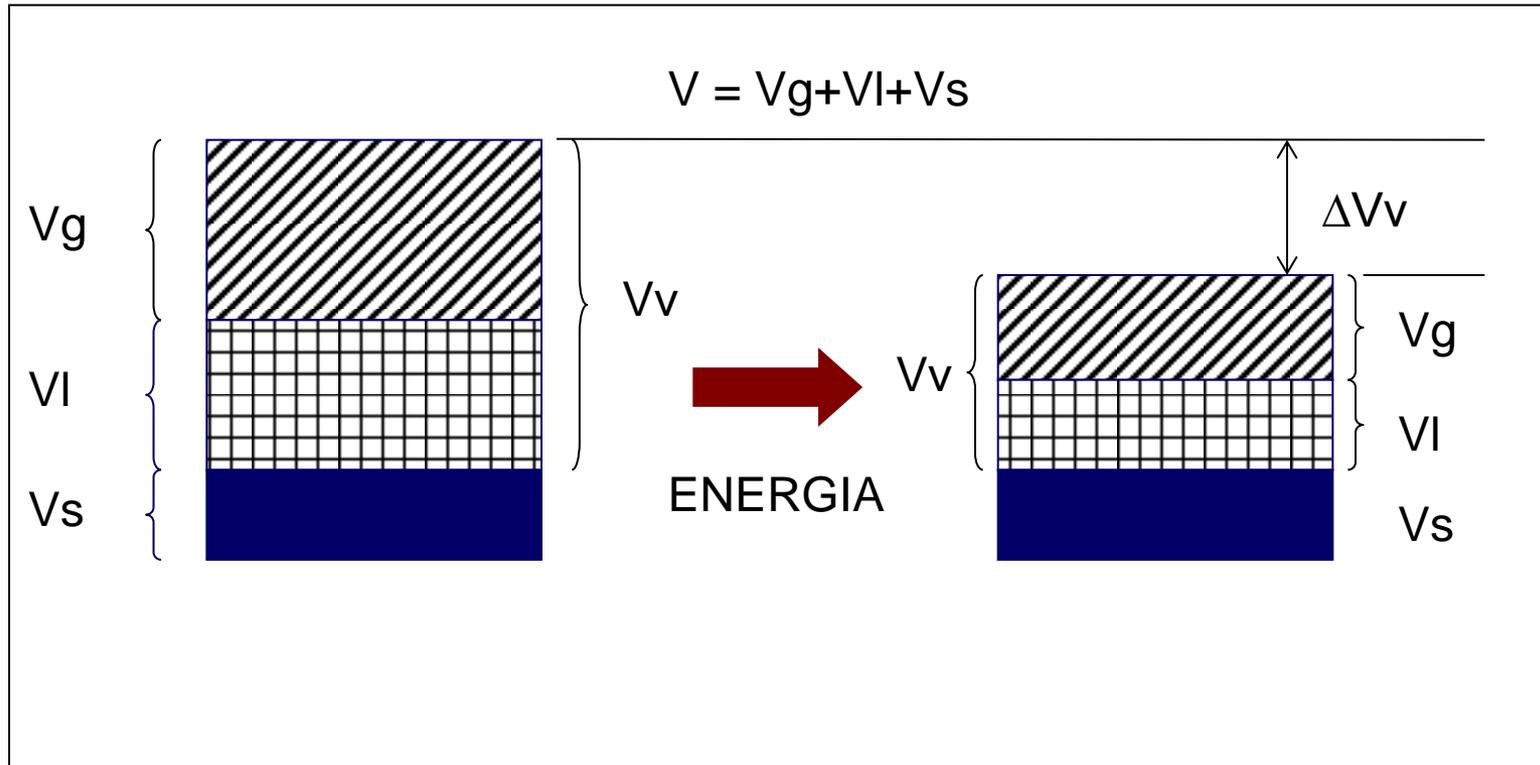


# **TEORIA DELLA COMPATTAZIONE**

# TEORIA DELLA COMPATTAZIONE

Argille: —————> Consolidamento e compattazione

Sabbie: —————> Addensamento



# **CONSOLIDAMENTO MECCANICO DELLE TERRE: COMPATTAZIONE SUPERFICIALE**

## **TEORIA DELLA COMPATTAZIONE**

La COMPATTAZIONE è l'incremento dell'addensamento del terreno attraverso la applicazione di ENERGIA MECCANICA

I TERRENI GRANULARI SONO EFFICACEMENTE COMPATTABILI CON VIBRAZIONI (ENERGIA DINAMICA)

I TERRENI FINI RICHIEDONO ALTA ENERGIA MECCANICA CON EQUIPAGGIAMENTI PARTICOLARI (SHEEPSFOOT ED ALTRI TIPI DI COMPATTATORI)

## TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE

R.R. Proctor nel 1930-1933 sviluppa il principio della compattazione in una serie di articoli pubblicati in “*Engineering News-Record*”

Proctor stabilisce che la compattazione è funzione di 4 variabili:

1. Densità secca
2. Contenuto di acqua
3. Sforzo di compattazione
4. Tipo di terra (classe, granulometria, caratteristiche fisiche, ecc.)

# TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE

## Densità secca

### Rapporto tra il peso del secco e il volume totale

(è una grandezza che dipende dal volume e che varia al variare della struttura che costituisce il volume)

$$\Gamma_d = W_s / V_t$$

## TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE

Contenuto d'acqua

$$w = \frac{W_w}{W_s} * 100(\%)$$

Grado di saturazione

$$S = \frac{V_w}{V_v} * 100(\%)$$

# TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE

## Energia di compattazione: $E$ [ $\text{J}/\text{m}^3$ ]

Energia necessaria a compattare un determinato volume di terreno in determinate condizioni di umidità.

### TIPO E METODO DI APPLICAZIONE

.Pressione statica

.Impatto

.Vibrazione

# TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE

## Tipo di terreno

### TERRENO COESIVI:

- elevata energia di compattazione
- efficacia relativa

### TERRENI GRANULARI:

- minore energia di compattazione
- elevata efficacia

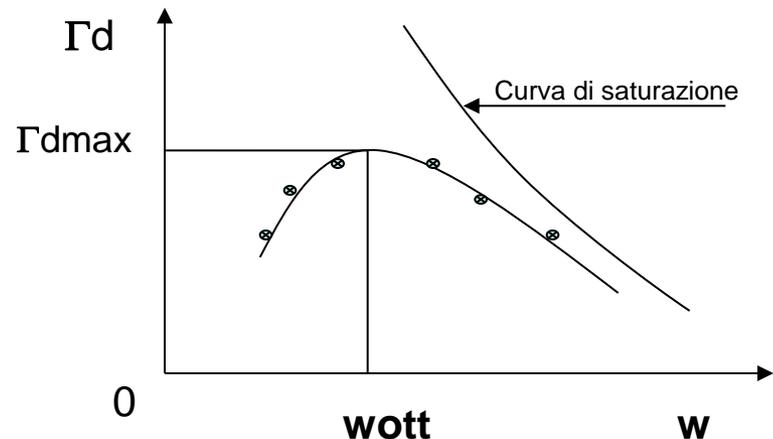
## TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE: TERRENI COESIVI

Il contenuto d'acqua nei terreni coesivi riveste un ruolo molto importante. Il diagramma di compattazione (Proctor 1933) mostra la dipendenza della densità secca massima raggiungibile per una data energia, in relazione al contenuto d'acqua.

La curva di compattazione delle argille e dei limi ha andamento tipico a campana ed il ginocchio corrispondente alla massima densità secca ad alla umidità ottimale è facilmente riconoscibile.

La classica curva a “campana” di compattazione di terreni coesivi è stata oggetto di diversi studi. AAVV hanno analizzato la curva stabilendo che essa è funzione di diverse condizioni fisiche:

- .Pressione interstiziale
- .Capillarità
- .Pressioni osmotiche
- .Permeabilità
- .Resistenza a taglio
- .Compressibilità



## TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE: TERRENI COESIVI

Qualitativamente il processo di compattazione può essere semplicemente descritto nel modo seguente:

In un terreno relativamente secco la compattazione deve vincere la adesione dovuta alle tensioni superficiali al confine tra aria e acqua dovute al fenomeno della capillarità. L'effetto che si ottiene è l'incremento della resistenza a taglio ma non si ha un addensamento sensibile.

Aumentando il contenuto d'acqua le particelle lubrificate si assestano con la compattazione ed aumenta la densità ma non altrettanto la resistenza a taglio.

Aumentando ancora il contenuto d'acqua aumenta l'indice dei vuoti con riduzione della densità

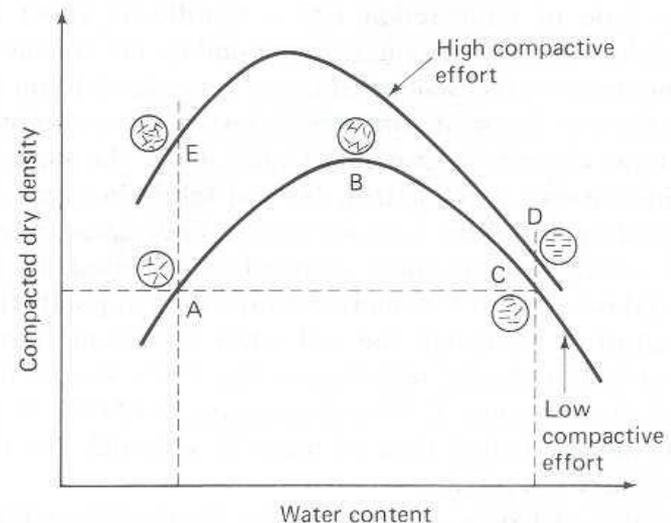


Fig. 5.5 Effect of compaction on soil structure (after Lambe, 1958a).

# TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE: TERRENI COESIVI

Non esiste un unico contenuto d'acqua ottimo per il raggiungimento della massima densità secca. Per diverse energie di compattazione si ha una umidità ottima ed una corrispondente densità secca.

Tutti i vertici delle curve ottenibili con diverse energie di compattazione si trovano lungo la linea degli ottimi che è pressoché parallela alla curva di saturazione.

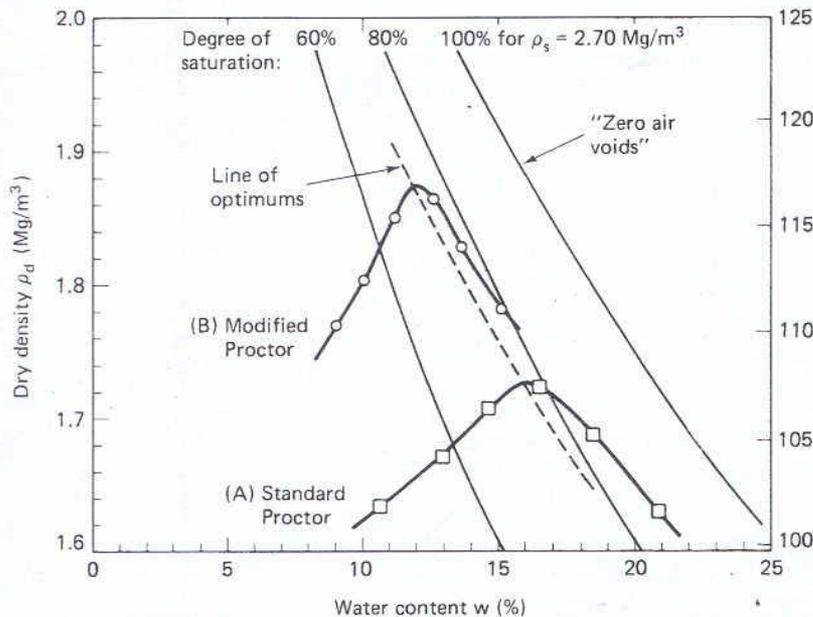


Fig. 5.1 Standard and modified Proctor compaction curves for Crosby B till.

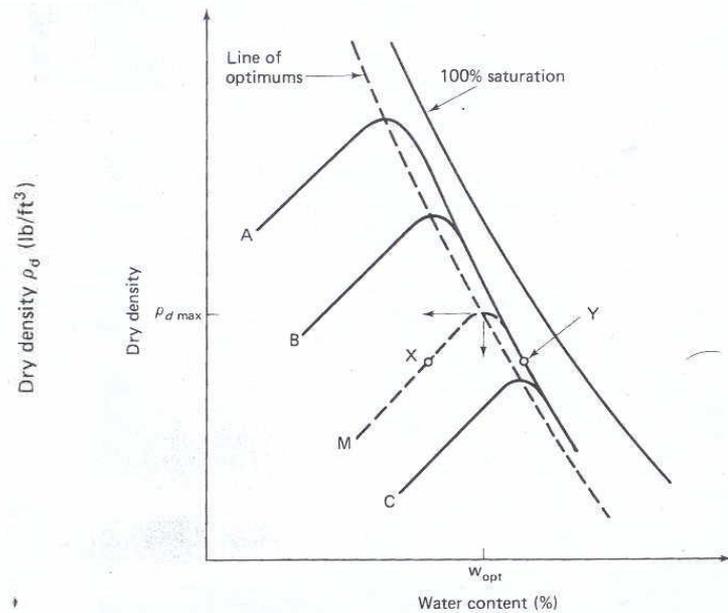


Fig. 5.25 Principle of the check point test.

## TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE: TERRENI INCOERENTI

Nei terreni incoerenti l'addensamento avviene con riduzione dei vuoti e con la espulsione di acqua interstiziale.

La curva di compattazione dei terreni incoerenti è sensibilmente diversa da quella dei terreno coesivi. Per i terreni incoerenti, infatti, si possono ottenere massimi addensamenti sia con saturazione completa sia in condizioni di assenza di acqua.

La forma relativamente piatta della curva mostra come effettivamente si possa ottenere il massimo addensamento anche in condizioni di umidità naturale del volume da compattare.

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.

