Raccomandazioni ISRM

Premessa alla traduzione dei Metodi Suggeriti dall'ISRM per l'esecuzione di indagini sismiche all'interno e tra fori

Le tecniche d'indagine di tipo sismico vengono da anni ampiamente utilizzate per la caratterizzazione degli ammassi rocciosi. In particolare, a complemento delle tecniche di rilievo dalla superficie quali i metodi a rifrazione e riflessione, la disponibilità di fori di perforazione amplia notevolmente le potenzialità di tali metodologie in quanto consente di ottenere informazioni di maggior dettaglio e con un grado di accuratezza molto più elevato.

I Metodi suggeriti dall'ISRM si riferiscono alle tre tecniche d'indagine più usate per rilievi all'interno di singoli fori e tra fori, vale a dire *downhole/uphole*, *crosshole* e tomografia.

Le prime due sono le più note e diffuse, la terza viene sempre più largamente impiegata per il notevole salto di qualità che ha portato nella descrizione delle caratteristiche dei materiali indagati. Ciò è potuto avvenire grazie alla disponibilità di mezzi di calcolo sempre più potenti, ma di costo sempre più contenuto.

Questo documento ISRM, edito nel 1988, rappresenta una efficace e completa guida per l'esecuzione di ognuna delle tecniche citate; le strumentazioni indicate e le modalità operative descritte sono le medesime di quelle attualmente in uso. Appaiono solo un po' datati, anche se tuttora idonei, i sistemi di acquisizione dei dati, in quanto proprio in questo settore la tecnologia ha compiuto grandi progressi.

Si rammenta infine che i suggerimenti e le indicazioni forniti nel presente documento sono validi non solo per la caratterizzazione di ammassi rocciosi ma anche per la caratterizzazione di terreni e di manufatti in muratura e calcestruzzo.

Il curatore della traduzione
Sabino Superbo

Avviso ai lettori

Da questo numero della RIG, anche se la rubrica Raccomandazioni ISRM manterrà invariato il suo nome, nel titolo di ciascuna traduzione verrà utilizzata la dizione "Metodo suggerito per..." che meglio risponde alla dizione inglese "Suggested method...". Questo cambiamento deriva dal fatto che nei più recenti documenti ISRM i redattori hanno tenuto a ribadire che le metodologie di prova proposte costituiscono dei suggerimenti per chi voglia eseguire il tipo di prova illustrato nel documento ISRM.

Non si è ritenuto opportuno, invece, cambiare il titolo della rubrica, più che altro per non interrompere la continuità con i numeri precedenti e togliere un riferimento ormai quinquennale ai lettori.

Renato Ribacchi e Paolo Tommasi

Metodi suggeriti per l'esecuzione di indagini sismiche all'interno e tra fori

Terminologia

Onda P: L'onda P è un'onda longitudinale ed è anche chiamata onda di compressione. La direzione del moto delle particelle coincide con quella della propagazione dell'onda. La velocità di propagazione di un'onda P è superiore a quella di un'onda S.

Onda S: L'onda S è un'onda trasversale ed è anche chiamata onda di taglio. Il moto delle particelle in un'onda S è nel piano perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda. Un'onda S può essere classificata in due tipi (onda SH e onda SV) in relazione al moto delle particelle.

Onda SH: Il moto delle particelle di un'onda SH è nel piano perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda ed in direzione parallela a quella dell'interfaccia che è normalmente costituita dalla superficie del terreno.

Onda SV: Il moto delle particelle di un'onda SV è nel piano perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda ed in direzione perpendicolare a quella del moto delle particelle delle onde SH.

Q: Il fattore di qualità (*Q*) è un fattore adimensionale che indica il grado di attenuazione di onde o di vibrazioni[1].

Parte 1: Introduzione Tecnica

Il metodo sismico è uno dei più pratici e convenienti per ottenere sia una mappa stratigrafica che informazioni riguardo le caratteristiche geologiche e le proprietà meccaniche del terreno. Tutto ciò viene dedotto dalle velocità di propagazione e dalle attenuazioni delle onde elastiche. Le velocità, le attenuazioni e le forme d'onda di onde che si propagano possono essere usate come indici di importanti caratteristiche *in situ* di rocce e terreni, che non sono solo le proprietà meccaniche medie, ma anche la loro struttura, il grado di alterazione, ecc.

Nell'ipotesi che il terreno abbia un comportamento elastico, perlomeno alle piccole deformazioni determinate da un'onda sismica che si propaga, dalle velocità sismiche osservate e dai valori di densità misurati si possono calcolare costanti elastiche quali il modulo di Young ed il coefficiente di Poisson. Queste costanti sono denominati "parametri elastici dinamici". Le misure effettuate sul campo, che sono state numerose negli ultimi decenni, dimostrano che il modulo elastico dinamico è sempre più grande del modulo di deformabilità statico determinato mediante prove di carico su piastra, prove dilatometriche o altre prove cosiddette "statiche"[1]. La difformità tra "costanti" statiche e dinamiche è legata a differenze nella velocità di deformazione, nei livelli di deformazione e nella diversa risposta dei giunti rocciosi ai carichi dinamici rispetto a quelli statici. Differenze nella qualità della roccia hanno un significativo effetto sul rapporto tra modulo statico e dinamico che, per principio, è vicino ad 1.0 quando la roccia è esente da difetti, ma aumenta mano a mano che la qualità dell'ammasso roccioso diventa più scadente.

L'introduzione di severe specifiche di sicurezza per edifici e servizi, sia di superficie che sotteranei, e gli sviluppi dell'ingegneria sismica hanno prodotto, negli ultimi anni, una crescente richiesta di prove di tipo sismico. Queste applicazioni richiedono che la velocità delle onde venga misurata con un'elevata precisione, allo scopo di contribuire alla definizione di complesse strutture geologiche sepolte ed della distribuzione e caratterizzazione di piccole faglie e giunti, oltre che delle condizioni sia dei riempimenti dei giunti che degli stessi materiali rocciosi.

Il metodo sismico a rifrazione, che è impiegato da moltissimi anni, non può essere usato con successo quando una roccia con un'elevata velocità ricopre materiali con velocità più bassa, né quando sono presenti molti strati a velocità differente. Inoltre vi è spesso un limite nella precisione dei valori di velocità determinati con questa tecnica.

Le misure della velocità delle onde di compressione (P) e di taglio (S), sia in fori che in superficie, sono divenute di uso diffuso per superare tali problemi.

Misure combinate di onde P ed S in perforazioni sono impiegate da circa 20 anni. Mediante queste misure le velocità di propagazione possono essere determinate attraverso i tempi di arrivo delle onde P ed S che percorrono il tragitto tra una sorgente ed uno o più ricevitori le cui distanze sono note.

[1] I numeri si riferiscono alle Note poste alla fine del testo principale.

In molte aree urbane è necessario determinare le proprietà dinamiche dei terreni per avere dati di ingresso per la soluzione di diversi problemi di ingegneria sismica.

Le prove sismiche in e tra fori vengono ora usate largamente per queste applicazioni. Sono anche state applicate per l'investigazione di terreni per la costruzione di centrali nucleari, impianti di stoccaggio in caverna, sistemi di stoccaggio di rifiuti, grandi ponti ecc..

Per le misure sismiche sono disponibili tre metodi alternativi:

(a) generazione in superficie e ricezione in un foro, o viceversa;

(b) generazione e ricezione nel medesimo foro;

(c) generazione in un foro e ricezione in uno o più fori adiacenti.

Una caratteristica comune dei tre metodi è che l'informazione può essere desunta dai tempi di percorso e dalle forme d'onda di onde che si propagano dal punto di scoppio a quello di ricezione; in questo modo è possibile ottenere informazioni quali velocità delle onde, impedenza acustica e caratteristiche di attenuazione.

Il primo dei metodi sopra citati è anche chiamato metodo sismico "*well shooting*" o "*downhole*" o "*uphole*". È comunemente impiegato per la determinazione di strutture e caratteristiche di rocce nelle immediate vicinanze di un foro. La profondità di indagine che può essere ottenuta con questo metodo è limitata dall'energia della sorgente sismica. Recentemente, usando una potente sorgente di onde P ed S, con tale tecnica è stato possibile penetrare i terreni fino a profondità di 1000 m. Inoltre sono stati sviluppati metodi per estrarre onde selezionate dall'intera registrazione sismica (metodo del profilo sismico verticale o VSP) che danno risultati molto migliori, particolarmente quando sono combinati con le tecniche di sismica a riflessione.

Il secondo metodo, che può essere considerato una variazione del primo sebbene possa essere usato a qualsiasi profondità, riguarda misure con sorgente sismica e ricevitore posizionati nello stesso foro. Sia il primo che il secondo metodo sono compresi nella Parte 2 di questo documento *Raccomandazioni per l'Esecuzione di Rilievi Sismici in un Foro*. Il log sonico con una sonda è escluso da queste Raccomandazioni essendo stato descritto nelle *Raccomandazioni per l'Esecuzione di Logs Geofisici di Fori*[1].

Il terzo metodo richiede due o più fori. Le velocità di propagazione vengono misurate generando onde sismiche in un foro e ricevendo i loro arrivi in fori adiacenti. Questo è il metodo chiamato "*crosshole*" ed è descritto nella Parte 3. Teoricamente la profondità di investigazione è illimitata, ma in pratica la precisione è limitata dalla deviazione dei fori, nel caso di fori profondi. In tali casi sono richieste misure della deviazione dei fori molto precise.

Negli anni recenti sono state adottate procedure di misura mediante le quali attorno alle zone di terreno oggetto d'investigazione vengono posizionati molti punti di generazione e ricezione, allo scopo di ottenere un numero notevole di misure sismiche in direzioni varie. Questa tecnica della "tomografia sismica" è molto simile alle misure computerizzate di tomografia a raggi x, usata per ricostruire le immagini interne del corpo umano.

Nella tomografia sonica, descritta nella Parte 4, vengono eseguite numerose misure di onde sismiche con differenti percorsi dei raggi attraverso una data zona posta tra fori, cunicoli di prova o la superficie del terreno per determinare il profilo della distribuzione delle proprietà fisiche quali la velocità o l'attenuazione. Questo consente di ricostruire l'immagine della struttura interna dell'ammasso roccioso. Il metodo più avanzato e più comunemente usato è quello che fa uso dei tempi di primo arrivo delle registrazioni sismiche.

Tuttavia, in aggiunta, sono state proposte molte tecniche di tomografia che impiegano le ampiezze delle onde sismiche. Per esempio, sono stati eseguiti esperimenti per ricostruire l'immagine interna di un ammasso roccioso usando la distribuzione per trasparenza o la distribuzione dei valori di Q, ciascuno dei quali è legato alle caratteristiche di attenuazione sismica della roccia. Sono stati eseguiti anche tentativi di ricostruire le immagini interne separando le onde di diffrazione delle registrazioni sismiche. alcune di queste tecniche sono già in uso, mentre altre sono ancora allo stadio sperimentale.

I pregi relativi a ciascuna delle tecniche discusse nelle Raccomandazioni sono quelli descritti nel seguito.

Il vantaggio della prova sismica in foro è quello di essere una tecnica standard a buon mercato e rapida, con risultati che possono essere facilmente interpretati. Uno dei maggiori vantaggi di queste tecnica è quello di necessitare di un solo foro.

Le prove sismiche tra fori comportano lo spostamento sia della sorgente che del ricevitore in due o più fori differenti. Il vantaggio di questa tecnica è quello di investigare un grande volume di terreno posto tra i fori. Lo svantaggio è che sono necessari due fori, fatto che aumenta il costo di ciascun rilievo. Un altro inconveniente è quello che la posizione di un'area che mostra distinte differenze di velocità rispetto ad un'altra non viene delineata precisamente come nella tecnica della tomografia sismica.

Le prove di tomografia sismica costituiscono un tipo di rilievo complesso e costoso che dovrebbe essere impiegato quanto è la conoscenza precisa della qualità della roccia tra due fori è fondamentale. Questa è l'unica che può fornire una precisa distribuzione bidimensionale della velocità tra fori. Que-

sta immagine di velocità bidimensionale può essere interpretata in termini di distribuzione bidimensionale delle proprietà della roccia[2].

In conclusione, la più semplice delle tecniche sismiche in foro è anche la più a buon mercato. Con l'aumentare della complessità della tecnica, il costo aumenta così come il dettaglio delle informazioni ottenute. Deve essere adottata una grande attenzione per stabilire la tecnica più appropriata, che sia idonea per il progetto sia da un punto di vista tecnico che economico.

Parte 2: Metodi suggeriti per l'esecuzione di prove sismiche all'interno di un foro

Scopo

1. Lo scopo delle misure sismiche è, in generale, sia quello di individuare e rappresentare limiti stratigrafici che di determinare le caratteristiche sismiche e, di conseguenza, meccaniche di rocce singole o unità di terreno comprese tra questi limiti. Attraverso l'uso delle sole onde trasmesse non può essere invece efficacemente individuata l'orientazione di strutture geologiche. Questo può essere ottenuto con l'elaborazione delle riflessioni delle interfacce. La tecnica è nota nell'esplorazione sismica come VSP (Profili Sismici Verticali). Il VSP porta ad una notevole espansione della sismica in un solo foro; tuttavia questa tecnica non è compresa in questo documento.

2. La prova sismica in un foro consiste nel misurare il tempo di percorso delle onde P ed S e la distanza tra una sorgente ed i ricevitori, lungo le pareti di un singolo foro, in modo da determinare la distribuzione della velocità delle onde elastiche nella direzione del foro. Possono essere anche stimate le caratteristiche di attenuazione delle onde P ed S misurando le ampiezze delle onde sismiche.

3. Questo metodo è classificabile secondo due alternative in relazione alla disposizione della sorgente sismica e del ricevitore, così come mostrato in fig. 2.1.

(a) Nel "metodo *downhole*", la sorgente sismica è posizionata sulla superficie del terreno o della roccia o di una caverna sotterranea, mentre uno o più ricevitori vengono successivamente posizionati a differenti profondità in un foro.

(b) Nel "metodo *uphole*", uno o più ricevitori sono piazzati sulla superficie del terreno o della roccia o di una caverna sotterranea e la sorgente viene successivamente posizionata a differenti profondità in un foro. Occasionalmente nello stesso foro, al di sopra della sorgente, vengono posti uno o più ricevitori e la sorgente e il (i) ricevitore (i) vengono entrambi spostati

4. Note le velocità delle onde P ed S e la densità dell'ammasso roccioso, possono essere calcolate le proprietà dinamiche della roccia.

5. Le variazioni delle velocità delle onde P ed S forniscono un indice delle proprietà fisiche e meccaniche e del grado di alterazione, fratturazione e fessurazione dell'ammasso roccioso circostante il foro. Inoltre dall'ampiezza e dallo spettro delle forme d'onda delle onde P ed S è possibile ottenere le caratteristiche di attenuazione delle rocce.

Strumentazione

6. Per generare il tipo di onda richiesta viene scelta una sorgente sismica o di tipo esplosivo o un dispositivo di tipo meccanico. In Fig. 2.2.[3] vengono mostrate differenti alternative di sorgenti sia superficiali che da foro.

7. Il ricevitore sismico può essere uno dei seguenti tre tipi:

(a) Un geofono, che genera una tensione direttamente proporzionale alla velocità delle particelle delle onde sismiche. Il campo di frequenze più adatto è tra 10Hz e 2kHz. La frequenza naturale del geofono deve essere meno della metà della frequenza predominante delle onde sismiche.

(b) Un accelerometro piezoelettrico, che genera una tensione direttamente proporzionale all'accelerazione delle particelle delle onde sismiche. Il campo di frequenza più adatto è tra 10 Hz e 60 kHz. La frequenza naturale dell'accelerometro piezoelettrico deve essere almeno il doppio della frequenza predominante delle onde sismiche.

(c) Un idrofono, che genera una tensione direttamente proporzionale alla pressione nell'acqua circostante ad esso, accettabile solo in fori pieni d'acqua. La frequenza più adatta è nel campo da 10 Hz a 60 kHz.

8. Per facilitare l'identificazione delle onde, quando si utilizzano geofoni o accelerometri piezoelettrici, ciascuna unità di ricezione dovrebbe consistere di almeno tre ricevitori, disposti ortogonalmente tra loro per formare un dispositivo triassiale; vale a dire un ricevitore verticale e due ricevitori orizzontali montati ad angolo retto.

