



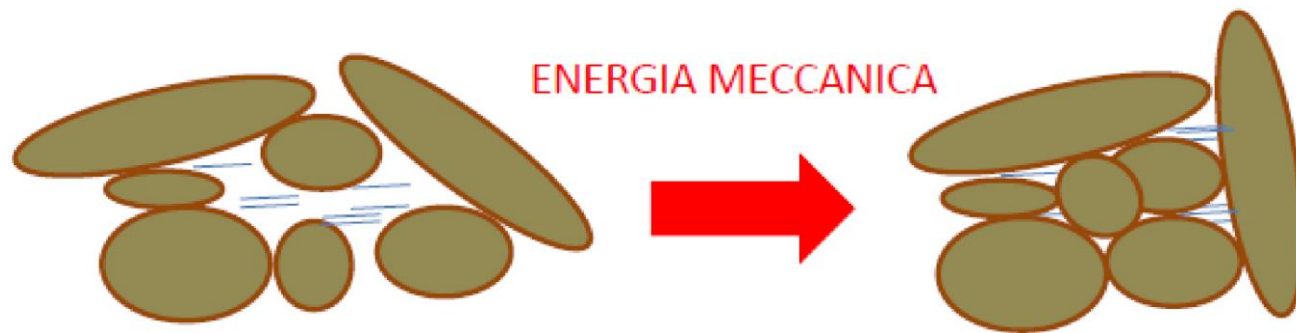
UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI FERRARA  
Dipartimento di ingegneria  
Corso di «Opere inTerra» –A.A. 2018-2019

## LEZIONE N.5 – TEORIA DELLA COMPATTAZIONE



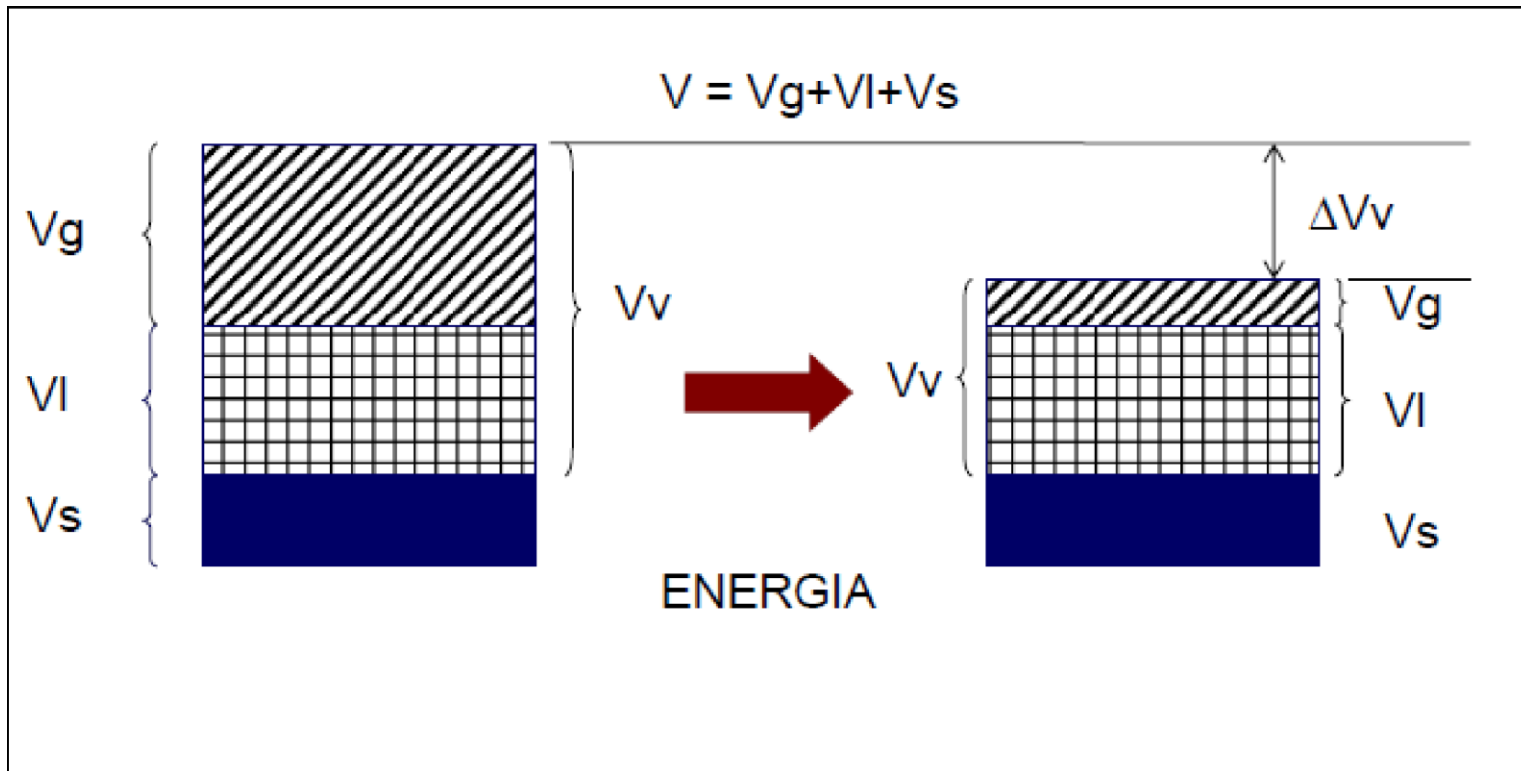
## Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento Teoria della compattazione

