

**Conferenza delle Regioni  
e delle Province autonome**  
Commissione protezione civile  
Sottocommissione 8  
Attuazione della normativa sismica

**Presidenza del Consiglio dei Ministri**  
Dipartimento della protezione civile

Indirizzi e criteri per la

# MICROZONAZIONE SISMICA

*Parte III*

Gruppo di lavoro *“Indirizzi e criteri generali per la microzonazione sismica”*

## INDIRIZZI E CRITERI PER LA MICROZONAZIONE SISMICA

### *Curatori dei volumi*

Fabrizio Bramerini, Giacomo di Pasquale, Giuseppe Naso, Massimiliano Severino

### *Coordinamento editoriale*

Giovanni Bastianini

### *Art Director*

Maurilio Silvestri

### *Grafica e Impaginazione*

Emiliana Colucci, Fabio Salamida

Roma, Settembre 2008



Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della protezione civile

© PCM - DPC 2008

### *Uso e citazione*

È vietato lo sfruttamento commerciale. L'uso è consentito a condizione che venga citata correttamente la fonte.

Si raccomanda di utilizzare la seguente dicitura:

Gruppo di lavoro MS, 2008. *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*.

Conferenza delle Regioni e delle Province autonome - Dipartimento della protezione civile, Roma, 3 vol. e Dvd.

### 3.4.4.2.9 Prova dilatometrica (DMT)<sup>79</sup>

#### 3.4.4.2.9.1 Generalità

Il dilatometro piatto (DMT) è una lama di acciaio avente dimensioni  $95 \times 200 \times 15$  mm, con il bordo inferiore affilato. Su di un lato dello strumento è montata una membrana metallica circolare espandibile (Figura 3.4-57). La prova consiste nell'infingere verticalmente la lama nel terreno mediante spinta statica, agendo su una batteria di aste, espandendo la membrana con gas in pressione e misurando le pressioni corrispondenti a due livelli di deformazione predeterminati della membrana. Da queste misure è possibile determinare, mediante correlazioni, numerosi parametri geotecnici di uso comune.



Figura 3.4-57 – Dilatometro piatto.

#### 3.4.4.2.9.2 Standard e documenti di riferimento

La prova dilatometrica è stata originariamente introdotta da Marchetti (1980). L'attrezzatura e le metodologie di prova DMT sono standardizzate dall'ASTM (2001) e nell'Eurocodice 7 (2007). Informazioni particolarmente dettagliate su attrezzatura, procedura di prova, interpretazione e applicazioni di progetto della prova DMT sono contenute nel rapporto del comitato tecnico TC16 ISSMGE (2001), disponibile anche in versione italiana.

#### 3.4.4.2.9.3 Descrizione della prova

La lama viene fatta avanzare nel terreno per mezzo di attrezzature di uso comune, ad esempio attrezzature di spinta normalmente utilizzate per la prova penetrometrica a punta conica (CPT) o per sondaggi. Le aste di spinta trasferiscono la forza di penetrazione alla lama.

La lama è collegata a una centralina di misura in superficie per mezzo di un cavo elettropneumatico (che trasmette pressione di gas e continuità elettrica) passante all'interno delle aste di spinta. Una bombola di gas, collegata alla centralina di misura per mezzo di un cavo pneumatico, costituisce la sorgente di gas necessaria per espandere la membrana. La centralina di misura è dotata di un regolatore di pressione, di manometri, di un segnalatore audiovisivo e di valvole di sfiato.

Lo schema generale della prova dilatometrica è illustrato in Figura 3.4-58.

<sup>79</sup> 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).

A intervalli regolari (generalmente ogni 20 cm) la penetrazione viene arrestata e, utilizzando la centralina di misura, viene immesso gas del quale si aumenta gradualmente la pressione, facendo dilatare la membrana contro il terreno. A ogni profondità, in circa 1 minuto, vengono rilevati due valori di pressione:

- A.** pressione necessaria per controbilanciare la pressione del terreno e iniziare il movimento della membrana (pressione di distacco o *lift-off*);
- B.** pressione necessaria per ottenere una dilatazione del centro della membrana contro il terreno di 1.1 mm.

La prova DMT può essere eseguita in una grande varietà di terreni, da estremamente teneri a molto duri argille con resistenza al taglio non drenata  $c_u$  da 2-4 kPa fino a 1000 kPa (marne), moduli  $M$  da 0.4 MPa a 400 MPa. La prova DMT è appropriata per sabbie, limi e argille, dove i grani sono piccoli rispetto al diametro della membrana (60 mm). Non è appropriata per misure nelle ghiaie. Tuttavia la lama è abbastanza robusta da attraversare strati di ghiaia di circa 0.5 m di spessore.

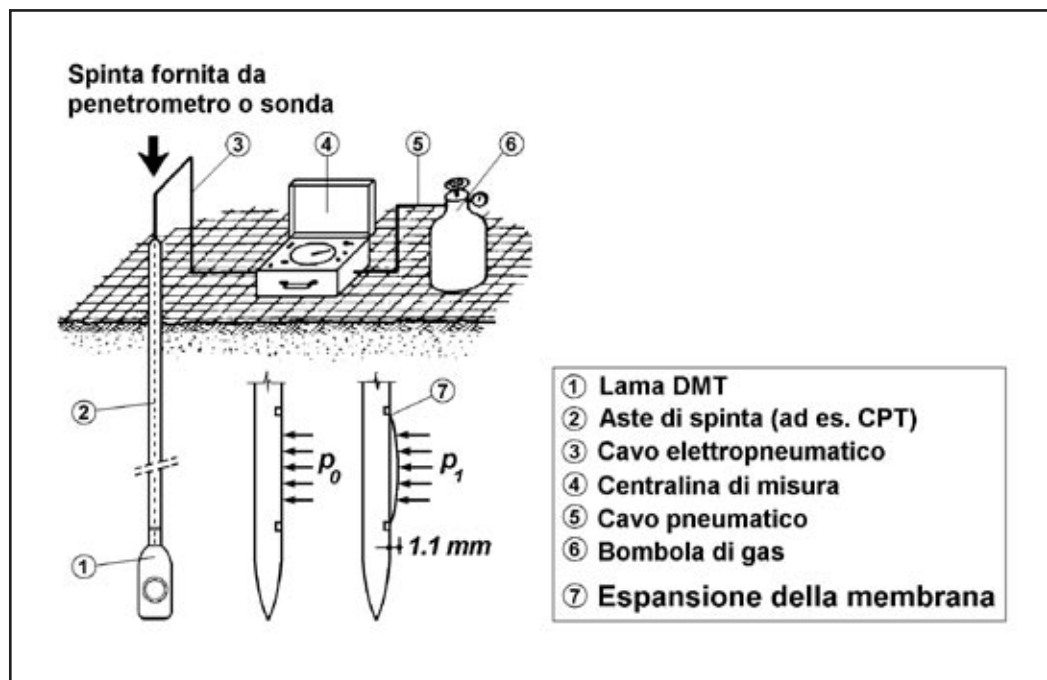


Figura 3.4-58 – Schema generale della prova DMT.