9. Sia la sorgente sismica che il ricevitore devono avere sensibilità e risposta in frequenza idonei per lo scopo dell'investigazione. Una banda di frequenza tipica per spari in foro è 10-500 Hz. Per studi di maggior dettaglio sono richieste frequenze più elevate.

10. Attrezzature per bloccare la sorgente sismica ed i ricevitori nei fori e per misurare profondità, direzione ed inclinazione dei fori stessi ed anche la posizione della sorgente e dei ricevitori.

11. Un sistema di acquisizione dei dati, mostrato a titolo di esempio in Fig. 2.3, deve includere i seguenti componenti:

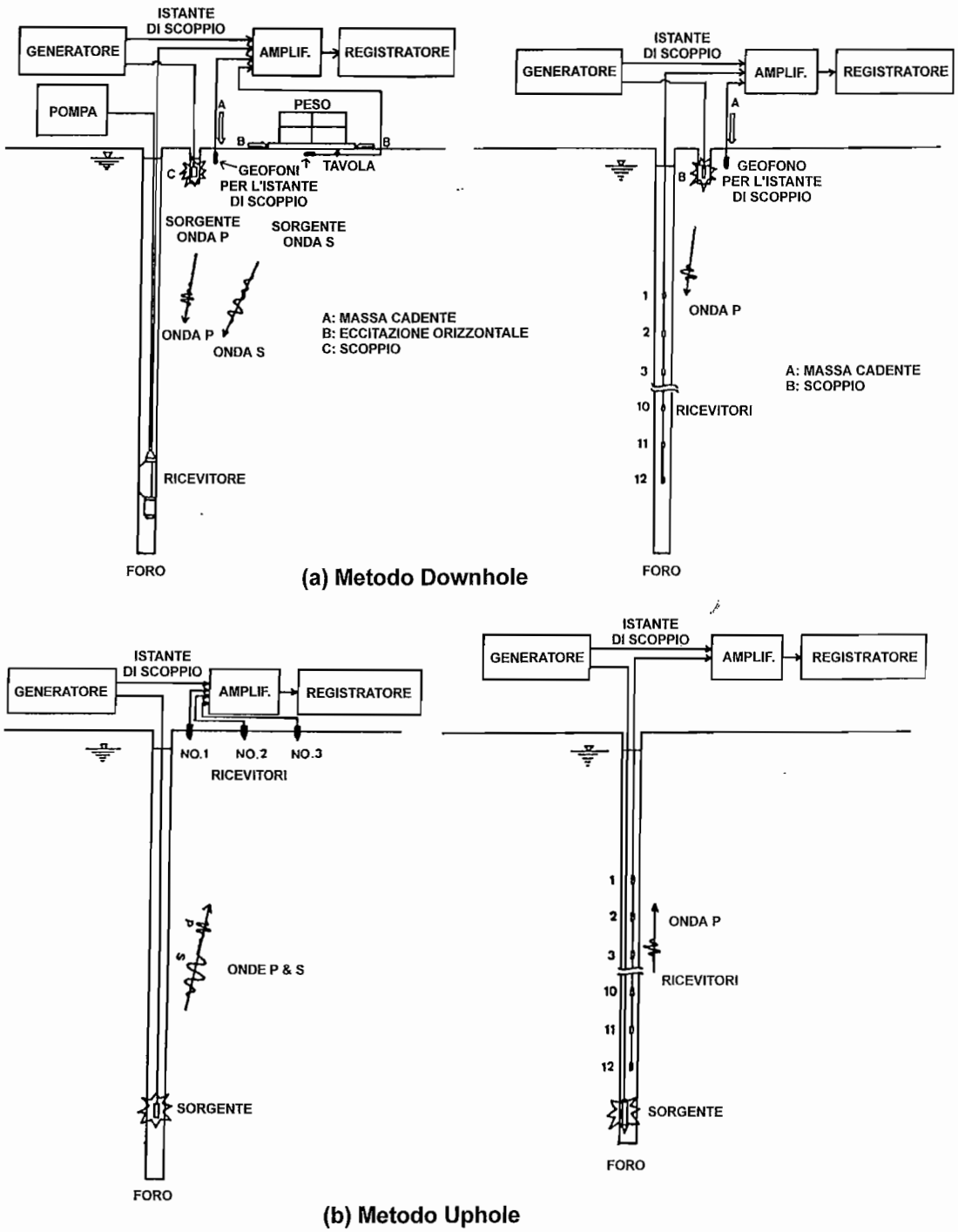

Fig. 2.1 – Misure sismiche all'interno di un foro. (a) Metodo "*downhole*". (b) Metodo "*uphole*".

(a) Un amplificatore, scelto per adattarsi al tipo di ricevitore usato. Il guadagno massimo di un amplificatore è normalmente di 70-130 dB[4].

(b) Una strumentazione a miglioramento di segnale, quando si opera in un'area "rumorosa" e/o in fori profondi, allo scopo di migliorare il rapporto segnale/disturbo della registrazione[5]. L'impiego di sistemi di acquisizione dati ad alta risoluzione dotati di funzione di miglioramento del segnale è fortemente raccomandato.

(c) Un sistema di temporizzazione per avere un preciso riferimento di tempo. L'intervallo tra i riferimenti è normalmente 0.1, 1 o 10 ms, in funzione delle dimensioni dell'area da investigare.

(d) Un'unità di istante di scoppio, per avere direttamente sulla registrazione il segnale di inizio all'istante della generazione delle onde. Il segnale di istante di scoppio deve essere registrato su un canale separato e non sovrapposto al segnale sismico. Quando viene impiegato esplosivo, per ottenere il

Fig. 2.2 – Sorgenti sismiche per misure sismiche all'interno di un foro.

	sorgenti di superficie	sorgenti in foro
onde P	esplosivo, mazza, massa cadente, ecc.	esplosivo cannone ad aria, sparker, martello, ecc.
onde SH	martello su tavola, cannone per SH, vibratore orizzontale, ecc.	martello ad azione orizzontale vibratore
onde SV	mazza massa cadente	esplosivo, cannone ad aria, sparker, martello, vibratore, ecc.

segnale di istante di scoppio sono usati le corrente di sparo, la rottura di un filo (avvolto sul detonatore) o un contatto (attraverso il plasma generato dall'esplosione), ma per gli altri tipi di sorgente sismica il segnale è ottenuto mediante un sensore o un segnale elettrico, per le sorgenti controllate elettronicamente[6].

(e) Un registratore, per avere una registrazione visiva, analogica o digitale delle onde sismiche per ciascun ricevitore[7]. Il più diffuso sistema per ottenere una copia fotostatica della registrazione visiva è costituto da un oscilloscopio elettromagnetico.

Procedura di prova

12. (a) I fori devono essere perforati nella posizione più adatta in funzione della topografia e della geologia del sito. Normalmente le misure vengono eseguite in fori non rivestiti[8].

(b) Devono essere misurate profondità, direzione e deviazione del foro per determinare le coordinate delle posizioni del ricevitore o della sorgente. La precisione del rilievo deve essere stabilita in funzione dello scopo delle misure.

13. (a) Con il metodo downhole devono essere installati nel foro, alla profondità richiesta, un singolo ricevitore o un dispositivo di ricevitori multipli, mentre la sorgente sismica viene posizionata in superficie o in un foro supplementare vicino a quello principale in modo da migliorare l'accoppiamento tra sorgente e terreno ed evitare l'effetto di strati superficiali estremamente aerati, incoerenti o fratturati. I ricevitori devono essere tenuti in saldo contatto con le pareti del foro; eccetto che per misure in fori pieni d'acqua, nel qual caso può essere usato un ricevitore del tipo a sospensione.

(b) Dopo ogni nuovo posizionamento del ricevitore del foro vengono generate le onde sismiche ed eseguite le misure. Quando si misurano le onde S con il metodo downhole, è fortemente raccomandata la generazione e la ricezione di onde del tipo SH [10].

(c) La distanza tra le misure corrisponde all'intervallo di riposizionamento del ricevitore, o la spaziatura tra i geofoni di un sistema di ricevitori multipli nel foro (Fig. 2.1a). Generalmente l'intervallo è scelto in funzione della precisione e della efficienza richiesta per le misure di velocità, ed è generalmente compreso nel campo $0.5 \div 5$ m.

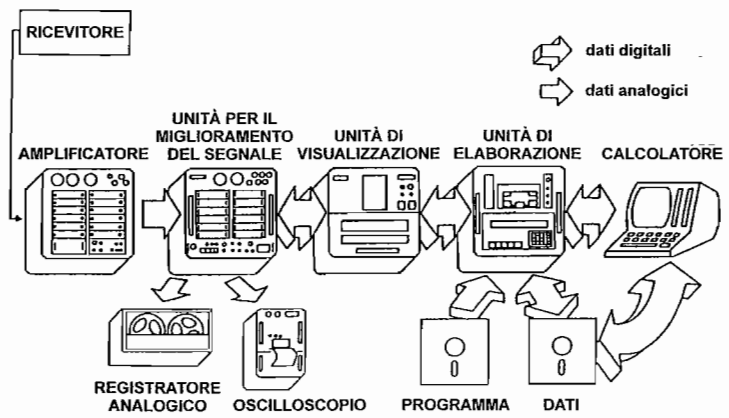

Fig. 2.3 – Esempio di sistema di acquisizione.

14. (a) Con il metodo uphole, d'altra parte, la sorgente sismica viene posizionata nel foro ed i ricevitori disposti in superficie vicino al foro o nello stesso foro al di sopra della sorgente sismica [11]. Il ricevitore può essere installato in un foro superficiale supplementare perforato vicino al principale in modo da evitare l'influenza di strati superficiali estremamente alterati, allentati o fratturati.

(b) Dopo ogni riposizionamento della sorgente sismica (o della sorgente e dei ricevitori se sono nello stesso foro) vengono eseguite la generazione e la misura delle onde sismiche, mantenendo il dispositivo di cui sopra.

(c) Per ottenere una buona registrazione delle onde SV è necessario piazzare il ricevitore in superficie in una posizione adatta in considerazione dello spettro di radiazione delle onde SV.[12].

(d) La distanza tra le misure corrisponde all'intervallo di riposizionamento della sorgente sismica o alla spaziatura di un sistema di geofoni multipli nel foro (Fig. 2.1b).
Generalmente tale intervallo viene determinato in funzione della precisione e della efficienza richiesta per le misure di velocità, ed è normalmente compreso nel campo 0.5 - 5 m.

15. I segnali provenienti dai ricevitori devono essere registrati su un supporto magnetico o visualizzati su un registratore con display. L'ampiezza del segnale e la scala dei tempi devono essere adeguate per consentire la lettura delle registrazioni con la precisione richiesta [13]. È fortemente raccomandata la registrazione su nastro magnetico o disco.

Elaborazione ed interpretazione dei risultati

16. (a) I tempi di percorso delle onde P ed S dalla sorgente al ricevitore devono essere determinati misurando il tempo dall'istante di scoppio alla prima riflessione sulla registrazione. Per le onde S deve anche essere misurato il tempo di percorso della fase predominante delle onde S.

(b) Deve essere disegnata una dromocrona (rappresentando i tempi di primo arrivo in funzione della distanza di misura).

(c) Dalle dromocrone si ottengono le velocità di propagazione delle onde P ed S come inverso della pendenza della linea retta che meglio si adatta ai punti entro il campo di interesse [14].

(d) Rappresentando l'andamento delle velocità di propagazione lungo il foro, le velocità sismiche possono essere correlate alle condizioni geologiche della roccia ottenute dalla perforazione.

(e) Dalle velocità delle onde P ed S e dalla densità del corrispondente ammasso roccioso possono essere ottenuti i seguenti parametri elastici dinamici usando le equazioni (2.1)-(2.4) [15].
Coefficiente di Poisson dinamico ν_d:

$$\nu_d = \frac{1}{2} \cdot \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{(V_p/V_s)^2 - 1} \qquad (2.1)$$

Modulo dinamico di rigidezza G_d:

$$G_d = \rho V_s^2 = E_d/(2 + 2\nu_d) \cdot \qquad (2.2)$$

Modulo dinamico di deformabilità volumetrica K_d:

$$K_d = \rho (V_p^2 - 4V_s^2/3) = E_d/(3 - 6\nu_d) \qquad (2.3)$$

Modulo di Young dinamico E_d:

$$E_d = \rho V_s^2 \frac{3(V_p/V_s)^2 - 4}{(V_p/V_s)^2 - 1} = \rho V_p^2 (1+\nu_d)(1-2\nu_d)/(1-\nu_d) \qquad (2.4)$$

dove ρ indica la densità delle roccia (kg/m^3), V_p, la velocità delle onde P (m/s), V_s, la velocità delle onde S (m/s). I moduli elastici dinamici sono espressi in Pascal, o più spesso in megapascal o gigapascal (1 megapascal (MPa)=10^6 pascal e 1 gigapascal (GPa)=10^9 pascal). Il coefficiente di Poisson è adimensionale.

(f) Misurando l'ampiezza delle onde P ed S con un idoneo sistema attraverso le variazioni dei loro spettri di ampiezza [2, 3] può essere calcolato il fattore Q (fattore di qualità), una misura di attenuazione dell'ammasso roccioso.

(g) Confrontando le velocità così ottenute con quelle misurate sui provini[16] possono esser valutate le proprietà dell'ammasso roccioso.

Relazione sui risultati

17. La relazione dovrà contenere quanto segue:
(a) La posizione dei fori e la loro lunghezza, diametro, direzione ed inclinazione oltre alla posizione e dettagli riguardo ad eventuali rivestimenti e cementazione.

(b) Disegni che mostrino tutte le posizioni della sorgente sismica e dei ricevitori e le coordinate di tutti i punti

(c) Una descrizione e le specifiche dei metodi di misura e della strumentazione incluse le frequenze caratteristiche di ogni strumento usato. Può essere fatto riferimento a queste Raccomandazioni, evidenziando solo le differenze da queste procedure e le ragioni che le hanno causate.

(d) Le forme d'onda ottenute a ciascuna profondità e le curve tempo-distanza (dromocrone) come mostrato nelle Fig. 2.4 e 2.5.

(e) I logs di perforazione ed il diagramma di distribuzione della velocità (per esempio Fig. 2.6).

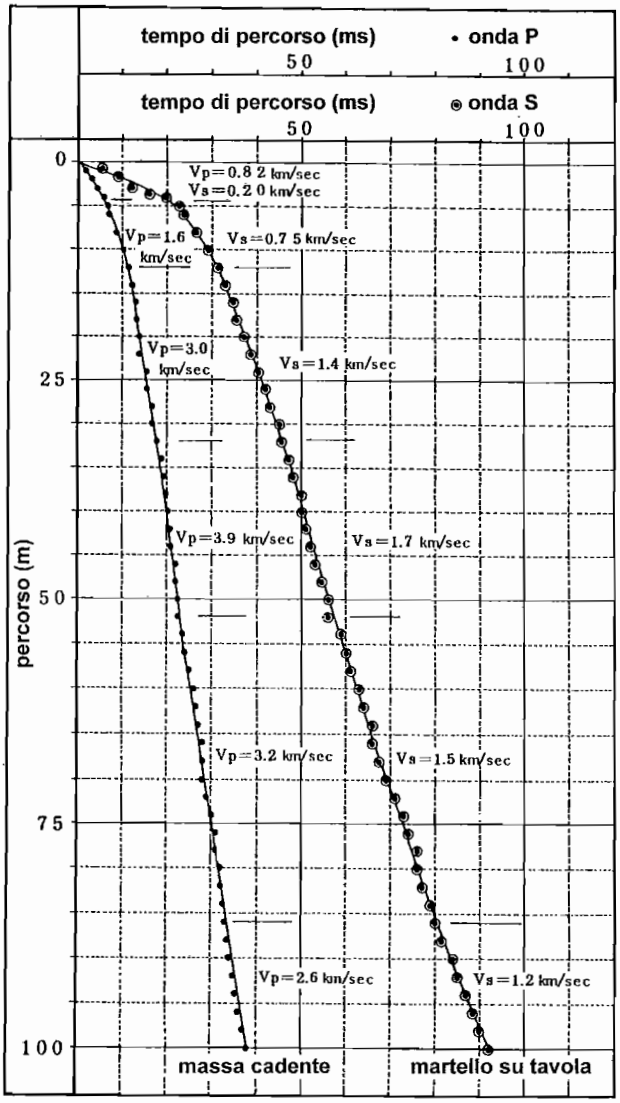

Fig. 2.4 – Esempio di curve tempo-distanza (dromocrone).