- 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)



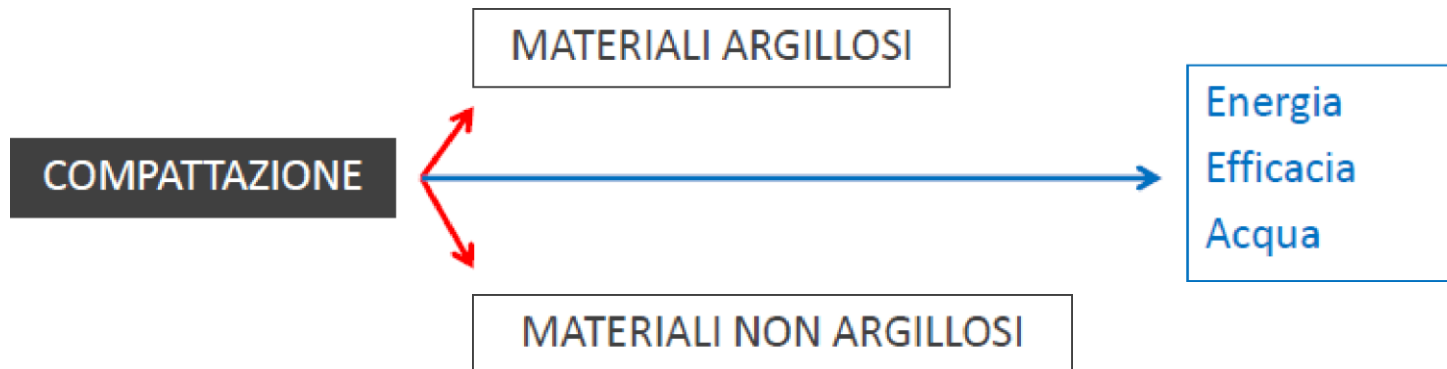
Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento  
Teoria della compattazione

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

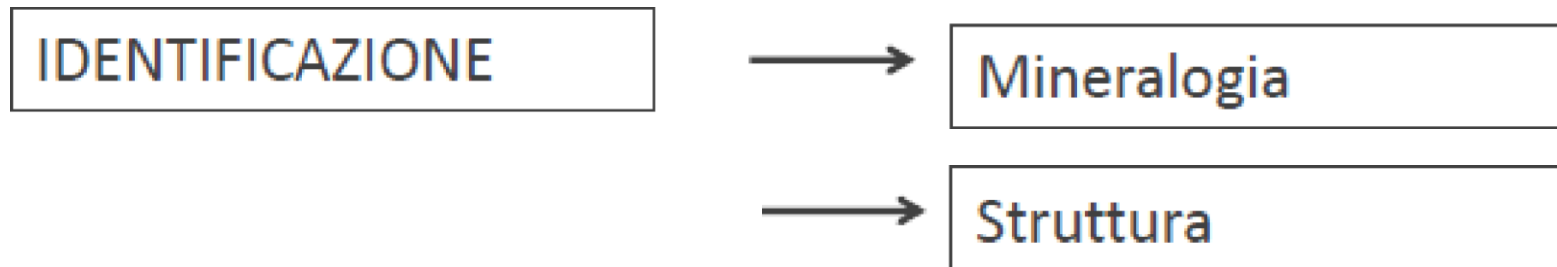


Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il  
consolidamento Teoria della compattazione





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







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/m<sup>3</sup>]



