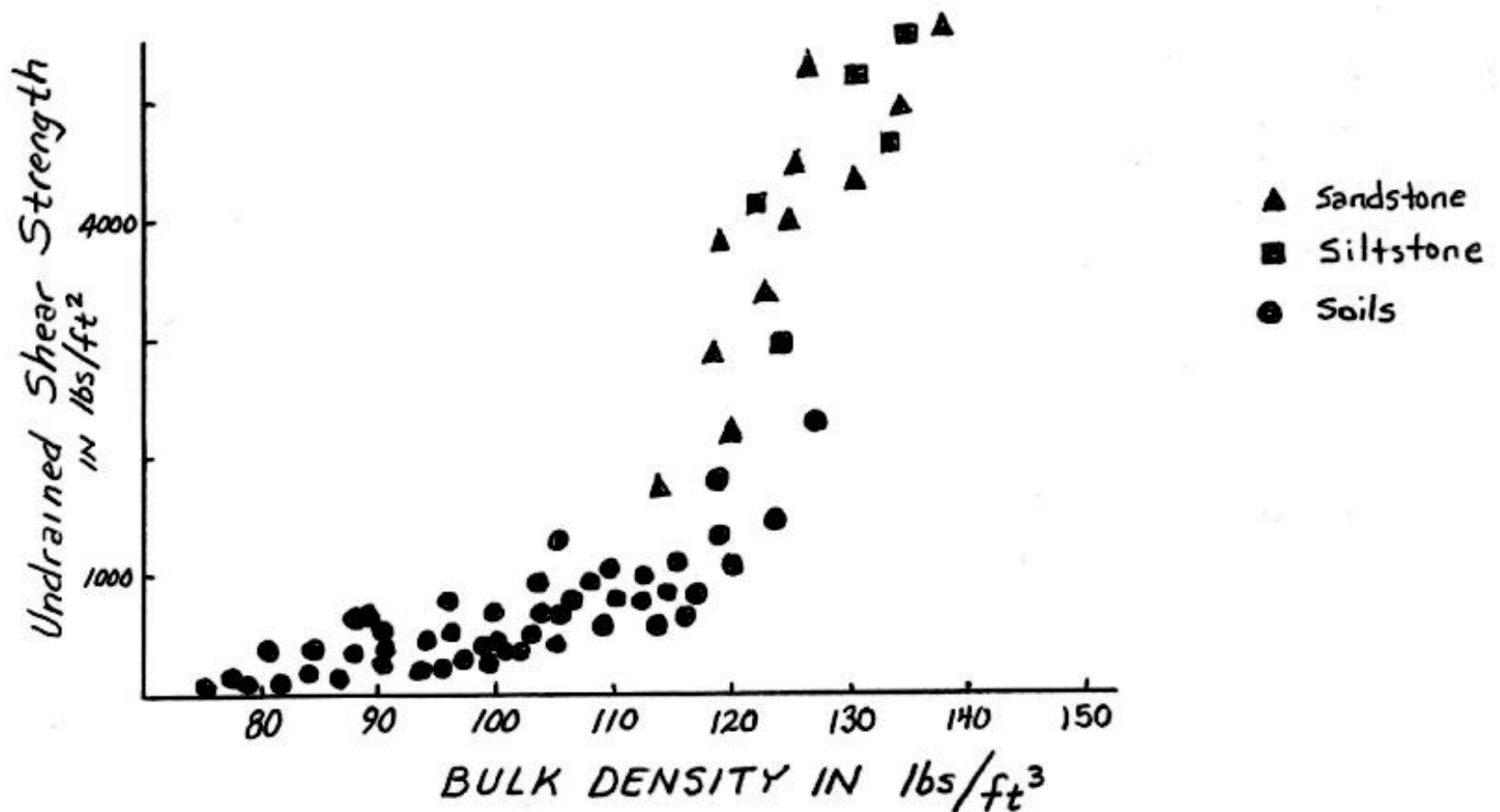


Compactação dos Solos

Fernando A. M. Marinho
2012

Por que Compactar os Solos?



Objetivos da Compactação

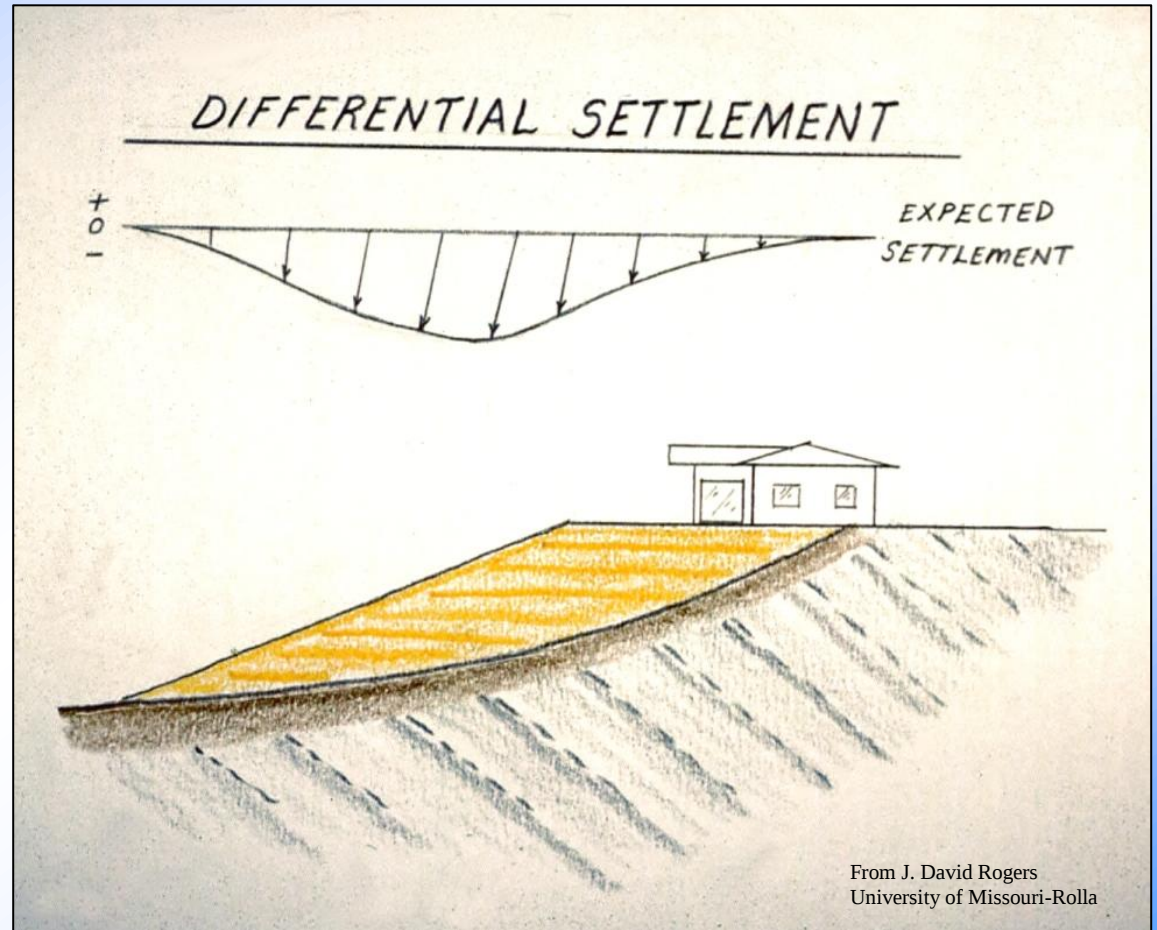
- Aumentar a capacidade suporte do solo.
- Diminuir os recalques indesejados nas estruturas.
- Controlar a variação de volume.
- Reduzir ou controlar a condutividade hidráulica.
- Aumentar a estabilidade de taludes.