(f) La tabella dei valori dei moduli elastici calcolati.

(g) Una descrizione di ogni equazione usata in aggiunta a quelle riportate in queste Raccomandazioni, insieme ad una definizione di ogni assunzione usata nell'analisi.

(h) Quando richiesto, l'interpretazione geotecnica dei risultati delle misure, tenendo in considerazione le condizioni geologiche dell'area in esame.

Parte 3: Metodi suggeriti per l'esecuzione di prove sismiche tra fori

Scopo

1. Lo scopo delle misure sismiche è, in generale, quello di individuare e mappare limiti stratigrafici o di determinare le caratteristiche sismiche e, di conseguenza, meccaniche, di rocce o di unità di terreno comprese tra questi limiti.

2. Questo metodo è chiamato metodo sismico "*crosshole*"[4]. Attraverso i tempi di percorso delle onde P ed S e le distanze tra la sorgente e numerosi ricevitori si misura la distribuzione della velocità dell'ammasso roccioso tra i fori. Sia la sorgente che i ricevitori sono posizionati in fori di sondaggio. Un vantaggio del metodo è quello di evitare lo strato alterato della roccia, che tende ad essere fortemente assorbente.

3. Note le velocità delle onde P ed S e la densità dell'ammasso roccioso, possono essere calcolate le proprietà dinamiche della roccia.

4. Le variazioni delle velocità delle onde P ed S possono fornire un indice delle proprietà fisiche e meccaniche e del grado di alterazione, fratturazione e fessurazione dell'ammasso roccioso posto tra i fori.

Inoltre, quando più di due fori di ricezione sono posti nello stesso piano, dall'ampiezza e dallo spettro delle forme d'onda delle onde P ed S, ammesso che non siano presenti fenomeni di rifrazione delle stesse, possono essere ottenute le caratteristiche di attenuazione della roccia.

Strumentazione

5. Per generare il tipo di onde richiesto viene scelta una sorgente di tipo esplosivo o un dispositivo meccanico o elettrico[17]. La figura 3.1 mostra sorgenti sismiche alternative usate per le misure *crosshole*[3].

6. Il ricevitore sismico può essere uno dei seguenti tre tipi:

(a) Un geofono, che genera una tensione direttamente proporzionale alla velocità delle particelle delle onde sismiche. Il campo di frequenze più adatto è da 10Hz a 2kHz. La frequenza naturale del geofono deve essere meno della metà della frequenza predominante delle onde sismiche.

(b) Un accelerometro piezoelettrico, che genera una tensione direttamente proporzionale all'accelerazione delle particelle delle onde sismiche. Il campo di frequenza più adatto è da 10 Hz a 60 kHz. La frequenza naturale dell'accelerometro piezoelettrico deve essere almeno il doppio della frequenza predominante delle onde sismiche.

(c) Un idrofono, che genera una tensione direttamente proporzionale alla pressione nell'acqua circostante ad esso, accettabile solo in fori pieni d'acqua. La frequenza più adatta è nel campo da 10 Hz a 60 kHz.

7. Per facilitare l'identificazione delle onde quando si utilizzano geofoni o accelerometri piezoelettrici, ciascuna unità di ricezione dovrebbe consistere di almeno tre ricevitori, disposti ortogonalmente tra loro per formare un *array* triassiale; vale a

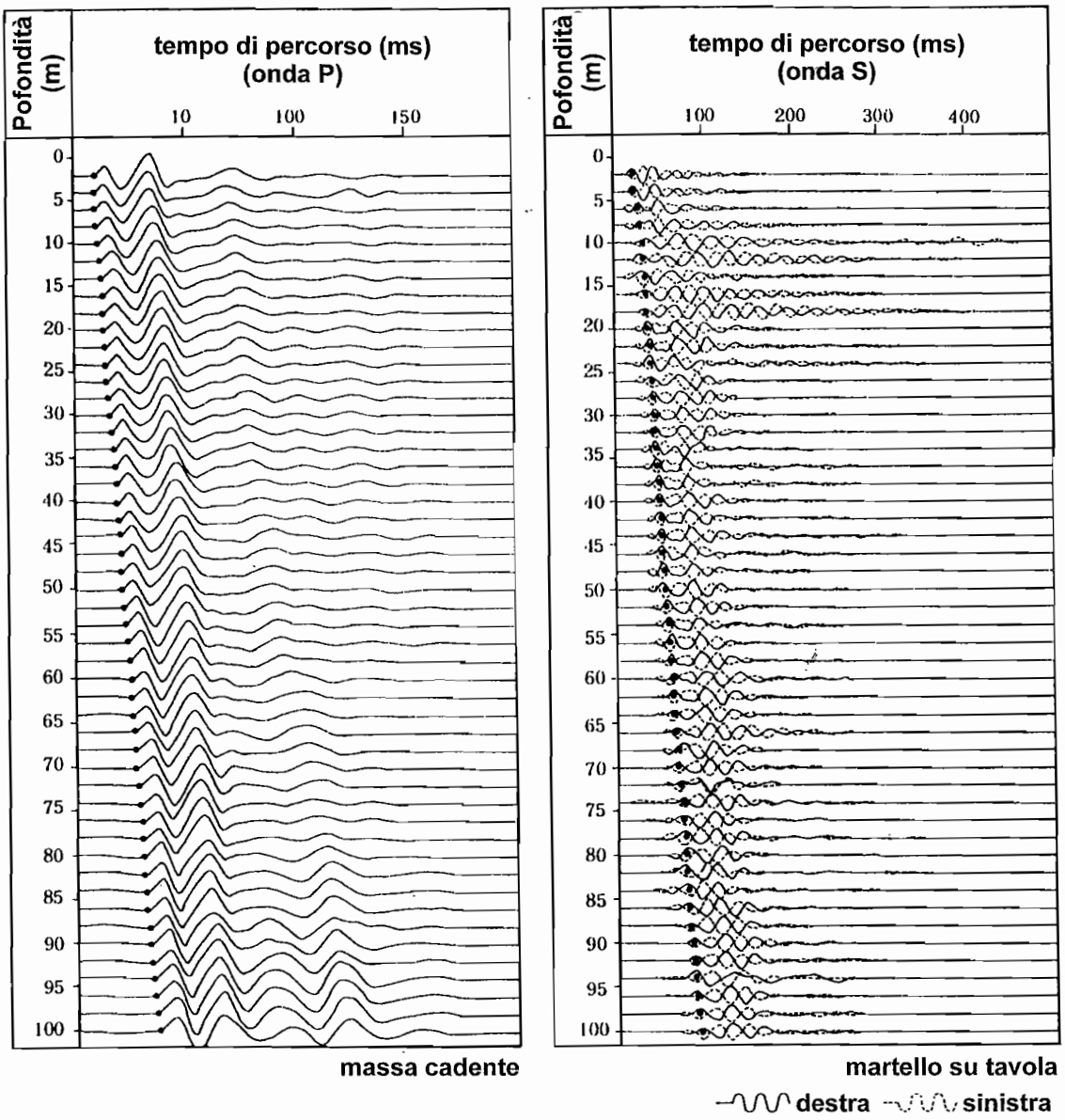

Fig. 2.5 – Esempio di registrazioni sismiche.

dire un ricevitore verticale e due ricevitori orizzontali montati ad angolo retto.

8. Sia la sorgente sismica che il ricevitore devono avere sensibilità e risposta in frequenza idonei per lo scopo dell'investigazione. Una banda di frequenza tipica per misure cross hole generiche è 10 Hz -2 kHz. Per studi di maggior dettaglio sono richieste frequenze più elevate.

9. Attrezzature per posizionare la sorgente sismica ed i ricevitori nei fori e per misurare distanza, profondità, direzione ed inclinazione dei fori stessi ed anche la posizione della sorgente e dei ricevitori.

10. Un sistema di acquisizione dei dati, mostrato a titolo di esempio in Fig. 3.2, deve includere i seguenti componenti:

(a) Un amplificatore, scelto per adattarsi al tipo di ricevitore usato. Il guadagno massimo di un amplificatore è normalmente di 70-130 dB[4].

(b) Una strumentazione di incremento del segnale, quando si opera in un'area "rumorosa" e/o nel caso di una notevole distanza tra i fori, allo scopo di migliorare il rapporto segnale/disturbo della registrazione[5]. È fortemente raccomandato l'impiego di sistemi di acquisizione dati digitali ad alta risoluzione, dotati di funzione di miglioramento del segnale.

(c) Un sistema di temporizzazione per avere un preciso riferimento di tempo. L'intervallo tra i riferimenti è normalmente 0.1, 1 o 10 ms, in funzione delle dimensioni dell'area da investigare.

(d) Un'unità di istante di scoppio, per segnare direttamente sulla registrazione l'istante della generazione delle onde. Il segnale di istante di scoppio deve essere registrato su un canale separato e non sovrapposto al segnale sismico. Quando viene impiegato esplosivo, per ottenere il segnale di

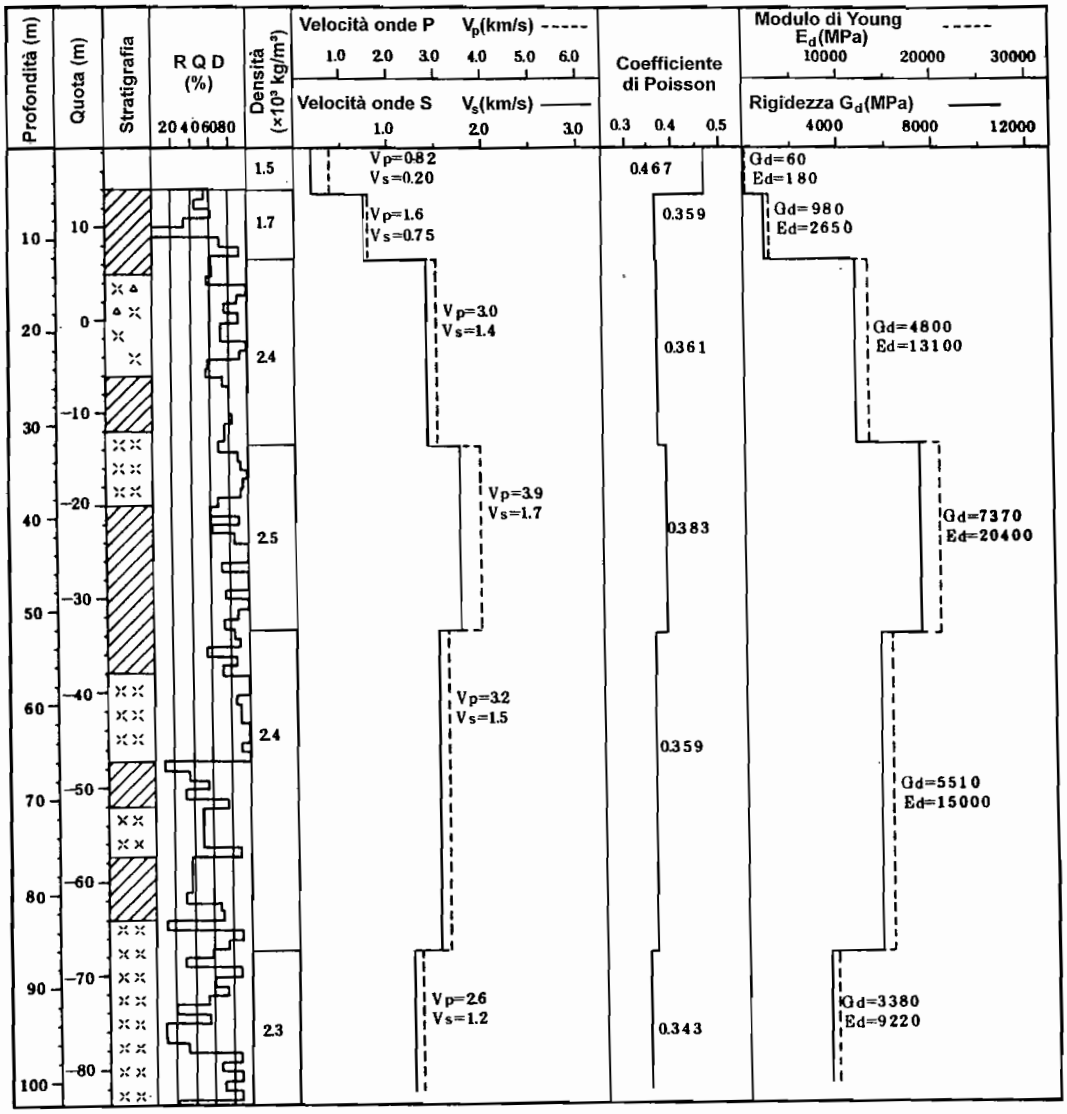

Fig. 2.6 – Esempio di stratigrafia e distribuzione di velocità ottenuto con misure sismiche all'interno di un foro.

istante di scoppio sono usati le corrente di sparo, la rottura di un filo (avvolto sul detonatore) o un contatto (attraverso il plasma generato dall'esplosione), ma per gli altri tipi di sorgente sismica il segnale è ottenuto mediante un sensore o un segnale elettrico, per le sorgenti controllate elettronicamente[6].

(e) Un registratore, per avere una registrazione visiva, analogica o digitale delle onde sismiche per ciascun ricevitore[7]. Il più diffuso sistema per ottenere una copia della registrazione visiva è costituto da un oscilloscopio elettromagnetico.

Procedura di prova

11. (a) I fori devono essere perforati nella posizione più adatta in funzione della topografia e della geologia del sito. Normalmente le misure vengono eseguite in fori non rivestiti[8].

(b) Il numero e la distanza tra i fori devono essere stabiliti in base agli scopi del progetto, così da ottenere i migliori risultati.

Aumentando la distanza tra i fori aumenta la probabilità di misurare onde rifratte piuttosto che onde dirette[19].

Fig. 3.1 – Sorgenti sismiche per misure sismiche tra fori.

sorgente di onde P	cannone ad aria, esplosivo, sparker, martello fondo-foro, vibratore piezoelettrico, sorgente magnetostrittiva, ecc.
sorgente di onde SH	martello fondo-foro, vibratore piezoelettrico, ecc.
sorgente di onde SV	esplosivo, sparker, martello di fondo-foro, vibratore piezoelettrico, sorgente magnetostrittiva, ecc.

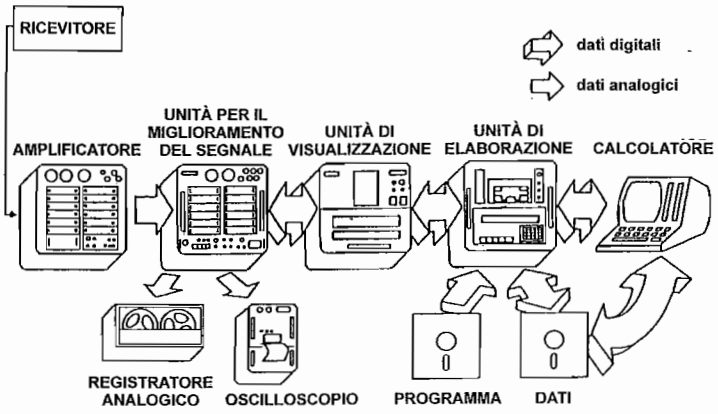

Fig. 3.2 – Esempio di sistema di acquisizione.

(c) Devono essere misurate profondità, direzione e deviazione di ciascun foro per determinare le coordinate delle posizioni del ricevitore o della sorgente. La precisione del rilievo deve essere stabilita in funzione dello scopo delle misure.

12. (a) La sorgente sismica deve essere installata in uno dei fori, mentre un ricevitore o un dispositivo di ricevitori multipli è installato negli altri fori alla profondità richiesta.

I ricevitori devono essere tenuti in fermo contatto con le pareti del foro[9], eccetto per i fori pieni d'acqua, nei quali può essere usato un ricevitore del tipo a sospensione..

(b) Dopo ogni nuovo posizionamento della sorgente e del ricevitore, o del dispositivo di ricevitori multipli, vengono generate le onde sismiche ed eseguite le misure.

(c) L'intervallo di distanza tra le misure corrisponde all'intervallo di riposizionamento della sorgente e/o dei ricevitori, o la spaziatura tra i geofoni di un sistema di ricevitori multipli nel foro (Fig. 3.3). Generalmente l'intervallo è scelto in funzione della precisione e della efficienza richiesta per le misure di velocità, ed è generalmente compreso nel campo 0.5 - 5 m.