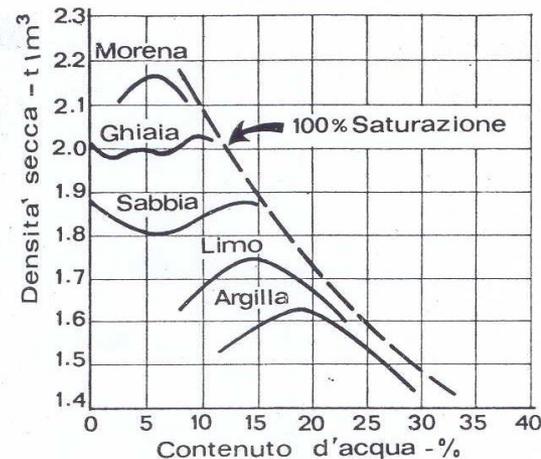


Fig. 1 - Curve di compattazione da prove di laboratorio.

# TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE: CENNI SU LE CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE DEI TERRENI COMPATTATI: TERRENI COESIVI

La compattazione comporta un addensamento dei terreni e una relativa variazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche

La struttura del terreno compattato rappresenta un termine qualitativo per la compattazione delle argille.

Gli stati in cui si presenta la argilla sono:

Stato flocculato

Stato disperso

Stato casuale

Il tipo di struttura che si ottiene con la compattazione dipende dal contenuto di acqua, dallo sforzo di compattazione, dal tipo di compattazione

# TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE: CENNI SU LE CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE DEI TERRENI COMPATTATI: TERRENI COESIVI

LA COMPATTAZIONE AL SECCO DELL'OTTIMO DETERMINA UNA STRUTTURA FLOCCULATA

LA COMPATTAZIONE ALL'UMIDO DELL'OTTIMO DETERMINA UNA STRUTTURA DISPERSA FINO A STRUTTURA ORIENTATA

LA COMPATTAZIONE ESEGUITA CON PRESSIONE STATICA COMPORTA UNA MODESTA DISPERSIONE ALL'UMIDO DELL'OTTIMO

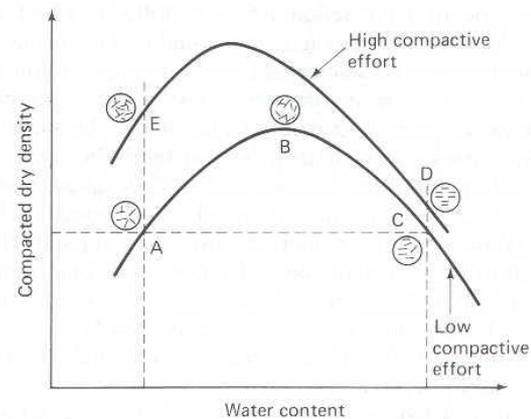


Fig. 5.5 Effect of compaction on soil structure (after Lambe, 1958a).

# TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE: CENNI SU LE CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE DEI TERRENI COMPATTATI: TERRENI COESIVI

## METODO DI COMPATTAZIONE

Il fattore discriminante tra un sistema e l'altro consiste nella deformazione per taglio applicato al volume di terreno da compattare.

Il terreno coesivo tende a mantenere la struttura flocculata che corrisponde ad una condizione con energia potenziale minore. Per raggiungere la configurazione di struttura dispersa occorre applicare molta energia come avviene per esempio con la applicazione per punti sotto i piedi di rulli compattatori particolari.

Con i rulli statici si possono ottenere le seguenti condizioni estreme:

- .Pressione statica
- .Compattazione con rimescolamento



# TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE: CENNI SU LE CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE DEI TERRENI COMPATTATI: TERRENI COESIVI

## DA ALCUNI STUDI CONDOTTI DA AAVV

Campioni sottoposti a compressione non confinata presentano, se preparati al secco dell'ottimo, un comportamento fragile e sono più resistenti dei campioni preparati all'umido dell'ottimo.

La resistenza rimane invariata nel caso di prove non drenate ma diminuisce il comportamento fragile nei campioni preparati all'umido dell'ottimo.

Campioni soggetti a prove consolidate e non drenate esibiscono curve sforzi-deformazioni molto simili e indipendenti dal contenuto d'acqua con cui sono preparati i campioni.

Da queste analisi appare come migliorativa la compattazione al secco dell'ottimo.

**E' importante notare che la resistenza di un terreno che viene saturato dopo la compattazione è inferiore a prima della saturazione.**

**TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE:**  
**CENNI SU LE CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE DEI TERRENI**  
**COMPATTATI: TERRENI INCOERENTI**

**I TERRENI INCOERENTI SONO RELATIVAMENTE PERMEABILI ANCHE ALLO STATO**  
**COMPATTATO**

LE CARATTERISTICHE DEI TERRENI INCOERENTI NON SONO MOLTO  
INFLUENZATE DAL CONTENUTO D'ACQUA  
*(VA CONSIDERATA COMUNQUE LA COESIONE APPARENTE COME FATTO  
ECCEZIONALE).*

LA CARATTERISTICA CURVA A CAMPANA RELATIVA ALLA COMPATTAZIONE DEI  
TERRENI COESIVI NON E' DEFINITA PER I TERRENI INCOERENTI O NON ESISTE.