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**

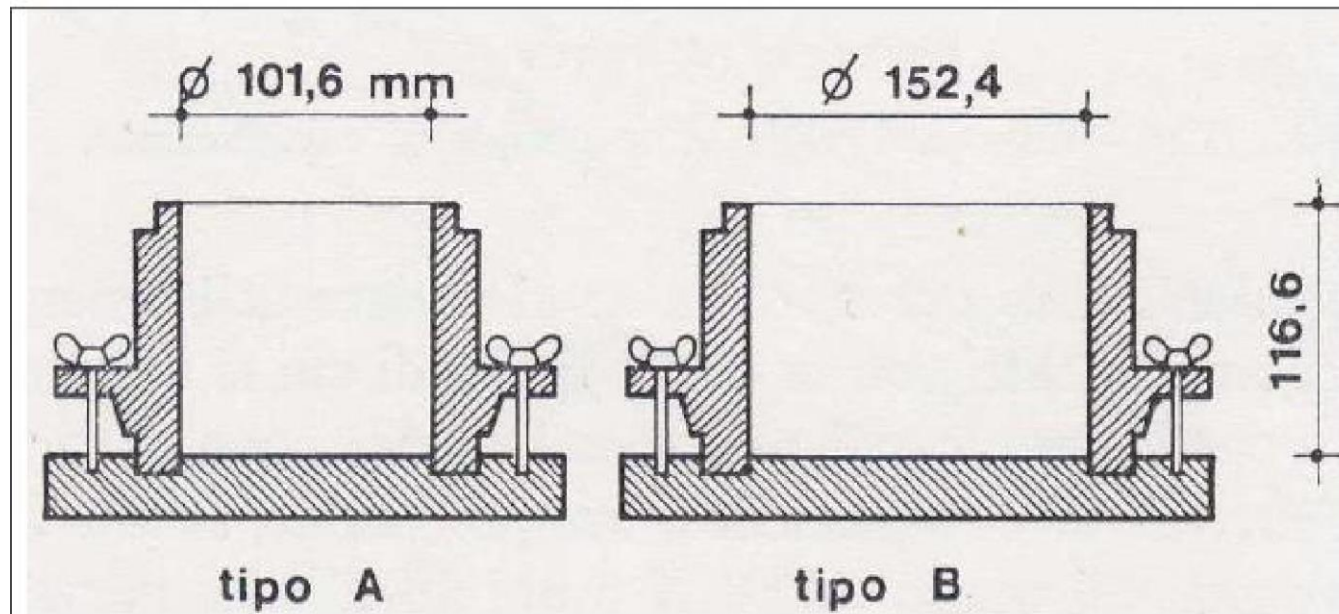
ASTM D698 – ASTM D1557

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

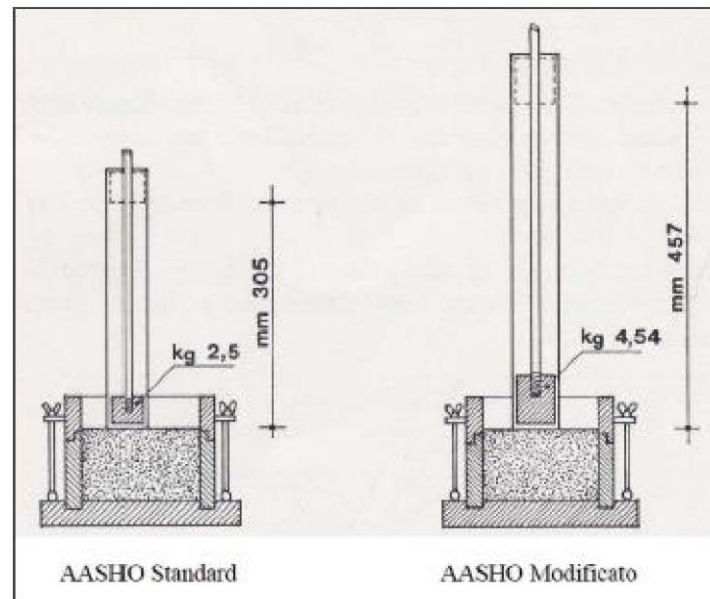




# Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento

## Teoria della compattazione

### R.R. PROCTOR





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

R.R. PROCTOR



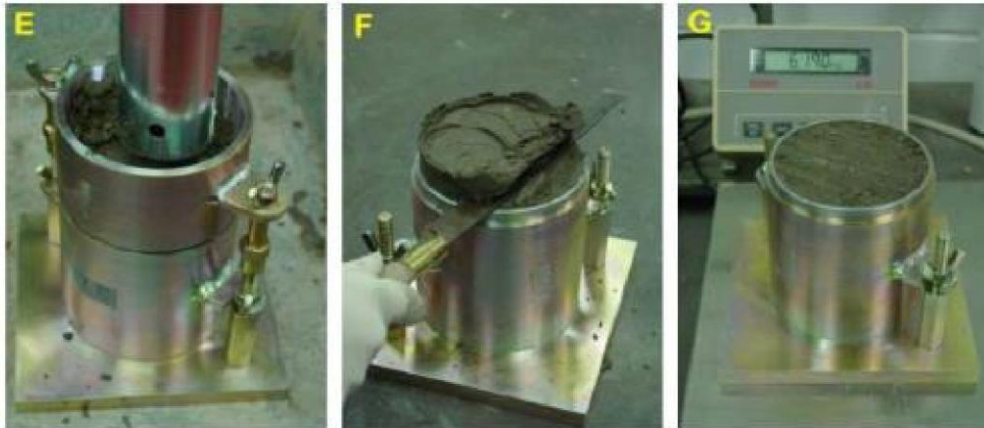
COMPATTATORE PROCTOR



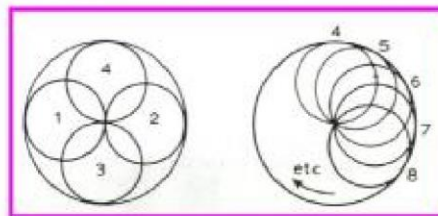
Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento

Teoria della compattazione

### R.R. PROCTOR



primi 4 colpi



colpi successivi

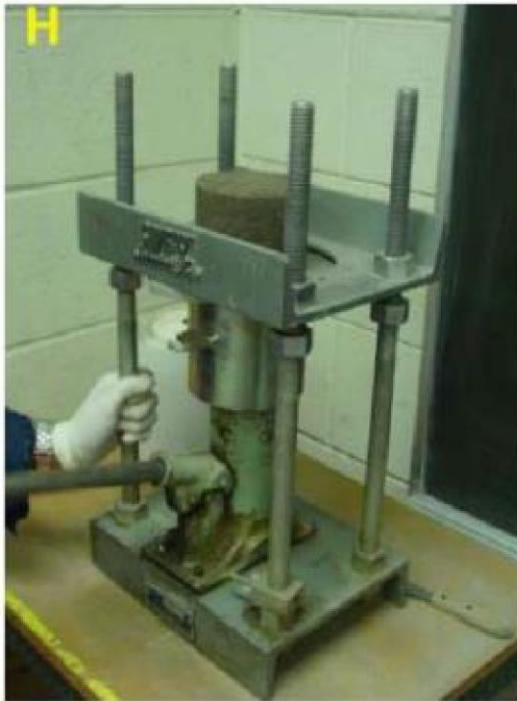
PREPARAZIONE DEI PROVINI



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

Teoria della compattazione

### R.R. PROCTOR



ESTRAZIONE DEI PROVINI

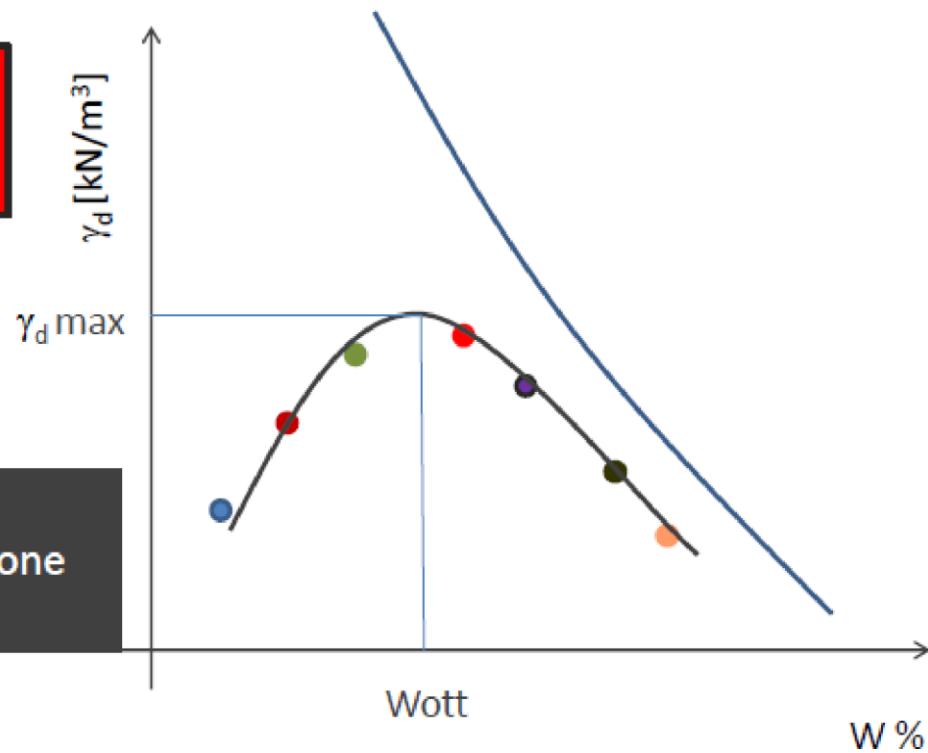


## Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento Teoria della compattazione