13. I segnali provenienti dai ricevitori devono essere registrati su un supporto magnetico o visualizzati su un registratore con display. L'ampiezza del segnale e la scala dei tempi deve essere adeguata per consentire la lettura delle registrazioni con la precisione richiesta[13]. È fortemente raccomandata la registrazione su nastro magnetico o disco.

Elaborazione ed interpretazione dei risultati

14 (a) I tempi di percorso delle onde P ed S dalla sorgente a ciascun ricevitore devono essere determinati misurando il tempo dall'istante di scoppio alla prima deflessione sulla registrazione. Quando due o più ricevitori sono posizionati lungo lo stesso percorso, il tempo di percorso delle onde P ed S tra i due ricevitori deve essere determinato misurando il tempo intercorso tra l'istante di scoppio e ciascuna registrazione. Per le onde S deve anche essere misurato il tempo di percorso della fase predominante delle onde S.

(b) Sia per le onde P che per le onde S, per ottenere la "velocità media " tra il punto di sparo ed il punto di ricezione o tra due ricevitori, si divide la distanza tra la sorgente e ciascun ricevitore, o la distanza tra i due ricevitori quando questi sono disposti lungo lo stesso percorso, per il tempo di percorso.

(c) Viene poi rappresentata la distribuzione della velocità media tra i fori.

(d) Dalle velocità delle onde P ed S e dalla densità del corrispondente ammasso roccioso possono essere ottenuti i seguenti parametri elastici dinamici usando le equazioni (3.1 - 3.4)[15].

Rapporto di Poisson dinamico ν_d:

$$\nu_d = \frac{1}{2} \cdot \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{(V_p/V_s)^2 - 1} \qquad (3.1)$$

Modulo dinamico di rigidezza G_d:

(3.2)

Modulo dinamico di deformabilità volumetrica K_d::

$$K_d = \rho\,(V_p^2 - 4V_s^2/3) = E_d/(3 - 6\nu_d) \qquad (3.3)$$

Modulo di Young dinamico E_d:

$$E_d = \rho V_s^2 \frac{3(V_p/V_s)^2 - 4}{(V_p/V_s)^2 - 1} = \rho V_p^2 (1+\nu_d)(1-2\nu_d)/(1-\nu_d) \qquad (3.4)$$

dove ρ indica la densità delle roccia (kg/m^3), V_p, la velocità delle onde P (m/s), V_s, la velocità delle onde S (m/s). I moduli elastici dinamici sono espressi in Pascal, o più spesso in megapascal o gigapascal (1

megapascal (MPa)=10^6 pascal e 1 gigapascal (GPa)=10^9 pascal). Il coefficiente di Poisson è adimensionale.

(e) Quando l'ampiezza delle onde P ed S viene misurata con un sistema idoneo, attraverso le variazioni dei loro spettri di ampiezza [2, 3, 5] può essere calcolato il fattore Q (fattore di qualità), una misura di attenuazione dell'ammasso roccioso[21].

(f) Confrontando le velocità così ottenute con quelle misurate su provini[16] possono esser valutate le proprietà dell'ammasso roccioso.

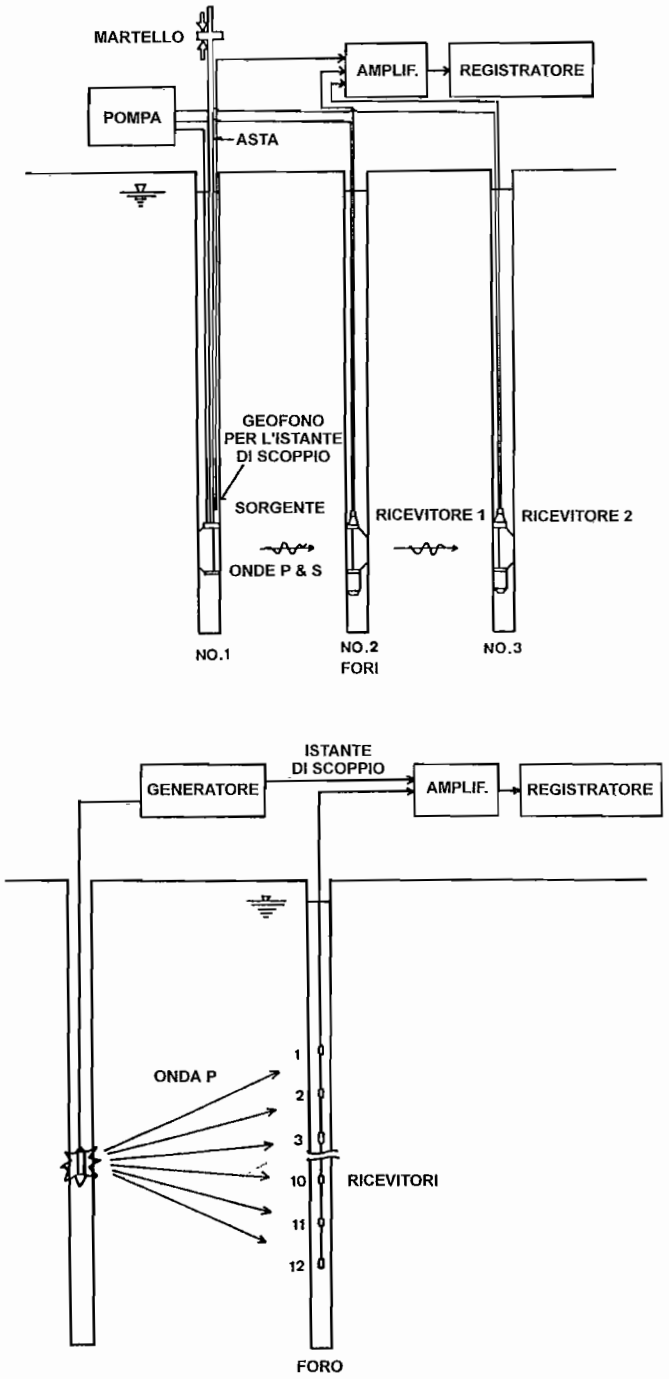

Fig. 3.3 – Misure sismiche tra fori.

Relazione sui risultati

17. Il rapporto dovrà contenere quanto segue:

(a) La posizione dei fori e la loro lunghezza, diametro, direzione ed inclinazione oltre alla posizione e dettagli riguardo ad eventuali rivestimenti e cementazione.

(b) Dei disegni che mostrino tutte le posizioni della sorgente sismica e dei ricevitori e le coordinate di tutti i punti

(c) Una descrizione e le specifiche dei metodi di misura e della strumentazione incluse le frequenze caratteristiche di ogni strumento usato. Può essere fatto riferimento a questi Metodi Suggeriti, evidenziando solo le differenze da queste procedure e le ragioni che le hanno causate.

(d) Forme d'onda ottenute per ogni posizione della sorgente e del ricevitore.

(e) Le velocità di propagazione medie calcolate tra i punti di scoppio e quelli di ricezione (per esempio Fig. 3.4) e anche tra coppie di fori, quando vengono usati fori di ricezione multipli disposti sullo stesso piano.

(f) La tabella dei valori dei moduli elastici calcolati.

(g) Una descrizione di ogni equazione usata in aggiunta a quelle riportate in questi Metodi Suggeriti, insieme ad una definizione di ogni assunzione usata nell'analisi.

(h) Quando richiesto, una interpretazione geotecnica dei risultati delle misure, tenendo conto delle condizioni geologiche dell'area di prova.

Parte 4: Metodi Suggeriti per la Tomografia Sismica

Scopo

1. La tomografia sismica ricostruisce una immagine della struttura interna del terreno mediante l'impiego dei tempi di percorso o le ampiezze di onde sismiche che si propagano attraverso una data sezione determinata da fori, cunicoli di prova o la superficie del terreno.

2. Il suo scopo è di determinare un dettagliato andamento della distribuzione di una proprietà fisica quale la velocità o l'attenuazione dell'ammasso roccioso.

3. Nella tomografia sismica sono richieste numerose misure delle onde sismiche lungo differenti percorsi. Per ottenere ciò attorno alla zona di terreno in esame vengono disposti numerosi punti di generazione e ricezione[22].

4. Per l'analisi dei dati di tomografia sismica possono essere anche applicati numerosi algoritmi di ricostruzione sviluppati nel campo della tomografia medica computerizzata a raggi X (CT). Tutta-

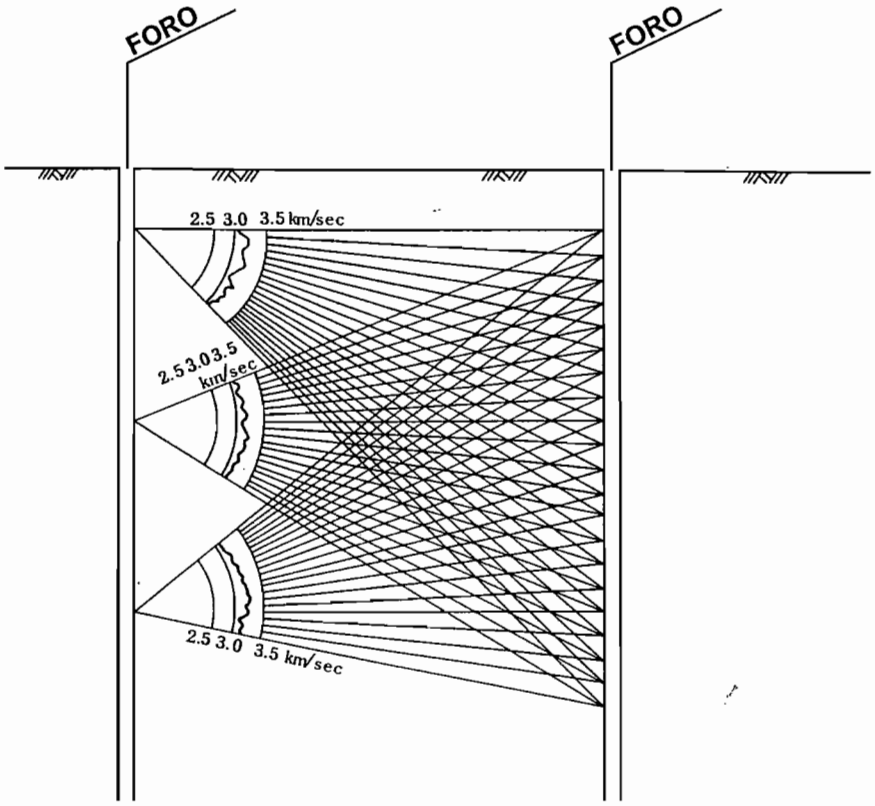

Fig. 3.4 – Diagramma schematico di misure sismiche tra fori che mostra un modo di rappresentare i valori medi di velocità ottenuti per ciascuna linea di misura.

via la tomografia sismica differisce notevolmente da quella a raggi X per i seguenti due aspetti:

a) Gli scanner tomografici a raggi X possono ottenere dati agendo tutto intorno al corpo umano, mentre nella tomografia sismica la quantità di dati multidirezionali che può essere ottenute è limitata dalle posizioni dove i fori o cunicoli di prova possono essere ubicati.

b) Con la tomografia a raggi X si assume che il percorso dei raggi X sia rettilineo, mentre per diverse specifiche strutture di velocità della tomografia sismica si devono tenere presenti gli effetti di rifrazione e diffrazione delle onde sismiche.

La limitazione discussa al punto a) comporta che le eleganti tecniche di calcolo usate per la tomografia a raggi X non possano essere direttamente applicate a quella sismica. Nella tomografia sismica viene generalmente impiegato per la ricostruzione il metodo iterativo mostrato in Fig. 4.1.

Il fattore di cui al punto b) suggerisce la necessità di prendere in considerazione la rifrazione e la diffrazione dei raggi quando, nel metodo iterativo, si calcolano i tempi di percorso teorici.

La letteratura esistente descrive due categorie di tecniche per il calcolo teorico dei tempi di percorso: metodi nei quali si assume che i percorsi dei raggi sono rettilinei [6,7]; e quelli in cui è presa in considerazione una inflessione dei raggi, determinata dalla rifrazione o diffrazione delle onde sismiche [8-11].

Strumentazione

5. La strumentazione usata per le misure di tomografia sismica è, in linea di principio, la stessa, per quel che riguarda sorgente sismica, ricevitori e sistema di registrazione, di quella mostrata nelle parti 2 e 3. Tuttavia il metodo tomografico richiede un livello di precisione delle misure più elevato e l'acquisizione di una quantità di dati molto più elevata. Queste differenze rendono necessari requisiti addizionali della strumentazione [23].

6. La sorgente sismica, sia essa di tipo esplosivo o un dispositivo meccanico od elettrico, viene scelta per generare il tipo di onda richiesto[24].

7. Un dispositivo di istante di scoppio, per avere un segnale elettrico di tempo zero al registratore all'istante della generazione dell'onda[25].

8. Il ricevitore sismico può essere uno dei seguenti tre tipi:

a) Un geofono, che genera una tensione direttamente proporzionale alle velocità delle particelle delle onde sismiche, e che può essere sia incorporato in sonde da foro sia usato direttamente sulla superficie del terreno e/o in cunicoli di prova. La frequenza naturale del geofono deve essere meno della metà della frequenza predominante delle onde sismiche. Il campo di frequenza più adatto è nella banda 10Hz - 2kHz[26].

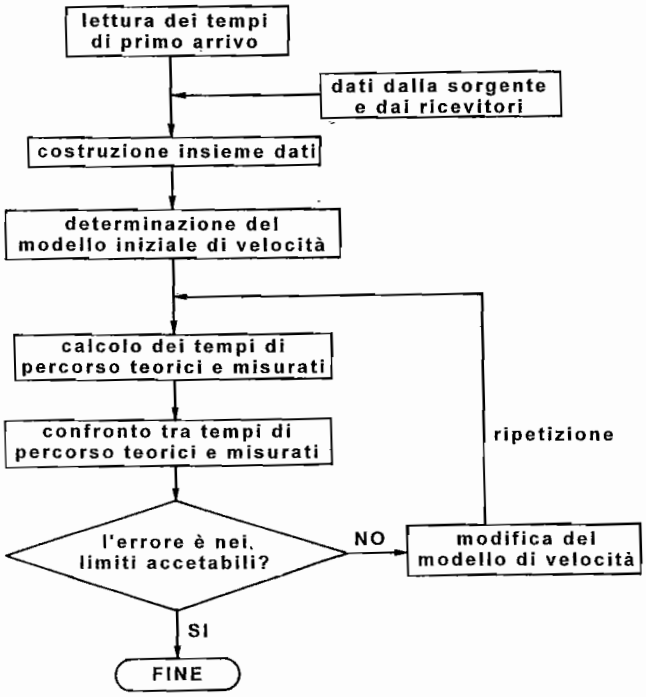

Fig. 4.1 – Schema di flusso: il metodo di analisi iterativo nella tomografia sismica.

b) Un accelerometro piezoelettrico, che genera una tensione direttamente proporzionale all'accelerazione delle particelle delle onde sismiche. Come il geofono esso può essere sia incorporato in sonde da foro che usato direttamente sulla superficie del terreno e/o in cunicoli di prova. La frequenza naturale dell'accelerometro piezoelettrico deve essere almeno il doppio della frequenza predominante delle onde sismiche. Il campo di frequenza più adatto è tra 10 Hz e 60 kHz[27].

c) Un idrofono, che genera una tensione direttamente proporzionale alla pressione nell'acqua circostante ad esso, accettabile solo in fori pieni d'acqua. La frequenza più adatta è nel campo tra 10 Hz e 60 kHz.

9. Allo scopo di ridurre il tempo richiesto per le misure deve essere usato un dispositivo con ricevitori multipli,.

10. Della strumentazione per rilevare la direzione e la deviazione dei fori, la posizione della sorgente sismica e dei ricevitori nei fori e la posizione della sorgente e/o dei ricevitori sulla superficie del terreno e/o nei cunicoli di prova. Alcune attrezzature addizionali possono essere richieste per calare le sonde nei fori.