Capacidade Suporte



From J. David Rogers
University of Missouri-Rolla

Recalques Diferenciais



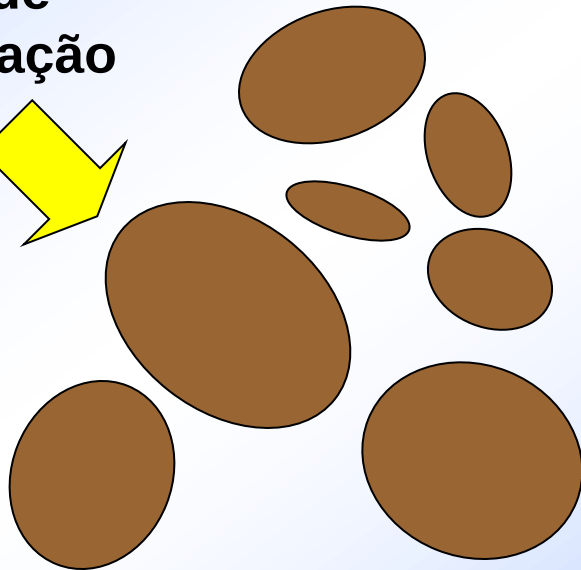
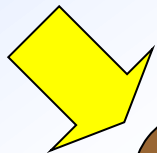
Fatores que Controlam a Compactação

1. Energia de compactação.
2. Tipo de solo e distribuição granulométrica.
3. Teor de umidade.
4. Densidade seca (Peso específico seco).

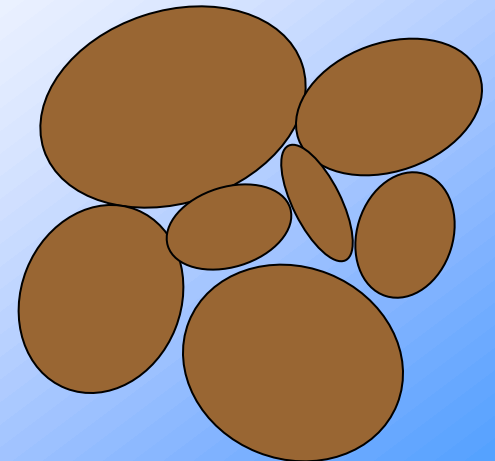
O que é Compactação?