CON UNA DETERMINATA ENERGIA SI PUO' RAGGIUNGERE LA MASSIMA DENSITA'  
SIA IN CONDIZIONI DI TERRENO SECCO SIA IN CONDIZIONI DI TERRENO  
SATURO.

## TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE: CENNI SU LE CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE DEI TERRENI COMPATTATI: TERRENI INCOERENTI

In condizioni di terreno secco o completamente saturo non si ha il fenomeno della capillarità che invece si può presentare in condizioni di terreno parzialmente saturo.

La capillarità è responsabile di una **coesione apparente** dovuta alle tensioni superficiali. Tale coesione rende più difficile la compattazione richiedendo maggiore energia per ottenere il massimo addensamento.

Queste condizioni non sono presenti nei terreni secchi o completamente saturi.

Nel caso dei terreni incoerenti non è possibile utilizzare i diagrammi Proctor, pertanto ci si deve affidare alla nota relazione di Terzaghi.

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

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

# TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE: CENNI SU LE CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE DEI TERRENI COMPATTATI: TERRENI INCOERENTI

RESTANO, COME NOTO, ALCUNE DIFFICOLTA' NELLA DETERMINAZIONE DELLA DENSITA' RELATIVA DEI TERRENI MEDIANTE PROVE DI LABORATORIO. CI SI AFFIDA A PROVE IN SITO, COME PER ESEMPIO LE PROVE SPT, LE CPT, LA SISMICA.

PER DEFINIRE IL GRADO DI ADDENSAMENTO DI UNA SABBIA CI AFFIDIAMO ALLA 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':

$$F = \frac{e_{\max} - e_{\min}}{e_{\min}}$$

**TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE:**  
**CENNI SU LE CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE DEI TERRENI**  
**COMPATTATI: TERRENI INCOERENTI**

I MATERIALI BEN GRADATI SONO BEN ADDENSABILI

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.

**TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE:**  
**CENNI SU LE CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE DEI TERRENI**  
**COMPATTATI: TERRENI INCOERENTI**

**INFLUENZA DEL CRITERIO DI COMPATTAZIONE**

**La compattazione vibratorio risulta superiore a qualsiasi metodo statico di applicazione della energia**

**La compattazione vibratorio riduce l'attrito tra le particelle e permette loro di risistemarsi in condizione di maggiore addensamento**

**UNA VIBRAZIONE ADEGUATA DEVE ESSERE IN GRADO DI:**

**Agire fino al limite inferiore dello strato di terreno da addensare con il processo di compattazione (**AMPIEZZA**)**

**Dare il tempo ai grani di terra di potersi muovere (**FREQUENZA**) (vibrazione imposta).**

**TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE:**  
**CENNI SU LE CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE DEI TERRENI**  
**COMPATTATI: TERRENI INCOERENTI**

**FATTORI IMPORTANTI PER LA COMPATTAZIONE:**

**PESO STATICO DEL MEZZO**

(maggiore peso, maggiore efficacia – 18÷22t)

**FREQUENZA E AMPIEZZA**

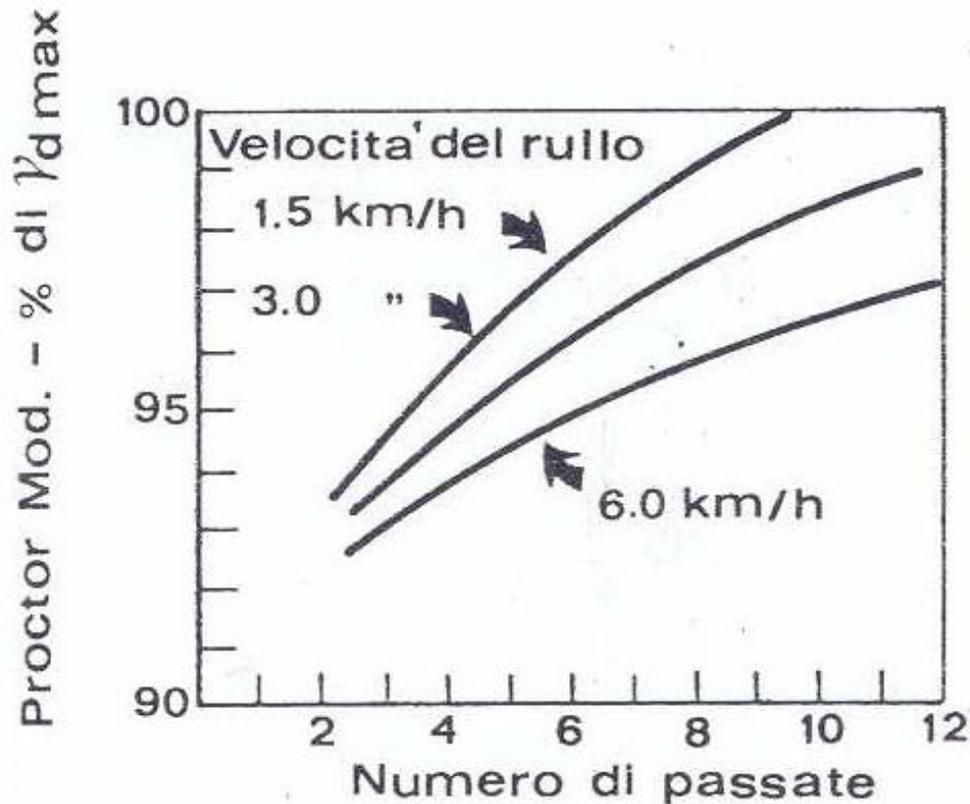
(Maggiore effetto con frequenze comprese tra 25 e 50 Hz  
(1500 e 3000 vibr/min))

