

# Prove in sito mediante dilatometro sismico (SDMT)

Marchetti D.  
Studio Prof. Marchetti, Roma

Volume  
Protezione civile

Marchetti S., Monaco P., Totani G.  
Università dell'Aquila – Dipartimento Ingegneria Strutture Acque e Terreno

## SOMMARIO

Il dilatometro sismico (SDMT) è una combinazione del dilatometro standard (DMT) con un modulo sismico per la misura della velocità delle onde di taglio  $V_S$ . L'articolo riassume l'esperienza acquisita negli ultimi anni con l'esecuzione di una grande quantità di prove SDMT in numerosi siti. Vengono descritte l'attrezzatura e la procedura di prova SDMT, confronti tra misure di  $V_S$  ottenute da SDMT e da altre prove ed una selezione di risultati SDMT. Si menzionano inoltre i temi di ricerca più attuali su uso ed applicazioni di SDMT, in particolare riguardanti le curve di decadimento del modulo all'aumentare della deformazione e la resistenza alla liquefazione di sabbie a partire da risultati SDMT.

Parole chiave: dilatometro sismico SDMT, dilatometro piatto DMT, velocità onde di taglio  $V_S$ , curve  $G-\gamma$ , liquefazione

## 1 INTRODUZIONE

Il dilatometro sismico (SDMT) combina le tradizionali caratteristiche del dilatometro piatto DMT (Marchetti, 1980) con la capacità di misurare la velocità delle onde di taglio  $V_S$ . Inizialmente concepito per ricerca, negli ultimi anni SDMT è gradualmente entrato nell'uso comune nelle indagini geotecniche. Le principali motivazioni alla base dello sviluppo e della diffusione di SDMT sono:

- Richiesta crescente per analisi sismiche, per le quali  $V_S$  è un dato di input indispensabile e "multiuso". Un impulso in tale direzione è fornito anche dalle recenti normative (OPCM 3274/2003, D.M. 14.9.2005) che, in linea con l'Eurocodice 8, prescrivono la determinazione di  $V_S$  nei primi 30 m nei siti ricadenti in zona sismica (la maggior parte del territorio nazionale).
- Riconoscimento dell'importanza di conoscere il comportamento dei terreni a piccole deformazioni ( $V_S$  fornisce il modulo di taglio a piccole deformazioni  $G_0$ ) e la non linearità della rigidità al variare della deformazione (curve  $G-\gamma$ ).
- Richiesta crescente per analisi di liquefazione.
- Disponibilità dei risultati DMT usuali (ad es. modulo di deformazione  $M_{DMT}$ ) per applicazioni di progetto correnti (ad es. previsione di cedimenti, probabilmente la migliore applicazione della prova DMT).

Questo articolo presenta i risultati più significativi accumulati nel periodo 2004-2006 in oltre 30 siti indagati con SDMT, in Italia e nel mondo. Per quanto riguarda esecuzione, interpretazione ed applicazioni della prova DMT tradizionale (non sismica) si rimanda alla letteratura disponibile. Il riferimento più completo è il rapporto del Comitato Tecnico TC16 ISSMGE (2001), anche in versione italiana (Marchetti et al., 2001).

