

Dip.to DISTART - Università di Bologna

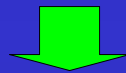


Portanza dei sottofondi stradali

Prof. Ing. Giulio Dondi

PORTANZA DEI SOTTOFONDI STRADALI

PORTANZA: tensione verticale corrispondente ad una deformazione prefissata ma sufficientemente piccola da limitare le plasticizzazioni del terreno dopo N cicli di carico.



La portanza è funzione della deformazione ammissibile.

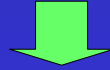
Non esiste una definizione univoca.

PORTANZA DEI SOTTOFONDI STRADALI

DETERMINAZIONE DELLA PORTANZA

PROVE DI CARICO CON PIASTRA

(PLT: Plate loading test)



Piastre di varie dimensioni

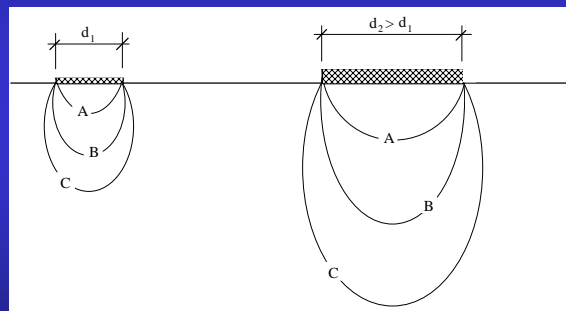


Si simulano le condizioni d'esercizio della sovrastruttura.

PROVA DI CARICO CON PIASTRA

FATTORI CHE INFLUENZANO LE MODALITÀ DI PROVA

1. **Diametro della piastra (D)**: influenza il risultato in quanto fa variare le dimensioni del bulbo di pressione;



Per strade ordinarie: $D = 300$ mm;
Per sovrastrutture aeroportuali: $D = 760$ mm.

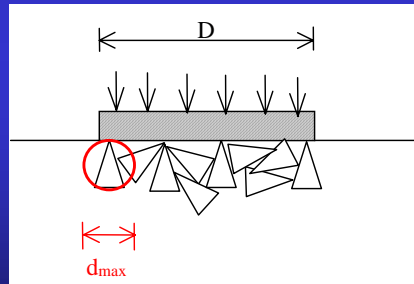
PROVA DI CARICO CON PIASTRA

FATTORI CHE INFLUENZANO LE MODALITÀ DI PROVA

2. **Effetto scala:** influenza il risultato in quanto può rendere la prova poco significativa.

Norme CNR: $D \geq 3 d_{\max}$

Altri: $D \geq 8 d_{\max}$

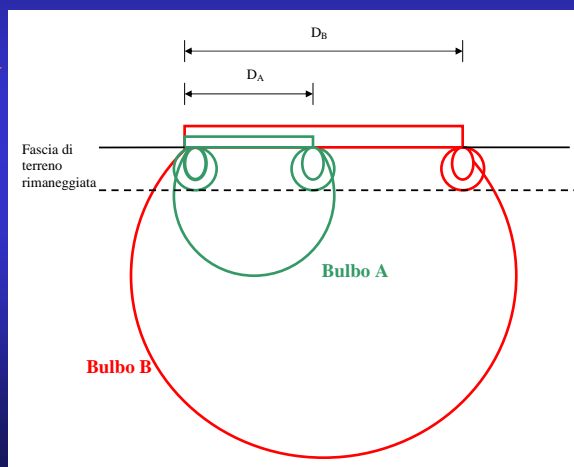


PROVA DI CARICO CON PIASTRA

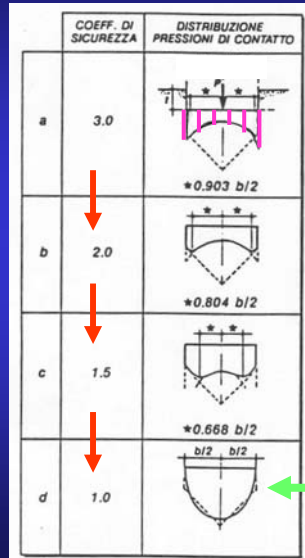
FATTORI CHE INFLUENZANO LE MODALITÀ DI PROVA

3. **Disturbo del piano di posa**

Ai bordi della piastra si creano delle zone di plasticizzazione che contribuiscono al cedimento. La percentuale di terreno disturbato è maggiore per il bulbo A.



PROVA DI CARICO CON PIASTRA DISTRIBUZIONE DELLE PRESSIONI DI CONTATTO



Evoluzione delle pressioni di contatto all'aumentare del carico: seguono un andamento parabolico con minimo al centro della fondazione e massimo agli estremi.

