

Misure di velocità di onde di taglio in laboratorio con l'impiego di trasduttori piezoelettrici

E. BRIGNOLI, M. GOTTI*

SOMMARIO. L'articolo illustra alcuni dispositivi, basati sull'impiego di ceramiche piezoelettriche, sviluppati per la misura della velocità di propagazione delle onde trasversali in provini di terreno, e descrive in dettaglio la metodologia sperimentale di prova e le tecniche interpretative sviluppate.

Le ceramiche impiegate per la generazione e ricezione delle onde trasversali sono del tipo a flessione e del tipo piano. Il programma sperimentale mette a confronto i risultati ottenuti con i due trasduttori ed utilizza come riferimento per la loro valutazione i risultati di prove parallele condotte con il classico dispositivo di colonna risonante. Le velocità determinate con i diversi sistemi risultano in buon accordo. Per le caratteristiche evidenziate, in particolare il trasduttore piano a taglio presenta notevoli prospettive di impiego futuro.

1. Introduzione

Il modulo dinamico iniziale di taglio del terreno costituisce un dato di ingresso fondamentale per tutti i tipi di analisi geotecniche dinamiche. Per questo motivo sono state sviluppate numerose tecniche sperimentali per pervenire alla sua determinazione.

Accanto ai metodi classici di misura in laboratorio (colonna risonante, triassiale ciclico, taglio torsionale, ecc.), in molti testi specialistici [PRAKASH, 1981; RICHART *et al.*, 1970] si menziona anche una tecnica di misura di tipo sonico. In questo tipo di prova, un'onda elastica viene generata da un trasduttore piezoelettrico posto ad un'estremità di un provino di terreno ed è ricevuta all'altra estremità da un'analogo trasduttore. La distanza tra i due trasduttori, L , ed il tempo richiesto dall'onda per percorrere questa distanza, t , sono utilizzati per il calcolo della velocità di propagazione, V , definita da:

$$V = L/t \quad (1)$$

Determinata la velocità di propagazione delle onde trasversali (S) si può calcolare il modulo iniziale tangente dalla relazione elastica:

$$G = \rho V_s^2 \quad (2)$$

dove G = modulo di taglio, V_s = velocità onde trasversali, ρ = massa volumica. Analogamente si può procedere con le onde di compressione (P).

LAWRENCE [1963, 1965] descrive una delle prime applicazioni di questa tecnica. Per generare e ricevere i segnali egli utilizza trasduttori piezoelettrici piani (shear plate). La cella triassiale utilizzata per

la misura di V_s su provini di argilla e sabbia dispone di alloggiamenti nel piedistallo di base e nel ripartitore superiore di carico in cui vengono sistemati i trasduttori.

Più tardi SHIRLEY e ANDERSON [1975] utilizzano un trasduttore costituito dall'unione di due cristalli piezoelettrici a polarizzazione contrapposta (bender) in grado di produrre e di rilevare onde di taglio. Per la capacità di sviluppare deformazioni relativamente ampie con una modesta eccitazione elettrica, il trasduttore tipo bender è stato largamente preferito a quello piano nelle successive applicazioni riportate in letteratura [SHIRLEY *et al.*, 1975; SHIRLEY *et al.*, 1978; TAYLOR, 1988; HORN, 1980-81; SCHULTHEISS, 1980-81; DE ALBA *et al.*, 1984; DYVIK *et al.*, 1985; RICHARDSON *et al.*, 1987; RICHARDSON, 1988].

A dispetto della apparente semplicità, il metodo sonico trova però ancora scarsa applicazione nei laboratori geotecnici a causa di problemi strumentali ed interpretativi. La presente nota descrive alcuni dispositivi, basati sull'impiego di trasduttori piezoelettrici, sviluppati per la misura della velocità delle onde trasversali in provini di terreno ed illustra i metodi interpretativi adottati ed i risultati ottenuti. Per consentire l'interpretazione delle misure con le onde S è stato necessario sviluppare anche trasduttori per la misura di onde P .

2]

2. Piezoelettricità e trasduttori piezoelettrici

Si dice piezoelettrico un materiale che sottoposto a deformazione meccanica produca una tensione elettrica e che, viceversa, subisca modificazioni nella forma quando gli sia applicato un campo elettrico.

La piezoelettricità può trovarsi in natura nei cristalli di quarzo e di tormalina, ma molto spesso nelle applicazioni industriali correnti è ottenuta artificialmente da particolari ceramiche, quali il titanato zir-

* M. Gotti - Divisione Territorio e Ambiente - ISMES.
Dott. Ing. E. Brignoli, Divisione Territorio e Ambiente - ISMES.

conato di piombo, il titanato di bario e il titanato di piombo. L'attivazione delle proprietà piezoelettriche nelle ceramiche (polarizzazione) è ottenuta mediante applicazione di un intenso campo elettrico continuo.

Il modo di deformarsi di un elemento polarizzato dipende dalla forma e composizione della ceramica, dalla direzione dell'asse di polarizzazione, dalla posizione degli elettrodi. In generale le ceramiche sono trattate per produrre (o reagire a) onde di compressione o di taglio, sebbene componenti spurie siano sempre presenti cosicché, per esempio, una ceramica che produca prevalentemente spostamenti di taglio genera anche piccoli spostamenti di compressione.

Le ceramiche per la produzione di onde P sono polarizzate nella direzione delle spessore con elettrodi che vengono applicati sulle facce normali alla direzione di polarizzazione (Fig. 1a).

Per la produzione e ricezione di onde di taglio si possono utilizzare, come già anticipato, trasduttori tipo bender o tipo shear plate.

Il primo consiste in due elementi snelli di piezoceramica rigidamente uniti attraverso una lamina metallica. Due sottili strati conduttivi sono applicati esternamente al trasduttore (Fig. 1b). La polarizzazione è tale che una differenza di potenziale applicata agli elettrodi causa la deformazione a flessione dell'intero elemento. Questi trasduttori sono generalmente commercializzati in due versioni che differiscono per il collegamento elettrico serie o parallelo dei due elementi polarizzati. La prima versione è da preferire nell'uso come ricevitore, in quanto consente di disporre in uscita di una tensione maggiore e pari alla somma dei potenziali disponibili agli elettrodi dei singoli elementi ceramici. La seconda risulta conveniente nell'uso come trasmettitore nei casi in cui si disponga per l'alimentazione di una sorgente di intensità limitata. Infatti con questo tipo di collegamento l'intera tensione disponibile è applicata a ciascuna ceramica anziché divisa tra le due, come nel collegamento tipo serie. Tuttavia, qualora si disponga di un adeguato sistema di amplificazione per l'alimentazione del trasmettitore (almeno 20V piccolo), l'adozione di un trasduttore bender tipo parallelo non è necessaria.

Infine, nel trasduttore a taglio tipo shear-plate, gli elettrodi sono applicati su due facce parallele alla direzione di polarizzazione (Fig. 1c).

In figura 1 è indicato per ciascuno dei tre tipi di trasduttori descritti il verso di deformazione nel funzionamento come trasmettitore, applicata agli elettrodi una tensione di polarità specificata. Una deformazione dello stesso verso causa nel trasduttore impiegato come ricevitore, la generazione di una ten-

sione di polarità invertita rispetto alla precedente.

Il comportamento delle ceramiche è caratterizzabile mediante alcuni parametri. Le grandezze d e g definiscono la qualità della ceramica rispettivamente per le funzioni di trasmettitore e di ricevitore; il coefficiente di accoppiamento k descrive il rendimento nella trasformazione di energia da elettrica in meccanica e viceversa; il fattore di qualità meccanica Q_m è un indice delle dissipazioni interne. Si possono così selezionare le ceramiche più adatte per i diversi usi. Per esempio, per l'uso geotecnico che verrà descritto nel seguito è conveniente disporre di materiali con un rapido decadimento delle oscillazioni dopo la sollecitazione.

3. Strumentazione impiegata

Nella ricerca qui presentata sono stati utilizzati tutti e tre i tipi di trasduttori descritti. La scelta delle ceramiche è stata effettuata tenendo conto delle prestazioni elettromeccaniche desiderabili in relazione anche al tipo di strumentazione impiegato e della disponibilità del materiale sul mercato.