#### 3.4.4.2.9.4 Elaborazione dati e interpretazione

Le formule base per l'elaborazione dei dati DMT e le principali correlazioni sono riassunte nella Tabella 3.4-20.

Le letture di pressione  $A$ ,  $B$  devono essere corrette per mezzo dei valori  $\Delta A$ ,  $\Delta B$  determinati mediante calibrazione, per tenere conto della rigidità della membrana, e convertite in  $p_0$ ,  $p_1$ .

I due valori di pressione determinati  $p_0$  e  $p_1$  vengono elaborati ottenendo tre "parametri indice":

- $I_D$  Indice di Materiale
- $K_D$  Indice di Spinta Orizzontale
- $E_D$  Modulo Dilatometrico

Dai parametri indice  $I_D$ ,  $K_D$ ,  $E_D$  applicando le correlazioni usuali (TC16 2001), vengono ricavati i parametri:

- $M$  Modulo edometrico (terreni sia coesivi che incoerenti)
- $c_u$  Resistenza al taglio non drenata (terreni coesivi)
- $K_0$  Coefficiente di spinta a riposo (terreni coesivi)
- $OCR$  Rapporto di sovraconsolidazione (terreni coesivi)
- $\Phi'$  Angolo di resistenza al taglio (terreni incoerenti)

e altre informazioni (vedi Tabella 3.4-20).

Il modulo edometrico  $M$  e la resistenza al taglio non drenata  $c_u$  sono ritenuti i parametri più affidabili e utili ottenuti dalla prova DMT.

**Tabella 3.4-20 – Formule base per l’elaborazione delle prove DMT (TC16 2001).**

SIMBOLO	DESCRIZIONE	FORMULE BASE DI ELABORAZIONE DMT	
$p_0$	Prima Lettura Corretta	$p_0 = 1.05 (A - Z_M + \Delta A) - 0.05 (B - Z_M - \Delta B)$	
$p_1$	Seconda Lettura Corretta	$p_1 = B - Z_M - \Delta B$	
$I_D$	Indice di Materiale	$I_D = (p_1 - p_0) / (p_0 - u_0)$	
$K_D$	Indice di Spinta Orizzontale	$K_D = (p_0 - u_0) / \sigma'_{v0}$	
$E_D$	Modulo Dilatometrico	$E_D = 34.7 (p_1 - p_0)$	
$K_0$	Coeff. Spinta Orizz. in Sito	$K_{0,DMT} = (K_D / 1.5)^{0.47} - 0.6$	
$OCR$	Rapp. di Sovraconsolidazione	$OCR_{DMT} = (0.5 K_D)^{1.56}$	
$c_u$	Res. al Taglio Non Drenata	$c_{u,DMT} = 0.22 \sigma'_{v0} (0.5 K_D)^{1.25}$	
$\Phi'$	Angolo di Resistenza al Taglio	$\Phi_{safe,DMT} = 28^\circ + 14.6^\circ \log K_D - 2.1^\circ \log^2 K_D$	
$c_h$	Coeff. di Consolidazione	$c_{h,DMTA} \approx 7 \text{ cm}^2 / t_{flex}$	
$k_h$	Coeff. di Permeabilità	$k_h = c_h \gamma_w / M_h \quad (M_h \approx K_0 M_{DMT})$	
$\gamma$	Peso di Volume	(vedi grafico in TC 16 2001)	
$M$	Modulo Verticale Drenato Confinato	$M_{DMT} = R_M E_D$	
		se $I_D \leq 0.6$	$R_M = 0.14 + 2.36 \log K_D$
		se $I_D \geq 3$	$R_M = 0.5 + 2 \log K_D$
		se $0.6 < I_D < 3$	$R_M = R_{M,0} + (2.5 - R_{M,0}) \log K_D$ con $R_{M,0} = 0.14 + 0.15 (I_D - 0.6)$
		se $K_D \rightarrow 10$	$R_M = 0.32 + 2.18 \log K_D$
		se $R_M < 0.85$	porre $R_M = 0.85$
$u_0$	Pressione Neutra di Equilibrio	$u_0 = p_2 - C - Z_M + \Delta A$	

Per quanto riguarda l’uso dei risultati DMT per specifici problemi applicativi, in particolare:

- pali soggetti a carichi orizzontali;
- individuazione di superfici di scorrimento in frane;
- liquefacibilità delle sabbie;
- controllo della compattazione;
- parametri di input per analisi agli elementi finiti;
- modulo di reazione orizzontale per il dimensionamento dei diaframmi.

Una sintesi delle metodologie è contenuta nel rapporto TC16 (2001), dove sono anche riportati i riferimenti bibliografici degli articoli originali pertinenti.

### 3.4.4.2.9.5 Presentazione dei risultati

La Figura 3.4-59 mostra un esempio di risultati DMT. L'uso dei risultati è il seguente:

- L'indice di materiale  $I_D$  fornisce informazioni sul tipo di terreno (argilla, limo, sabbia).
- Il modulo edometrico  $M$  e la resistenza al taglio non drenata  $c_u$  sono parametri di uso comune.
- Il profilo dell'indice di spinta orizzontale  $K_D$  è simile, nella forma, al profilo del rapporto di sovraconsolidazione  $OCR$ . In argille  $K_D \approx 2$  indica  $OCR = 1$ ,  $K_D > 2$  indica un deposito sovraconsolidato. Il profilo di  $K_D$  può aiutare a comprendere la storia del deposito.

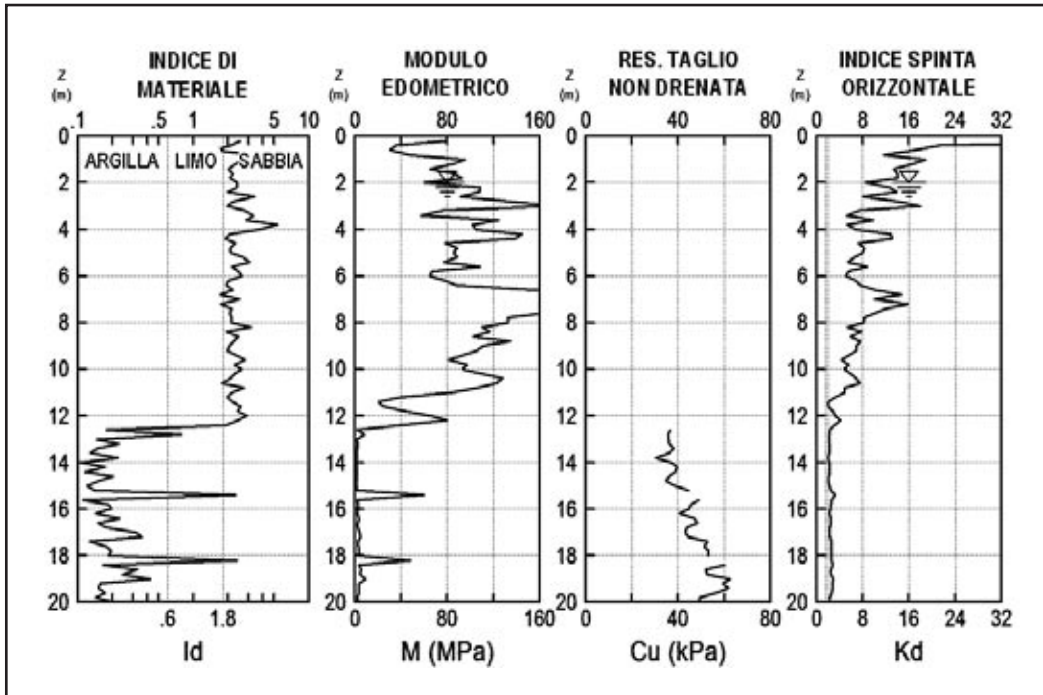


Figura 3.4-59 – Esempio di risultati DMT.

