

# The research dilatometer: in situ and calibration chamber test results

C. FRETTI\*, D. LO PRESTI\*\*, R. SALGADO\*\*\*

Fretti C., Lo Presti D. and Salgado R. (1992)  
"The Research Dilatometer : In Situ and Calibration Chamber Test Results",  
Riv. Italiana di Geotecnica, 26, No.4, 237-243.

## 1. Introduction

The research dilatometer (RD) designed and built at ISMES in Italy was first presented at the IV Seminar on Calibration Chambers in Grenoble [FRETTI, 1990] and similar devices were discussed in [MOTAN and KHAN, 1988] and [CAMPANELLA and ROBERTSON, 1988]. This paper presents the results of both calibration chamber and in situ tests performed with the Research Dilatometer.

Differences in construction between the new device and Marchetti's Dilatometer (MD) and the possibility of getting an unloading reloading modulus at an advanced stage of membrane expansion will be discussed.

## 2. The research dilatometer and the calibration chamber

The RD is built in such a way (Fig.1) to allow measurements of the membrane inflating pressure, displacement at the center of the membrane and force  $F$  immediately above the dilatometer blade.

When the dilatometer blade is pushed into the soil the membrane is forced back by the soil behind its zero reading position, the extent of movement depending on the stress state in the soil mass. This membrane compliance can be evaluated for a given blade by the calibration system shown in Fig. 2a, by means of which it is possible to measure the displacement of the central point of the membrane when air pressure is applied against it.

The first step in the interpretation process of a conventional dilatometer test (DMT) or of a research dilatometer test (RDMT) involves determining pressures  $p_0$  and  $p_1$  [MARCHETTI and CRAPPS, 1981].

The pressure  $p_0$  is associated with the membrane lift-off.

In a DMT  $p_0$  is the pressure corresponding to null displacement on the line interpolating A and B readings after the correction for the membrane stiffness (i.e. subtracting from A and B the stress requi-

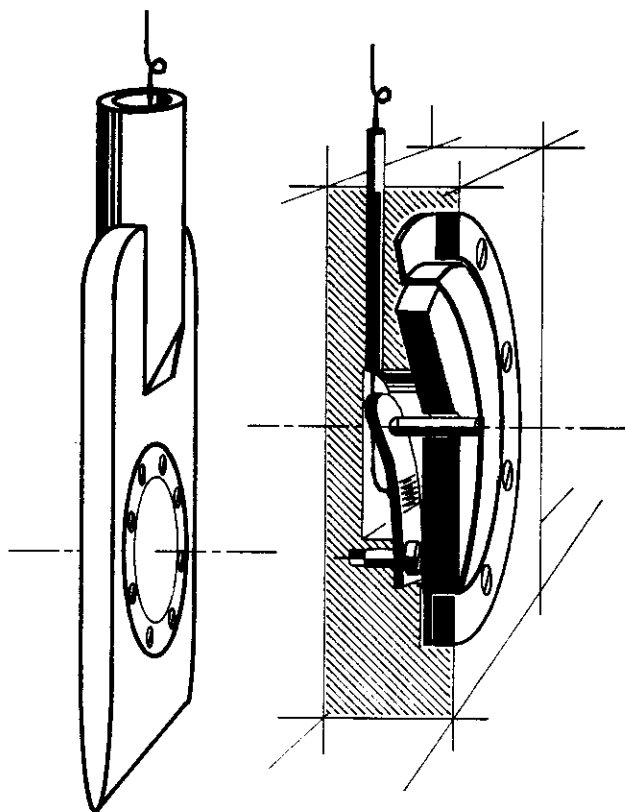
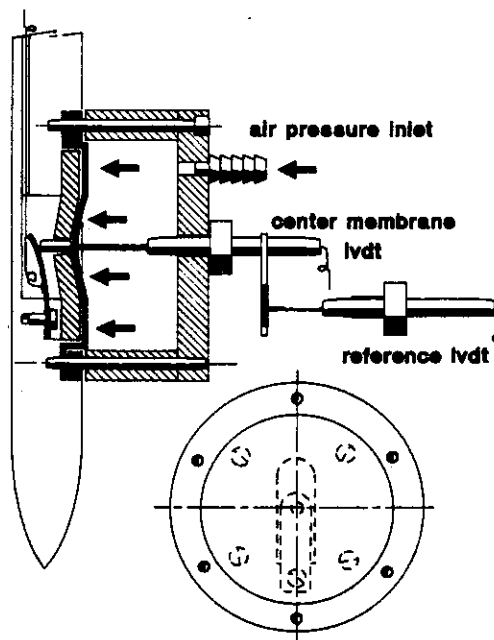


Fig. 1. The Research Dilatometer (RD).



Membrane compliance calibration equipment

Fig. 2a. Testing device for membrane compliance equipment.

