

Insegnamento di **Progetto di Infrastrutture viarie**

Opere in terra

Caratteristiche di un terreno

Compressibilità e costipamento delle terre

Portanza sottofondi e fondazioni stradali

Instabilità del corpo stradale

Soprastrutture

Materiali stradali

Soprastruttura flessibili

Cenni di calcolo delle soprastrutture

Intersezioni e Impianti stradali

Intersezioni a raso e a livelli sfalsati

Aree di sosta

Addensamento delle terre

Nella costruzione di un rilevato stradale, ma anche di dighe in terra, è fondamentale conferire all'insieme un'elevata densità.

E' altresì importante che il terreno di sottofondo, su cui appoggia il rilevato,, presenti caratteristiche tali da non ammalorare ciò che verrà realizzato al di sopra.

Nell'esecuzione di opere in terra si procede per fasi:

- A. Si studiano in laboratorio le terre che verranno utilizzate in cantiere per realizzare i rilevati al fine di determinarne: le migliori miscele, l'idonea percentuale d'acqua, ecc.;
- B. Si scelgono le tipologie di macchine operatrici (costipatori) e relative prove pratiche per ricavarne: tipo di carico, n° di passaggi, spessore strati, ecc.;
- C. Si passa all'esecuzione dell'opera e dei relativi controlli (in sito ed in laboratorio) riguardanti: densità, contenuto d'acqua, granulometria, ecc.;
- D. Si effettuano infine le verifiche finali per controllare la rispondenza dell'opera ai dati progettuali.

Prove di laboratorio

Per poter fare quanto detto in precedenza, occorre riprodurre, il più fedelmente possibile, in laboratorio le stesse condizioni utilizzate sul terreno dai mezzi di costipamento.

Prima di descrivere le prove di costipamento, che vengono effettuate in laboratorio, occorre ricordare che:

- il peso specifico apparente γ_a (densità) varia al variare dell'energia impiegata per costipare una terra,
- a parità di energia, il γ_a varia al variare del contenuto d'acqua.
- nelle prove non ci riferisce al $\gamma_a = P_b / V$, ma al peso specifico del secco $\gamma_s = P_s / V$.