Il trasduttore utilizzato per la generazione e ricezione di onde P è una ceramica (titanato zirconato di piombo, PZT-5A), prodotta dalla Vernitron Ltd. Le dimensioni sono 8mm per il diametro e 2mm per lo spessore.

I trasduttori tipo bender, prodotti dalla stessa casa, sono anch'essi in titanato zirconato di piombo (PZT5HN), e hanno altezza 20mm, larghezza 10mm e spessore 0.5mm.

La ceramica per i trasduttori piani a taglio è un titanato zirconato di piombo (HST 41), prodotto dalla Gulton. Le dimensioni sono 12.7mm di lunghezza, 12.7mm di larghezza e 6.3mm di spessore.

I trasduttori sono stati inseriti in speciali basi metalliche che sostituiscono il piedestallo ed il ripartitore di carico di una cella triassiale. Poiché si tratta di elementi ad alta impedenza, si è evitato il contatto con l'acqua mediante impermeabilizzazione. A tale scopo si è usata araldite a due componenti prodotta dalla Ciba Geigy. Questo materiale oltre ad essere un ottimo isolante elettrico, è sufficientemente duttile per permettere il movimento dei trasduttori ai quali conferisce inoltre robustezza.

I cavi elettrici usati per i collegamenti con i dispositivi esterni sono coassiali. Tubi di plastica li proteggono dall'acqua in cella. Il sistema prevede che in ciascuna base triassiale siano montati in modo permanente un trasduttore per onde P ed uno per onde S (Fig. 2).

Il primo, montato su un supporto che lo isola elettricamente dalla parte metallica, è completamente inserito nella base triassiale ed è a contatto con il provino attraverso lo strato impermeabilizzante di araldite.

L'isolamento elettrico e la impermeabilizzazione del trasduttore bender sono ottenuti attraverso l'applicazione di uno strato uniforme di resina epossidica (0.3mm). Il riempimento con silicone dell'in-

terstizio esistente tra il trasduttore e la base triassiale serve a prevenire l'infiltrazione di terreno, consentendo tuttavia il movimento al trasduttore. La soluzione evita inoltre i problemi legati alla saturazione di vuoti. Nella configurazione standard adottata, i trasduttori penetrano le estremità del campione per una lunghezza totale pari al 3% della lunghezza del provino.

Il trasduttore piano per onde S è anch'esso to-

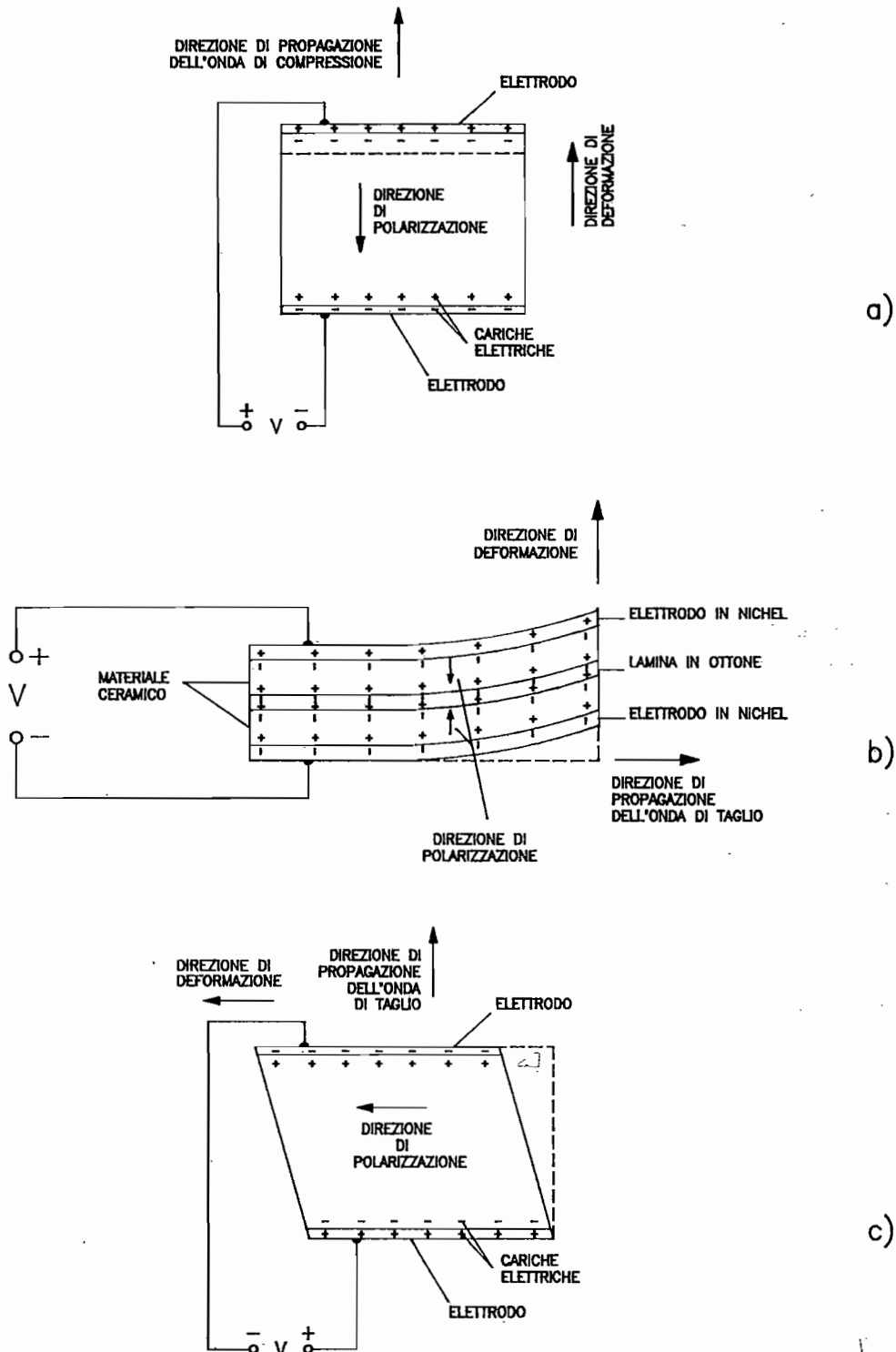
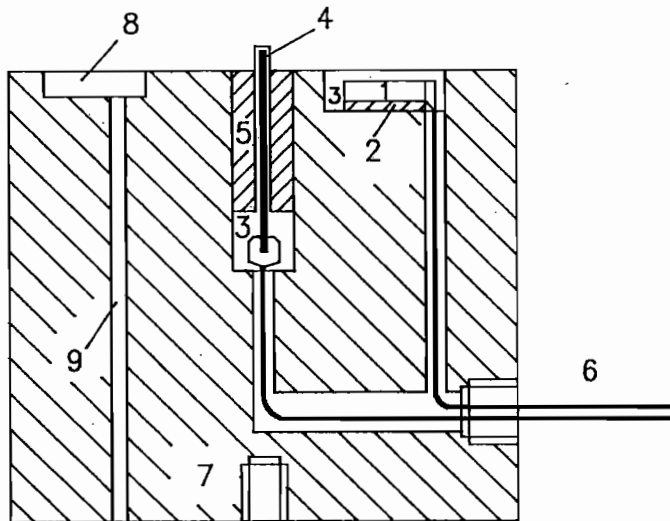
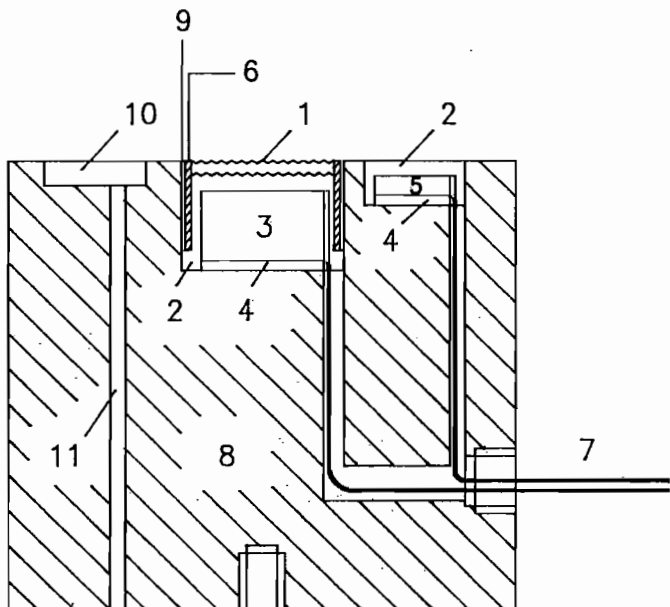


Fig. 1 - Schema dei trasduttori piezoelettrici : a) trasduttore a compressione, b) trasduttore a taglio tipo bender, c) trasduttore piano a taglio.