**VELOCITA' DEL RULLO COMPATTATORE**

(Velocità ottimali comprese tra 3 e 6 km/h)

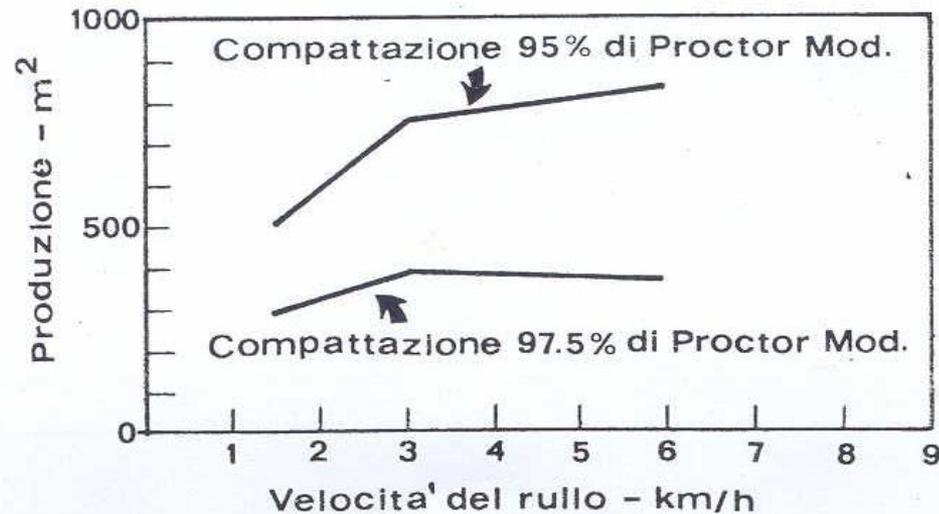
**TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE:**  
**CENNI SU LE CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE DEI TERRENI**  
**COMPATTATI: TERRENI INCOERENTI**

**FATTORI IMPORTANTI PER LA COMPATTAZIONE:**



**TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE:**  
**CENNI SU LE CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE DEI TERRENI**  
**COMPATTATI: TERRENI INCOERENTI**

**FATTORI IMPORTANTI PER LA COMPATTAZIONE:**



# TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE: CENNI SU LE CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE DEI TERRENI COMPATTATI: TERRENI INCOERENTI

## FATTORI IMPORTANTI PER LA COMPATTAZIONE:

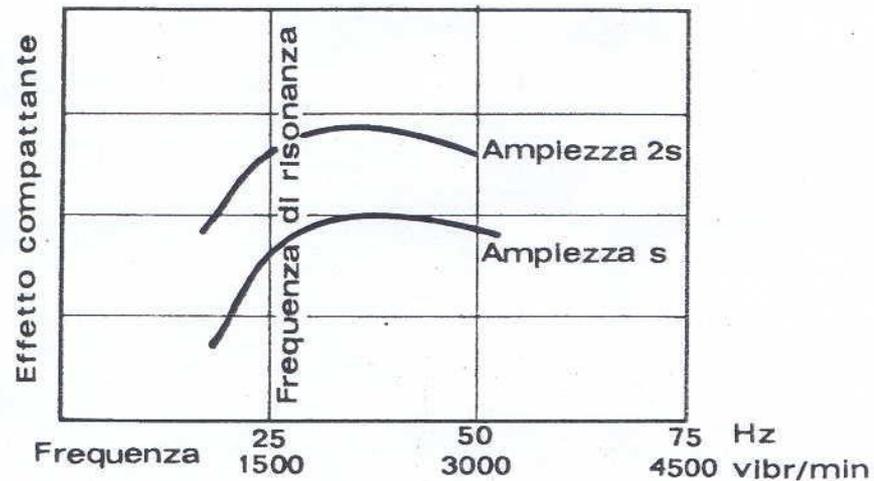


Fig.18 - Rapporto tra l'effetto compattante, la frequenza e l'ampiezza.

# TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE: CENNI SUI METODI DI COMPATTAZIONE

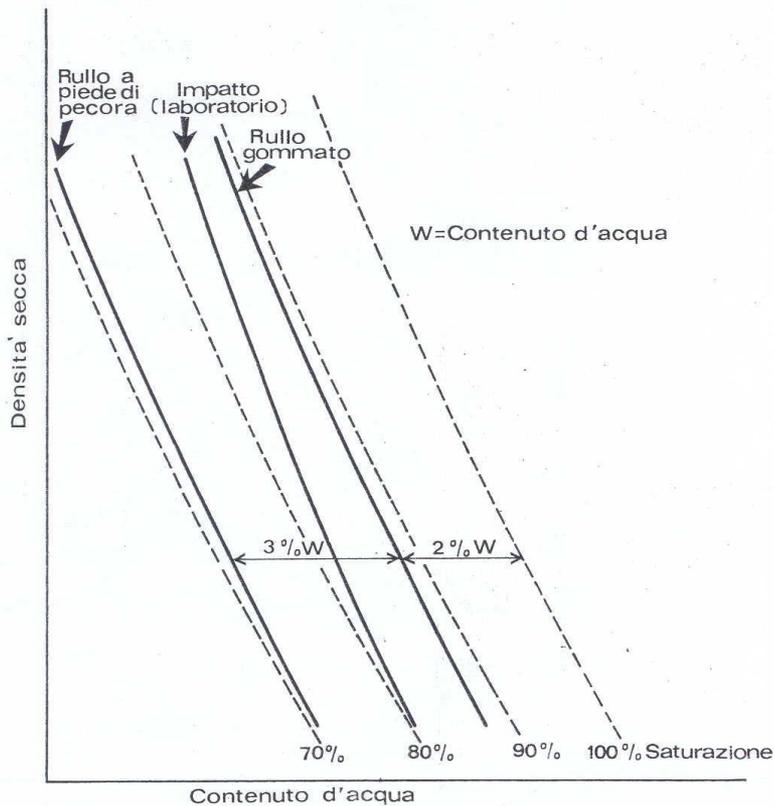


FIG.22 - POSIZIONE RELATIVA DELLE «LINEE DEGLI OTTIMI» PER VARI METODI DI COMPATTAZIONE

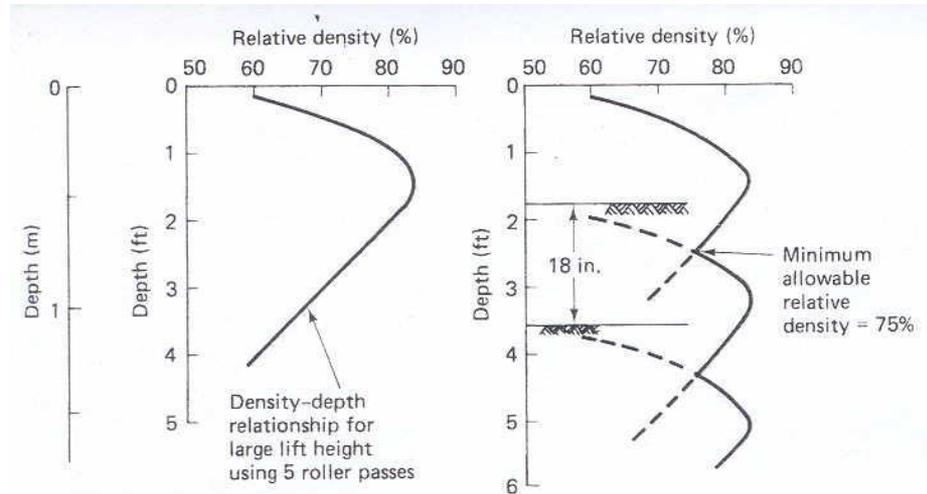


Fig. Ex. 5.2 Approximate method for determining lift height required to achieve a minimum compacted relative density of 75% with five roller passes, using data for a large lift height (after D'Appolonia, et al., 1969).