\* ISMES, Bergamo.

\*\* Technical University of Torino.

\*\*\* University of California, Berkeley.

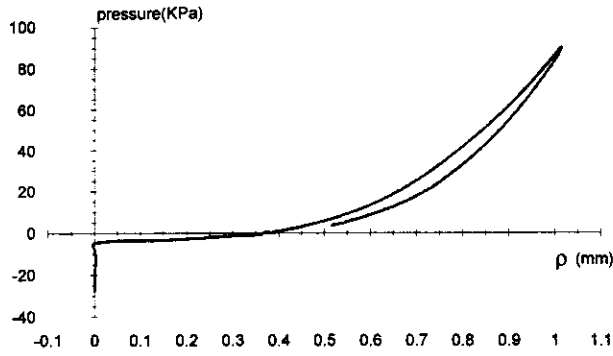


Fig. 2b. membrane hysteresis for RD.

red to deform the membrane in air; see dashed line in Fig 3a). The pressure  $p_1$  corresponds to a displacement of 1.1 mm of the central point of the membrane. Also in determining  $p_1$  the membrane stiffness is accounted for.

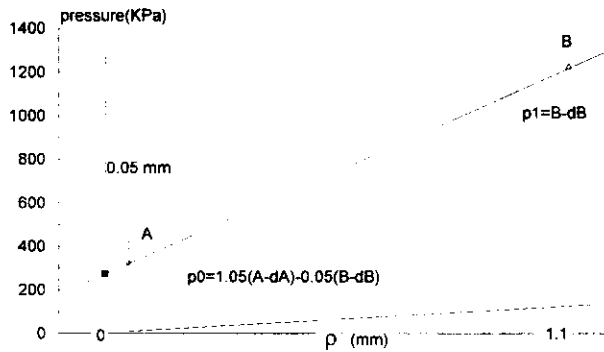


Fig. 3a. Determination of  $p_0$  and  $p_1$  in MD.

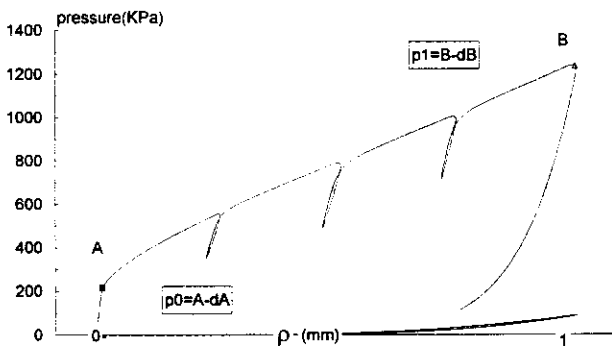


Fig. 3b. Determination of  $p_0$  and  $p_1$  in RD.

In an RDMT,  $p_0$  and  $p_1$  are read directly from the expansion curve (Fig.3b), corrected for membrane stiffness, which gives displacement as a function of the pressure required to expand the membrane.

In particular  $p_1$  is the pressure corresponding to 1 mm displacement while  $p_0$  is the pressure corresponding to zero reading position of the membrane (see Fig.4a).

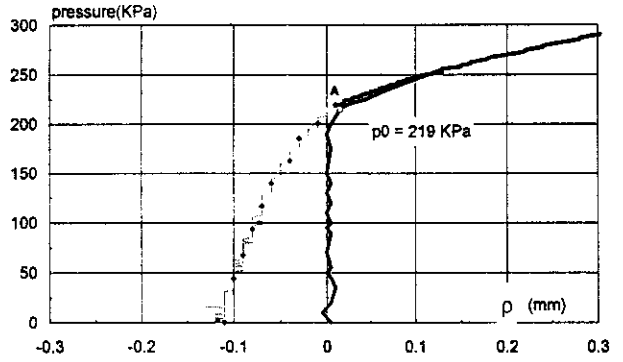


Fig. 4a. Evaluation of  $p_0$  in RD.

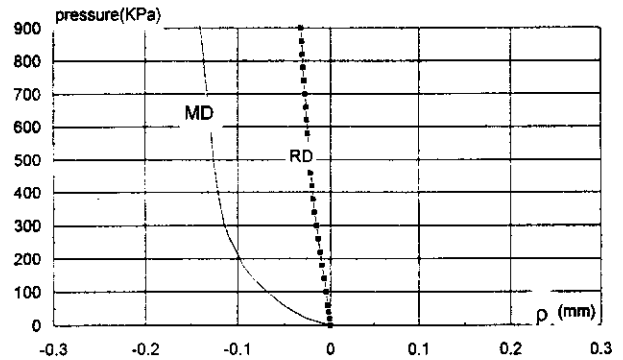


Fig. 4b. Membrane compliance.

Displacements taking place before A represent the recovery of membrane deformation occurred during the blade penetration into the soil. The abrupt change of the slope of the pressure displacement curve is observed in correspondence of point A (see Fig.4a).

