

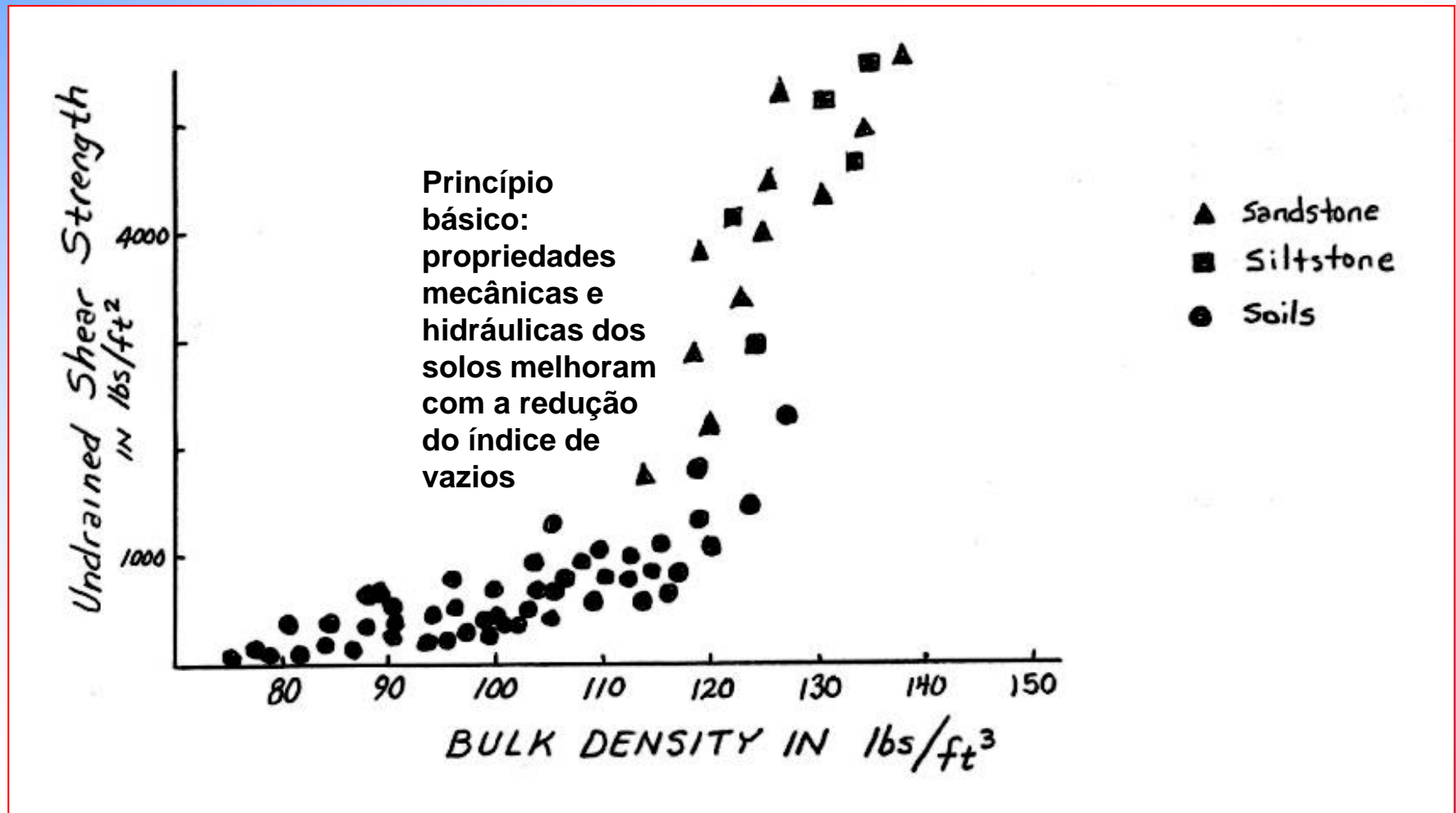
# COMPACTAÇÃO DOS SOLOS

Fernando A. M. Marinho (2012)

Waldemar Hachich (2021)

# **OBJETIVOS DA COMPACTAÇÃO**

# Por que Compactar os Solos?



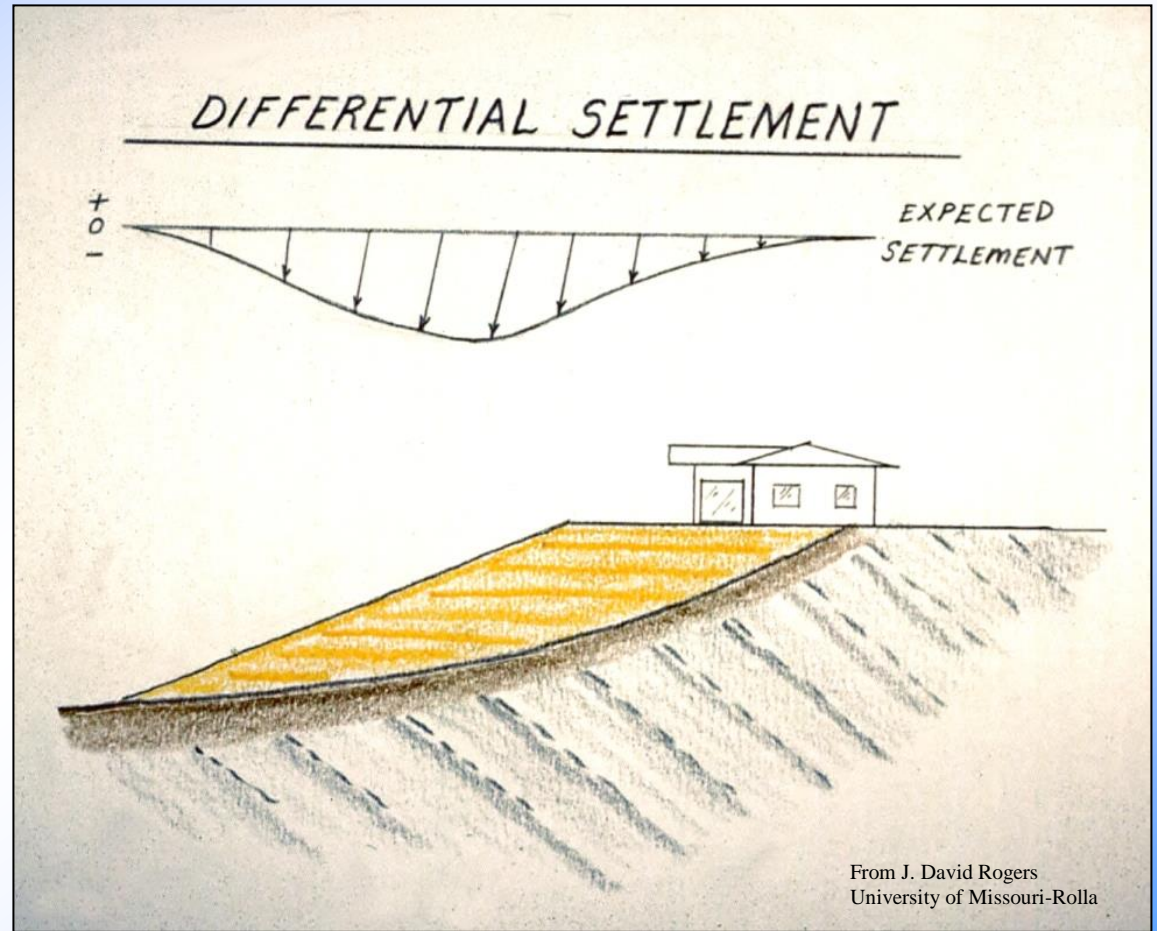
# Objetivos da Compactação

- Uniformizar o solo como material de construção.
- Aumentar a resistência e, conseqüentemente, a capacidade de suporte do solo e a estabilidade de taludes, por exemplo.
- Diminuir ou controlar a variação de volume, aumentando ou reduzindo a rigidez para reduzir recalques indesejados ou outros efeitos indesejados nas estruturas (trincas, efeito silo, etc.).
- Reduzir ou controlar a condutividade hidráulica.

# Capacidade Suporte



# Recalques Diferenciais



# Efeito silo

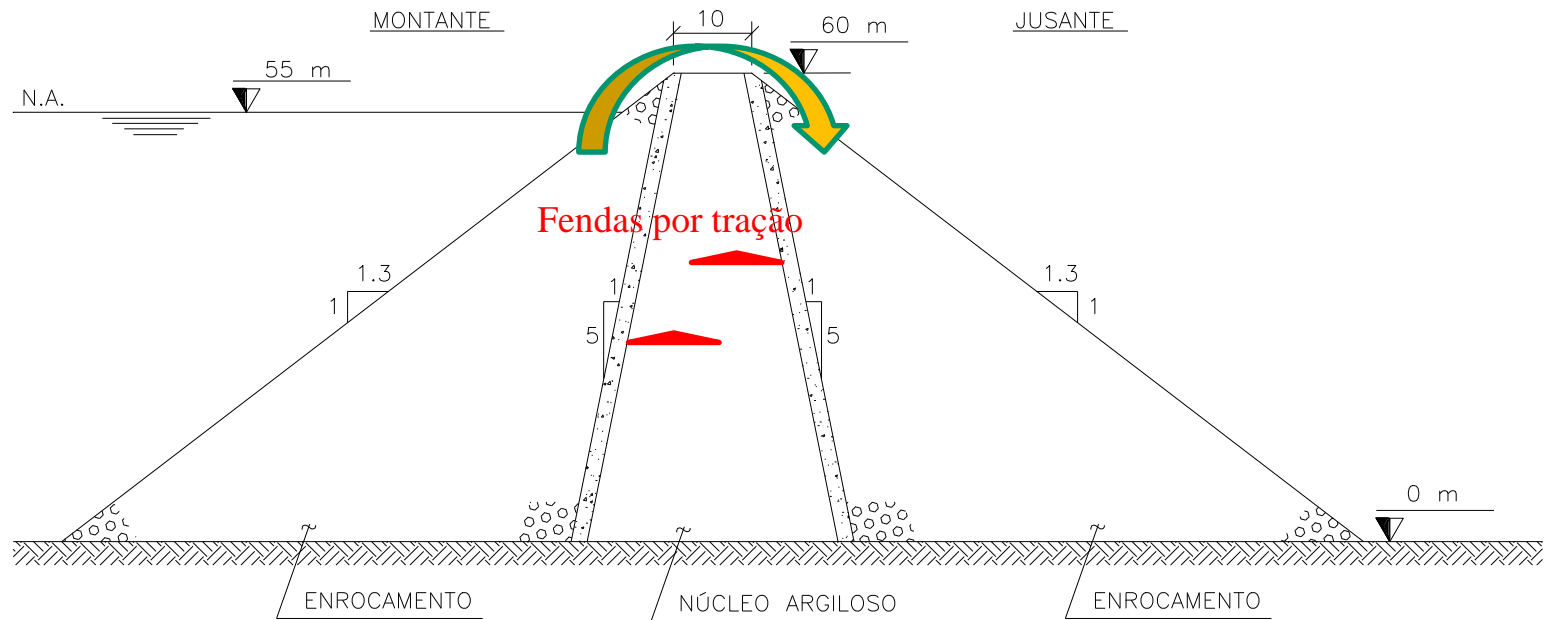


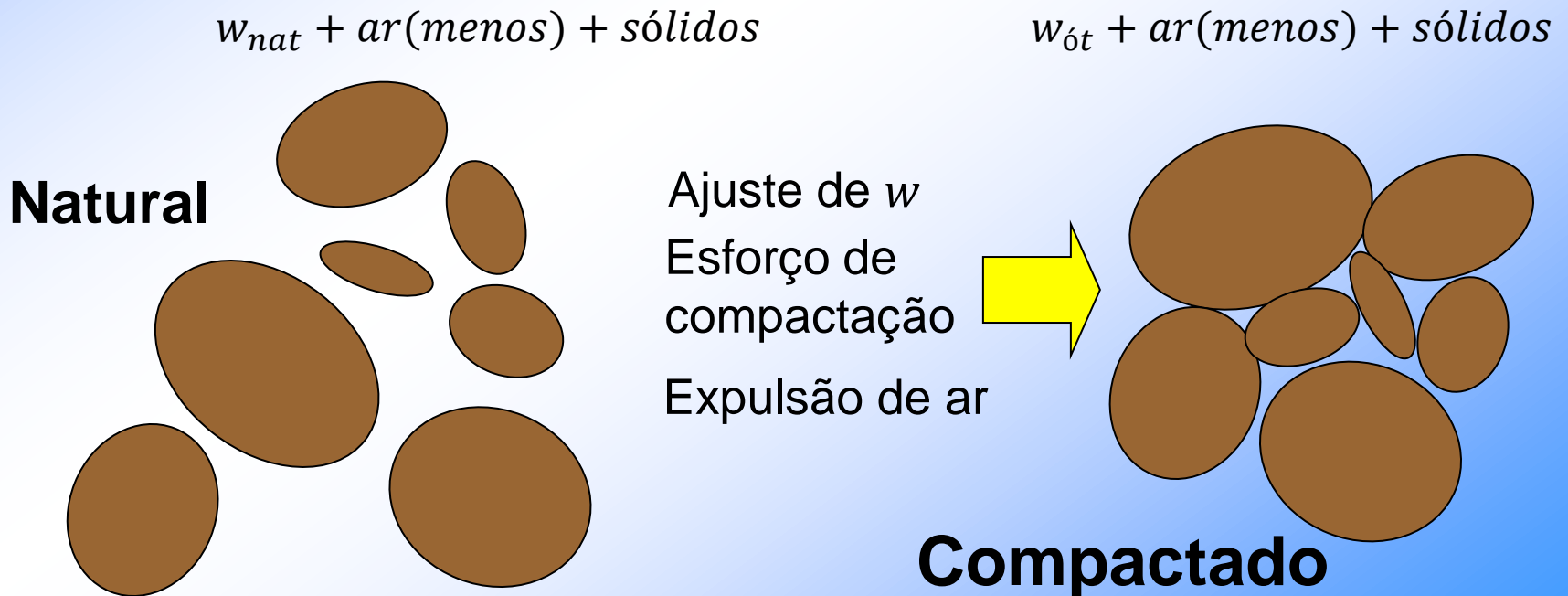
FIGURA 2 – Barragem de Terra – Enrocamento  
esc. 1:100

# FUNDAMENTOS DA COMPACTAÇÃO



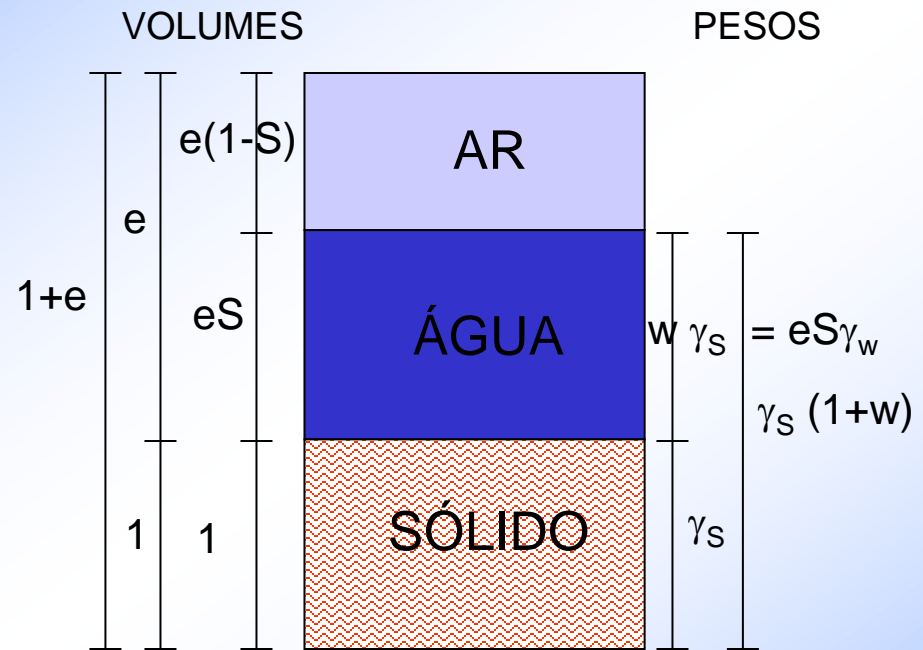
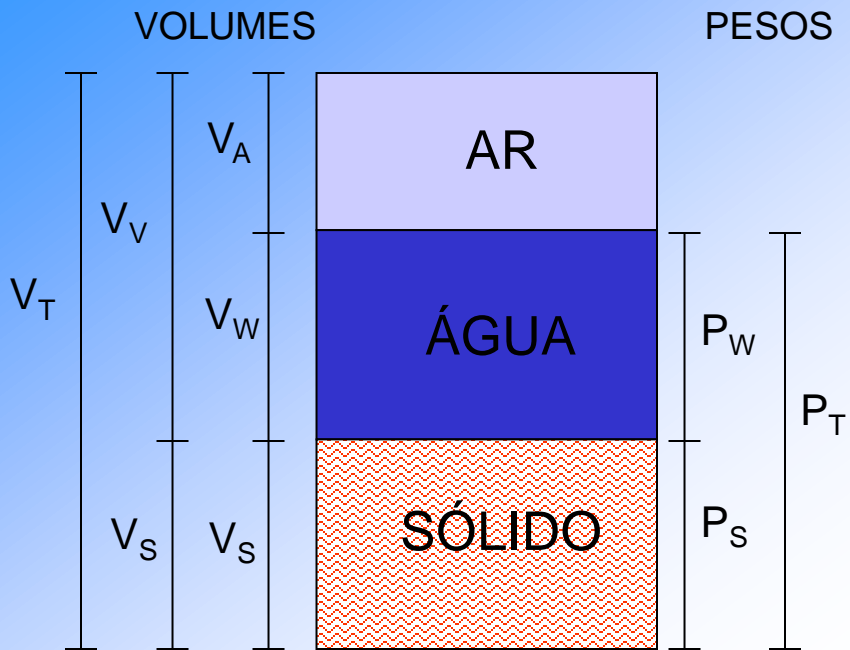
# O que é Compactação?

*É uma técnica de melhoramento do solo, onde o solo é densificado pela aplicação de um esforço externo. O índice de vazios é reduzido pela saída de ar.*



# Fatores que Controlam a Compactação

1. Tipo de solo e distribuição granulométrica.
2. Energia de compactação.
3. Umidade (especificada e controlada).
4. Peso específico aparente seco (especificado e controlado).