### R.R. PROCTOR



Stesso terreno  
Stessa energia di compattazione  
Umidità diverse



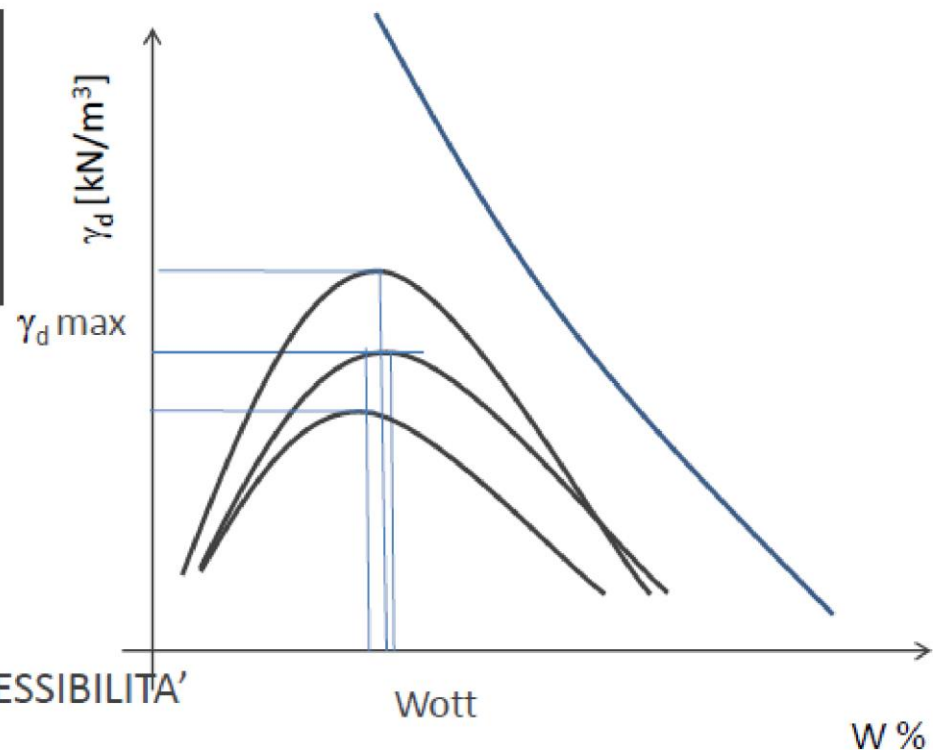


## Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento Teoria della compattazione

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

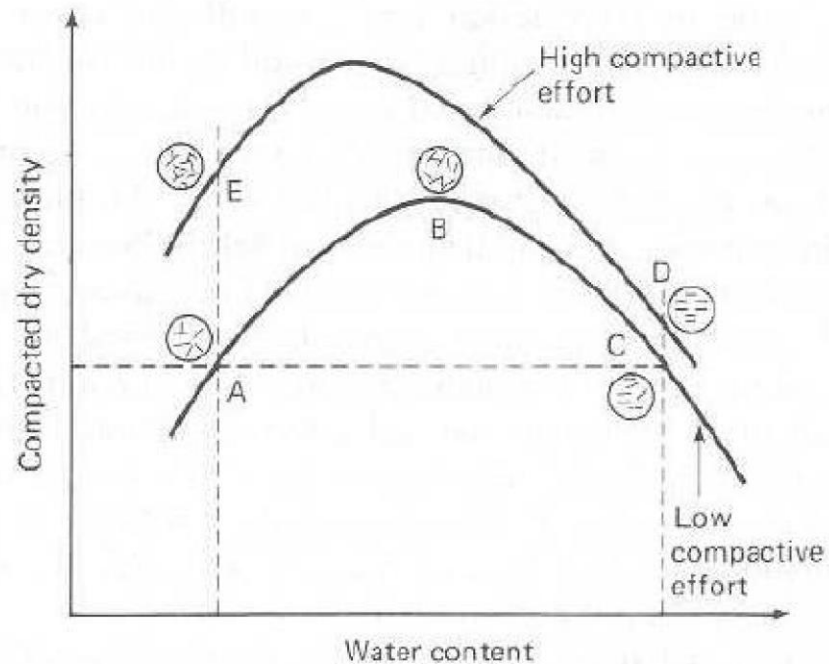


Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento

Teoria della compattazione

R.R. PROCTOR

EFFETTI DELLA COMPATTAZIONE SULLA STRUTTURA DEL TERRENO

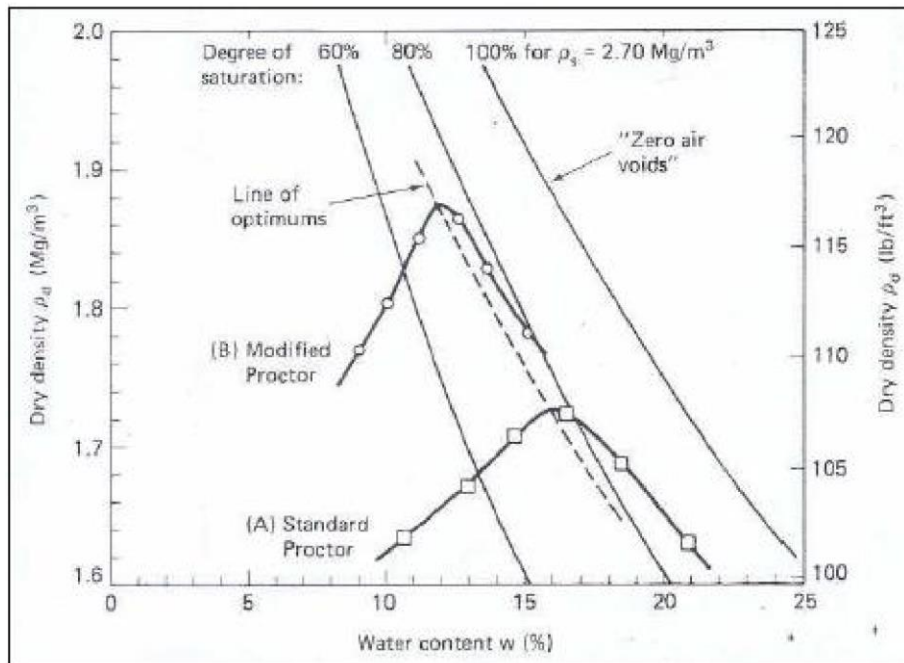




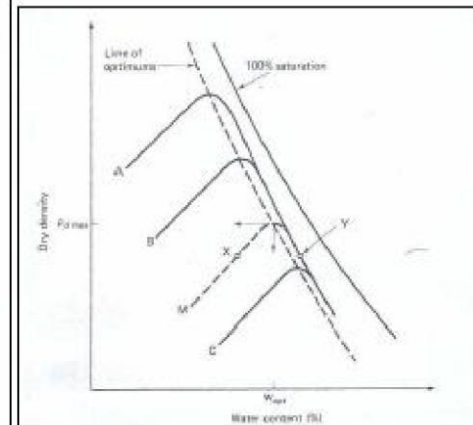


## Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento Teoria della compattazione

