

# La deposizione pluviale come mezzo per la preparazione dei provini di sabbia

M. BATTAGLIO \*, R. BELLOTTI \*\*, E. PASQUALINI \*

**SOMMARIO:** Viene presentato il metodo detto della « deposizione pluviale » che consente di ricostituire, in laboratorio, i provini di sabbia da sottoporre alle prove meccaniche di resistenza al taglio.

Vengono descritti e commentati i risultati di numerose prove, effettuate allo scopo di determinare la rispondenza dell'apparecchiatura (sand spreader) ai requisiti indispensabili per una corretta preparazione dei provini di sabbia.

Particolare attenzione è stata posta nei riguardi dei parametri che intervengono a definire la densità relativa dei provini ottenuti e della loro ripetibilità: si può concludere che il fattore principale che controlla la densità della sabbia depositata pluvialmente è l'intensità di deposizione.

Infine vengono riportati, in appendice, i risultati di tutte le prove eseguite.

## Premessa

Il lavoro descritto nel presente rapporto rientra nell'ambito del progetto Finalizzato di Geodinamica, Sottoprogetto 2. Più precisamente costituisce una parte della ricerca intrapresa dall'unità operativa 2.6.4. (Istituto di Scienza delle Costruzioni del Politecnico di Torino - Ingegneria - responsabile Michele Jamiolkowski) avente come tema lo « Studio del comportamento dei terreni sabbiosi in presenza di sollecitazioni dinamiche. Elaborazione di nuovi criteri per la valutazione del pericolo alla liquefazione dei depositi sabbiosi ».

Esso è stato reso possibile grazie alla collaborazione del Centro di Ricerche Idrauliche e Strutturali dell'ENEL di Niguarda (Milano).

## 1. Introduzione

Il prelievo di campioni « indisturbati » nel caso dei terreni sabbiosi risulta ancora oggi un'operazione difficile dal punto di vista tecnico e di dubbia riuscita. Se si tiene inoltre conto dell'ulteriore disturbo dovuto al trasporto delle carote ed alla preparazione del provino in laboratorio, si comprendono i diversi tentativi compiuti recentemente di mettere a punto delle tecniche di « ricostituzione » di campioni di sabbia in laboratorio, aventi caratteristiche « le più vicine possibili » a quelle del deposito di sabbia in situ.

Tali tecniche di ricostituzione sono d'altronde insostituibili quando si opera con provini di grandi dimensioni quali quelli delle camere di calibrazione [GIBBS e HOLTZ, 1957; SCHMERT-

MANN, 1974, 1976] e delle grosse tavole vibranti [DE ALBA *et al.*, 1975].

In queste condizioni, allo stato attuale, è concordemente accettata la seguente metodologia:

1) Determinazione della *densità secca in situ* con i metodi della Geofisica, oppure determinazione delle *densità relativa in situ* in base alle prove penetrometriche statiche e/o dinamiche S.P.T., risalendo poi, attraverso i valori dell'indice dei vuoti minimo e massimo, alla presumibile densità secca del deposito in situ.

2) Ricostituzione, in laboratorio, utilizzando campioni di sabbia rimaneggiati ma *granulometricamente integri e rappresentativi*, di provini aventi densità secca prossima a quella del deposito in situ.

Tale procedura è naturalmente suscettibile a serie critiche; in particolare, si ha che la ricostituzione in laboratorio, anche quando riproduce la densità del deposito in situ, dà luogo ad una struttura del materiale diversa da quella naturale, essendo questa influenzata principalmente dalle differenze nell'orientamento dei grani e dei contatti intergranulari. Inoltre, qualsiasi sia il metodo di ricostituzione dei provini di sabbia impiegato, non è possibile tenere conto di fattori quali:

— un certo grado di cementazione, che può conferire alla sabbia in situ valori di coesione dell'ordine di  $0,04 \div 0,1$  kg/cm<sup>2</sup>, e che può risultare di grandissima importanza nel comportamento meccanico delle sabbie, in particolare quando sono sottoposte a sollecitazioni dinamiche;

— la storia dello stato tensionale, anch'essa di fondamentale importanza per il comportamento meccanico dei terreni sabbiosi, la quale

\* Politecnico di Torino.

\*\* ENEL - Centro di Ricerche Idrauliche e Strutturali.

può essere solo parzialmente riprodotta in laboratorio mediante l'applicazione di un opportuno sistema di tensioni di consolidazione anisotropa [LADD, 1977].

Nonostante queste importanti limitazioni, e prima di tutto in mancanza di alternative valide, il tipo di approccio indicato rappresenta una soluzione da tenere in attenta considerazione; inoltre, essa può essere accettata come valida nel caso di sabbie di recente formazione contenenti piccole percentuali di limo, prive di cementazione e per le quali, sulla base delle informazioni geologiche, sia possibile ricostruire in prima approssimazione la storia dello stato tensionale.

## 2. La deposizione pluviale

La ricostituzione in laboratorio dei provini di sabbia, indipendentemente dal metodo utilizzato, deve poter soddisfare i seguenti requisiti:

- i provini devono avere la densità richiesta;
- essi devono essere omogenei, cioè le densità locali non devono avere variazioni significative rispetto al valore medio;
- le proprietà del provino devono essere riproducibili ed indipendenti dalla persona che lo prepara.

I diversi metodi attualmente impiegati possono essere schematicamente distinti in due gruppi:

*Gruppo A* - Rientrano in questo gruppo quei metodi di preparazione che prevedono l'addensamento della sabbia dopo che questa è stata posta in appositi contenitori od anelli porta campione. L'addensamento può essere effettuato per strati successivi a mezzo di un pestello di massa nota, fatto cadere da altezze prefissate (tamping), oppure martellando le pareti del contenitore del provino (tapping) o, infine, comunicando ad esso opportune vibrazioni.

Tali metodi presentano l'inconveniente, in generale, di dar luogo ad addensamenti non uniformi nell'ambito del singolo provino; il fenomeno è tanto più pronunciato quanto più è bassa la densità relativa desiderata.

*Gruppo B* - Rientrano in questo gruppo quei metodi in cui la sabbia, opportunamente diffusa, viene fatta cadere per gravità nel contenitore del provino. I diversi valori di densità re-

lativa si ottengono in questo caso variando le modalità di deposizione.

Questa metodologia, definita « deposizione pluviale », è stata introdotta da Schmertmann per la preparazione di provini di grandi dimensioni<sup>(1)</sup> da utilizzare nelle così dette « celle di calibrazione » e nelle grosse celle triassiali. Tale metodologia è stata progressivamente perfezionata al fine di garantire una buona omogeneità del provino ed assicurare un elevato grado di ripetibilità [JACOBSEN, 1976], riscuotendo notevole interesse anche nella preparazione dei provini di sabbia di piccole dimensioni [MULILIS *et al.*, 1975; BIEGANOUSKY e MARCUSON, 1976; STANHAMMER e HOLDEN, 1976]. Per la preparazione mediante deposizione pluviale dei provini destinati ad essere sottoposti alle prove di laboratorio di tipo meccanico, occorre avvalersi di un'apparecchiatura (sand spreader) che risponda ai seguenti requisiti [KILDALEN e STANHAMMER, 1977]:

- le operazioni di inizio e fine deposizione devono essere istantanee;
- la deposizione pluviale deve poter avvenire, oltre che in presenza di aria, anche in presenza di un gas diverso, o nel vuoto;
- la sabbia deve poter essere visibile durante la deposizione;
- il sand spreader deve essere accoppiabile con l'apparecchiatura di laboratorio con cui sarà eseguita la prova.

Sulla scorta di tali esigenze gli scriventi hanno realizzato l'apparecchiatura schematizzata nelle figure 1a e 1b. Essa consiste di un cilindro il quale è delimitato, superiormente, dal contenitore della sabbia destinata alla deposizione e, inferiormente, dal contenitore del campione (campionatore). Le operazioni di inizio e fine deposizione vengono comandate per mezzo di un dispositivo di alimentazione (alimentatore) che consiste di due piastre di acciaio scorrevoli una sull'altra le quali sono provviste di un certo numero di fori.

La piastra superiore è fissa, solidale coll'intera apparecchiatura, mentre quella inferiore è mobile: poiché la disposizione dei fori è identica su entrambe, la semplice traslazione di una piastra (piastra di alimentazione) sull'altra (~ 2 cm) permette di aprire e chiudere istantaneamente i fori di alimentazione.

Utilizzando piastre con fori di diametro e/o

(1) Altezza:  $1.5 \div 2$  m; diametro:  $1 \div 1.2$  m.