- 1 trasduttore a compressione
- 2 supporto isolante
- 3 resina epossidica
- 4 trasduttore bender
- 5 silicone
- 6 cavi elettrici
- 7 base per cella triassiale
- 8 pietra porosa
- 9 drenaggio

a) Trasduttore bender a taglio e trasduttore a compressione.



- 1 elemento rugoso
- 2 resina epossidica
- 3 trasduttore piano a taglio
- 4 supporto isolante
- 5 trasduttore a compressione
- 6 silicone
- 7 cavi elettrici
- 8 base per cella triassiale
- 9 interstizio ($\sim 0.2\text{mm}$)
- 10 pietra porosa
- 11 drenaggio

b) Trasduttore piano a taglio e trasduttore a compressione.

Fig. 2 - Disposizione dei trasduttori piezoelettrici nelle basi triassiali.

talmente inserito nella base triassiale e raggiunge il contatto con il terreno attraverso un elemento rugoso che ne migliora l'accoppiamento. Supporto isolante, resina epossidica e silicone sono impiegati con le stesse finalità già illustrate per i trasduttori precedentemente descritti.

Lo schema delle apparecchiature impiegate nelle misure è mostrato in figura 3. Il segnale di eccitazione, prodotto da un generatore di funzioni (Hewlett-Packard tipo 81654), è amplificato (amplificatore di potenza Bruel & Kjaer tipo 2713) e inviato al trasduttore piezoelettrico posto nella base inferiore della cella triassiale (trasmettitore). L'onda

trasmessa attraverso il provino di terreno è registrata all'altra estremità dal secondo trasduttore (ricevitore).

Il segnale di eccitazione e il segnale al ricevitore (dopo amplificazione) sono visualizzati su un oscilloscopio. Poiché i tempi impiegati dalle onde (specialmente da quelle P) per propagarsi da un'estremità all'altra del provino sono estremamente piccoli, è necessario disporre di un oscilloscopio di elevata risoluzione e precisione di misura. L'oscilloscopio analogico/digitale Tektronix 2230 utilizzato in questo lavoro dispone di 2 canali, di una larghezza di banda di 100MHz, di una velocità di campionamento

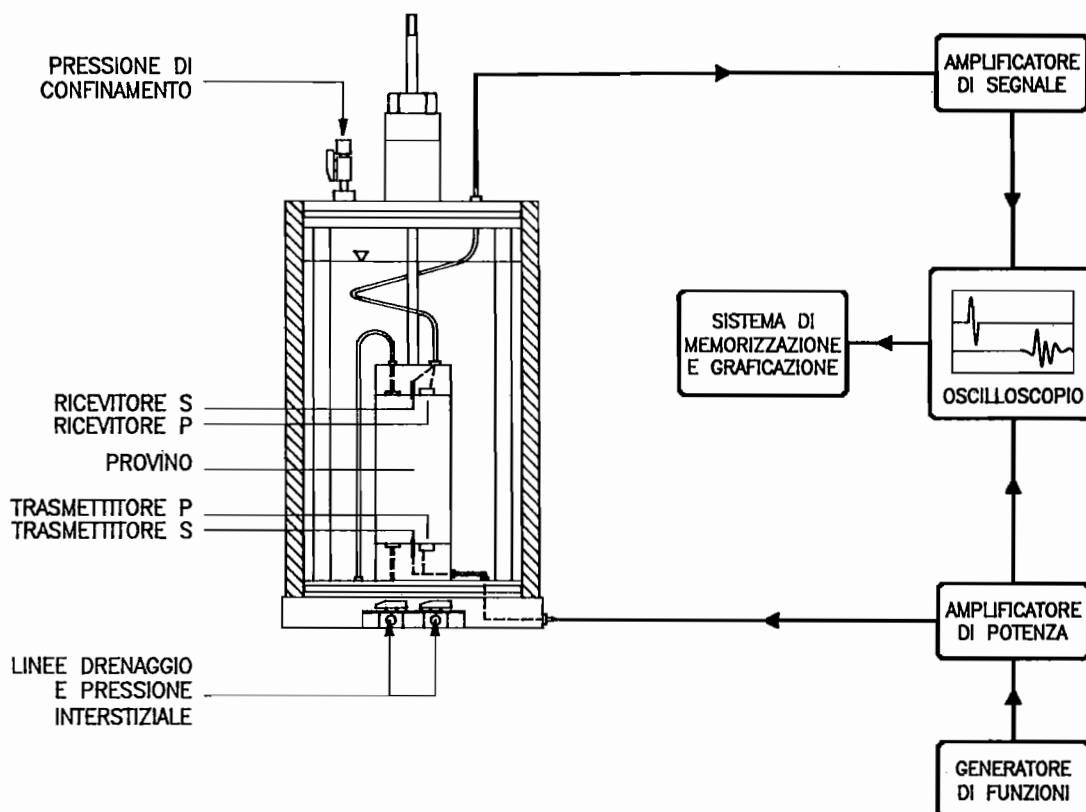


Fig. 3 - Rappresentazione schematica delle attrezzature e della strumentazione nell'assetto di prova.

digitale di 20×10^6 campioni al secondo. Un calcolatore per la memorizzazione su supporto magnetico delle tracce registrate dall'oscilloscopio completa il sistema di misura.

4. Messa a punto della procedura di prova

4.1. Calibrazioni e verifiche

La calibrazione del sistema di prova è necessaria per determinare il tempo di ritardo introdotto nelle misure dai dispositivi elettronici e dai materiali impiegati per rivestire le ceramiche. La calibrazione è stata eseguita ponendo i trasduttori in contatto diretto e misurando l'intervallo di tempo intercorso tra l'invio dell'impulso al trasmettitore e la registrazione dell'onda al ricevitore. In figura 4 è riportato un esempio delle tracce e dei tempi misurati. Le polarità iniziali dei segnali ai ricevitori (per gli intervalli di frequenze usati nelle misure) sono quelle prevedibili in base all'allineamento e alle direzioni di polarizzazione dei trasduttori impiegati.

Si è inoltre proceduto alla verifica dell'assenza di percorsi d'onda diversi da quello costituito dal campione di terreno. La cella è stata allestita come in una normale prova triassiale, ma senza montare il provino al suo interno. La distanza dei trasduttori è stata fissata attraverso il sistema di bloccag-

gio del pistone di carico verticale. Con la cella vuota in corrispondenza di impulsi P o S generati dall'emettitore non è stato registrato al ricevitore alcun arrivo di onde. Con la cella piena di acqua gli arrivi osservati sono risultati corrispondere a onde compressionali attraverso il fluido. L'unico significativo percorso delle onde durante le prove con il terreno è pertanto costituito dal provino.

4.2. Metodo di misura

Il metodo di misura consiste nell'eccitare il trasmettitore con un unico impulso sinusoidale e nell'individuare il primo arrivo dell'onda al ricevitore.

L'ampiezza prescelta dell'impulso è funzione del tipo di trasduttore impiegato ed è pari a 20 Volts picco-picco per il bender e a 130 Volts picco-picco per i trasduttori piani a taglio ed a compressione. Nel primo caso la limitazione alla tensione è imposta dall'esigenza di non indurre la depolarizzazione del trasduttore, nel secondo caso è la massima ottenibile dall'amplificatore impiegato. Si noti che la tensione di depolarizzazione è funzione dello spessore della ceramica, e pertanto per i trasduttori a taglio piani e a compressione essa raggiunge valori molto elevati.