A rottura

PROVA DI CARICO CON PIASTRA VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI PER PROVE SUPERFICIALI

$$\Delta W = C_d \frac{\Delta p * D}{E} (1 - \nu^2)$$

Con:

- D = diametro della piastra;
- Δp = pressione applicata alla piastra;
- E = modulo elastico del terreno;
- ν = coefficiente di Poisson;
- C_d = fattore di forma e rigidità della piastra.

Forma	Centro	Bordo	Metà del lato minore	Metà del lato maggiore	Medio
Circolare	1.00	0.64	0.64	0.64	0.85
Circolare (rigida)	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79
Quadrata	1.12	0.56	0.76	0.76	0.95
Quadrata (rigida)	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
Rettangolare: Lungh./largh.					
1.5	1.36	0.67	0.89	0.97	1.15
2	1.52	0.76	0.98	1.12	1.30
3	1.78	0.88	1.11	1.35	1.52
5	2.10	1.05	1.27	1.68	1.83
10	2.53	1.26	1.49	2.12	2.25
100	4.00	2.00	2.20	3.60	3.70
1000	5.47	2.75	2.94	5.03	5.15
10000	6.90	3.50	3.70	6.50	6.60

PROVA DI CARICO CON PIASTRA

VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI PER PROVE PROFONDE

$$\Delta w_z = \Delta w * C_z = C_d \frac{\Delta p * D}{E} (1 - \nu^2) C_z$$

Con:

D = diametro della piastra;

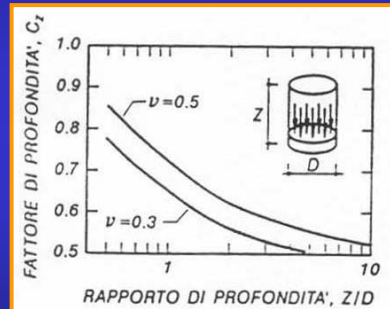
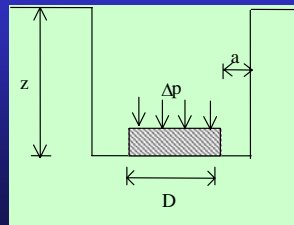
Δp = pressione applicata alla piastra;

E = modulo elastico del terreno;

ν = coefficiente di Poisson;

C_d = fattore di forma e rigidità della piastra;

C_z = fattore di profondità.



Per $a \geq 0,75 D$: C_z non si applica.

PROVA DI CARICO CON PIASTRA

VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI PER PROVE PROFONDE ESEMPIO

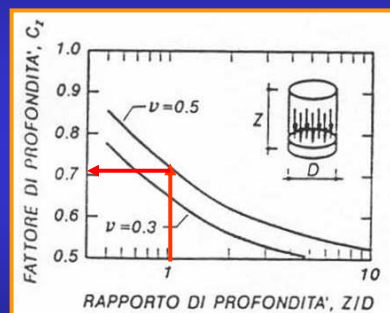
DATI:

$$Z / D = 1;$$

$$\nu = 0.5$$



$$C_z = 0.7$$



PROVA DI CARICO CON PIASTRA

MODULI DEL TERRENO RICAVABILI DA UNA PLT

1. MODULO "ELASTICO" $E = C_d \frac{\Delta p^* D}{\Delta w} (1 - \nu^2) C_z$

2. MODULO DI DEFORMAZIONE (norme DIN) $E_v = 0.75 \frac{\Delta p^* D}{\Delta w}$

Se $C_z=1$ e la piastra è rigida e circolare ($C_d=0.79$), E_v coincide con il modulo di Young con un coefficiente $\nu=0.21$ (tipico delle sabbie).



E_v è il modulo elastico solo nei terreni granulari.

PROVA DI CARICO CON PIASTRA

MODULI DEL TERRENO RICAVABILI DA UNA PLT

3. MODULO DI COMPRESSIONE (SNV 670317) $M_E = \frac{\Delta p^* D}{\Delta w}$

È definito come il MODULO DI DEFORMAZIONE M_d delle norme CNR – capitolato ANAS.