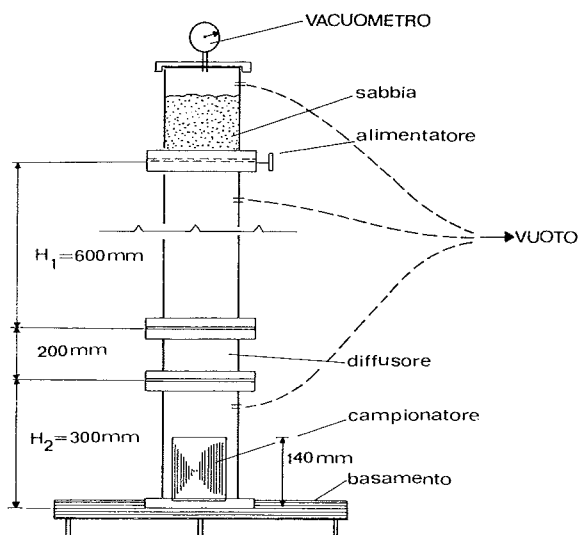


Fig. 1 (a). - Schema dell'apparecchiatura per la deposizione pluviale delle sabbie (Sand spreader).

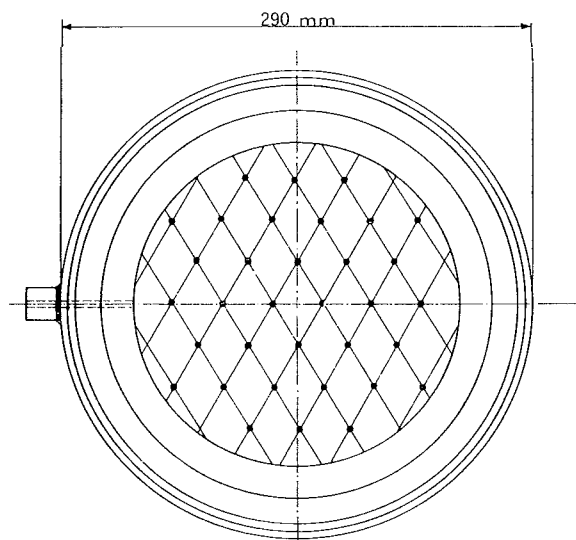


Fig. 1 (b). - Dispositivo di apertura e chiusura (alimentatore).

numero differenti, l'intensità di caduta della sabbia varia.

Allo scopo di ottenere un piano di deposizione il più uniforme possibile occorre che i filetti di sabbia provenienti dall'alimentatore siano dispersi opportunamente prima di raggiungere il campionario: ciò si ottiene sia per mezzo di una distribuzione uniforme dei fori sulle piastre, sia interponendo tra il campionario e l'alimentatore il cosiddetto « diffusore »; questo consiste di due maglie metalliche<sup>(2)</sup> sovrapposte, distanti tra loro 20 centimetri e ruotate di 45° una rispetto all'altra. La scelta del-

<sup>(2)</sup> In tutto simili a quelle dei setacci utilizzati nelle analisi granulometriche.

l'apertura minima ottimale delle maglie si basa sul requisito che su di esse non si deve avere accumulo di sabbia durante la deposizione; risulta che al variare dell'intensità di deposizione la misura dell'apertura delle maglie del diffusore varia da 2 a 3 volte il diametro massimo della sabbia utilizzata.

Le diverse parti del sand spreader sono state realizzate in plexiglas, in modo da poter osservare con continuità l'andamento della prova, ed in particolare:

- la regolarità dei filetti di sabbia provenienti dell'alimentatore;
- il buon funzionamento del diffusore;
- il livello raggiunto dalla sabbia nel campionario;
- l'orizzontalità del piano di deposizione; quest'ultima rappresenta infatti un controllo indiretto della omogeneità del campione stesso.

### 3. Risultati delle prove

Nella presente nota vengono descritti e commentati i risultati delle prove effettuate allo scopo di determinare la rispondenza dell'apparecchiatura ai requisiti su esposti; per tale motivo, al posto di un contenitore delle esatte dimensioni del provino è stato utilizzato un contenitore di dimensioni maggiori (diam. 130 mm, altezza 140 mm) in modo che eventuali difetti o variazioni delle grandezze esaminate fossero esaltati.

La curva granulometrica ed altre caratteristiche della sabbia cui si riferiscono i risultati qui esposti sono riportati in figura 2.

Le prove di deposizione sono state eseguite con sabbia essiccata in forno a 105°C e lasciata successivamente raffreddare fino a circa 40°C; dopo ogni prova questa veniva nuovamente messa in forno per 10 minuti in modo da eliminare l'umidità assorbita dall'ambiente circostante il quale, per altro, aveva umidità relativa e temperatura costanti (60% di umidità relativa a 20°C). Queste precauzioni sono state prese con l'unico scopo di assicurare che l'esecuzione delle prove di deposizione avvenisse con materiale di caratteristiche il più possibile costanti.

Le prove effettuate sono state classificate in base:

- al mezzo attraverso il quale avviene la deposizione (aria e vuoto);

— alla disposizione, diametro e numero dei fori sulle piastre di alimentazione.

Le grandezze misurate nel corso di ciascuna prova sono:

— peso della sabbia depositata nel campionatore (necessaria al calcolo del peso di volume secco ottenuto, essendo noto il volume del campionatore);

— tempo di deposizione: tempo necessario a riempire completamente il campionatore; in pratica è l'intervallo di tempo che intercorre tra la manovra di apertura e quella di chiusura delle piastre di alimentazione.

Sia nel caso della deposizione in aria che in presenza di vuoto, sono state eseguite prove sistematiche con due serie di piastre di alimentazione al fine di determinare l'influenza del mezzo attraverso cui avviene la deposizione e del tipo di piastra sulla densità secca del campione.

### 3.1. Prove in presenza d'aria.

#### 3.1.1. Risultati relativi alla 1ª serie di piastre di alimentazione.

Le prove effettuate utilizzando questa serie di piastre di alimentazione avevano lo scopo di

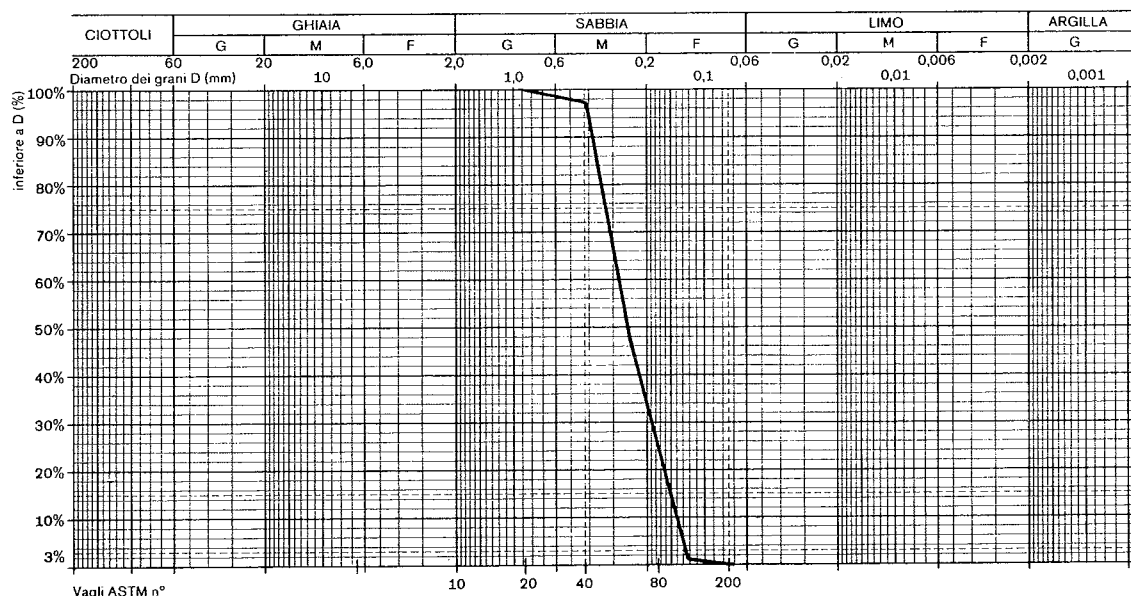
stabilire una relazione tra la densità del campione di sabbia «  $\gamma_s$  » ed il diametro « D » dei fori della piastra stessa.

La disposizione dei fori ed il loro numero sono mantenuti costanti per tutta la serie: essi sono disposti a « quinconce », cioè secondo una maglia costituita dai vertici di triangoli equilateri; quello che varia da una piastra all'altra è invece il diametro dei fori, che va da un minimo di 3 mm ad un massimo di 10 mm; ne consegue che la porosità «  $n_p$  » della piastra di alimentazione varia da 0,83% a 9,25% (3).