La frequenza ottimale dell'impulso elettrico di eccitazione dipende da diversi fattori tra cui la rigidità del terreno ed il tipo di trasduttore sono i prin-

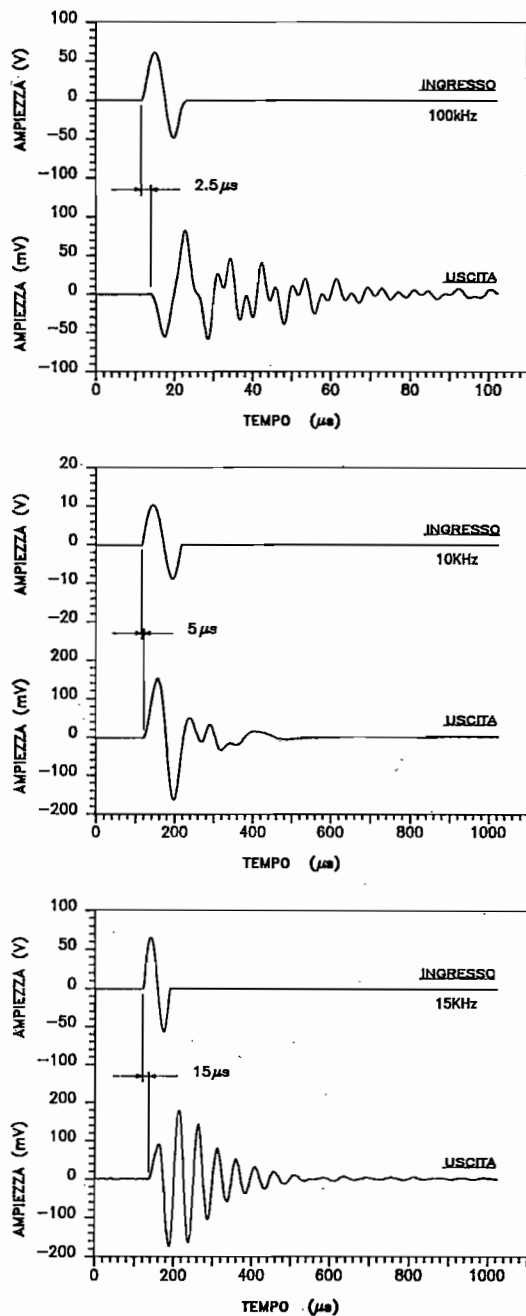


Fig. 4 - Calibrazione del sistema di misura : a) trasduttori a compressione, b) trasduttori a taglio tipo bender, c) trasduttori piani a taglio.

cipali. Durante ciascuna misura di velocità sono investigati i segnali al ricevitore per frequenze crescenti di eccitazione del trasmettitore. Lo scopo è l'individuazione della monofrequenza di alimentazione per la quale si dispone al ricevitore del segnale di massima ampiezza e con frequenza simile all'impulso impartito. Si è osservato che, in genere, soddisfatta la prima condizione la seconda è conseguente. Le misure di V_s sono generalmente eseguite con frequenze comprese tra 1 e 20kHz. La frequenza di 100kHz per misure di V_p in terreni saturi consente sempre condizioni ottimali di misura.

4.3. Interpretazione delle forme d'onda al ricevitore

La figura 5 mostra l'impulso fornito al trasmettitore e la relativa forma d'onda ottenuta al ricevitore durante una misura di V_p . La registrazione dell'impulso al trasmettitore, tenuto conto dei ritardi strumentali, consente la determinazione dell'istante di partenza dell'onda.

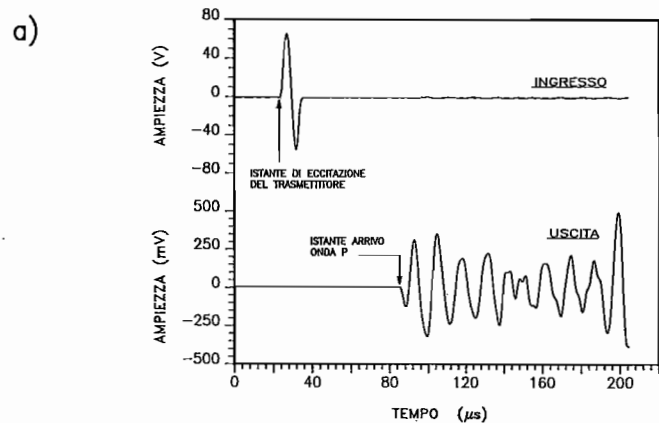


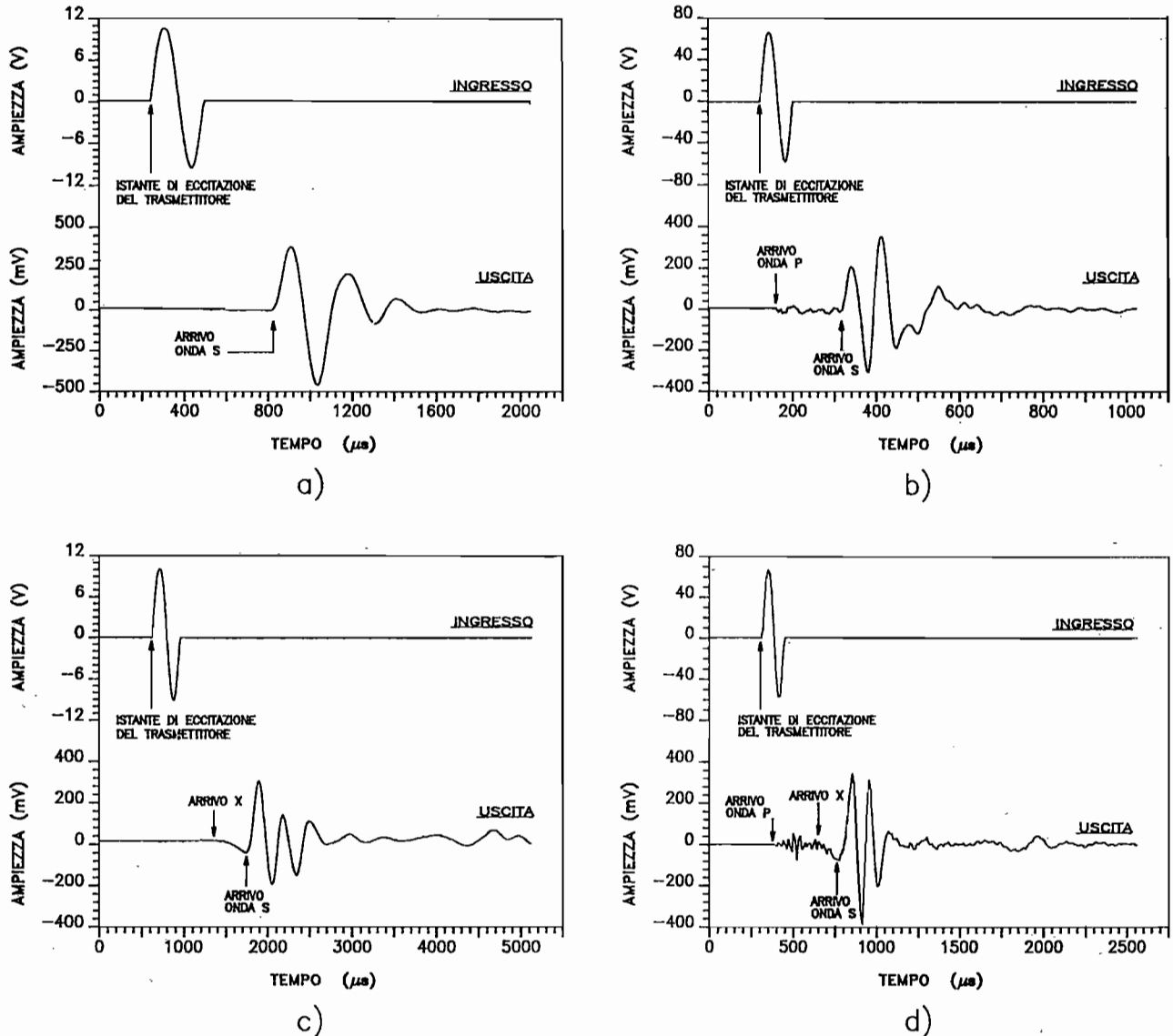
Fig. 5 - Esempio di misura del tempo di percorso di un'onda longitudinale.

