



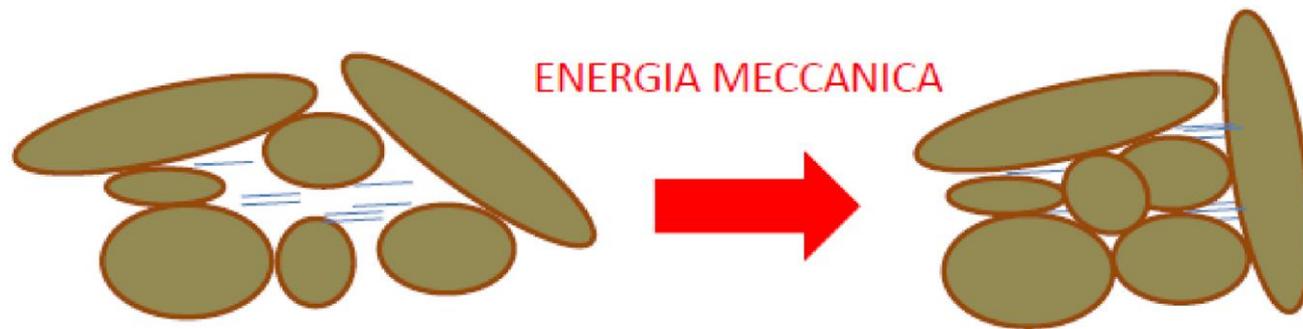
UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI FERRARA
Dipartimento di ingegneria
Corso di «Opere inTerra» –A.A. 2018-2019

LEZIONE N.5 – TEORIA DELLA COMPATTAZIONE



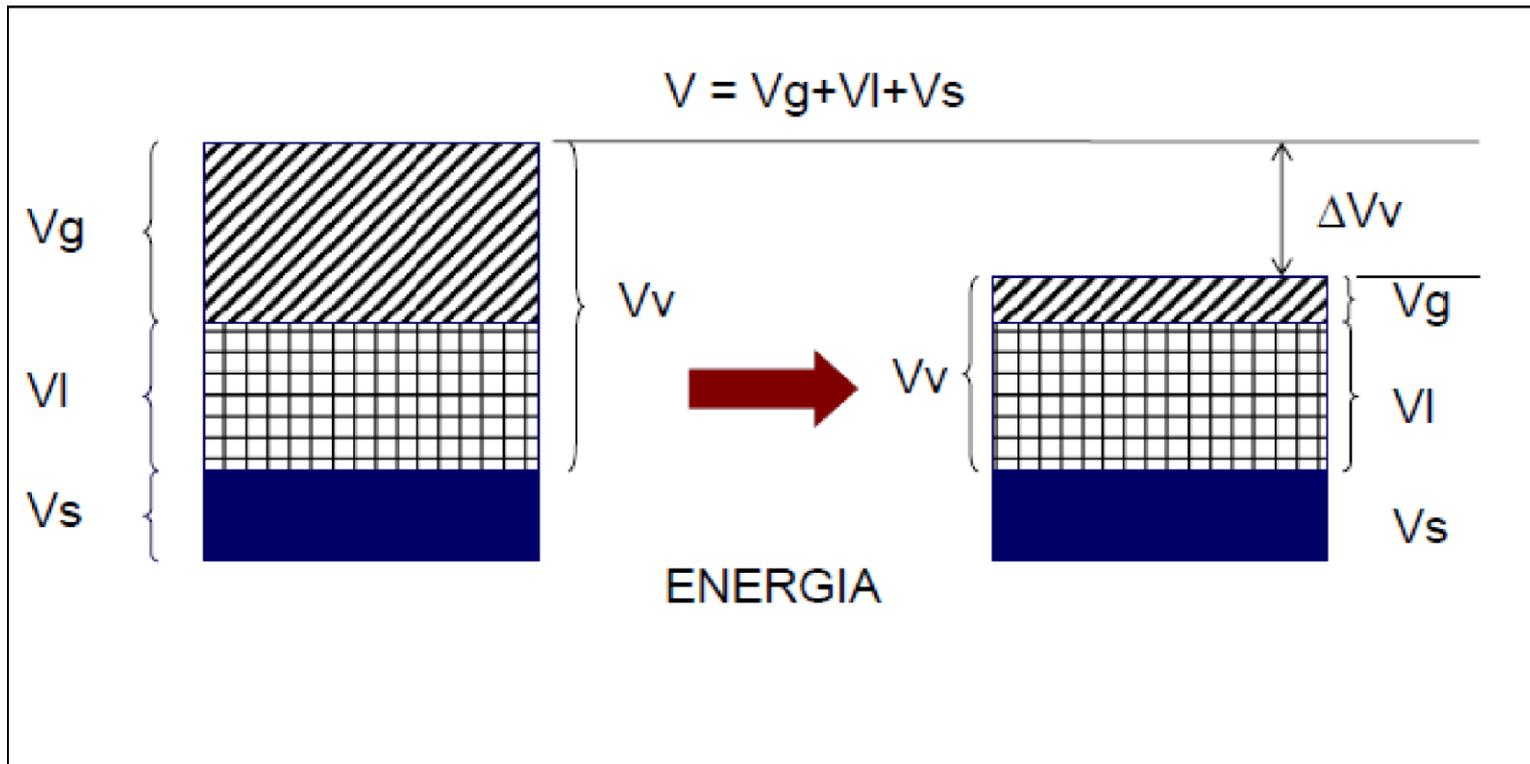
Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento
Teoria della compattazione

- ADDENSAMENTO DEL TERRENO
- RIDUZIONE DEL VOLUME DEI VUOTI
- MANTENIMENTO DEL VOLUME DEI GRANI





Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento
Teoria della compattazione





Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento Teoria della compattazione

Obiettivi

- AUMENTO DELLA RESISTENZA A TAGLIO
- RIDUZIONE DELLA COMPRESSIBILITA'
- RIDUZIONE DELLA PERMEABILITA'
- RIDUZIONE DELPOTENZIALE DI LIQUEFAZIONE
- CONTROLLO DEL RIGONFIAMENTO E DEL RITIRO
- PROLUNGAMENTO DELLA DURABILITA' NEL TEMPO



Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento
Teoria della compattazione

- TERRENI A GRANA FINE (Limi ed Argille)
 ↕ 0,05mm
- TERRENI A GRANA GROSSA (Ghiaie e Sabbie)



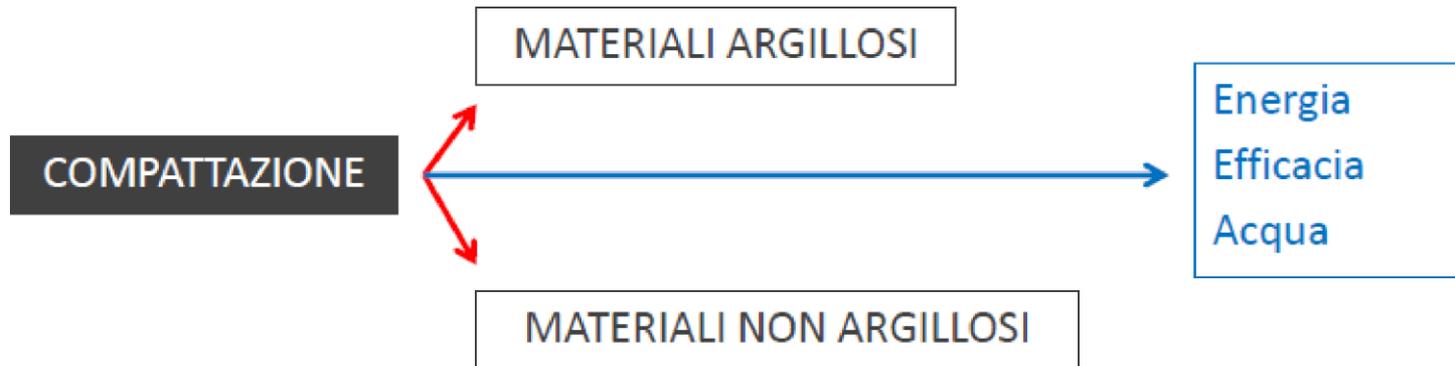
Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento
Teoria della compattazione

LA COMPATTAZIONE DEI TERRENI DOTATI DI COESIONE RICHIEDE L'APPLICAZIONE DI
UNA ELEVATA QUANTITA' DI ENERGIA MECCANICA DI TIPO STATICO

L'ADDENSAMENTO DEI TERRENI PRIVI DI COESIONE RICHIEDE L'APPLICAZIONE DI
UNA QUANTITA' MINORE DI ENERGIA MECCANICA MA DINAMICA



Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il
consolidamento Teoria della compattazione





Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento

Teoria della compattazione

IDENTIFICAZIONE



Tessitura



Mineralogia



Struttura



Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento
Teoria della compattazione

CLASSIFICAZIONE



Collocazione del campione di terra
all'interno di classi nell'ambito delle
quali si riscontra un comportamento
simile



Ingegneria
COMPORTAMENTO MECCANICO



Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento Teoria della compattazione

R.R. PROCTOR

nel (1930-1933) pubblica una serie di articoli su
«Engineering News Record»

relativamente al principio della compattazione stabilendo che essa dipende da 4 variabili:

- DENSITA' SECCA
- CONTENUTO IN ACQUA
- ENERGIA DI COMPATTAZIONE
- TIPO DI TERRENO



Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento
Teoria della compattazione

R.R. PROCTOR

ENERGIA DI COMPATTAZIONE

Energia necessaria a compattare un determinato volume di terreno
In determinate condizioni di umidità'
[J/m³]



Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento
Teoria della compattazione

R.R. PROCTOR

ENERGIA DI COMPATTAZIONE

STATICA
DINAMICA { VIBRAZIONE
IMPATTO



Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento

Teoria della compattazione

R.R. PROCTOR

ENERGIA DI COMPATTAZIONE



MATERIALI ARGILLOSI

MATERIALI NON ARGILLOSI



Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento
Teoria della compattazione

R.R. PROCTOR

PROVA DI COMPATTAZIONE IN LABORATORIO

NORMA CNR 69/1978

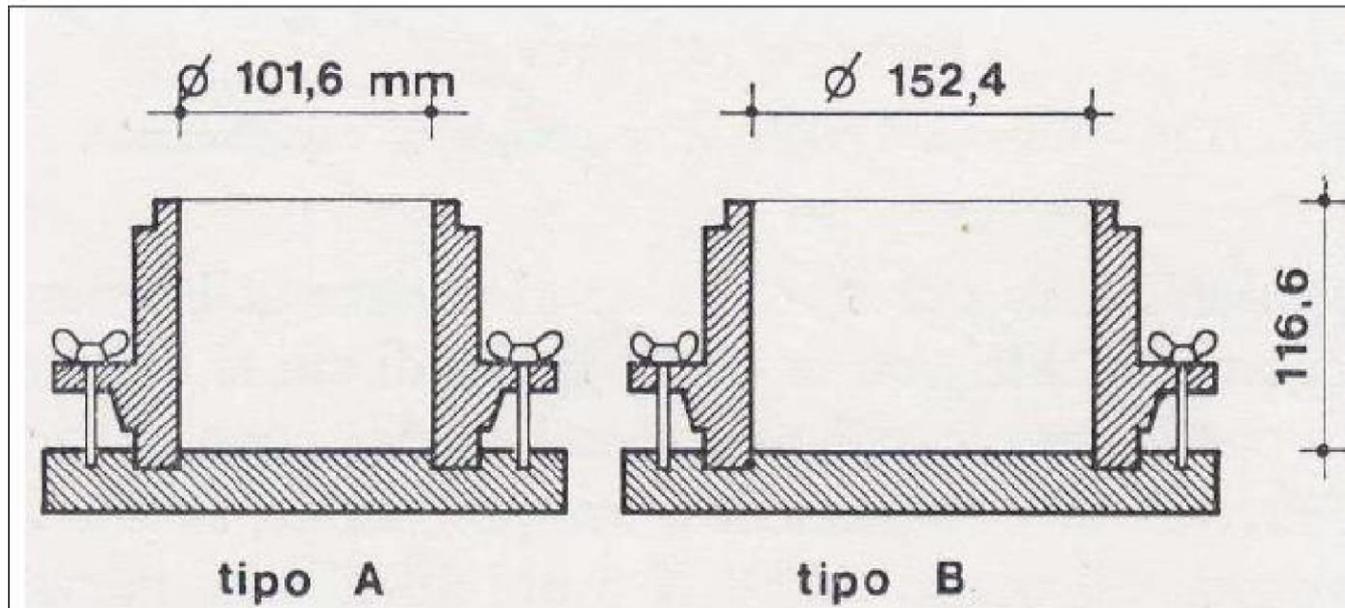
ASTM D698 – ASTM D1557

Prove di compattazione AASHO Standard
Prove di compattazione AASHO Modificata



Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento
Teoria della compattazione