### STANDARD AND MODIFIED PROCTOR COMPACTION CURVES



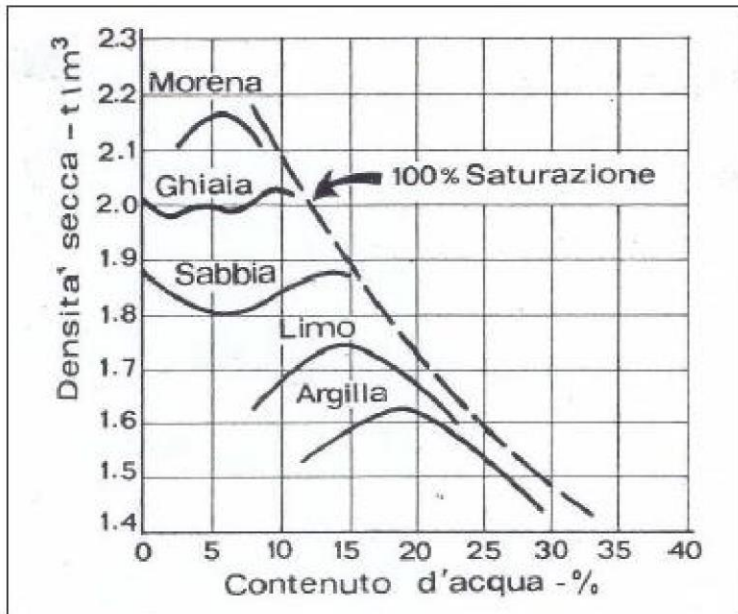
I VERTICI DELLE CURVE OTTENIBILI CON DIVERSE ENERGIE DI COMPATTAZIONE SI TROVANO LUNGO LA LINEA DEGLI OTTIMI CHE E' PRESSOCHE' PARALLELA ALLA CURVA DI SATURAZIONE





## 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.



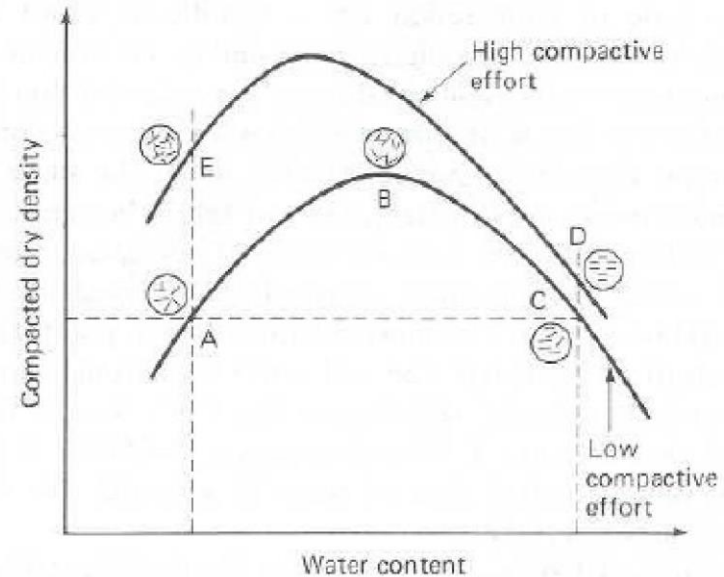
## Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento Teoria della compattazione

### 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:

$$D_r = \frac{e_{\max} - e_0}{e_{\max} - e_{\min}} * 100(\%)$$

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



## 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

**$0,5 < F < 2,0$  (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 ( $\sigma_3$ ) 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 (MESCOLOAMENTO)
- 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

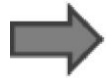


Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento  
Teoria della compattazione