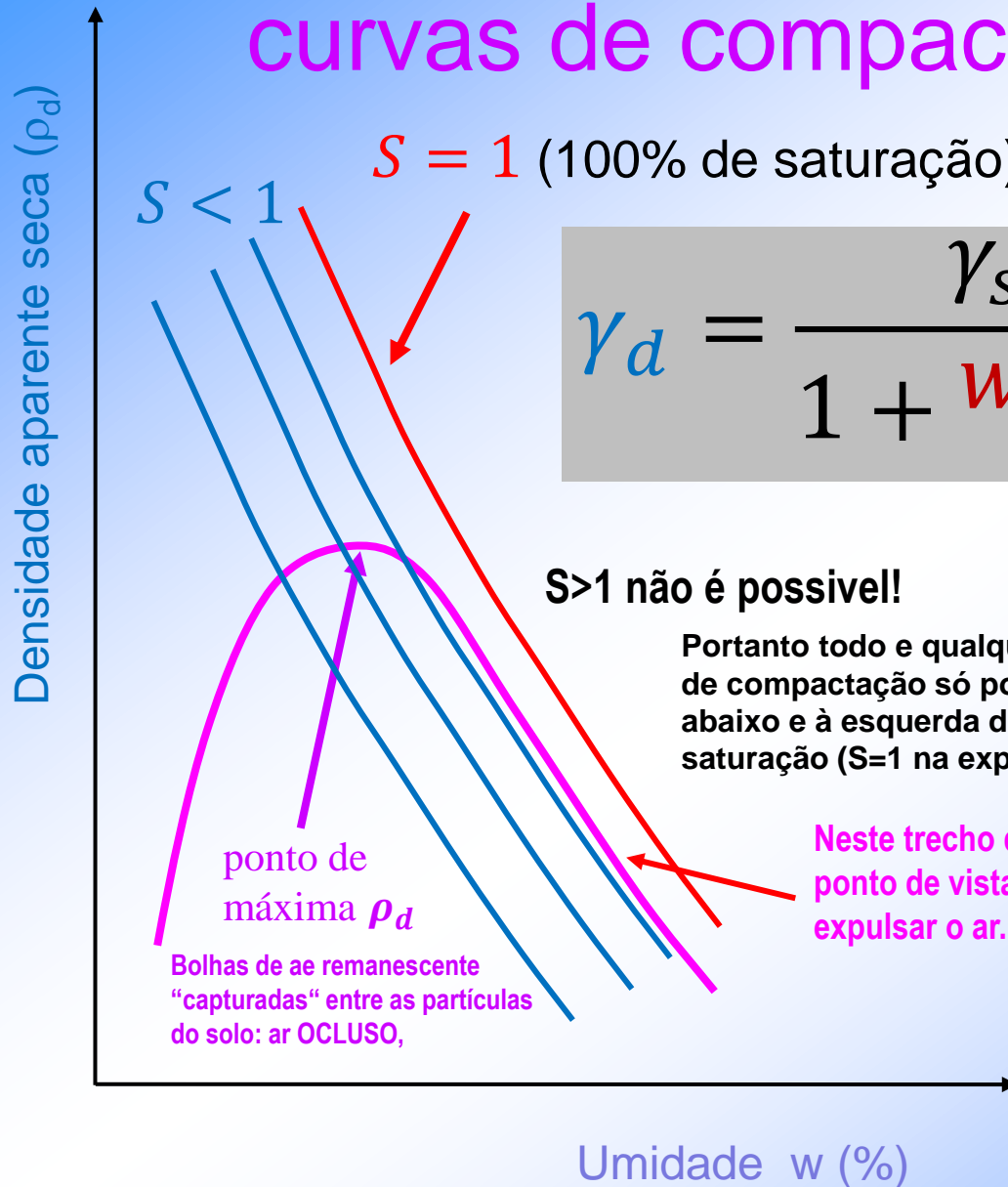
$$\gamma_d = \frac{P_S}{V_T} = \frac{\gamma_s}{1+e}$$

$$eS\gamma_w = w\gamma_s$$

$$\frac{\gamma_s}{\gamma_w} = G$$

$$eS = Gw$$

# Curvas de saturação vs curvas de compactação



$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1 + wG/S}$$

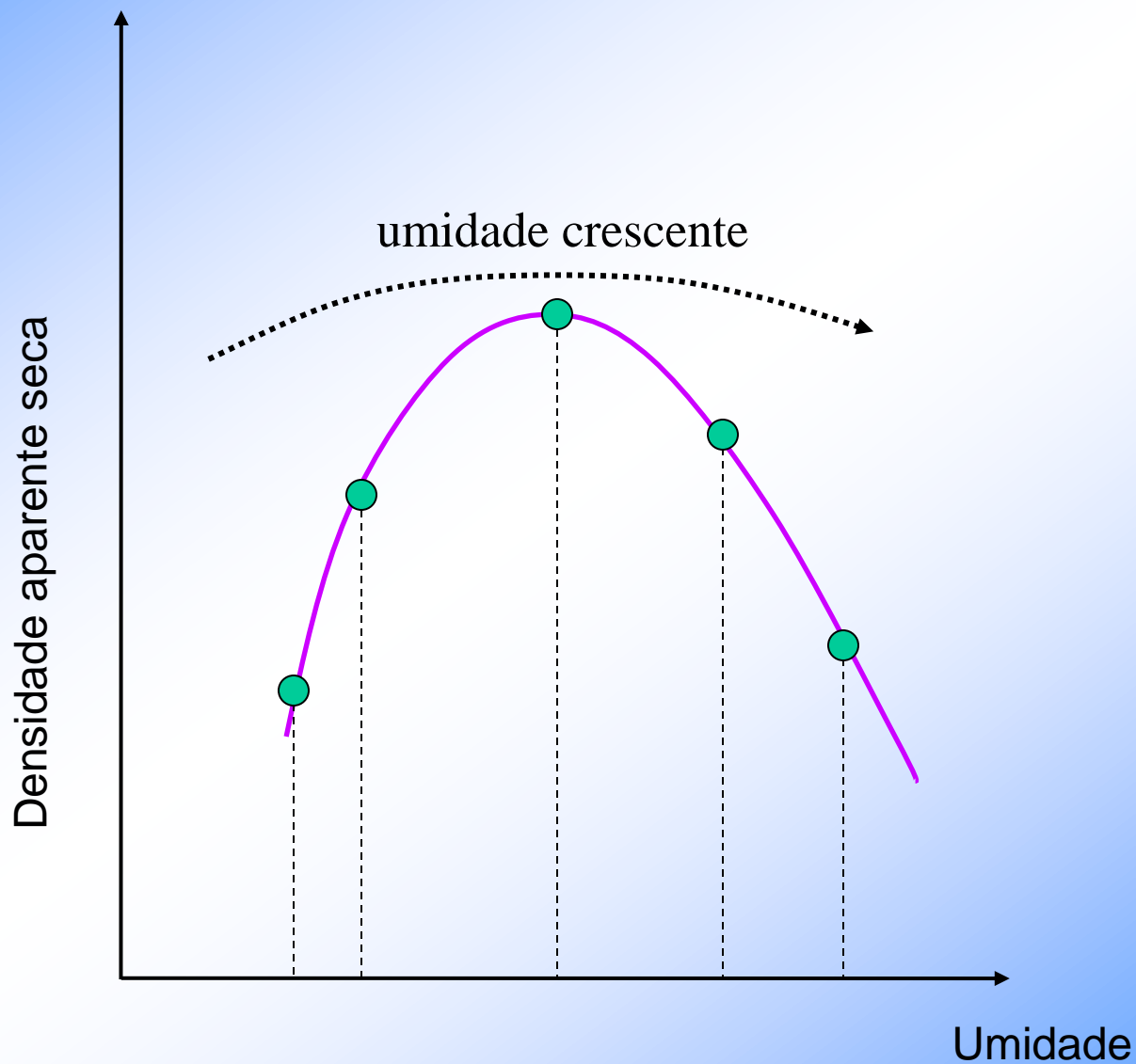
$$\gamma_d = \frac{P_s}{V_T} = \frac{\gamma_s}{1 + e}$$

$$eS\gamma_w = w\gamma_s$$

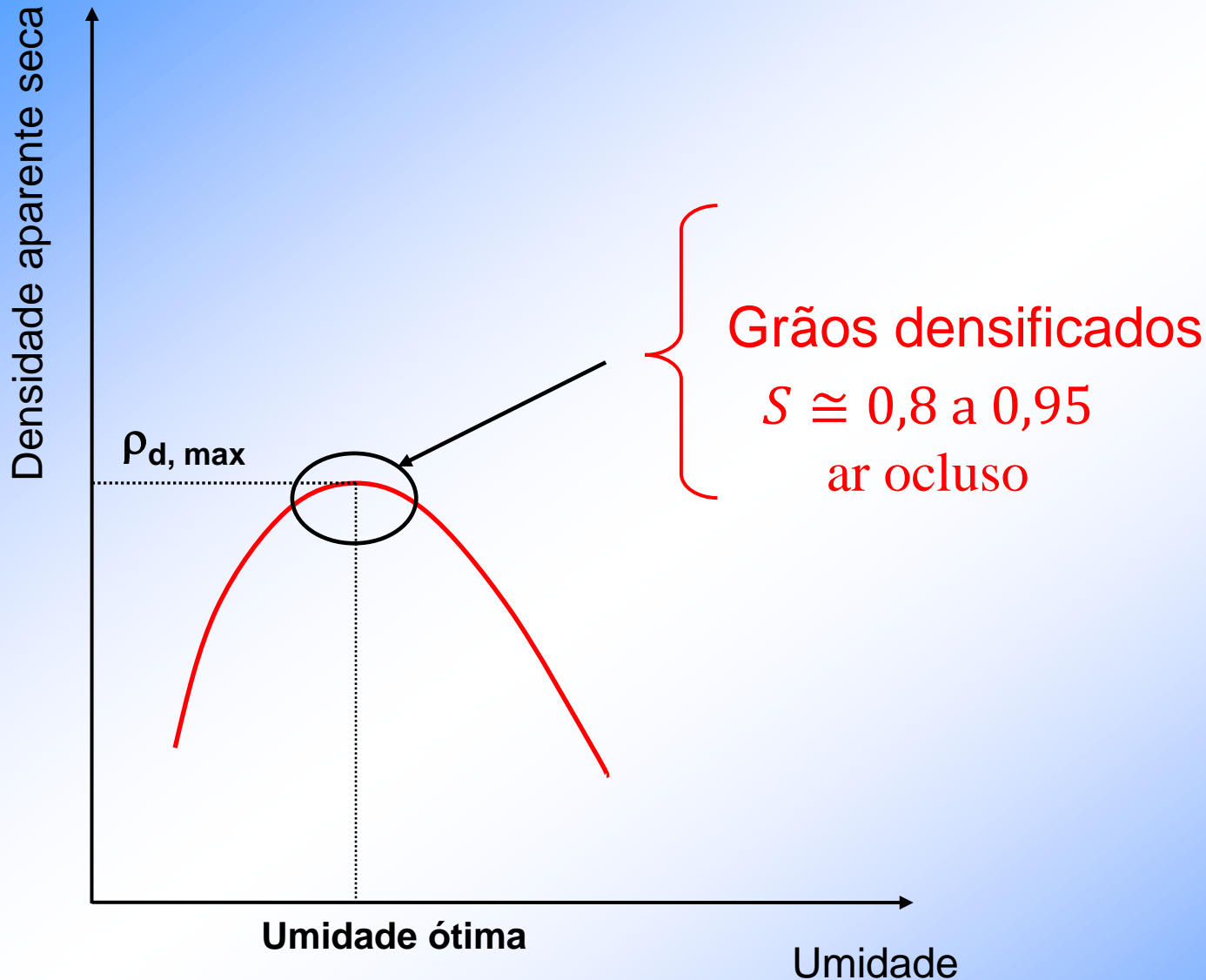
$$\frac{\gamma_s}{\gamma_w} = G$$

$$eS = wG$$

# Curva Típica de Compactação



# Curva de Compactação

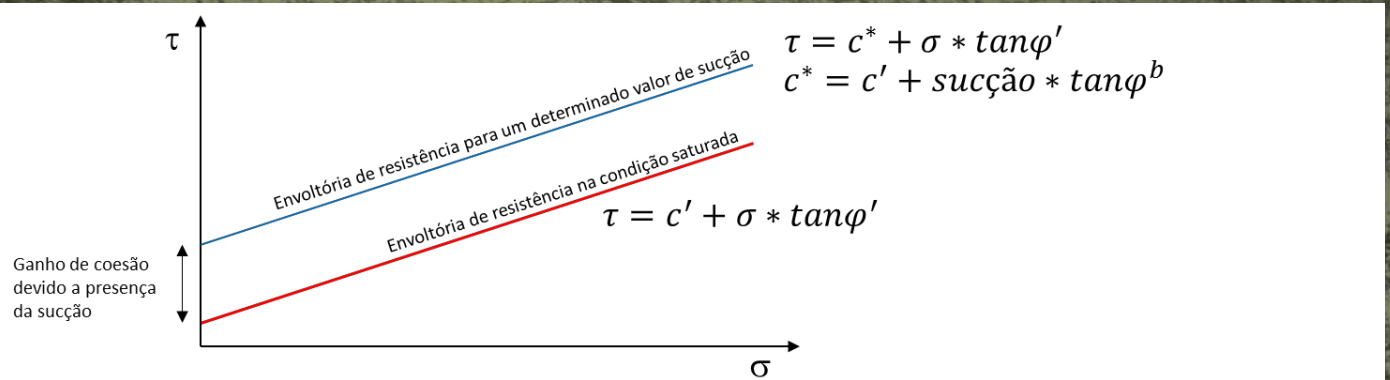


# Capilaridade

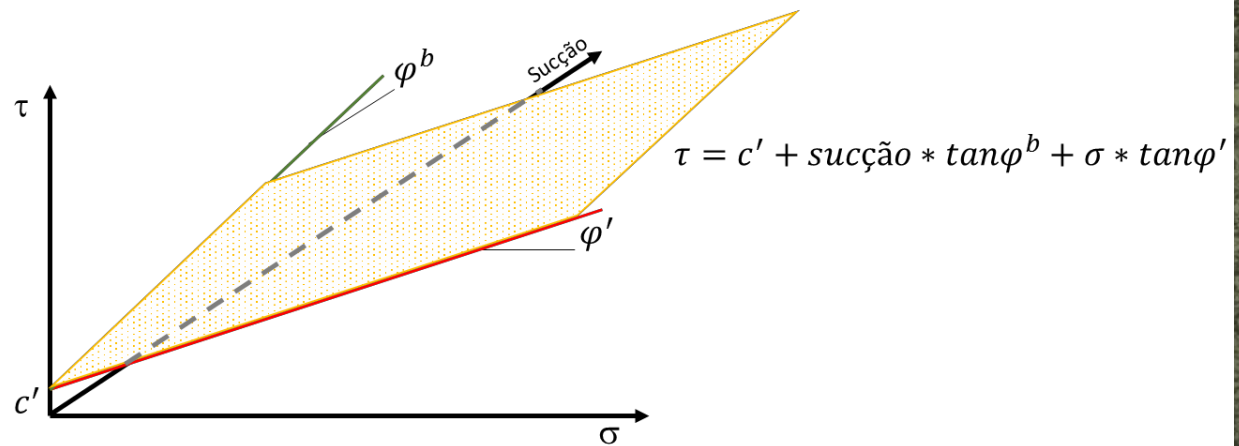
- Mecânica dos Solos em 16 aulas
  - Prof. Carlos Pinto

# Efeito da sucção

## Envoltórias de Resistência



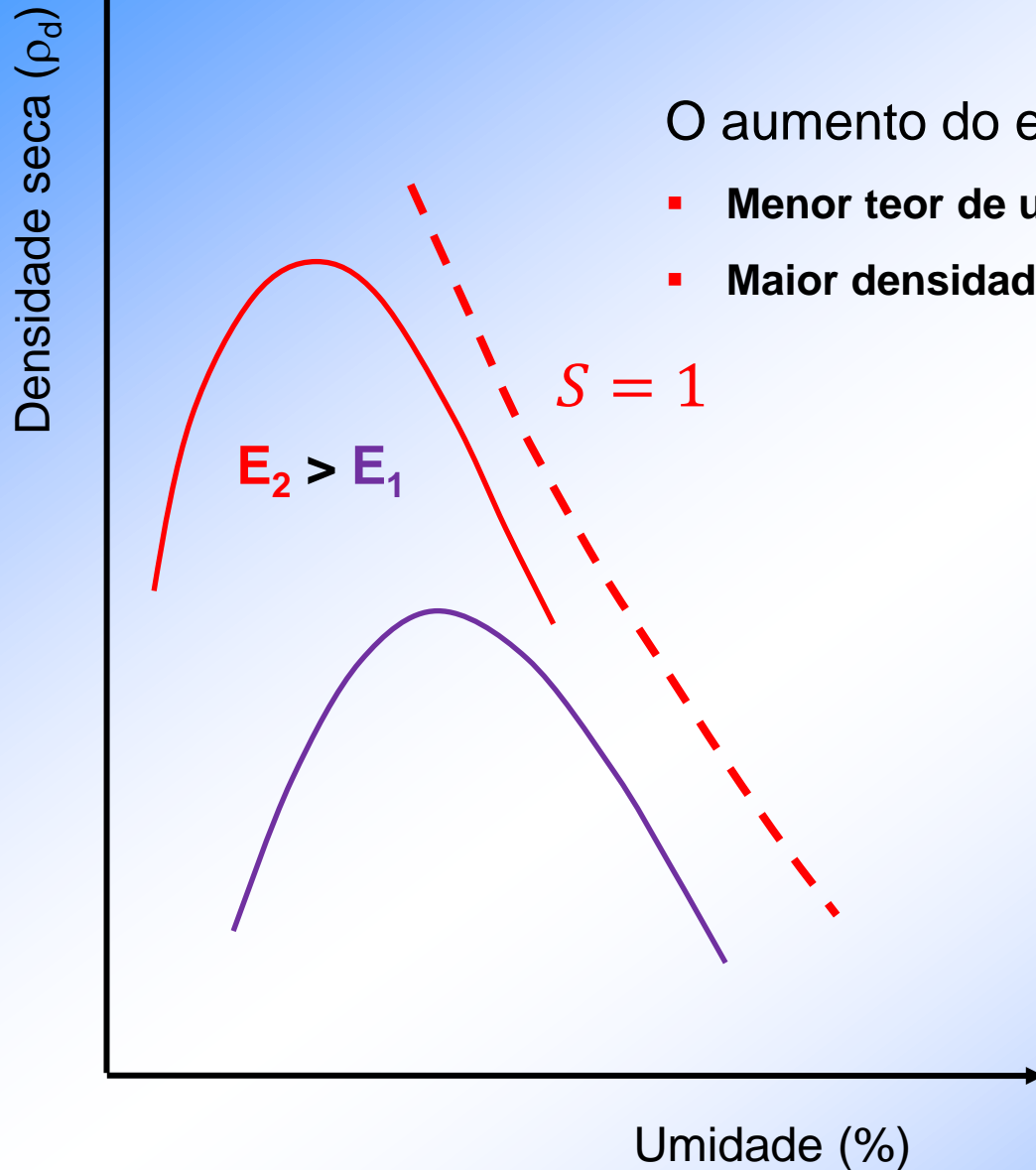
(a)