### 3.4.4.2.9.6 Specifiche per l'esecuzione della prova dilatometrica (DMT)

#### A. ATTREZZATURA

##### 1. Dispositivo di spinta

Può essere costituito da un penetrometro statico da 200 kN di spinta effettiva, completo di batteria di aste di spinta ( $\Phi_{est}$  compreso tra 36 e 50 mm), oppure dal dispositivo di spinta di una sonda da perforazione. In questo secondo caso almeno 2-3 m di aste, quelle connesse allo strumento di prova, avranno  $\Phi_{est} = 36 \div 50$  mm. Le aste sovrastanti potranno avere diametro maggiore.

Il cavo elettropneumatico di collegamento dello strumento con la superficie passa internamente alle aste di spinta. In caso di spinta a mezzo sonda esso può uscire lateralmente in corrispondenza del raccordo, spaccato longitudinalmente, che connette le ultime 2-3 aste alle aste sovrastanti di diametro maggiore. Sopra il punto di uscita il cavo verrà fissato opportunamente all'esterno delle aste.

##### 2. Attrezzatura dilatometrica

L'attrezzatura dilatometrica avrà la geometria inizialmente fissata da Marchetti senza modifiche e dovrà comprendere:

- lama dilatometrica (95×200×15 mm) con membrana metallica laterale espandibile per 1.1 mm al centro;

- centralina di misura;
- cavo elettropneumatico di collegamento del dilatometro con la centralina;
- bombola di gas azoto, con riduttore di pressione con uscita regolabile almeno fino a 80 bar.

## B. MODALITÀ ESECUTIVE

### 1. Accertamenti preliminari

Prima dell'esecuzione della prova si dovrà verificare che la lama di prova sia diritta, senza concavità o convessità maggiori di 0.5 mm rispetto alla corda.

La lama collegata alle aste dovrà presentare una deviazione del bordo affilato dall'asse entro 1.5 mm. La membrana dovrà essere liscia e regolare e il metallo che la costituisce non deve essere snervato.

Dovrà essere verificata la tenuta del sistema complessivo collegato lama-cavo-centralina. A tal fine si pressurizzerà il sistema a 200 kPa e si chiuderà la mandata. Non si dovranno rilevare nel circuito perdite di pressione maggiori di 100 kPa/min.

### 2. Taratura

Dovranno essere misurati, tramite il dispositivo di taratura, i valori di depressione ( $\Delta A$ ) e di pressione ( $\Delta B$ ) necessari per portare la membrana della lama, libera in aria, nelle posizioni *A* e *B*, corrispondenti rispettivamente agli spostamenti 0.05 mm e 1.1 mm del centro membrana. Dovrà risultare:

$$\Delta A = 5-30 \text{ kPa}$$

$$\Delta B = 5-80 \text{ kPa}$$

Membrane con caratteristiche diverse non saranno accettate e dovranno essere sostituite.

Le membrane nuove dovranno essere sottoposte a 5 cicli di carico e scarico con pressioni comprese entro i limiti indicati dal costruttore prima di essere impiegate in prove reali.

La taratura della membrana dovrà essere eseguita all'inizio e al termine di ogni verticale di prova.

La prova sarà eseguita da personale in possesso del patentino di abilitazione rilasciato dal costruttore.

### 3. Prova corrente

Il dilatometro sarà spinto verticalmente nel terreno arrestando la penetrazione a intervalli di 20 cm per l'esecuzione delle misure.

Durante l'infissione il segnale acustico (o audiovisivo) sarà sempre attivato e la valvola di sfiato dovrà essere aperta.

Raggiunta la quota di prova, si arresta l'infissione e si scarica la spinta sulle aste. Entro 20 secondi dall'arresto si invia gas alla membrana misurando, tramite la centralina elettro-pneumatica di superficie:

- la pressione alla quale si ha il distacco della membrana (lettura *A* – il segnale cessa), da rilevarsi a circa 15 secondi dall'inizio della immissione del gas;
- la pressione necessaria per espandere di 1.1 mm il centro della membrana (lettura *B* – il segnale si riattiva), da rilevarsi a circa 15 secondi dalla lettura *A*.

Se richiesto, verrà anche misurato e annotato il valore *C* della pressione che agisce sulla membrana quando, durante lo scarico del gas (dapprima immesso per ottenere le letture *A* e *B*), la membrana si richiude sulla posizione *A* di riposo riattivando il segnale acustico (pressione di "richiusura" o *closing pressure*). Il tempo di scarico deve essere di circa 30 secondi.

Qualora la natura del terreno impedisca l'infissione del dilatometro fino alla profondità prefissata, si

devono estrarre aste e dilatometro, si deve eseguire un preforo di diametro adeguato (ad esempio 100 mm) fino alla profondità prescritta, quindi si re-immette il dilatometro per proseguire la prova.

#### 4. Prove di dissipazione "DMTA"

Se richiesto, verranno anche eseguite prove di dissipazione DMTA. Tali prove consistono nel rilevare, a dilatometro fermo, una sequenza di letture  $A$  (generalmente a tempi raddoppiati quali 15 secondi, 30 secondi, 1 min, 2 min, etc.) che permettono di costruire la curva di decadimento nel tempo della pressione totale  $\sigma_n$  esercitata dal terreno sulla lama. Il decadimento è tanto più lento quanto meno il terreno è permeabile. L'interpretazione della curva di decadimento fornisce stime del coefficiente di consolidazione e del coefficiente di permeabilità.

### C. DOCUMENTAZIONE

Per ogni prova deve essere fornita la seguente documentazione:

1. individuazione dell'ubicazione e della data di prova;
2. quota del piano campagna rilevata rispetto al livello del mare;
3. valori di  $A$  e  $B$  rilevati a ciascuna profondità;
4. valori di  $\Delta A$  e  $\Delta B$  iniziali e finali di ciascuna verticale;
5. eventualmente, valori di  $C$  (se rilevati) a ciascuna profondità;
6. eventualmente, letture  $A$  in funzione del tempo rilevate nel corso di prove di dissipazione DMTA a ciascuna profondità (se eseguite).
7. Le letture ( $A$  e  $B$ ) devono essere elaborate e diagrammate in modo da ottenere i profili di:
  - indice di materiale  $I_p$ , correlato alla granulometria del materiale (argilla, limo, sabbia);
  - indice di spinta orizzontale  $K_D$ ;
  - modulo dilatometrico  $E_D$ ;
  - modulo edometrico  $M = 1/m_v$ ;
  - resistenza al taglio non drenata  $c_u$  (solo in terreni coesivi);
  - angolo di resistenza al taglio  $\Phi'$  (solo in terreni incoerenti);
  - coefficiente di spinta orizzontale  $K_0$  (solo in terreni coesivi);
  - grado di sovraconsolidazione  $OCR$  (solo in terreni coesivi).