11. Con la tomografia è preferibile usare un sistema di acquisizione dati di tipo digitale. La frequenza di campionamento deve essere almeno 4-5 volte più grande della frequenza dominante dei segnali. La risoluzione digitale deve essere almeno di 8 bit. Deve essere usato uno strumento multicanale per ridurre il tempo di esecuzione delle misure. Accanto alla capacità di conversione analogico-digitale del segnale, il sistema di acquisizione dati deve anche includere le seguente parti:

a) Un banco di amplificatori, uno per ciascun canale, con guadagno selezionabile ed un guadagno massimo di 70-130 dB.

b) Un banco di filtri taglia basso e taglia alto per la soppressione del rumore al di fuori della banda di frequenza del segnale.

c) Una unità di miglioramento del segnale allo scopo di migliorare la dinamica di segnali deboli. Questa caratteristica è fortemente raccomandata quando si eseguono misure in un'area "rumorosa" o in aree fortemente assorbenti e/o in caso di notevoli distanza di misura.

d) Un visore con schermo per una rapida ispezione delle forme d'onda.

e) Un dispositivo per produrre una copia su carta delle forme d'onda.

f) Un registratore, per memorizzare i dati per analisi future.

g) Un'interfaccia digitale o un mezzo equivalente per trasferire i dati ad un computer.

Un esempio del sistema di acquisizione dati è mostrato in Fig. 4.2. A seconda della costruzione della strumentazione i differenti componenti del sistema possono essere separati o alloggiati in un unico contenitore.

Disposizione della sorgente e dei punti di ricezione

12. Esistono numerose combinazioni possibili per la disposizione della sorgente e dei ricevitori. I punti di generazione e quelli di ricezione devono es-

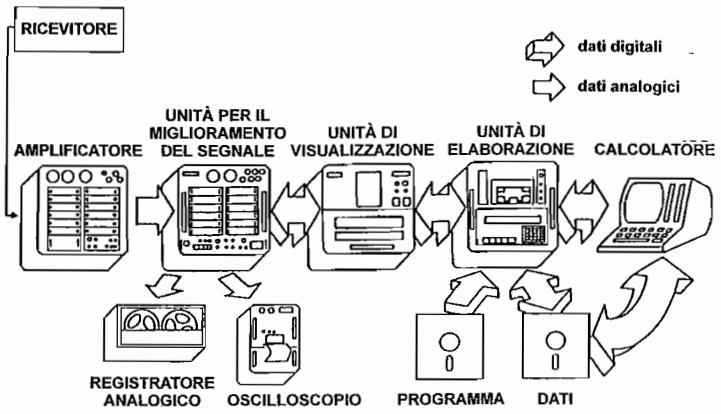

Fig. 4.2 – Esempio di sistema di acquisizione.

sere disposti in modo tale da circondare il più possibile la zona di misura, traendo vantaggio, quando sono disponibili, da fori e cunicoli esistenti.
I punti devono essere disposti in modo da ottenere una copertura di raggi uniforme ed in modo tale che i raggi siano distribuiti nel maggior numero di direzioni possibili.

Procedimento di analisi

13. Deve essere preparata per l'analisi una rappresentazione in sezione trasversale che mostri la topografia e la posizione di ciascun foro o punto di accesso sotterraneo.

14. Un metodo per definire il profilo di distribuzione della velocità è quello di dividere l'area in celle rettangolari di dimensione appropriata. I valori di velocità entro ciascuna cella sono considerati uniformi. Ciascun valore viene determinato e viene calcolata la distribuzione della velocità.
Un metodo alternativo è quello di disporre una griglia rettangolare sull'area ed assegnare dei valori di velocità a ciascun punto di intersezione. Il precedente metodo è quello più comune.

15. Deve essere determinata una appropriata dimensione per le celle considerando le dimensioni dell'area investigata ed il numero di raggi.

16. La Fig. 4.1 indica i passi per l'esecuzione del procedimento tomografico più usato, il metodo iterativo. Una breve spiegazione di questo metodo è la seguente:

a) *Lettura dei primi arrivi*
Dalle registrazioni sismiche devono essere letti i tempi di percorso dei primi arrivi.

b) *Costruzione dell'insieme dei dati*
L'insieme dei dati è inserito in un computer. Deve includere i tempi di percorso dei primi arrivi e la posizione dei punti di generazione e di ricezione.

c) *Determinazione del modello iniziale di velocità*
Il modello iniziale (distribuzione della velocità), che costituisce il punto di partenza del metodo iterativo, viene normalmente determinato assegnando velocità uniformi a tutte le celle poste entro la sezione di terreno in esame, oppure applicando alla sezione di terreno la tecnica delle proiezione inversa (BPT) che impone traiettorie dei raggi rettilinee[28]. A questo punto possono essere efficacemente utilizzate conoscenze *a priori* sul mezzo: il modello iniziale può essere scelto in modo da soddisfare, ad esempio, limiti conosciuti tra strati, velocità note dai sonic logs, etc..

d) *Calcolo dei tempi di percorso teorici*
In questo passo vengono calcolati per ciascuna iterazione e per ogni coppia sorgente-ricevitori del modello i tempi di percorso teorici, sia assumendo traiettorie rettilinee sia tenendo conto della curvatura dei raggi.
Se esiste un intervallo di valori di velocità troppo ampio (più del 15-20% di contrasto di velocità) entro l'area in esame, si deve tenere conto della curvatura dei raggi. Per fare ciò viene eseguito un ray tracing e determinate le relative traiettorie teoriche.

e) *Confronto tra i tempi di percorso teorici e quelli osservati*
I tempi di percorso teorici ottenuti in d) vengono confrontati con quelli effettivamente misurati. Se i residui ricadono entro il campo di errore accettabile, il calcolo è completato.

f) *Modifica del modello di velocità*
La struttura del modello di velocità viene modificata correggendo i valori di velocità di ciascuna cella, in modo da diminuire i residui nei tempi di percorso. Per modificare il modello di velocità sono disponibili vari algoritmi come, ad esempio, la tecnica iterativa di ricostruzione simultanea (SIRT)[29] o la tecnica iterativa dei minimi quadrati (ILST)[30].

17. I valori di velocità ottenuti per ciascuna cella mediante l'elaborazione di cui sopra vengono assegnati alle rispettive celle e rappresentati a colori o

toni di grigio, oppure come mappe a linee di livello dell'intero andamento.

18. Infine, quando per la struttura di velocità ottenuta sono state tracciate le traiettorie dei raggi per tutte le coppie generatore-ricevitore, si deve tener conto che esiste un limite all'attendibilità dei valori di velocità in quelle celle attraverso le quali passano pochi raggi.

Esempi di modelli di calcolo

19. In questa parte viene illustrata la tecnica di ricostruzione della tomografia sismica impiegando alcuni esempi di studi su modelli [12].
La Fig. 4.3 mostra un modello di struttura di velocità bidimensionale di sezione quadrata 40 × 40 m.
Al fine di generare un insieme di dati con cui provare il metodo della tomografia sismica, è stata ipotizzata la posizione delle sorgenti sismiche e dei punti di ricezione mostrata in Fig. 4.4. In aggiunta alla posizione dei punti di generazione e ricezione, sono anche state mostrate le linee rette di collegamento tra di essi per indicare la copertura sismica. Venti punti di ricezione sono stati spaziati ad intervalli di 2 m partendo a 1 m da ciascun angolo fino alle rispettive posizioni di 39 m. Vi sono così 80 punti di ricezione. Ci sono 8 sorgenti sismiche, che comprendono i punti ABCD in ciasun angolo del quadrato e i punti mediani EFGH di ciascun lato.
Sono stati calcolati quindi i tempi dei primi arrivi che si osserverebbero in ciascun punto di ricezione se fossero generate onde sismiche in ciascun punto di sorgente. La figura 4.5 mostra i percorsi dei raggi dei primi arrivi per ciascun punto di ricezione ottenuti generando l'onda sismica al punto sorgente F.
Come risultato dei calcoli di cui sopra, dai punti sorgente A-H sono stati ottenuti 640 tempi di percorso (8 posizioni × 20 punti × 4 lati). Tuttavia nel prendere in considerazione le reali condizioni di osservazione di un ammasso roccioso, sono stati eliminati i dati ottenuti dai ricevitori posizionati sui lati che hanno anche punti sorgente. In questo modo sono stati utilizzati 400 tempi di percorso dei primi arrivi (4 posizioni × 20 punti × 2 lati + 4 posizioni × 20 punti × 3 lati). Questa geometria di sorgente e ricevitori è stata chiamata Caso 1.

20. Al fine di ricostruire una immagine del campo di velocità da questi 400 dati di tempi di percor-

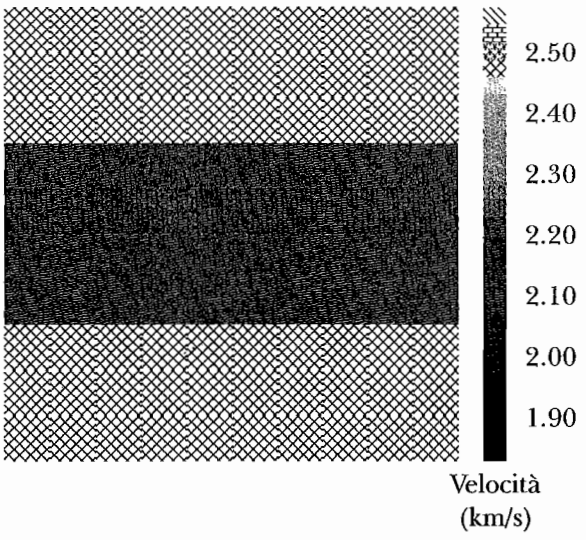

Fig. 4.3 – Modello di velocità del Modello 1 usato per gli esperimenti su modello dei Casi 1-3.

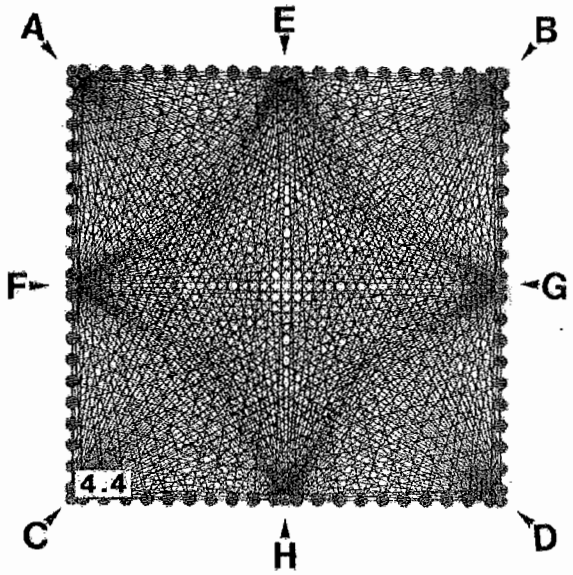

Fig. 4.4 – Geometria sorgente ricevitore per il Caso 1 (i cerchi contrassegnati con le lettere mostrano i punti sorgente sismica; i cerchi non contrassegnati da lettera, mostrano i punti di ricezione).

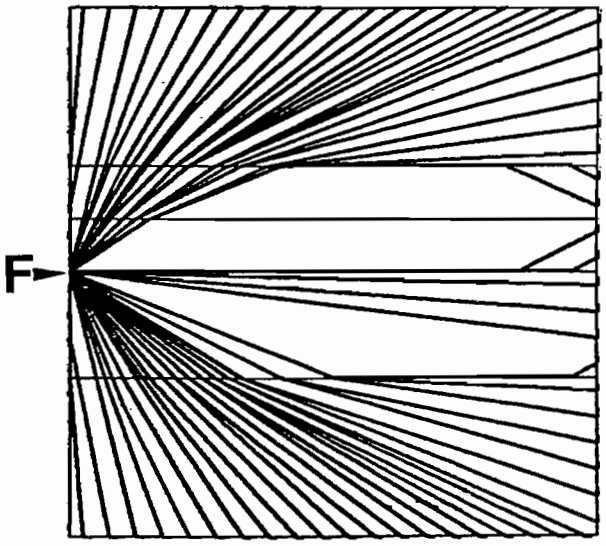

Fig. 4.5 – Percorso teorico dei raggi dal punto sorgente F ai 60 punti di ricezione per il Modello 1 mostrato in Fig. 4.3.

so, la sezione è stata suddivisa in 100 celle quadrate di 4 × 4 m.

21. La figura 4.6 mostra il modello iniziale per l'analisi tomografica iterativa. Usando i dati "misurati" (ovviamente in uno studio su modello tali dati sono in realtà quelli calcolati teoricamente, cioè i tempi di primo arrivo calcolati mediante tracciamento dei raggi e non comprensivi di alcun rumore di osservazione), questo modello iniziale è stato determinato semplicemente mediante la tecnica della proiezione inversa, in cui il percorso dei raggi è approssimato a linee rette. La figura 4.7 mostra i percorsi dei raggi dei primi arrivi del punto di sorgente sismica F per il modello iniziale mostrato in Fig. 4.6. I percorsi dei raggi mostrati in Fig. 4.7 sono più rettilinei di quelli mostrati in Fig. 4.5. Ciò significa che i risultati ottenuti con la tecnica di proiezione inversa danno un minor contrasto di velocità.

22. Seguendo lo schema di flusso mostrato in Fig. 4.1 e partendo dal modello iniziale mostrato in Fig. 4.6 sono stati calcolati tutti i tempi dei primi arrivi tra ciascuna coppia di sorgente e ricevitore, tenendo conto della rifrazione delle onde.
Sono stati così ottenuti, per ciascuna coppia, i residui dei tempi tra i tempi di primo arrivo "misurati"e calcolati.
Usando la tecnica dei minimi quadrati, al fine di diminuire i residui dei tempi di percorso, sono stati quindi determinati, per ciascuna cella, i valori di correzione della velocità. Dopo cinque iterazioni, per correggere ciascun modello intermedio, è stato ottenuto il modello dell'iterazione finale, mostrato in Fig. 4.8. Questo risultato indica che è stata raggiunta una ricostruzione del modello originale estremamente buona. La figura 4.9 mostra i percorsi dei raggi dei primi arrivi per tale modello ricostruito, relative al punto sorgente F.

23. Nell'analisi sopra illustrata nel calcolo dei tempi di percorso teorici per ciascuna iterazione è stata presa in considerazione la rifrazione delle onde sismiche. Tuttavia, se i percorsi dei raggi potessero essere approssimati a linee rette, il tempo di calcolo per la determinazione dei tempi di percorso teorici verrebbe enormemente ridotto. La Figura 4.10 è relativa ad un modello ricostruito ripetendo 5 volte la seguente elaborazione: il risultato della proiezione inversa di Fig. 4.6 viene usato come modello iniziale. Nelle fasi di calcolo dei tempi di percorso teorici i percorsi dei raggi vengono approssimati con linee rette.
Vengono quindi ottenuti i residui dei tempi di percorso e, mediante la tecnica dei minimi quadrati per diminuire i residui dei tempi di percorso, determinati i valori di correzione della velocità per ciascuna cella.. La Fig. 4.11 mostra i percorsi dei raggi teorici dal punto sorgente F, nella sezione ricostruita mostrata in Fig. 4.10.

24. Confrontando le figure 4.8 e 4.10 si può riconoscere una evidente differenza di qualità delle immagini ricostruite.
Questo risultato suggerisce che è fortemente desiderabile tener conto degli effetti della rifrazione nel calcolo dei tempi di primo arrivo, in particolare quando sono presenti grandi differenze di velocità.

25. Nell'esperimento del modello del Caso 1, è stato ipotizzato che la sorgente ed i ricevitori possono essere disposti sui quattro lati di una sezione quadrata. Tuttavia è fortemente improbabile che tale geometria possa essere trovata nelle reali condizioni

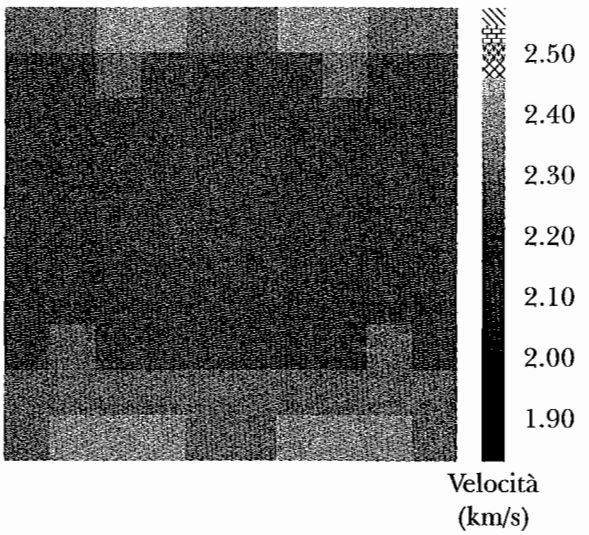

Fig. 4.6 – Modello di velocità all'iterazione iniziale per il metodo iterativo del Modello 1 per il Caso 1 ottenuto con la tecnica della proiezione inversa in cui i percorsi dei raggi sono stati considerati rettilinei.