## 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.



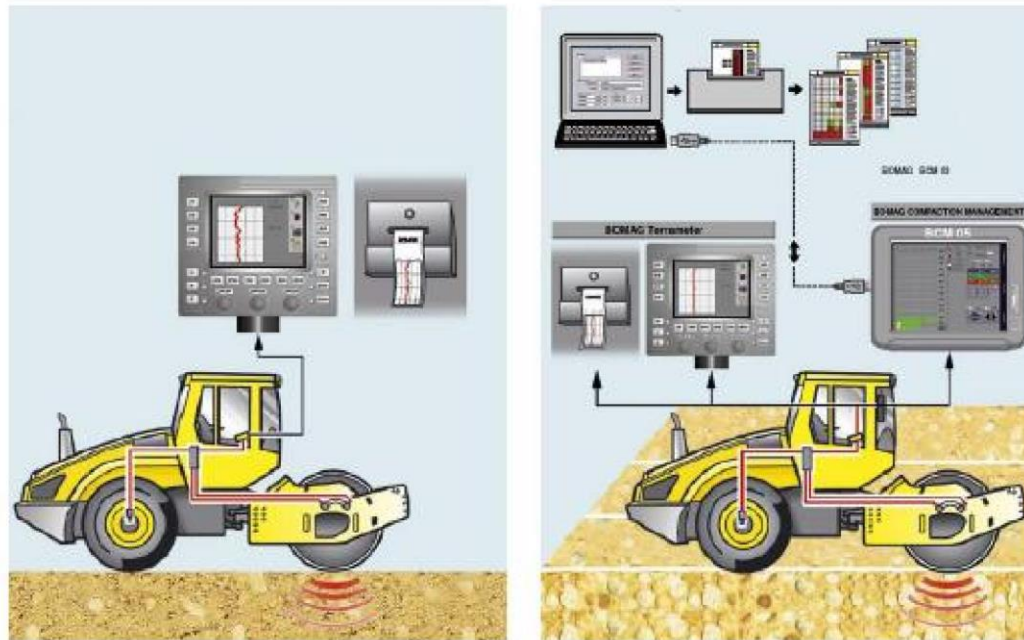
Amman (2001) Introduce il parametro di rigidezza  $k_s$





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)

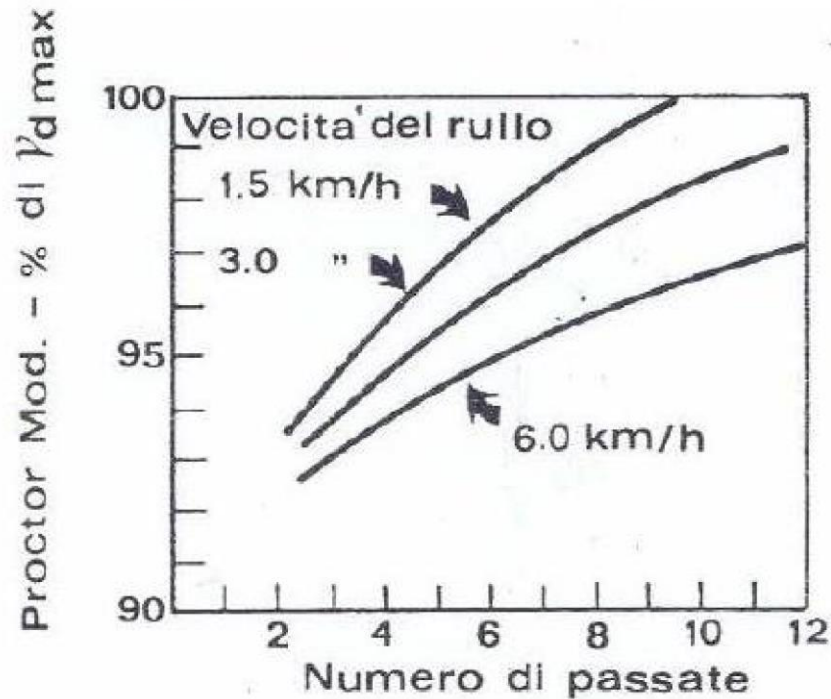


Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento

Teoria della compattazione

## TECNOLOGIA DELLA COMPATTAZIONE

VELOCITA' E NUMERO DI PASSATE DEI RULLI COMPATTATORI

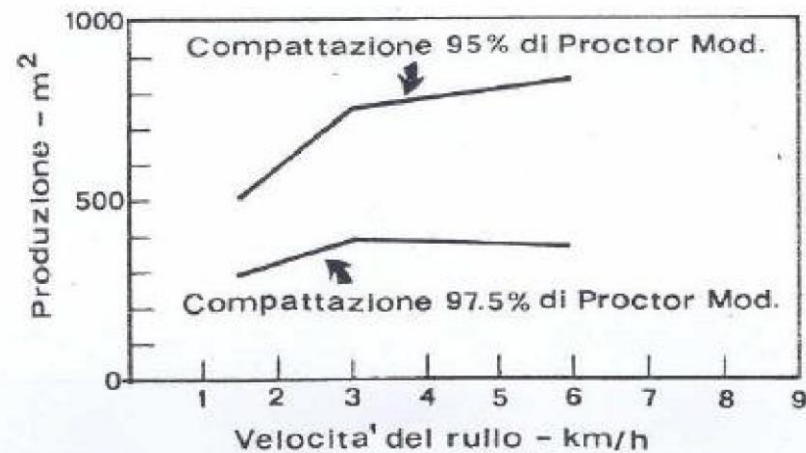




Costruzione opere in terra tal quale con azione meccanica per il consolidamento  
Teoria della compattazione