#### 3.4.4.2.10 Prove mediante dilatometro sismico (SDMT)<sup>80</sup>

##### 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.

<sup>80</sup> 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).

- 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 esempio modulo di deformazione  $M_{DMT}$ ) per applicazioni di progetto correnti (ad esempio 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)

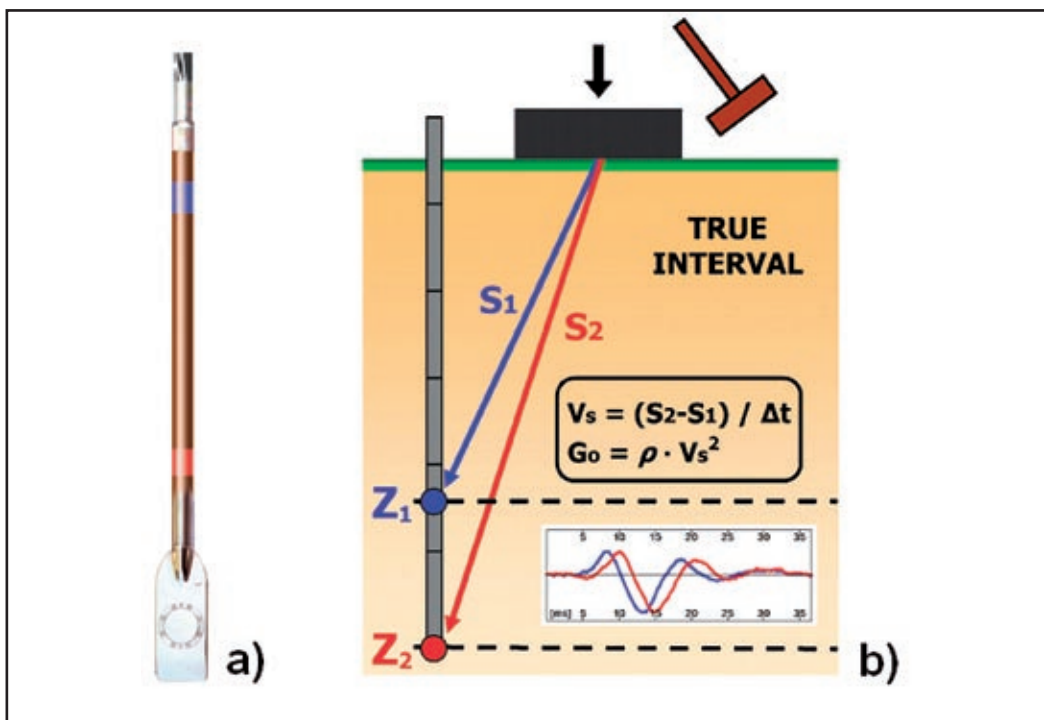


Figura 3.4-60 – (a) Lama DMT e modulo sismico. (b) Schema della prova con SDMT.

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 a 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 (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 ( $\Delta t$ ). 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 ( $\approx 10$  kg) che percuote orizzontalmente una base di ferro parallelepipedica pressata verticalmente contro il terreno (grazie al peso del camion) e 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 rifsati secondo il ritardo calcolato).

I risultati SDMT sono generalmente elaborati in forma grafica come mostrato nell'esempio in Figura 3.4-64 (Le Vignole - Fiumicino). 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 Figura 3.4-64 si evince la elevata ripetibilità delle misure di  $V_s$ , oltre che degli altri profili.



Figura 3.4-61 – Attrezzatura SDMT.

Figura 3.4-62 – Sorgente di energizzazione in superficie.

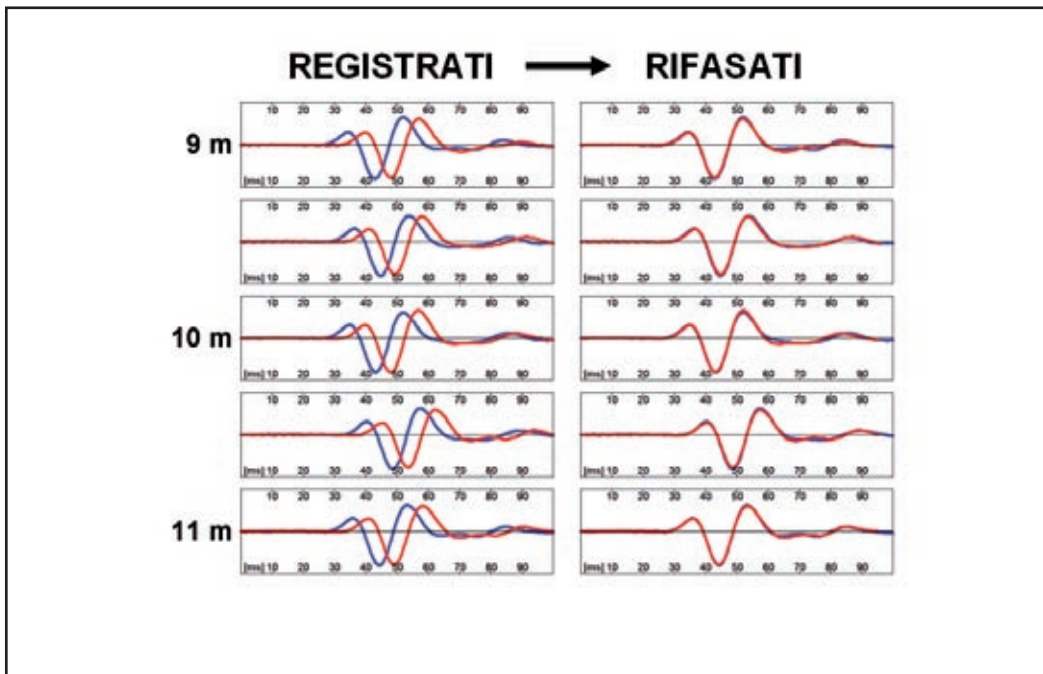


Figura 3.4-63 – Esempio di sismogrammi ottenuti da SDMT a varie profondità di prova nel sito di Telespazio (Piana del Fucino, Abruzzo), registrati e rifsati secondo il ritardo calcolato.