Per ciascuna piastra di alimentazione, caratterizzata da un certo valore di D (ovvero di  $n_p$ ), sono state eseguite N prove al fine di controllare la ripetibilità dei risultati. I valori medi di «  $\gamma_s$  » (oppure della densità relativa DR) e del tempo di deposizione « t » relativi a ciascuna prova sono riportati nella tabella I e diagrammati nelle figure 3 e 4. Esse mostrano, rispettivamente, la dipendenza di  $\gamma_s$  (o DR) dal diametro D dei fori e dal tempo di deposizione t (linee a tratto continuo indicate con « a ») (4).

(3) Per porosità «  $n_p$  » si intende il rapporto tra l'area complessiva dei fori e l'area totale della piastra di alimentazione, in percentuale.

(4) L'analisi dei risultati per ciascuna prova viene rimandata alle tabelle riportate in appendice, con un commento relativo alla qualità del piano di deposizione ottenuto.



$$u_1 = \frac{d_{60}}{d_{10}} = 2,1$$

$$\gamma_{s \max} = 1.706$$

$$u_2 = \frac{d_{30}}{d_{10}} = 0,9$$

$$\gamma_{s \min} = 1.465$$

Fig. 2. - Curva granulometrica della sabbia utilizzata per le prove.

TABELLA I

Valori medi di « $\gamma_s$ », « $D_R$ » e « $t$ » ottenuti con la 1ª serie di piastre di alimentazione effettuando la deposizione in presenza d'aria

Numero Prove N.	D (mm)	$n_p$ (%)	$\gamma_s$ (t/m <sup>3</sup> )	DR (%)	t (sec)
10	3	0.83	1.709	101	283
11	4	1.5	1.698	97	107
9	5	2.3	1.683	92	64
15	5	3.3	1.657	82	31.5
12	7.3	4.0	1.623	69	20
10	8	5.9	1.609	63	14.5
9	9.2	7.8	1.599	59	11
10	10	9.25	1.593	57	9.5

### 3.1.2. Risultati relativi alla 2ª serie di piastre.

Le prove effettuate con questa serie di piastre avevano lo scopo di indagare sull'influenza che il numero e la disposizione dei fori hanno sulla densità del campione e sul tempo di deposizione. In questa seconda serie di piastre di alimentazione il numero dei fori varia da un minimo di 6 ad un massimo di 124, mentre il loro diametro rimane costante e pari a 5 mm<sup>(5)</sup>.

I risultati ottenuti sono riportati nella tabella II (valori medi delle N prove eseguite con ciascuna piastra), e nelle figure 3 e 4 (linee tratteggiate indicate con « b »)<sup>(6)</sup>.

TABELLA II

Valori medi di « $\gamma_s$ », « $D_R$ » e « $t$ » ottenuti con la 2ª serie di piastre di alimentazione effettuando la deposizione in presenza d'aria

Numero Prove N.	Num. fori F	$n_p$ (%)	$\gamma_s$ (t/m <sup>3</sup> )	DR (%)	t (sec)
3	6	0.37	1.702	99	275
5	13	0.83	1.700	98	166
5	24	1.5	1.689	94	92
12	37	2.3	1.683	92	64
5	53	3.3	1.671	87	43
5	76	4.9	1.666	85	28.5
4	95	5.9	1.650	79	22
3	124	7.8	1.641	76	17.5

### 3.2. Prove in presenza del vuoto.

In questo caso la deposizione non avviene più in presenza dell'aria alla pressione atmosferica ma ad una pressione residua pari a 20 ÷ 25 mmHg (97% di vuoto).

Lo scopo di tali prove era duplice:

(5) Essendo in questo caso imposto il numero dei fori, la loro disposizione non è più a quinconce; tuttavia si è avuto cura che fossero uniformemente distribuiti sull'area della piastra.

(6) La piastra avente 37 fori (F = 37) da 5 mm coincide nelle due serie per cui i valori medi riportati sono quelli desunti dalla tab. 3 riportata in app.

— controllare se variava, rispetto alla deposizione in aria, il campo dei valori di  $\gamma_s$  a parità di piastra di alimentazione;

— indagare sui possibili effetti della turbolenza<sup>(7)</sup>, che si genera nell'apparecchio durante la deposizione, sull'uniformità del piano di deposizione e sulla densità del campione.

### 3.2.1. Risultati relativi alla 1ª serie di piastre di alimentazione.

I risultati ottenuti sono riportati nella tabella III (valori medi delle N prove eseguite con ciascuna piastra) e nelle figure 5 e 6 (linee a tratto continuo indicate con « c »).

TABELLA III

Valori medi di « $\gamma_s$ », « $D_R$ » e « $t$ » ottenuti con la 1ª serie di piastre di alimentazione effettuando la deposizione nel vuoto

Numero Prove N.	D (mm)	$n_p$ (%)	$\gamma_s$ (t/m <sup>3</sup> )	DR (%)	t (sec)
2	3	0.83	1.707	100	319
2	4	1.5	1.704	99	119
2	5	2.3	1.699	97	79.5
2	6	3.3	1.676	89	37
2	7.3	4.9	1.670	87	24.5
2	8	5.9	1.664	85	20
3	9.2	7.8	1.652	80	14
2	10	9.25	1.646	78	11.5

### 3.2.2. Risultati relativi alla 2ª serie di piastre di alimentazione.

I risultati ottenuti sono riportati nella tabella IV (valori medi delle N prove eseguite con ciascuna piastra) e nelle figure 5 e 6 (linee tratteggiate indicate con « d »)<sup>(6)</sup>.

TABELLA IV

Valori medi di « $\gamma_s$ », « $D_R$ » e « $t$ » ottenuti con la 2ª serie di piastre di alimentazione effettuando la deposizione nel vuoto

Numero Prove N.	Num. fori F	$n_p$ (%)	$\gamma_s$ (t/m <sup>3</sup> )	DR (%)	t (sec)
3	6	0.37	1.707	100	375
3	13	0.83	1.707	100	214
3	24	1.5	1.698	97	108
2	37	2.3	1.699	97	79.5
3	53	3.3	1.687	93	51
4	76	4.9	1.675	89	37
4	95	5.9	1.667	86	26.5
3	124	7.8	1.657	82	21

(7) Per turbolenza si intende il moto disordinato dell'aria che si verifica durante la deposizione all'interno del sand spreader.

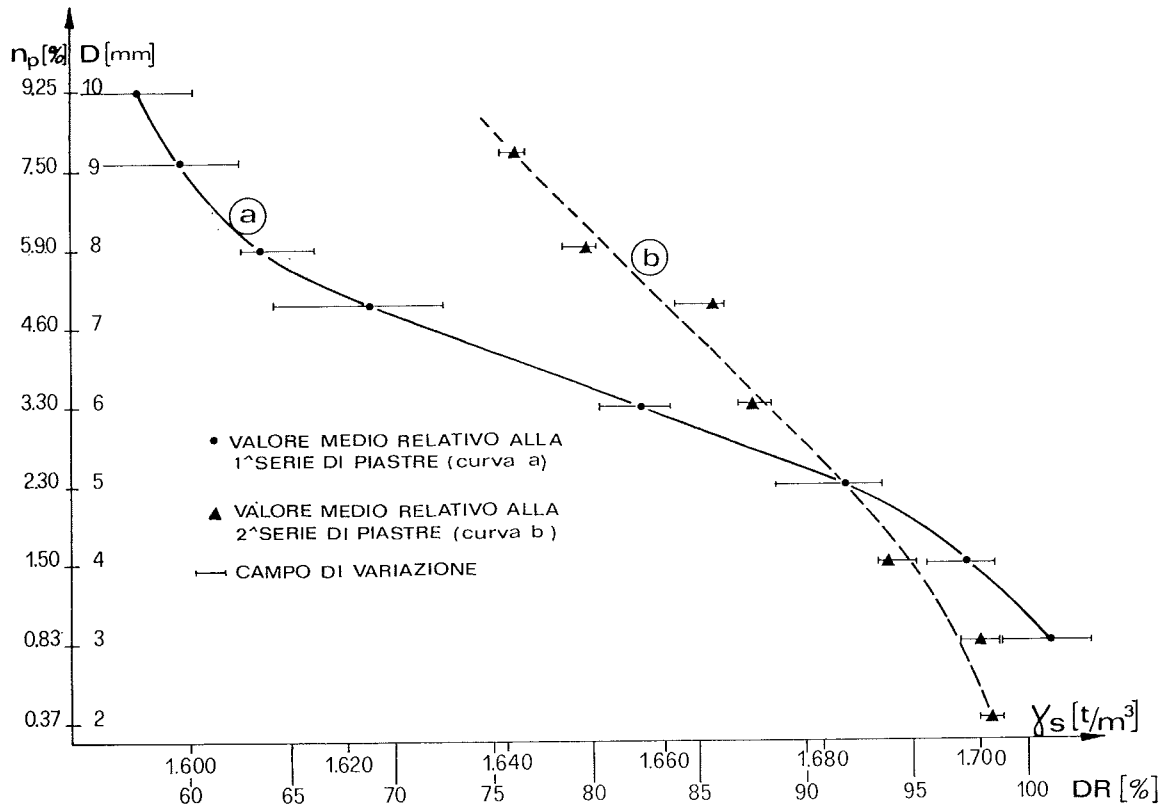


Fig. 3. - Correlazione tra la densità del campione (valori medi) e la porosità della piastra di alimentazione per prove in presenza d'aria.