$E = C_d \frac{\Delta p^* D}{\Delta w} (1 - \nu^2) C_z$ \Rightarrow $M_E = \frac{E}{C_d C_z (1 - \nu^2)}$

$C_d \leq 1$
 $C_z \leq 1$
 $(1 - \nu^2) \leq 1$ \Rightarrow $M_E \gg E$

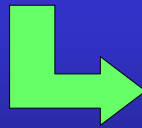
Per piastra rigida circolare e prova superficiale:

$E = 0.785(1 - \nu^2) M_E$

PROVA DI CARICO CON PIASTRA MODULI DEL TERRENO RICAVABILI DA UNA PLT

Indicando con E_{ed} il modulo edometrico del terreno:

$$E = E_{ed} \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)}$$

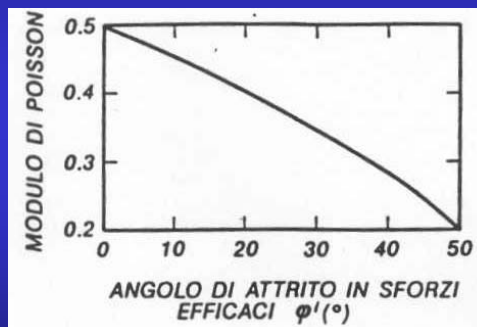


$$E_{ed} = E_{ed} (M_E)$$

PROVA DI CARICO CON PIASTRA VALUTAZIONE DEL COEFFICIENTE DI POISSON DA INSERIRE NELLE FORMULE

Si valuta in funzione dell'angolo d'attrito efficace del terreno.

$$\nu = \frac{1 - \sin \varphi}{2 - \sin \varphi}$$



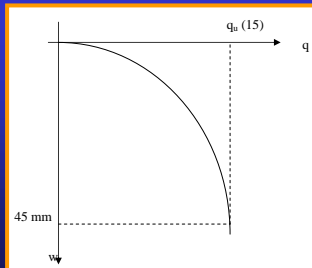
In condizioni non drenate ($\varphi=0$) (argille sature): $\nu = 0.5$

PROVA DI CARICO CON PIASTRA VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA A TAGLIO NON DRENATA

$$c_u = \frac{q_u}{6.2}$$

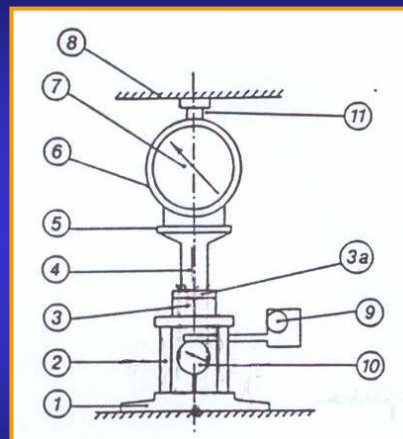
q_u è la pressione a rottura che si può assumere pari a $q_u(15)$, cioè al valore pari ad un affondamento $w/D = 0.15$ (cedimento normalizzato).

Se $D = 300$ mm, $q_u(15)$ va letto per un cedimento pari a 45 mm.

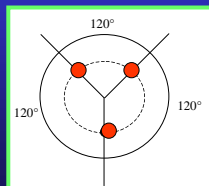


PROVA DI CARICO CON PIASTRA ATTREZZATURA DI PROVA (SNV 670317a)

1. Piastra di carico ($A = 700$ cm²);
2. Dispositivo per la misura del cedimento a centro piastra;
3. Raccordo;
- 3a. Ghiera di serraggio;
4. Pistone di carico;
5. Piastra di testa;
6. Martinetto;
7. Manometro;
8. Contrasto;
9. Trave porta comparatore;
10. Comparatore;
11. Eventuale inserimento prolunga.



Vista in pianta:



• *Comparatori*

PROVA DI CARICO CON PIASTRA

MODALITÀ DI PROVA (CNR BU 146/1992)

Si carica la piastra imprimendo delle pressioni predefinite e si misurano i cedimenti per mezzo di comparatori centesimali.

Dai risultati si determina il modulo di deformazione M_d :

Con:

$$M_d = D \frac{\Delta p}{\Delta w}$$

D = diametro della piastra;

Δp = incremento di tensione tra due passi di carico successivi = 0.1 MPa;

Δw = incremento di cedimento corrispondente (valore medio delle letture dei comparatori).

M_d , come abbiamo visto, non è un modulo elastico ($M_d \neq E$)!

PROVA DI CARICO CON PIASTRA

MODALITÀ DI PROVA (CNR BU 146/1992)

PRESCRIZIONI CNR

Sottofondo: $\Delta p = 0.05 - 0.15$ MPa;

Rilevato: $\Delta p = 0.05 - 0.15$ MPa;

Fondazione: $\Delta p = 0.15 - 0.25$ MPa;

Base: $\Delta p = 0.25 - 0.35$ MPa.

Precarico = 0.02 Mpa.

Incremento di carico: viene dato per passi successivi:

Sottofondo e Rilevato: 0.05 MPa;

Fondazione e Base: 0.1 MPa.