## 2 IL DILATOMETRO SISMICO (SDMT)

Il dilatometro sismico (SDMT) è una combinazione della lama DMT standard con un modulo sismico per la misura della velocità di propagazione delle onde di taglio  $V_S$ . La prova è concettualmente simile alla prova con cono sismico SCPT. Il modulo sismico (Fig. 1a) è costituito da un corpo cilindrico posto sopra la lama DMT, munito di due ricevitori distanti 0.5 m. Il segnale è amplificato e digitalizzato in profondità. La configurazione *true-interval* a due ricevitori evita possibili inesattezze nella determinazione dello zero dei tempi dall'impatto, talora riscontrate nella configurazione *pseudo-interval* con un solo ricevitore. Inoltre la coppia di sismogrammi registrata dai due ricevitori ad una data profondità di prova corrisponde allo stesso colpo, anziché a colpi successivi non necessariamente identici, con sensibile miglioramento della ripetibilità delle misure di  $V_S$  (ripetibilità osservata  $\approx 1$  m/s).  $V_S$  è ottenuta (Fig. 1b) come rapporto tra la differenza di distanza tra la sorgente e i due ricevitori ( $S_2 - S_1$ ) e il ritardo dell'arrivo dell'impulso dal primo al secondo ricevitore ( $\Delta t$ ). Le misure di  $V_S$  sono effettuate ogni 0.5 m di profondità. L'energizzazione avviene in superficie (Fig. 3) mediante un martello a pendolo ( $\approx 10$  kg) che percuote orizzontalmente una base di ferro parallelepipeda pressata verticalmente contro il terreno (grazie al peso del camion) ed orientata con asse longitudinale parallelo all'asse dei ricevitori, in modo che essi offrano la massima sensibilità all'onda di taglio generata. La Fig. 4 mostra un esempio di sismogrammi ottenuti da SDMT a varie profondità di prova nel sito del Fucino (è buona pratica riportare affiancati i sismogrammi registrati e rifasati secondo il ritardo calcolato).

I risultati SDMT sono generalmente elaborati in forma grafica come mostrato nell'esempio in Fig. 7 (Fiumicino-Le Vignole). Il profilo di  $V_s$  è riportato a fianco di quattro profili DMT base – indice di materiale  $I_D$  (tipo di terreno), modulo di deformazione confinato  $M$ , resistenza al taglio non drenata  $c_u$  e indice di spinta orizzontale  $K_D$  (correlato a OCR) – ottenuti da correlazioni DMT usuali. Dalla Fig. 7 si evince la elevata ripetibilità delle misure di  $V_s$  – oltre che degli altri profili.

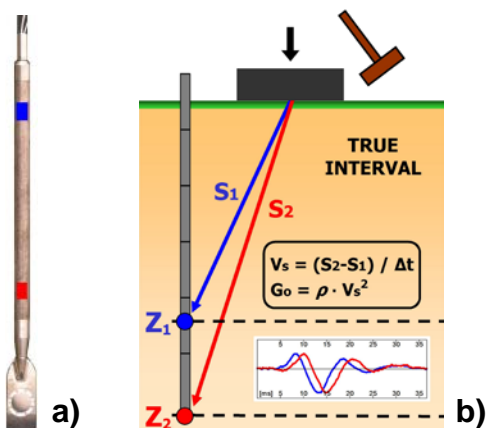


Fig 1. (a) Lama DMT e modulo sismico.  
(b) Schema della prova con SDMT.



Fig 2. Attrezzatura SDMT



Fig 3. Sorgente di energizzazione in superficie

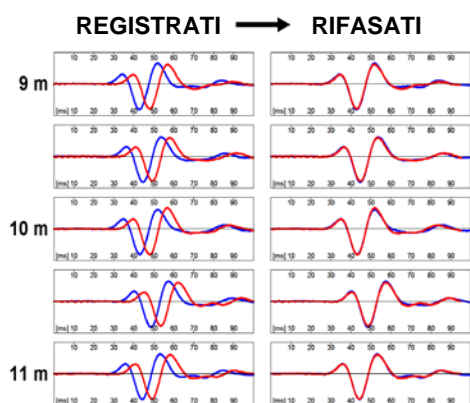


Fig 4. Esempio di sismogrammi ottenuti da SDMT a varie profondità di prova nel sito del Fucino (Telespazio) – registrati e rifasati secondo il ritardo calcolato

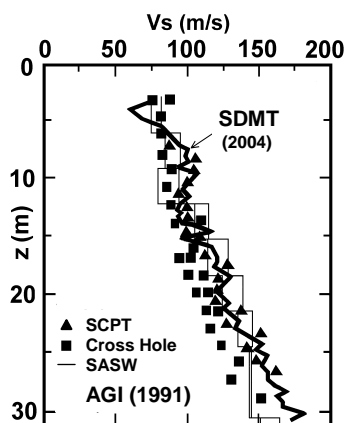


Fig 5. Confronto profili di VS da SDMT e da SCPT, Cross-Hole e SASW (AGI, 1991) nel sito di ricerca del Fucino