The pressure-displacement curve corrected for effect of membrane compliance is also reported in Fig.4a. This curve shows a null displacement until a pressure, corresponding to the  $p_0$  previously determined, is reached.

The membrane compliance, as determined after calibration according to Fig.1 for both RD and MD, is shown in Fig.4b.

An important construction difference between the RD and the MD is the support for the expandable membrane (see Figs.1 and 2); in the RD it is reinforced, so that membrane compliance is smaller (Fig.4b) and plays, therefore, a less important role in the determination of  $p_0$ .

In any case for both the apparatuses  $p_0$  does not represent the in-situ horizontal stress of the undisturbed soil, but it has to be considered as a conventional value measured in a disturbed soil, even if the disturbance introduced by the RD appears to be repetitive.

During an RDMT is also possible to perform any number of unloading-reloading loops in the course of membrane expansion (Fig.5).

For each of these loops we can compute an unloading-reloading dilatometer modulus  $E_{Dur}$ , so

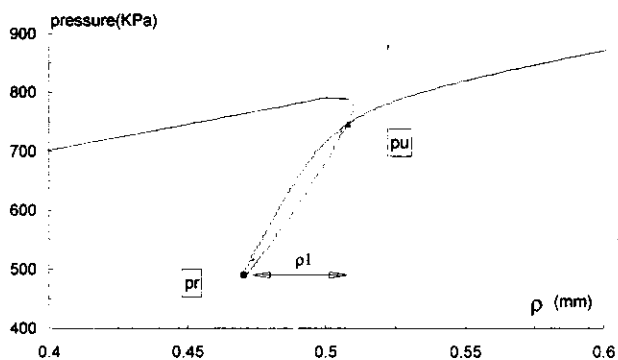


Fig. 5. Unloading-reloading loop.

that the interpretation of an RDMT involves an intermediate step where not only the standard parameters ED, KD, and ID but also EDur can be determined from test results. In Fig. 5 the unloading (pu) and the reloading (pr) pressures as well as the displacement  $\rho_l$ , that are used to compute EDur are shown.

Membrane hysteresis resulted not much relevant (Fig. 2b). Thus, it was decided to not account for it especially considering that the displacement during a loop was extremely small.

The steps involved in the interpretation of RDMT's are then the following:

1. correct for membrane stiffness the expansion curves;
2. read  $p_0$ ,  $p_1$ ,  $p_u$ ,  $p_r$  and  $\rho_l$  from the corrected expansion curve;
3. compute ED, KD, ID and EDur through the proper expressions [MARCHETTI and CRAPPS, 1981]:

$$\begin{aligned}
 KD &= (p_0 - u_0) / \sigma'_v \\
 ID &= (p_1 - p_0) / (p_0 - u_0) \\
 ED &= 38.2(p_1 - p_0) \\
 EDur &= 38.2(p_u - p_r) / \rho_l
 \end{aligned}$$

The calibration chamber used in the tests discussed herein has been described in detail elsewhere [BELLOTTI *et al.*, 1982; BELLOTTI *et al.*, 1983; BALDI *et al.*, 1986; BELLOTTI *et al.*, 1988].

It has a diameter of 1.20 m and a height of 1.50 m. The sample is prepared by pluviial deposition from a travelling sand spreader (TSS) (Fig. 6a), which results in different relative densities depending on the size of the opening (Fig. 6b) through which the sand exits the spreader.

Several travelling sand pluviators have been developed such as: [STOKOE *et al.*, 1985; TATSUOKA *et al.*, 1991; PASSALACQUA, 1991] to reconstitute large size specimens. The most attractive feature of this kind of apparatus is the ease in interrupting the pluviation to insert instrumentation (load cells, geophones, etc.) into the specimens. Furthermore a travel-

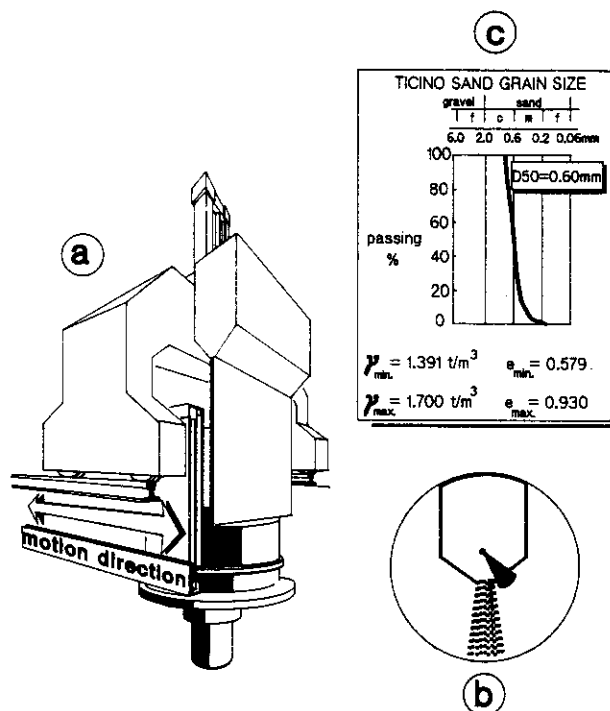


Fig. 6. Sample preparation in CC.

ling pluviator is preferable to a stationary one as it is possible to achieve a higher degree of spatial uniformity of density and grain size distribution [LO PRESTI *et al.*, 1993].