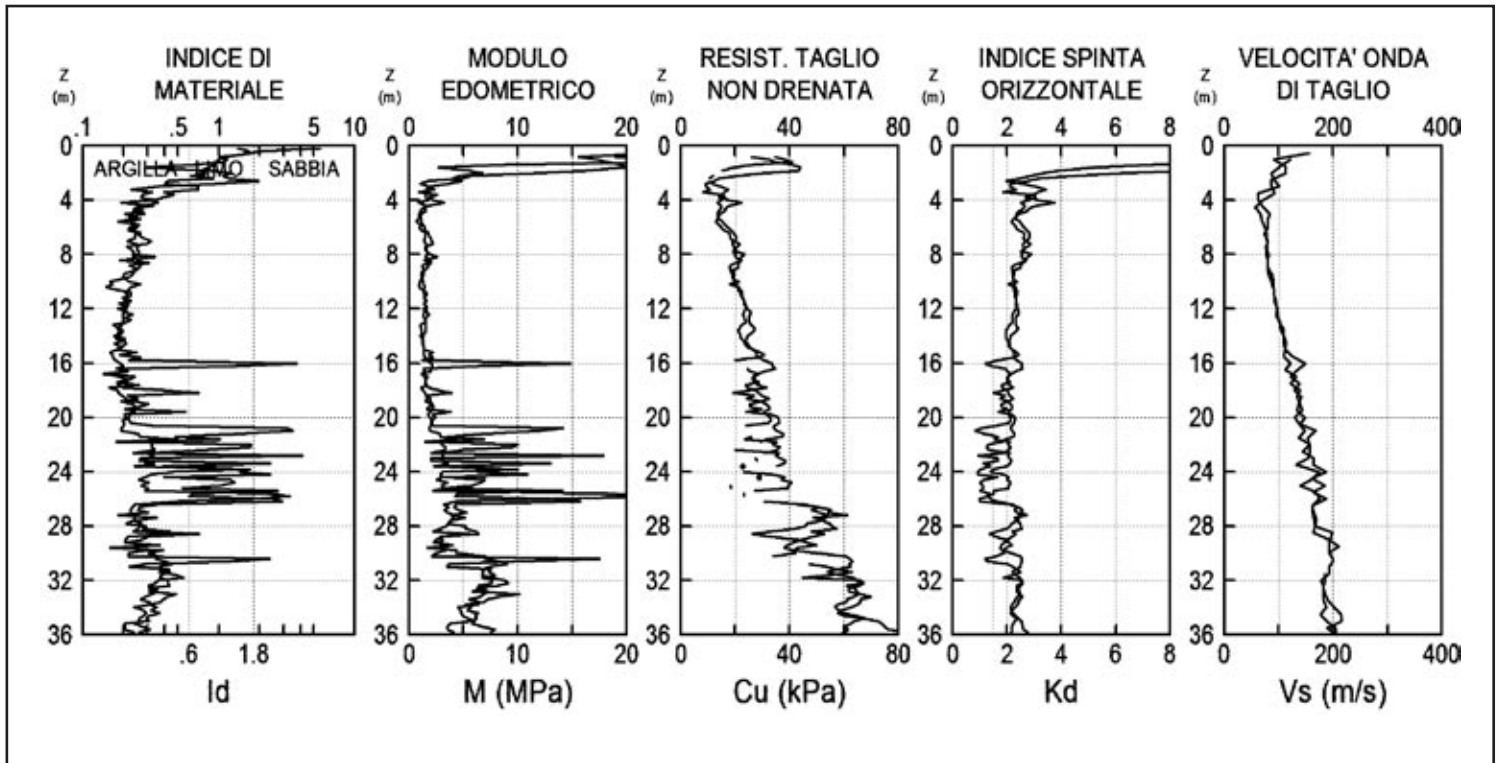


Figura 3.4-64 – Profili SDMT nel sito Le Vignole (Fiumicino, Roma), ottenuti in due verticali vicine.

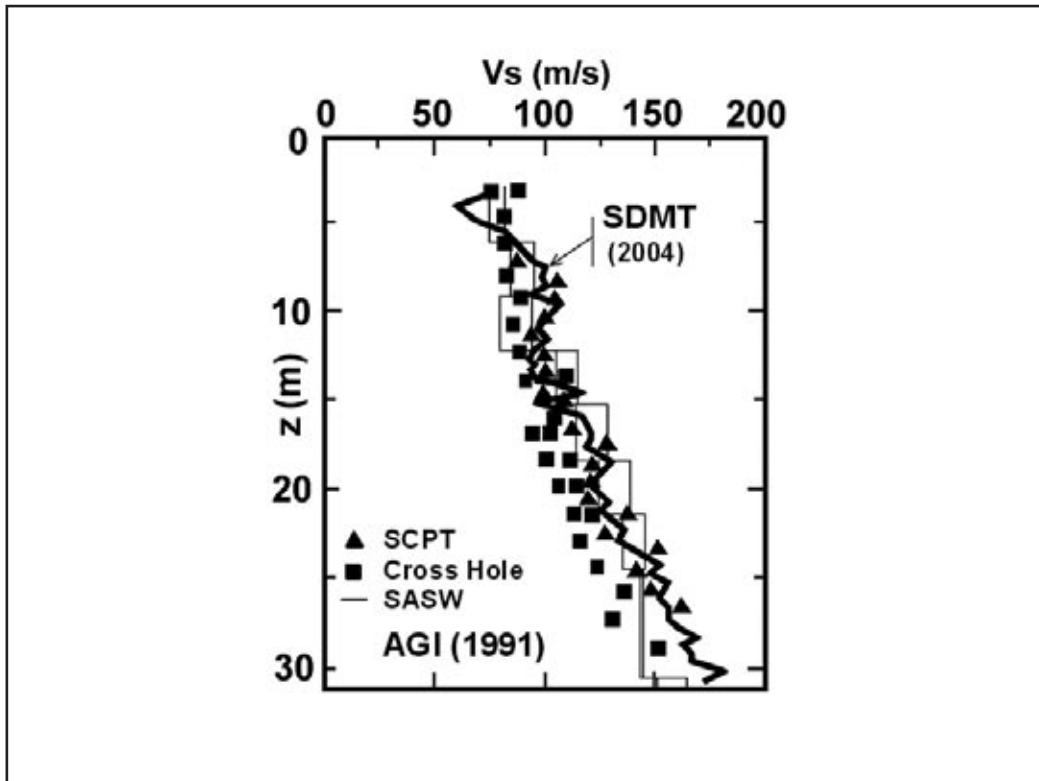


Figura 3.4-65 – Confronto profili di  $V_s$  da SDMT e da SCPT, Cross-Hole e SASW (AGI, 1991) nel sito di ricerca del Fucino (L'Aquila).

### 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).

### 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 a 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 (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  $M_{DMT}$ .