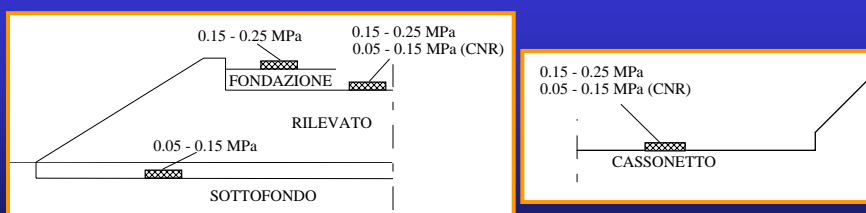
PROVA DI CARICO CON PIASTRA MODALITÀ DI PROVA PRESCRIZIONI ANAS (SNV 670317)

Sottofondo ($\Delta p = 0.15 - 0.25$ MPa): $M_d \geq 15$ MPa;

Rilevato e cassonetto in trincea ($\Delta p = 0.15 - 0.25$ MPa): $M_d \geq 50$ MPa;

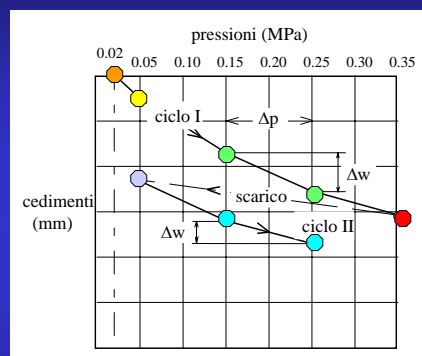
Fondazione: $M_d \geq 80$ MPa;

Base: non è prescritto alcun limite inferiore, ma $M_d > 100$ MPa.



PROVA DI CARICO CON PIASTRA PROVA DI CARICO A DOPPIO CICLO (strato di fondazione)

- Si applica un precarico di assestamento $P_0 = 0.02$ MPa;
- Si applica il carico $P_1 = 0.05$ MPa;
- Si incrementa il carico per passi successivi di 0.1 MPa;
- Si prosegue fino a $P_3 = 0.35$ MPa, al fine di esaltare l'addensamento iniziale;
- Si scarica fino a $P_3 = 0.05$ MPa;
- Si applica un secondo ciclo di carico con le stesse modalità;

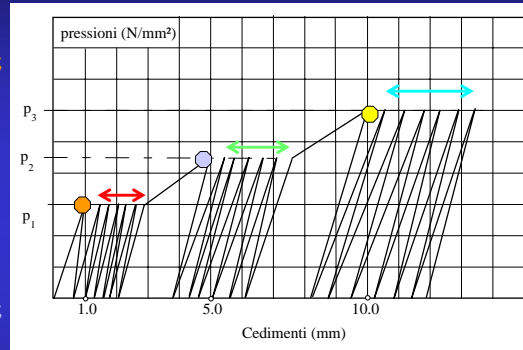


Il risultato è soddisfacente se: $k = \frac{M_d(II^\circ)}{M_d(I^\circ)} \leq 2$

Se $M_d(II^\circ)$ è $\gg M_d(I^\circ)$, il primo ciclo di carico ha addensato il terreno, che non era sufficientemente compattato.

PROVA DI CARICO CON PIASTRA PROVA DI CARICO A CICLI RIPETUTI (ASTM D1195-64)

- Si applica un carico P_1 tale da determinare un cedimento di 1 mm;
- Si mantiene P_1 fino al completo assestamento e si scarica la piastra attendendo l'esaurirsi del ritorno elastico;
- Si applicano 6 cicli di carico alla pressione ottenuta al primo ciclo;
- Si applica un carico P_2 tale da determinare un cedimento di 5 mm;
- Si mantiene P_2 fino al completo assestamento e si scarica la piastra attendendo l'esaurirsi del ritorno elastico;
- Si applicano 6 cicli di carico alla pressione indicata dal cedimento di 5 mm;
- Si applica un carico P_3 tale da determinare un cedimento di 10 mm;
- Si mantiene P_3 fino al completo assestamento e si scarica la piastra attendendo l'esaurirsi del ritorno elastico;
- Si applicano 6 cicli di carico alla pressione indicata dal cedimento di 10 mm.



PROVA DI CARICO CON PIASTRA PROVA DI CARICO A CICLI RIPETUTI (ASTM D1195-64)

Legge di McLeod:

$$w_{tot} = w_1 + k \log N$$

$$w_{el} = cost$$

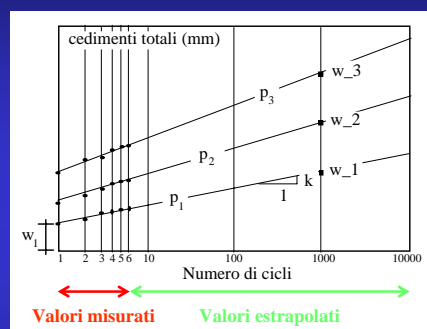
con:

w_{el} = cedimento elastico;

w_1 = cedimento corrispondente al primo ciclo di carico;

w_{tot} = cedimento totale;

N = numero di cicli di carico.