(b)

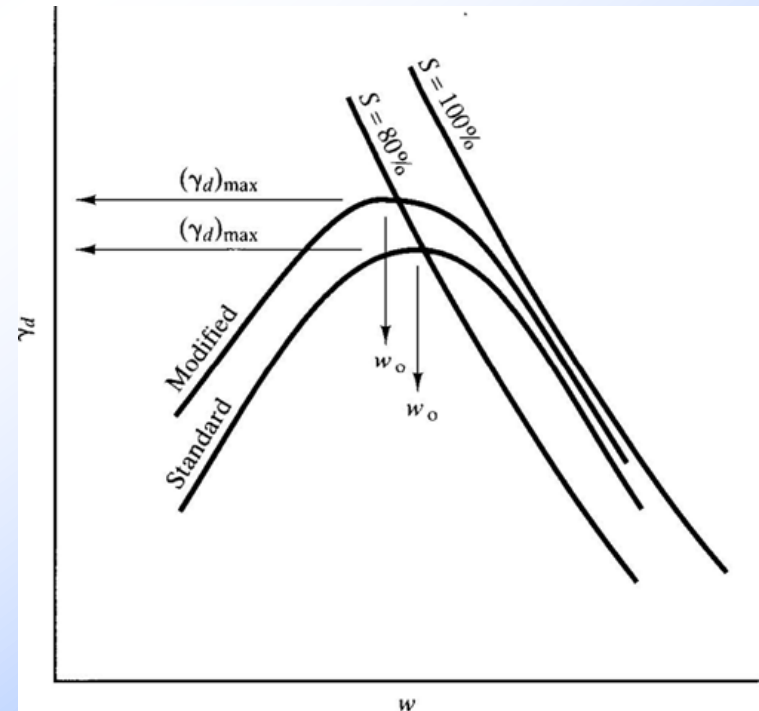


# Efeito do Esforço de Compactação

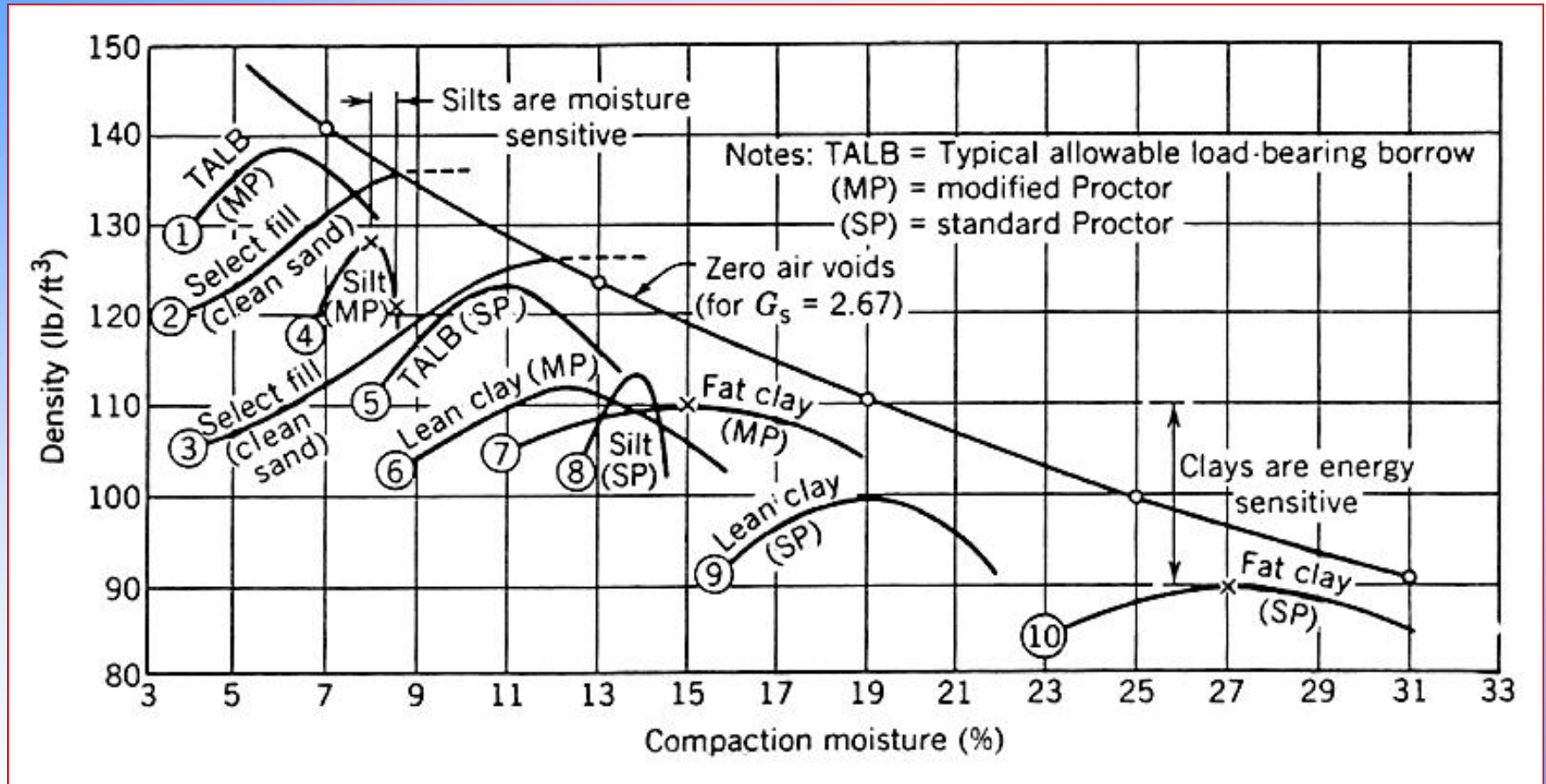


O aumento do esforço de compactação causa:

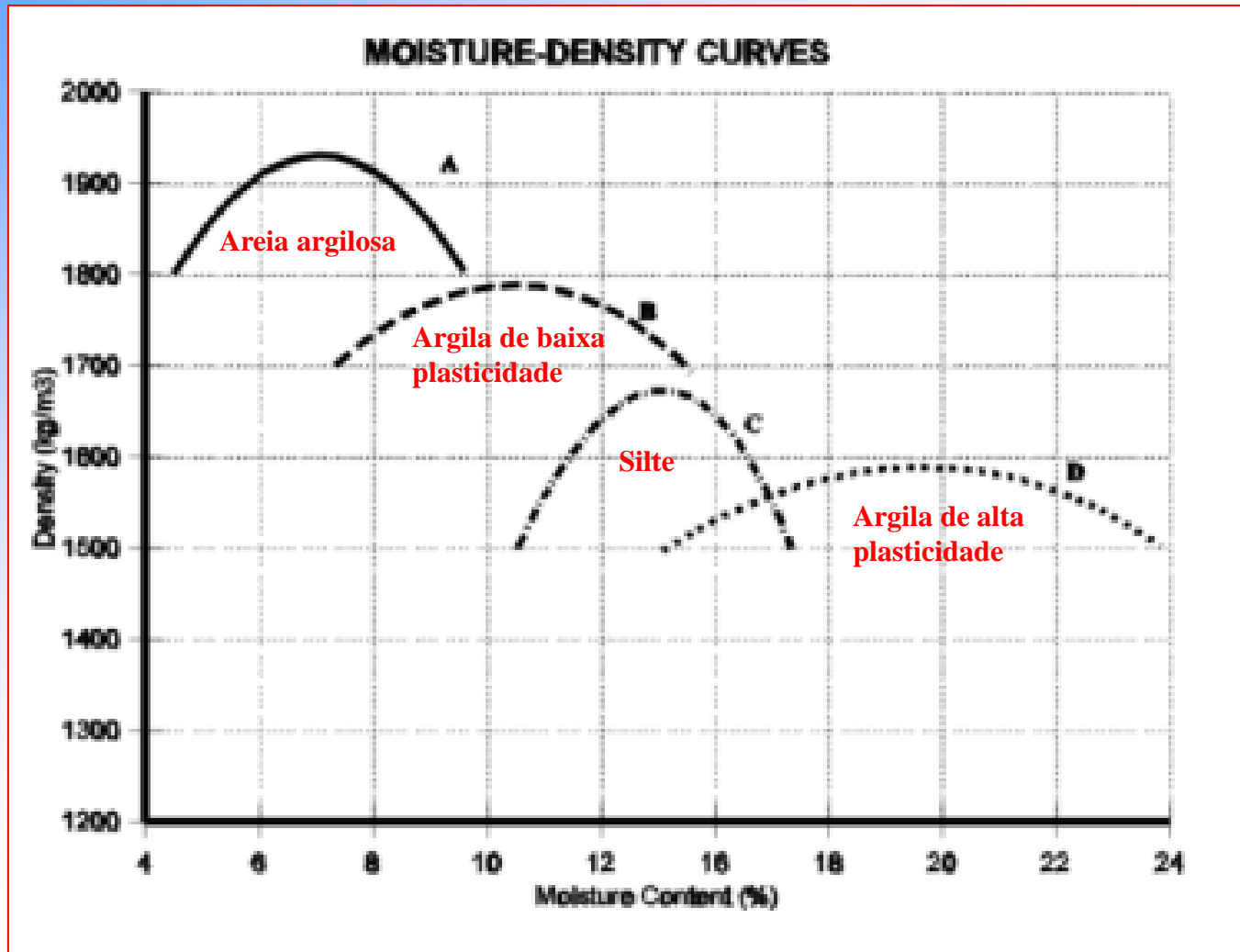
- Menor teor de umidade ótimo
- Maior densidade aparente seca máxima.



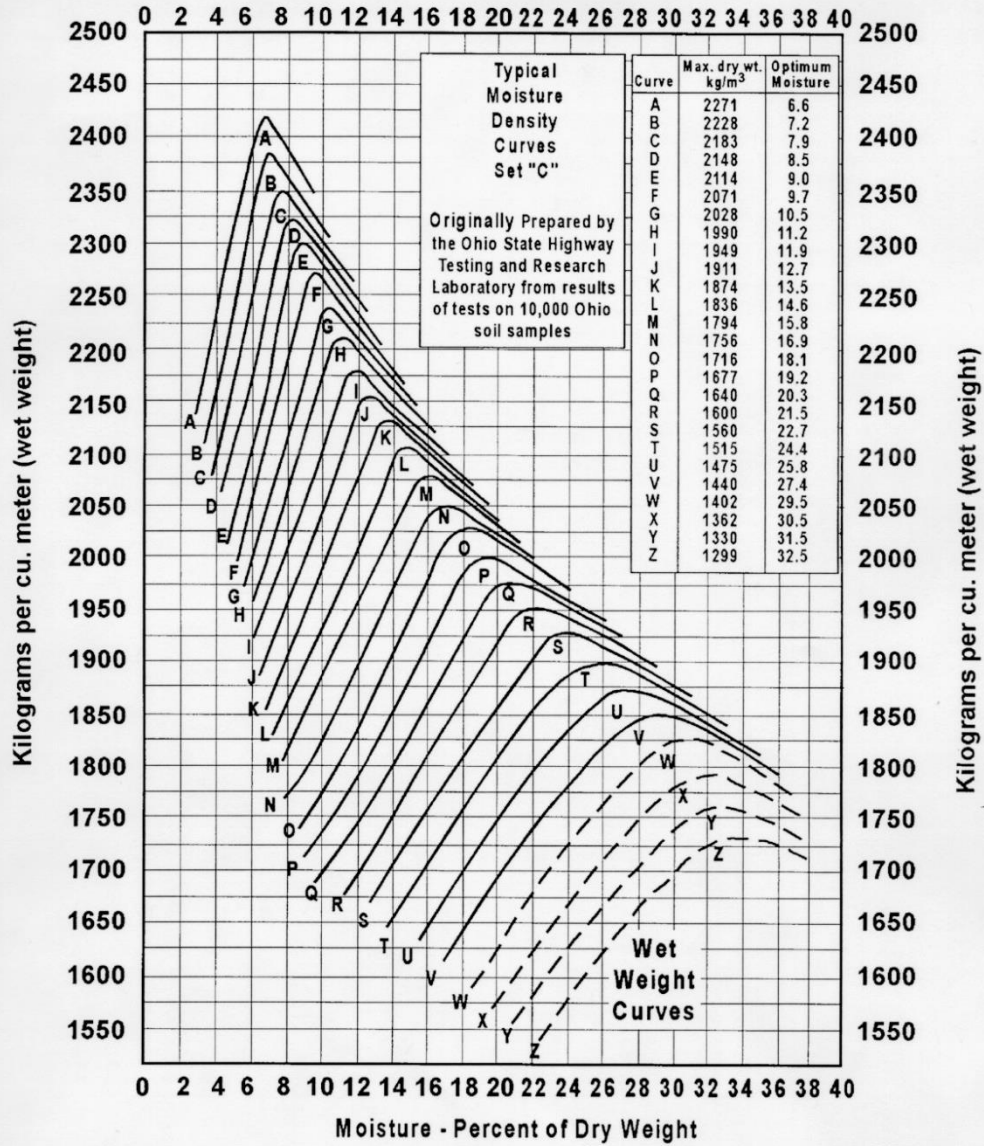
# Efeito do Tipo de Solo e Esforço de Compactação



## Efeito do tipo de solo



Moisture - Percent of Dry Weight



Typical  
Moisture  
Density  
Curves  
Set "C"

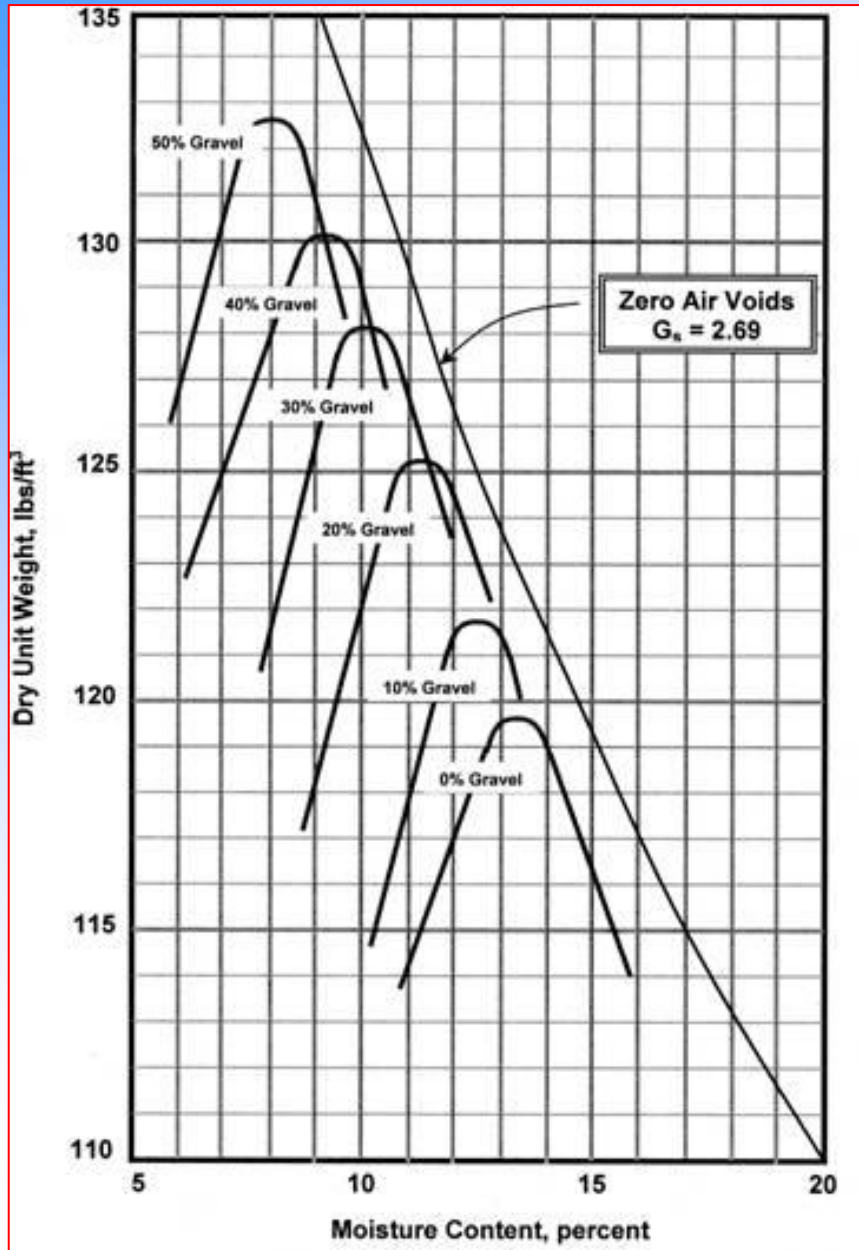
Originally Prepared by  
the Ohio State Highway  
Testing and Research  
Laboratory from results  
of tests on 10,000 Ohio  
soil samples

Curvas típicas dos solos de Ohio  
(...?)