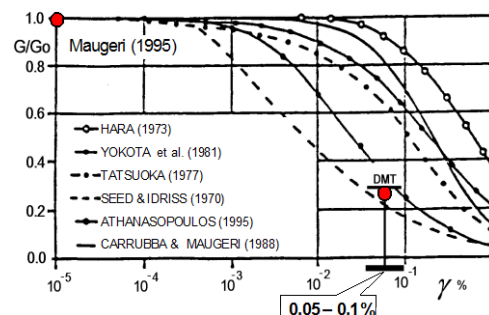


Fig 6. Metodo di tentativo per ricavare curve  $G-\gamma$  da SDMT

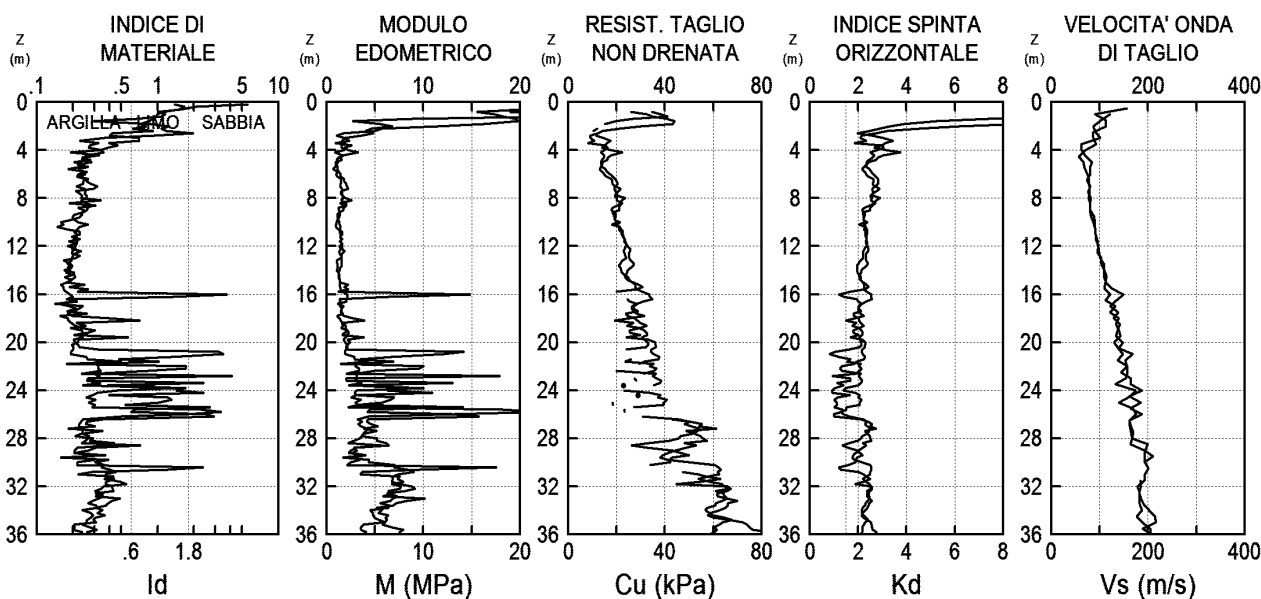


Fig 7. Profili SDMT nel sito di Fiumicino (Le Vignole), ottenuti in due verticali vicine

### 3 CONFRONTI $V_S$ DA SDMT E DA ALTRE PROVE

Le misure di  $V_S$  ottenute da SDMT sono state validate in base a confronti con misure di  $V_S$  ottenute da altre prove sismiche in sito in diversi siti di ricerca.

Prove SDMT sono state eseguite nel 2004 nel sito di ricerca del Fucino (L'Aquila), in argille NC cementate, estesamente indagato alla fine degli anni '80. Il profilo di  $V_S$  da SDMT (Fig. 5) è risultato in ottimo accordo con i profili di  $V_S$  ottenuti in precedenza da SCPT, Cross-Hole e SASW (AGI, 1991).