The calibration chamber allows four classes of boundary conditions (BC1, BC2, BC3, BC4) [PARKIN and LUNNE, 1982] during tests; twelve tests were performed in BC1 conditions (constant vertical and lateral stresses throughout the test), while three tests in BC3 (constant vertical stress and lateral strain). Totally 15 tests were performed in CC; eight of them were NC, and seven, OC.

### 3. Ticino Sand

The sand used in the CCT's was the Ticino Sand (TS), from the banks of Ticino River near the northern Italian city of Pavia and processed for elimination of fines prior to testing.

It is a uniform (coefficient of uniformity U of about 1.3), coarse to medium silica sand, with subangular grains having sphericity from 0.7 to 0.8.

Its granulometric curve and some basic properties are shown in Fig. 6c

### 4. The San Prospero Site

The San Prospero site is located in Lombardia, north central Italy, in the Po River valley about 100 km east of Milan.

The soil profile consists of a very uniform cohesionless alluvial deposit of the Holocene period consisting of a NC, medium fine sand underlying a 7 m thick sandy clay layer.

Fines content of the cohesionless horizon ranges from 1 to 6%. The groundwater table is at a depth of about 2 m. A detailed characterization of the site can be found in [JAMIOLKOWSKI *et al.*, 1985].

## 5. Tests results

General test conditions and the dilatometer parameters measured at 70 cm depth, that is approximately the midheight of the specimen, are reported in table I.

Table II shows results of the RDMT at the San Prospero site. The estimated pore pressure and in situ

effective vertical stress are listed for depth ranging from 8 to 20 m.

Both in CC and in San Prospero site DMT's have been performed [PEPE, 1988, DI PIETRO, 1990]. The  $p_0$  and  $p_1$  as well as the dilatometer parameters obtained with both apparatuses MD and RD did not show any relevant differences. Thus the discussion of the results mainly concerns the comparison between ED and EDur measured during RDMT's.

In Fig. 7 the conventional dilatometer modulus ED is plotted vs the unload-reload moduli EDur1 & EDur2 for both the CC and in situ tests, and it appears that conventional modulus ED is about one seventh, one ninth of the secant modulus EDur of an unload-reload loop performed during the dilatometer expansion (see also Table I and II). In Fig. 8 ED, EDur1 and EDur2 for the San Prospero site are plotted with the depth  $z$ . EDur2 is greater than EDur1

TABLE I- RDMT's in CC - Dilatometer parameters

	BC	Dr	OCR	$\sigma'_v$	$\sigma'_h$	$p_0$	$p_1$	ID	KD	ED	EDur	
$n'$	—	%	—	(Kpa)	(Kpa)	(Kpa)	(Kpa)	(—)	(—)	(Mpa)	loop1	loop2
											(Mpa)	(Mpa)
139	1	41	1	112	64	131	532	3.1	1.2	15.3	—	—
145	1	84	1	113	49	299	1236	3.1	2.6	35.8	—	—
146	1	30	1	111	65	120	557	3.6	1.1	16.7	—	—
147	1	35	1	513	291	447	1712	2.8	0.9	48.3	—	—
246	3	55	1	77	31	180	1068	4.9	2.3	33.9	—	—
247	3	53	1.9	76	38	178	836	3.7	2.3	25.1	—	—
248	3	56	7.1	76	55	231	1194	4.2	3.0	36.8	—	—
249	1	40	1	111	45	157	846	4.4	1.4	26.3	—	—
250	1	46	1	311	127	209	1483	6.1	0.7	48.7	291.1	331.4
251	1	40	1.4	112	49	92	576	5.3	0.8	18.5	204.9	—
252	1	57	1.4	111	48	205	887	3.3	1.8	26.1	194.0	219.5
253	1	57	2.8	111	56	249	1056	3.2	2.2	30.8	230.8	278.1
254	1	60	4.6	111	60	354	1599	3.5	3.2	47.6	340.9	395.2
255	1	59	1	511	214	689	2758	3.0	1.3	79.0	411.5	462.9
256	1	60	8.2	111	78	337	1656	3.9	3.0	50.4	339.3	377.6

As all CC's tests were performed on dry sand, stresses are effective.