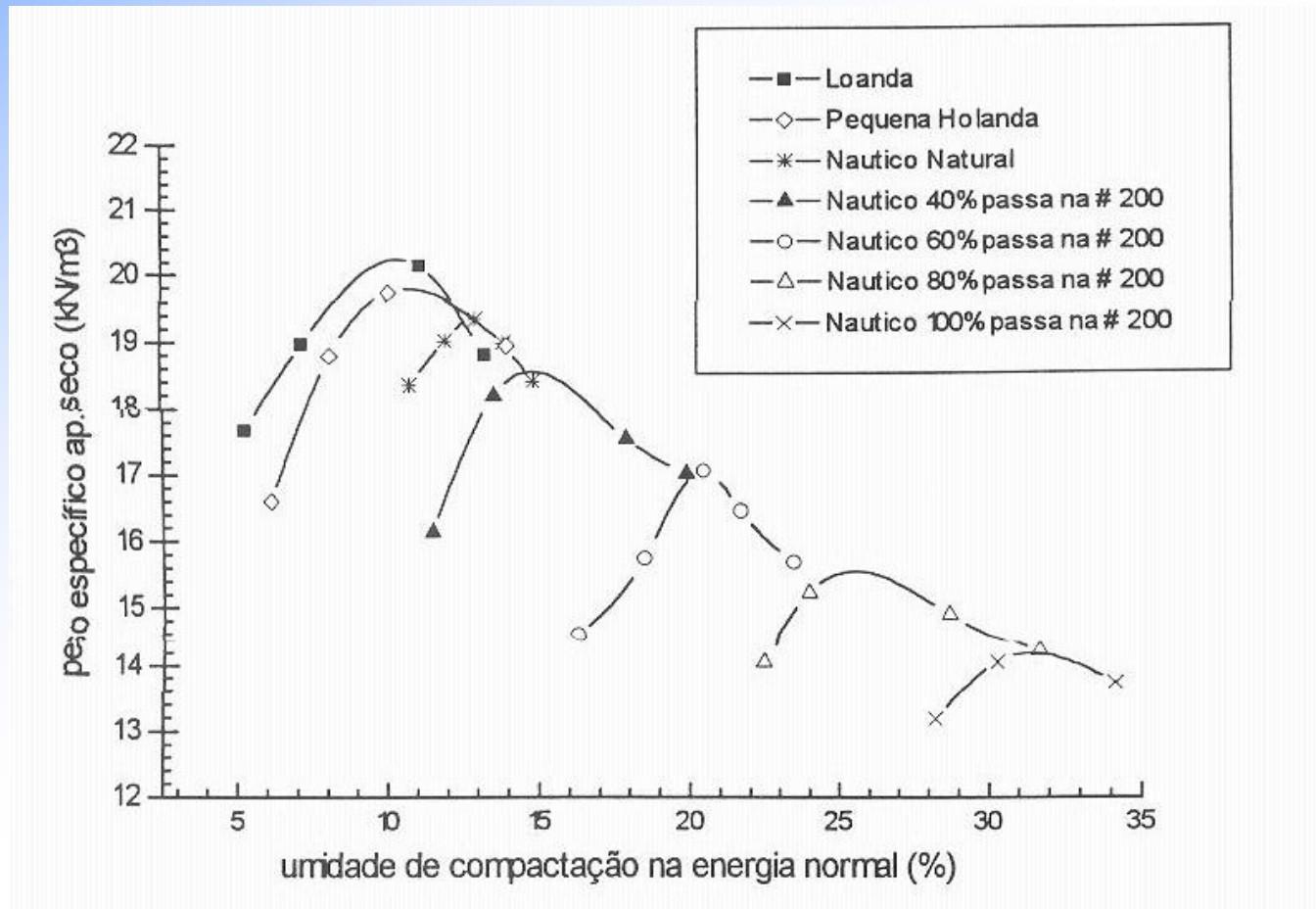
\* Computer re-drawn February 1996

Use for C-90M + C-135B-M

## Efeito da presença de material mais grosso

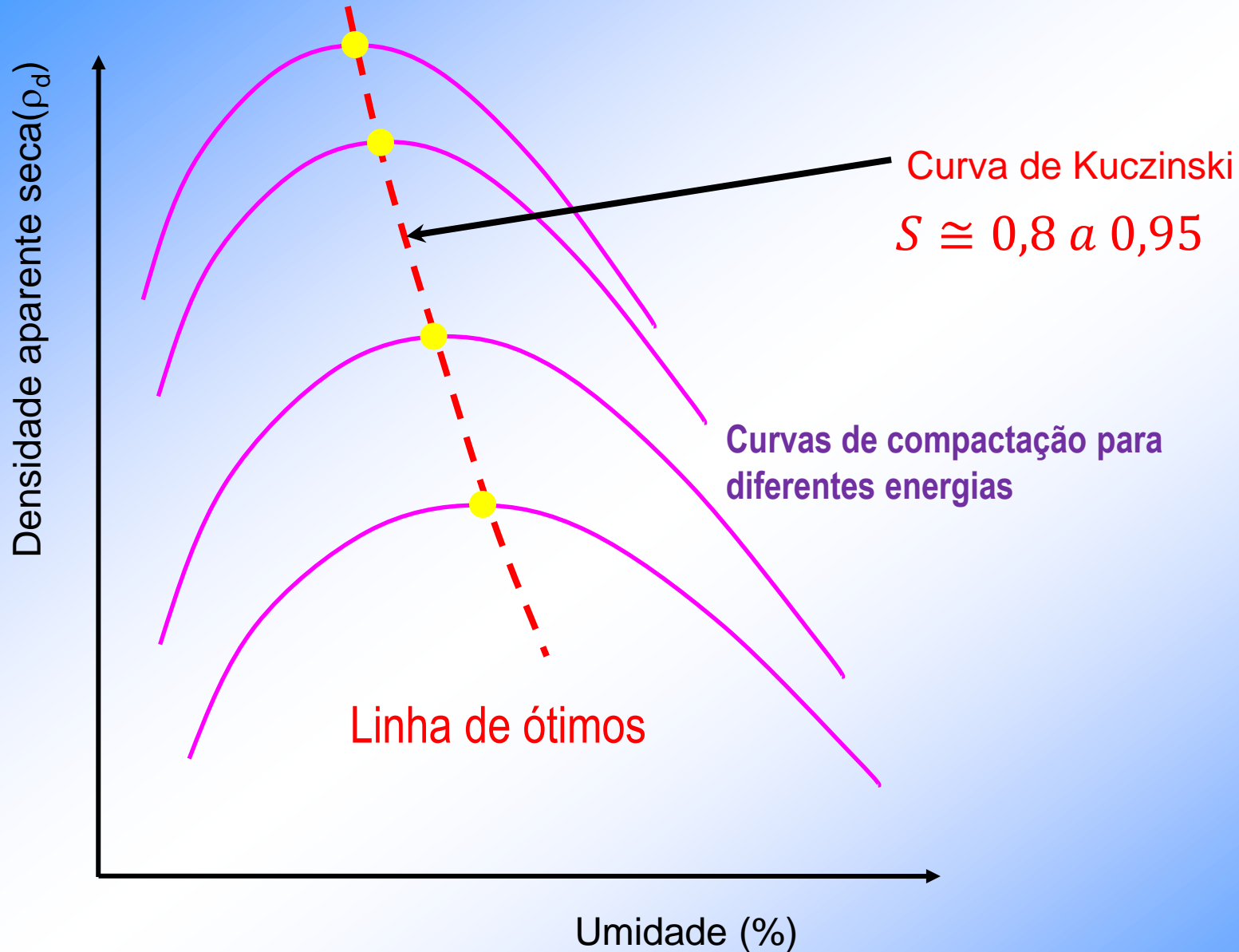


# Solos lateríticos

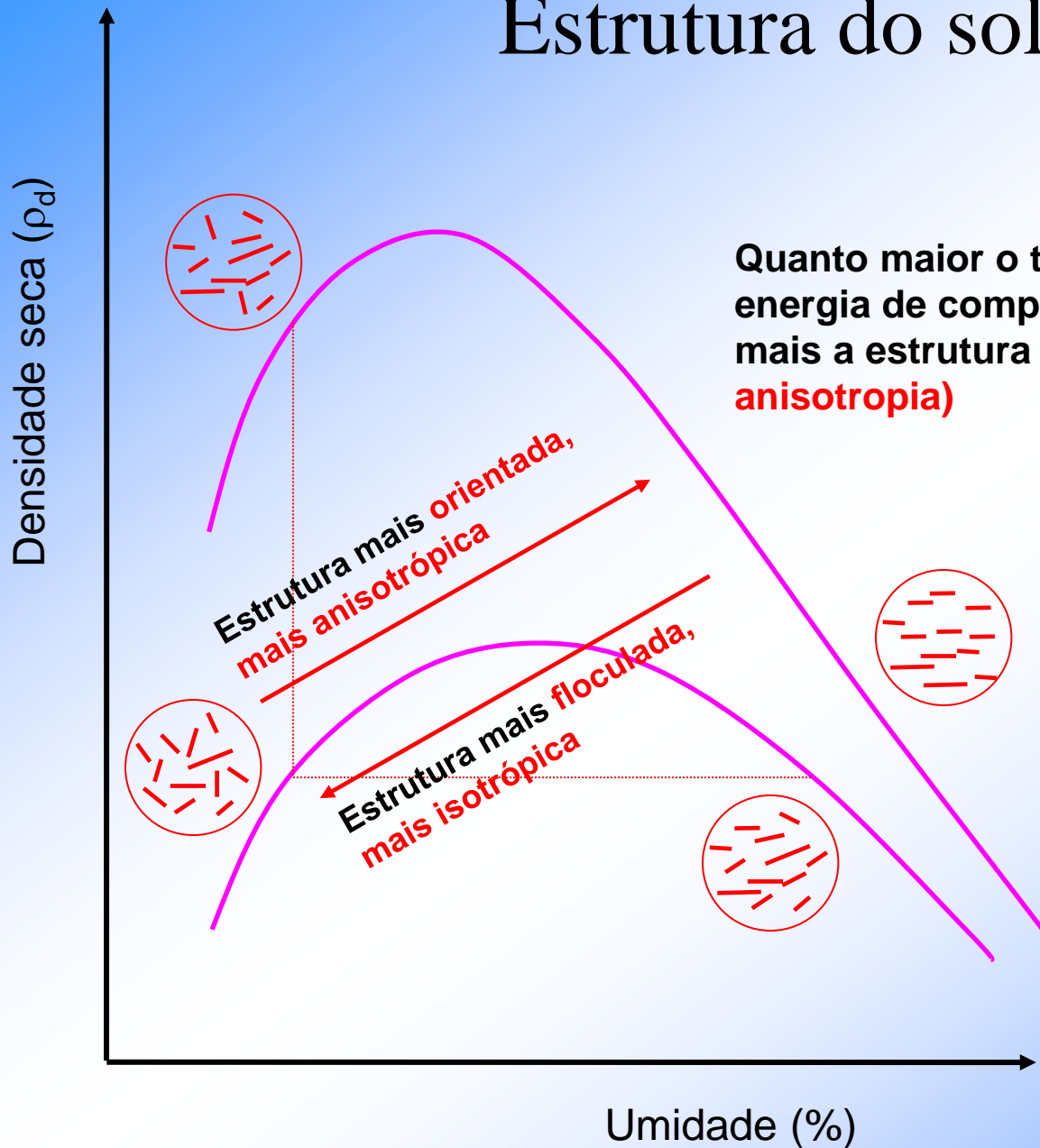


Maior inclinação do ramo seco (Bernucci, 1995).

# Linha de Ótimos



# Estrutura do solo



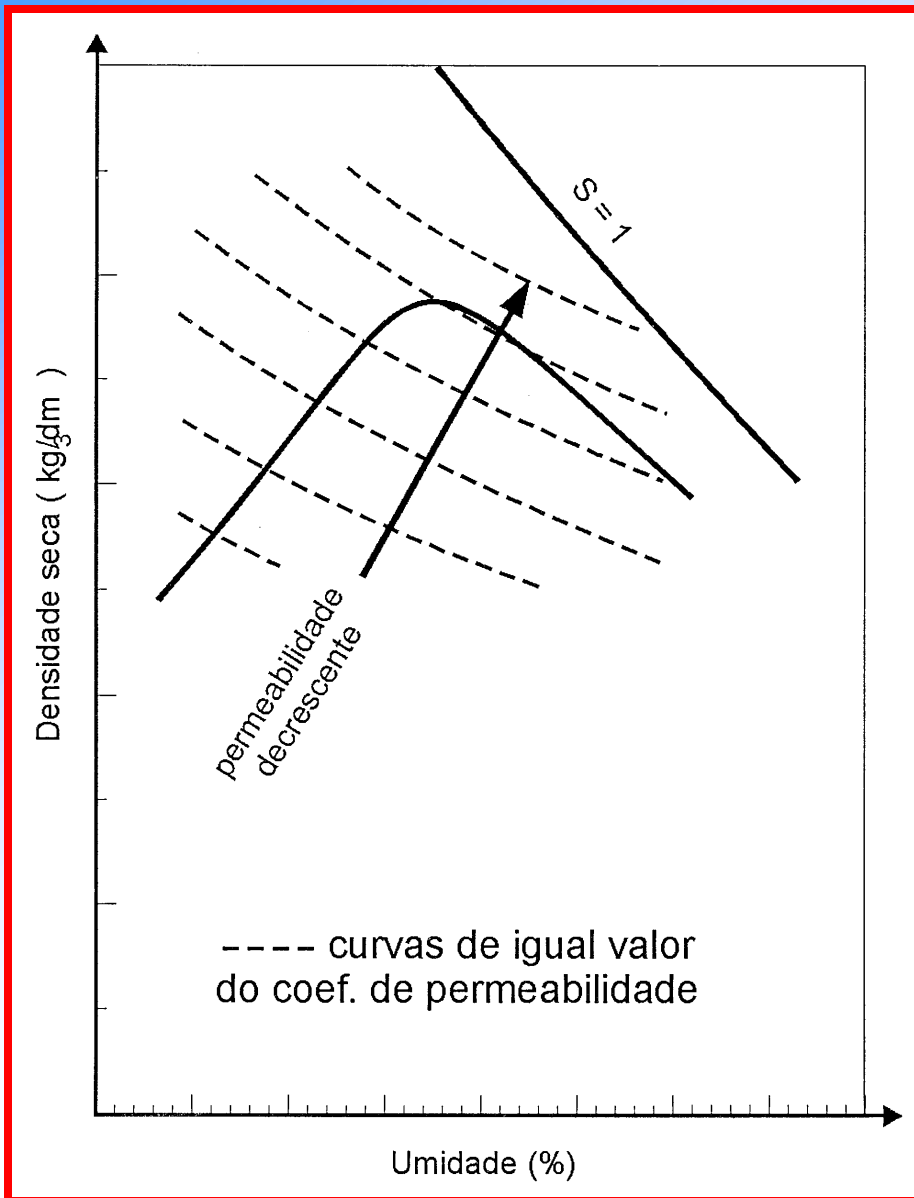
Quanto maior o teor de umidade ou maior a energia de compactação, mais a estrutura é **orientada (intensifica-se a anisotropia)**

Estrutura mais orientada,  
mais anisotrópica

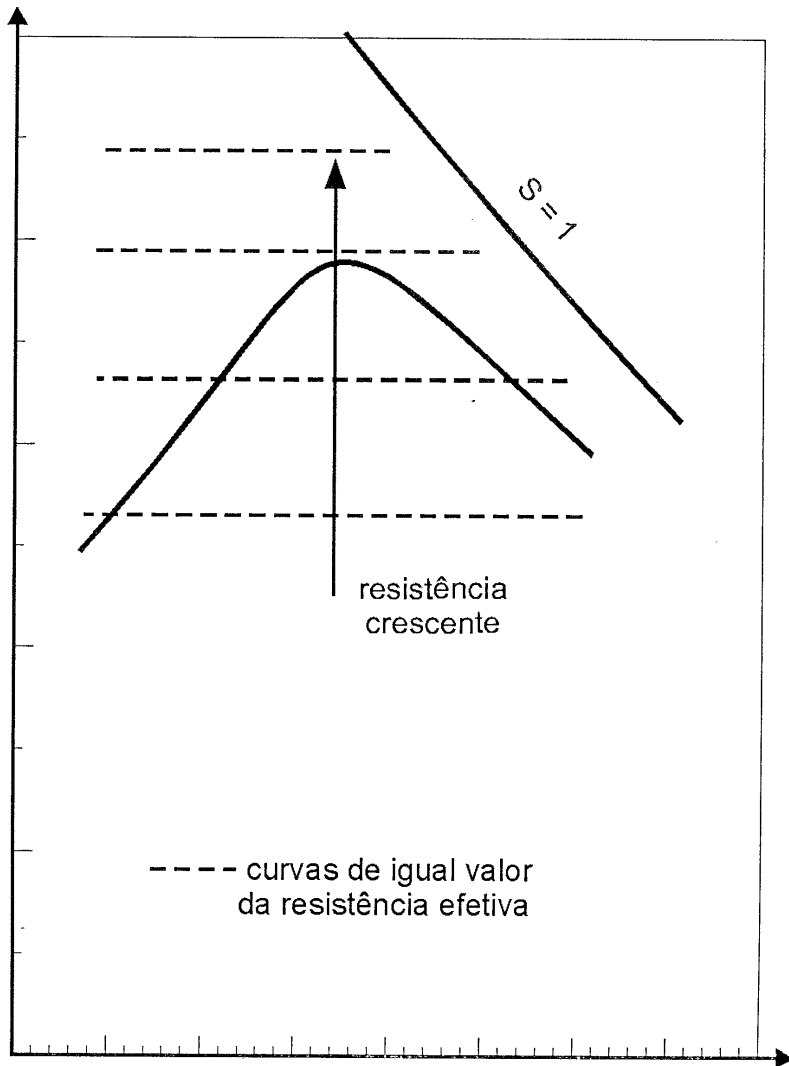
Estrutura mais flocculada,  
mais isotrópica

Umidade (%)