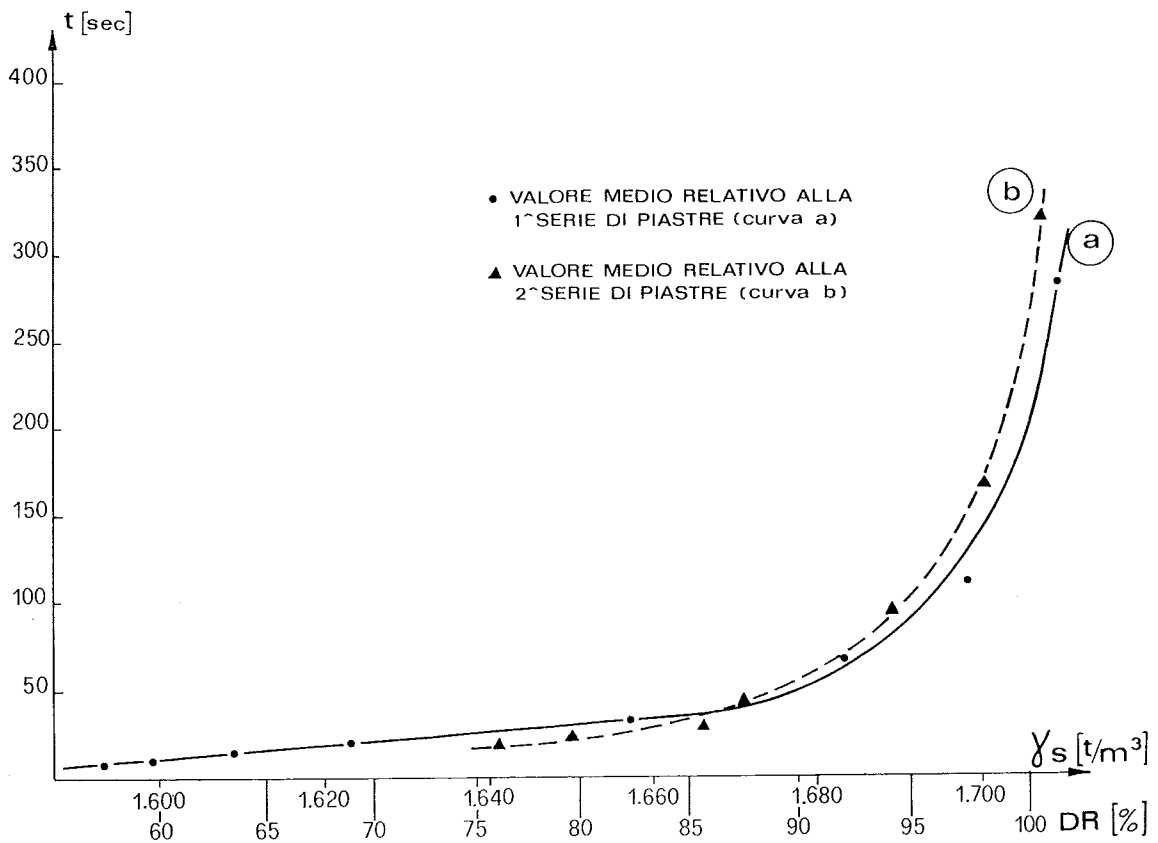


Fig. 4. - Correlazione tra la densità del campione ed il tempo di deposizione (valori medi) per prove in presenza d'aria.

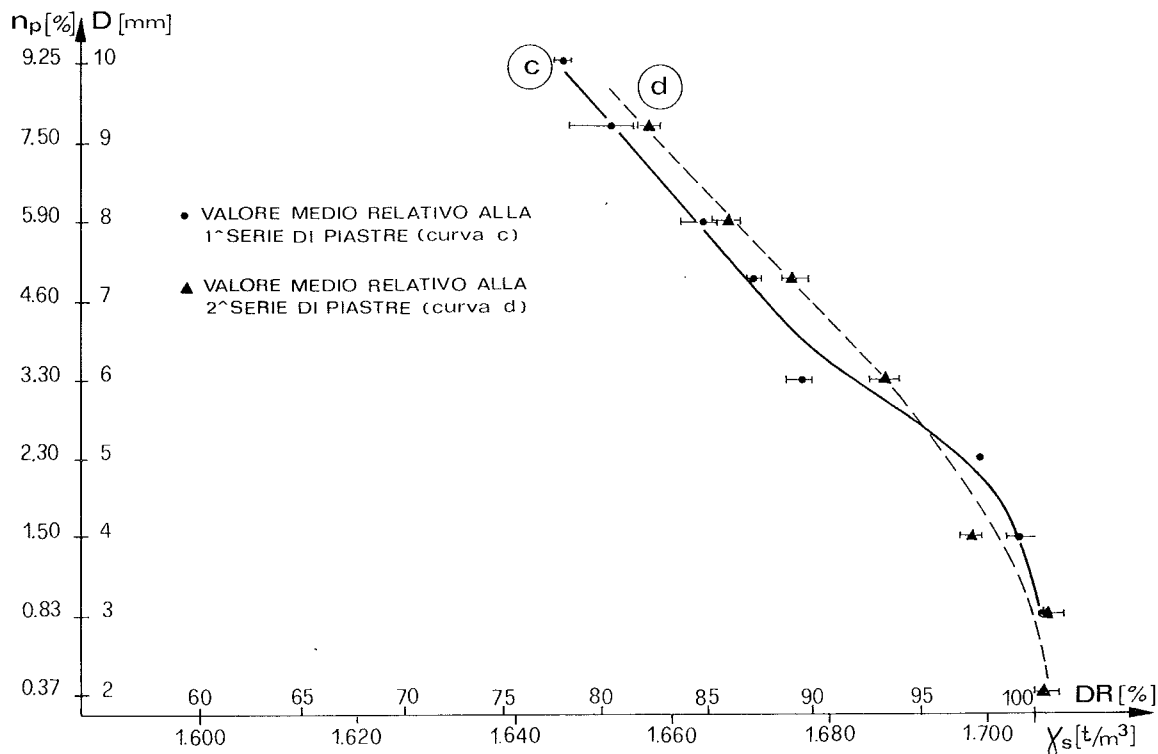


Fig. 5. - Correlazione tra la densità del campione (valori medi) e la porosità della piastra di alimentazione per prove nel vuoto.

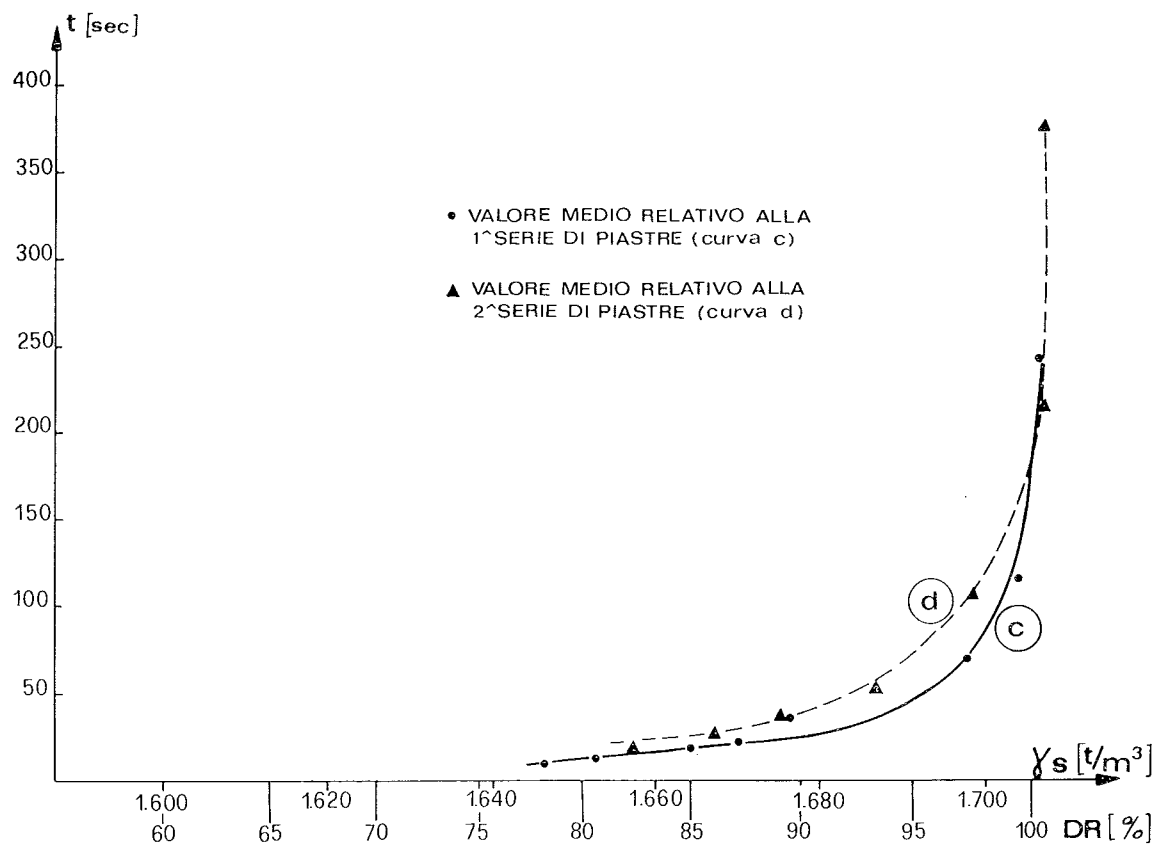


Fig. 6. - Correlazione tra la densità del campione ed il tempo di deposizione (valori medi) per prove nel vuoto.