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

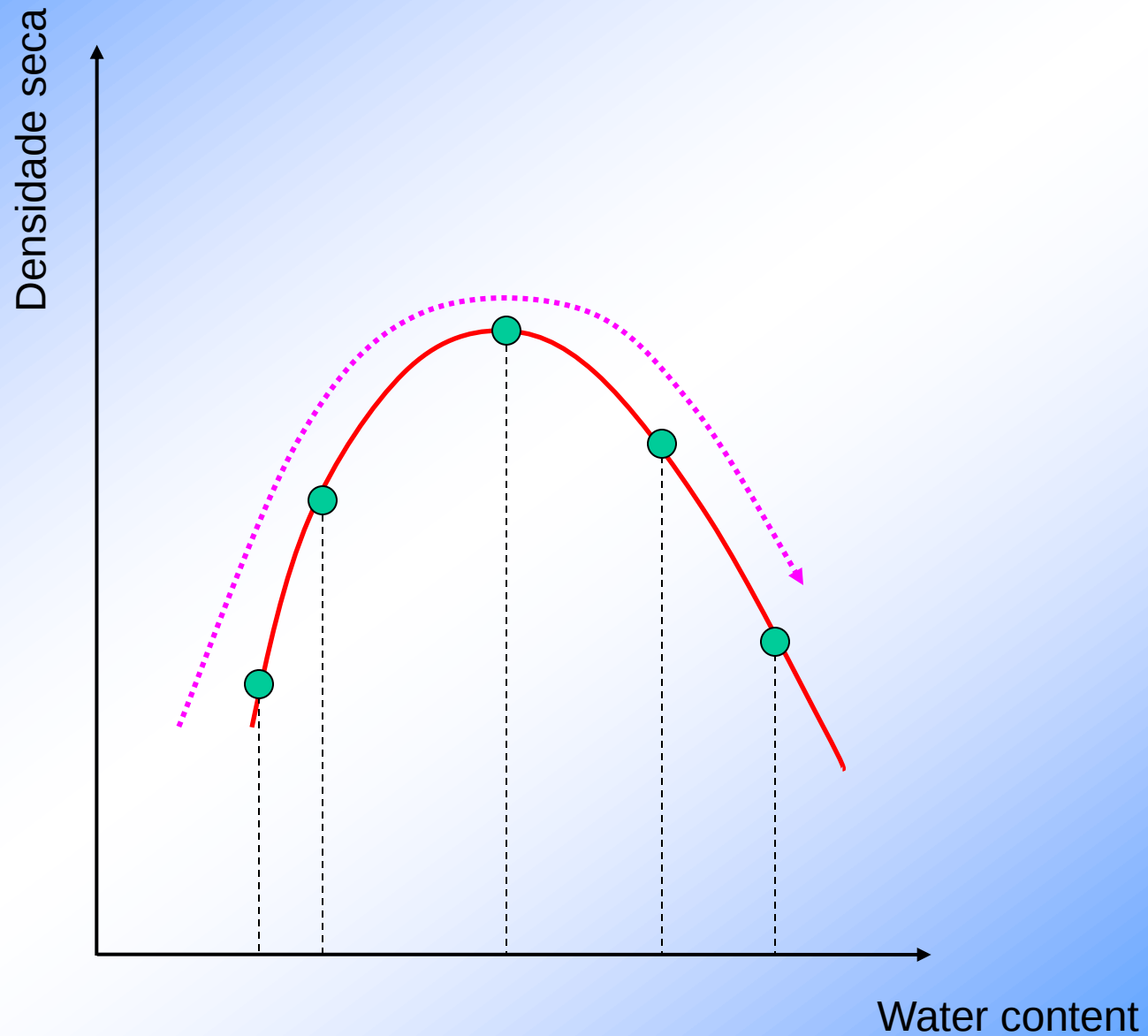
Esforço de compactação



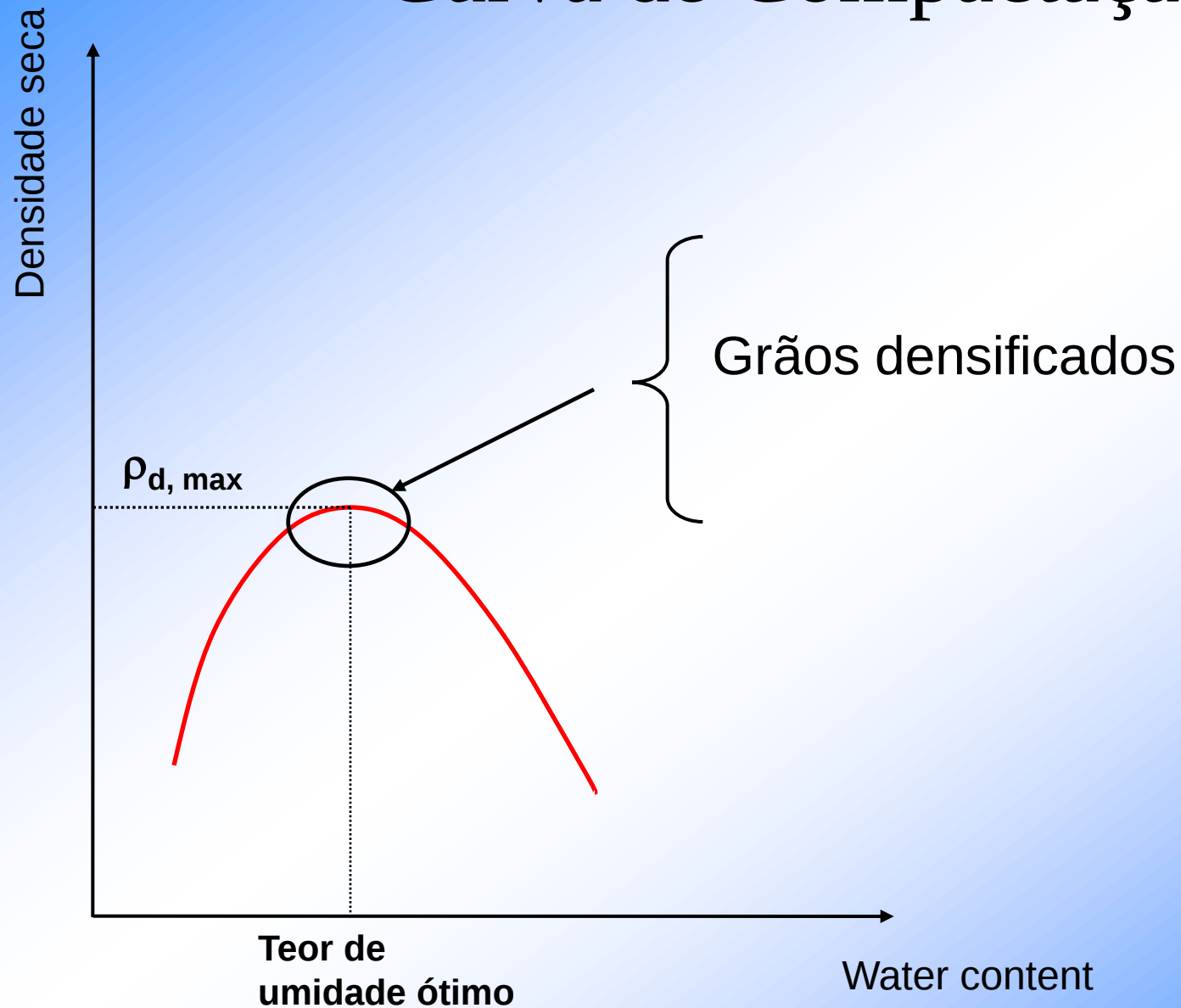
+ água =



Curva de Compactação