R.R. PROCTOR





Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento
Teoria della compattazione

R.R. PROCTOR

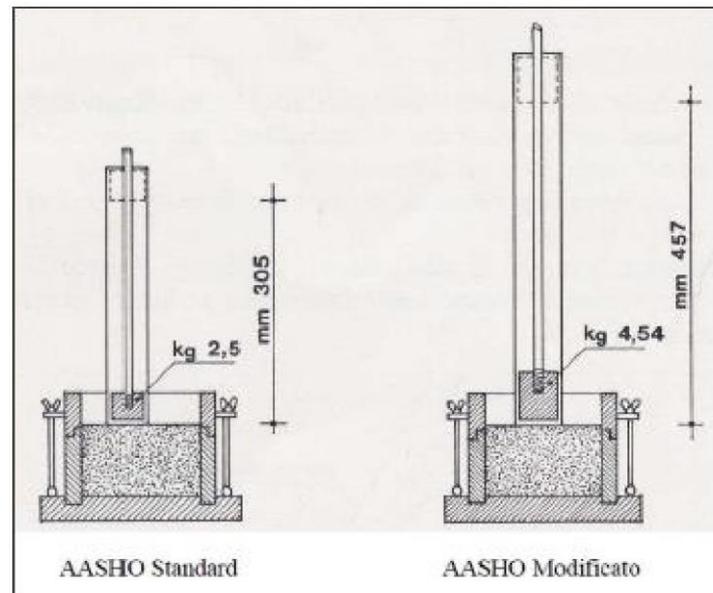


FUSTELLE PER LA PREPARAZIONE DEI PROVINI PER LA PROVA PROCTOR



Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento Teoria della compattazione

R.R. PROCTOR





Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento
Teoria della compattazione

R.R. PROCTOR



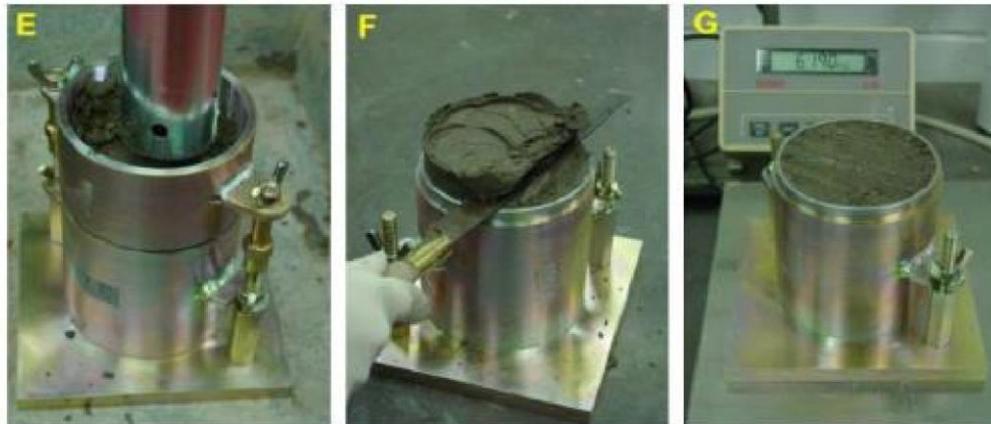
COMPATTATORE PROCTOR



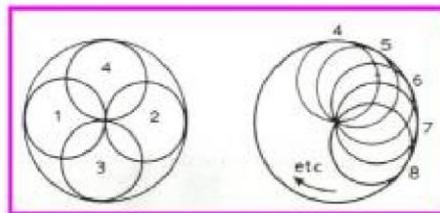
Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento

Teoria della compattazione

R.R. PROCTOR



primi 4 colpi



colpi successivi

PREPARAZIONE DEI PROVINI



Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento

Teoria della compattazione

R.R. PROCTOR



ESTRAZIONE DEI PROVINI

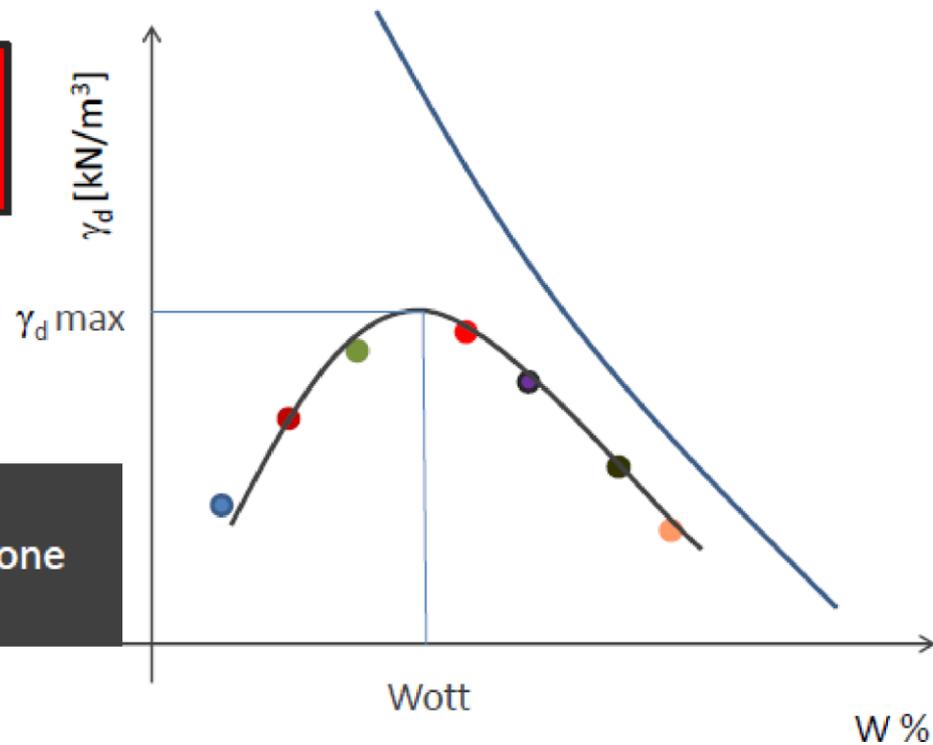


Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento Teoria della compattazione