Definite le costanti w_1 e k , tramite analisi di regressione per ogni livello tensionale si estrapolano i diagrammi cedimenti-pressioni in funzione di cicli di carico differenti.

➔ Noti i cedimenti w_1, w_2, w_3 per un determinato numero di cicli di carico N si valuta la portanza del sottofondo.

PROVE DI ADDENSAMENTO

Per ottenere opere stabili nel tempo è necessario:

- scegliere con cura i materiali da utilizzare;
- metterli in opera in modo accurato.



È fondamentale un corretto addensamento.

Prove di addensamento:

- Prova Proctor (AASHTO) Standard;
- Prova Proctor (AASHTO) Modificata.

CLASSIFICAZIONE DELLE TERRE (CNR UNI 10006)

Classificazione	Terre ghiaio-sabbiose P (0.075 UNI 2332) ≤ 35%							Terre limo-argillose P (0.075 UNI 2332) > 35%					Torbe
	A1		A3	A2				A4	A5	A6	A7		
Sottogruppo	A1-a	A1-b		A2-4	A2-5	A2-6	A2-7				A7-5	A7-6	
Analisi granulometrica Frazione passante al setaccio 2 UNI 2332 (%) 0.4 UNI 2332 (%) 0.075 UNI 2332 (%)	< 50 < 30 < 15	< 50 < 25	> 50 > 10	< 35	< 35	< 35	< 35	> 35	> 35	> 35	> 35	> 35	> 35
Limite liquido				< 40	> 40	< 40	> 40	< 40	> 40	< 40	> 40	> 40	
Indice di plasticità	< 6			< 10	< 10	> 10	> 10	< 10	< 10	> 10	> 10	> 10	
Indice di gruppo	0		0	0		< 4		< 8	< 12	< 16	< 20		
Tipo di materiale	Ghiaia		Sabbia	Ghiaia e sabbia limosa o argillosa				Limi		Argille			Torbe
Qualità portanti	Da eccellente a buono					Da mediocre a scadente					Nulle		
Sensibilità al gelo	Nessuna o lieve			Media				Molto alta	Media	Alta	Media		
Ritiro o rigonfiamento	Nulla			Nulla o lieve				Lieve	Alto	Alto	Alto		
Permeabilità	Alta			Media o scarsa					Scarsa o nulla				

CLASSIFICAZIONE DELLE TERRE (CNR UNI 10006)

CRITERI DI CLASSIFICAZIONE

- Analisi granulometrica (per setacciatura);
- Limiti di Atterberg:
limite liquido: LL;
limite plastico: LP;
indice di plasticità: $IP = LL - LP$;
- Indice di gruppo: $IG = 0.2a + 0.005ac + 0.01bd$
con:
a = passante al setaccio 200 ASTM – 35 ($0 \leq a \leq 40$);
b = passante al setaccio 200 ASTM – 15 ($0 \leq b \leq 40$);
c = $LL - 40$ ($0 \leq c \leq 20$);
d = $IP - 10$ ($0 \leq d \leq 20$).

$$0 \leq IG \leq 20$$

PROVE DI ADDENSAMENTO

DENSITÀ RELATIVA

$$D_r = \frac{e_{MAX} - e}{e_{MAX} - e_{MIN}} 100$$

Con:

e_{MAX} = indice dei vuoti al minimo addensamento (materiale sciolto);

e_{MIN} = indice dei vuoti al massimo addensamento;

e = indice dei vuoti in sito.

$D_r = 0 \div 15 \%$		Materiale molto sciolto
$D_r = 15 \div 35 \%$		Materiale sciolto
$D_r = 35 \div 65 \%$		Materiale mediamente addensato
$D_r = 65 \div 85 \%$		Materiale addensato ← sufficiente
$D_r = 85 \div 100 \%$		Materiale molto addensato ← ottimale

PROVE DI ADDENSAMENTO

PROVA PROCTOR

Costipamento con colpi di pestello su una terra disposta in strati entro una fustella metallica.