Progetto di Infrastrutture viarie

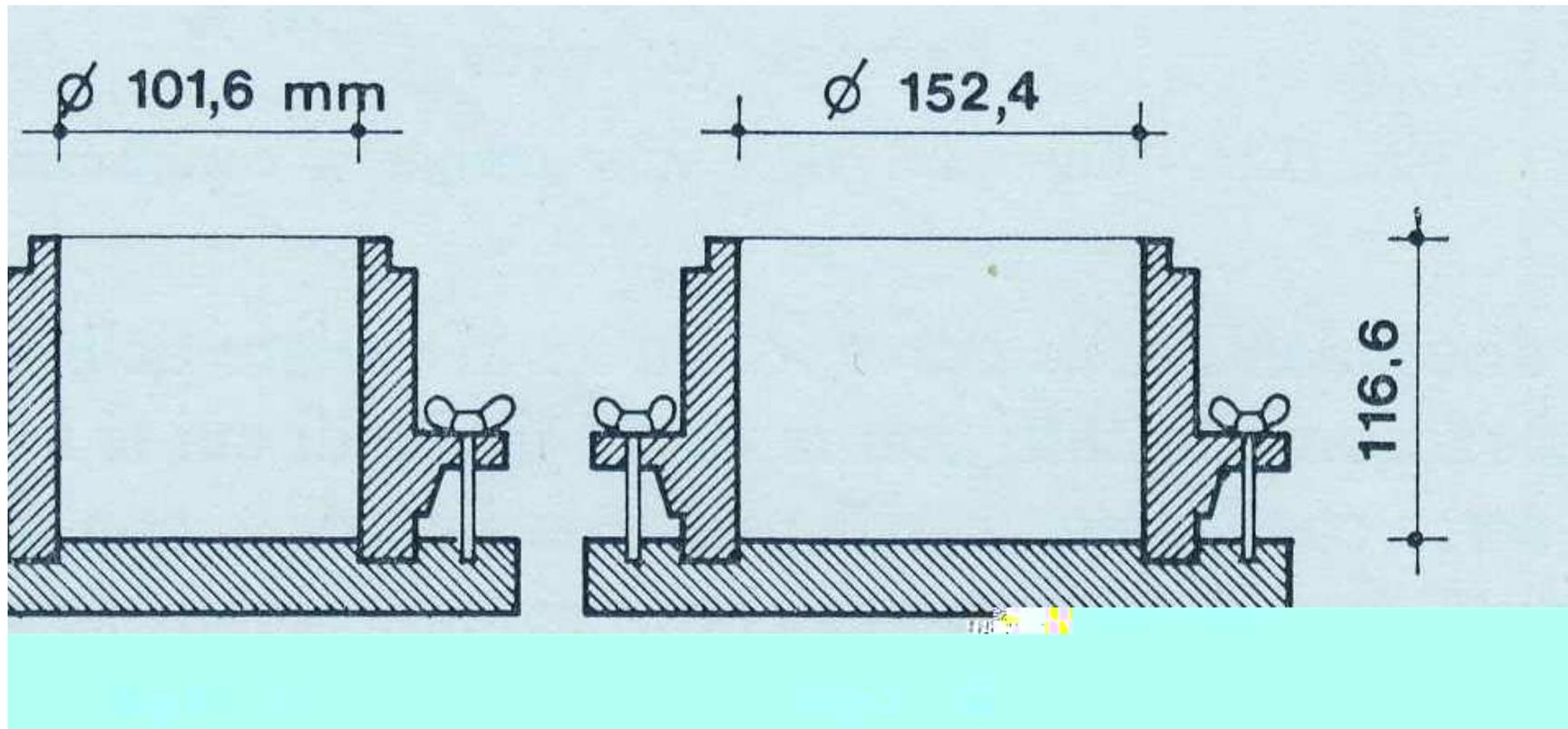
La prova Proctor

Tale prova consiste nel compattare, con data energia, un campione della terra da esaminare posto entro un contenitore, detto *fustella*, per misurarne il peso specifico del secco in funzione del contenuto percentuale d'acqua. Nelle figure: 1, 2, 3 e 4 si riportano rispettivamente l'apparecchiatura di prova, la fustella ed il compattatore meccanico. L'esperienza permette di affermare che la relazione (w, γ_s) ha un andamento a campana ed il valore massimo di densità lo si ottiene in corrispondenza di un preciso valore di contenuto d'acqua. In figura 5 è mostrato sia tale andamento, ma anche l'andamento della curva di saturazione. Ciò si spiega ricordando che:

- in una retta coesistono tre fasi: solida costituita dai granuli, liquida (acqua) e gassosa (aria); contenute negli spazi interstiziali tra granuli.
- in presenza di una terra asciutta, dove non è presente quindi la fase liquida, i granuli si assestano per costipamento in modo indipendente gli uni dagli altri con notevole quantità di vuoti.
- la presenza di acqua invece, rivestendo con sottili pellicole i granuli, fa sì che, per effetto delle tensioni superficiali esistenti, si sviluppi un mutuo legame tra granuli che favorisce appunto un maggior addensamento.
- tale effetto aumenta all'aumentare della percentuale d'acqua sino ad un punto di umidità ottima in corrispondenza del quale si raggiunge il massimo addensamento compatibile con l'energia impiegata. Se si aumenta la quantità d'acqua, oltre il valore di ottimo, si avrà un minore addensamento con valori di γ_s più bassi.