Altri confronti similmente favorevoli sono riportati da altri Autori (Hepton 1988, McGillivray e Mayne 2004, Mlynarek et al. 2006)

### 4 CURVE $G-\gamma$ IN SITO DA SDMT

Una importante peculiarità di SDMT è la sua capacità di determinare, oltre ad un modulo a piccole deformazioni ( $G_0$  da  $V_S$ ), anche un modulo a "deformazioni operative". Numerosi confronti tra cedimenti osservati in casi reali e previsti da DMT (vedi Monaco et al., 2006) documentano che il modulo di deformazione confinato  $M_{DMT}$  può essere considerato un ragionevole modulo a "deformazioni operative" (quel modulo che, introdotto nelle formule dell'elasticità lineare, fornisce previsioni generalmente attendibili dei cedimenti sotto i carichi di esercizio). Ricerche attualmente in corso indagano il possibile uso di SDMT per la determinazione "in sito" di curve di decadimento del modulo all'aumentare della deformazione (curve  $G-\gamma$  o simili). Curve di tentativo possono essere ricostruite mediante *fitting* di "curve tipiche di riferimento" di laboratorio attraverso due punti, entrambi ottenuti da SDMT (Fig. 6): (1) il modulo iniziale  $G_0$  da  $V_S$ , e (2) un modulo a "deformazioni operative" corrispondente a  $M_{DMT}$ .

### 5 RELAZIONI $G_0/E_D$

Sono state proposte numerose correlazioni tra  $G_0$  e il modulo dilatometrico  $E_D$  (ad es. Hryciw, 1990 e molti altri), generalmente finalizzate ad ottenere stime di  $G_0$  da  $E_D$ , evitando la misura diretta di  $G_0$ . Questa finalità appare oggi di minore interesse, poiché SDMT fornisce allo stesso tempo misure sia di  $E_D$  che di  $V_S$  (e quindi  $G_0$ ).

Se comunque non vengono effettuate misure dirette, stime approssimative di  $G_0$  possono ottenersi con le Fig. 8a e 8b dai valori di  $E_D$ ,  $I_D$  e  $K_D$  ottenuti mediante DMT meccanico.

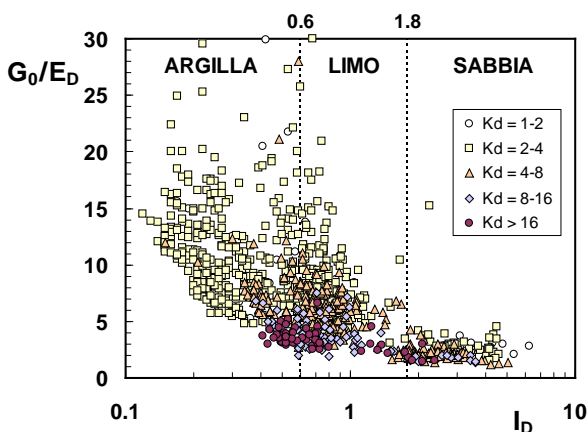


Fig 8a. Rapporto  $G_0/E_D$  in funzione di  $I_D$  (tipo di terreno) per diversi campi di  $K_D$

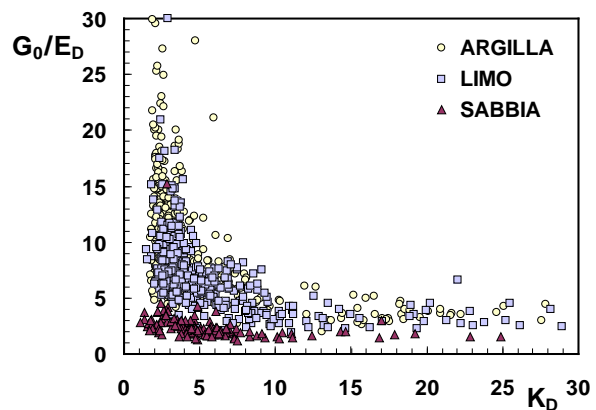


Fig 8b. Rapporto  $G_0/E_D$  in funzione di  $K_D$  (OCR) per vari tipi di terreno