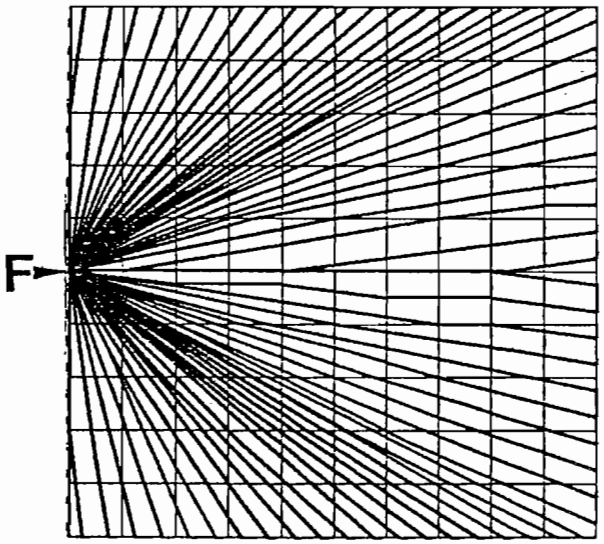

Fig. 4.7 – Percorso teorico dei raggi dal punto sorgente **F** ai 60 punti di ricezione per il modello iniziale di velocità del Modello 1 per il Caso 1 mostrato in Fig. 4.6.

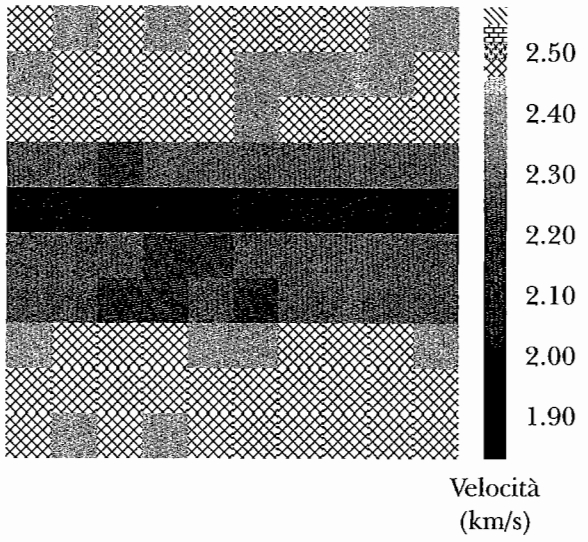

Fig. 4.8(a) – Sezione di velocità dell'iterazione finale dopo cinque iterazioni del metodo ILST tenendo conto della rifrazione delle onde sismiche.

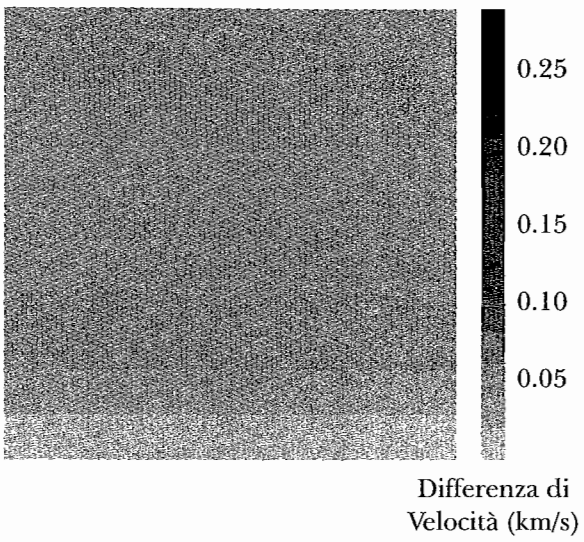

Fig. 4.8(b) – Distribuzione degli errori (l'errore è definito come differenza dei valori assoluti di velocità in ciascuna cella, tra il modello originario e quello all'iterazione finale).

di sito. Dobbiamo pertanto esaminare i risultati di altri modelli sperimentali in cui le geometrie dei punti sorgente e ricezione sono soggette ad alcune condizioni limitative.

26. Nei seguenti esperimenti sono stati impiegati due modelli. Il Modello 1 è il medesimo di quello mostrato in Fig. 4.3. Il Modello 2 è stato ottenuto ruotando il Modello 1 di 90° in direzione oraria, come mostrato in Fig. 4.12.

27. Per ciascun modello sono stati ipotizzati due tipi di geometrie sorgente-ricevitore. La Fig. 4.13 mostra la posizione dei punti di sorgente è di ricezione per ciascun caso.

Nel Caso 2 si è assunto che i punti sorgente e di ricezione non possano essere disposti sul lato inferiore della sezione, vale a dire che i punti sorgente e di ricezione sono disposti in due fori e sulla superficie.

Nel Caso 2 il numero dei tempi di percorso usati per l'analisi tomografica è stato 480 (13 punti sorgente e 60 punti di ricezione).

Nel Caso 3 è stato assunto che non ci siano né punti sorgente né punti di ricezione sul lato superiore ed inferiore. Questo caso corrisponde alle misure cross-hole.

Nel Caso 3 sono stati usati 530 dati di tempo di percorso (26 punti sorgente, 40 punti di ricezione).

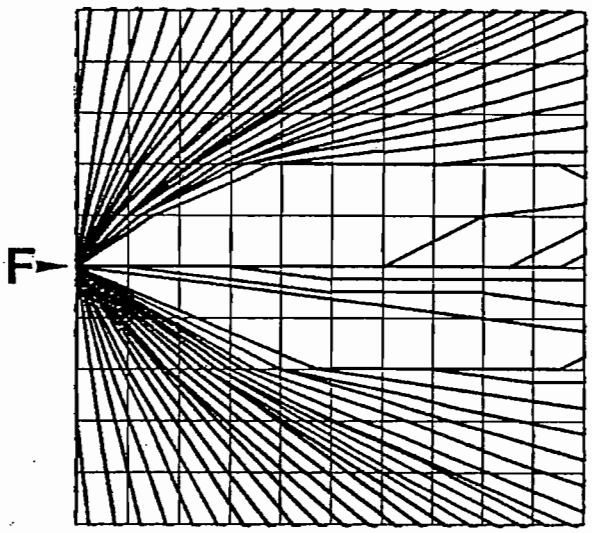

Fig. 4.9 – Percorso teorico dei raggi dal punto sorgente **F** ai 60 punti di ricezione per la sezione di velocità dell'iterazione finale mostrata in Fig. 4.8a.

28. In entrambi i casi è stata utilizzata la stessa procedura di analisi del Caso 1. La sezione è stata divisa in celle quadrate di 4 × 4 m. È stato determinato il modello iniziale con la tecnica della proiezione inversa, approssimando i raggi a linee rette. Quindi, partendo dal modello iniziale, il modello è stato iterativamente modificato usando la tecnica dei minimi quadrati. Al passo di calcolo dei tempi di percorso teorici dei primi arrivi è stato preso in considerazione l'effetto della rifrazione delle onde sismiche.

29. La figura 4.14 mostra i modelli iniziali dei Casi 2 e 3 per i Modelli 1 e 2. Il modello dell'iterazione finale ottenuto per ciascun Caso è mostrato nella Fig. 4.15a, e la distribuzione degli errori, definiti come valori assoluti delle differene di velocità in ciascuna cella, è mostrata in Fig. 4.15b. È mostrato anche il numero delle iterazioni richieste per ottenere i modelli allo stadio finale.

30. Confrontando questi risultati con quelli del Caso 1 (Fig. 4.8), si possono fare le seguenti considerazioni. Nel Modello 1, malgrado la riduzione delle geometrie di sorgente e ricevitori, si sono ottenute immagini piuttosto buone per entrambi i

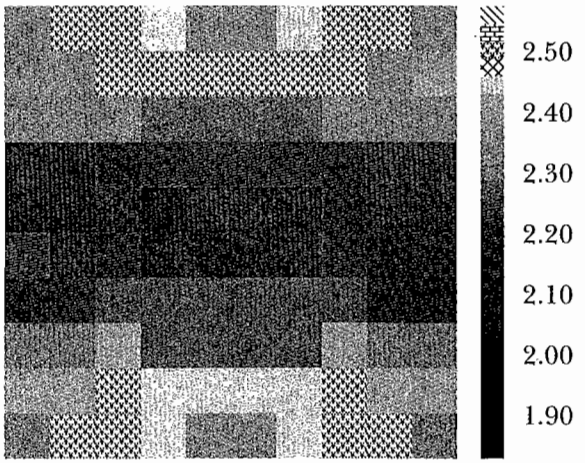

Fig. 4.10(a) – Sezione di velocità dell'iterazione finale dopo cinque iterazioni del metodo ILST con l'assunzione di percorsi dei raggi rettilinei.

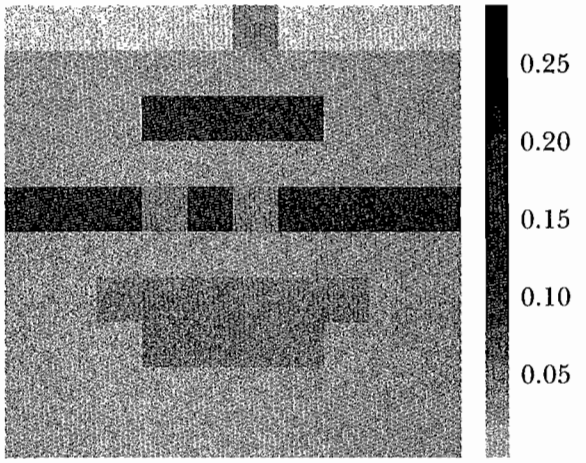

Fig. 4.10(b) – Distribuzione degli errori.

Casi 2 e 3. Mentre nel Caso 3, per il Modello 2, l'immagine ricostruita è invece completamente differente dal modello originale. Ciò è avvenuto poichè i dati sismici "misurati" usati consistevano solo in quei dati per i quali il percorso dominante dei raggi era pressocchè perpendicolare alla direzione degli strati a bassa velocità esistenti nella parte centrale del modello originale del Modello 2. Se i punti sorgente e/o di ricezione fossero stati disposti lungo più di due lati, come nel Caso 2 del Modello 2, si sarebbe potuta ottenere una migliore ricostruzione dell'immagine nella parte con più elevata densità di raggi.

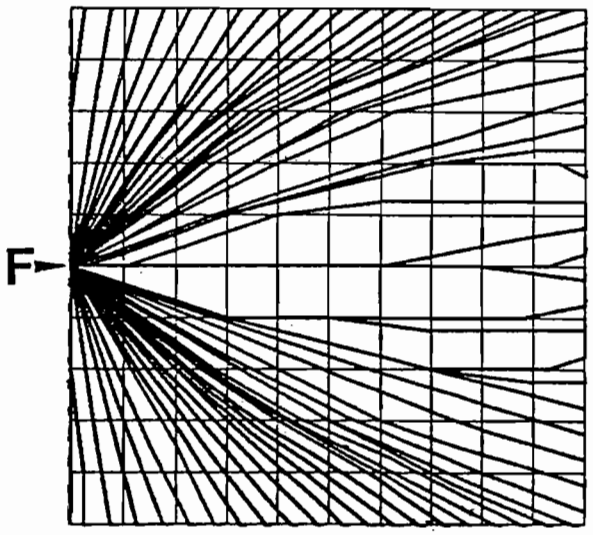

Fig. 4.11 – Percorso teorico dei raggi dal punto sorgente **F** ai 60 punti di ricezione per la sezione di velocità mostrata in Fig. 4.10.

31. Nei calcoli di cui sopra, allo stadio di modifica del modello di velocità è stato usato il metodo iterativo (ILST).
Nell'ILST, per risolvere le equazioni in un modo stabile, è stato impiegato il metodo dei minimi quadrati smorzato[6].

32. Dai risultati degli esperimenti sui modelli possono essere tratte alcune cautele da osservare nel prendere le misure in sito. Allo scopo di ottenere buoni risultati è necessario assicurare che le sorgenti sismiche ed i punti di ricezione siano disposti in modo tale che i percorsi dei raggi coprano il più omogeneamente possibile l'intera area da investigare. Quindi è desiderabile che ci sia un adeguato numero di fori perforati o cunicoli scavati. Quando non ci sono abbastanza cunicoli o fori e non può essere utilizzato uno schema di misure ideale, la precisione delle analisi diminuisce. Se sono note le condizioni geologiche generali del sito, al fine di pianificare una disposizione ottimale della sorgente sismica e dei punti di ricezione, è una buona idea eseguire dei calcoli su modello, per una struttura di velocità ipotetica o per un modello basato sui dati di un sondaggio.

33. Si deve notare che negli esperimenti su modelli sopra citati sono stati ottenuti risultati favorevoli in quanto i limiti delle celle coincidono con i limiti originali degli strati. Questo è un motivo per cui è importante prendere effettivamente in considerazione la conoscenza preliminare del mezzo da investigare. Nella esecuzione di reali rilievi tomografici in campo, quando questa conoscenza non è immediatamente disponibile, i risultati non sono generalmente così buoni.

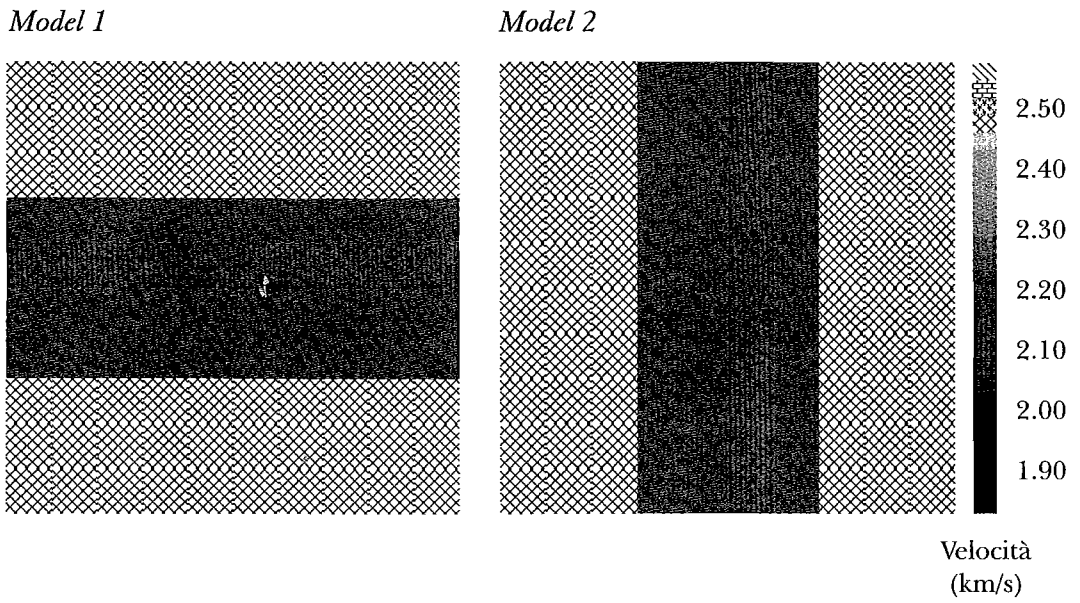

Fig. 4.12 – Modello 1 e Modello 2. Il modello 1 è identico a quello mostrato in Fig. 4.3. Il modello 2 è ottenuto ruotando il Modello 1 di 90°.

Note

1. Il fattore di qualità *(Q)* è definito come segue:

$$Q = \frac{2\pi \text{ (Energia Totale in un periodo)}}{\text{(Energia Persa in un periodo)}}$$

L'attenuazione prodotta dall'anelasticità di un materiale è governata dalla seguente equazione:

$$U = U_0 \, e^{-a(f)x}$$

dove U_o è l'ampiezza dell'onda al punto iniziale, U è l'ampiezza dell'onda alla distanza x dal punto iniziale e $a(f)$ è il coefficiente di attenuazione. Il coefficiente di attenuazione è espresso come segue:

$$a(f) = \pi f / (QC)$$

dove f è la frequenza dell'onda e C è la velocità di propagazione dell'onda.