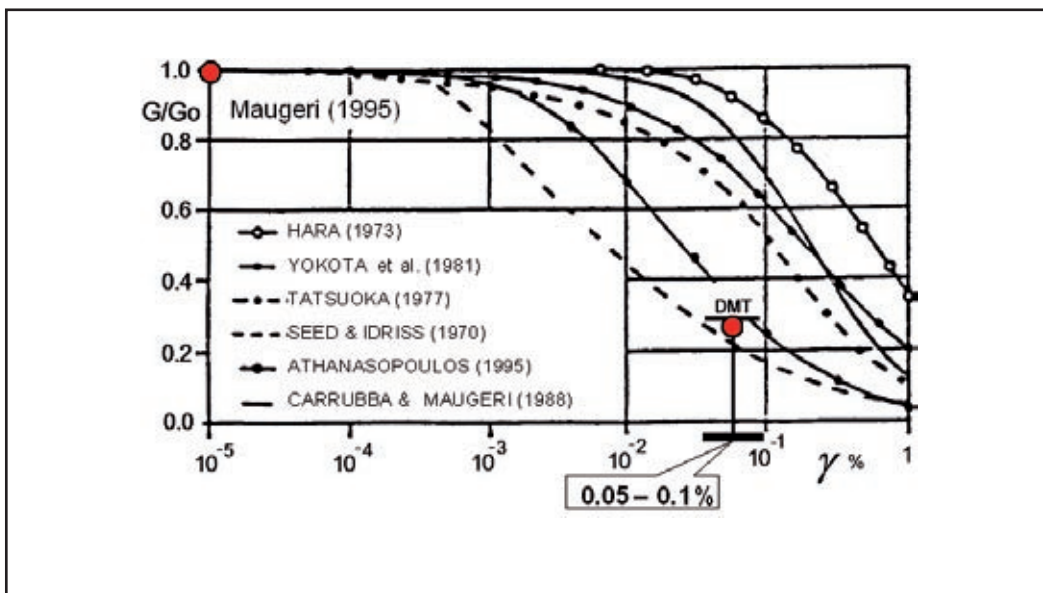


Figura 3.4-66 – Metodo di tentativo per ricavare curve  $G$ - $\gamma$  da SDMT.

### 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*.

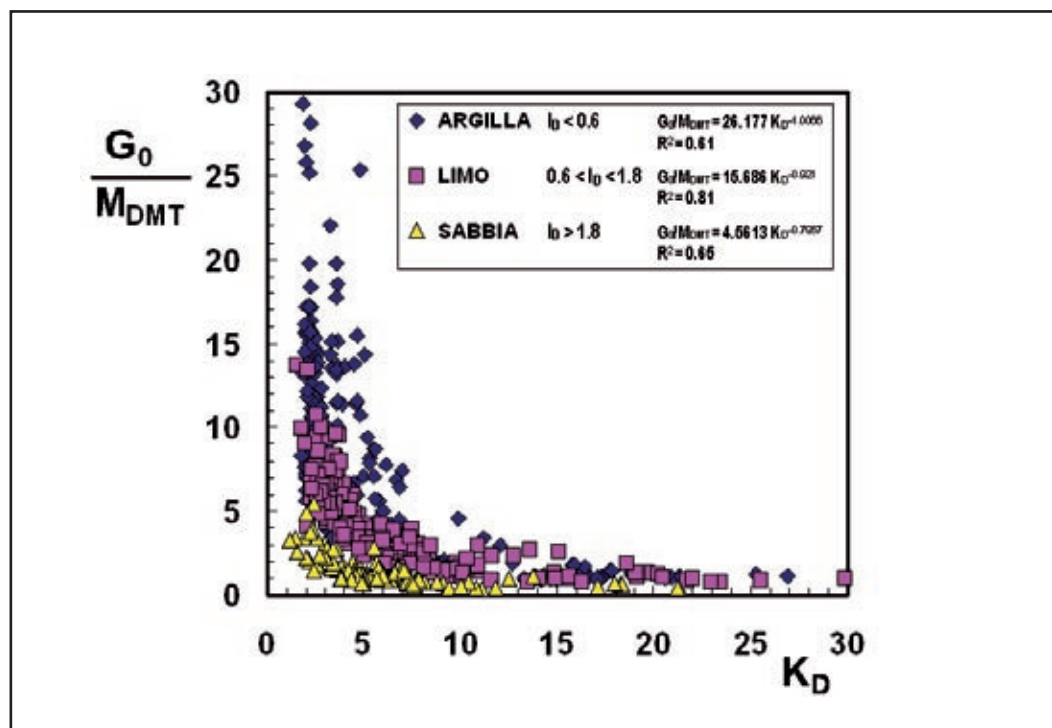


Figura 3.4-67 – Rapporto  $G_0/M_{DMT}$  in funzione di  $K_D$  (OCR) per vari tipi di terreno.

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 a 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  $V_{S1}$ , 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.

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.

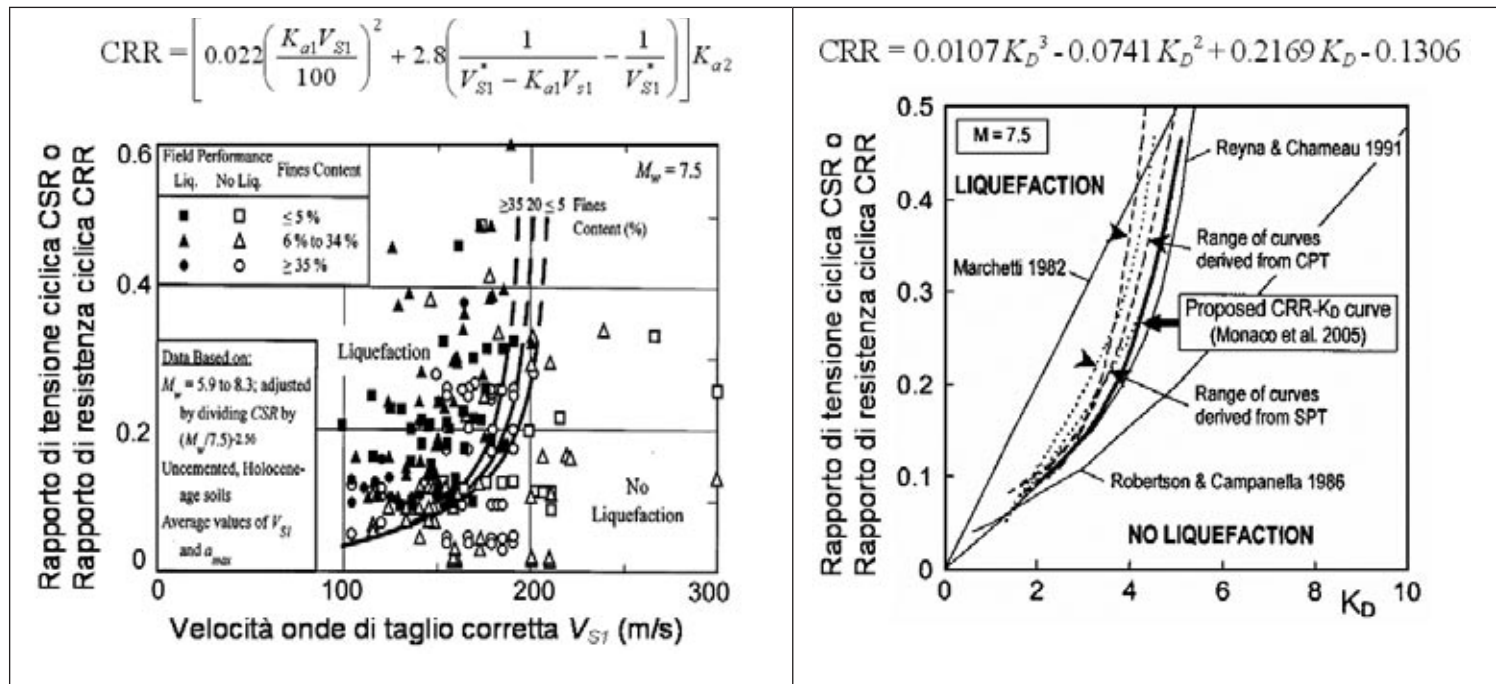


Figura 3.4-68 – Curve per valutare  $CRR$  da  $V_{S1}$  per sabbie pulite non cementate (Andrus e Stokoe, 2000).