#### 4. Commento dei risultati

##### 4.1. Variazione della densità dei campioni.

I risultati delle prove di deposizione pluviale, effettuate sia in aria che in presenza di vuoto, mostrano che la densità del campione è legata al tempo di deposizione, cioè al tempo necessario per il riempimento del campionatore. Risulta infatti che la densità del campione diminuisce con il diminuire del tempo di deposizione, il quale è, a sua volta, condizionato essenzialmente dalla porosità della piastra di alimentazione, riducendosi all'aumentare di questa.

Si può pertanto affermare che *il fattore principale che controlla la densità della sabbia depositata pluvialmente è l'intensità della deposizione stessa.*

Un quadro complessivo dei risultati delle prove eseguite è dato dai diagrammi delle figure 7 e 8; le curve a tratto continuo « a » e « c » si riferiscono alle prove effettuate utilizzando la 1<sup>a</sup> serie di piastre di alimentazione (numero di fori costante, diametro variabile), rispettivamente per prove in presenza d'aria (curva « a ») e nel vuoto (curva « c »), mentre le curve tratteggiate « b » e « d » si riferiscono alla 2<sup>a</sup> serie di piastre di alimentazione (diametro dei fori costante, loro numero variabile), rispettivamente per prove in presenza d'aria (curva « b ») e nel vuoto (curva « d »).

I campi di variazione della densità relativa per la sabbia in esame e per ciascuna serie di prove sono (fig. 7):

— prove in presenza d'aria con la 1<sup>a</sup> serie di piastre (curva « a »):

$$1,593 \leq \gamma_s \leq 1,709 \quad 57\% \leq DR \leq 101\%$$

— prove in presenza d'aria con la 2<sup>a</sup> serie di piastre (curva « b »):

$$1,641 \leq \gamma_s \leq 1,702 \quad 76\% \leq DR \leq 99\%$$

— prove nel vuoto con la 1<sup>a</sup> serie di piastre (curva « c »):

$$1,646 \leq \gamma_s \leq 1,707 \quad 78\% \leq DR \leq 100\%$$

— prove nel vuoto con la 2<sup>a</sup> serie di piastre (curva « d »):

$$1,657 \leq \gamma_s \leq 1,707 \quad 82\% \leq DR \leq 100\%$$

Riguardo i valori di densità relativa ottenuti sono opportune le seguenti considerazioni:

— i valori di  $DR > 100\%$  sono dovuti al fatto

che il valore  $\gamma_{s \max}$  del terreno è stato determinato secondo le norme ASTM n. D 2049, ed è pertanto un valore convenzionale, come dimostra il fatto che con la deposizione pluviale si ottengono valori di  $\gamma_s$  superiori ad esso;

— il valore minimo di densità relativa ottenuto, per la sabbia in esame, vale  $DR = 54\%$ ; allo stato attuale, risulta essere questa, una grave limitazione dell'apparecchiatura, anche se appare probabile che essa possa essere superata eseguendo la deposizione in gas più pesanti dell'aria (per esempio  $CO_2$ ).

##### 4.2. Effetti dell'applicazione del vuoto.

Lo scopo principale per cui sono state eseguite le prove nel vuoto era quello di indagare sugli effetti della turbolenza sulla uniformità della deposizione e sulla densità del campione.

La caduta della sabbia attraverso il « sand spreader », specialmente nel caso in cui vengono usate piastre di alimentazione ad alta porosità, tali cioè da realizzare elevate intensità di deposizione, provoca uno spostamento di volumi d'aria che hanno prevalentemente un moto diretto dal basso verso l'alto; tale elemento costituisce la causa principale di eventuali irregolarità del piano di deposizione, e quindi, presumibilmente, dell'omogeneità del campione di sabbia<sup>(8)</sup>.

I risultati delle prove effettuate hanno messo in evidenza che l'applicazione del vuoto all'interno del « sand spreader », riducendo notevolmente gli effetti della turbolenza, conduce a superfici di deposizione più uniformi: tale beneficio, trascurabile per intensità di deposizione medio-bassa, diventa sensibile allorché la porosità delle piastre di alimentazione è dell'ordine del 6% o maggiore.

La maggiore uniformità del piano di deposizione, anche per intensità elevate, fa sì che la dispersione dei risultati sia minore, sia in termini di densità del campione che di tempo di deposizione.

Per quanto riguarda il tempo di deposizione, ciò è dovuto essenzialmente al fatto che il riempimento uniforme del campionatore permette di stabilire con maggiore precisione l'istante di chiusura dell'alimentatore; nei riguardi della densità del campione, la maggiore ripetibilità

<sup>(8)</sup> Una volta che siano stati risolti problemi pratici quali la perfetta verticalità del castello di deposizione, la orizzontalità dei diffusori e del piano di deposizione, la corretta apertura e chiusura delle piastre di alimentazione.



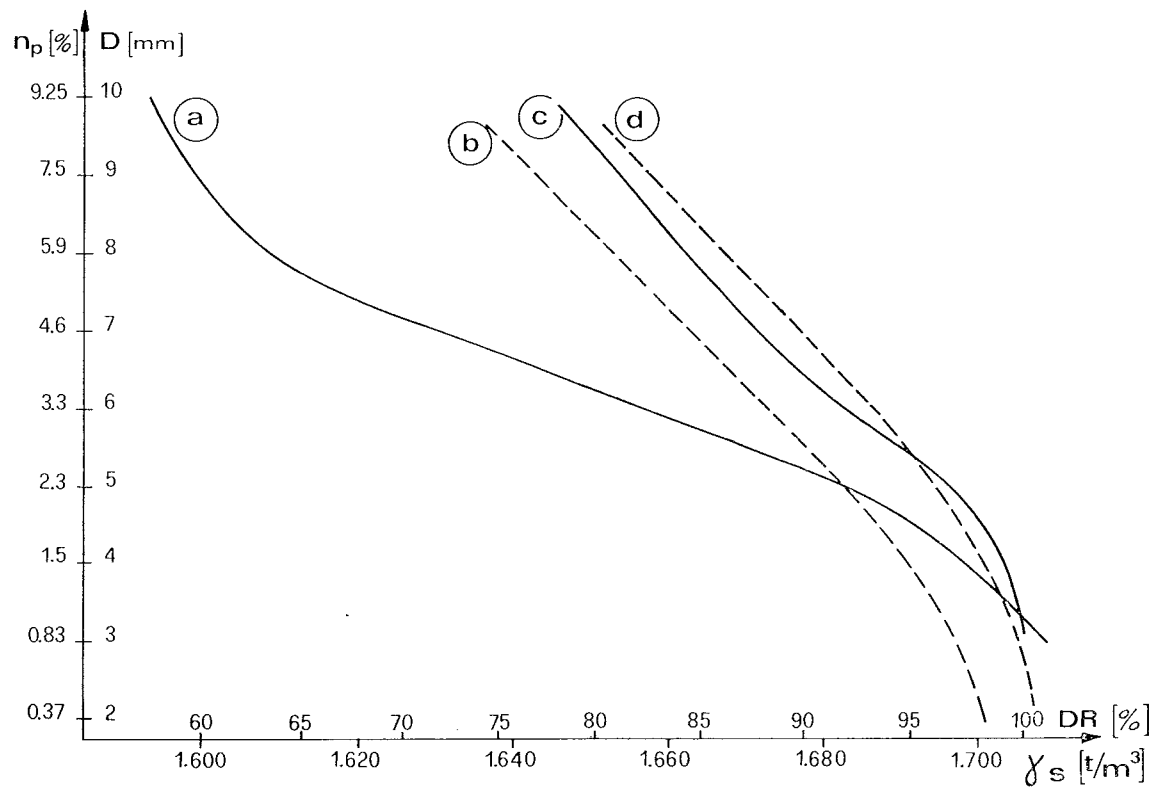


Fig. 7. - Confronto delle correlazioni tra la densità del campione e la porosità della piastra di alimentazione per i quattro casi esaminati.