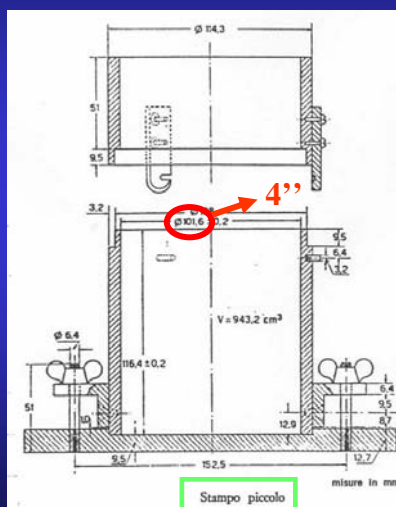


Si cerca di riprodurre in laboratorio il massimo addensamento possibile per il materiale in esame.

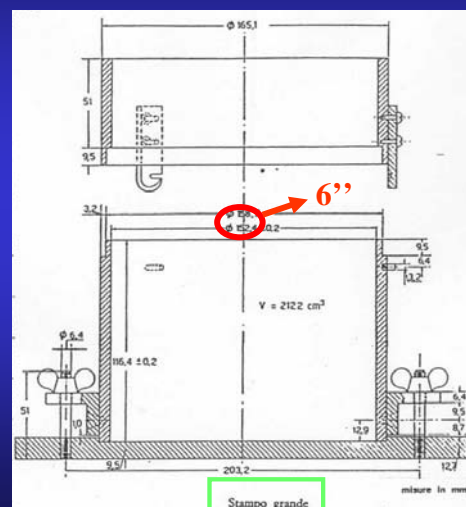


Il valore ottenuto in laboratorio è quello con cui si confrontano i risultati in sito.

PROVA PROCTOR APPARECCHIATURA DI PROVA



Stampo piccolo



Stampo grande

PROVA PROCTOR

MODALITÀ DI PROVA

1. Essiccamento in stufa (50°) del campione;
2. Disgregazione del campione con pestelli di gomma;
3. Vagliatura al setaccio 25 UNI 2334 (si procede se il trattenuto è $\leq 35\%$);
4. Si procede alla seconda vagliatura al setaccio 5 UNI;
5. Se $p_{5\text{ UNI}} = 100\%$, si usa indifferentemente lo stampo piccolo o quello grande;
6. Se $p_{5\text{ UNI}} \neq 100\%$, si usa lo stampo grande;
7. Si considerano 5 provini e si umidificano a w crescente con $\Delta w \approx 2\%$, e si lasciano riposare per 12 ore in recipienti chiusi (omogeneizzazione);

PROVA PROCTOR

MODALITÀ DI PROVA

8. Si introduce il materiale nelle fustelle procedendo per strati;
9. Si esegue la prova con le seguenti modalità:

	AASHTO standard	AASHTO modificata
Numero degli strati	3	5
Peso del pestello	2.5 kg	4.5 kg
Altezza di caduta	30.5 cm	45.7 cm
Numero colpi/strato	25 stampo piccolo	25 stampo piccolo
	56 stampo grande	56 stampo grande

10. Rimozione del collare superiore e rasatura con coltello della superficie;
11. Si determina la massa del provino umido (m_w);
12. Si determina l'umidità nella parte centrale del provino (w);

PROVA PROCTOR MODALITÀ DI PROVA

13. Si ripete l'operazione finché un provino con $w >$ del precedente evidenzia una massa minore del medesimo;
14. Per i provini ottenuti si calcola la densità secca γ_s :

$$\gamma_s = \frac{m_w}{V(1 + \frac{w}{100})}$$

Con:

m_w = massa del provino umido;

V = volume del provino;

w = umidità del provino.

$$m_w = m_d(1 + \frac{w}{100})$$

Con m_d = massa del provino secco.

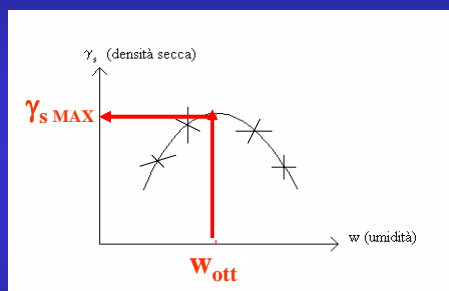


$$\gamma_s = \frac{m_d}{V}$$

PROVA PROCTOR RISULTATI DI PROVA

15. Si riportano i risultati ottenuti in un grafico umidità – densità secca.

Si ottiene un grafico a campana: il punto di massimo corrisponde alla percentuale di umidità ottimale e alla massima densità secca.



