

3.4.4.2.10 Prove mediante dilatometro sismico (SDMT)⁷⁹

3.4.4.2.10.1 Introduzione

Il dilatometro sismico (SDMT) combina le tradizionali caratteristiche del dilatometro piatto (DMT) 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 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).

Di seguito vengono presentati i risultati più significativi accumulati nel periodo 2004-2006 in oltre 30 siti indagati con SDMT, in Italia e nel mondo.

3.4.4.2.10.2 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 (Figura 3.4-60 e Figura 3.4-61) 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 ≈ 1 m/s). V_S è ottenuta (Figura 3.4-60) 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 (Δt). Le misure di V_S sono effettuate ogni 0.5 m di profondità.

L'energizzazione avviene in superficie (Figura 3.4-62) mediante un martello a pendolo (≈ 10 kg) che percuote orizzontalmente una base di ferro parallelepipedica 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 Figura 3.4-63 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 Figura 3.4-64 (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

⁷⁹ Il presente paragrafo è stato redatto da Marchetti D., Marchetti S., Monaco P., Totani G., e non fa parte delle IT predisposte nell'ambito del Progetto VEL (Regione Toscana).

correlazioni DMT usuali. Dalla Figura 3.4-64 si evince la elevata ripetibilità delle misure di V_s , oltre che degli altri profili.

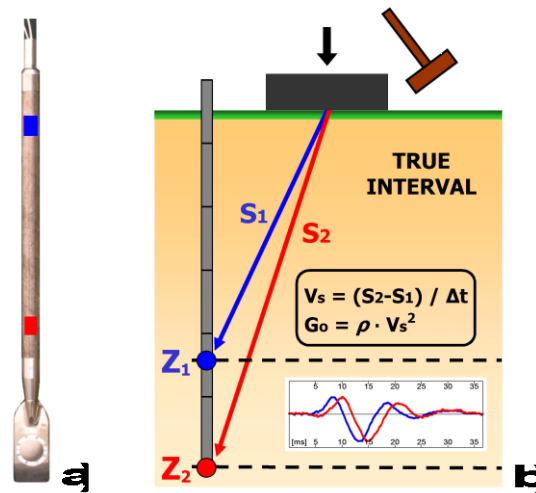


Figura 3.4-60 – (a) Lama DMT e modulo sismico. (b) Schema della prova con SDMT.



Figura 3.4-61 – Attrezzatura SDMT



Figura 3.4-62 – Sorgente di energizzazione in superficie

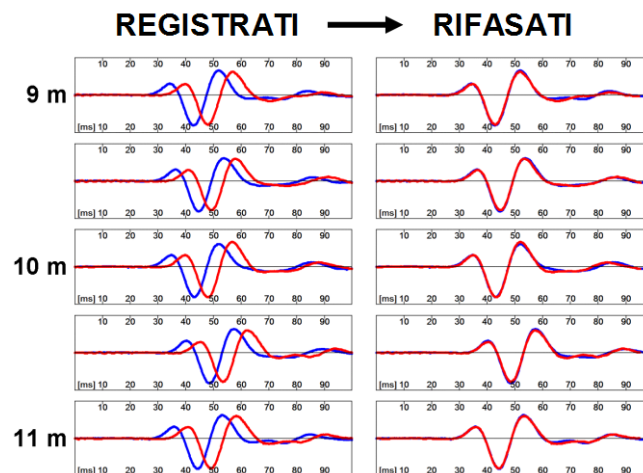


Figura 3.4-63 – Esempio di sismogrammi ottenuti da SDMT a varie profondità di prova nel sito del Fucino (Telespazio), registrati e rifsati secondo il ritardo calcolato