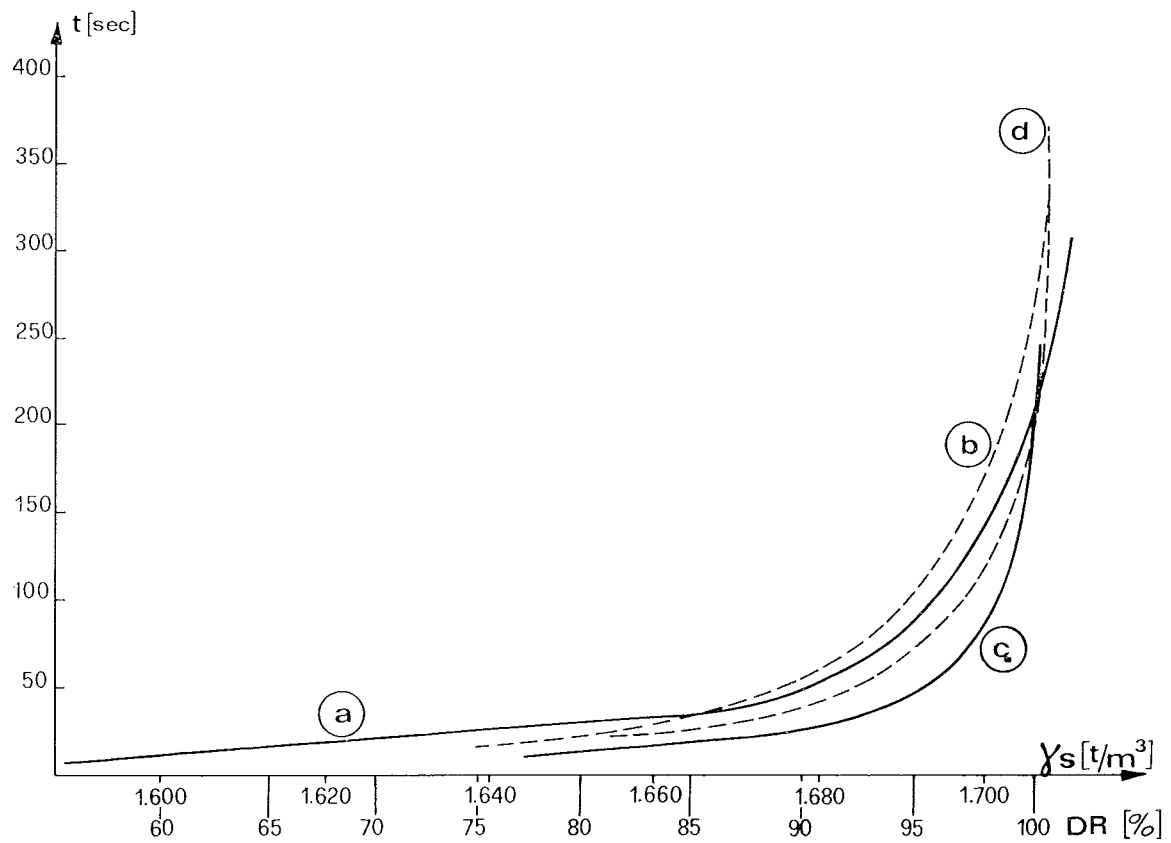


Fig. 8. - Confronto delle correlazioni tra la densità del campione ed il tempo di deposizione per i quattro casi esaminati.

delle prove porta a concludere che la riduzione della turbolenza all'interno dell'apparecchio favorisce l'ottenimento di campioni più omogenei.

Inoltre le prove effettuate nel vuoto forniscono rispetto a quelle in aria, a parità di porosità delle piastre di alimentazione, valori di densità maggiori. Ciò si spiega considerando le forze cui è sottoposto il singolo grano di sabbia durante la caduta: esse sono, essenzialmente, la forza gravitazionale e la resistenza aerodinamica. In conseguenza dell'applicazione del vuoto quest'ultima viene eliminata, per cui la velocità di deposizione aumenta: ciò comporta, nei confronti delle prove effettuate in presenza d'aria, maggiore energia all'impatto, e quindi densità del campione e tempi di deposizione maggiori. In questo modo viene evidenziato un secondo fattore (oltre *all'intensità di deposizione*) che controlla la densità della sabbia: la sua velocità durante la deposizione (*velocità di deposizione*).

#### 4.3. *Influenza del numero e della disposizione dei fori.*

Con riferimento alle figg. 3 e 5 è possibile osservare che la 1<sup>a</sup> serie di piastre di alimentazione, avente numero di fori costante e diametro variabile, fornisce, rispetto alla 2<sup>a</sup> serie, un campo di variazione della densità del campione più ampio; ciò si verifica sia nel caso di deposizione in aria (fig. 3) che nel vuoto (fig. 5). Poiché tale differenza riguarda i valori più bassi della densità (in modo particolare nel caso di deposizione in aria), risulta più conveniente ricorrere all'impiego di piastre della 1<sup>a</sup> serie e alla deposizione in aria quando sia necessario ricostituire campioni di sabbia sciolta o mediamente addensata.

#### 4.4. *Influenza dell'altezza di caduta.*

Si è già osservato (punto 4.2.) che la deposizione della sabbia in presenza di aria o altro gas è governata dalla forza gravitazionale e dalla resistenza aerodinamica; pertanto ogni singolo grano subisce un'accelerazione fino a che non venga raggiunta la condizione di equilibrio in cui la resistenza al moto equilibra la forza gravitazionale. Considerando trascurabili i fenomeni di interazione tra le particelle, ciò comporta che dopo una sufficiente altezza di caduta la sabbia raggiunge una velocità costante; a questo punto la lunghezza del tragitto delle

particelle non dovrebbe più condizionare la densità del campione.

Allo scopo di valutare quantitativamente questo aspetto del problema, sono state fatte due serie di prove entrambe in presenza d'aria, per le quali le altezze di caduta  $H_1$  e  $H_2$  (fig. 1) vengono fatte variare da 200 mm a 800 mm.

Si è rilevato che:

— la variazione dell'altezza  $H_1$  (dall'alimentatore al diffusore) non provoca variazioni significative della densità del campione (le differenze rientrano nella normale dispersione dei valori), in accordo con il fatto che la deposizione pluviale vera e propria si ha dal diffusore al campionatore;

— la variazione dell'altezza  $H_2$  (dal diffusore al campionatore) mostra come, nell'ambito delle altezze considerate, non vi sono variazioni significative della densità del campione sia per intensità di deposizione medio basse (corrispondenti ad una porosità dell'alimentatore  $< 2\%$ ), sia per intensità di deposizione maggiori (anche se in quest'ultimo caso l'aumento della turbolenza provoca una maggiore dispersione dei risultati. Ciò confermerebbe [JACOBSON, 1976] il fatto che la progressiva riduzione dell'altezza di caduta dal diffusore alla superficie di deposizione, durante il riempimento del campionatore, non comporta variazioni locali della densità del campione, a patto che tale altezza si mantenga costantemente maggiore o uguale a 200 mm.

## 5. Conclusioni

In base ai risultati delle prove fino ad ora effettuate si può concludere che:

1) l'impiego del metodo della deposizione pluviale permette la ricostituzione di provini di sabbia di densità relativa variabile. I fattori che controllano tale parametro sono la velocità di caduta della sabbia durante la deposizione e l'intensità della deposizione.

In particolare:

— la densità relativa dei provini diminuisce con l'aumentare della porosità della piastra di alimentazione (ovvero con l'aumentare dell'intensità di deposizione);

— il mezzo attraverso cui avviene la deposizione (aria, altri gas o vuoto), influenzando la velocità di deposizione, influenza i valori della densità relativa.

2) in presenza di aria, e per elevate intensità di deposizione, si verificano fenomeni di turbolenza che influenzano, se pur modestamente, l'omogeneità del campione, valutabile in prima approssimazione dalla uniformità del piano di deposizione;

3) l'applicazione del vuoto, riducendo notevolmente gli effetti della turbolenza, migliora la qualità della superficie di deposizione: ciò, congiuntamente ad una minore dispersione dei risultati, è indice di una maggiore omogeneità del campione; tuttavia la deposizione nel vuoto comporta una riduzione del campo di variazione delle densità del campione;

4) le prove sono state condotte, in presenza d'aria e nel vuoto, utilizzando due serie di piastre: nella 1ª serie la variazione di porosità è stata ottenuta cambiando la sezione dei fori e lasciandone inalterato il numero e la disposizione; nella 2ª serie è stata mantenuta costante la sezione dei fori e ne sono stati fatti variare il numero e la disposizione.