Al crescere di w :

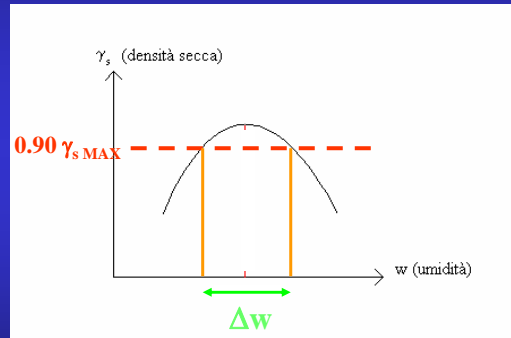
$w < W_{ott}$: l'acqua fornita al provino funziona da lubrificante fra i grani del terreno, provocando progressivamente un maggior costipamento (γ_s aumenta);

$w > W_{ott}$: l'acqua fornita al provino assorbe l'energia di compattazione, provocando uno scarso addensamento (γ_s diminuisce).

PROVA PROCTOR RISULTATI DI PROVA

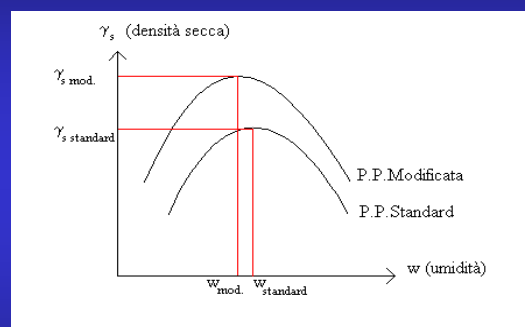
I capitolati impongono di raggiungere $\gamma_s = (90 - 95\%) \gamma_{s\text{MAX}}$.

Si definisce l'intervallo di umidità Δw in cui operare.



Terre sabbiose e ghiaiose: Δw poco importante;
Terre argillo - limose: Δw è determinante.

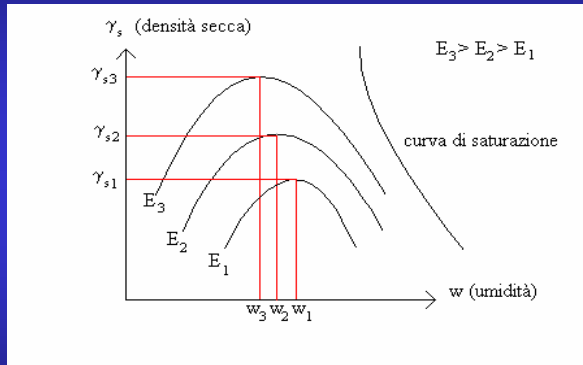
PROVA PROCTOR RISULTATI DI PROVA: CONFRONTO FRA MODALITÀ STANDARD E MODIFICATA



Le curve sono molto distanti tra loro e ad una contenuta diminuzione dell'umidità ottimale fa riscontro una maggiore densità secca eseguendo la prova Proctor Modificata.

PROVA PROCTOR

RISULTATI DI PROVA AL VARIARE DELL'ENERGIA DI COMPATTAZIONE



Al crescere dell'energia di compattazione le curve si innalzano ed il loro massimo si ottiene per valori di umidità minori.

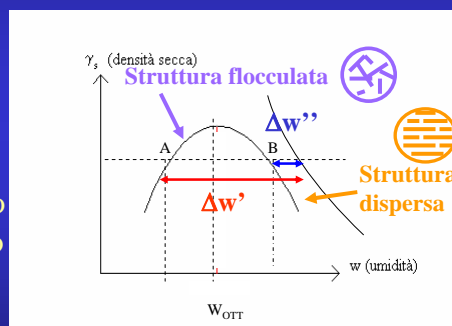
PROVA PROCTOR

RISULTATI DI PROVA

Si considera la curva AASHTO per il materiale esaminato e si traccia l'orizzontale in corrispondenza della densità secca cercata.

Si individuano due punti A e B caratterizzati da uguale densità secca e diversa umidità.

Per valutare quale dei due scegliere si esamina l'intervallo di umidità (distanza fra il punto e la curva di saturazione).



$$\Delta w' < \Delta w''$$



Meglio B: minor incremento di umidità per raggiungere la saturazione, minori variazioni volumetriche, migliore mantenimento dell'addensamento iniziale. È valido per le granulometrie più fini.

COMPATTAZIONE IN SITO

ATTREZZATURE PER IL COSTIPAMENTO

Si utilizzano:

1. mezzi statici: addensano il terreno sfruttando il peso proprio;
2. mezzi dinamici: l'addensamento è ottenuto sfruttando il peso proprio e l'azione vibratoria dinamica trasmessa al terreno.