TABLE II- RDMT testing at the San prospero site

dept	$u_0$	$\sigma'_v$	$p_0$	$p_1$	ID	KD	ED	EDur	
(m)	(Kpa)	(Kpa)	(Kpa)	(Kpa)	(—)	(—)	(Mpa)	loop1	loop2
								(Mpa)	(Mpa)
8	49	94	691	2371	2.6	6.9	64.2	—	—
9	59	102	540	1914	2.9	4.7	52.5	298.0	319.4
10	69	110	603	1995	2.6	4.8	53.2	288.1	324.5
11	78	119	928	2622	2.0	7.2	64.7	348.8	400.7
12	88	127	701	2144	2.4	4.8	55.1	279.7	400.4
13	98	135	1465	3902	1.8	10.1	93.1	488.0	520.5
14	108	144	1094	3098	2.0	6.9	76.6	397.2	447.0
15	118	152	889	2515	2.1	5.1	62.1	313.7	371.4
16	128	160	789	2233	2.2	4.1	55.2	326.4	349.7
17	137	169	781	2282	2.3	3.8	57.3	305.5	350.2
18	147	177	271	991	5.8	0.7	27.5	164.5	.
19	161	189	620	2349	3.8	2.4	66.0	.	.
20	167	194	1392	3204	1.5	6.3	69.2	403.6	450.6

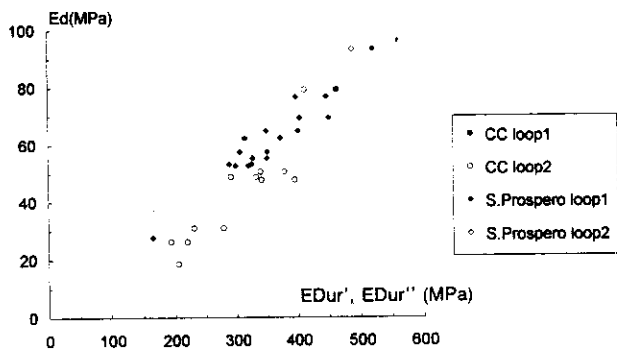


Fig. 7. Comparison of ED and EDur.

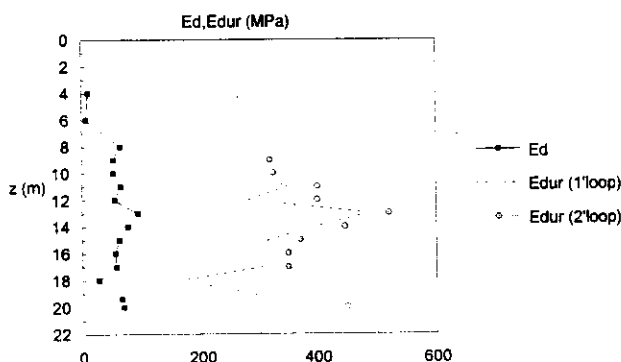


Fig. 8. ED and EDur at San Prospero.

reflecting a larger value of the mean effective stress.

In particular it results:

	(EDur/ED)av	1SD
CC		
1 st cycle	7.30	1.88
2nd cycle	7.65	1.19
San Prospero		
1st cycle	7.36	2.30
2nd cycle	8.45	2.89

Differences between ED and EDur can be mainly explained considering that ED reflects the sand behaviour after it has been subjected to large straining while EDur reflects the sand behaviour of the disturbed soil but within the current yield surface (see also Fig. 9).

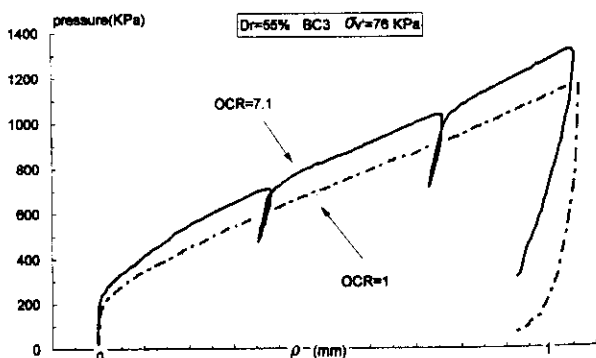


Fig. 9. Effect of OCR on dilatometer results.

### 6. Conclusion

The analysis of results from RDMT's performed in CC on pluvially deposited TS and at San Prospero site allows the following conclusions concerning the engineering significance of the dilatometer stiffness:

- the conventional modulus ED is only one seventh, one ninth of the secant modulus EDur performed during the dilatometer expansion (see Figs. 7 and 8 and also Tables I and II).
- the measured ED appears to be insensitive to the mechanical overconsolidation of the CC specimens of TS (see Fig.9). This is because ED is a measure of the sand response after it has been subjected to large straining along a complicated path during penetration of the dilatometer blade.
- as final remarks the RD offers the possibility of development of new correlation between EDur and elastic parameters together with a better accuracy in the determination of p0.