Per quanto concerne l'arrivo, nelle misure di V_p la sua identificazione non presenta difficoltà essendo le onde di compressione le più veloci nel mezzo di propagazione e quindi le prime a giungere al ricevitore. Nella misura di V_s l'analisi del segnale al ricevitore richiede invece più cura perché le informazioni contenute nella traccia al ricevitore non sono relative alle sole onde trasversali e la loro forma può presentarsi più o meno complessa. Del resto, allo scopo di discriminare l'arrivo dell'onda suddetta da altri arrivi di onde, è inutile ricorrere all'inversione dell'impulso elettrico fornito al trasmettitore, poiché tutte le componenti dell'onda generata si invertono.

Sulla base dell'esperienza maturata su diversi materiali, condizioni di confinamento, caratteristiche geometriche, la maggioranza dei segnali elettrici registrati può essere ricondotta ad una delle quattro forme principali rappresentate in Fig. 6:

a) È la forma d'onda più semplice da interpretare, ma sfortunatamente la meno frequente. L'istante di arrivo dell'onda trasversale corrisponde al primo intenso arrivo di energia al ricevitore. La polarità iniziale del segnale è positiva.

b) L'onda trasversale, che trasporta ancora la maggior parte di energia, è preceduta con grande anticipo da un segnale di intensità minore. Confronti con le misure di V_p eseguite con i trasduttori a compressione, confermano che si tratta di onde compres-

Fig. 6 - Tipologia di segnali elettrici registrati al ricevitore nelle misure di V_s .

sionali nel sistema fluido-terreno. Questo tipo di segnale è più frequente nelle misure con trasduttori piani a taglio. La polarità iniziale dell'arrivo S è positiva, mentre è negativa per l'arrivo P.

c) Il primo arrivo di energia al ricevitore inizia nel punto indicato in figura con l'arrivo X'. La sua intensità cresce fino a che giunge nel punto indicato dalla seconda freccia (arrivo S), un segnale più intenso caratterizzato da un brusco cambio di polarità nell'onda registrata. Le ragioni per le quali si è ritenuto di individuare solo nella seconda parte della traccia l'arrivo delle onde S, cioè in corrispondenza del primo arrivo intenso di segnale con polarità positiva, sono discusse nel seguito.

d) È una forma d'onda mista in cui sono riconoscibili tutte e tre le componenti descritte negli esempi precedenti.

Nell'esempio di Fig. 10c il riconoscimento del-

l'istante di arrivo di V_s nel punto indicato si basa sulle seguenti considerazioni:

- la polarità e l'allineamento dei trasduttori suggeriscono per l'onda trasversale una polarità iniziale positiva;

- la componente con polarità negativa che precede l'arrivo dell'onda S tende ad attenuarsi, talvolta fino a scomparire completamente, all'aumentare della frequenza utilizzata per alimentare la sorgente.

In figura 7 sono riportate una serie di registrazioni eseguite con diverse frequenze per l'eccitazione della sorgente di onde S. Le misure sono state condotte su di un provino (diametro 5cm e altezza 10cm) saturo di limo con argilla di bassa consistenza (coesione non drenata 0.025 MPa); consolidato isotropicamente al valore di tensione di 25kPa. Per ciascuna registrazione sono indicate la frequenza dell'impulso sinusoidale di eccitazione (le cui tracce non

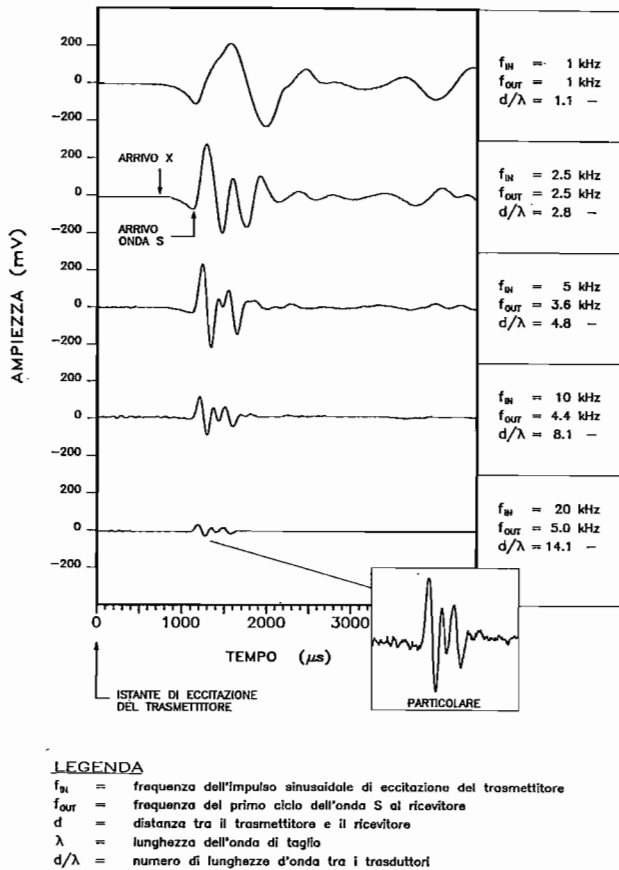


Fig. 7 - Misura di V_s : tracce al ricevitore per diverse frequenze di eccitazione del trasmettitore.

sono riportate), la frequenza del primo ciclo dell'onda registrata stimato come primo arrivo di S, ed il rapporto d/λ (dove d è la distanza tra i trasduttori e λ è la lunghezza dell'onda trasversale) che rappresenta il numero di lunghezze d'onda tra i due trasduttori. A causa del comportamento dissipativo del terreno, ad alte frequenze del segnale di eccitazione, la frequenza predominante del segnale al ricevitore è notevolmente inferiore a quella di eccitazione. Per questa ragione il valore della lunghezza d'onda λ (definita dal rapporto V_s/f , dove V_s e f sono rispettivamente la velocità dell'onda di taglio e la frequenza) utilizzata per definire il rapporto d/λ è riferita alla media delle frequenze del segnale di ingresso e di uscita.

In sintesi, dalle esperienze condotte risulta che:

- la componente del segnale con polarità negativa (arrivo x) che precede l'arrivo stimato dell'onda di taglio è più intensa per basse frequenze di alimentazione del trasmettitore, mentre tende ad attenuarsi per frequenze crescenti (cioè quando è maggiore il numero di lunghezze d'onda tra i trasduttori);
- l'arrivo di questa componente non presenta uno stacco brusco dal segnale di zero tale per cui sia generalmente bene individuabile l'esatto istante di ricezione;

- le misure di V_p eseguite in terreni saturi con l'uso di trasduttori a compressione evidenziano che le onde P nel sistema fluido-terreno sono molto più veloci dell'arrivo x in esame (si veda Fig. 10d).

Ulteriori esperienze condotte su provini secchi rivelano una sostanziale similitudine tra gli arrivi delle onde longitudinali rilevati con trasduttori a compressione e gli arrivi x rilevati con trasduttori a taglio. I risultati di una di queste prove sono graficati in figura 8, mentre un esempio delle tracce registrate è presentato in figura 9. Il provino analizzato (diametro 5cm e altezza 10cm) è un limo con argilla sabbioso preparato con la tecnica della sottocompattazione descritta da LADD [1978] adottando una densità secca iniziale di 1.52 t/m^3 e un grado di sottocompattazione pari al 3%.