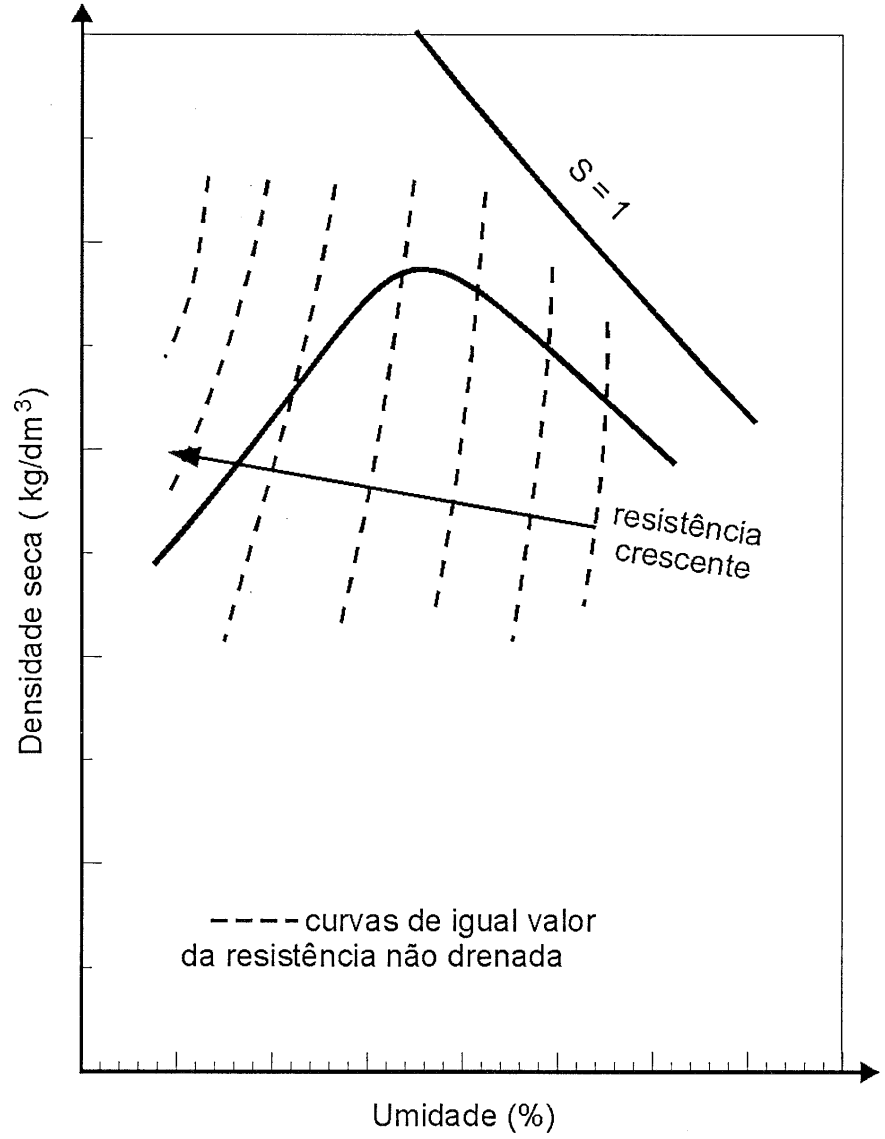




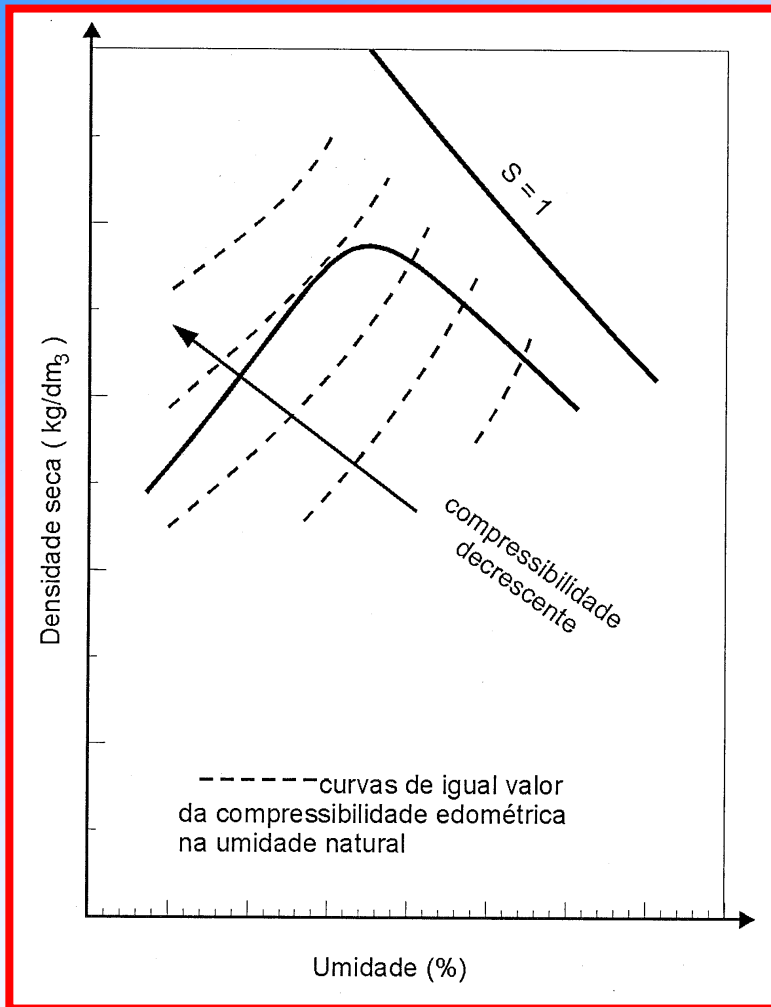
**Influência na  
condutividade hidráulica**



**Influência na resistência efetiva**

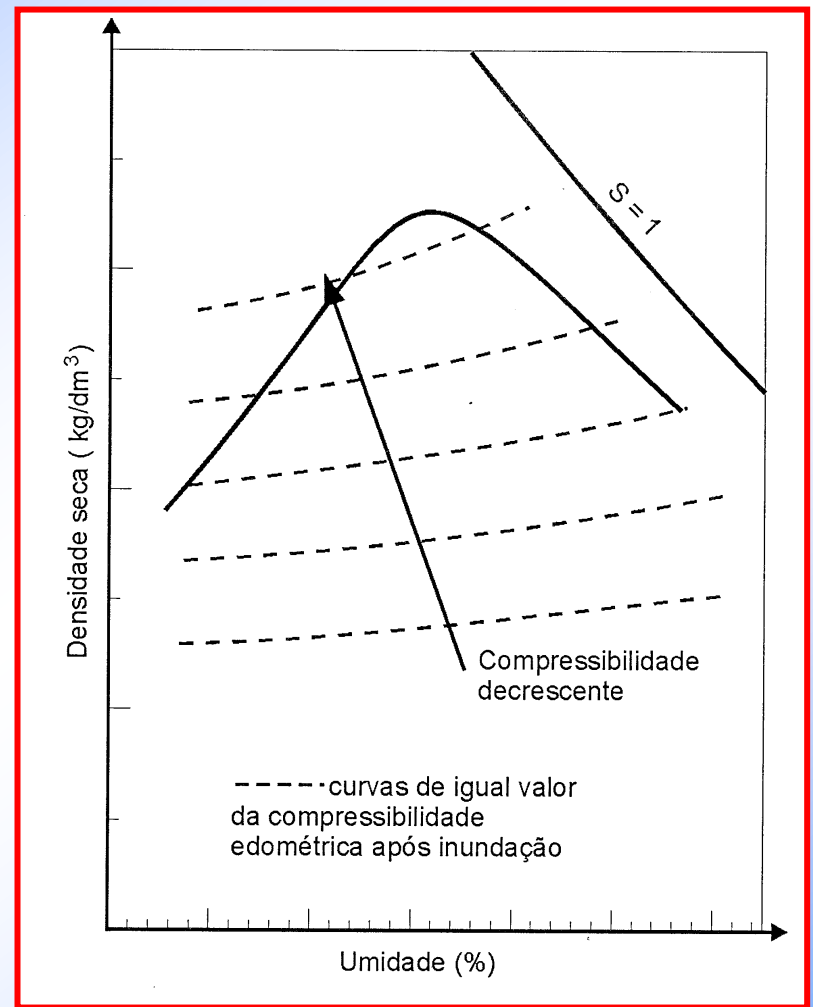


**Influência na resistência não drenada**



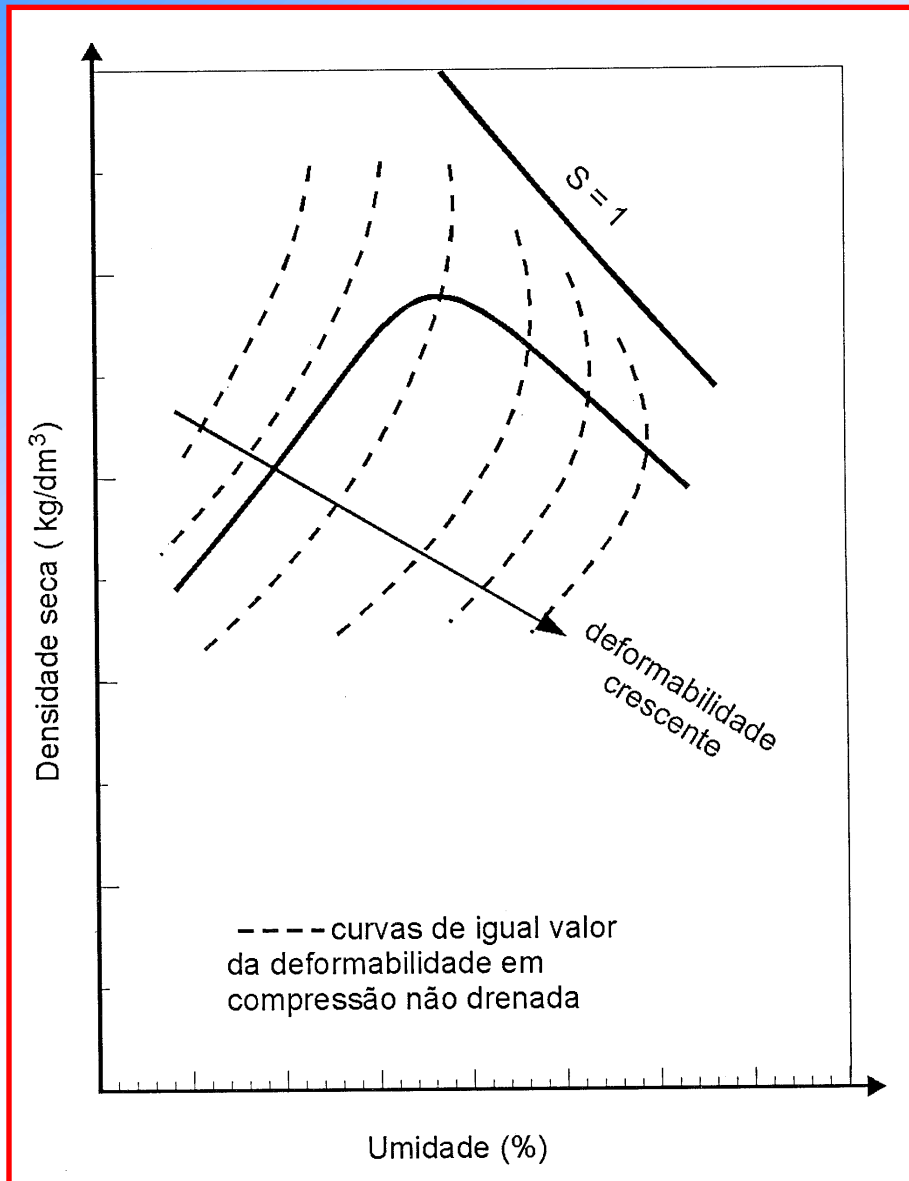
Sousa Pinto (2000)

**Influência na compressibilidade edométrica (  $w$  natural )**



Sousa Pinto (2000)

**Influência na compressibilidade edométrica (  $w$  após inundação:  $S \cong 1$  )**

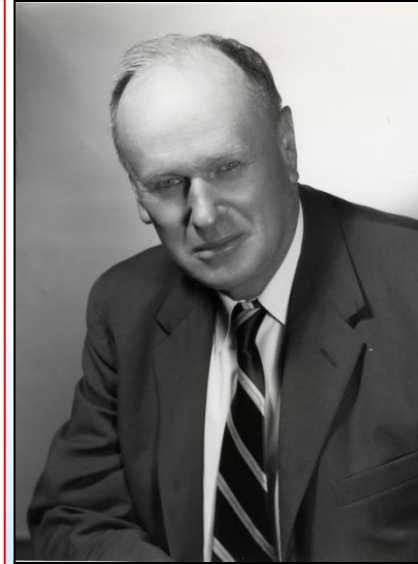
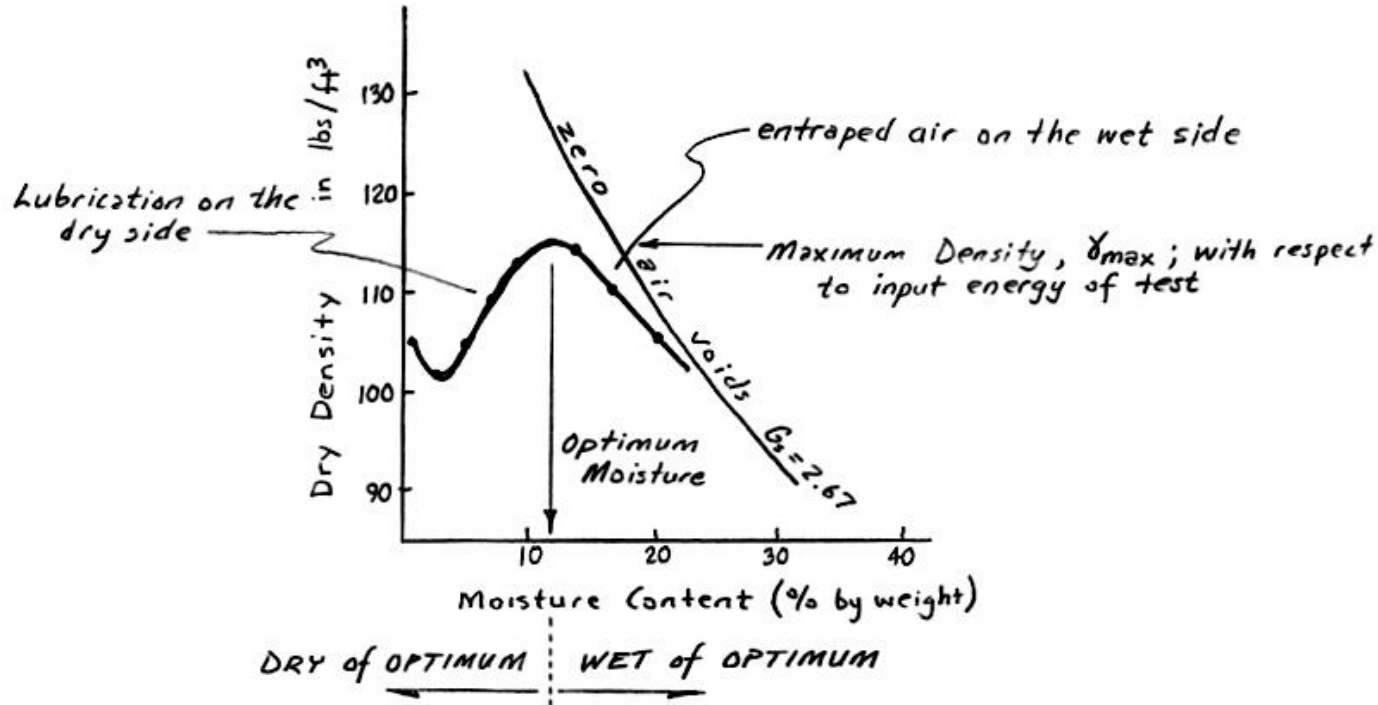


**Influência na deformabilidade em compressão não drenada**

# **ENSAIOS DE LABORATÓRIO**

**(PARA ESPECIFICAR CONTROLES DE CAMPO)**

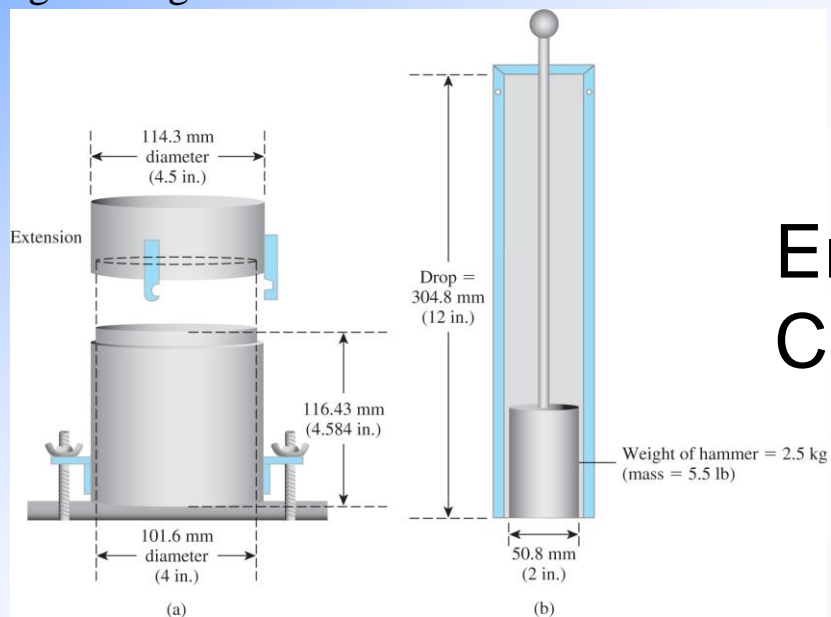
# Ralph Proctor



Ralph Proctor 1894-1962

Ensaio padronizado de compactação  $\Rightarrow$  curvas de Proctor

# Ensaio de Compactação



(c)

**Figure 6.2** Standard Proctor test equipment: (a) mold; (b) hammer; (c) photograph of laboratory equipment used for test (Courtesy of Braja M. Das, Henderson, Nevada)

© 2010 Cengage Learning Engineering. All Rights Reserved.

# Ensaio de Compactação

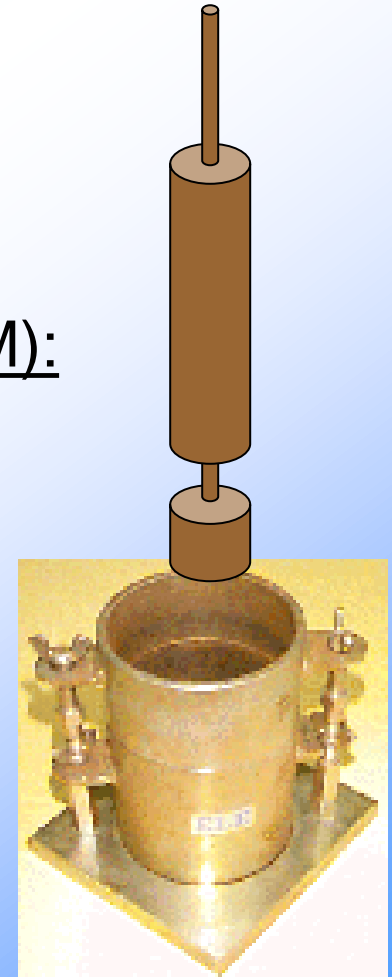
O objetivo do ensaio é obter a curva de compactação e definir o teor de umidade ótimo e a densidade seca máxima para uma energia especificada.