## 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

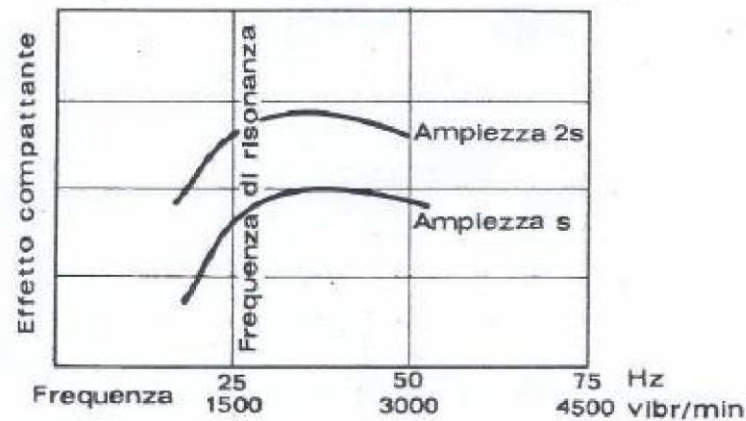


Fig.18 - Rapporto tra l'effetto compattante, la frequenza e l'ampiezza.



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

Teoria della compattazione

## TECNOLOGIA DELLA COMPATTAZIONE

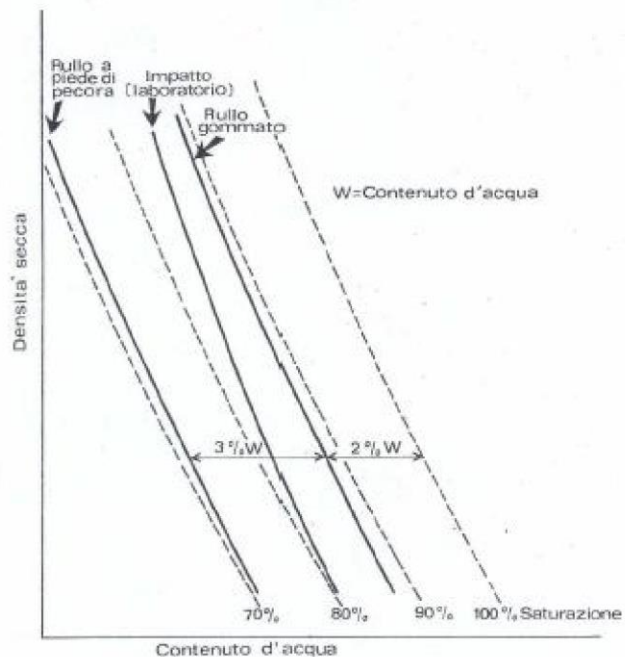


FIG.22 - POSIZIONE RELATIVA DELLE LINEE DEGLI OTTIMI - PER VARI METODI DI COMPATTAZIONE



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

Teoria della compattazione

## TECNOLOGIA DELLA COMPATTAZIONE

### Formazione di rilevati per strati compattati

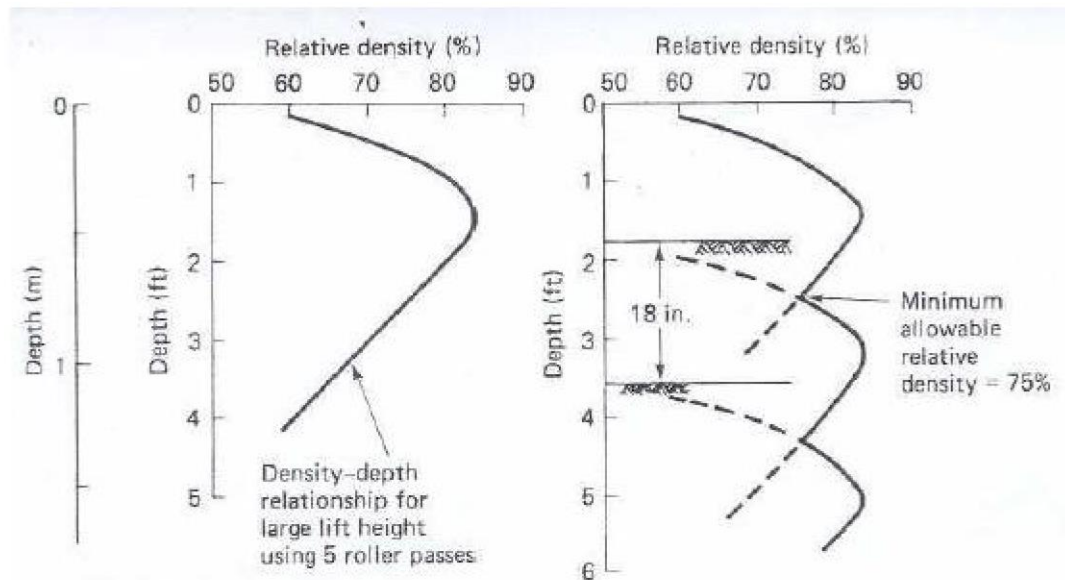


Fig. Ex. 5.2 Approximate method for determining lift height required to achieve a minimum compacted relative density of 75% with five roller passes, using data for a large lift height (after D'Appolonia, et al., 1969).



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