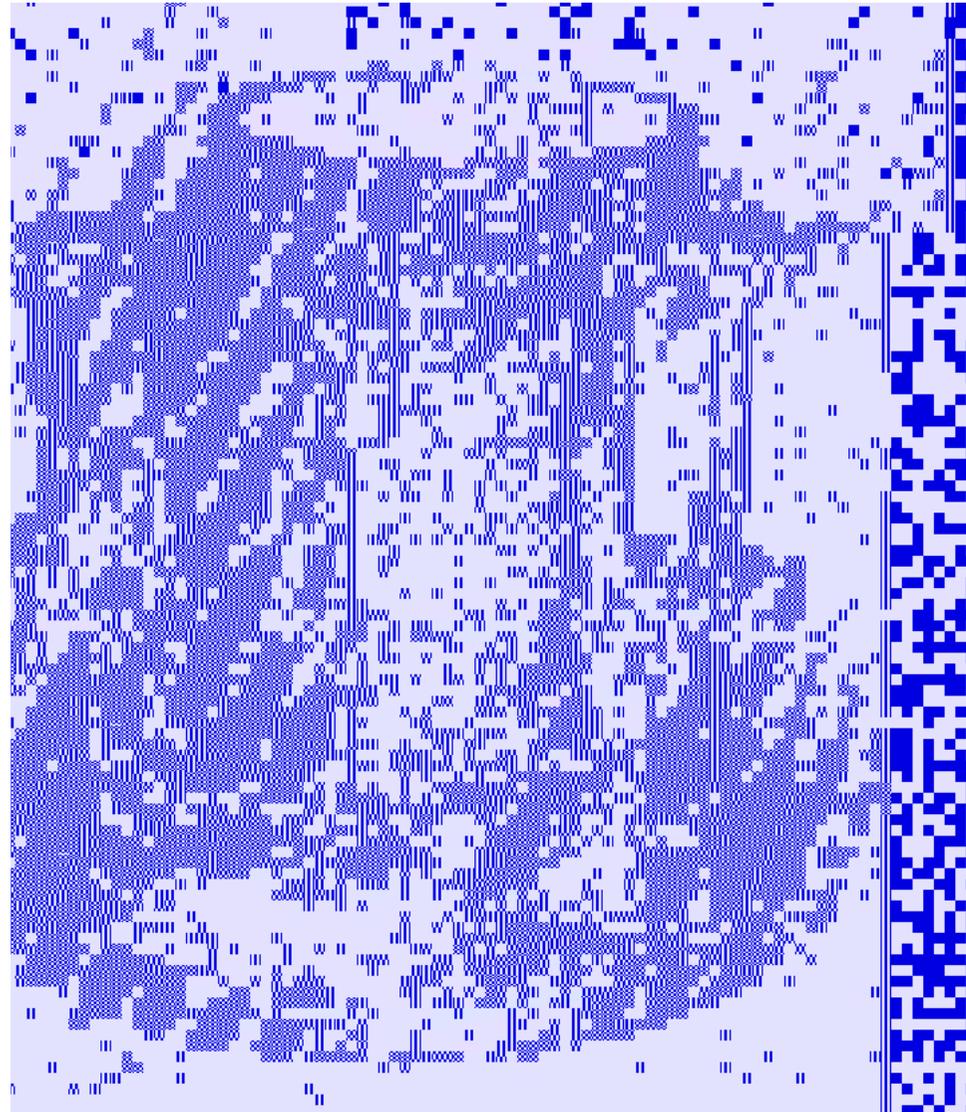
Schema della prova di costipamento

Tipi di fustelle



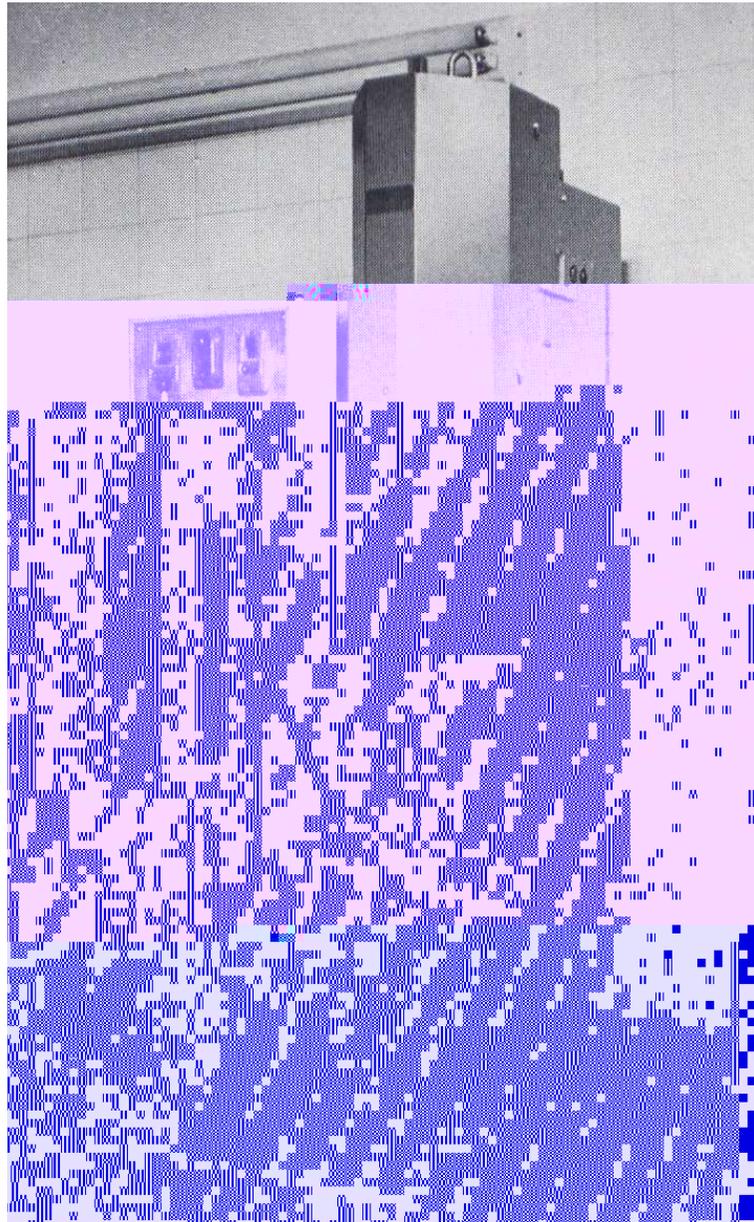
Progetto di Infrastrutture viarie

Fustella

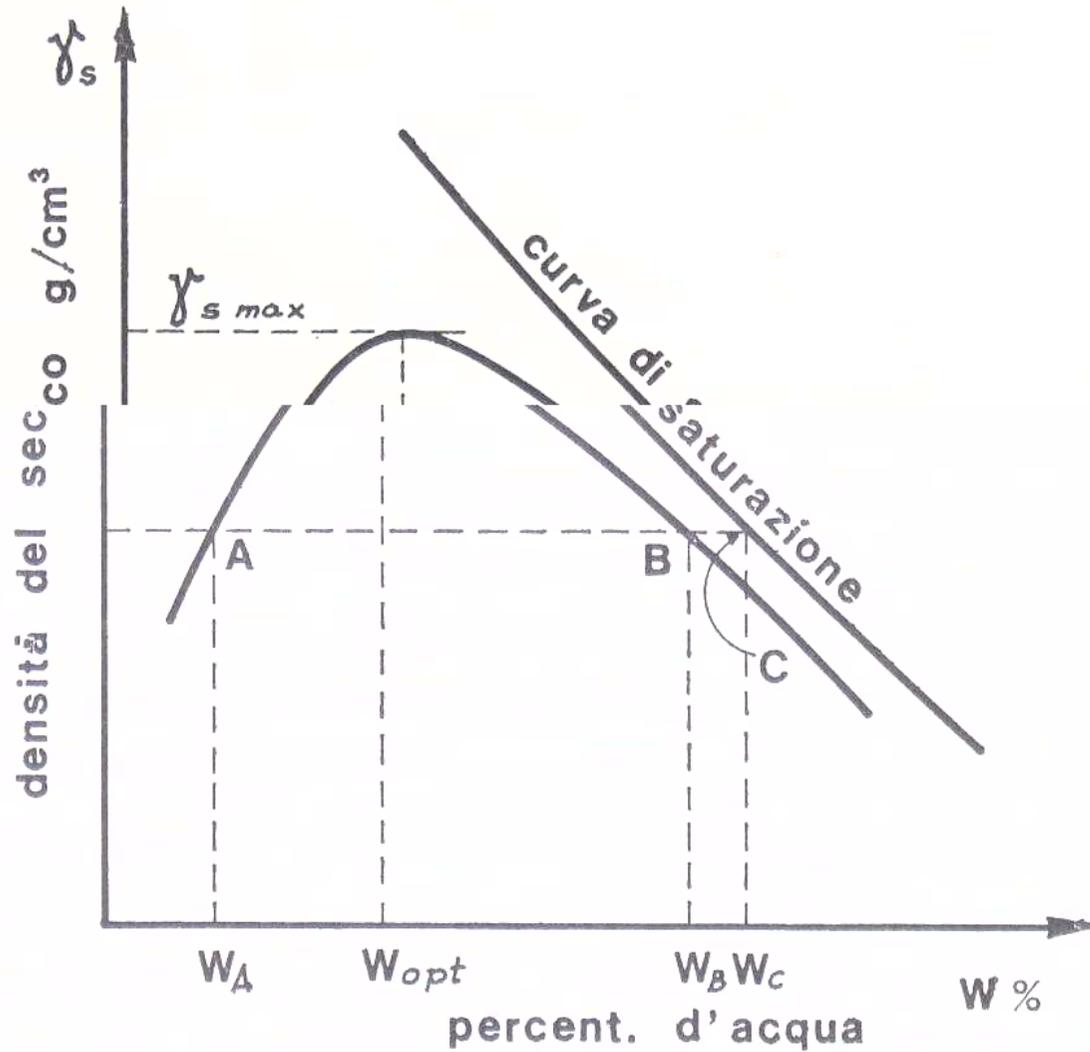


Progetto di Infrastrutture viarie

Compattatore meccanico



Andamento (w, γ_s) e curva di saturazione



Curva di saturazione

Con riferimento alle tre fasi che coesistono in una terra, indicato con V il volume della fustella, si ha: $V = V_g + V_a + V_v$; dividendo per P_s si ha:

$$V / P_s = V_g / P_s + V_a / P_s + V_v / P_s$$

Ricordato che: $V_g / P_s = 1 / \gamma_s$ e $V_a / P_s + V_v / P_s = (V_a + V_v) / P_s = (w + v) / 100$, si ottiene:

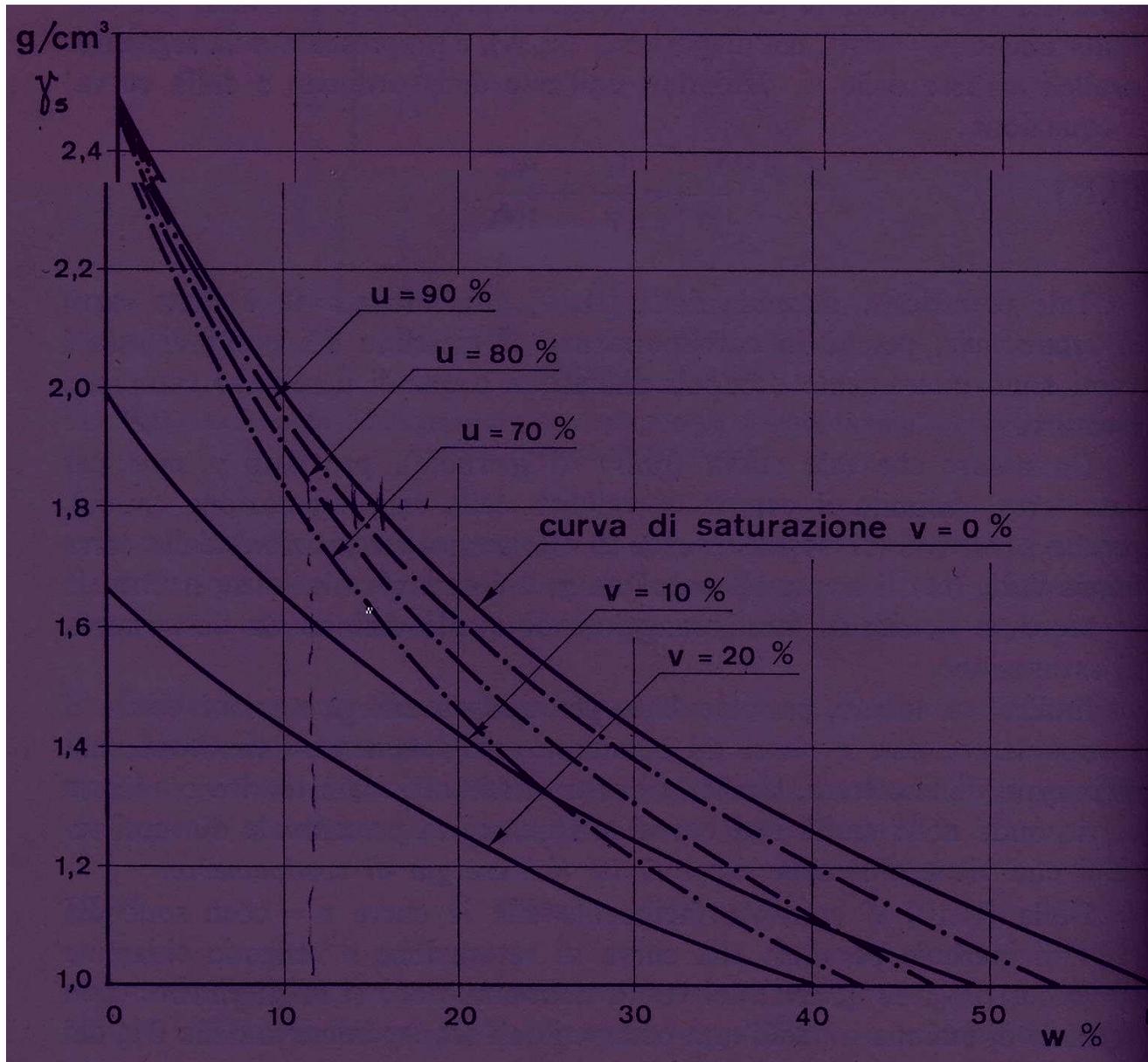
$$1 / \gamma_s = 1 / \gamma_g + (w + v) / 100$$

Per $v = 0$, si ha:

$$1 / \gamma_s = 1 / \gamma_g + w / 100$$

si ottiene cioè la *curva di saturazione* che è teorica in quanto si riferisce a condizioni solo teoriche. E' infatti impossibile eliminare completamente l'aria in essa contenuta, delimitando il campo di validità della rappresentazione (w, γ_s) . Nella figura 6 sono riportate, oltre alla curva saturazione, anche le curve del 10

Curve limite dell'energia di costipamento



Progetto di Infrastrutture viarie

Grado e percentuale di saturazione

Si definisce *grado di saturazione* il rapporto tra il volume occupato dall'acqua V_a ed il volume totale occupato dai vuoti $V_a + V_v$, cioè: $V_a / (V_a + V_v)$.

Si definisce invece *percentuale di saturazione* il rapporto:

$$u = 100 V_a / (V_a + V_v),$$

cioè il grado di saturazione moltiplicato per cento.

La percentuale di saturazione può anche essere espressa nella forma:

$$u = 100 [w / (w + v)],$$

in quanto, per : $w = 100 V_a / P_s$ e $v = 100 V_v / P_s$, si ha: $V_a / (V_a + V_v) = w / (w + v)$.