Per la sabbia descritta in fig. 2 sono stati ottenuti i seguenti risultati:

— prove in presenza d'aria con la 1ª serie di piastre:

$$57\% \leq DR \leq 101\%$$

— prove in presenza d'aria con la 2ª serie di piastre:

$$76\% \leq DR \leq 99\%$$

— prove in vuoto con la 1ª serie di piastre:

$$78\% \leq DR \leq 100\%$$

— prove in vuoto con la 2ª serie di piastre:

$$82\% \leq DR \leq 100\%$$

5) la variazione dell'altezza di caduta  $H_2$  (con  $H_2 > 200$  mm) dal diffusore al campionatore (per prove effettuate in presenza d'aria) non comporta variazioni significative dei valori di densità del campione; la variazione dell'altezza di caduta  $H_1$  dall'alimentatore al diffusore non produce alcun effetto.

#### *Future ricerche.*

Gli autori intendono proseguire i loro studi perfezionando la deposizione pluviale attraverso anidride carbonica. La qual cosa, oltre a dover permettere la ricostituzione di provini aventi densità relativa inferiori a quelle ottenute in aria e nel vuoto, semplificherebbe la successiva operazione di saturazione dei provini da sottoporre alle prove meccaniche di laboratorio.

Si intende inoltre studiare l'influenza che le caratteristiche della sabbia (diametro medio, curva granulometrica, angolarità, contenuto di limo) hanno sui risultati delle prove (fissata la configurazione geometrica dell'apparecchiatura).

#### *Ringraziamenti.*

Gli autori intendono ringraziare il prof. Michele Jamiolkowski la cui guida ha reso possibile la ideazione e la realizzazione della presente ricerca e inoltre l'ing. G. Bizzi ed il tecnico Sig. Bacci del Centro di Ricerche Idrauliche e Strutturali dell'ENEL di Niguarda per il loro contributo nella costruzione del prototipo del sand spreader.

#### APPENDICE

Vengono qui di seguito riportati i risultati di tutte le prove eseguite con il « sand spreader », divisi secondo il tipo di piastra di alimentazione utilizzata e secondo il mezzo attraverso cui avviene la deposizione.

1) *Prove effettuate in presenza d'aria - 1ª serie di piastre di alimentazione.*

TABELLA 1  
D = 3 mm;  $n_p = 0,83\%$

Prova	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t	273	284	286	274	285	283	283	286	288	290
$\gamma_s$	1.702	1.706	1.711	1.703	1.711	1.712	1.706	1.712	1.713	1.713
DR	99	100	102	99	102	102	100	102	103	103

Il piano di deposizione è uniforme e perfettamente orizzontale; l'operazione di apertura e chiusura dell'alimentazione non crea alcuni disturbi.

TABELLA 2

D = 4 mm;  $n_p = 1,5\%$ 

Prova	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
t	—	107	107	107	106,5	106,5	106	106,5	107	107	107,5
$\gamma_s$	1.699	1.702	1.692	1.697	1.700	1.695	1.698	1.700	1.697	1.701	1.699
DR	97	99	95	97	98	96	97	98	97	98	97

Il piano di deposizione è buono; il suo dislivello all'interno del campionatore è di 2 ÷ 3 mm (valore massimo) mentre la sua direzione varia da prova a prova senza un riferimento preciso.

TABELLA 3

D = 5 mm;  $n_p = 2,3\%$ 

Prova	1	2	3	4	5	6	7	8	9
t	68	64,5	65	65	63	64	64	64	65
$\gamma_s$	1.677	1.684	1.686	1.674	1.661	1.687	1.687	1.687	1.684
DR	89	92	98	88	81	93	93	93	92

Il piano di deposizione ha un dislivello all'interno del campionatore minore di 10 mm, la cui direzione si mantiene immutata in tutte le prove.

TABELLA 4

D = 6 mm;  $n_p = 3,3\%$ 

Prova	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\gamma_s$	1.657	1.648	1.658	1.653	1.657	1.654	1.656	1.652	1.653	1.658	1.654	1.660	1.659	1.6622	1.661
DR	82	79	82	80	82	80	82	80	80	28	80	83	83	84	84

Nonostante l'elevato numero di prove rispetto alle altre piastre, in questo caso non si hanno valori affidabili del tempo di deposizione: il suo valore indicativo è di 31 sec; inoltre la temperatura e l'umidità della sabbia sono casuali da prova a prova. Il dislivello del piano di deposizione all'interno del campionatore è di circa 10 mm e la sua direzione coincide con quella della manovra di apertura e chiusura.

TABELLA 5

D = 7,3 mm;  $n_p = 4,9\%$ 

Prova	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t	—	19,5	20	20	20	20	20,5	20	20	19,3	21	21
$\gamma_s$	1.631	1.632	1.618	1.624	1.624	1.624	1.629	1.621	1.622	1.611	1.616	1.623
DR	72	72	67	69	69	69	71	68	68	64	66	69

Il piano di deposizione ha un dislivello dell'ordine di 10 ÷ 15 mm, direzione coincidente con quella delle manovre di apertura e chiusura.

TABELLA 6

D = 8 mm;  $n_p = 5,9\%$ 

Prova	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t	14	15	15	—	14,5	14,2	14,5	14,2	14,5	—
$\gamma_s$	1.606	1.607	1.615	1.616	1.607	1.611	1.608	1.607	1.607	1.606
DR	62	62	66	66	62	64	63	63	63	63

Il piano di deposizione ha un dislivello dell'ordine di 15 mm, la cui direzione è costantemente a  $\pi/2$  rispetto alla direzione di manovra dell'alimentatore.

TABELLA 7  
D = 9,2 mm; n<sub>p</sub> = 7,8%

Prova	1	2	3	4	5	6	7	8	9
t	10	10.3	12	10	10.5	11	11	11	12.2
γ <sub>s</sub>	1.596	1.587	1.599	1.602	1.593	1.599	1.605	1.606	1.602
DR	58	54	59	60	57	59	62	62	60

Il piano di deposizione è abbastanza buono, essendo il dislivello contenuto in 5 ÷ 6 mm; per questa piastra e per la seguente da 10 mm sono state cambiate le maglie del diffusore, aumentandone l'apertura da 18 a 16 mesh/inch<sup>2</sup>.

TABELLA 8  
D = 10 mm; n<sub>p</sub> = 9,25%

Prova	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t	9.2	10	9	9	9.6	9.2	9.5	9.8	9.4	9.2
γ <sub>s</sub>	1.588	1.595	1.595	1.592	1.600	1.600	1.596	1.587	1.585	1.587
DR	55	58	58	57	60	60	58	54	54	54

Il piano di deposizione è caratterizzato da una accentuata irregolarità e cioè dal non avere una particolare inclinazione; il dislivello tra i vari punti all'interno del campionatore è contenuto in 10 mm.

2) Prove effettuate in presenza d'aria - 2<sup>a</sup> serie di piastre di alimentazione

(F = numero dei fori della piastra; D = cost = 5 mm)

TABELLA 9  
F = 6; n<sub>p</sub> = 0,37%

Prova	1	2	3
t	268	275	282
γ <sub>s</sub>	1.700	1.703	1.701
DR	98	99	98

Il piano di deposizione è uniforme e orizzontale; il riempimento è contemporaneo nel campionatore e nella corona circostante (H<sub>z</sub> = 350 mm).

TABELLA 11  
F = 24; n<sub>p</sub> = 1,5%

Prova	1	2	3	4	5
t	91	92	91	93	94
γ <sub>s</sub>	1.690	1.688	1.689	1.688	1.692
DR	94	93	94	94	95

Il piano di deposizione è uniforme e quasi orizzontale; il suo dislivello all'interno del campionatore è di circa 3 ÷ 4 mm. Riempimento pressoché contemporaneo dentro e fuori il campionatore.

TABELLA 10  
F = 13; n<sub>p</sub> = 0,83%

Prova	1	2	3	4	5
t	171	168	165	165	165
γ <sub>s</sub>	1.697	1.700	1.700	1.700	1.702
DR	97	98	98	98	99

Il piano di deposizione è uniforme e quasi orizzontale; il suo dislivello all'interno del campionatore è di circa 2 mm. Riempimento pressoché contemporaneo dentro e fuori il campionatore.

TABELLA 12  
F = 53; n<sub>p</sub> = 3,3%

Prova	1	2	3	4	5
t	42.5	44	43	42.5	43
γ <sub>s</sub>	1.673	1.672	1.669	1.672	1.671
DR	88	88	86	88	87

Il piano di deposizione è leggermente inclinato; il dislivello all'interno del campionatore è di circa 5 ÷ 6 mm. Tendenza al riempimento prima dentro il campionatore.