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

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  $V_{S1} = V_S (P_a / \sigma'_{v0})^{0.25}$ , dove  $V_S$  è corretta per la tensione geostatica  $\sigma'_{v0}$  ( $P_a$  = 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, stimulate 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 esempio 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.

### 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 (Figura 3.4-70, Vado Ligure), con la sorgente di energizzazione collocata sul fondale marino.

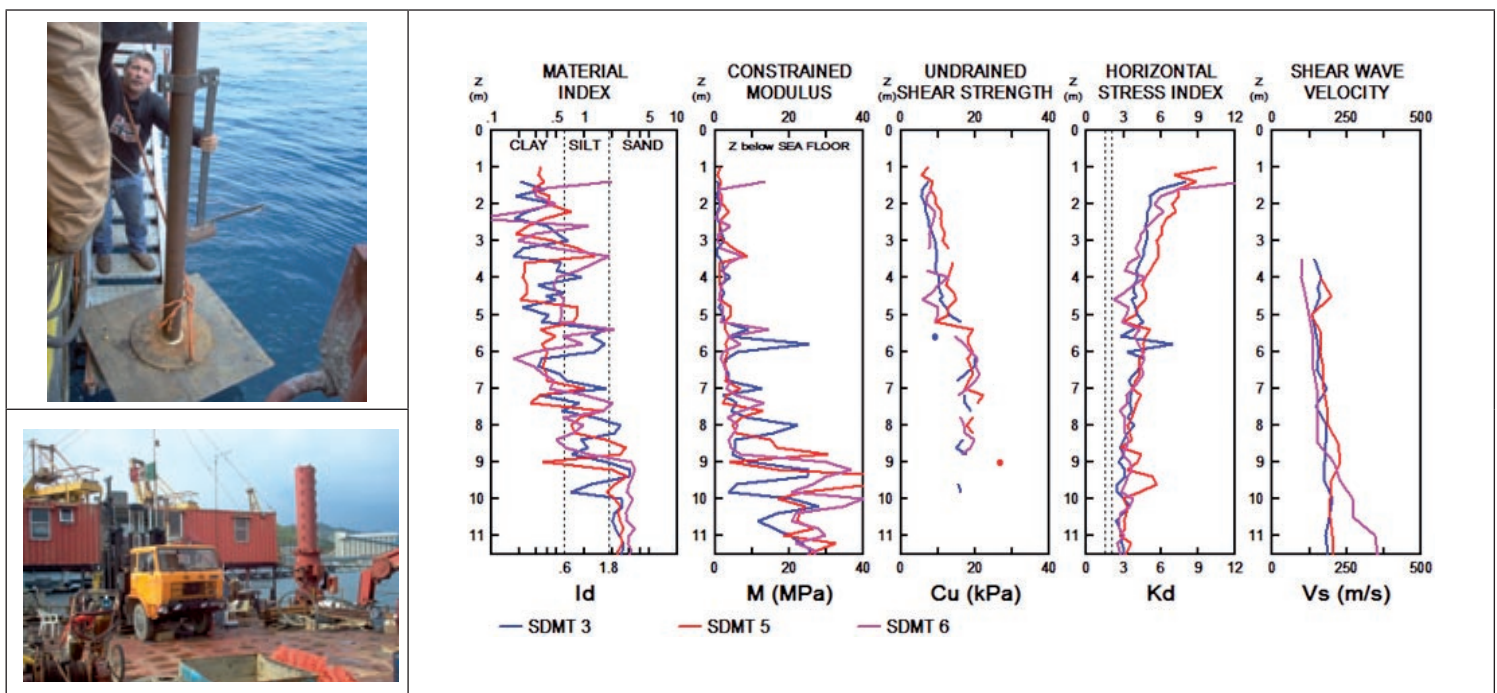


Figura 3.4-70 – Dettagli delle indagini e profili di prove SDMT *offshore* nel sito di Vado Ligure (Savona).

### 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.

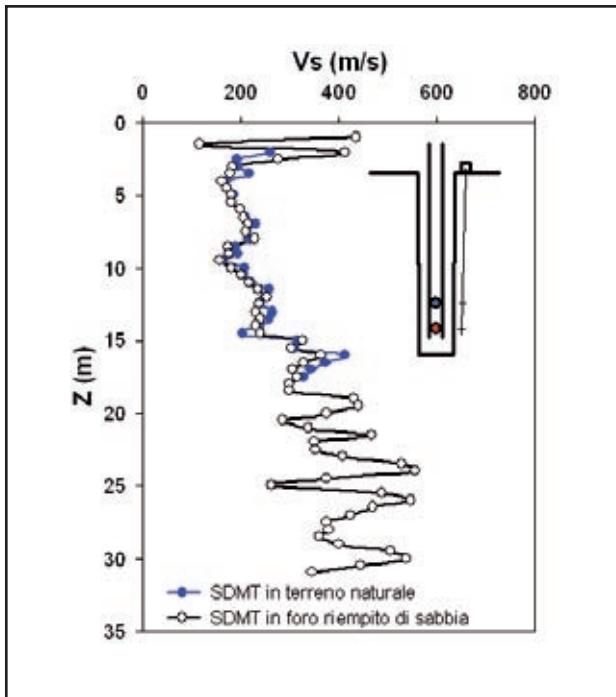


Figura 3.4-71 – Confronto tra profili di  $V_s$  ottenuti da SDMT nel terreno naturale e in un foro riempito di sabbia nel sito di Montescaglioso – Ginosa (Matera).

#### 3.4.4.2.10.9 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 a 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.
- A 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. È 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.

#### 3.4.4.2.10.10 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 (esempio 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 esempio *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.

#### 3.4.4.2.10.11 Riferimenti bibliografici

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. Geoenviron. 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. Geoenviron. 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 N. 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.