## Proctor Normal (PN):

- 3 camadas
- 26 golpes por camada
- Soquete de 2.5 kg
- Altura de queda 305 mm

## Proctor Modificado (PM):

- 5 camadas
- 27 golpes por camada
- Soquete de 4.5 kg
- Altura de queda 457 mm



Volume do molde 1000 ml



# Necessidade de maior energia (PM)





© 2010 Cengage Learning  
Engineering. All Rights Reserved.

**Figure 6.7** Comparison between standard Proctor hammer (left) and modified Proctor hammer (right) (Courtesy of Braja M. Das, Henderson, Nevada)

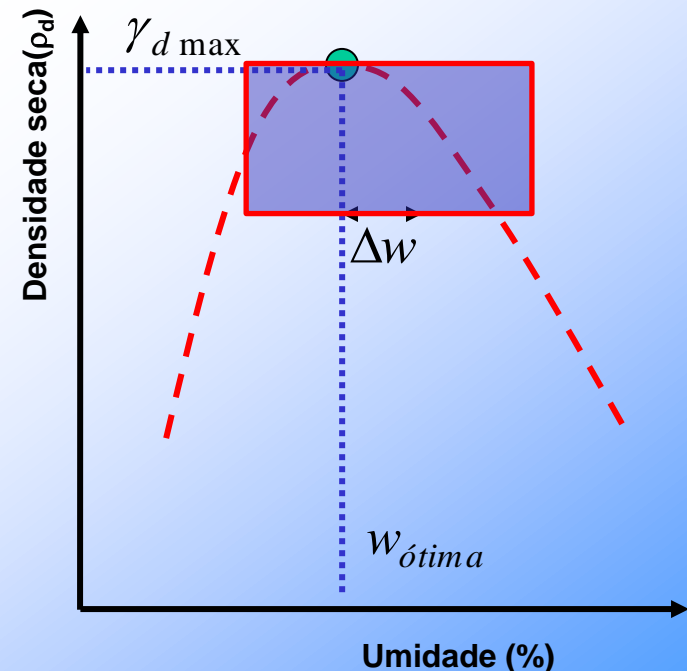
# **ESPECIFICAÇÕES E CONTROLE DE CAMPO**

# ESPECIFICAÇÕES DE COMPACTAÇÃO

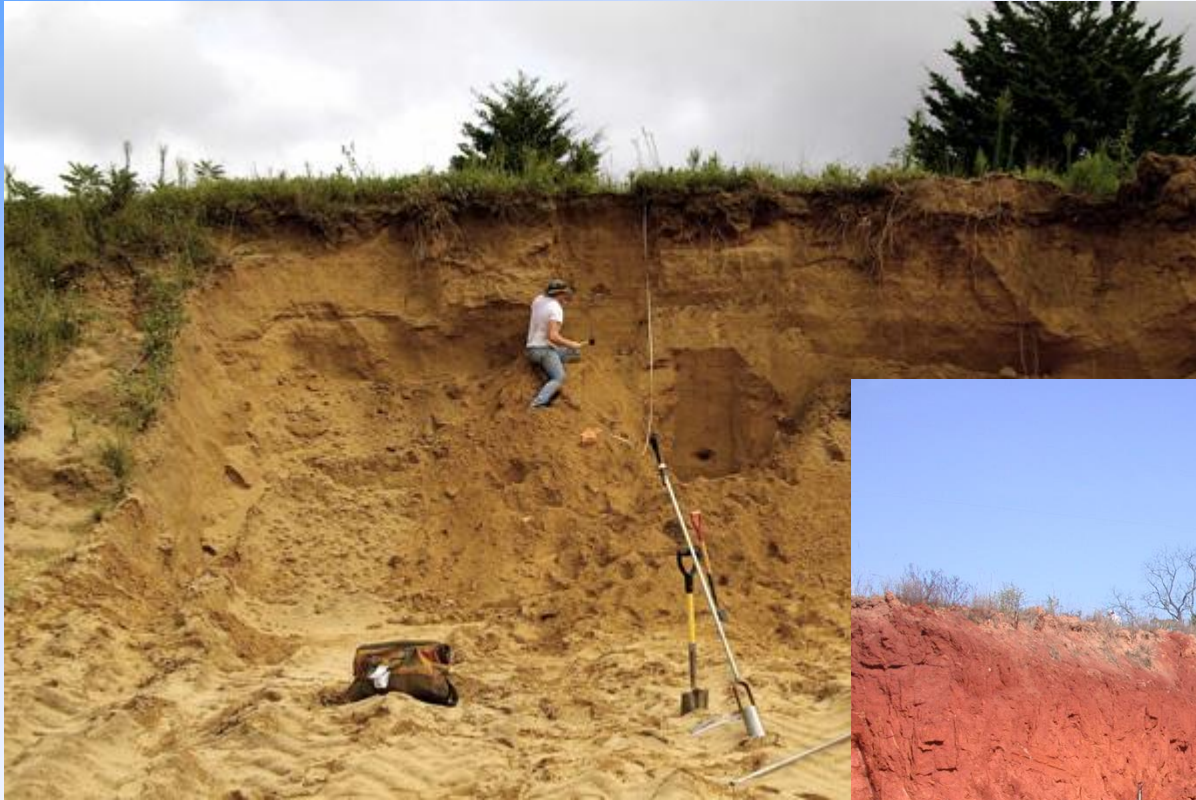
- Objetivo: garantir **comportamento desejado**
- De uma mesma área de empréstimo podem ser obtidos solos compactados com comportamento ajustados a diferentes necessidades da obra
- Evitar que uma camada indequadamente compactada seja coberta por outra antes da análise.

$$G.C. = \frac{\gamma_{d \text{ aterro}}}{\gamma_{d \text{ max}}}$$

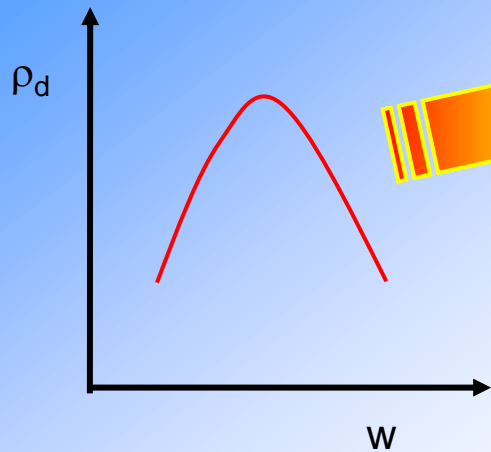
$$\Delta w = w_{\text{aterro}} - w_{\text{ótima}}$$



# Área de Empréstimo – Tipo de Solo



# Princípio básico do controle de compactação



Especificações de compactação

$$\rho_{d,fcampo} = ?$$
$$W_{campo} = ?$$

Comparar!



Aterro Compactado

# CONTROLE DE COMPACTAÇÃO

- Objetivo: Verificar conformidade às especificações para garantir **comportamento desejado**
- Evitar que uma camada indequadamente compactada seja coberta por outra antes da análise
- Controle de grau de compactação e de umidade: ensaios de campo de lotes de ~ 30 x 80 m em cada camada

# Procedimentos de Controle

É uma verificação sistemática onde se verifica, em intervalos regulares, se a compactação foi feita de acordo com as especificações

1 teste por 1000 m<sup>3</sup>  
de solo compactado

•Densidade (grau de compactação)  
•Umidade

- Verificação da densidade no campo:
  - Frasco de areia (mais usual no Brasil)
  - Densímetro nuclear
- Verificação da umidade de campo (precisa ser rápida para não prejudicar a logística da compactação)
  - Método de Hilf (mais usual no Brasil)
  - TDR (Time domain reflectometry)



# Espessura da Camada Lançada







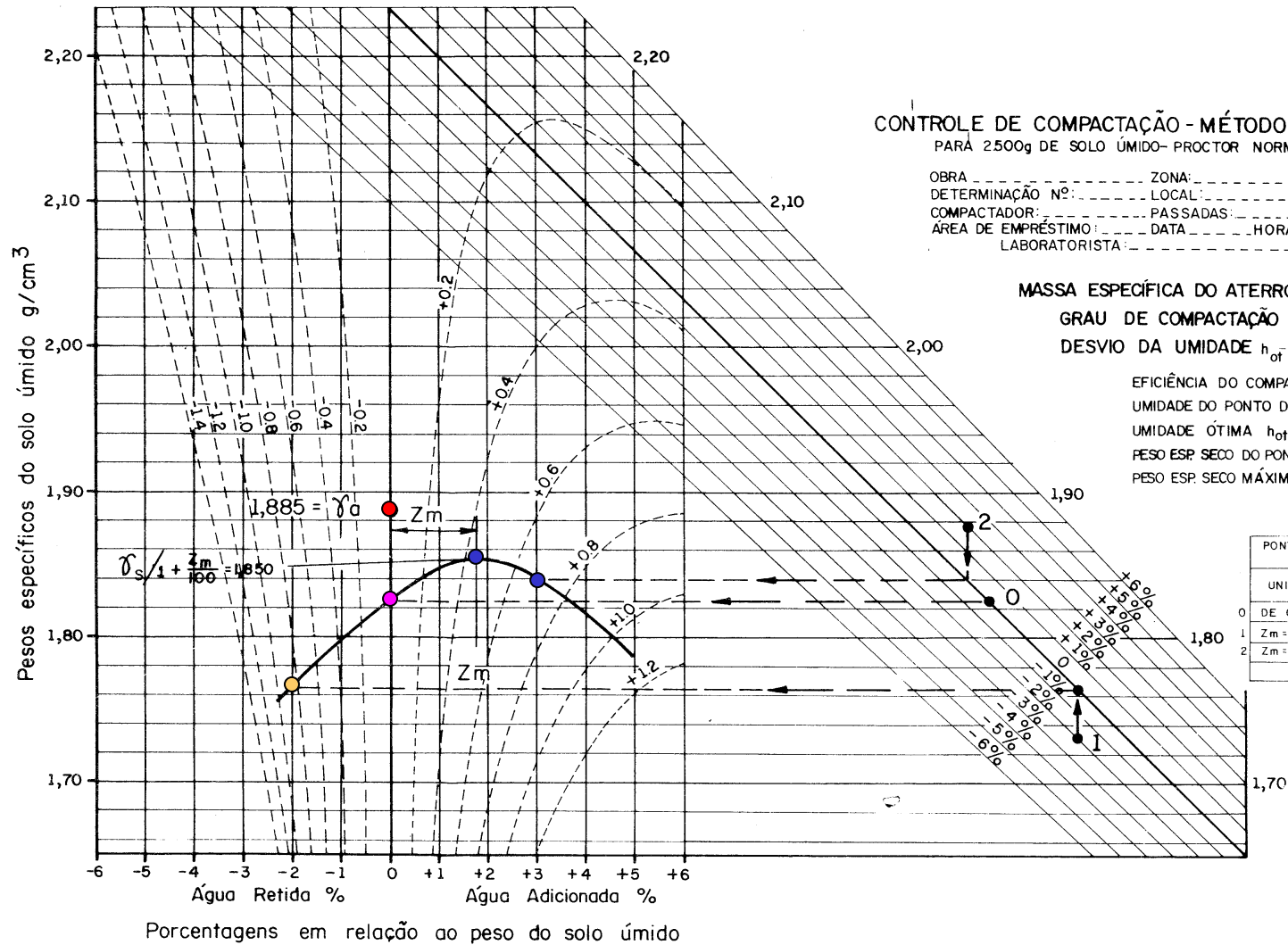
## ➤ Método de Hilf

- Determina-se a densidade úmida do aterro compactado ( $\gamma_a$ ), sem se preocupar em obter a umidade ( $w_a$ ).
- Acrescenta-se água ou seca-se a amostra em quantidades determinadas ( $\Delta m_{ag}$ ).
- Calcula-se a percentagem  $z$  dessa água acrescida ou retirada, em relação a massa úmida inicial da amostra com a umidade do aterro ( $w_a$ ).

$$\frac{z}{100} = \frac{\Delta M_{ag}}{M} = \frac{M_d w - M_d w_a}{M_d (100 + w_a)} = \frac{w - w_a}{100 + w_a}$$

- De cada amostra determina-se a densidade úmida moldando-se corpos de prova no cilindro de Proctor.
- Traça-se então, em gráfico, a relação  $\gamma/(1+z/100)$  em função de  $z$ .
- Esta relação terá um máximo em  $z_m$ .
- Dividindo-se o valor de  $\gamma_a$  pelo máximo da curva obtida tem-se o grau de compactação.
- Para se obter o desvio de umidade acrescenta-se a  $z_m$  uma correção  $\Delta$  que, é dada pela expressão:

$$\Delta = \frac{Z_m (w_{ot} - z_m)}{100 + z_m}$$



### CONTROLE DE COMPACTAÇÃO - MÉTODO DE HILF

PARA 2500g DE SOLO ÚMIDO - PROCTOR NORMAL MB-33

OBRA \_\_\_\_\_ ZONA: \_\_\_\_\_  
 DETERMINAÇÃO Nº: \_\_\_\_\_ LOCAL: \_\_\_\_\_  
 COMPACTADOR: \_\_\_\_\_ PASSADAS: \_\_\_\_\_  
 ÁREA DE EMPRÉSTIMO: \_\_\_\_\_ DATA: \_\_\_\_\_ HORA: \_\_\_\_\_  
 LABORATORISTA: \_\_\_\_\_

MASSA ESPECÍFICA DO ATERRO  $\gamma_a = 1,885$   
 GRAU DE COMPACTAÇÃO  $C = \frac{\gamma_a}{\gamma_{s\max}} \cdot 100 = 102\%$   
 DESVIO DA UMIDADE  $h_{of} - h_c = +1,8 + 0,42 = 2,22\%$   
 EFICIÊNCIA DO COMPACTADOR  $E = \dots\%$   
 UMIDADE DO PONTO DE CONTROLE  $h_c = \dots\%$   
 UMIDADE ÓTIMA  $h_{of} = \dots\%$   
 PESO ESP SECO DO PONTO DE CONTROLE  $\gamma_s = \dots \text{g/cm}^3$   
 PESO ESP SECO MÁXIMO  $\gamma_{s\max} = \dots \text{g/cm}^3$

PONTOS PARA O TRAÇADO DA CURVA	
UNIDADE	PESOS ESPEC. SOLO ÚMIDO
0 DE CAMPO	1,825 g/cm <sup>3</sup>
1 $Z_m = -2\%$	1,730 g/cm <sup>3</sup>
2 $Z_m = +2\%$	1,875 g/cm <sup>3</sup>

Normograma de Hilf (IPT)

# TDR



Template for Positioning Probes



Probes in Ground (Template Removed)



TDR Measurement in-situ



Remove Material from Test Area



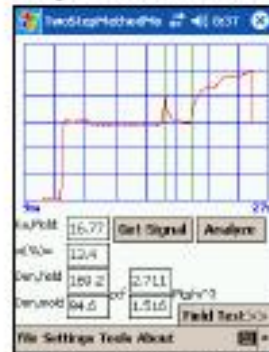
Compact Soil in TDR Mold



Determine Wet Density



TDR Measurement in Mold



TDR Waveform and Results

# Necessidade de Ajuste de Umidade



Observação ainda é um dos melhores métodos de controle. Excesso de poeira é um indício de umidade abaixo da ótima.

# Ajuste de Umidade





# Ajuste de Umidade



Bou langer

# **TIPOS DE COMPACTADORES**

# Compactação no campo

Tipos principais de compactadores (há inúmeros outros):

- Compactador “pé de carneiro”.
- Compactador de rolo liso
- Compactador de pneu
- Compactador manual vibratório (para pequenas

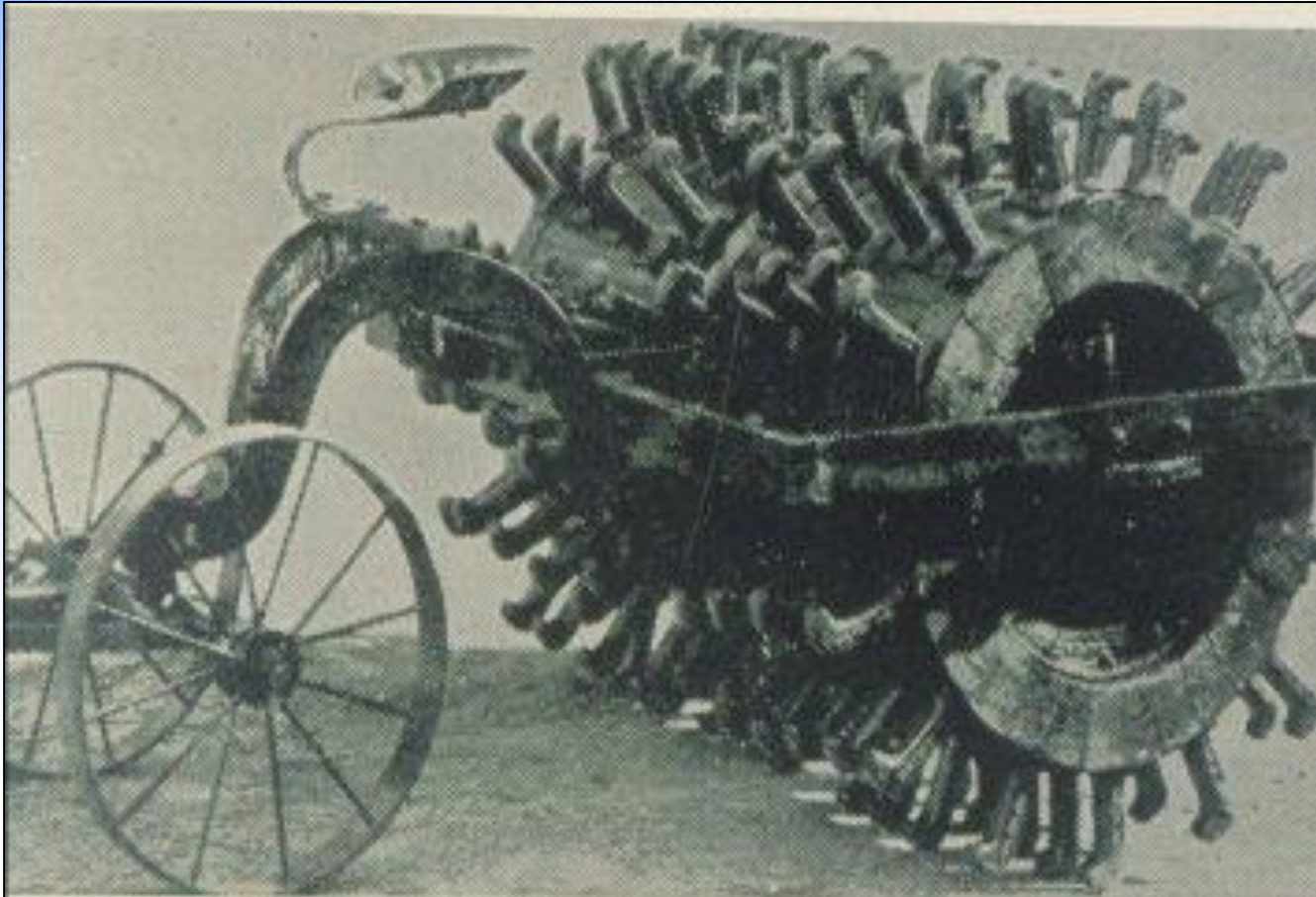
# Compactação no campo



[www.worldofstock.com](http://www.worldofstock.com)



# Rolo pé-de-carneiro



O rolo pé-de-carneiro foi patenteado em 1904.