R.R. PROCTOR



Stesso terreno
Stessa energia di compattazione
Umidità diverse



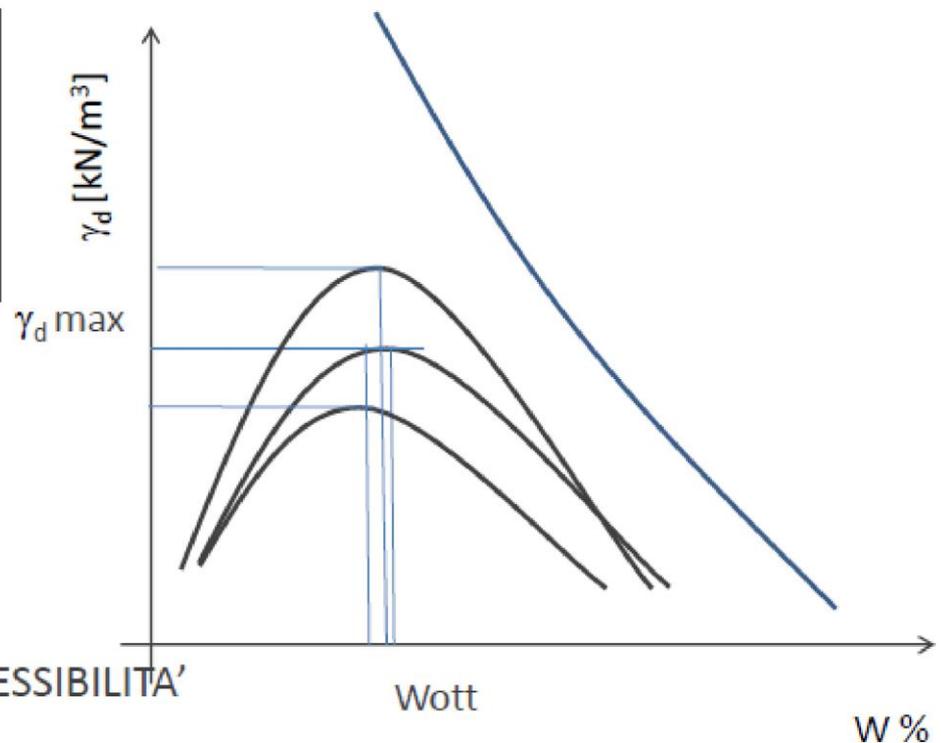


Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento Teoria della compattazione

Terreni diversi danno luogo a curve a campana di forme diverse, a parità di energia: le forme dipendono da una serie di caratteristiche fisiche

PRESSIONE INTERSTIZIALE
CAPILLARITA'
PRESSIONI OSMOTICHE
PERMEABILITA'
RESISTENZA A TAGLIO E COMPRESSIBILITA'

R.R. PROCTOR





Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento Teoria della compattazione