Pertanto dalla: $u = 100 [w / (w + v)]$ si ricava: $(w + v) / 100 = w / u$ e si ottiene la relazione:

$$1 / \gamma_s = 1 / \gamma_g + w / u.$$

Tale relazione, nel piano (w, γ_s) riportata in figura 6, permette di determinare le curve congiungenti i punti di uguale grado di saturazione.

Progetto di Infrastrutture viarie
Prova di costipamento

Consiste come si è detto, nel compattare, uno alla volta, tre successivi strati di terra, passante al setaccio n° 4 serie ASTM, nella fustella, facendo cadere per 25 volte un pestello da un'altezza di circa 30 cm (prove *Proctor e AASHO standard*) e per 55 volte un pestello da un'altezza di circa 45 cm (prova *AASHO modificato*). In figura 6 sono riportati i dati che caratterizzano le citate prove di costipamento.

Per la determinazione della curva (w, γ_s), riportata in figura 7, si eseguono più prove su campioni dello stesso terreno, ma con diversi contenuti percentuali d'acqua e a parità di energia di costipamento.

Aumentando l'energia di costipamento, la curva (w, γ_s) s'innalza ed il suo vertice si sposta verso l'asse delle ordinate; si ha un conseguente aumento della massima densità a fronte di una diminuzione della percentuale ottima di acqua.

A parità di contenuto percentuale d'acqua, il peso specifico γ_s passa dal punto M ad N e poi ad E sulla curva limite dell'energia all'aumentare dell'energia stessa di costipamento.