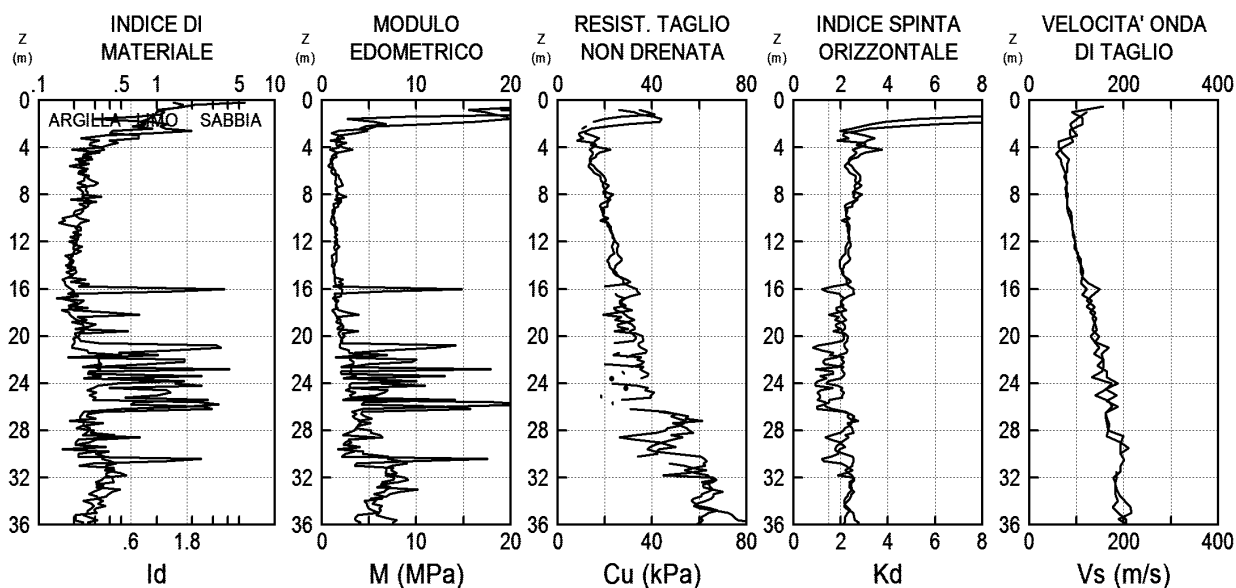


Figura 3.4-64 – Profili SDMT nel sito di Fiumicino (Le Vignole), ottenuti in due verticali vicine

3.4.4.2.10.3 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 (Figura 3.4-65) 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).

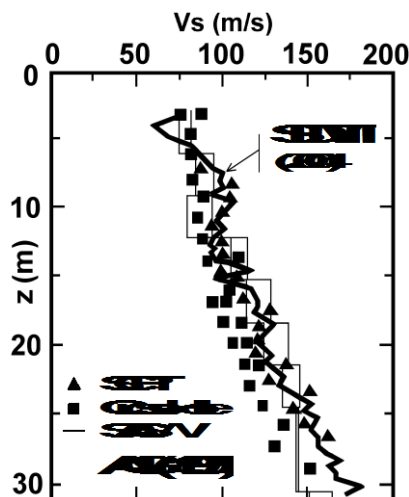


Figura 3.4-65 – Confronto profili di V_s da SDMT e da SCPT, Cross-Hole e SASW (AGI, 1991) nel sito di ricerca del Fucino

3.4.4.2.10.4 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). Particolarmente rappresentativo a tale riguardo è l'accordo osservato tra il profilo del modulo M determinato mediante DMT e il profilo di M sotto il rilevato sperimentale in vera grandezza di Treporti (Venezia) ricavato misurando l'accorciamento di ciascuno strato di spessore un metro mediante micrometro di alta precisione (vedasi Marchetti *et al.* 2008).

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 (Figura 3.4-66): (1) il modulo iniziale G_0 da V_S , e (2) un modulo a "deformazioni operative" corrispondente a M_{DMT} .