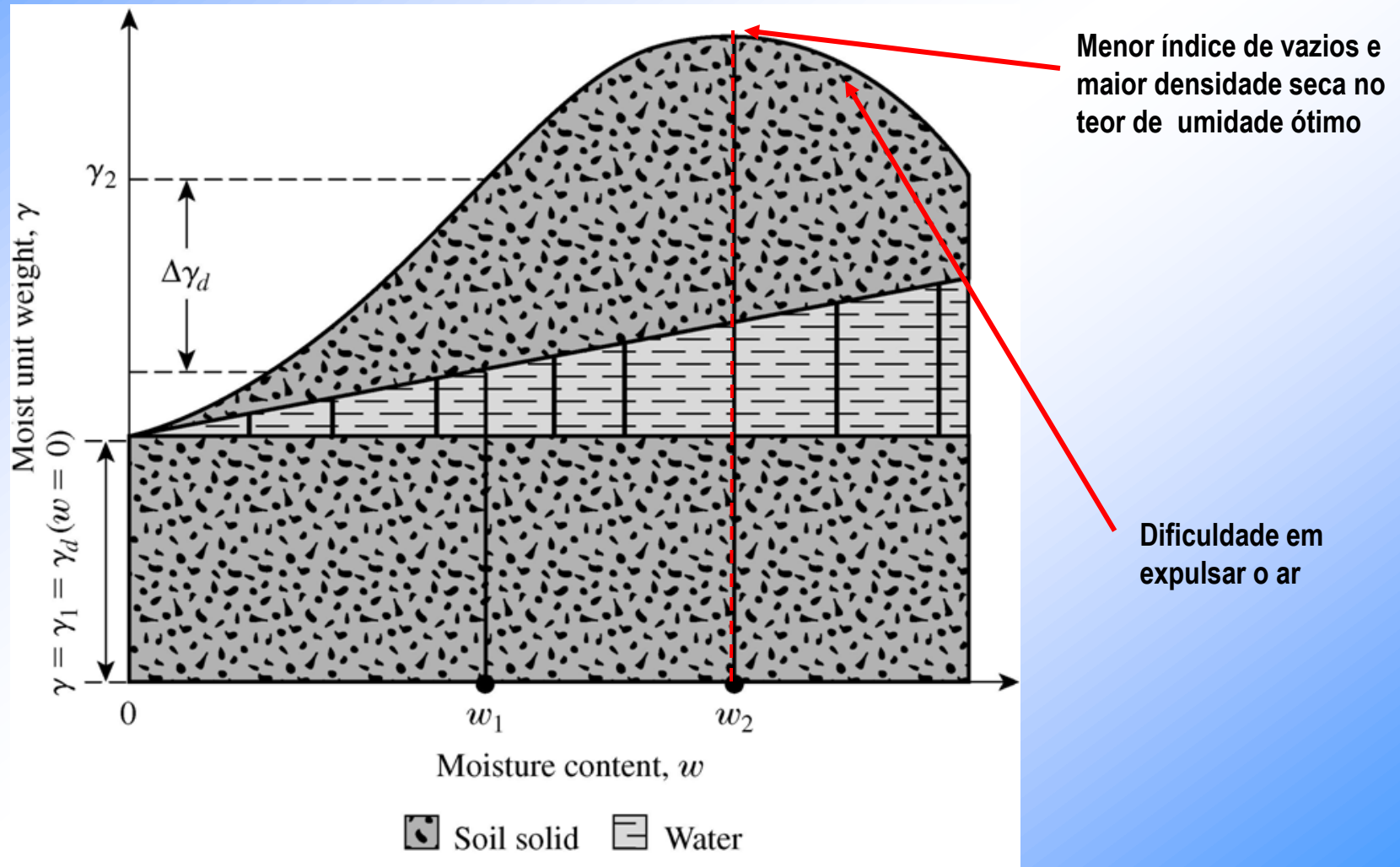


Curva de Compactação

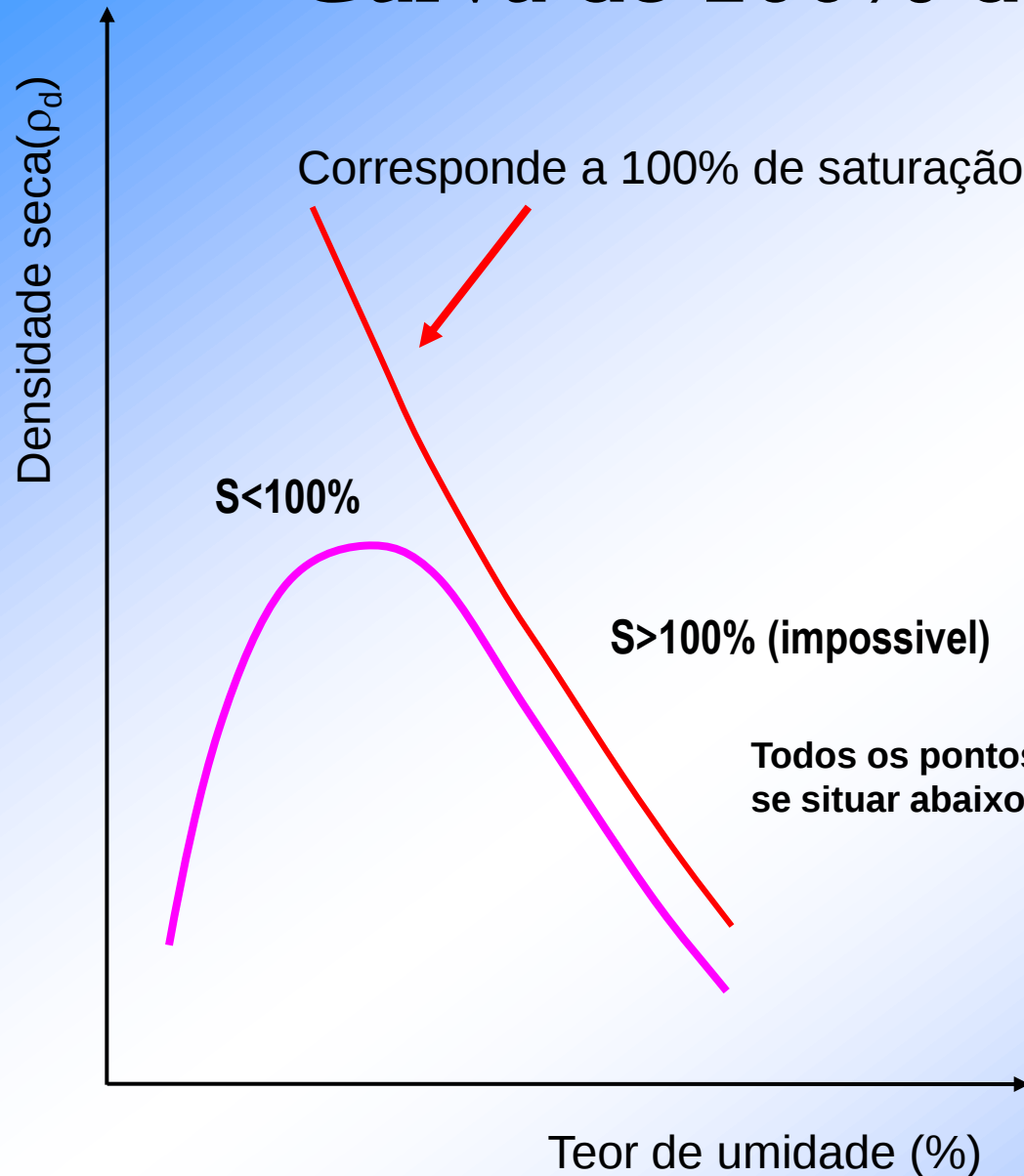


Curva de Compactação

O que ocorre com as três fases durante o processo de compactação?