2. Se una data spaziatura tra i trasduttori entro o tra fori di misura dà origine a N misure, la corrispondente tomografia cross hole darà origine a $N \times N$ misure. Se N è un numero grande, il tempo necessario in campagna per acquisire questo insieme di dati può essere considerevole. Pertanto l'acquisizione dei dati sarà sostanzialmente più costosa se si vuole ottenere una immagine tomografica tra fori. La maggior spesa è anche nell'elaborazione. Per una elaborazione appropriata dei dati tomografici sono richieste sostanziali risorse di calcolo. La maggior spesa nell'elaborazione tomografica risiede nel tempo di calcolo necessario per il

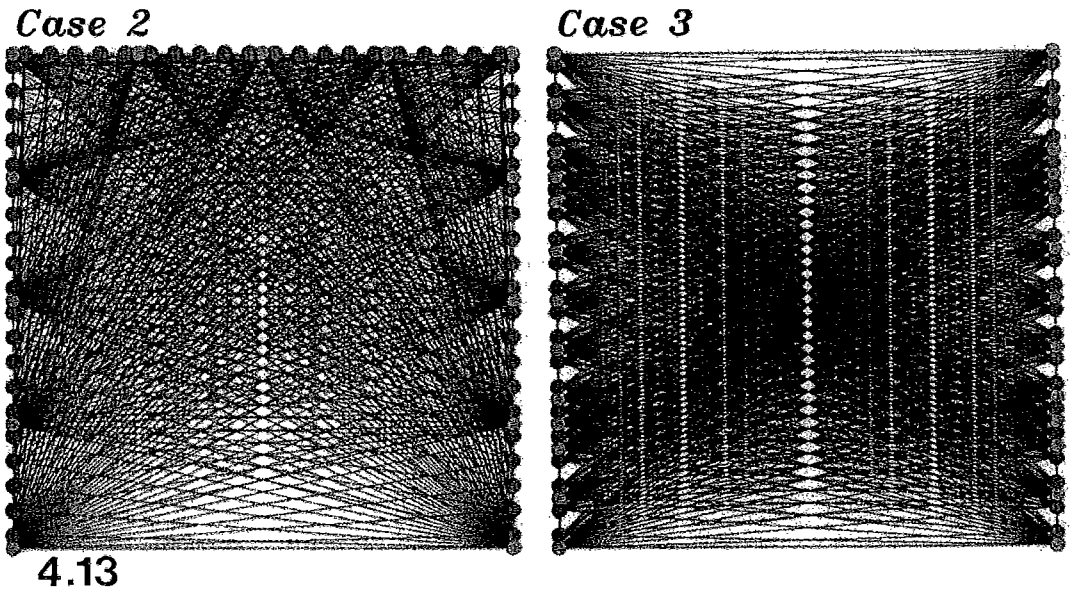

Fig. 4.13 – Geometria sorgente-ricevitore dei Casi 2 e 3 (i cerchi chiari mostrano i punti sorgente ed i cerchi scuri i punti di ricezione).

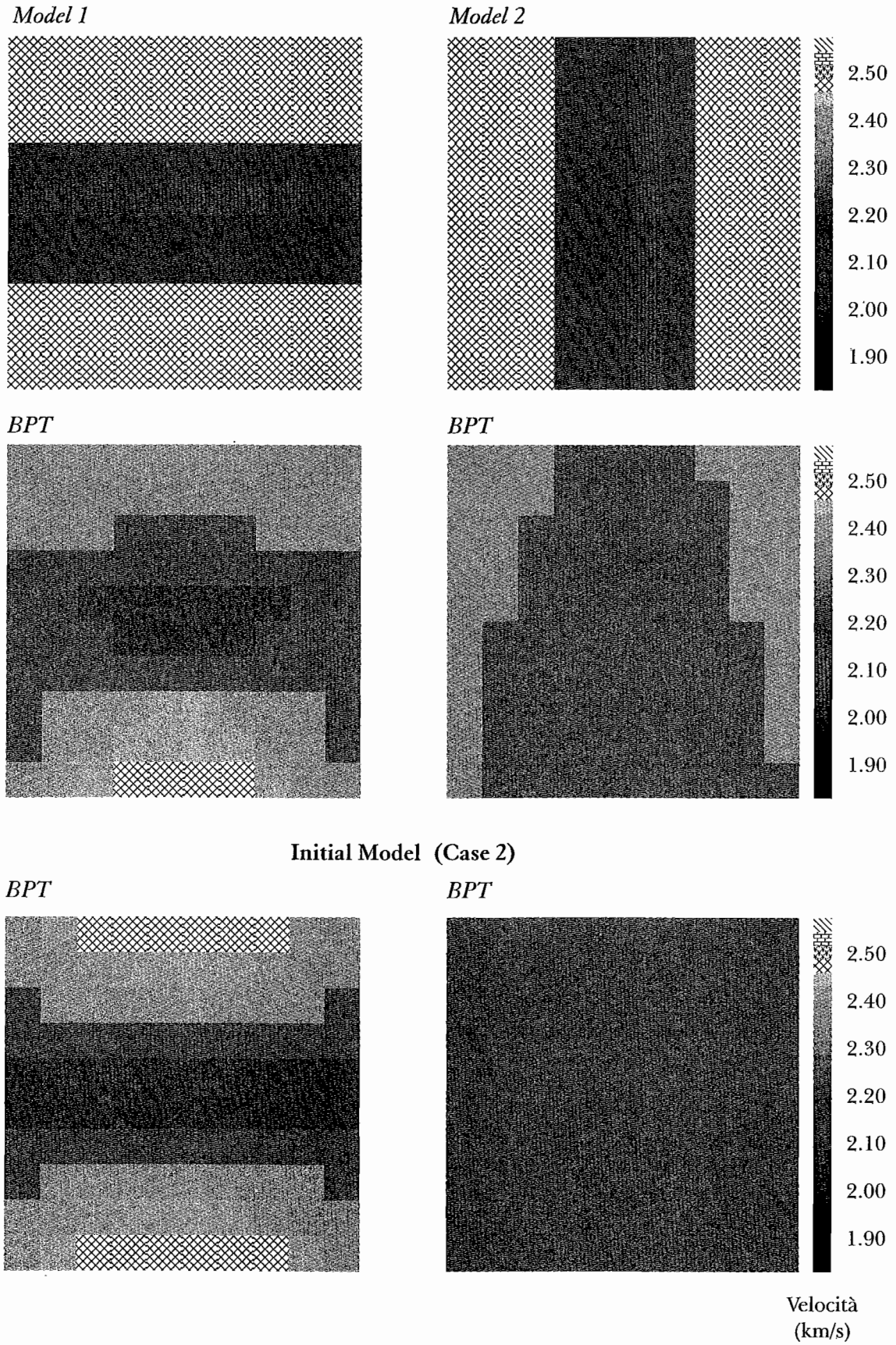

Fig. 4.14 – Modelli di velocità dell'iterazione iniziale per i Casi 2 e 3 dei Modelli 1 e 2 ottenuti con la tecnica della proiezione inversa in cui i percorsi dei raggi sono stati considerati rettilinei

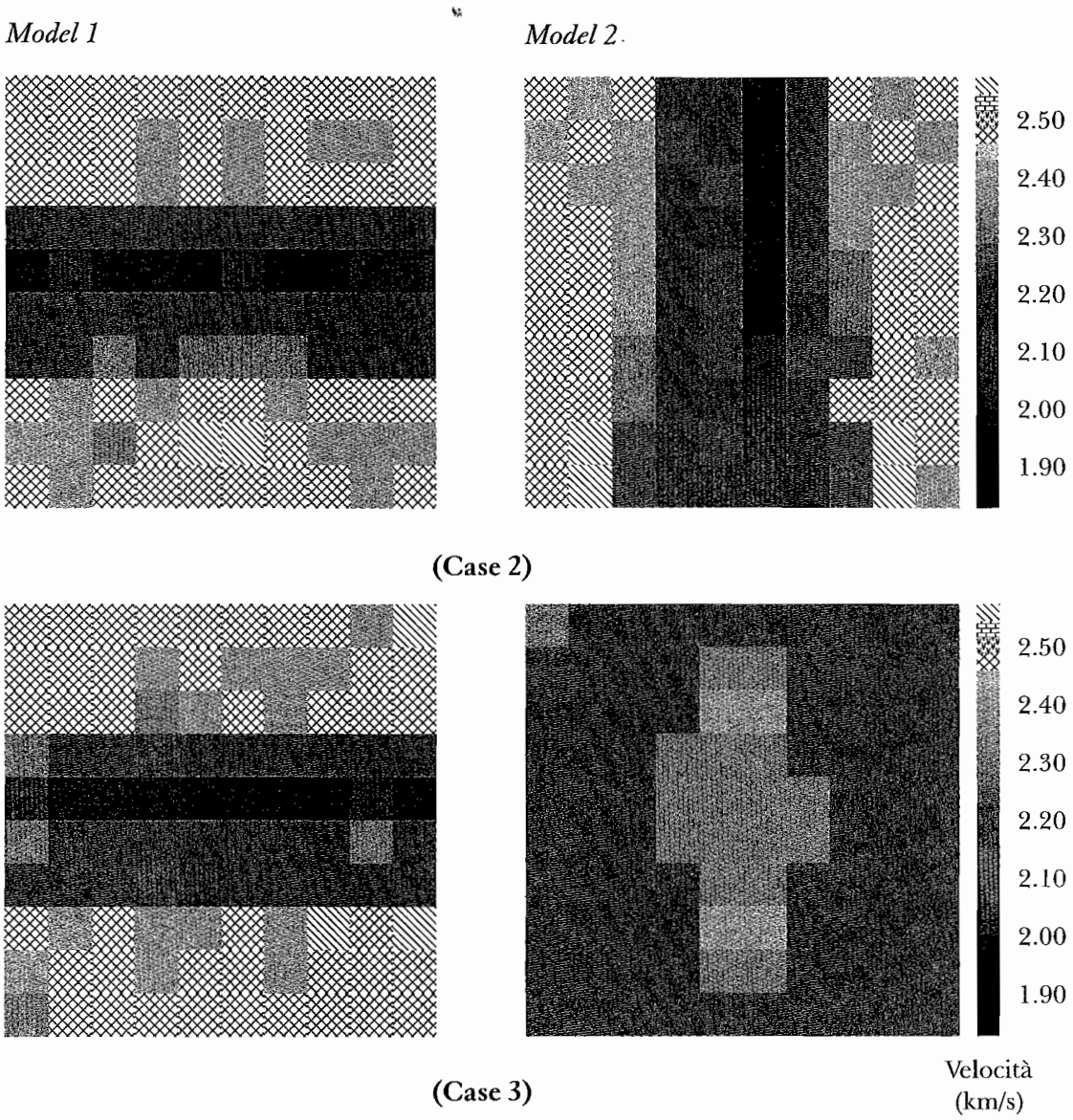

Fig. 4.15(a) – Sezione di velocità dell'iterazione finale per i Casi 2 e 3 dei Modelli 1 e 2. In ciascun caso è stato tenuto conto dell'effetto della rifrazione delle onde sismiche. Le iterazioni del metodo ILST sono state eseguite 2 volte per il Caso 2 del Modello 1, 15 volte per il Caso 2 del Modello 2, 3 volte per il Caso 3 del Modello 1 e 4 volte per il Caso 3 del Modello 2.

tracciamento dei raggi dei segnali sismici al fine di posizionare correttamente il percorso dell'energia sismica.

3. Quando un vibratore genera una vibrazione della durata di pochi secondi, le frequenze di vibrazione devono essere variate in funzione del tempo (up-sweep o down sweep) ed i segnali sismici devono essere registrati utilizzando un sistema di acquisizone digitale. Inoltre, per ottenere i tempi di percorso, deve essere impiegata una funzione di cross-correlazione.
4. Con trasduttori a cristalli piezoelettrici con elevata impedenza (accelerometri ed idrofoni) il cavo di collegamento deve essere corto, tipicamente non più di 10 m. È quindi fortemente consigliato l'impiego di preamplificatori in foro con uscita a bassa impedenza.
5. La tecnica del miglioramento del segnale (signal enhancement) funziona come segue: i segnali sismici, ottenuti da una singola geometria generatore-ricevitore mediante onde sismiche generate in modo ripetitivo, vengono digitalizzati e sommati sincronizzandoli con i segnali di tempo di inizio del segnale. Questa operazione fornisce un miglioramento del rapporto segnale/rumore in proporzione alla radice quadrata del numero di segnali sommati.
6. Il tempo di inizio del segnale (time break) basato sulla corrente di sparo è spesso impreciso per i rilievi sismici in foro con tempi di percorso brevi. Per misure precise è raccomandato l'impiego di tecniche quali l'apertura o chiusura di contatti.
7. Un sistema di acquisizione dati non deve solo produrre una copia su carta della registrazione oscillografica, ma anche memorizzare i dati su un disco o nastro magnetico. Per questo scopo possono essere usati sistemi di acquisizione dei dati sia analogici che digitali. I mezzi magnetici forniscono le migliori registrazioni in ampiezza e/o registrazioni filtrate.
   I dati registrati su nastro magnetico, cartucce o floppy disk possono essere trasferiti direttamente ad un computer. Mediante l'elaborazione con computer è possibile eseguire rapidamente ed in modo preciso la lettura dei primi arrivi, individuare i parametri di attenuazione ed identificare i vari tipi di onde.
8. Quando un foro di sondaggio senza rivestimento risulta instabile, dovrà essere rivestito e cementato.

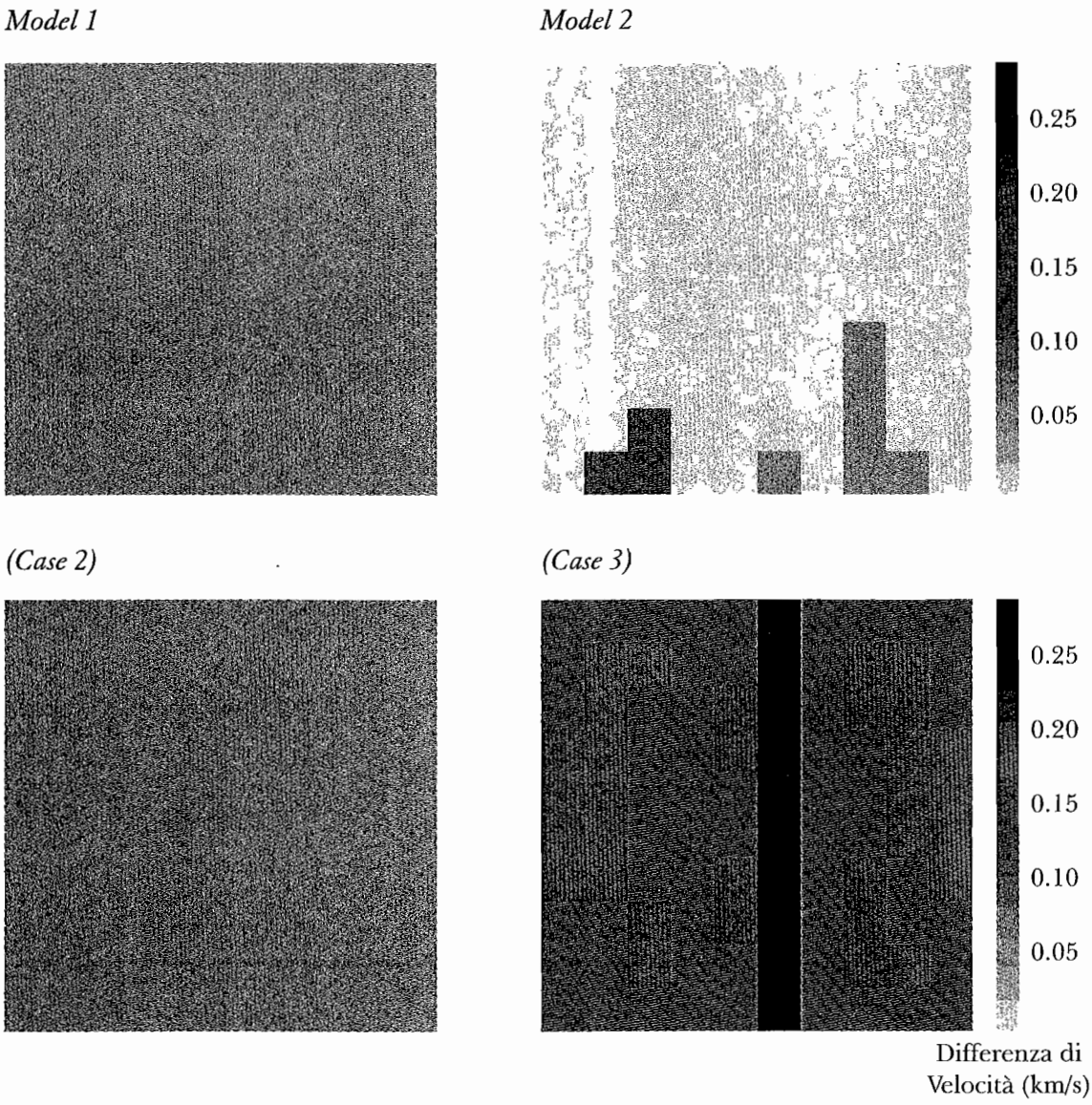

Fig. 4.15(b) – Distribuzione degli errori.