### REFERENCES

BALDI G., BELLOTTI R., GHIONNA V., JAMIOLKOWSKI M. (1986) - *Flat Dilatometer Tests in Calibration Chambers*. In Situ '86, Proc. Spec. Conf. GED ASCE, Virginia Tech, Blacksburg.

BELLOTTI R., BIZZI G., GHIONNA V. (1982) - *Design, Construction and Use of a Calibration Chamber*. Proc. ESOPT II, Amsterdam, vol.II, pp. 439-446.

BELLOTTI R., GHIONNA V., JAMIOLKOWSKI M., PEDRONI S. (1983) - *Le Prove Penetrometriche Statiche nei Terreni Non Coesivi*. Atti dell'Istituto di Scienza delle Costruzioni del Politecnico di Torino, n. 606.

BELLOTTI R., CRIPPA V., PEDRONI S. (1988) - *Saturation of Sand Specimen for Calibration Chamber Tests*. Penetration testing 1988, ISOPT 1, Orlando, Fla, pp. 661-671.

CAMPANELLA R.G., ROBERTSON P.K. (1988) - *Use and Interpretation of a Research DMT*. Draft submitted for publication in the J.G.E., ASCE.

CESTARI F. (1990) - *Prove Geotecniche in Sito*. Ed. Geograph, Segrate, Italy.

DI PIETRO G. (1990) - *Analisi delle prove dilatometriche eseguite nelle sabbie del fiume Po in località San Prospero*. M.Sc. Thesis, Department of Structural Engineering, Politecnico di Torino.

FRETTI C. (1990) - *On Dilatometer Stiffness of Ticino Sand*. IV Seminar on Calibration Chambers, Grenoble, oral report only.

JAMIOLKOWSKI M., LADD C.C., GERMAINE J.T., LANCELOTTA R. (1985) - *New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils*. Proc. 11th ICSMFE, San Francisco, pp. 57-153.

LO PRESTI D.C.F., BERARDI R., PEDRONI S., CRIPPA V. (1993) - *A new travelling sand pluviator to reconstitute specimens of well graded silty sands*. Geotechnical Testing Journal, March.

MARCHETTI S., CRAPPS D.K. (1981) - *Flat Dilatometer Manual*. Schertmann and Crapps, Inc., Gainsville, USA.

MOTAN S.E., KHAN A.Q. (1988) - *In Situ Shear Modulus of Sands by a Flat Plate Penetrometer: a Laboratory Study*. Geotechnical Testing Journal, vol.XI, n.4, pp. 257-262.

PARKIN A.K., LUNNE T. (1982) - *Boundary Effects in the Laboratory Calibration of a Cone Penetrometer in Sand*. Proc.II ESOPT, vol.II, pp. 761-769.

PASSALACQUA R. (1991) - *A sand-spreader used for the reconstitution of granular soil models*. Soils and Foundations, JSSMFE, vol.XXXI, n.2, pp.175-180.

PEPE C. (1988) - *Interpretation of Dilatometer tests in Calibration Chamber*. M. Sc. Thesis, Department of Structural Engineering, Politecnico di Torino.

- STOKOE K.H., LEE S.H.H., KNOX D.P. (1985) - *Shear Moduli Measurements under true triaxial stresses*. Advances in the art of testing soils under cyclic conditions, Detroit, Michigan.
- TATSUOKA F., OKAHARA M., TANAKA T., TANI K., MORIMOTO T., SIDDIQUEE M.S.A (1991) - *Progressive failure and particle size effect in bearing capacity of a footing on sand*. Proceedings of Geotechnical Engineering Congress, ASCE, Geotechnical Special Publication n. 27, vol. XI, pp.788-801.

## SOMMARIO

### Il dilatometro sperimentale: risultati di prove in sito ed in camera di calibrazione

#### Introduzione

Il dilatometro sperimentale (RD), progettato e realizzato presso l'ISMES di Bergamo, è stato presentato ufficialmente, per la prima volta, durante il IV seminario sulle Camere di Calibrazione tenuto a Grenoble nel 1990 [FRETTI, 1990]. Apparecchiature simili erano già state sviluppate nel Nord-America (Si vedano i lavori di MOTAN e KHAN, 1988 e CAMPANELLA e ROBERTSON, 1988). Questo articolo presenta i risultati di prove dilatometriche eseguite col dilatometro sperimentale in Camera di Calibrazione ed in sito. Nell'articolo vengono presentate le differenze costruttive tra RD e il tradizionale Dilatometro di Marchetti (MD). L'analisi dei risultati è soprattutto centrata nel confronto tra il modulo dilatometrico ED e i moduli di scarico-ricarico determinabili con l'RD.