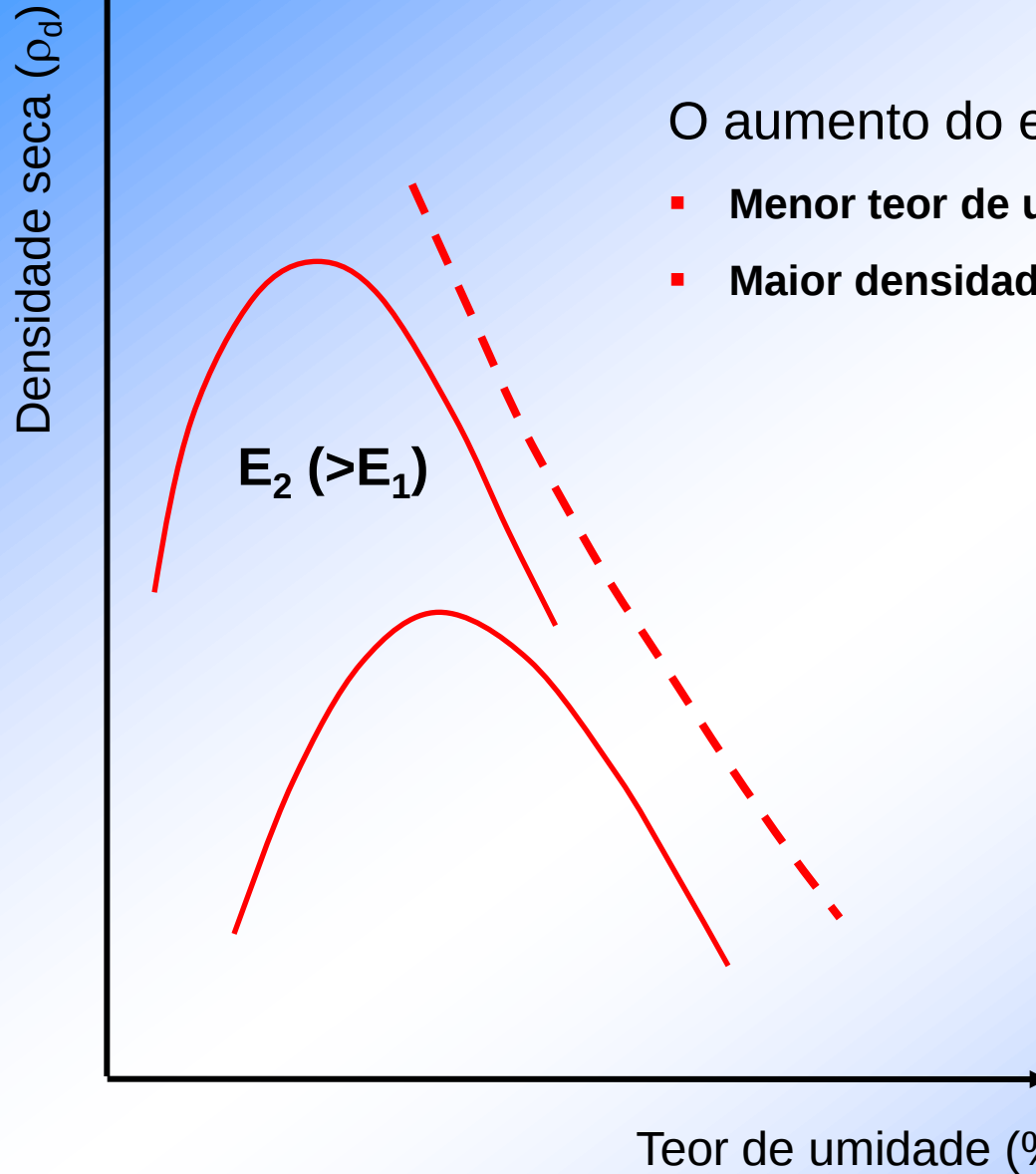
Curva de 100% de saturação



$$\rho_d = \frac{G_s \rho_w}{1 + w G_s}$$

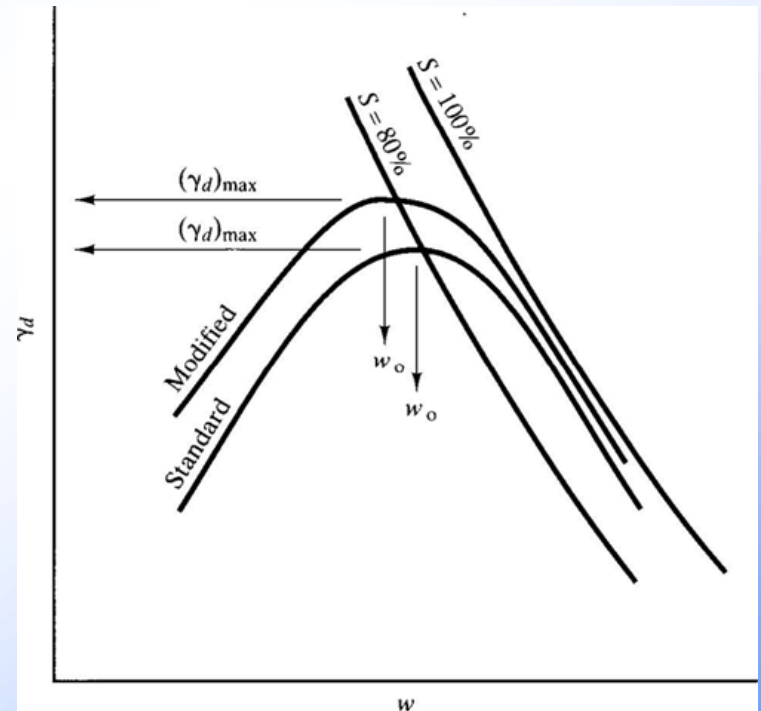
Todos os pontos da curva de compactação devem se situar abaixo da curva de saturação.

Efeito do Esforço de Compactação

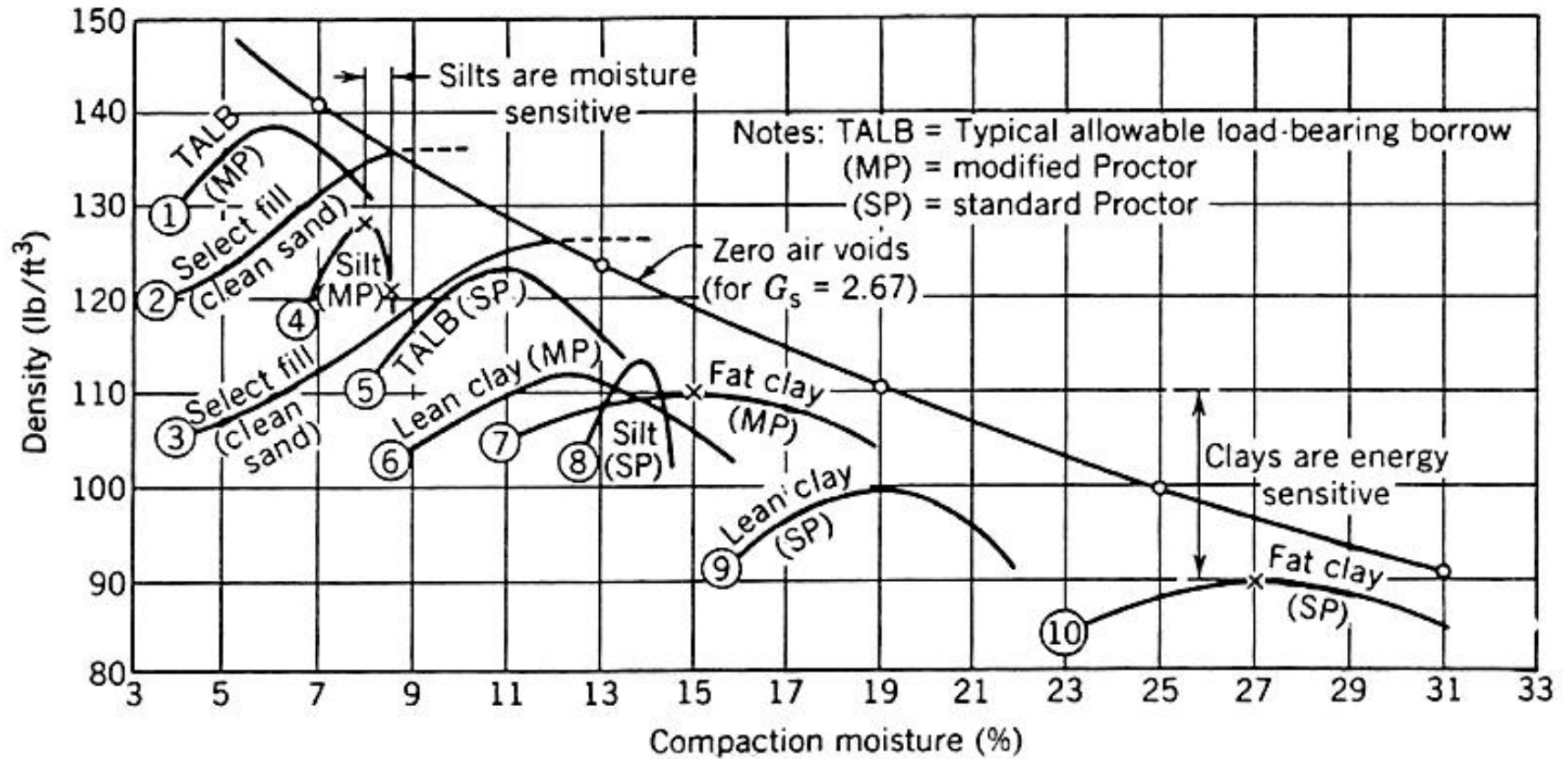


O aumento do esforço de compactação causa:

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

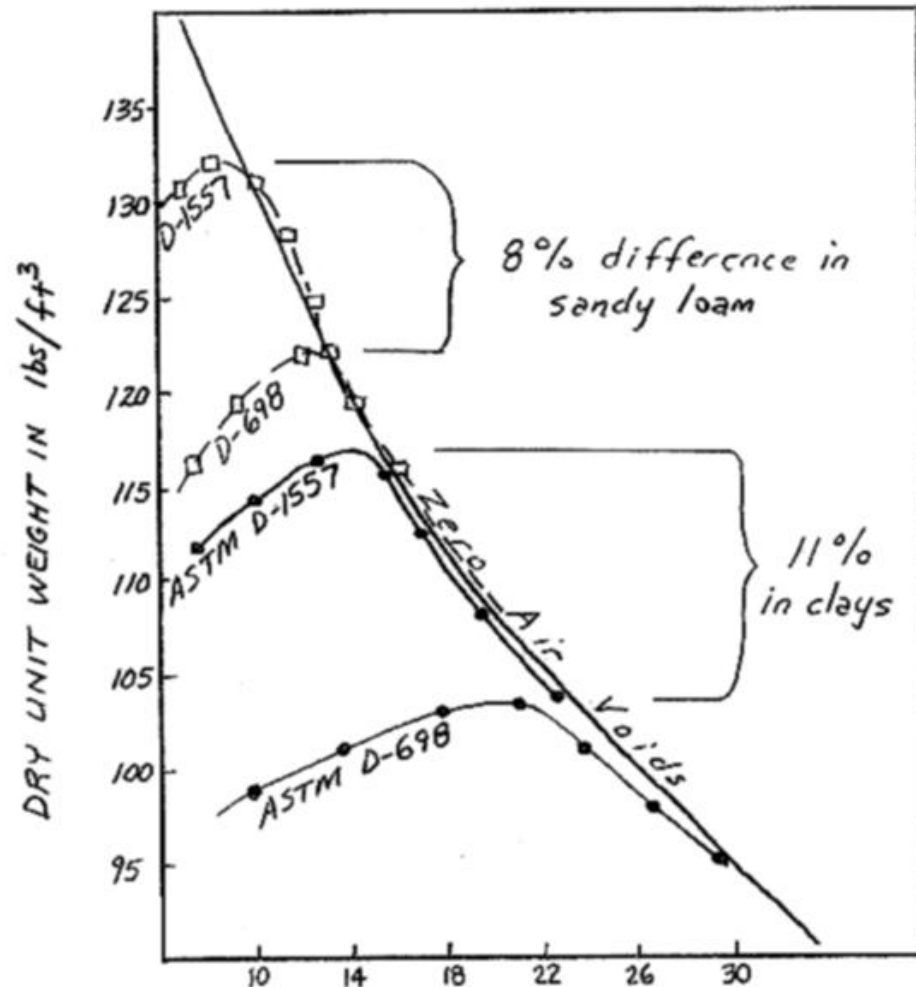


Efeito do Tipo de Solo e Esforço de Compactação

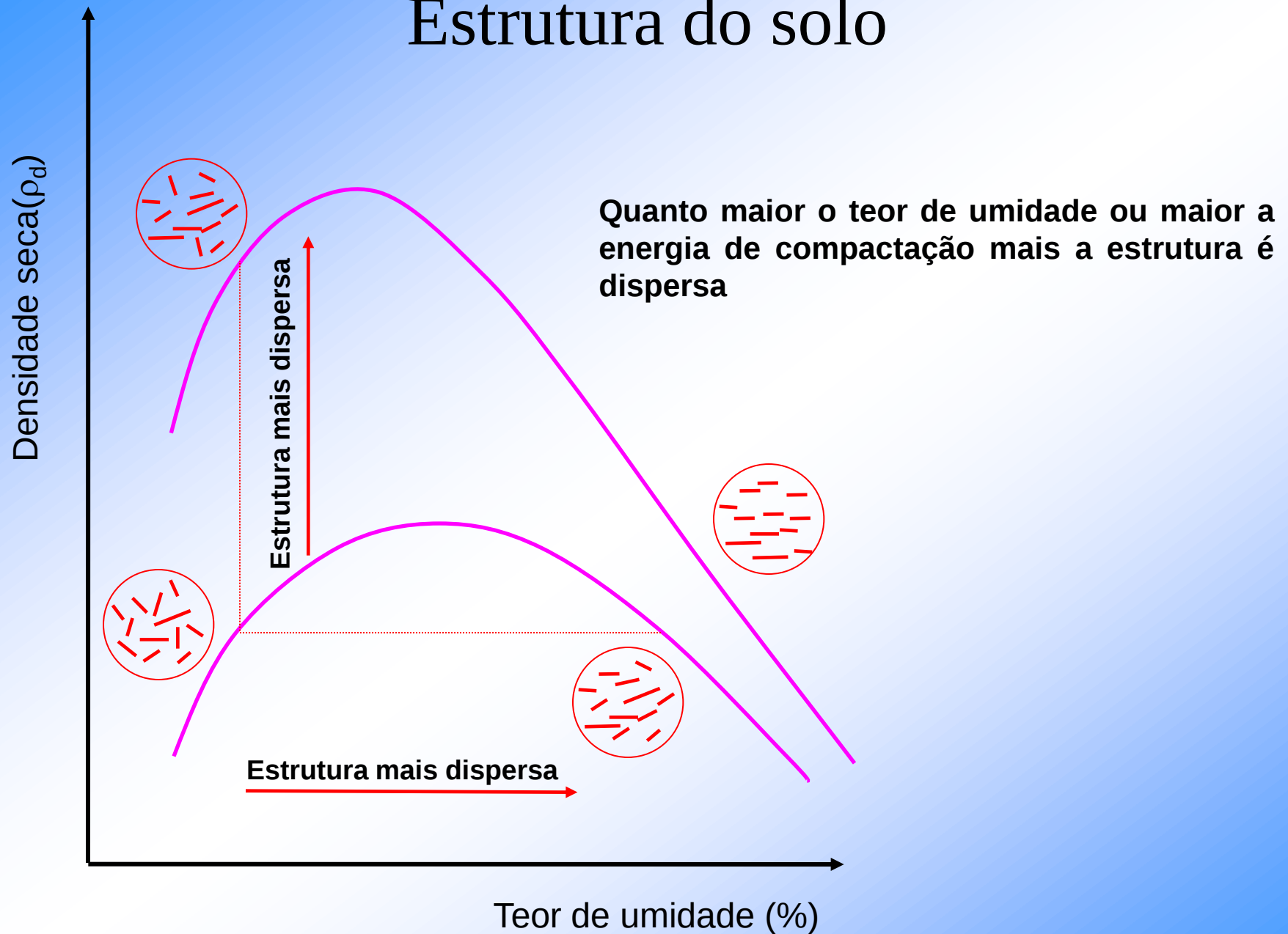


Efeito do Tipo de Solo e Esforço de Compactação

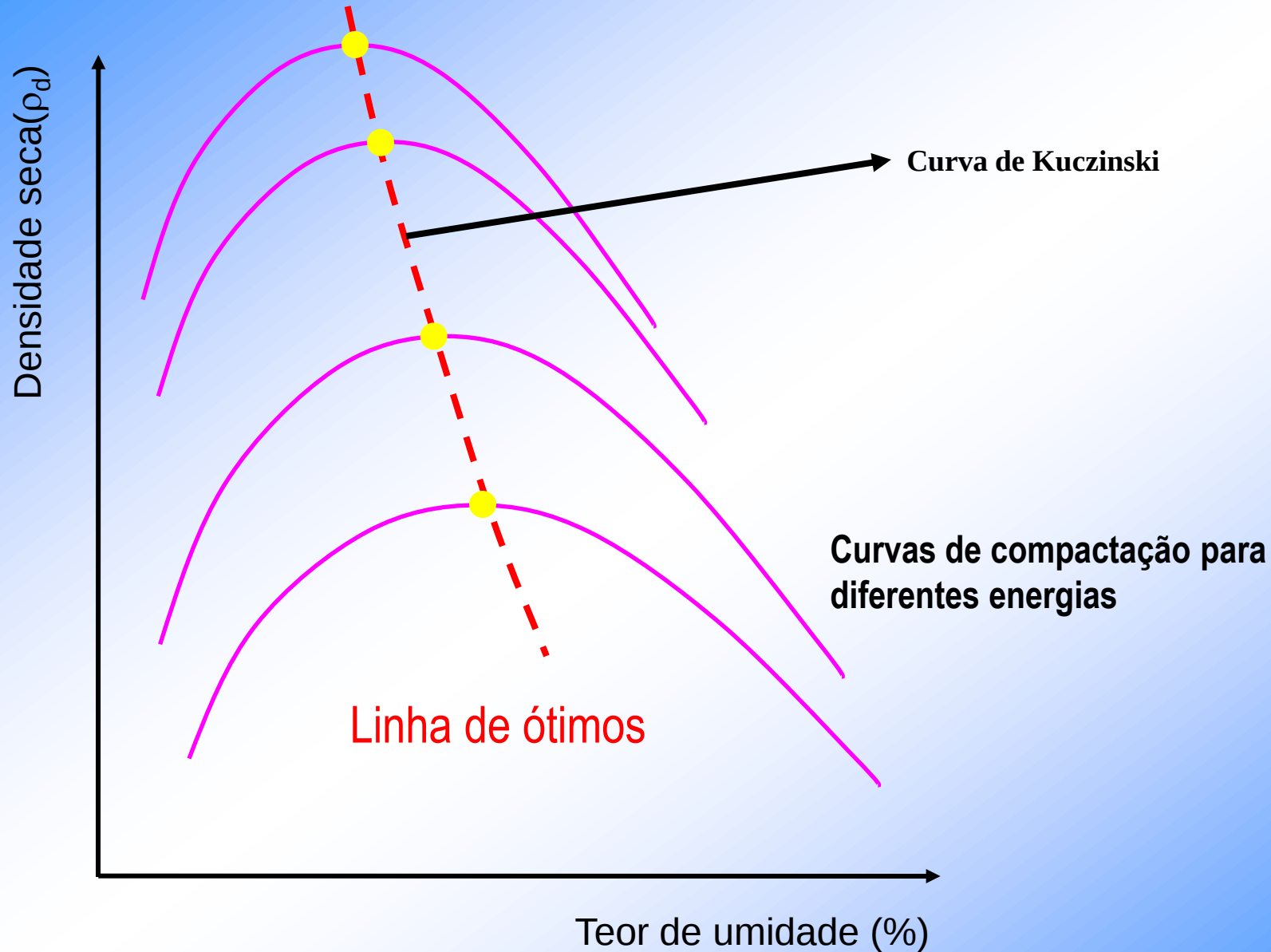
COMPARISON BETWEEN ASTM D-698-70 and ASTM D-1557-78