Sulla base di questi dati si può ipotizzare che l'arrivo x, che precede quello delle onde S in figura 6c, 6d, 7, 9, possa rappresentare un effetto di campo vicino (near-field). Analisi teoriche dimostrano infatti che, in presenza di un fronte d'onda sferico generato da una sorgente di soli spostamenti di taglio, nella direzione sorgente-ricevitore contemporaneamente al segnale con velocità V_s si propaga anche un segnale con velocità di onde compressionali. Quest'ultimo ha polarità opposta rispetto alla componente con velocità V_s e la quantità di energia trasportata decade rapidamente al crescere del numero di lunghezze d'onda tra sorgente e ricevitore. Sebbene la componente di campo vicino viaggi alla velocità delle onde compressionali, essa non rappresenta un movimento longitudinale (compressione e estensione) ma ancora un movimento trasversale giacché il movimento delle particelle è perpendicolare alla direzione di propagazione [SALINERO *et al.*, 1986]. Vista la similitudine si può ipotizzare anche per le situazioni indagate sperimentalmente l'esistenza di un fenomeno equiparabile a quello di campo vicino.

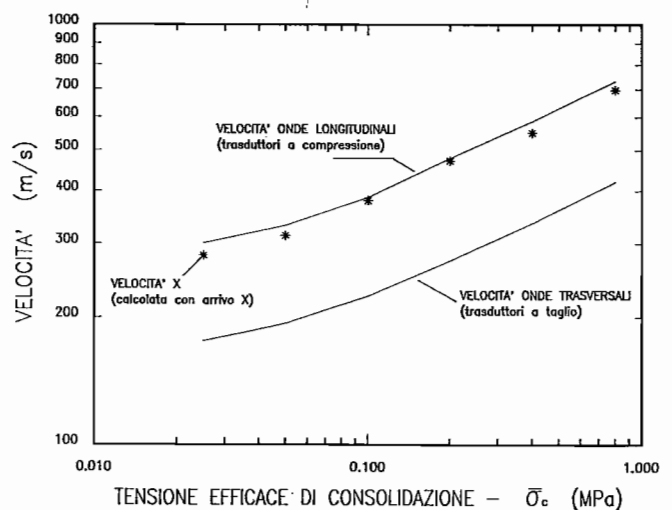


Fig. 8 - Misure di velocità su un provino secco.

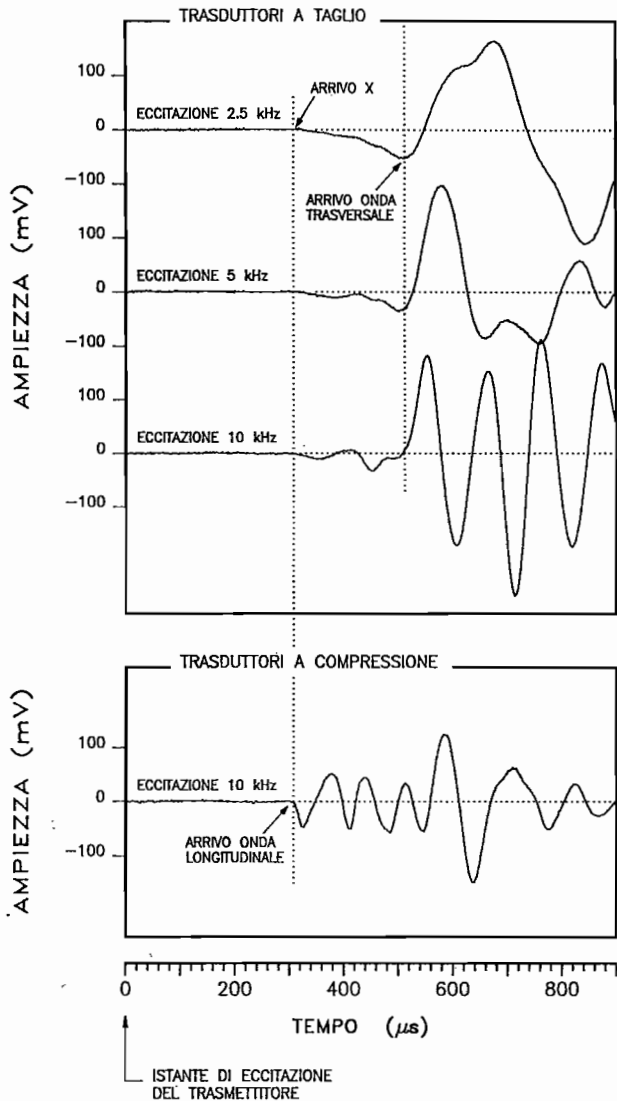


Fig. 9 - Misure di velocità su un provino secco : esempio dei segnali elettrici ai ricevitori.

4.4. Definizione della lunghezza di percorso dell'onda

La definizione della lunghezza di percorso dell'onda richiede alcune considerazioni nel caso in cui i trasduttori utilizzati siano del tipo bender. Mentre i trasduttori a taglio piani sono completamente inseriti nelle basi triassiali e per essi quindi il percorso dell'onda è pari all'altezza del provino, i trasduttori a tipo bender penetrano nel terreno, introducendo ambiguità sulla distanza da utilizzare nel calcolo della velocità. Per avere una verifica sperimentale sono state eseguite misure di velocità su tre provini simili (diametro 5cm e altezza 10cm) ricostruiti con sabbia, con l'impiego rispettivamente di trasduttori shear-plate, di trasduttori bender aventi una penetrazione nel terreno pari al 3% (trasduttori standard) e di trasduttori bender aventi una penetrazione pari al 14%.

I risultati presentati in figura 10 mostrano il modulo di taglio G a diverse tensioni di confinamento. È evidente come solo considerando la lunghezza di percorso pari alla distanza punta-punta dei trasduttori bender vi sia perfetto accordo dei risultati per le tre prove diagrammate.

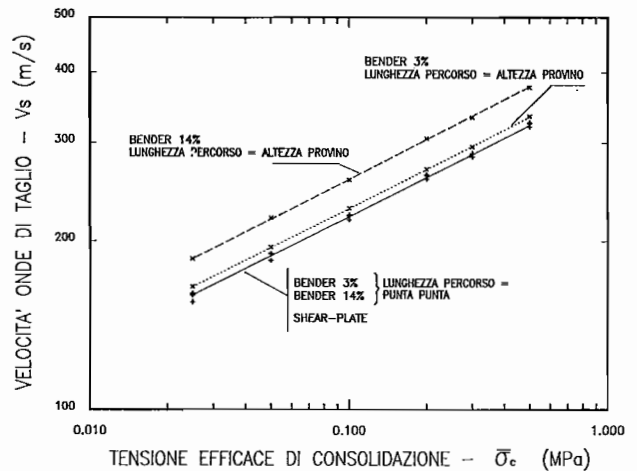


Fig. 10 - Determinazione della lunghezza di percorso dell'onda.

5. Programma sperimentale

Per confrontare le prestazioni dei trasduttori a taglio di tipo piano e bender sono state condotte prove in cella triassiale su provini saturi di diametro 5cm e altezza 10cm, utilizzando come riferimento i risultati di prove di colonna risonante eseguite sullo stesso materiale e con le stesse condizioni tensionali.

Per le prove si sono utilizzati provini ricostruiti di caolino, limo con argilla di Pontida e sabbia del Ticino. Le principali proprietà indice dei materiali sono riassunte in tabella 1; le relative curve granulometriche sono diagrammate in figura 11.

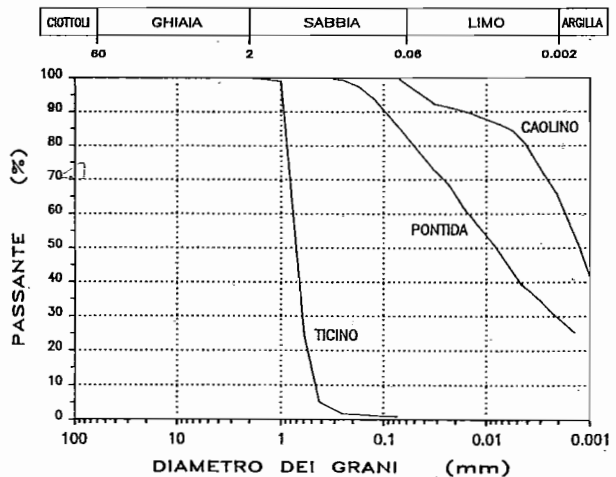


Fig. 11 - Curve granulometriche dei terreni impiegati nel programma sperimentale.