### 6 USO DI SDMT PER ANALISI DI LIQUEFAZIONE

SDMT fornisce, tra le varie grandezze determinate, coppie di profili di  $K_D$  e  $V_S$  – due parametri entrambi correlati con la resistenza alla liquefazione di sabbie. SDMT permette quindi di ottenere due valutazioni parallele indipendenti della resistenza alla liquefazione CRR, una da  $K_D$  e l'altra da  $V_S$ , per mezzo di correlazioni CRR- $K_D$  e CRR- $V_S$ , dove CRR è il rapporto di resistenza ciclica, parametro di input fondamentale nella "procedura semplificata" di Seed e Idriss (1971) comunemente utilizzata.

L'uso di  $V_S$  per la valutazione di CRR è ben noto. La correlazione più utilizzata (Fig. 9) è quella proposta da Andrus e Stokoe (2000), modificata da Andrus et al. (2004). CRR è valutata in base a  $V_{SI} = V_S (p_a / \sigma'_{vo})^{0.25}$ , dove  $V_S$  è corretta per la tensione geostatica  $\sigma'_{vo}$  ( $p_a$  = pressione atmosferica). Le curve CRR- $V_{SI}$  in Fig. 9 sono valide per terremoti di magnitudo  $M_w = 7.5$  (per magnitudo diverse vanno applicati fattori di scala).

Correlazioni CRR- $K_D$  sono state sviluppate negli ultimi 20 anni, stimolate dal riconoscimento della "sensibilità" di  $K_D$  a diversi fattori che aumentano la resistenza alla liquefazione (non rilevati con altrettanta sensibilità da altre prove), quali storia tensionale, *prestraining*, cementazione, struttura, e della relazione di  $K_D$  con densità relativa e parametro di stato. Un elemento chiave della correlazione CRR- $K_D$  (Monaco e Schmertmann, 2007, Monaco e Marchetti, 2007) è la capacità di  $K_D$  di riflettere l'*aging* in sabbie, fattore che ha un'influenza primaria sulla resistenza alla liquefazione, come evidenziato ad es. da Leon et al. (2006). La Fig. 10 riassume le varie correlazioni proposte per valutare CRR da  $K_D$ , da utilizzare secondo la "procedura semplificata" (per magnitudo  $M = 7.5$  e sabbia pulita), inclusa la correlazione CRR- $K_D$  più recente (Monaco et al., 2005), basata su tutti i dati precedenti.

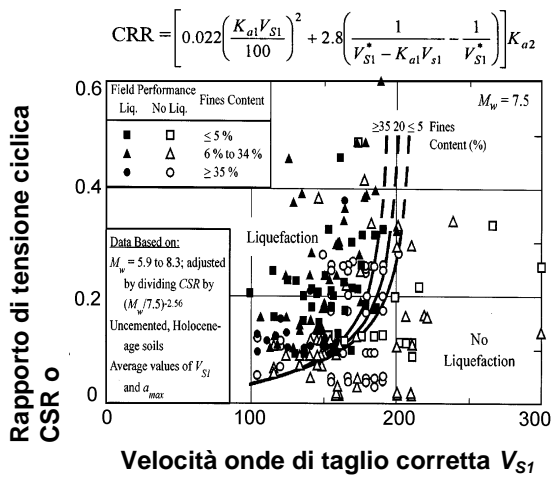


Fig 9. Curve per valutare CRR da  $V_S$  per sabbie pulite non cementate (Andrus + Stokoe, 2000)

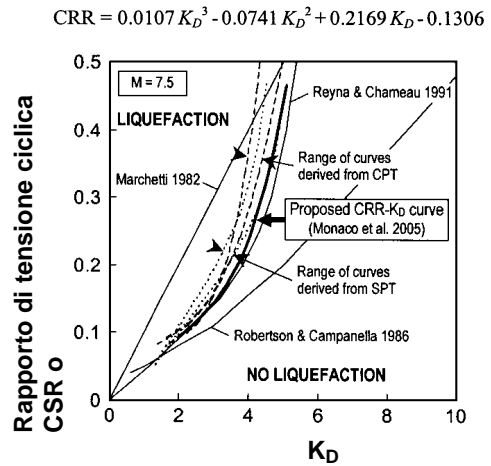


Fig 10. Curve per valutare CRR da  $K_D$  (Monaco et al., 2005)