R.R. PROCTOR

EFFETTI DELLA COMPATTAZIONE SULLA STRUTTURA DEL TERRENO

TERRENO AL SECCO DELL'OTTIMO



Aumento della resistenza a taglio ma non sensibile addensamento

TERRENO CON UMIDITA' OTTIMALE



Aumenta l'indice dei vuoti e si riduce la densità

TERRENO ALL'UMIDO DELL'OTTIMO



Aumenta la densità ma non altrettanto la resistenza a taglio

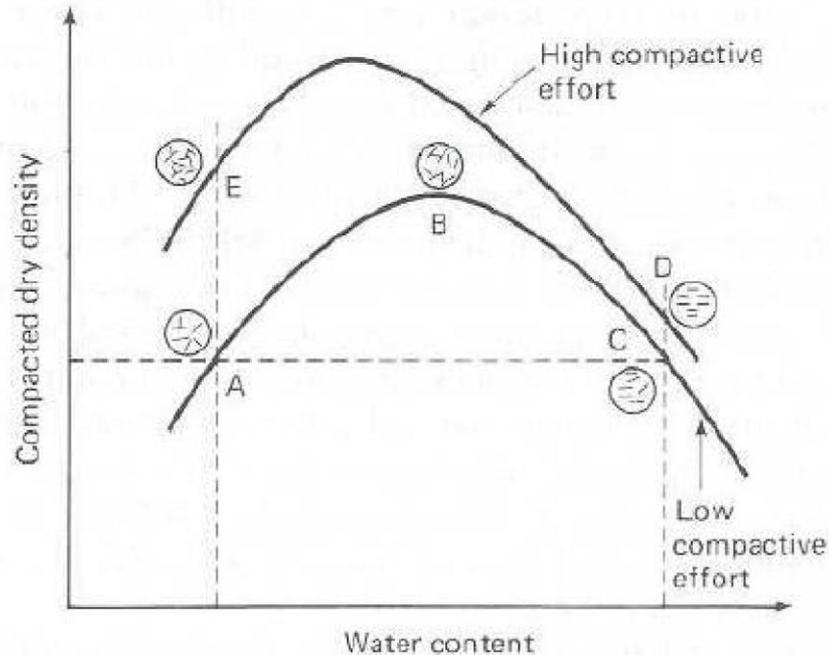


Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento

Teoria della compattazione

R.R. PROCTOR

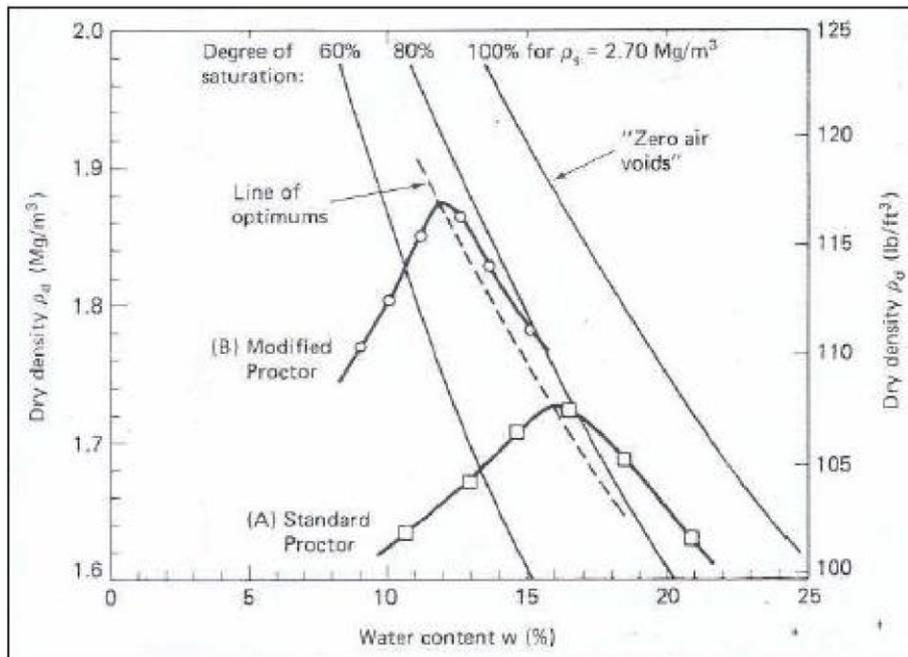
EFFETTI DELLA COMPATTAZIONE SULLA STRUTTURA DEL TERRENO



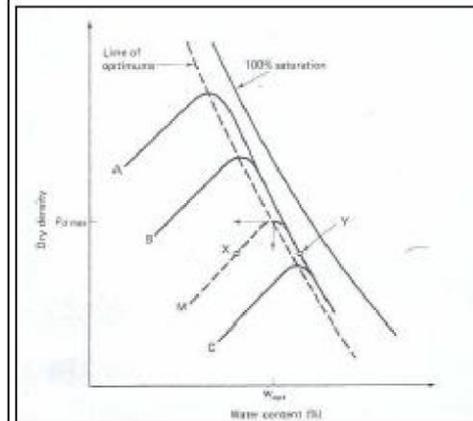


Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento Teoria della compattazione

STANDARD AND MODIFIED PROCTOR COMPACTION CURVES



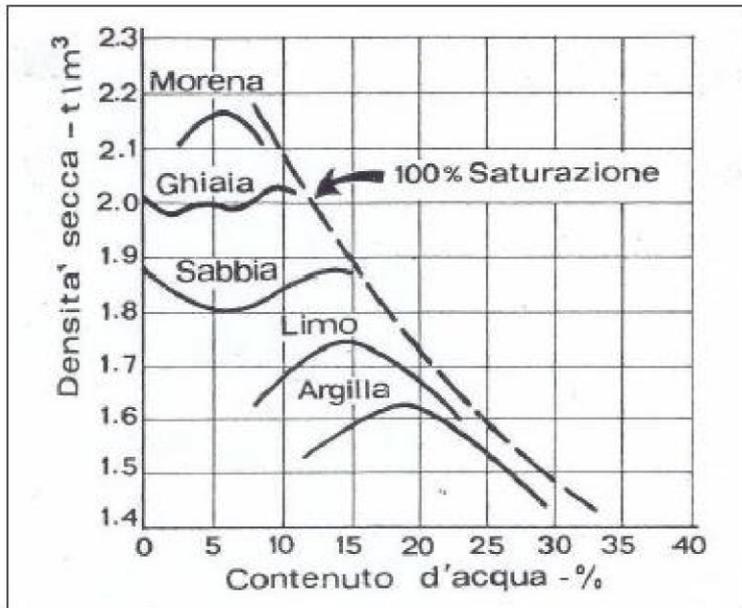
I VERTICI DELLE CURVE OTTENIBILI CON DIVERSE ENERGIE DI COMPATTAZIONE SI TROVANO LUNGO LA LINEA DEGLI OTTIMI CHE E' PRESSOCHE' PARALLELA ALLA CURVA DI SATURAZIONE





Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento Teoria della compattazione

PROCTOR COMPACTION CURVES



Occorre considerare sempre e comunque che è sufficiente una percentuale del 10-15% di materiali fini per rendere il terreno incoerente assimilabile, ai fini della compattazione, ai terreni coesivi e, quindi a dovere compattare il volume di terreno al valore ottimo della umidità per ottenere il massimo addensamento.



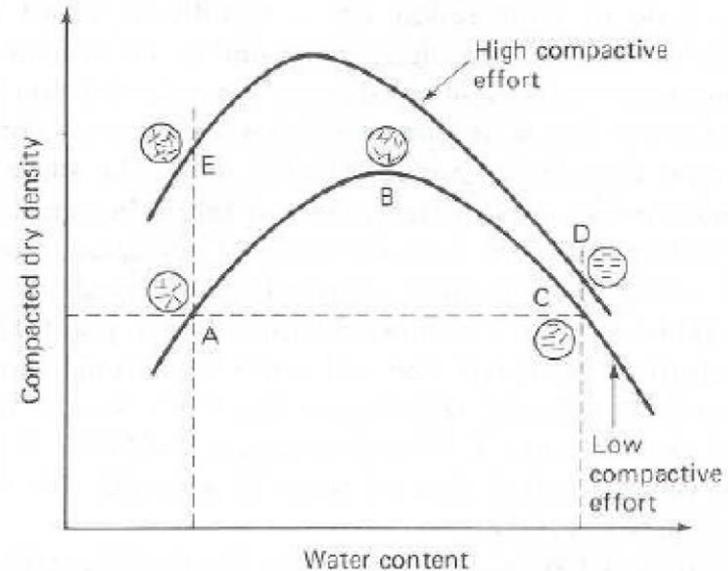
Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento Teoria della compattazione