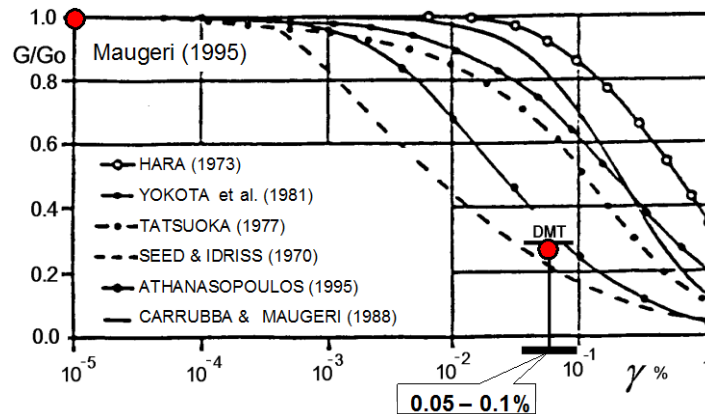


Figura 3.4-66 – Metodo di tentativo per ricavare curve $G-\gamma$ da SDMT

3.4.4.2.10.5 Relazione sperimentale tra il modulo G_0 e il modulo operativo M

Il dilatometro sismico fornisce alle varie profondità valori sia del modulo G_0 che del modulo operativo M , oltre che degli altri parametri ottenuti dalla prova. Da ogni indagine SDMT effettuata in un sito viene perciò ottenuta una gran quantità di dati sperimentali. Il diagramma in Figura 3.4-67 riporta circa 800 punti sperimentali ottenuti effettuando prove SDMT in 34 siti italiani ed esteri in vari tipi di terreno (Marchetti *et al.* 2008).

La Figura 3.4-67 mostra il diagramma del rapporto G_0/M_{DMT} in funzione dell'indice di spinta orizzontale K_D per argilla (indice di materiale $I_D < 0.6$), limo ($0.6 < I_D < 1.8$) e sabbia ($I_D > 1.8$). Per ciascun tipo di terreno sono indicate le rispettive equazioni *best-fit*.

Dal grafico scaturiscono le seguenti considerazioni:

1. Il rapporto G_0/M è tutt'altro che una costante, essendo variabile all'incirca tra 0.5 e 25. L'ipotesi talora avanzata che sia possibile stimare il modulo operativo M dividendo G_0 per una costante appare quindi poco realistica.
2. Se si dispone dei risultati DMT, è possibile ottenere da tale grafico, facendo uso dei tre parametri I_D , K_D , M , stime di G_0 , e quindi di V_S . Vista la non trascurabile dispersione, è naturalmente da raccomandare la misura diretta di V_S .
3. I grafici evidenziano la dominante influenza di K_D sul rapporto G_0/M . La non disponibilità di K_D equivarrebbe ad un addossamento di tutti i punti sperimentali sull'asse verticale.

L'assenza di K_D – che riflette la *stress history* – renderebbe oltremodo incerta la scelta del rapporto G_0/M . Necessitano quindi ben tre informazioni e cioè I_D , K_D , M (di cui una è già un modulo) per formulare stime di larga massima di G_0 e V_S .

4. Vista la considerazione 3, sostituire V_S , quando non misurata direttamente, con un solo parametro, quale N_{SPT} o c_u , non appare particolarmente razionale. Infatti, se V_S è il parametro considerato primario per la classificazione del sito, l'eventuale sostituto di V_S dev'essere ragionevolmente correlato a V_S . Se tre parametri (I_D , K_D , M) sono appena sufficienti per formulare stime di larga massima di V_S , la possibilità di stimare V_S da un solo parametro appare remota.