#### Dilatometro sperimentale e camera di calibrazione

I particolari costruttivi più significativi dell'RD sono mostrati in Figura 1. È possibile misurare la forza F necessaria per l'infissione (la cella di carico è situata appena sopra la lama), la pressione di espansione della membrana nonché il suo spostamento, rilevato in centro.

Quando il dilatometro è infisso nel terreno, la membrana è spinta indietro rispetto alla sua posizione di zero. L'entità di tale spostamento dipende dallo stato tensionale nel terreno.

Codesto mal funzionamento della membrana può essere valutato grazie al sistema di taratura mostrato in Figura 2a.

L'interpretazione di una prova dilatometrica convenzionale (DMT) o di una prova dilatometrica eseguita col dilatometro sperimentale (RDMT) comporta la determinazione delle pressioni  $p_0$  e  $p_1$  [MARCHETTI e CRAPPS, 1981]. La pressione  $p_0$  corrisponde a quella di distacco. In particolare, in una prova DMT,  $p_0$  è associato alla condizione di spostamento nullo, individuata dalla retta interpolatrice dei punti A e B (Fig. 3a). La pressione  $p_1$  corrisponde a uno spostamento di 1.1 mm del punto centrale della membrana. Nella determinazione di  $p_0$  e  $p_1$  occorre tenere conto della rigidità della membrana, sottraendo ai valori di pressione misurati quelli che competono alla deformazione della membrana in aria (linea tratteggiata in Fig. 3a).

In una prova RDMT,  $p_0$  e  $p_1$  sono determinate direttamente dalla curva di espansione, previa correzione per la rigidità della membrana. In particolare  $p_1$  è la pressione corrispondente ad uno spostamento di 1.0 mm, mentre  $p_0$  corrisponde alla posizione di zero della membrana. Gli spostamenti che si verificano prima del punto A rappresentano il recupero della deformazione della membrana che si è verificato nel corso della penetrazione. In corrispondenza del punto A si osserva un improvviso cambiamento di pendenza nella curva di espansione. La curva pressioni-cedimenti, corretta per tener conto del mal funzionamento della membrana, è anch'essa riportata in Fig. 4a. Tale curva mostra uno spostamento nullo fino a quando non si raggiunge una pressione corrispondente al  $p_0$  precedentemente determinato.

La calibrazione della membrana, effettuata secondo lo schema di Fig. 1, è riportata in Fig. 4b sia per l'RD che per l'MD.

Un'importante differenza costruttiva tra le due apparecchiature riguarda il supporto della membrana (vedasi Figg. 1 e 2); nel dilato-

metro sperimentale tale supporto è molto più rigido, cosicché il mal funzionamento della membrana gioca in questo caso un ruolo più modesto consentendo una più accurata determinazione di  $p_0$ .

In ogni caso, in entrambe le apparecchiature, po non rappresenta la pressione orizzontale a riposo di un terreno indisturbato; essa deve essere riguardata come un valore convenzionale misurato in un terreno disturbato, anche se nel caso dell'RD il disturbo sembra avere caratteristiche di migliore ripetitività.

In prove RDMT è possibile eseguire cicli di scarico-ricarico (Fig. 5). Per ogni ciclo è possibile calcolare un modulo di scarico-ricarico EDur. In Fig. 5 sono indicate le pressioni di scarico ( $p_u$ ) e ricarica ( $p_r$ ), come pure lo spostamento  $l$ , utilizzati per il calcolo di EDur.

L'isteresi della membrana (Fig. 2b) risultò trascurabile.

L'interpretazione della prova RDMT si basa sui seguenti passi:

1. correzione delle curve di espansione per la rigidità della membrana;
2. lettura di  $p_0$ ,  $p_1$ ,  $p_u$ ,  $p_r$ ,  $Q_1$  dalla curva corretta
3. calcolo di ED, KD, ID, EDur attraverso le espressioni appropriate [MARCHETTI e CRAPPS, 1981]:

$$\begin{aligned} KD &= (p_0 - u_0) / \sigma'_v \\ ID &= (p_1 - p_0) / (p_0 - u_0) \\ ED &= 38.2 * (p_1 - p_0) \\ EDur &= 38.2 * (p_u - p_r) / \rho l \end{aligned}$$