COMPATTAZIONE DELL'ARGILLA E STRUTTURA

Il tipo di struttura che si ottiene dipende dal contenuto di acqua, dal tipo di compattazione, dal tipo di c

Gli stati in cui si presenta la argilla sono:

- Stato flocculato
- Stato disperso
- Stato casuale





Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento Teoria della compattazione

ADDENSAMENTO TERRE A GRANA GROSSA - NON COESIVI

In condizioni di parziale saturazione si può manifestare il fenomeno della capillarità

La capillarità è responsabile della coesione apparente dovuta alle tensioni superficiali

La capillarità richiede maggiore energia di compattazione / addensamento

Per terre a grana grossa non coesive non si utilizza il metodo Proctor e ci si affida alla relazione di Terzaghi:

$$D_r = \frac{e_{\max} - e_o}{e_{\max} - e_{\min}} * 100(\%)$$

$$D_r = \frac{Y_{d\max} (Y_d - Y_{d\min})}{Y_d (Y_{d\max} - Y_{d\min})} * 100(\%)$$



Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento Teoria della compattazione

ADDENSAMENTO TERRE A GRANA GROSSA - NON COESIVI

Difficoltà nella determinazione della densità relativa mediante prove di laboratorio

Ci si affida a prove in sito: CPT, CPTE, CPTEU, SPT, CPTECS

CLASSIFICAZIONE DI TERZAGHI:

SABBIA SCIOLTA:	$0 < D_r < 1/3$
SABBIA MEDIAMENTE DENSA:	$1/3 < D_r < 2/3$
SABBIA DENSA:	$2/3 < D_r < 1$

COMPATTABILITA':
$$F = \frac{e_{\max} - e_{\min}}{e_{\min}}$$



Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento
Teoria della compattazione

I MATERIALI MONOGRANULARI SONO ADDENSABILI CON MINORE EFFICACIA
RISPETTO A QUELLI BEN GRADATI

$$0,5 < F < 2,0 \text{ (circa)}$$

F maggiore per terreni ben addensabili.



Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento Teoria della compattazione

Alcuni Autori e Studiosi hanno misurato il coefficiente di spinta a riposo durante prove di compattazione all'interno di un riporto di sabbia con contenuto d'acqua compreso tra 3% e 4%. Sono stati utilizzati rulli lisci con peso limitato: 5,7 e 3,0 tonnellate, operanti con una frequenza compresa tra 19 e 29 Hz.

Uno dei risultati più interessanti consiste nel fatto che la tensione principale minore (σ_3) dipende dalla orientazione del piano di misura rispetto alla direzione di viaggio del rullo.

IL VALORE MASSIMO DI K_0 SI VERIFICA SU UN PIANO PERPENDICOLARE AL MOVIMENTO DEL MEZZO;

IL VALORE MINORE DI K_0 SU UN PIANO PARALLELO AL MOVIMENTO DEL MEZZO



Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento
Teoria della compattazione

SVILUPPO TECNOLOGICO E SCIENTIFICO

- EFFICACIA DELLE MACCHINE COMPATTATRICI
- CONTROLLO E GESTIONE DELLA QUALITA' DI COMPATTAZIONE
- CONOSCENZA SCIENTIFICA DEL PROCESSO DI COMPATTAZIONE

INCREMENTO DEI REQUISITI ATTESI PER LE NUOVE OPERE
(STRADE, AUTOSTRADE, ALTA VELOCITA' FERROVIARIA)



Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento
Teoria della compattazione

METODI DI COMPATTAZIONE

- IMPACT
- STATIC
- KNEADING (MESCOLAMENTO)
- VIBRATORY
- GYRATORY SHEAR



Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento
Teoria della compattazione

METODI DI COMPATTAZIONE DEI TERRENI

- CONVENZIONALI
- CONTROLLO CONTINUO (Continuous Compaction Control) CCC



Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento
Teoria della compattazione

METODI DI COMPATTAZIONE CONVENZIONALI

- TAMBURI STATICI O VIBRATORI LISCI O A PIASTRE



Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento
Teoria della compattazione

METODI DI COMPATTAZIONE CONTROLLO CONTINUO CCC

- RULLI VIBRANTI CON STRUMENTAZIONE A BORDO
- MISURA DELL'ACELERAZIONE DEL RULLO FUNZIONE DEL TEMPO
- DETERMINAZIONE RIGIDEZZA DEL TERRENO E DEL MODULO
- CONFRONTO VALORE DEL MODULO CON QUELLO PREIMPOSTATO
- VERIFICA DELLA COMPATTAZIONE ATTESA
- RULLO INTELLIGENTE MODIFICA AUTOMATICAMENTE FREQUENZA, FORZA ED AMPIEZZA PER RAGGIUNGERE IL VALORE DI MODULO PREIMPOSTATO



Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento
Teoria della compattazione

METODI DI COMPATTAZIONE CONVENZIONALI

- AZIONI MECCANICHE DI TIPO STATICO (COMPRESSIONE-TAGLIO)
- AZIONI DINAMICHE, URTI VIBRAZIONI



Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento
Teoria della compattazione

METODI DI COMPATTAZIONE CONVENZIONALI

IN BASE AL PREVALERE DI UNO DEI DUE TIPI DI AZIONI TRASMESSE



1. COMPATTATORI PREVALENTEMENTE STATICI



2. COMPATTATORI PREVALENTEMENTE DINAMICI

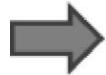
TERRENI GRANULARI

TERRENI FINI

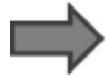


Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento
Teoria della compattazione

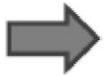
METODI DI COMPATTAZIONE INTELLIGENTI (CCC)



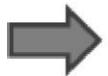
Primo rullo vibrante con accelerometro (1974)



Geodynamik (1978) valore di compattazione CMV



Bomag (1980) Metodo Omega che fornisce una misura continua della energia di compattazione



Bomag (1990) Modulo Vibratorio che rileva la rigidità del terreno raggiunta in fase di compattazione



Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento
Teoria della compattazione

METODI DI COMPATTAZIONE INTELLIGENTI (CCC)



Adam (1996) descrive le modalità di operare dei rulli : area di contatto, perdita contatto ecc.