From J. David Rogers  
University of Missouri-Rolla

O cilindro era preenchido com areia.

# Rolo Pé de Carneiro



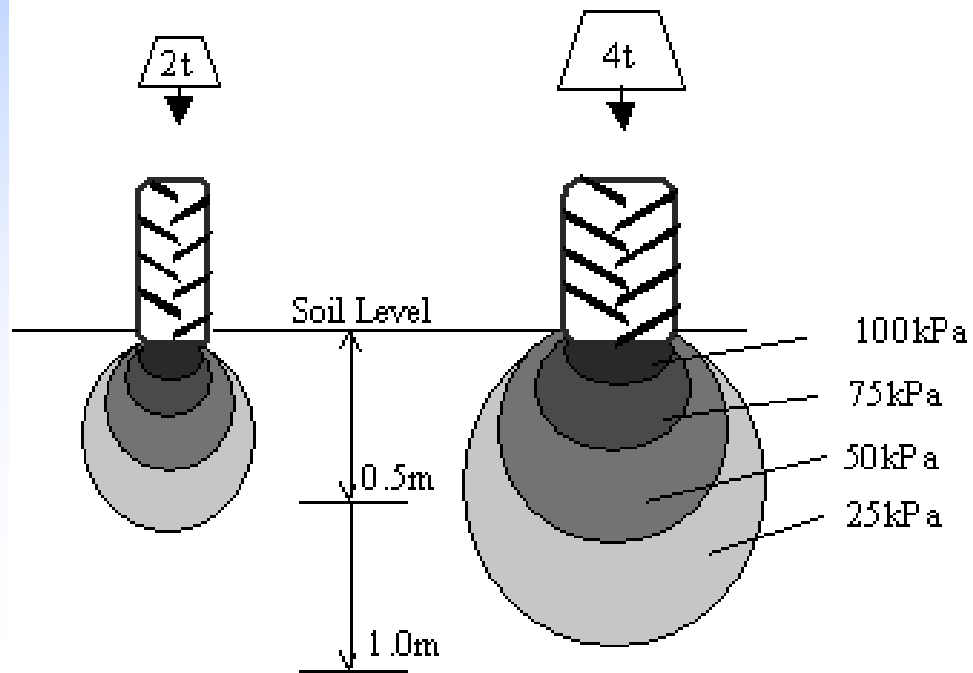
# Compactação Pneumática



**1.0 bar GP**

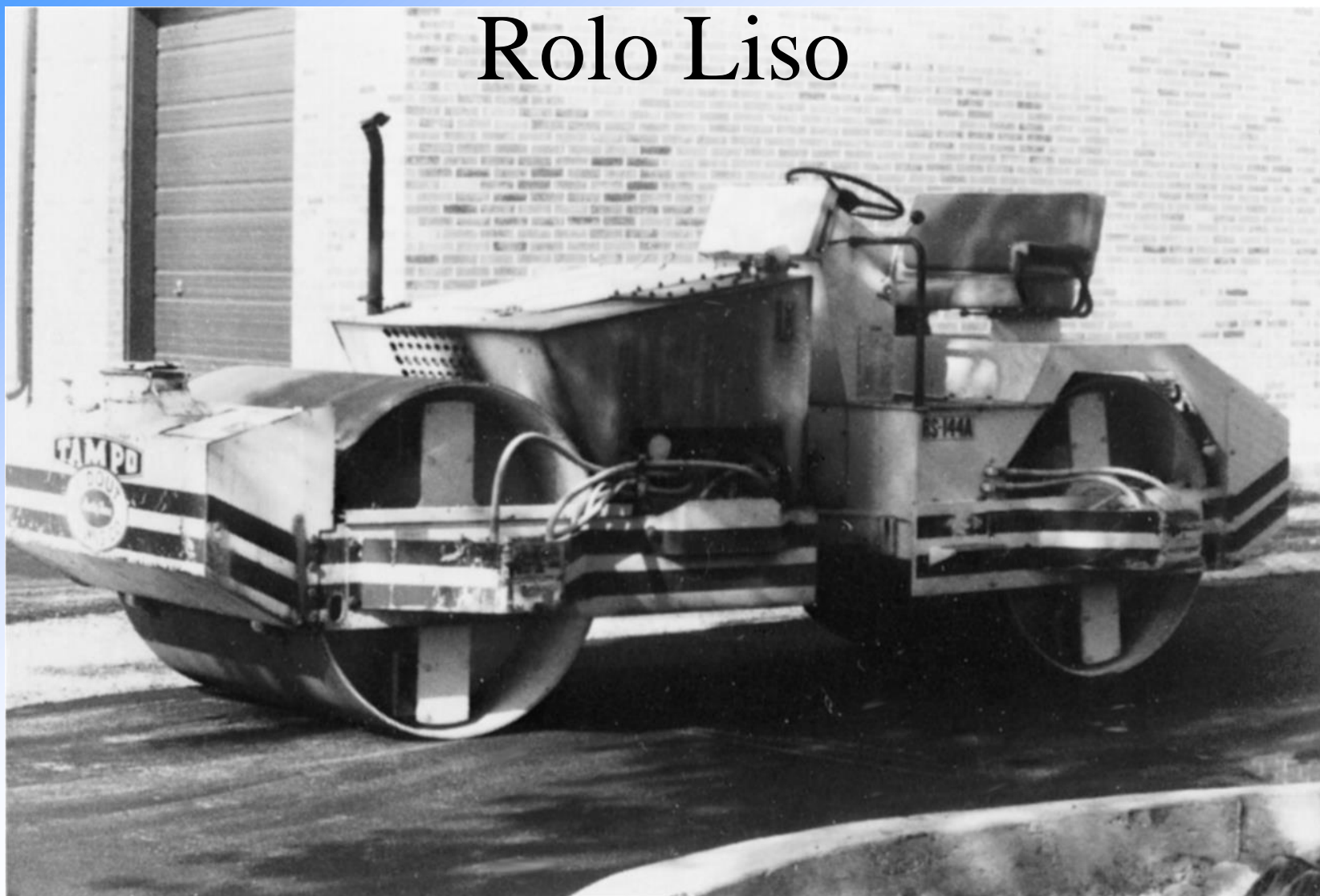
**1.0 bar GP**

1 bar = 100 kPa = 14,5 psi





# Rolo Liso



**Figure 6.15** Smooth-wheel roller (*Ingram Compaction LLC*)

# Equipamentos



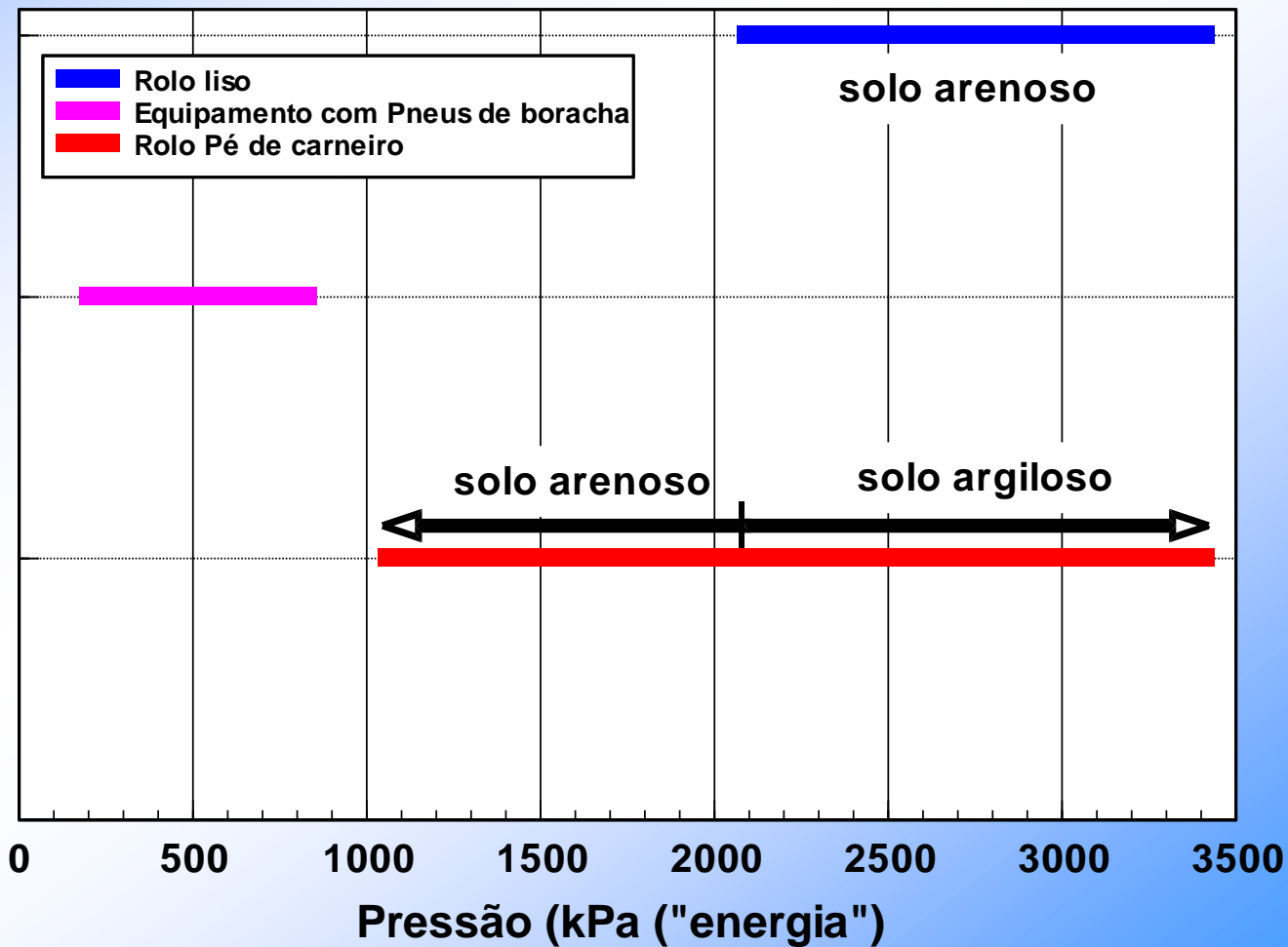
# Rolo Liso



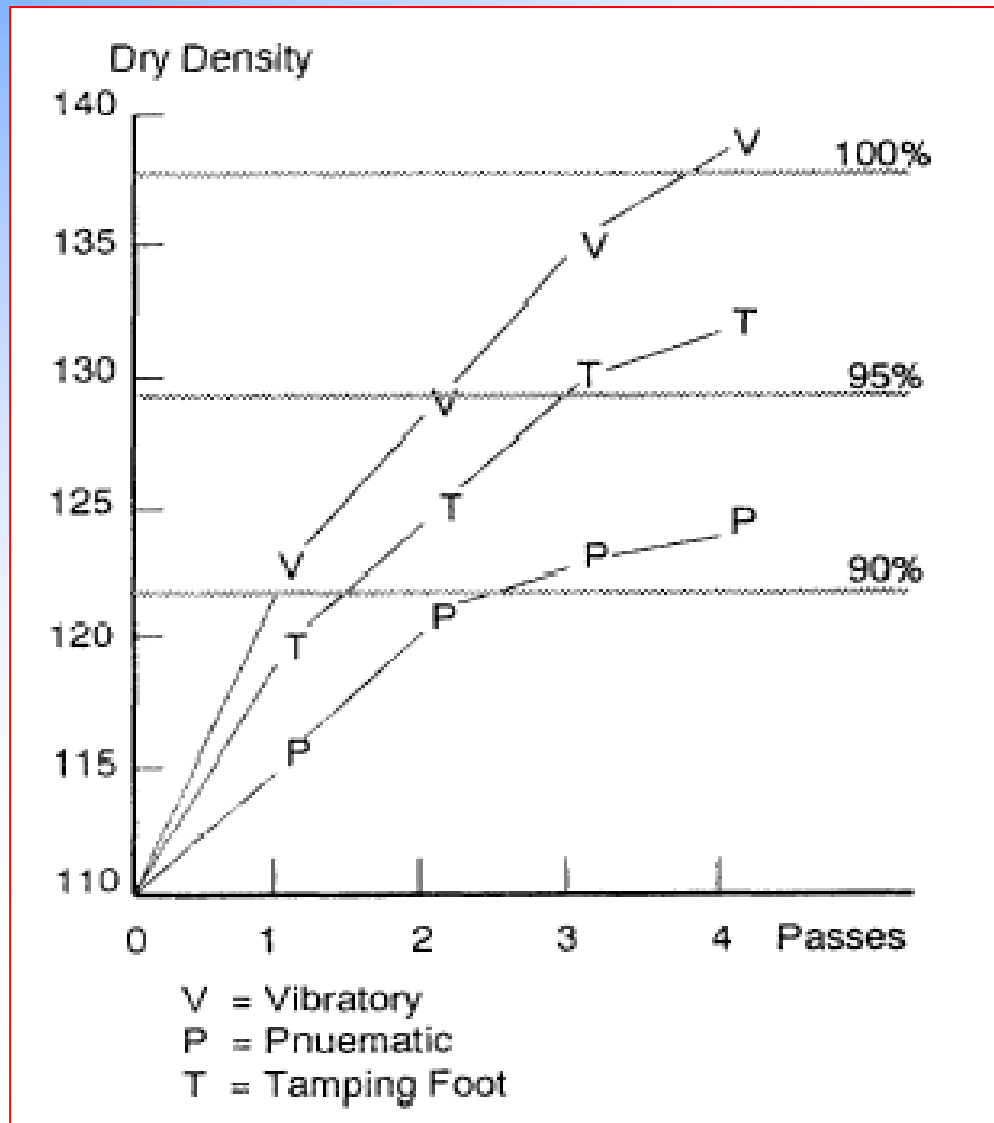
# Compactação por impacto



# Aplicabilidade e escolha ("energia" e tipo de solo)

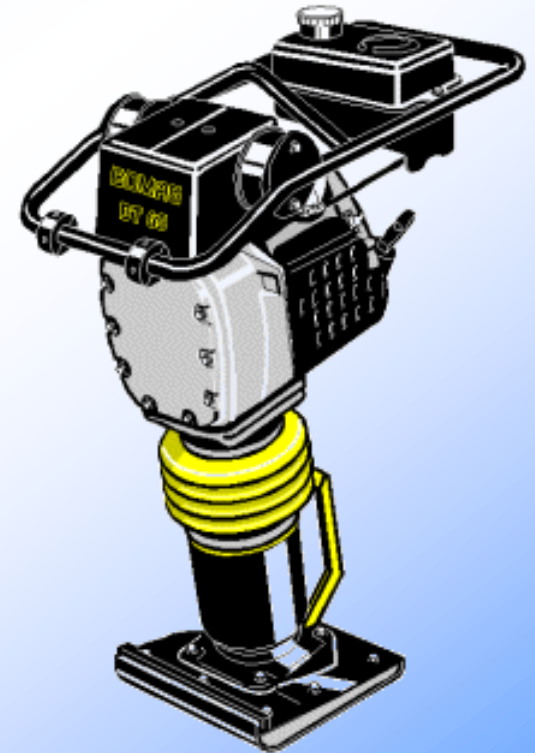


# Aterro Experimental

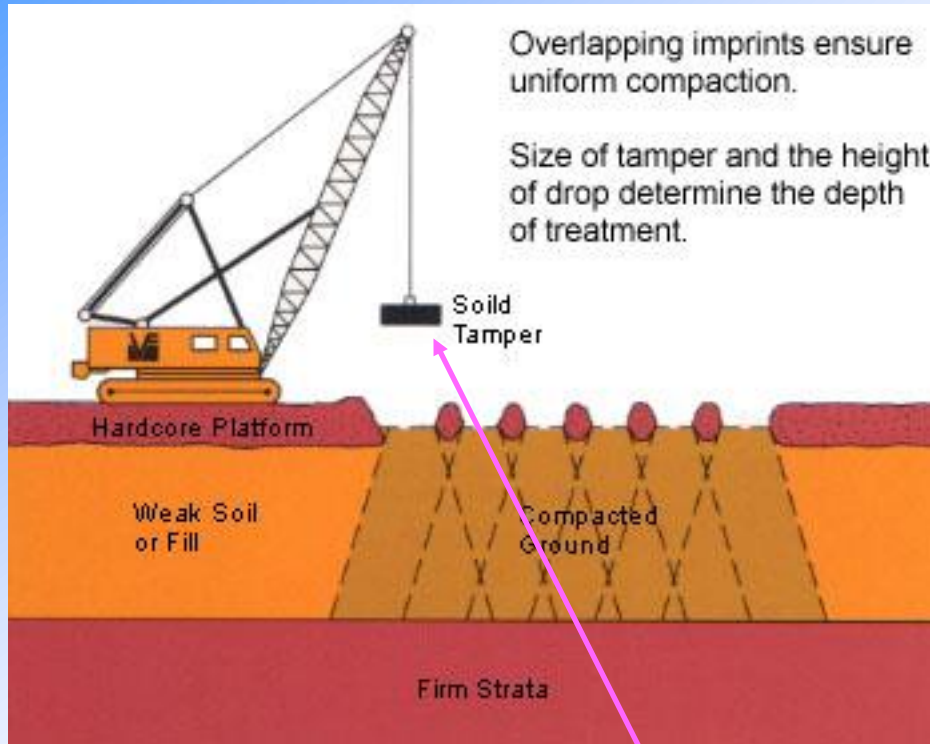


**Material Granular**

# Manual



# Compactação Dinâmica



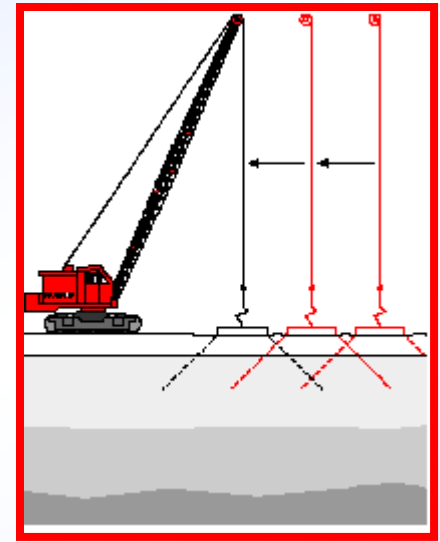