I provini di Pontida e di caolino sono stati ricavati per fustellazione da un campione di 50cm di diametro preparato in consolidometro. Raggiunta la massima tensione verticale efficace prevista (pari a 150 kPa per Pontida ed a 200 kPa per il caolino), il campione è stato scaricato per gradini in modo da raggiungere le condizioni di equilibrio, prima di rimuoverlo dalla macchina. I provini sono stati ricavati ad una distanza dal bordo del campione superiore a 5cm, al fine di evitare possibili effetti di disuniformità.

I provini di sabbia del Ticino sono stati preparati invece usando la tecnica della sottocompattazione descritta da LADD [1978] adottando una densità relativa nominale di ricostruzione pari al 60%, un contenuto d'acqua del 6%, e un grado di sottocompattazione pari al 5%.

Prima di essere consolidato, ciascun provino è stato saturato con l'applicazione di una contro pressione, il cui valore è stato incrementato per gradini fino ad ottenere un soddisfacente valore del parametro B di Skempton (> 0.95). Per i provini incoerenti preparati con il metodo della sottocompattazione la saturazione è stata preceduta dalla circolazione di anidride carbonica e di acqua deaerata dal basso verso l'alto.

Completata la saturazione, i provini sono stati consolidati ai valori di tensione prestabiliti. Le variazioni di altezza ed il volume di acqua in entrata o uscita dal terreno durante le fasi di saturazione e consolidazione, sono stati misurati rispettivamente con comparatori lineari di spostamento e burette graduate.

Le misure dei tempi di percorso delle onde longitudinali e trasversali sono state eseguite con l'impiego dei trasduttori piezoelettrici al termine della consolidazione. Per la calcolazione della velocità, il tempo misurato è stato depurato dal ritardo del sistema di misura. Velocità e moduli sono stati ottenuti applicando le equazioni (1) e (2). Poiché i livelli di deformazione prodotti dai trasduttori piezoelettrici sono estremamente piccoli (inferiori a 10-4%), il modulo G ottenuto è stato considerato iniziale.

Campioni preparati nello stesso modo sono stati sottoposti a prova di colonna risonante in un apparecchio fixed-free: la procedura adottata per la prova è stata quella ASTM [1987].

5.1. Analisi dei risultati

Le velocità ottenute sono diagrammate nelle figure 12, 13 e 14, in funzione della tensione di confinamento.

I valori di V_s ottenuti con trasduttori bender sulla sabbia del Ticino sono risultati superiori di circa il

3% ai corrispondenti ottenuti dalle misure con trasduttore piano. Mediamente i valori di V_s ottenuti con misure soniche sono risultati maggiori di circa l'8% rispetto ai dati di colonna risonante.

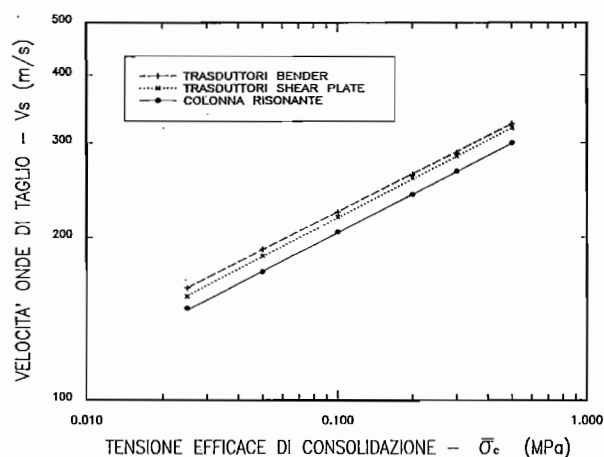


Fig. 12 - Ticino : variazione della velocità delle onde di taglio in funzione della tensione isotropa efficace di consolidazione.

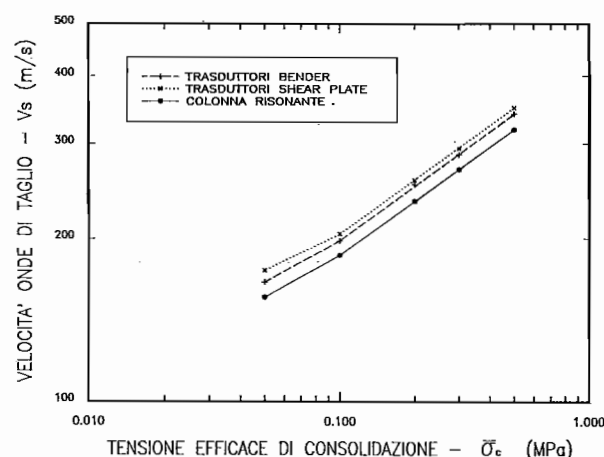


Fig. 13 - Pontida : variazione della velocità delle onde di taglio in funzione della tensione isotropa efficace di consolidazione.

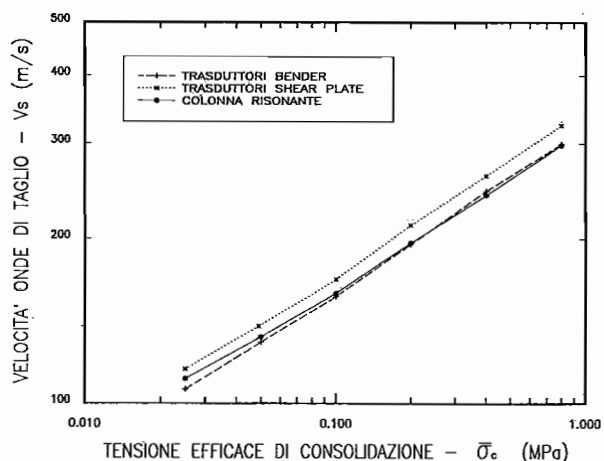


Fig. 14 - Caolino : variazione della velocità delle onde di taglio in funzione della tensione isotropa efficace di consolidazione.

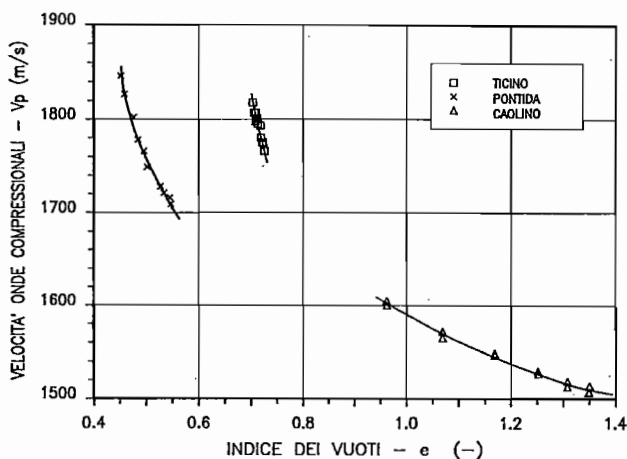


Fig. 15 - Ticino, Pontida, Caolino : variazione della velocità delle onde compressionali in funzione della tensione isotropa efficace di consolidazione.

PROPRIETA'		TERRENO		
		TICINO	PONTIDA	CAOLINO
peso specifico	(-)	2.68	2.77	2.63
limite liquido	(%)	-	24	53
indice di plasticita'	(%)	-	11	25
composizione granulometrica	sabbia	100	17	2
	limo	-	54	34
	argilla	-	29	64
frazione particelle piu' fini di 0.074 mm	(%)	-	86	100
D ₅₀	(mm)	7.10E-1	8.04E-3	1.24E-3
$\gamma_{max} - \gamma_{min}$	(t/m ³)	1.667-1.397	-	-

Tab. 1 - Proprietà indice dei terreni utilizzati nel programma sperimentale.

Per i campioni di Pontida i valori di V_s ottenuti con trasduttori shear plate sono risultati invece superiori di circa il 2% ai corrispondenti ottenuti sul provino testato con bender. Mediamente i valori di V_s ottenuti con misure soniche sono risultati maggiori di circa l' 8% rispetto ai dati di colonna risonante.