TABELLA 13  
F = 76;  $n_p = 4.9\%$

Prova	1	2	3	4	5
t	30.5	28.5	28.5	28	28
$\gamma_s$	1.665	1.665	1.667	1.661	1.664
DR	85	85	86	94	85

Il piano di deposizione è inclinato; il dislivello all'interno del campionatore è di circa  $5 \div 6$  mm. Tendenza al riempimento prima all'interno del campionatore.

TABELLA 14  
F = 95;  $n_p = 5.9\%$

Prova	1	2	3	4
t	22.5	23	21	21
$\gamma_s$	1.647	1.650	1.651	1.651
DR	78	79	79	79

Il piano di deposizione è inclinato; dislivello nel campionatore di circa 8 mm. Riempimento prima dentro il campionatore.

TABELLA 15  
F = 124;  $n_p = 7.8\%$

Prova	1	2	3
t	17	18	17
$\gamma_s$	1.642	1.639	1.641
DR	76	75	76

Il piano di deposizione è quasi orizzontale; il suo dislivello nel campionatore è di circa  $3 \div 4$  mm. Sulla corona esterna piano molto ondulato.

3) Prove effettuate in vuoto - 1ª serie di piastre di alimentazione.

TABELLA 16  
D = 3 mm;  $n_p = 0.83\%$

Prova	1	2
t	325	313
$\gamma_s$	1.705	1.708
DR	100	101

Il piano di deposizione è uniforme ed orizzontale; riempimento contemporaneo dentro al campionatore e sulla corona esterna con  $H_2 = 350$  mm.

TABELLA 17  
D = 4 mm;  $n_p = 1.5\%$

Prova	1	2
t	118	120
$\gamma_s$	1.704	1.704
DR	99	99

Il piano di deposizione è uniforme ed orizzontale; riempimento contemporaneo dentro al campionatore e sulla corona esterna con  $H_2 = 350$  mm.

TABELLA 18  
D = 5 mm;  $n_p = 2.3\%$

Prova	1	2
t	75	84
$\gamma_s$	1.699	1.699
DR	97	97

Il piano di deposizione è uniforme ma inclinato, all'interno del campionatore, di circa 2 mm. Tendenza al riempimento nel campionatore ( $H_2 = 350$  mm).

TABELLA 19  
D = 6 mm;  $n_p = 3.3\%$

Prova	1	2
t	36	38
$\gamma_s$	1.674	1.677
DR	88	89

Piano di deposizione leggermente inclinato; all'interno del campionatore il dislivello è dell'ordine di 5 mm. Tendenza al riempimento prima sulla corona esterna ( $H_2 = 300$  mm).

TABELLA 20  
D = 7.3 mm;  $n_p = 4.9\%$

Prova	1	2
t	24	25
$\gamma_s$	1.671	1.670
DR	87	87

Piano di deposizione uniforme e orizzontale; tendenza al riempimento prima nel campionatore. Sono state cambiate le maglie del diffusore, aumentandone l'apertura da 18 a 16 mesh/inch<sup>2</sup>.

TABELLA 21  
D = 8 mm;  $n_p = 5.9\%$

Prova	1	2
t	20	20
$\gamma_s$	1.661	1.666
DR	84	85

Piano in deposizione uniforme, leggermente inclinato: all'interno del campionatore il dislivello è dell'ordine di 3 mm.

TABELLA 22  
D = 9.2 mm;  $n_p = 7.8\%$

Prova	1	2	3
t	14.5	13	15
$\gamma_s$	1.648	1.647	1.661
DR	79	78	83

Piano di deposizione uniforme e quasi orizzontale; riempimento prima nel campionatore.

TABELLA 23  
D = 10 mm;  $n_p = 9.25\%$

Prova	1	2
t	11.5	11.5
$\gamma_s$	1.645	1.646
DR	77	78

Piano di deposizione uniforme e quasi orizzontale; riempimento prima nel campionatore.

4) Prove effettuate in vuoto - 2ª serie di piastre di alimentazione.

TABELLA 24  
F = 6;  $n_p = 0.37\%$

Prova	1	2	3
t	377	380	368
$\gamma_s$	1.709	1.706	1.706
DR	101	100	100

Piano di deposizione uniforme ed orizzontale nel campionatore; riempimento prima nel campionatore.

TABELLA 25  
F = 13;  $n_p = 0.83\%$

Prova	1	2	3
t	229	274	200
$\gamma_s$	1.709	1.708	1.708
DR	101	100	100

Piano di deposizione uniforme e leggermente inclinato di 2 ÷ 3 mm; riempimento contemporaneo nel campionatore e sulla corona esterna.

TABELLA 26  
F = 24;  $n_p = 1.5\%$

Prova	1	2	3
t	105	107	112
$\gamma_s$	1.699	1.697	1.699
DR	97	97	97

Piano di deposizione ondulato fino dall'inizio della prova. Avvallamento di 4 ÷ 5 mm in direzione perpendicolare alla manovra di apertura.

TABELLA 27  
F = 53;  $n_p = 3.3\%$

Prova	1	2	3
t	51	51	51
$\gamma_s$	1.685	1.687	1.688
DR	92	93	93

Piano di deposizione uniforme e leggermente inclinato di 2 ÷ 3 mm nel campionatore; riempimento contemporaneo dentro e fuori il campionatore ( $H_z = 350$  mm).

TABELLA 28  
F = 76;  $n_p = 4.9\%$

Prova	1	2	3	4
t	37.5	37	36.5	36.5
$\gamma_s$	1.677	1.674	1.676	1.674
DR	69	88	89	88

Piano di deposizione non molto uniforme e leggermente inclinato di 2 ÷ 3 mm all'interno del campionatore. Riempimento contemporaneo ( $H_z = 350$  mm).

TABELLA 29  
F = 95;  $n_p = 5.9\%$

Prova	1	2	3	4
t	26	27	27	26.5
$\gamma_s$	1.668	1.668	1.665	1.666
DR	86	86	85	85

Il piano di deposizione è abbastanza orizzontale anche se ondulato; tendenza al riempimento prima dentro al campionatore.

TABELLA 30  
F = 124;  $n_p = 7.8\%$

Prova	1	2	3
t	21	21.5	21
$\gamma_s$	1.656	1.658	1.656
DR	82	82	82

Il piano di deposizione non è uniforme perché presenta un vistoso cumulo all'interno del campionatore. Riempimento prima all'interno di esso.

#### BIBLIOGRAFIA

- BIEGANOUSKY W., MARCUSON W. (1976) - *Uniform placement of sand* - ASCE - Vol. 102 No. GT 3.  
 HOLDEN J. C. - Comunicazione privata, Oslo, 7/IV/76.  
 JACOBSEN M. (1976) - *On pluvial compaction of sand* - Rapport No. 9 - Laboratoriet for fundering - University of Aalborg - Danmark.

- KILDALLEN S. et al. (1977) - *N.G.I. Laboratory sand reiner*, Internal report No. 51505 - 15. Norwegian Geotechnical Institute, Oslo.  
 LADD R. S. (1974) - *Specimen preparation and liquefaction of sand*. Technical note, ASCE - Vol. 100 No. GT10.  
 LADD R. S. (1976) - *Specimen preparation and cyclic stability of sand* - ASCE, Annual convention and exposition - Philadelphia.  
 LADD C. C. (1977) - *Stress deformation and strength characteristics*, IX Int. Conf. of Soil mechanics and foundation engineering - Tokyo.  
 MAHMOOD A. (1973) - *Fabric-mechanical property relationships in fine granular soils*. Ph. D. thesis, University of California, Berkeley.  
 MULILIS J. et al. (1975) - *The effects of method of sample preparation on the cyclic stress-strain behaviour of sands*. Report No. EERC 75-18, University of California, Berkeley.  
 MULILIS J. P. et al. (1977) - *Effects of sample preparation of sand liquefaction*. ASCE, Vol. 103 - No. GT2.  
 ODA M. (1972) - *Initial fabrics and their relations to mechanics properties of granular materials*, Soil and Foundation - Vol. 1 - No. 1.

#### SUMMARY

##### Sand specimen preparation by means of pluvial deposition.

The present paper briefly describes the development of the equipment called gravity mass sand spreader (see Fig. 1-a) useful for preparation of sand specimens for laboratory testing by means of pluvial deposition.

The first series of tests carried out with sand having grain size distribution given in Fig. 2 have shown that using this method of sand specimen preparation one can obtain specimens having relative density ranging between 57% and 100% characterized by a very high degree of uniformity and very pronounced repeatability. Further research have been initiated with the scope to obtain lower relative densities with a new set diffusion plates and performing the deposition in gasses heavier than air.