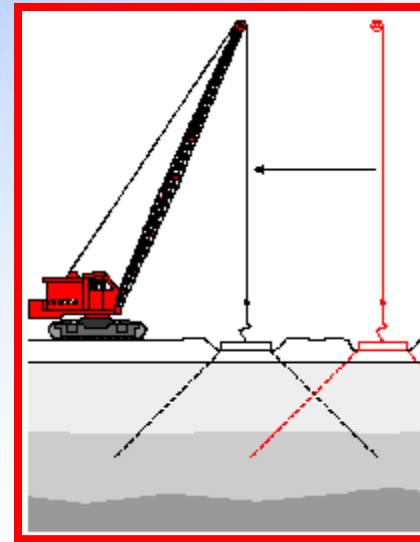
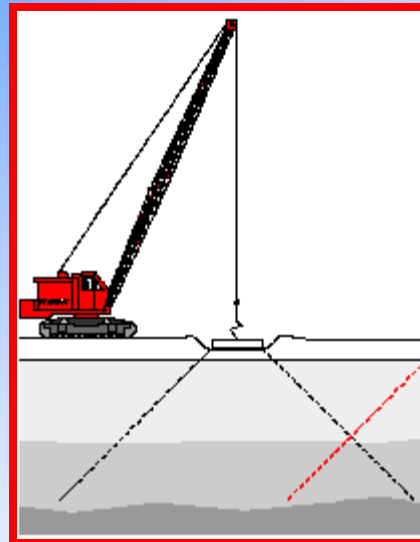
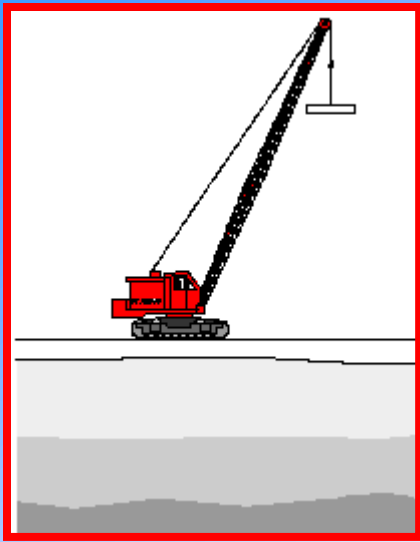
## Martelo

Massa = 5-30 t

Queda = 10-30 m



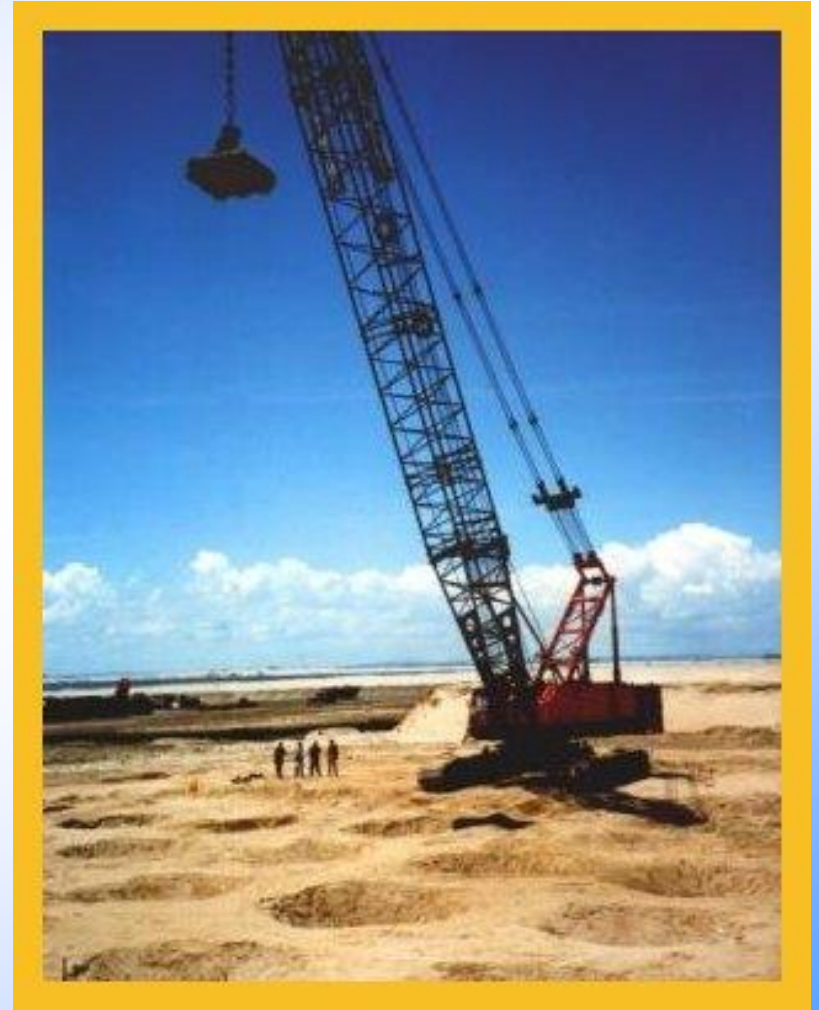




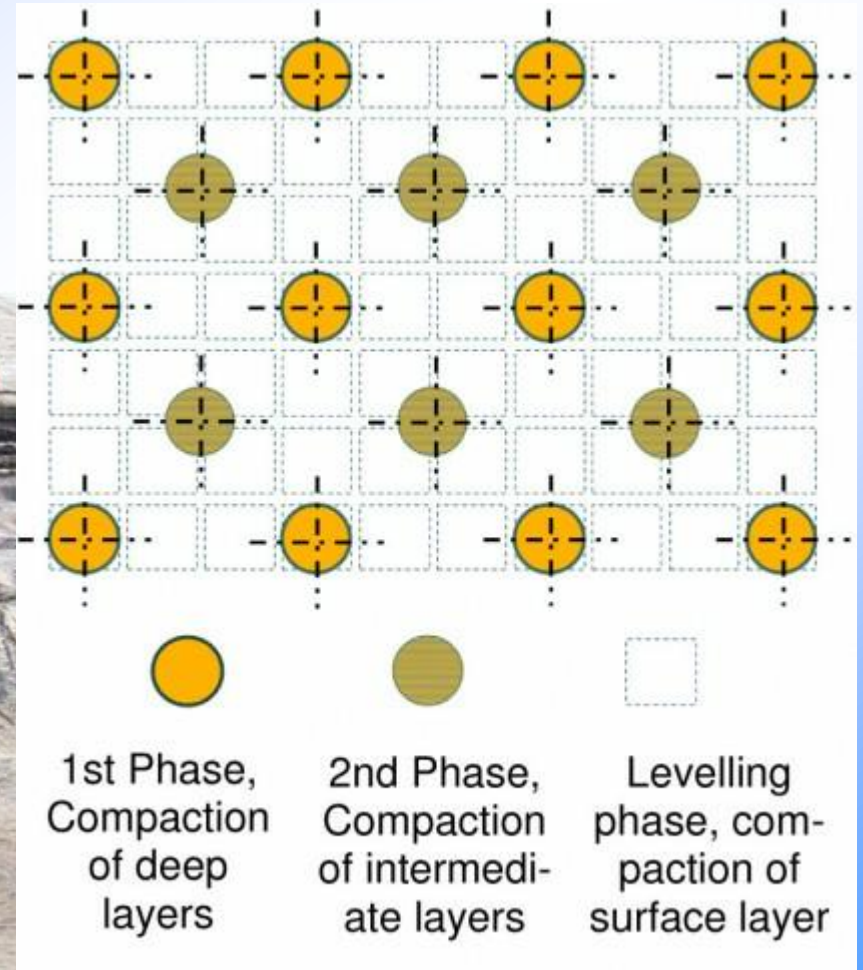
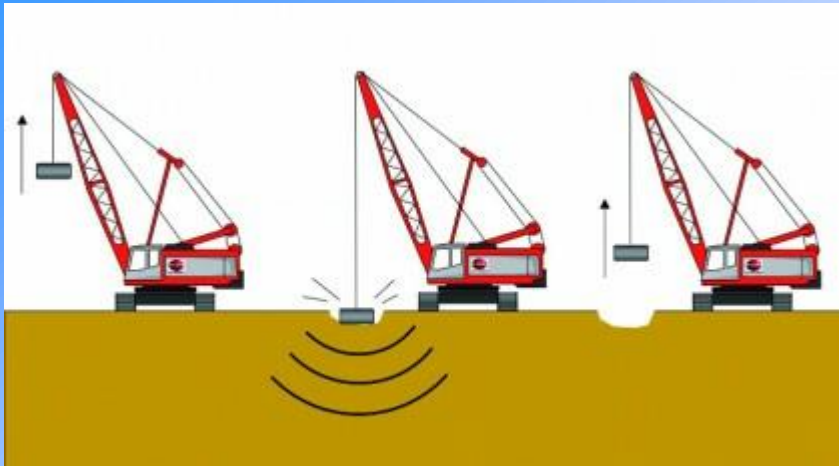
# Compactação Dinâmica



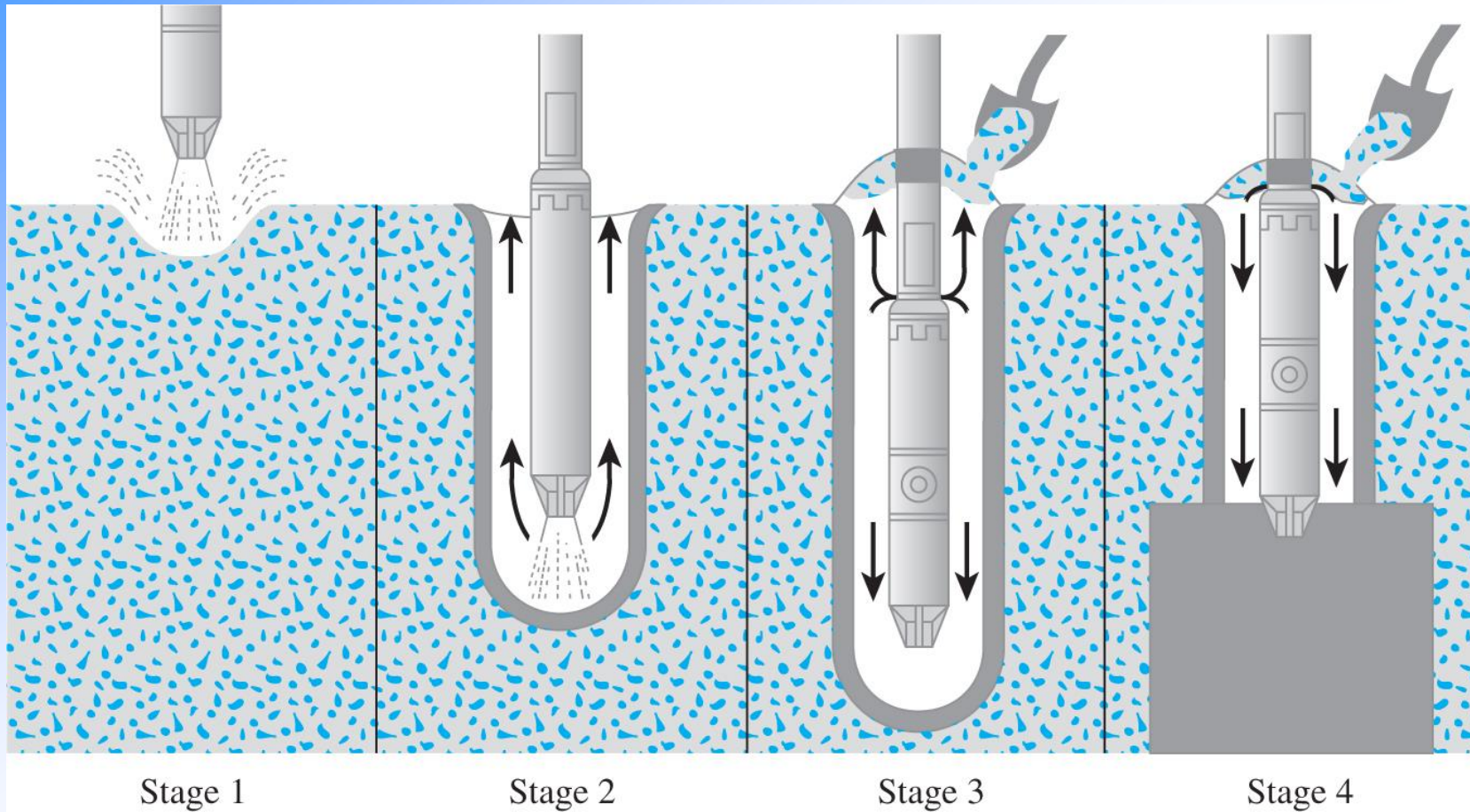
# Compactação dinâmica



# Compactação Dinâmica

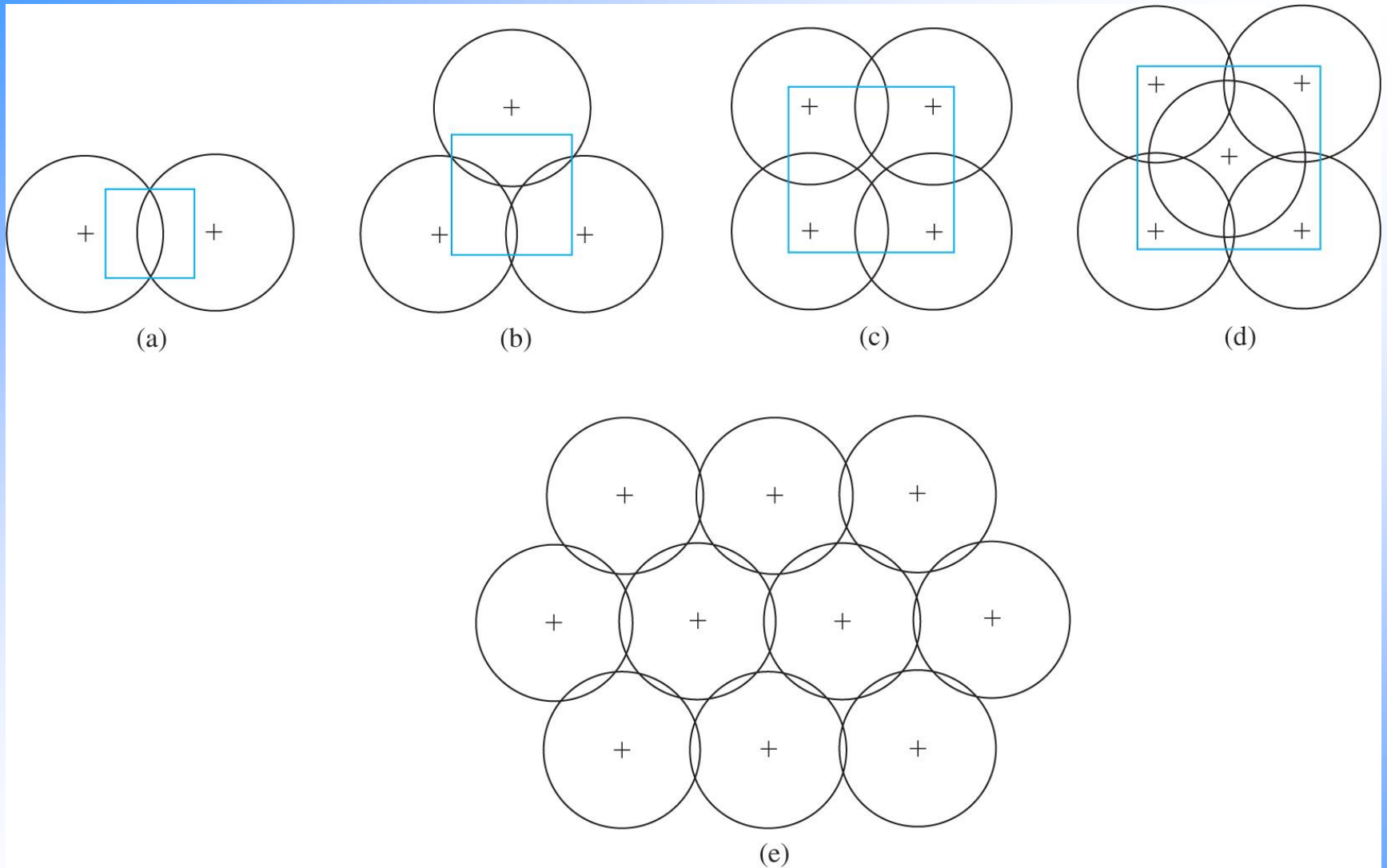


# Areias: só com vibração



**Figure 6.32** Compaction by vibroflotation process (After Brown, 1977. With permission from ASCE.)

por exemplo



**Figure 6.33** Typical patterns of Vibroflot probe spacings for a column foundation (a, b, c, and d) and for compaction over a large area (e)