Le prove su caolino hanno registrato la maggiore divergenza tra le misure soniche condotte con i due diversi tipi di trasduttori piezoelettrici. I valori di V_s ottenuti con trasduttori piani sono superiori di circa l' 8% rispetto ai corrispondenti ottenuti con trasduttori bender. I dati di colonna risonante per bassi valori di tensione di confinamento (25-100 kPa) si pongono in posizione intermedia rispetto alle misure soniche, mentre tendono a sovrapporsi ai valori da bender per tensioni maggiori. La sensibile diversità nel confronto bender - shear plate è probabilmente da attribuirsi alle caratteristiche del materiale. Sebbene l'in-

dice dei vuoti dei provini analizzati sia quasi coincidente nei tre casi, si sono registrate sensibili differenze nelle variazioni di altezza durante la consolidazione. I due provini più simili per comportamento in fase di consolidazione (colonna risonante e shear plate) ripropongono una divergenza tra misure soniche con trasduttori piezoelettrici e colonna risonante simile a quella riscontrata nelle prove su Pontida e Ticino.

Dall'analisi dei risultati si può notare una tendenza per la metodologia sonica a fornire valori di V_s superiori a quelli ottenibili con dispositivo di colonna risonante. Possibili motivazioni sono le metodologie di prova diverse, i diversi livelli di deformazione, le diverse frequenze di misura. Le differenze riscontrate tra misure effettuate con trasduttori bender e shear plate sui campioni di sabbia del Ticino e di limo con argilla di Pontida (circa il 3% in termini di V_s) possono rientrare nell'ambito della normale dispersione sperimentale.

L'impiego di trasduttori a compressione nel corso delle prove ha consentito di ricavare il diagramma di figura 18, dal quale si evidenzia come la velocità delle onde P sia particolarmente sensibile alle variazioni di stato di addensamento del terreno e risultati superiore alla velocità di propagazione nell'acqua (pari a circa 1480 m/s, a 21 gradi centigradi), con una tendenza a diminuire all'aumentare dell'indice dei vuoti.

6. Conclusioni

Le misure di velocità delle onde elastiche V_p e V_s su provini di terreno possono essere convenientemente eseguite in laboratorio attraverso l'impiego di trasduttori piezoelettrici. Il modesto costo della strumentazione elettronica, la semplicità e l'immediatezza della misura, nonché la possibilità di eseguire la misura durante altre prove meccaniche rendono questa tecnica alquanto interessante.

Le misure di V_p e V_s estese alle prove triassiali o a qualsiasi altra prova di laboratorio, oltre che fornire indicazioni sulle caratteristiche dinamiche dei terreni, possono rappresentare un'informazione complementare per l'analisi e l'interpretazione dei dati. La misura di V_p tra l'altro, può costituire un metodo alternativo per la verifica della saturazione del terreno.

Oltre al trasduttore bender, diffusamente descritto in letteratura, è stato sperimentato un trasduttore piano a taglio che ha fornito risultati di qualità equiparabile. Questo trasduttore è preferibile al bender nelle applicazioni in terreni di consistenza elevata, poiché non richiede la penetrazione del trasduttore nel terreno. In generale i segnali più intensi sono

ottenuti con i trasduttori piani a taglio nei terreni compatti, mentre con i trasduttori a flessione nei terreni soffici.

La metodologia di prova adottata ha consentito in tutti i casi esaminati una buona definizione della velocità delle onde, anche se un'interpretazione esauritiva delle tracce registrate richiede ancora approfondimenti.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare i colleghi Flaminio Baggi, Edoardo Ravasio e Roberto Pensieri della Divisione Geofisica dell'Ismes, per il supporto fornito in fase iniziale di allestimento della strumentazione, e per la collaborazione nelle fasi di interpretazione dei risultati. Un particolare ringraziamento è dovuto al prof. Kenneth H. Stokoe (Università di Austin, Texas) per i preziosi consigli e incoraggiamenti elargiti durante tutto il periodo di svolgimento della ricerca.

Si ringrazia infine il prof. Michele Jamiolkowski (Politecnico di Torino) per il contributo, sinceramente apprezzato, nella fase di sintesi e revisione del lavoro.

Simbologia

B	=	parametro di Skempton
d	=	distanza tra i trasduttori
D ₅₀	=	diametro medio dei grani
e	=	indice dei vuoti
f	=	frequenza
G	=	modulo di taglio
H	=	altezza provino
L	=	lunghezza di percorso dell'onda
t	=	tempo di percorso dell'onda
T	=	periodo dell'onda
V _p	=	velocità onde compressionali
V _s	=	velocità onde trasversali
γ _{max}	=	densità massima del terreno
γ _{min}	=	densità minima del terreno
λ	=	lunghezza d'onda
ρ	=	massa volumica
σ' _c	=	tensione isotropa efficace di consolidamento

BIBLIOGRAFIA

ASTM D4015-87 - *Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soil by the Resonant-Column Method.*

- DE ALBA P., BALDWIN K., JANOO V., ROE G., LEIKKOL B. (1984) - *Elastic Wave Velocities and Liquefaction Potential.* Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, vol. VII, n. 2, June.
- DYVIK R., MADSHUS C. (1985) - *Lab Measurements of Gmax using Bender elements.* Proceedings of Advances in the Art of Testing Soil Under Cyclic Loading, ACE Convention in Detroit, Michigan.
- HORN I.W. (1980-81) - *Some Laboratory Experiments on Shear Wave Propagation in Unconsolidated Sands.* Marine Geotechnology, vol. IV, n. 1.
- LADD R.S. (1978) - *Preparing Test Specimens using Undercompaction.* Geotechnical Testing Journal, vol. I, n. 1, March.
- LAWRENCE F.V. (1963) - *Propagation of Ultrasonic Waves through Sand.* Research Report R 63-8, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, March.
- LAWRENCE F.V. (1965) - *Ultrasonic Shear Wave Velocity in Sand and Clay.* Research Report R65-05, Soil Publication n.175, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, January.
- PRAKASH S. (1981) - *Soil Dynamics.* Mc Graw-Hill.
- RICHARDSON M.D. (1988) - *Spatial Variability of Superficial Shallow Water Sediment Geoacoustic Properties.* Ocean Seismo-Acoustics, Edited by Tuncay Akal and Jonathan M. Berkson, Nato Conference Series.
- RICHARDSON M.D., CURZI P.V., MUZI E., MIASCHI B., BARBAGELATA A. (1987) - *Measurement of Shear Wave Velocities in Marine Sediments.* Acoustics and Ocean Bottom, II Fase Conference, Madrid.
- RICHART F.E., HALL J.R., WOODS R.D. (1970) - *Vibrations of Soils and Foundations.* Prentice-Hall.
- SALINERO I.S., ROESSET J.M., STOKOE K.H. (1986) - *Analytical Studies of Body Wave Propagation and Attenuation.* Geotechnical Engineering Report GR86-15, Geotechnical Engineering Center, Civil Engineering Department, The University of Texas at Austin, September.
- SCHULTHEISS P.J. (1980-81) - *Simultaneous Measurement of P&S Wave Velocities during Conventional Laboratory Soil Testing Procedures.* Marine Geotechnology, vol. 4, n. 4.
- SHIRLEY D.J., ANDERSON A.L. (1975) - *Acoustical and Engineering Properties of Sediments.* Applied Research Laboratories, the University of Texas at Austin, Report n. ARL-TR-75-58.
- SHIRLEY D.J., BELL D.W. (1978) - *Acoustic of in Situ and Laboratory Sediments.* Applied Research Laboratories, the University of Texas at Austin, Report n. ARL-TR-78-36.
- TAYLOR SMITHS D. (1988) - *Geotechnical Characteristics of the Sea Bed related to Seismo-Acoustic.* Ocean Seismo-Acoustics, Edited by Tuncay Akal and Jonathan M. Berkson, Nato Conference Series.

SUMMARY

Laboratory measurement of shear wave velocity of soil with piezo-transducers.

The article illustrates some devices, based on the use of piezoelectric ceramics, developed for the measurement of seismic waves propagation velocity in soil samples. The experimental methodology and the interpretative technique are described in detail.

Both bender and flat ceramics are used for the generation and receipt of the transverse waves. Results from the two types of ceramics are compared with one another within the experimental program and are both compared with the results of a parallel program performed in the resonant column device. The velocities determined via the various systems compare well with one another. In particular, the flat shear transducer presents notable potential for future use.