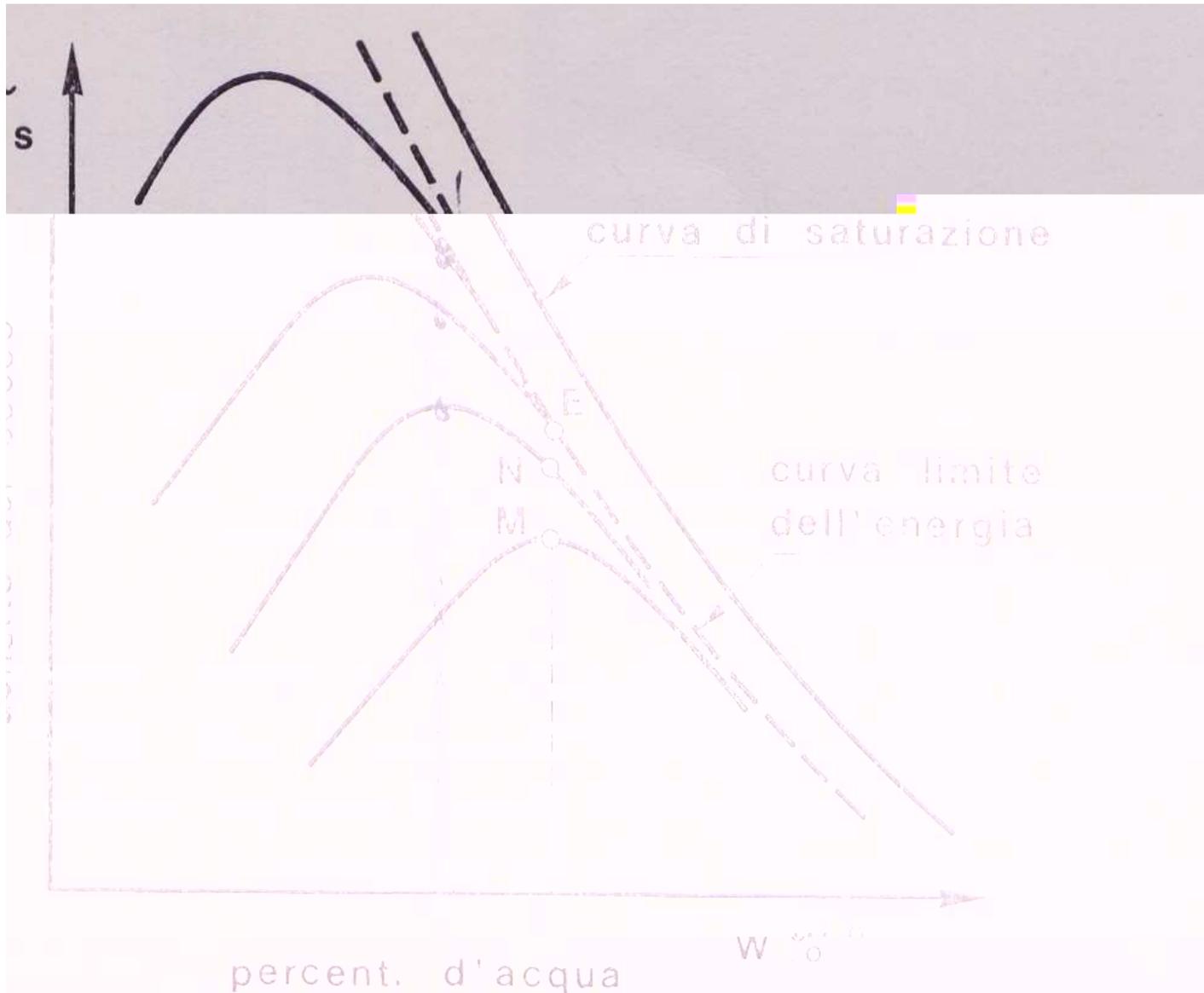
Progetto di Infrastrutture viarie

Dati che caratterizzano le prove di costipamento

	Dimensioni del cilindro			Dimensioni e peso del pestello		N. strati	N. colpi per strato	Altezza di caduta del pestello in cm	Energia per unità di volume (kg/cm ²)
	Diametro	Altezza	Volume	Diametro	Peso				
	cm	cm	cm ³	mm	kg		N.	Altezza del	Energia vol
Proctor Standard	10,16	11,66	945	50,8	2,5	3	25	30,5	6,5
A.A.S.H.O. Standard	10,16	11,66	945	50,8	2,5	3	25	30,5	6,5
	15,24	11,66	2125(*)	50,8	2,5	3	55	30,5	
A.A.S.H.O. Modificato	10,16	11,66	945	50,8	4,54	5	25	45,7	27,53
	15,24	11,66	2125(*)	50,8	4,54	5	55	45,7	

Progetto di Infrastrutture viarie

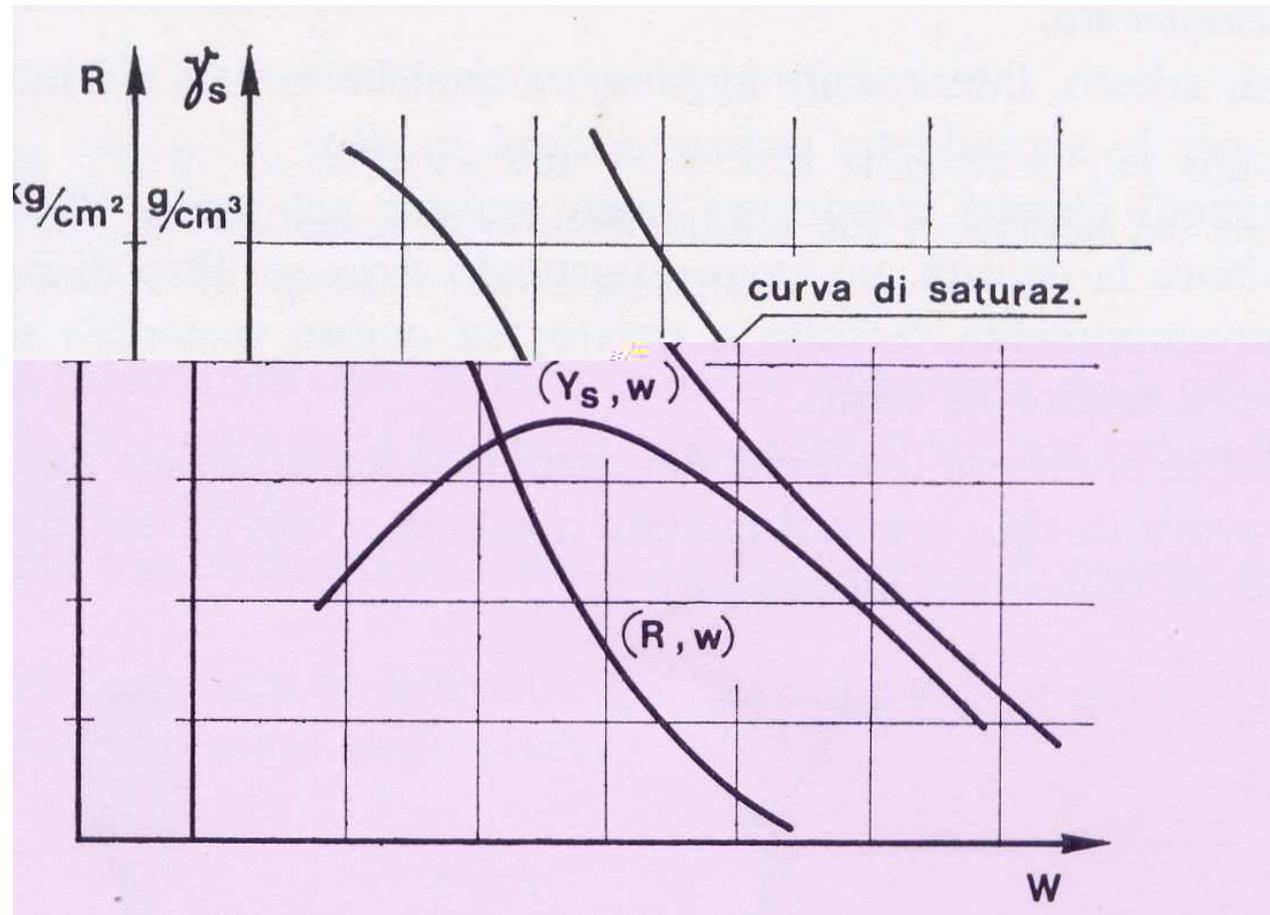
Curve (w, γ_s) a varie energie di costipamento