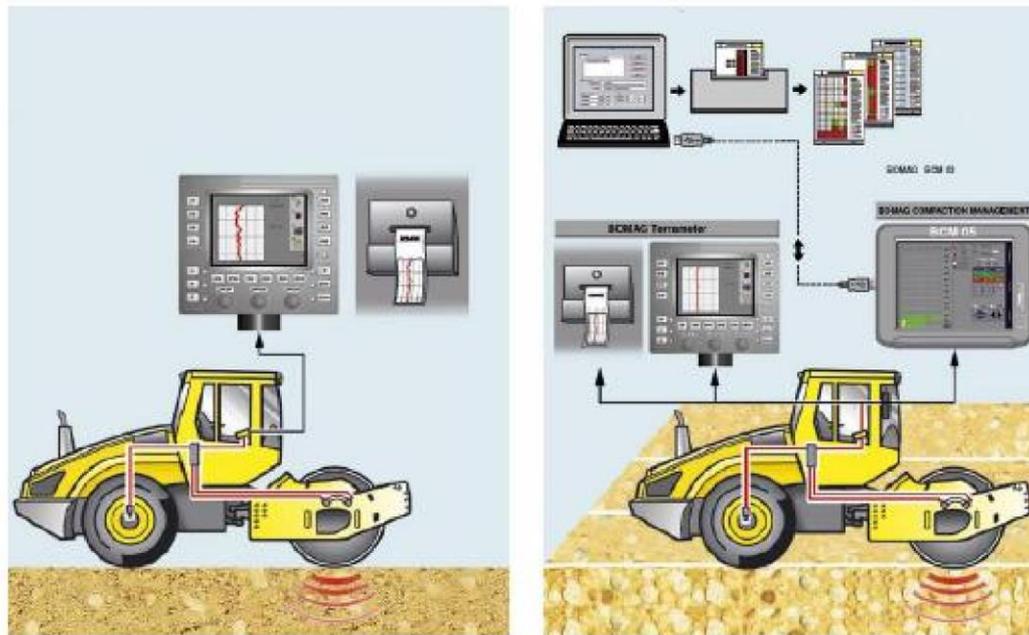


Amman (2001) Introduce il parametro di rigidità k_s



Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento
Teoria della compattazione

METODI DI COMPATTAZIONE INTELLIGENTI (CCC)





Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento Teoria della compattazione

FATTORI IMPORTANTI PER LA COMPATTAZIONE:

PESO STATICO DEL MEZZO (maggiore peso, maggiore efficacia – 18÷22t)

FREQUENZA E AMPIEZZA (Maggiore effetto con frequenze comprese tra 25 e 50 Hz (1500 e 3000 vibr/min))

VELOCITA' DEL RULLO COMPATTATORE (Velocità ottimali comprese tra 3 e 6 km/h)

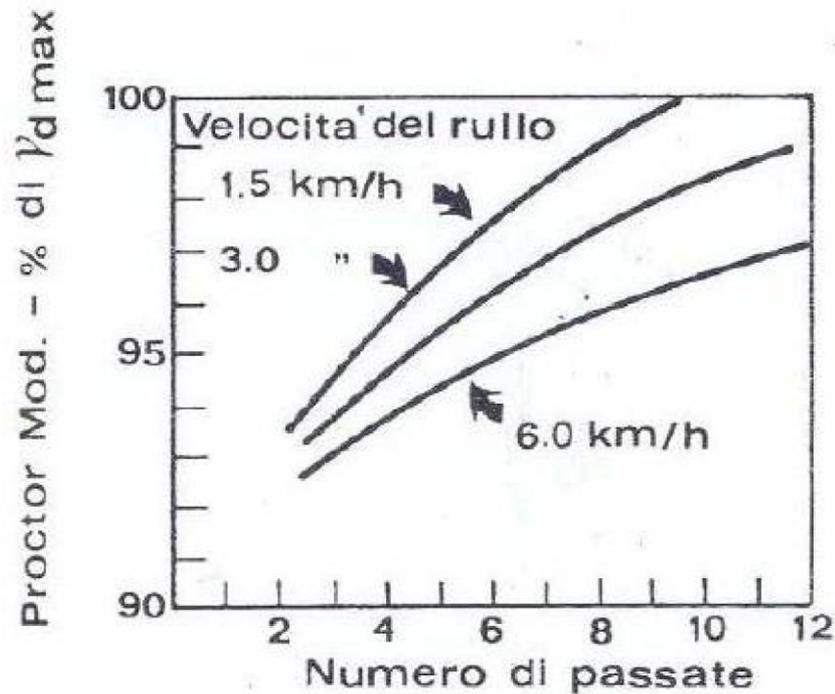


Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento

Teoria della compattazione

TECNOLOGIA DELLA COMPATTAZIONE

VELOCITA' E NUMERO DI PASSATE DEI RULLI COMPATTATORI

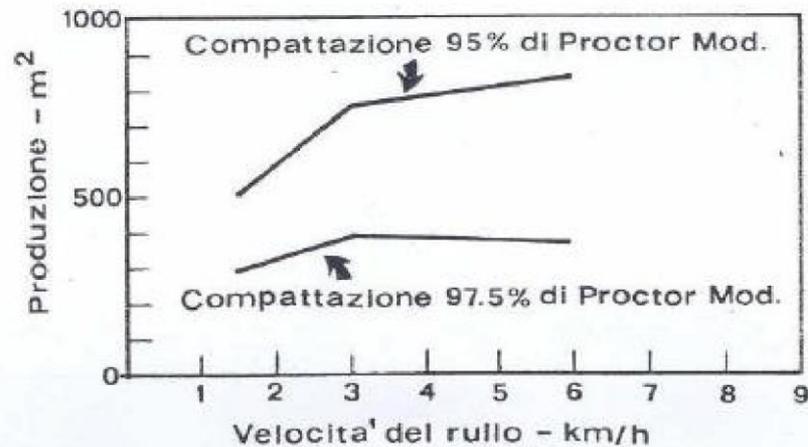




Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento
Teoria della compattazione