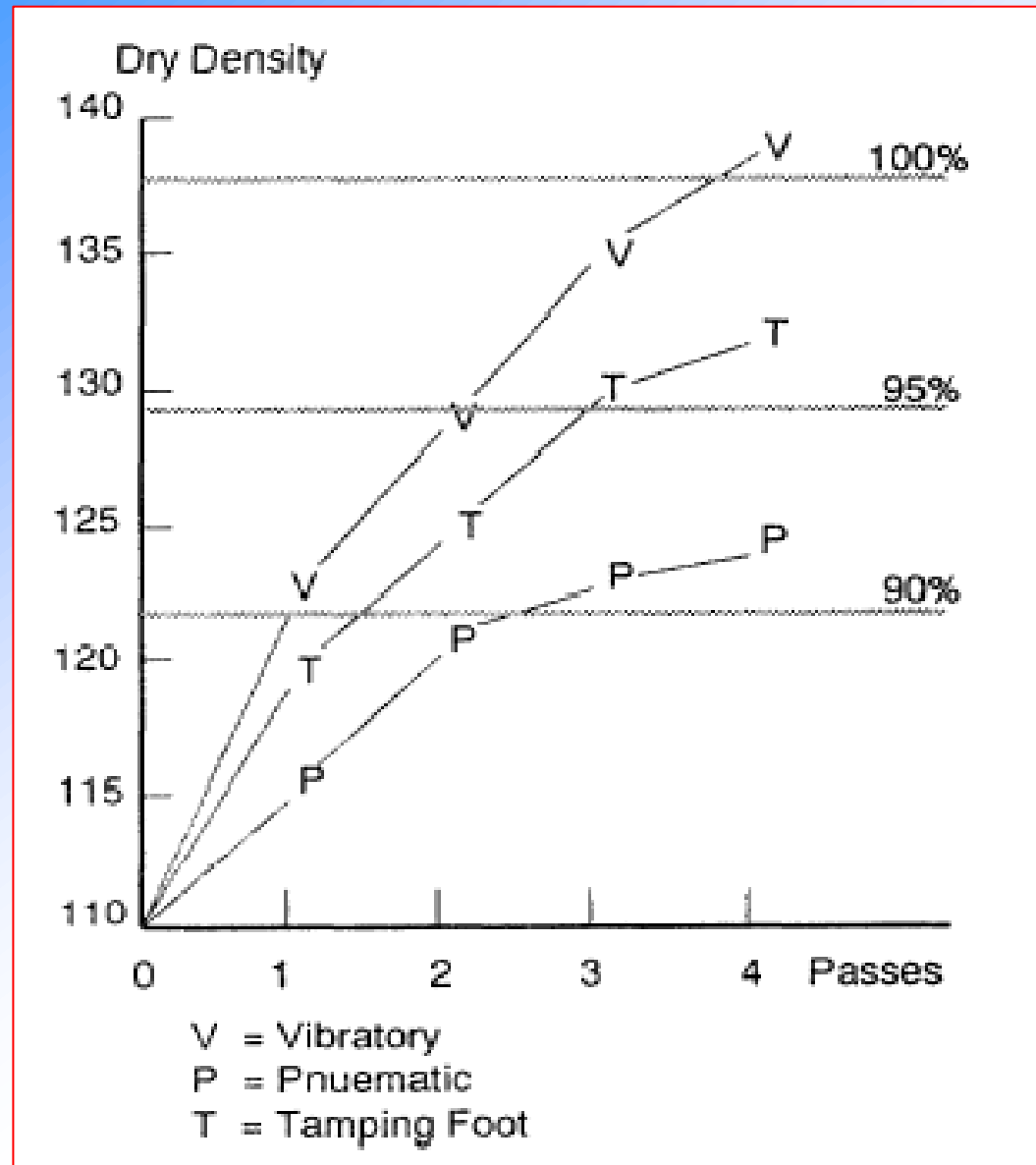
Estrutura do solo



Linha de Ótimos

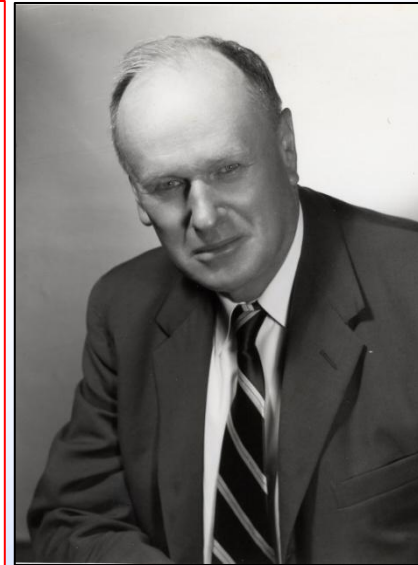
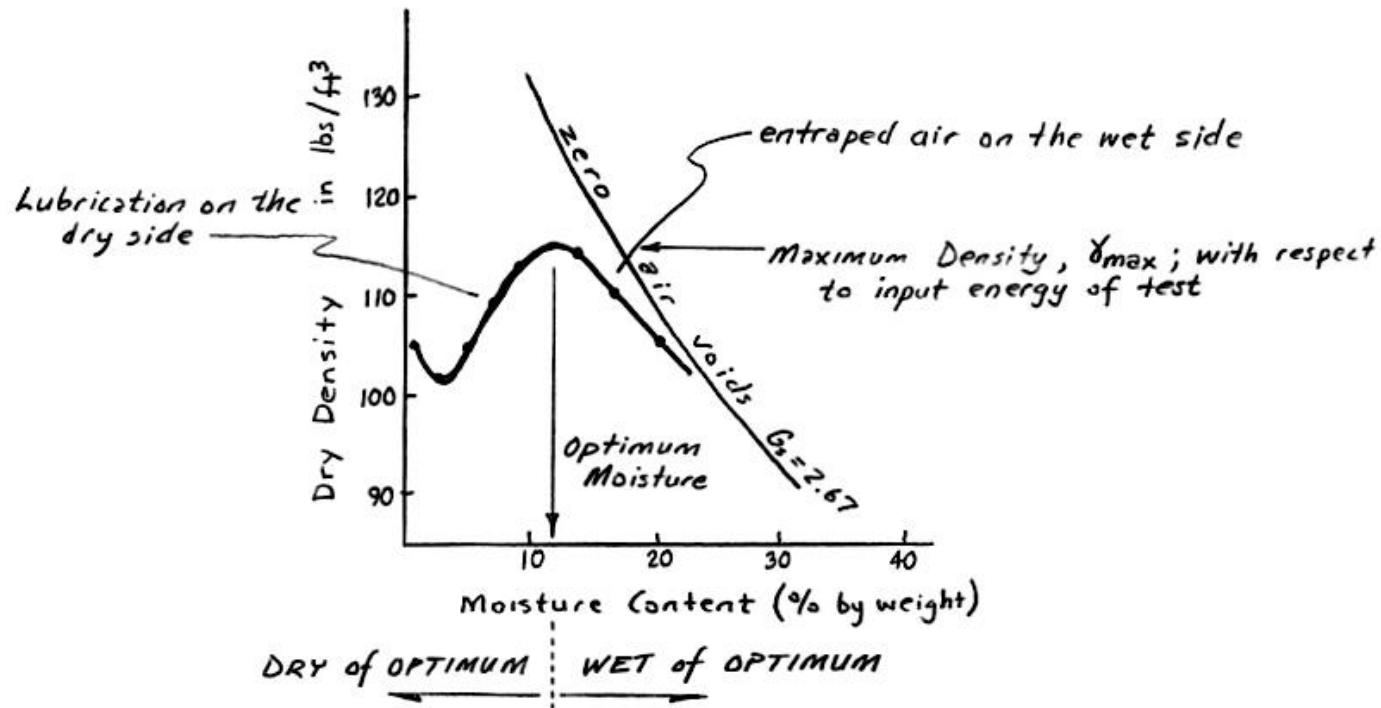


Aterro Experimental



Material Granular

Ralph Proctor



Ralph Proctor 1894-1962

Ensaio de Compactação de laboratório

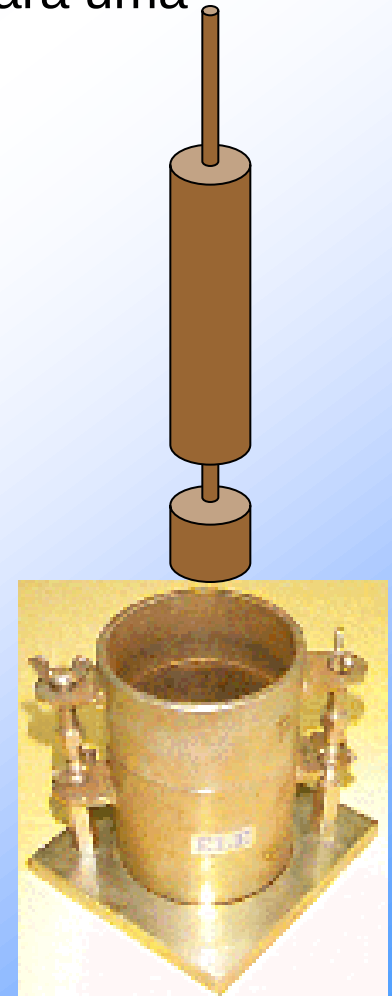