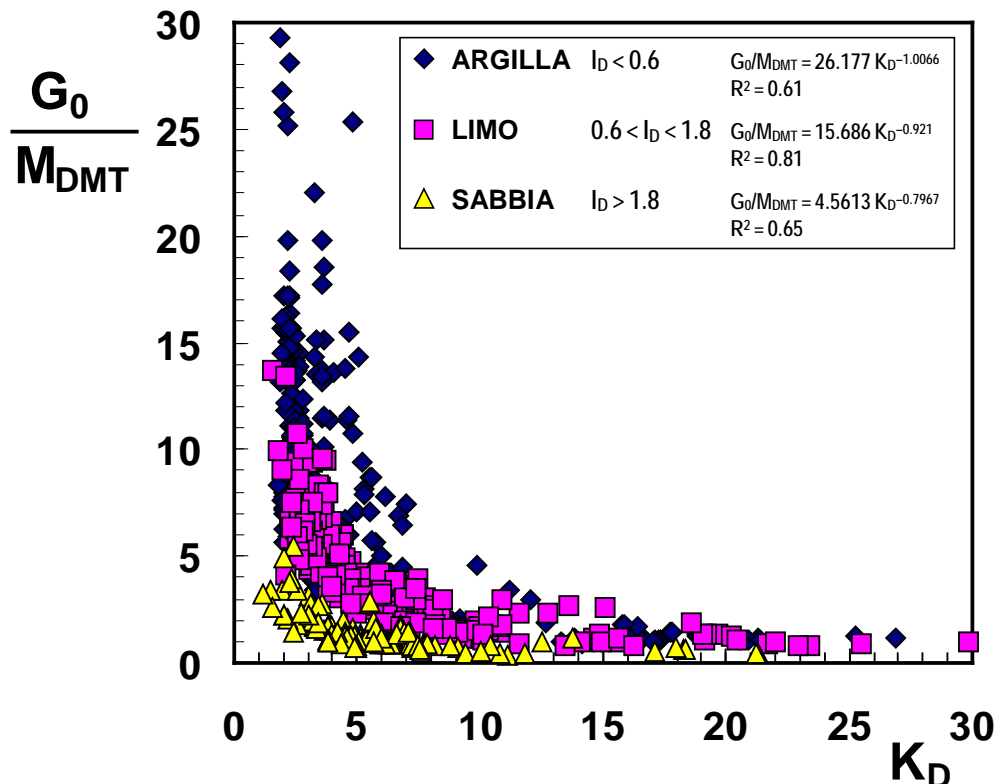


Figura 3.4-67 – Rapporto G_0/M_{DMT} in funzione di K_D (OCR) per vari tipi di terreno

3.4.4.2.10.6 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 (Figura 3.4-68) è quella proposta da Andrus e Stokoe (2000), modificata da Andrus *et al.* (2004). CRR è valutata in base a $V_{S1} = V_S (\rho_a / \sigma'_{v0})^{0.25}$, dove V_S è corretta per la tensione geostatica σ'_{v0} (ρ_a = pressione atmosferica). Le curve CRR- V_{S1} in Figura 3.4-68 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 Figura 3.4-69 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.

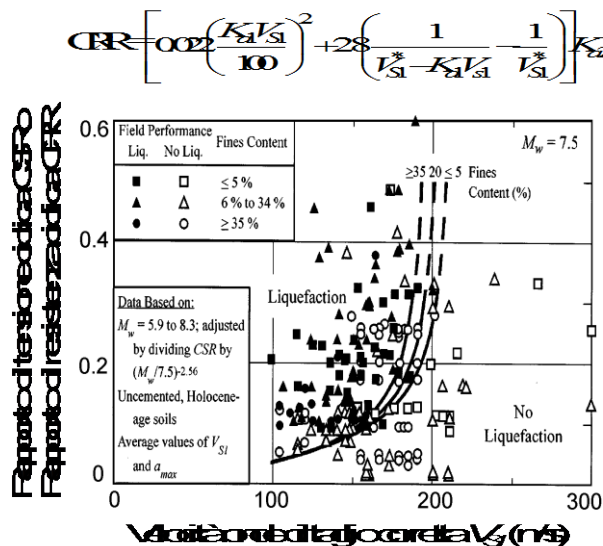


Figura 3.4-68 – Curve per valutare CRR da V_s per sabbie pulite non cementate (Andrus e Stokoe, 2000)