Progetto di Infrastrutture viarie

Curva della consistenza

Alla curva (w, γ_s) può associarsi, nello stesso diagramma, anche la *curva della consistenza* (w, R) utilizzando l'ago di Proctor e che misura lo sforzo necessario a far penetrare nel campione, con velocità di circa 12,5 mm/sec. Tale sforzo varia al variare del contenuto percentuale d'acqua, come riportato in figura.



Progetto di Infrastrutture viarie

Percentuale d'addensamento

Dopo la costruzione di un rilevato stradale occorre controllare in sito il contenuto d'acqua e la densità raggiunti.

I capitolati speciali d'appalto infatti prescrivono densità in sito facendo riferimento alla percentuale del valore massimo di densità. Per esempio se, con la prova Proctor si stabilisse un valore di γ_s massimo pari a $1,94 \text{ g/cm}^3$, la prescrizione di una densità in sito pari al 95 % del γ_s massimo equivarrebbe ad una densità di $1,44 \text{ g/cm}^3$.

Si definisce *percentuale d'addensamento* il rapporto percentuale tra il γ_s del terreno costipato in sito ed il γ_s massimo.

Esistono diversi metodi per determinare in sito la densità di un terreno costipato; tra questi: il metodo della sabbia, il metodo che utilizza una membrana elastica e il metodo che impiega apparecchiature ad isotopi radioattivi. L'uso dell'ago di Proctor è sconsigliato, specialmente in terreni ghiaiosi, perché, in assenza di particolari attenzioni, si può incorrere in errori grossolani.

Sulla percentuale d'addensamento, poc'anzi definita, vale la pena osservare che, avendo stabilito una densità in sito riferita percentualmente alla densità massima ottenuta in laboratorio, una variazione in meno anche del 5 % (dal 95 % al 90 %) determina differenze del grado di costipamento non accettabili. Nell'esempio che segue lo si dimostra.

Osservazioni sulla percentuale d'addensamento

Se per esempio il terreno di un rilevato senza alcuna compattazione presenta una densità di $1,50 \text{ g/cm}^3$, mentre a seguito della prova AASHO modificato lo stesso terreno presenta un $\gamma_{s \text{ massimo}}$ di $2,00 \text{ g/cm}^3$. Richiedendo una densità in sito pari non inferiore al 95 % di tale massimo, questa a costipamento avvenuto dovrà quindi risultare non inferiore a $\gamma_s = 2,00 \times 0,95 = 1,90 \text{ g/cm}^3$. Se invece detta densità è solo il 90 % della massima, sarà $\gamma_s = 2,00 \times 0,90 = 1,80 \text{ g/cm}^3$. Per evitare un grado di costipamento non accettabile, per effetto di facili errori di valutazione, occorre che la densità in sito vada raffrontata non alla densità massima di una prova Proctor, ma alla differenza tra detto massimo e la densità secca del terreno sciolto (non compattato) che nell'esempio si era indicato con $\gamma_{1s} = 1,50 \text{ g/cm}^3$. Come avviene in alcuni paesi, il capitolato speciale in questo caso dovrebbe prescrivere che la densità in sito dopo costipamento dovrà essere maggiore o uguale a γ_{1s} più una certa percentuale p % delle differenza tra $\gamma_{s \text{ massimo}}$ e γ_{1s} . In altri termini:

$$\gamma_s \geq \gamma_{1s} + (p / 100) (\gamma_{s \text{ massimo}} - \gamma_{1s}).$$

Per $p = 85 \%$ e con i dati di cui sopra avremmo: $\gamma_s \geq 1,50 + 0,42 = 1,92 \text{ g/cm}^3$. Una variazione in meno del 5 % su tale percentuale produce, evidentemente, differenze irrilevanti nel valore di γ_s . In questo caso: $\gamma_s \geq 1,50 + 0,40 = 1,90 \text{ g/cm}^3$.