Mezzi statici: materiali fini;

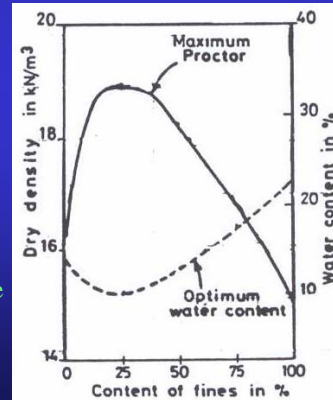
Mezzi dinamici: materiali incoerenti granulari.

Terreni granulari: facile addensamento;

Terreni coesivi: difficile addensamento:

1. Comportamento non drenato;
2. L'energia di compattazione aumenta la sola pressione neutra.

Se aumenta la percentuale di argilla, diminuisce la densità secca massima ottenuta con prova Proctor ed aumenta il contenuto di acqua ottimale per la compattazione.



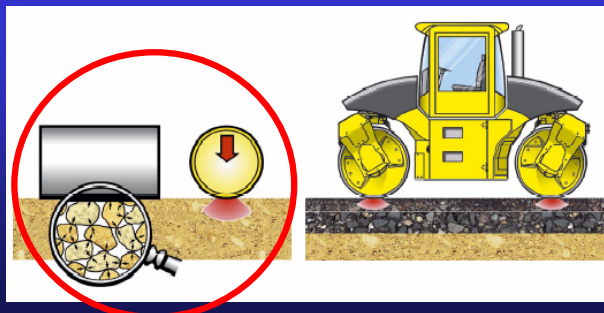
ATTREZZATURE PER IL COSTIPAMENTO

MACCHINE AD AZIONE STATICA

1. RULLI LISCI

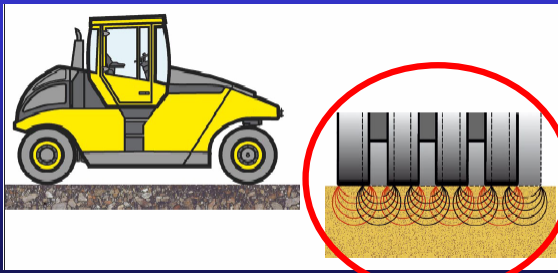


Esplicano forti azioni in superficie che si smorzano rapidamente in profondità.



ATTREZZATURE PER IL COSTIPAMENTO MACCHINE AD AZIONE STATICA

2. RULLI GOMMATI

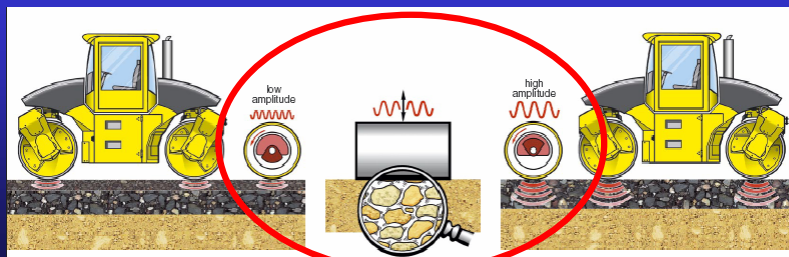


È possibile variare la pressione di gonfiaggio dei pneumatici. Si inizia con pressioni modeste e si aumenta la pressione durante il costipamento.

ATTREZZATURE PER IL COSTIPAMENTO MACCHINE AD AZIONE DINAMICA

1. RULLI LISCI

Pressione verticale, dovuta al peso della macchina, e oscillazione forzata, dovuta alla vibrazione
⇒ **ADDENSAMENTO**



ATTREZZATURE PER IL COSTIPAMENTO MACCHINE AD AZIONE DINAMICA

2. PIASTRE VIBRANTI



3. RULLI VIBROGOMMATI



COMPATTAZIONE IN SITO ATTREZZATURE PER IL COSTIPAMENTO

Tipo attrezzatura		Ghiaie e sabbie		Limi e argille	
		Spessore max (m)	Capacità (m ³ /h)	Spessore max (m)	Capacità (m ³ /h)
Mezzi statici	Rulli lisci	0.20	50	0.10	25
	Rulli gommati	0.30	60	0.20	30
Mezzi vibranti	Rulli lisci	0.20	80	0.15	50
	Piastre vibranti	0.50	60	0.35	40
	Rulli vibrogommati	0.30	85	0.20	35

I mezzi di massa elevata hanno una produttività più alta e lavorano più facilmente in materiali sabbioso-ghiaiosi.

COMPATTAZIONE IN SITO

ATTREZZATURE PER IL COSTIPAMENTO

Curve di addensamento al variare del mezzo costipante: i mezzi più pesanti producono una densità secca maggiore.

I rulli vibranti lisci sono il 60-70% del totale e operano a 25-40Hz con ampiezze di 1-2 mm. Lo spessore massimo addensabile è in genere di 30-50 cm.