TECNOLOGIA DELLA COMPATTAZIONE

VELOCITA' E NUMERO DI PASSATE DEI RULLI COMPATTATORI





Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento

Teoria della compattazione

TECNOLOGIA DELLA COMPATTAZIONE

VELOCITA' E NUMERO DI PASSATE DEI RULLI COMPATTATORI

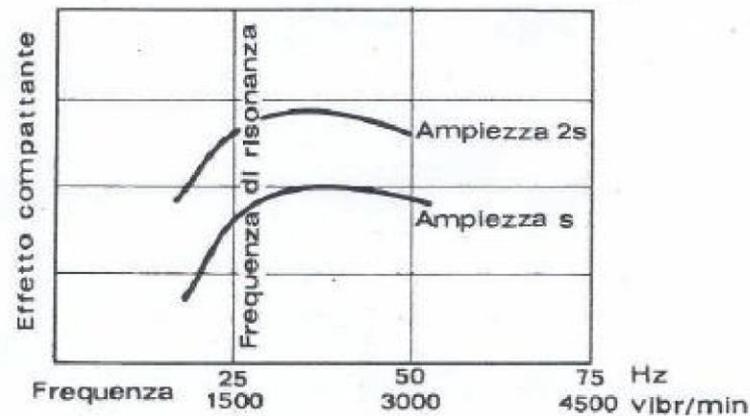


Fig.18 - Rapporto tra l'effetto compattante, la frequenza e l'ampiezza.



Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento

Teoria della compattazione

TECNOLOGIA DELLA COMPATTAZIONE

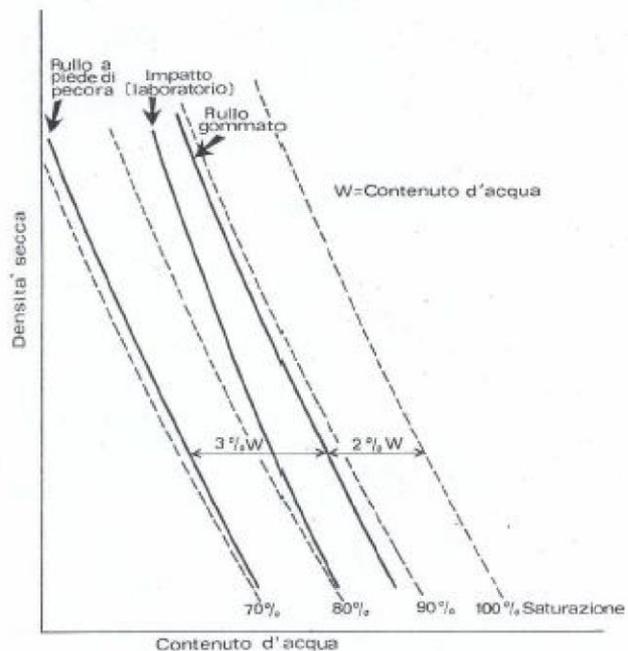


FIG.22 - POSIZIONE RELATIVA DELLE LINEE DEGLI OTTIMI - PER VARI METODI DI COMPATTAZIONE



Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento

Teoria della compattazione

TECNOLOGIA DELLA COMPATTAZIONE

Formazione di rilevati per strati compattati

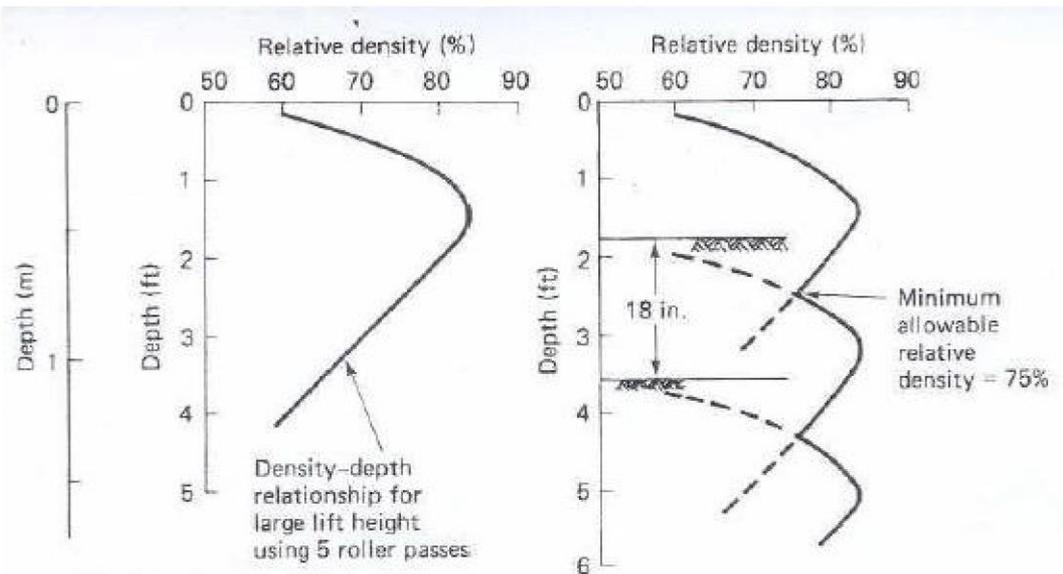


Fig. Ex. 5.2 Approximate method for determining lift height required to achieve a minimum compacted relative density of 75% with five roller passes, using data for a large lift height (after D'Appolonia, et al., 1969).



Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento
Teoria della compattazione

TECNOLOGIA DELLA COMPATTAZIONE

MACCHINE OPERATRICI DI CANTIERE: RULLI COMPATTATORI

Rulli a tamburo metallico (pressione statica e vibratoria)

Rulli a doppio tamburo metallico (pressione statica e vibratoria)

Rulli con tamburo metallico dotato di piastre (alta pressione statica)

Rulli con ruote gommate

Piastre vibranti