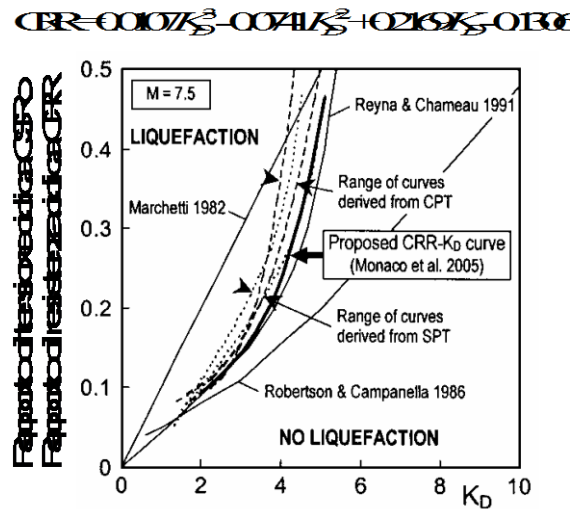


Figura 3.4-69 – Curve per valutare CRR da K_D (Monaco *et al.*, 2005)

3.4.4.2.10.7 Prove SDMT offshore

Prove SMDT sono state eseguite anche *offshore*, con risultati di qualità simile a quella a terra (vedasi esempio in Figura 3.4-70, Vado Ligure), con la sorgente di energizzazione collocata sul fondale marino.

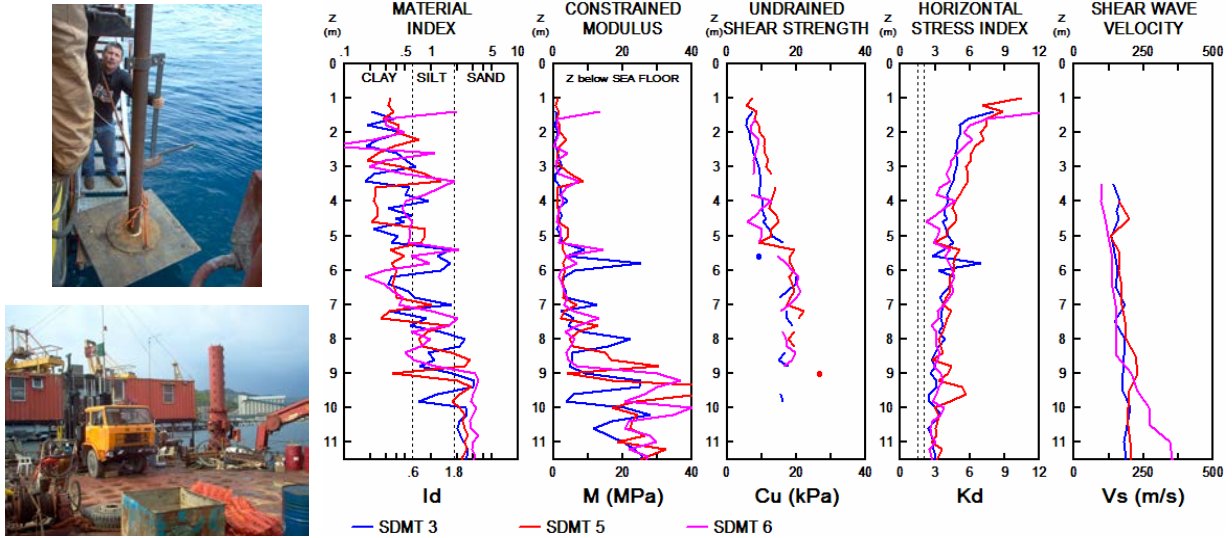


Figura 3.4-70 – Dettagli delle indagini e profili di prove SDMT offshore nel sito di Vado Ligure (Savona)

3.4.4.2.10.8 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 (Figura 3.4-71) indica l'affidabilità delle misure di V_s ottenute in questo modo.