9. Esempi di metodi accettabili sono: camera d'aria, cuneo, molla rigida o espansore meccanico.
10. Prendendo una singola geometria generatore-ricevitore, le onde SH si generano mediante l'impatto su una tavola o sparando con un fucile per SH in direzioni opposte e registrare i segnali. Una fase delle onde SH generate in direzioni opposte deve essere invertita. Quindi è possibile identificare facilmente l'arrivo delle onde SH come mostrato in Fig. 2.5.
11. Nel caso in cui sia la sorgente sismica di tipo esplosivo che il ricevitore siano nello stesso foro, una importante considerazione riguarda il possibile danneggiamento che può essere indotto. Come sorgente sismica in fori pieni d'acqua viene spesso usato un detonatore. Una sorgente meccanica da foro è quella più desiderabile.
12. Quando viene usata una sorgente sismica di tipo esplosivo, air gun o sparker, la massima ampiezza delle onde SV è irraggiata in una direzione di 45° rispetto all'asse del foro [13]. D'altra parte, nel caso in cui il fondo sia spinto verso il basso, la radiazione avviene in una direzione perpendicolare a quella dell'impatto.
13. I migliori risultati si otterranno eseguendo due prove separate: (1) una ottimizzata per la registrazione delle onde P e (2) una per la registrazione delle onde S. Nel caso si usi una apparecchiatura con miglioramento di segnale, le onde sismiche dovrebbero essere generate ripetitivamente finchè siano visualizzati i risultati migliori.
14. Se la sorgente sismica è posizionata ad una considerevole distanza dalla sommità del foro, nel caso del metodo down-hole o se il ricevitore è spostato in modo considerevole rispetto sempre alla sommità del foro, nel caso dell'up-hole, alle profondità più superficiali l'onda critica rifratta può arrivare come onda principale [44]. In questo caso la tecnica della ricostruzione dei raggi è utile per determinare la velocità di propagazione in ciascuno strato.
15. La densità della roccia viene determinata dai risultati di un log di densità gamma gamma in sito o da misure di densità su campioni indisturbati. Il log di densità gamma gamma deve essere eseguito in accordo con il relativo metodo suggerito dall'ISRM [1].
16. Le velocità delle onde P ed S devono essere misurate in laboratorio in condizioni umide riproducenti quelle di sito, usando campioni prelevati nella stessa località nella quale sono state eseguite le misure in sito delle onde elastiche. Queste prove devono essere eseguite in accordo con i relativi metodi suggeriti dall'ISRM [1].
17. Per grandi distanze in rocce tenere deve essere usato un air

gun da foro. Le frequenze delle onde sismiche generate da air gun ed esplosivi sono rispettivamente comprese tra 10 e 800 Hz e tra 10 Hz e 5 kHz. La frequenza delle onde emesse da una data sorgente aumenta con l'aumentare della rigidezza dei materiali geologici. Il vantaggio di impiegare una sorgente piezoelettrica o magnetostrittiva controllata elettronicamente sta nel fatto che l'ampiezza ed il contenuto in frequenza delle onde sismiche generate possono essere regolate in modo controllato.

18. Le misure cross-hole su percorsi di pochi metri in rocce dure devono essere eseguite con sorgenti piezoelettriche usando un campo di frequenze di 10-60 kHz. [5].
19. Quando viene usato il metodo sismico cross hole convenzionale, i punti di generazione e di ricezione sono posizionati molto vicini ed allo stesso livello, allo scopo di ridurre la complicazione della curvatura dei raggi.
20. Se esiste la possibilità che le onde rifratte diventino onde principali, l'analisi deve tener conto di ciò [15]. In questo caso, il tracciamento dei raggi è un utile mezzo per determinare le velocità di propagazione in ciascuno strato.
21. Grande attenzione deve essere fatta quando si misura l'attenuazione in questo modo. Più fratturata è la roccia tanto diversi sono i percorsi tra la sorgente ed i ricevitori, e l'onda che viene presa in considerazione può contenere elementi che sono stati riflessi da punti esterni al percorso canalizzato. Ciò produrrà considerevoli distorsioni dello spettro di frequenza e darà risultati erronei.
22. Per esempio, se una sezione cross hole non tomografica può essere fatta con 20 registrazioni a quote differenti, una tomografica richiederà da 300 a 400 misure.
23. La velocità media lungo ciascun raggio è ottenuta con i metodi mostrati nelle Parti 2 e 3, come rapporto tra le distanze sorgente-ricevitore e il tempo di percorso misurato. Con la tomografia, ciascuna misura contribuisce alla velocità assegnata a ciascuna delle celle attraversate dai rispettivi raggi, come descritto nel capitolo "Procedure di analisi". Quindi errori di posizionamento e di lettura dei tempi che sembrano piccoli, se confrontati con la lunghezza totale dei percorsi e dei tempi totali, diventeranno grandi alla scala di ciascuna cella. Per esempio, una distribuzione di velocità tomografica ottenuta con celle 10x10 richiederà approssimativamente una precisione 10 volte più grande rispetto ai metodi descritti nelle Parti 2 e 3.
24. È desiderabile che il segnale generato abbia un elevato contenuto in frequenza. Questo migliorerà la precisione della misura dei tempi di arrivo. Le frequenze tipiche in formazioni tenere sono fino a 500 Hz. In rocce dure, le frequenze possono raggiungere l'ordine dei kiloHertz.
25. Quando viene usato esplosivo, come segnale di tempo d'inizio (time break) può essere usato l'impulso elettrico di scoppio, ma questo è spesso impreciso per la sismica in foro con tempi di percorso brevi. Quando i tempi di percorso sono brevi a causa della scala ridotta del rilievo o della elevata velocità sismica del materiale, deve essere creato attorno alla carica esplosiva un circuito di trigger separato. Il tempo di inizio è fornito così dalla chiusura del contatto mediante il plasma dell'esplosione. Per altri tipi di sorgente sismica il contatto si ottiene con un sensore posizionato sulla sorgente o dal circuito di alimentazione di una sorgente controllata elettronicamente.
26. I geofoni sono raccomandati per rilievi in formazioni tenere. In rocce dure essi sono utilizzabili nel caso di distanze sorgente-ricevitore relativamente lunghe.
27. Gli accelerometri sono raccomandati per rilievi in rocce dure per le quali le componenti ad alta frequenza dell'onda possono raggiungere il ricevitore. In formazioni tenere, gli accelerometri sono raccomandati per distanze sorgente-ricevitore inferiori a 100 m.
28. *Tecnica della Proiezione Inversa (BPT).*

Nella spiegazione, al posto della velocità di propagazione viene usato il termine "lentezza", cioè il reciproco della velocità. Inoltre il numero di dati (dai punti di sorgente sismica a quelli di ricezione) è espresso con N ed il numero di blocchi con M.
In questo metodo quando i percorsi dei raggi passano attraverso una cella, la lentezza di tale cella viene calcolata mediando la lentezza di ciascun percorso (la lentezza viene calcolata dai tempi di percorso misurati e dalla lunghezza del percorso rettilineo tra il punto di sorgente e quello di ricezione) e dando peso alla lunghezza di ciascun percorso all'interno della cella.
Consideriamo il raggio i ($i = 1, 2, \ldots, N$).
La lentezza media lungo questo raggio (S_i) è espressa da:

$$S_i = T_{0i}/L_i$$

dove T_{0i} è il tempo di percorso misurato ed L_i è la lunghezza del raggio tra il punto di sorgente e quello di ricezione. La lentezza della cella k (S_k) è:

$$S_k = \sum_i (l_{ik} \cdot S_i) / \sum_i l_{ik}$$

dove l_{ik} è la lunghezza dei percorsi del raggio i-esimo nella cella k-esima ($k = 1, 2, \ldots, M$).
Queste equazioni possono essere usate iterativamente se, dopo il calcolo iniziale, al posto di T_{0i} si usano i residui dei tempi di percorso. Facendo ciò si ottiene l'algoritmo della Nota 29.

29. *Tecnica Iterativa di Ricostruzione Simultanea (SIRT)*
Nella spiegazione, al posto della velocità di propagazione viene usato il termine "lentezza", cioè il reciproco della velocità. Inoltre il numero di dati (dai punti di sorgente sismica a quelli di ricezione) è espresso con N ed il numero di blocchi con M.
In questo metodo i residui dei tempi di percorso dei raggi vengono distribuiti proporzionalmente lungo le celle attraverso le quali i raggi passano. Successivamente viene scelta una singola cella e calcolato il fattore di correzione della lentezza mediante tutti i residui dei tempi di percorso e le lunghezze dei raggi.
Consideriamo l'iterazione del ciclo I-esimo.
Se si indica con $S_k^{(I-1)}$ la lentezza della cella k-esima ($k = 1, 2, \ldots, M$) ottenuta con l'iterazione del ciclo $(I-1)$-esimo, allora la lentezza al ciclo I-esimo, $S_k(i)$ è

$$S_k^{(I)} = S_k^{(I-1)} + \Delta S_k$$

In questa formula ΔS_k viene calcolato nel seguente modo: dapprima si calcola il residuo del tempo di percorso $T_i^{(I-1)}$ come:

$$\Delta T_i^{(I-1)} = T_{0i} - T_{ci}^{(I-1)}$$

dove $T_{ci}(I-1)$ è il tempo di percorso teorico del raggio i-esimo ($i = 1, 2, \ldots, N$) per l'iterazione $(I-1)$-esima. Così come nella tecnica della proiezione inversa, il residuo del tempo di percorso distribuito lungo ciascuna cella (ΔT_{ik}) è espresso da:

$$\Delta t_{ik} = \Delta T_i^{(I-1)} \cdot l_{ik} / L_i$$

Il fattore di correzione della lentezza si ottiene con la seguente formula:

$$\Delta S_k = \sum_i \Delta t_{ik} / \sum_i l_{ik}$$

30. *Tecnica Iterativa dei Minimi Quadrati (ILST)*
Nella spiegazione, al posto della velocità di propagazione viene usato il termine "lentezza", cioè il reciproco della velocità. Inoltre il numero di dati (dai punti di sorgente sismica a quelli di ricezione) è espresso con N ed il numero di blocchi con M.
In questo metodo, allo scopo di ridurre i residui dei tempi di percorso per ogni percorso, viene usato il metodo dei minimi quadrati.
Consideriamo l'iterazione al ciclo I-esimo: in accordo con la

terminologia usata nella tecnica SIRT si determinerà S_k (k = 1, 2, ..., M) dove:

$$S_k^{(I)} = S_k^{(I-1)} + \Delta S_k$$

Se si considera il residuo del tempo di percorso dopo che la sua lentezza è stata corretta con ΔS_k, il tempo residuo del raggio i-esimo (i = 1, 2, ..., N), $\Delta T_i(I)$ è espresso come:

$$\Delta T_i^{(1)} = T_{0i} - \sum_k \left[\left(S_k^{(I-1)} + \Delta S_k \right) \cdot l_{ik} \right]$$

$$= T_{0i} - \sum_k S^{(I-1)} \cdot l_{ik} - \sum_k \Delta S_k \cdot l_{ik}$$

$$= T_{0i} - T_{ci}^{(I-1)} - \sum_k \Delta S_k \cdot l_{ik}$$

$$= \Delta T_i^{(I-1)} - \sum_k \Delta S_k \cdot l_{ik}$$

$$= T_{0i} - T_{ci}^{(I-1)} - \sum_k \Delta S_k \cdot l_{ik}$$

$$= \Delta T_i^{(I-1)} - \sum_k \Delta S_k \cdot l_{ik}$$

Nella formula di cui sopra $\Delta T_i^{(I-1)}$ e l_{ik} sono già note dall'iterazione al ciclo $(I-1)$-esimo già eseguita. Quindi, se il numero dei dati è sufficientemente grande rispetto al numero delle celle, è possibile usare il metodo dei minimi quadrati per determinare i valori di ΔS_k, in modo da ridurre i residui dei tempi di percorso $\Delta T_i^{(I)}$.

Bibliografia

1 INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS, (1981) – *Rock Characterization, Testing and Monitoring-ISRM Suggested Methods* (Edited by Brown E.T.). ISRM Commission on Testing Methods Pergamon Press, Oxford.

2 MCDONAL F.J., ANGONA F.A., MILLS R.L., SENGBUSH R.L., VAN NOSTRAND R.G. and WHITE J.E. (1958) – *Attenuation of shear and compressional waves in Pierre shale*. Geophysics 23 (3), pp. 421-439.

3 KUDO K. and SHIMA E. (1970) – *Attenuation of shear waves in soil*. Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ., 48, pp. 145-158.

4 BALLARD R.F., STOKOE K.H., and MCLEMORE R. (1983) – *Proposed standard method for cross-hole seismic testing*. Geotech. Test. J., 6, 4, pp. 210-219.

5 PAULSSON B.N.P., COOK N.G. and MCEVILLY T.V. (1985) – *Elastic wave velocities and attenuation in an underground granite repository for nuclear waste*. Geophysics, 50, 4, pp. 551-570.

6 AKI K. and LEE W.H.K. (1976) – *Determination of threee-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first P-arrival times from local earthquakes-I. A homogeneous initial model*. J. Geophys. Res,. 81, pp. 4381-4389.

7 MASON I.M. (1981) – *Algebraic reconstruction of a two-dimensional velocity inhomogeneity in the High Hazles seams of Thoresby Colliery*. Geophysics, 46, pp. 298-308.

8 BOIS P., LAPORTE M., LAVERGNE M. and THOMAS G. (1971) – *Essai de détermination automatique des vitessess par mesures entre puit*. Geophys Prospect 19, pp. 43-83.

9 BOIS P., LAPORTE M., LAVERGNE M. and THOMAS G. (1972) – *Well to well seismic measurements*. Geophysics, 37, pp. 471-480.

10 LYTLE R.J. and DINES K.A. (1980) – *Iterative ray tracing between boreholes for underground image reconstruction*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing GE-18, pp. 234-240.

11 PETERSON J.E. JR., PAULSSON B.N.P. and MCEVILLY T.V. (1985) – *Application of algebraic reconstruction techniques to crosshole seismic data*. Geophysics 50, pp. 1566-1580.

12 SAKAYAMA T., OHTOMO H., SAITO H and SHIMA H. (1987) – *Applicability and some problems of geophysical tomography techniques in estimation of underground structure and physical properties of rock*. Proc. 2nd Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics Kobe, Japan, Balkema, Rotterdam, vol. I, pp. 357-366.

13 HEELAN P.A. (1953) – *Radiation of a cylindrical source of finite length*. Geophysics 18, pp. 685-696.

14 OOMI M., KANEKO K. and INOUE M. (1982) – *Procedure of determination of velocity profiles from P- and S-waves for shallow down-hole surveys*. Butsuri-Tanko (Geophysical Exploration), 35, 2, pp. 103-108.

15 BUTLER D.K. and CURRO J.R. Jr. (1981) – *Crosshole seismic testing procedures and pitfalls*. Geophysics, 46, 1, pp. 23-29.

16 MEISSNER R. (1961) – *Wave-front diagrams from uphole shooting*. Geophys. Prospect., 9, pp. 533-543.

17 WONG J., HURLEY P. and WEST G.F. (1984) – *Crosshole audiofrequency seismology in granitic rocks using piezoelectric transducers as sources and detectors*. Geoexploration, 22, pp. 261-279.

18 RADCRIFF R.D., BALANIS C.A. and HILL H.W.Jr. (1984) – *A stable geotomography technique for refractive media*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing GE-22, pp. 698-703.

19 WONG J., HURLEY P. and WEST G.F. (1983) – *Crosshole seismology and seismic imaging in crystalline rocks*. Geophys. Res. Lett., 10, pp. 686-689.

20 COTE Ph. (1984) – *Imagerie sismique. Inversion en vitesse et facteur de qualité de mesures de transparence sismique entre forages. Application au contrôle des injection*. Rapp. Rech. LPC, Paris, 132, pp.1-86.

21 DEVANEY A.J. (1984) – *Geophysical diffraction tomography*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing GE-22, pp. 3-13.