### 7 VARIABILITÀ DEL RAPPORTO $G_0/M_{DMT}$

La Fig. 7 mostra che, mentre il modulo  $M_{DMT}$  presenta valori molto maggiori tra 21 e 26 m di profondità, al passaggio da argilla tenera a strati sabbiosi,  $V_S$  mostra solo una lieve aumento. Quindi  $G_0$  ricavato da  $V_S$  è ben lungi dall'essere proporzionale al "modulo operativo"  $M_{DMT}$ . Tali risultati indicano che può essere molto impreciso ricavare il "modulo operativo" riducendo  $G_0$  di un fattore prefissato.

### 8 PROVE SDMT OFFSHORE

Prove SMDT sono state eseguite anche *offshore*, con risultati di qualità simile a quella a terra (vedasi esempio in Fig. 12, Vado Ligure), con la sorgente di energizzazione collocata sul fondale marino.

### 9 SDMT IN FORI RIEMPITI DI SABBIA

In casi in cui il terreno è troppo duro per essere penetrato (o in roccia) è possibile eseguire la prova SDMT (solo misure di  $V_S$ , senza DMT) all'interno di un foro di sondaggio preventivamente riempito di sabbia. L'ottimo accordo osservato tra i profili di  $V_S$  ottenuti da prove SDMT parallele eseguite, nello stesso sito, nel terreno naturale e in un foro riempito di sabbia (Fig. 13) indica l'affidabilità delle misure di  $V_S$  ottenute in questo modo.

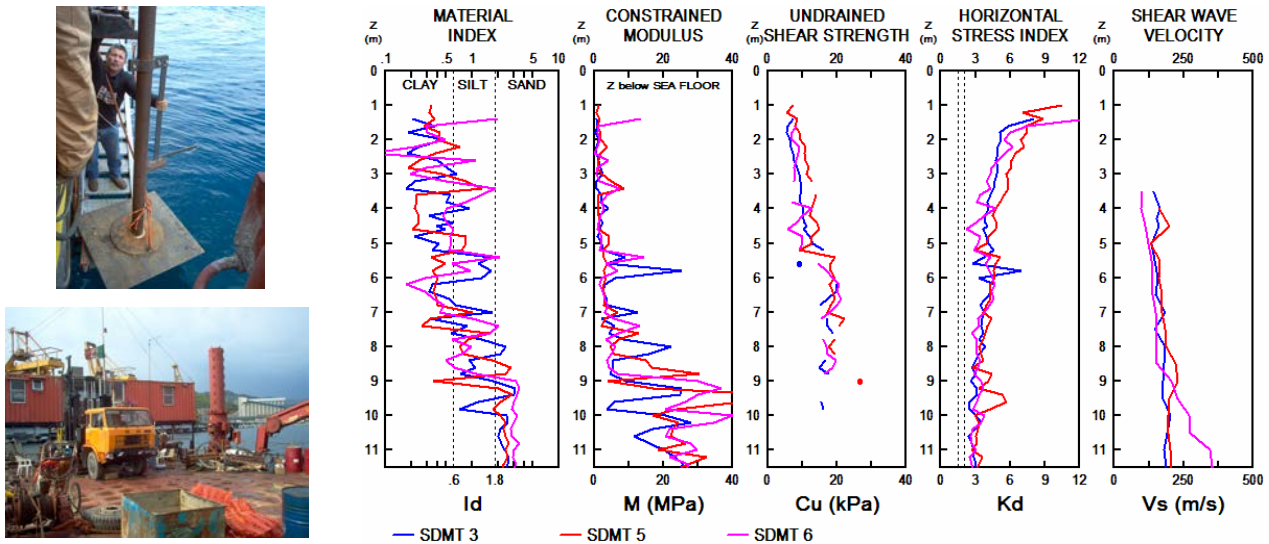


Fig 12. Dettagli delle indagini e profili di prove SDMT *offshore* nel sito di Vado Ligure Savona

### 10 CONCLUSIONI

Il dilatometro sismico (SDMT) fornisce misure accurate e altamente riproducibili della velocità delle onde di taglio  $V_S$  – parametro di input fondamentale per analisi sismiche. In aggiunta, SDMT fornisce i risultati DMT usuali (ad es. modulo di deformazione confinato  $M_{DMT}$ ) per applicazioni di progetto correnti.