#### **3.4.4.2.11 Prove pressiometriche con pressiometro autoperforante (SBP)**

La prova ha lo scopo di determinare la curva di espansione (curva pressione-spostamenti radiali) di una sonda cilindrica preventivamente inserita nel terreno. Dalla curva di espansione pressiometrica è possibile ricavare le seguenti informazioni:

- modulo di taglio  $G$ ;
- densità relativa  $[D]$ , angolo di resistenza al taglio  $(\phi)$  e di dilatanza  $(\psi)$  dei terreni a grana grossa;
- resistenza al taglio non drenata  $[S_v]$  dei terreni a grana fine.

La prova pressiometrica viene realizzata in tutti i terreni sciolti, nelle rocce tenere e nelle rocce vere e proprie. Nelle presenti IT viene trattata la prova con pressiometro autoperforante eseguibili unicamente in terreni sciolti, rinviando alla norma di riferimento per la prova in roccia. La prova è drenata nel caso dei terreni a grana grossa (ghiaie, sabbie, sabbie debolmente limose) e non drenata in quelli saturi a grana fine (argille e argille limose). Nei terreni a grana fine parzialmente saturi e nel caso di terreni limosi e limo-argillosi è possibile che si verifichi una condizione di parziale drenaggio. L'interpretazione convenzionale dei risultati di prova fa riferimento o alla condizione drenata o a quella non drenata.

##### **3.4.4.2.11.1 Schema esecutivo della prova**

La prova pressiometrica consiste nell'installare nel terreno, alla profondità desiderata, una sonda cilindrica e nell'espandere successivamente tale sonda registrando le pressioni applicate e gli spostamenti radiali o le variazioni di volume della sonda.

Sono disponibili diversi tipi di pressimetri: pressiometro Menard (MPM), presso-pressiometro (PIP), pressiocono (FDPM) e il pressiometro autoperforante (SBP). L'attrezzatura di seguito descritta è quest'ultima.

La sonda cilindrica è cava e al suo interno consente il passaggio di un utensile disagregatore. Il fluido di perforazione e i detriti risalgono in superficie passando all'interno della sonda. La sonda ha diametro di 80 mm e lunghezza complessiva superiore a 1000 mm. Questa tecnica di avanzamento e installazione della sonda nel terreno è ritenuta causare un disturbo minimo.

Esternamente la sonda pressiometrica porta una membrana di gomma eventualmente protetta da strisce metalliche (lanterna cinese) nel caso di terreni ghiaiosi o sabbiosi con asperità. Questa membrana è la parte espandibile della sonda e il rapporto tra la lunghezza della membrana espandibile e il diametro a riposo della sonda deve essere di almeno 6. L'espansione della membrana viene realizzata mediante

### 3.4.7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Barsanti P., D'Intinosante V., Ferrini M. & Signanini P. (2000) – Note sulla sismica a rifrazione con onde di taglio per la caratterizzazione sismica dei terreni. *Atti del XIX Convegno Nazionale GNGTS*, Roma.
- Foti S., Lo Presti D., Pallara O., Rainone M.L. & Signanini P. (2002) – Indagini geotecniche e geofisiche per la caratterizzazione del sito di Castelnuovo Garfagnana (Lucca). *Rivista Italiana di Geotecnica*, Luglio - Settembre.
- Lo Presti D., Luzi L., Pergalani F., Petrini V., Puci I. & Signanini P. (2002) – Determinazione della risposta sismica dei terreni a Castelnuovo Garfagnana (Lucca). *Rivista Italiana di Geotecnica*, Luglio - Settembre.
- Signanini P., Torrese P. & Gasperini L. (2002) – La metodologia VSP per l'investigazione del sottosuolo nell'ambito del progetto VEL della Regione Toscana: il sito sperimentale di Pieve Fosciana (LU). *Atti del XX Conv. GNGTS (avvenuto deposito bozza secondo il D.L. 660 del 31/08/45, art. 1)*.
- Rainone M.L., Signanini P. & D'Intinosante V. (2003) – Metodi geofisici integrati per la ricostruzione del sottosuolo e per la caratterizzazione dinamica dei terreni negli studi di microzonazione sismica: l'esempio di Pieve Fosciana (LU). *Quaderni di Geologia Applicata*, 10 (1). pp. 75-88.
- D'Intinosante V. (2003) – Valutazione della risposta sismica locale in un sito della Lunigiana (Toscana Settentrionale). Analisi dei risultati preliminari. *Atti del I Congresso dell'Associazione Italiana di Geologia Applicata ed Ambientale*. Chieti, 19-20 Febbraio. pp. 343-353.
- Cherubini C., D'Intinosante V., Ferrini M., Rainone M.L., Puccinelli A., D'Amato Avanzi G., Signanini P. & Vessia G. (2004) – Valutazione della risposta sismica locale attraverso l'applicazione di metodologie multidisciplinari comparate: gli esempi di Fivizzano e Licciana Nardi (Toscana Settentrionale). *XI Congresso Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia"*, Genova 25-29 gennaio 2004.
- Cherubini C., D'Intinosante V., Ferrini M., Lai C., Lo Presti D.C., Rainone M.L., Signanini P. & Vessia G. (2004) – Problems associated with the assessment of local site effects through a multidisciplinary integrated study: the case of Fivizzano's town (Italy). *Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, New York, April 13-17 2004.
- Ferrini M., Baglione M., Calderini F., D'Intinosante V., Danese S., Di Lillo R., Fabbroni P., Iacomelli S., Rossi M., Stano S. & Calosi E. (2007) – Le attività della Regione Toscana per la valutazione degli effetti locali dei terreni: il programma regionale V.E.L. *XII Congresso Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia"*, Pisa 10-14 giugno 2007.
- D'Intinosante V., Ferrini M., Eva C. & Ferretti G. (2007) – Valutazione degli effetti di sito mediante l'utilizzo di rumore ambientale in alcuni siti a elevata sismicità della Toscana Settentrionale (Garfagnana e Lunigiana). *XII Congresso Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia"*, Pisa 10-14 giugno 2007.
- Rainone M.L., Signanini P., Pizzica F., Madonna R., Torrese P. D'Intinosante V. & Ferrini M. (2007) – Applicabilità delle tecniche di sismica a rifrazione in onde SH per la valutazione della risposta sismica locale. *XII Congresso Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia"*, Pisa 10-14 giugno 2007.
- Marchetti, S. (1980) - In Situ Tests by Flat Dilatometer. *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, 106(GT3), 299-321.
- ASTM D6635-01 (2001) - Standard Test Method for Performing the Flat Plate Dilatometer. *Book of Standards* 04.09. 14 pp.
- Eurocode 7 - *Geotechnical Design - Part 2: Ground Investigation and Testing*. EN 1997-2:2007.
- TC16 (2001) - The Flat Dilatometer Test (DMT) in Soil Investigations - A Report by the ISSMGE Committee TC16. 41 pp. Reprinted in *Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on the Flat Dilatometer*, Washington D.C. (USA), April 2-5, 2006, 7-48.
- Versione italiana: Marchetti, S., Monaco, P., Totani, G. e Calabrese, M. (2001) - Il Dilatometro Piatto. *Atti XVIII Ciclo Conferenze di Geotecnica di Torino*, 50 pp.