Formazione di rilevati per strati compattati

# TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE: PRESSIONE ORIZZONTALE ALL'INTERNO DEL RIORTO COMPATTATO

## $K_0$

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 ( $\bar{\sigma}_3$ ) 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

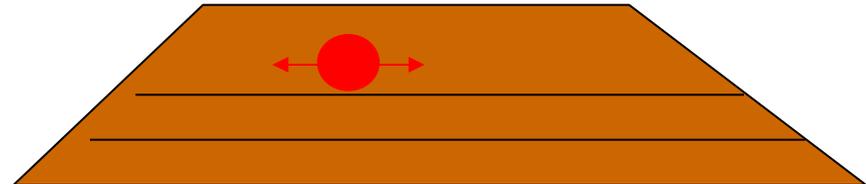
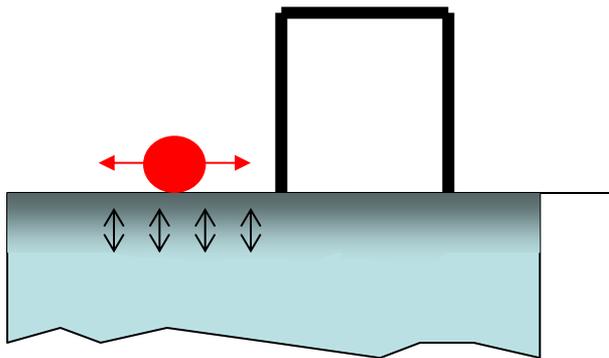
# TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE: APPLICAZIONI

Opere stradali, autostradali e ferroviarie, aeroportuali

Opere marittime e fluviali

Rilevati strutturali

Opere ambientali (discariche, bonifiche)



# TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE: CENNI SU LE CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE DEI TERRENI COMPATTATI: TERRENI INCOERENTI

## MACCHINE OPERATRICI DI CANTIERE: RULLI COMPATTATORI

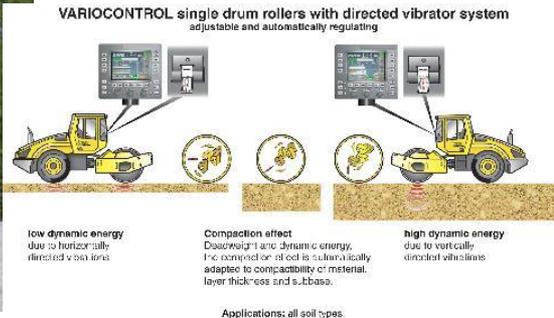
Rulli a tamburo metallico (pressione statica e vibratoria)

Rulli a doppio tamburo metallico (pressione statica e vibratoria)

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

Rulli con ruote gommatae

Piastre vibranti



## TEORIA DELLA COMPATTAZIONE SUPERFICIALE: LE PROVE DI COMPATTAZIONE STANDARD IN LABORATORIO

Le prove di compattazione in laboratorio sono tentativi per riprodurre in piccola scala l'effetto della compattazione in campo ma sono anche un valido elemento di controllo delle attività e delle operazioni di cantiere.

- Prove di compattazione AASHO Standard
  - Prove di compattazione AASHO Modificata
  - Densità relativa } ASTM D2049
  - Bureau Reclamation Standard USA
  - Army Corps of Engineers USA
  - British standard BS 1377
  - German Standard Din 18127
  - PROVA CBR (in laboratorio) } Norma CNR-UNI N.10009-1964
- } Norma CNR n.69-1978  
ASTM D698 – ASTM D1557

## TEORIA DELLA COMPATTAZIONE : LE PROVE DI COMPATTAZIONE STANDARD IN CAMPO

Le prove in sito sono indispensabili per il collaudo delle opere eseguite con particolare riferimento ai requisiti specifici che si devono ottenere.

- Prova di densità in sito → grado di addensamento
- Prova CBR in sito → consistenza, portanza
- Prova di carico con piastra → portanza e modulo di deformazione
- Prova penetr. statica o dinamica → (grado di addensamento e consistenza)
- Prova con ago di Proctor → (consistenza)
- Prove sismiche Sasw (addensamento, consistenza - omogeneità)
- Prove di permeabilità → (riduzione dell'indice dei vuoti-permeabilità < 9)

# CONSOLIDAMENTO MECCANICO DELLE TERRE: COMPATTAZIONE SUPERFICIALE

## Cenni bibliografici di riferimento per il corso

- R. Lancellotta, “Elementi di Geotecnica” -Zanichelli Ed.
- Holtz R.D., Kovacs W.D., “An introduction to geotechnical engineering” - Prentice Hall Ed.
- Hegg U., Laterza G., “Rapporti strutturali” - Atti Politecnico Torino.
- A. Mazzuccato, “Aspetti geotecnici nella progettazione e della costruzione di rilevati stradali e ferroviari”, CISM Ed.
- SISMG Comité ETS11, “Le compactage des sols et des matériaux granulaires” - LCPC Ed.
- Appunti del Corso di Strade della Università di Ingegneria di Ferrara