L'esperienza recente documenta la possibilità di eseguire prove SDMT con buoni risultati anche in condizioni non usuali, ad es. *offshore* o in terreni non penetrabili (misure di  $V_S$  in fori riempiti di sabbia).

Ricerche in corso indagano il possibile uso di SDMT per la determinazione "in sito" di curve di decadimento del modulo all'aumentare della deformazione, mediante *fitting* di "curve  $G-\gamma$  di riferimento" attraverso due moduli forniti da SDMT a diversi livelli di deformazione: il modulo di taglio a piccole deformazioni  $G_0$  (da  $V_S$ ) e un modulo a "deformazioni operative" corrispondente a  $M_{DMT}$ .

SDMT permette di ottenere due valutazioni parallele indipendenti della resistenza alla liquefazione CRR da  $V_S$  e da  $K_D$  (indice di spinta orizzontale) per mezzo di correlazioni CRR- $V_S$  (Fig. 9) e CRR- $K_D$  (Fig. 10) da utilizzare secondo la "procedura semplificata" di Seed e Idriss (1971). La valutazione basata su  $K_D$  e quella basata su  $V_S$  possono fornire, nello stesso sito, stime di CRR anche apprezzabilmente diverse. Vari elementi, in primo luogo la maggiore sensibilità di  $K_D$  a *stress history* e *aging*, lasciano presumere una maggiore affidabilità di CRR da  $K_D$ , specialmente per terremoti di considerevole intensità.

## 11 SPECIFICHE PER LE PROVE CON DILATOMETRO SISMICO (SDMT)

Prove con dilatometro sismico (SDMT) per la misura di  $V_S$  (velocità di propagazione delle onde di taglio)

- La sonda sismica sovrastante il dilatometro sarà dotata di due ricevitori posti a distanza verticale di 0.5 m (configurazione "true interval"). I due ricevitori devono avere gli assi sensibili orizzontali e paralleli tra loro.
- Le energizzazioni di superficie e quindi le misure sismiche verranno effettuate ad intervalli di profondità di 0.5 m.
- Durante la prova la configurazione sarà tale che gli assi sensibili dei sensori saranno orientati parallelamente alla linea d'impatto, ovvero all'asse longitudinale dell'incudine
- Ad ogni profondità di misura dovranno essere effettuate almeno tre energizzazioni e quindi tre determinazioni della velocità  $V_S$ . La ripetibilità dei valori di  $V_S$  dovrà essere pari al 3% di  $V_S$  o migliore, altrimenti i risultati non saranno considerati accettabili.
- Configurazione della sorgente rispetto alla verticale di prova. Una retta ideale tracciata dalle aste al centro dell'incudine dovrà essere perpendicolare all'asse longitudinale dell'incudine. E' ammessa una deviazione da tale perpendicolarità fino a 20°.
- L'incudine dovrà essere pressata contro la superficie del terreno con un carico verticale tale da assicurare il trasferimento dell'energia d'impatto al terreno senza che l'incudine trasli. Il punto di trasferimento del carico all'incudine dovrà essere costituito per quanto possibile da un vincolo di tipo "carrello". In tal modo l'incudine risulterà caricata verticalmente, ma non disperderà verso l'alto l'energia dell'impatto. La linea d'impatto dovrà essere orizzontale.
- La capacità di acquisizione dei segnali dovrà essere almeno quella corrispondente a 50 microsecondi.
- Le misure con SDMT dovranno essere effettuate da personale con documentata esperienza con questo tipo di misure.