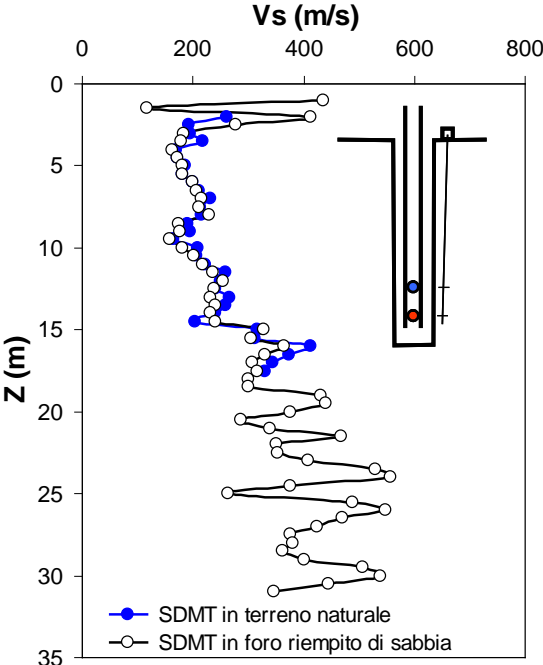


Figura 3.4-71 – Confronto tra profili di V_s ottenuti da SDMT nel terreno naturale e in un foro riempito di sabbia nel sito di Montescaglioso – Ginosa (Matera)

3.4.4.2.10.9 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 (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} .

La Figura 3.4-67 permette di ottenere stime di G_0 e V_S quando non siano state effettuate misure dirette di V_S e siano disponibili I_D , K_D , M da prova DMT. La Figura 3.4-67 indica inoltre: (a) L'ipotesi talora avanzata che sia possibile stimare il modulo operativo M dividendo G_0 per una costante appare poco realistica. (b) La fondatezza dell'uso talora suggerito di N_{SPT} o c_u in sostituzione di V_S , quando non misurata, appare dubbia.

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 (Figura 3.4-68) e CRR- K_D (Figura 3.4-69) 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.

3.4.4.2.10.10 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 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.

3.4.4.2.10.11 Bibliografia

- AGI (1991) - Geotechnical Characterization of Fucino Clay. *Proc. X ECSMFE, Firenze, 1, 27-40.*
- Andrus, R.D. e Stokoe, K.H. II (2000) - Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity. *J. Geotech. Geoenv. Engrg., ASCE, 126(11), 1015-1025.*
- Andrus, R.D., Stokoe, K.H. II e 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.*
- Leon, E., Gassman, S.L. e Talwani, P. (2006) - Accounting for Soil Aging When Assessing Liquefaction Potential. *J. Geotech. Geoenv. Engrg., ASCE, 132(3), 363-377.*
- Marchetti, S., Monaco, P., Totani, G. e Marchetti, D. (2008) - In Situ Tests by Seismic Dilatometer (SDMT). In "From Research to Practice in Geotechnical Engineering", *Geotechnical Special Publication No. 180 Honoring Dr. John H. Schmertmann, ASCE. J.E. Laier, D.K. Crapps & M.H. Hussein Editors.*
- McGillivray, A. e Mayne, P.W. (2004) - Seismic piezocone and seismic flat dilatometer tests at Treporti. *Proc. 2nd Int. Conf. on Site Characterization ISC'2, Porto, 2, 1695-1700.*
- Mlynarek, Z., Gogolik, S. e Marchetti, D. (2006) - Suitability of the SDMT method to assess geotechnical parameters of post-flotation sediments. *Proc. 2nd Int. Conf. on the Flat Dilatometer, Washington D.C., 148-153.*
- Monaco, P. e Marchetti, S. (2007) - Evaluating liquefaction potential by seismic dilatometer (SDMT) accounting for aging/stress history. *Proc. 4th Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki, Paper 1626.*
- Monaco, P., Marchetti, S., Totani, G. e Calabrese, M. (2005) - Sand liquefiability assessment by Flat Dilatometer Test (DMT). *Proc. XVI ICSMGE, Osaka, 4, 2693-2697.*
- Monaco, P. e Schmertmann, J.H. (2007) - Discussion of "Accounting for Soil Aging When Assessing Liquefaction Potential" by Leon *et al.* (in *J. Geotech. Geoenv. Engrg., ASCE, 2006, 132(3), 363-377.* *J. Geotech. Geoenv. Engrg., ASCE, 133(9), 1177-1179.*
- Monaco, P., Totani, G. e Calabrese, M. (2006) - DMT-predicted vs observed settlements: a review of the available experience. *Proc. 2nd Int. Conf. on the Flat Dilatometer, Washington D.C., 244-252.*
- Seed, H.B. e Idriss, I.M. (1971) - Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 97(9), 1249-1273.*