Numerosi particolari e dettagli relativamente alla Camera di Calibrazione utilizzata sono reperibili in [BELLOTTI *et al.*, 1983; BALDI *et al.*, 1985; BELLOTTI *et al.*, 1988]. Il campione (1.2 m in diametro e 1.5 m in altezza) viene ricostruito per deposizione pluviale con un depositore viaggiante (TSS), illustrato in Fig. 6a. Differenti densità relative sono ottenibili variando la dimensione dell'apertura attraverso cui esce la sabbia (Fig. 6b). Vari depositori viaggianti per la ricostruzione di campioni di grandi dimensioni sono indicati in letteratura [STOKOE *et al.*, 1985; TATSUOKA *et al.*, 1991; PASSALACQUA, 1991]. La caratteristica più interessante di tali apparecchiature risiede nella facilità di interruzione della deposizione allo scopo di consentire la sistemazione nel campione di varia strumentazione (celle di carico, geofoni, ecc.). Inoltre un depositore viaggiante è preferibile ad uno stazionario in quanto offre una maggiore omogeneità spaziale sia in termini di densità che di distribuzione granulometrica [Lo PRESTI *et al.*, 1993]. La camera di calibrazione consente quattro differenti condizioni al contorno [PARKIN e LUNNE, 1982]. Dodici prove furono eseguite in condizione BC1 (tensioni verticale e orizzontale costanti), altre tre in condizioni BC3 (tensione verticale e deformazione laterale costanti). In totale furono eseguite 12 prove di cui 8 normalconsolidate e 7 sovraconsolidate.

#### Sabbia del Ticino

È stata utilizzata in Camera di Calibrazione la sabbia del Ticino prelevata dalle sponde dell'omonimo fiume in località Pavia e trattata per l'eliminazione del fine prima delle prove. È una sabbia silicea, medio-grossa con particelle subangolari ad elevata sfericità (0.7-0.8). Il coefficiente di uniformità è piccolo ( $U = 1.3$ ).

Curva granulometrica e caratteristiche fisiche di maggiore interesse sono riassunte in Fig. 6c.

#### Sito di San prospero

È situato in Lombardia, nella valle del Po a circa 100 Km ad est di Milano. I primi sette metri al di sotto del piano campagna sono costituiti da argilla sabbiosa, sovrastante uno strato molto uniforme di sabbia medio-fine di origine alluvionale dell'Olocene. Questo orizzonte si estende sino alla profondità di circa 20-30 metri sotto il piano campagna. Il contenuto di fine dell'orizzonte sabbioso varia tra l'1 e il 6%. La falda freatica è situata a circa due metri sotto il piano campagna. Un'accurata caratterizzazione geotecnica del sito è reperibile in [JAMIOLKOWSKI *et al.*, 1985].

## Risultati

Le condizioni generali di prova ed i parametri dilatometrici misurati in Camera di Calibrazione alla profondità di 70 cm sono riportati in Tavola I. La Tavola II mostra invece i risultati della prova RDMT a San Prospero.

Sono disponibili prove DMT sia per la Camera di Calibrazione che per il sito di San Prospero [PEPE, 1988; DI PIETRO, 1990]. I valori di  $p_0$  e  $p_1$ , nonché i parametri dilatometrici ottenuti con entrambe le apparecchiature non mostrano differenze significative. Pertanto la discussione si concentra nel confronto tra moduli ED e moduli EDur.

In Figura 7 il modulo dilatometrico ED è diagrammato in funzione di EDur1 ed EDur2 per le prove in Camera di Calibrazione e per quella in sito. Risulta che ED è circa un settimo un nono del modulo secante EDur.

In Fig. 8 ED, EDur1 ed EDur2 per il sito di San Prospero sono diagrammati in funzione della profondità  $z$ . Ai commenti precedenti occorre aggiungere che EDur2 è sempre maggiore di EDur1, il che riflette la dipendenza della rigidità dal livello tensionale corrente. In particolare risulta quanto segue:

	(EDur/ED)av	ISD
CC		
1° ciclo	7.30	1.88
2° ciclo	7.65	1.19
San Prospero		
1° ciclo	7.36	2.30
2° ciclo	8.45	2.89

Le differenze tra ED ed EDur possono essere fondamentalmente spiegate considerando che il primo riflette il comportamento della sabbia che è stata assoggettata a grandi deformazioni, mentre il secondo rappresenta il comportamento del materiale disturbato ma al di sotto della superficie di plasticizzazione corrente (si veda anche la Fig. 9).

## Conclusioni

L'analisi di risultati di prove RDMT eseguite in Camera di Calibrazione su campioni ricostruiti di sabbia del Ticino e nel sito di San Prospero su sabbie naturali oloceniche ha fornito le seguenti indicazioni riguardanti il significato ingegneristico della rigidità dilatometrica:

- il modulo convenzionale ED è pari ad un settimo, un nono del modulo secante EDur;

- i valori di ED misurati sembrano insensibili alla sovraconsolidazione meccanica imposta in Camera di Calibrazione ai provini di sabbia del Ticino (Fig. 9). Ciò accade perché ED rappresenta la risposta della sabbia che è stata assoggettata a grandi deformazioni secondo un percorso di sollecitazioni complesso, nella fase di penetrazione;

- infine l'RD consente di sviluppare nuove correlazioni tra EDur e parametri elastici, nonché la determinazione di  $p_0$  con una maggiore precisione.