Per quanto riguarda le specifiche per la prova DMT tradizionale si rimanda al collegamento:

<http://www.marchetti-dmt.it/docfiles/Specifications/capitolato-specifiche%20dmt.doc>

## BIBLIOGRAFIA

- AGI, 1991. *Geotechnical Characterization of Fucino Clay*. Proc. X ECSMFE, Firenze, 1, 27-40.
- Andrus R.D., Stokoe K.H. II, 2000. *Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity*. Jnl GGE, ASCE, 126(11), 1015-1025.
- Andrus R.D., Stokoe K.H. II, Juang C.H., 2004. *Guide for Shear-Wave-Based Liquefaction Potential Evaluation*. Earthquake Spectra, 20(2), 285-305.
- Hepton P., 1988. *Shear wave velocity measurements during penetration testing*. Proc. Penetration Testing in the UK, ICE, 275-278.
- Hryciw R.D., 1990. *Small-Strain-Shear Modulus of Soil by Dilatometer*. Jnl GE, ASCE, 116(11), 1700-1716.
- Leon E., Gassman S.L., Talwani P., 2006. *Accounting for Soil Aging When Assessing Liquefaction Potential*. Jnl GGE, ASCE, 132(3), 363-377.
- Marchetti S., 1980. *In Situ Tests by Flat Dilatometer*. Jnl GED, ASCE, 106(GT3), 299-321.
- Marchetti S., Monaco P., Totani G., Calabrese M., 2001. *Il Dilatometro Piatto*. Atti XVIII Ciclo Conferenze di Geotecnica di Torino, 50 pp. (Versione italiana del Rapporto del TC16 ISSMGE *The Flat Dilatometer Test (DMT) in Soil Investigations*, Maggio 2001).
- Maugeri M., Monaco P., 2006. *Liquefaction Potential Evaluation by SDMT*. Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on the Flat Dilatometer, Washington D.C., 295-305.
- McGillivray A., Mayne P.W., 2004. *Seismic piezocone and seismic flat dilatometer tests at Treporti*. Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Site Characterization ISC'2, Porto, 2, 1695-1700.
- Młynarek Z., Gogolik S., Marchetti D., 2006. *Suitability of the SDMT method to assess geotechnical parameters of post-flotation sediments*. Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on the Flat Dilatometer, Washington D.C., 148-153.
- Monaco P., Marchetti S., 2007. *Evaluating liquefaction potential by seismic dilatometer (SDMT) accounting for aging/stress history*. Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Earthquake Geotech. Engineering, Thessaloniki.
- Monaco P., Marchetti S., Totani G., Calabrese M., 2005. *Sand liquefiability assessment by Flat Dilatometer Test (DMT)*. Proc. XVI ICSMGE, Osaka, 4, 2693-2697.
- Monaco P., Schmertmann J.H., 2007. *Discussion of "Accounting for Soil Aging When Assessing Liquefaction Potential" by Leon et al.* (in Jnl GGE, ASCE, 2006, 132 (3), 363-377). To appear in ASCE Jnl GGE.
- Monaco P., Totani G., Calabrese M., 2006. *DMT-predicted vs observed settlements: a review of the available experience*. Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on the Flat Dilatometer, Washington D.C., 244-252.

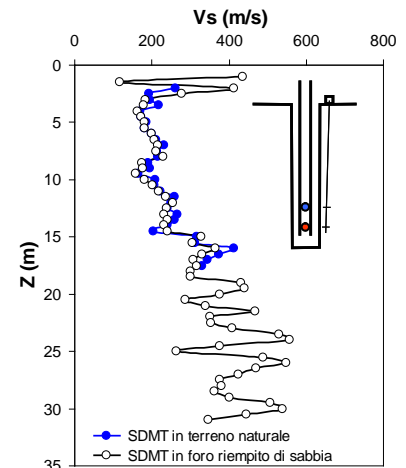


Fig 13. Confronto tra profili di  $V_S$  ottenuti da SDMT nel terreno naturale e in un foro riempito di sabbia nel sito di Montescaglioso - Ginosa, Matera

Seed H.B., Idriss I.M., 1971. *Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential*. Jnl GED, ASCE, 97(9), 1249-1273.