O objetivo do ensaio é obter a curva de compactação e definir o teor de umidade ótimo e densidade seca máxima para uma energia especificada.

Proctor Normal:

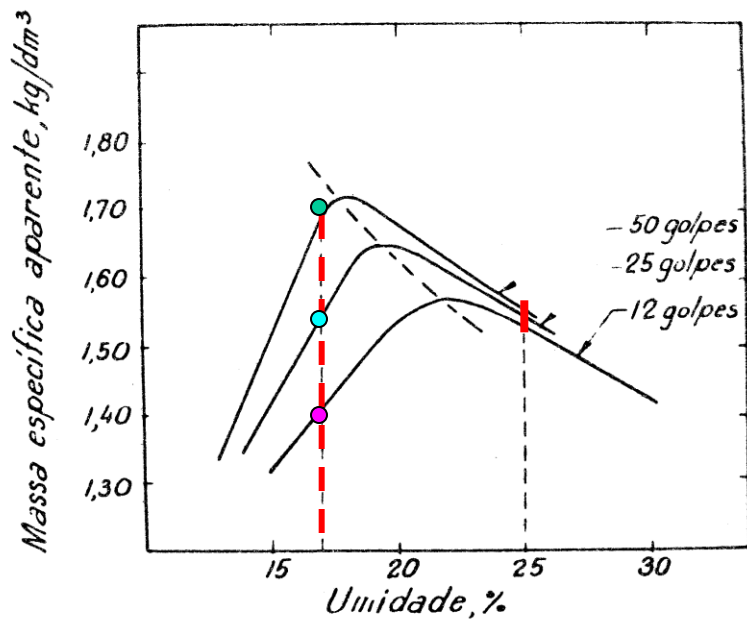
- 3 camadas
- 26 golpes por camada
- Soquete de 2.5 kg
- Altura de queda 305 mm

Proctor Modificado:

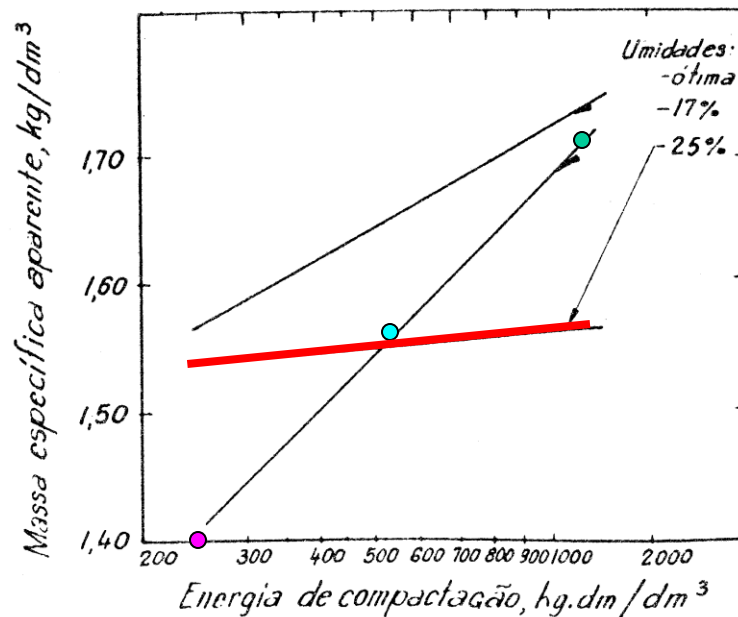
- 5 camadas
- 27 golpes por camada
- Soquete de 4.5 kg
- Altura de queda 457 mm



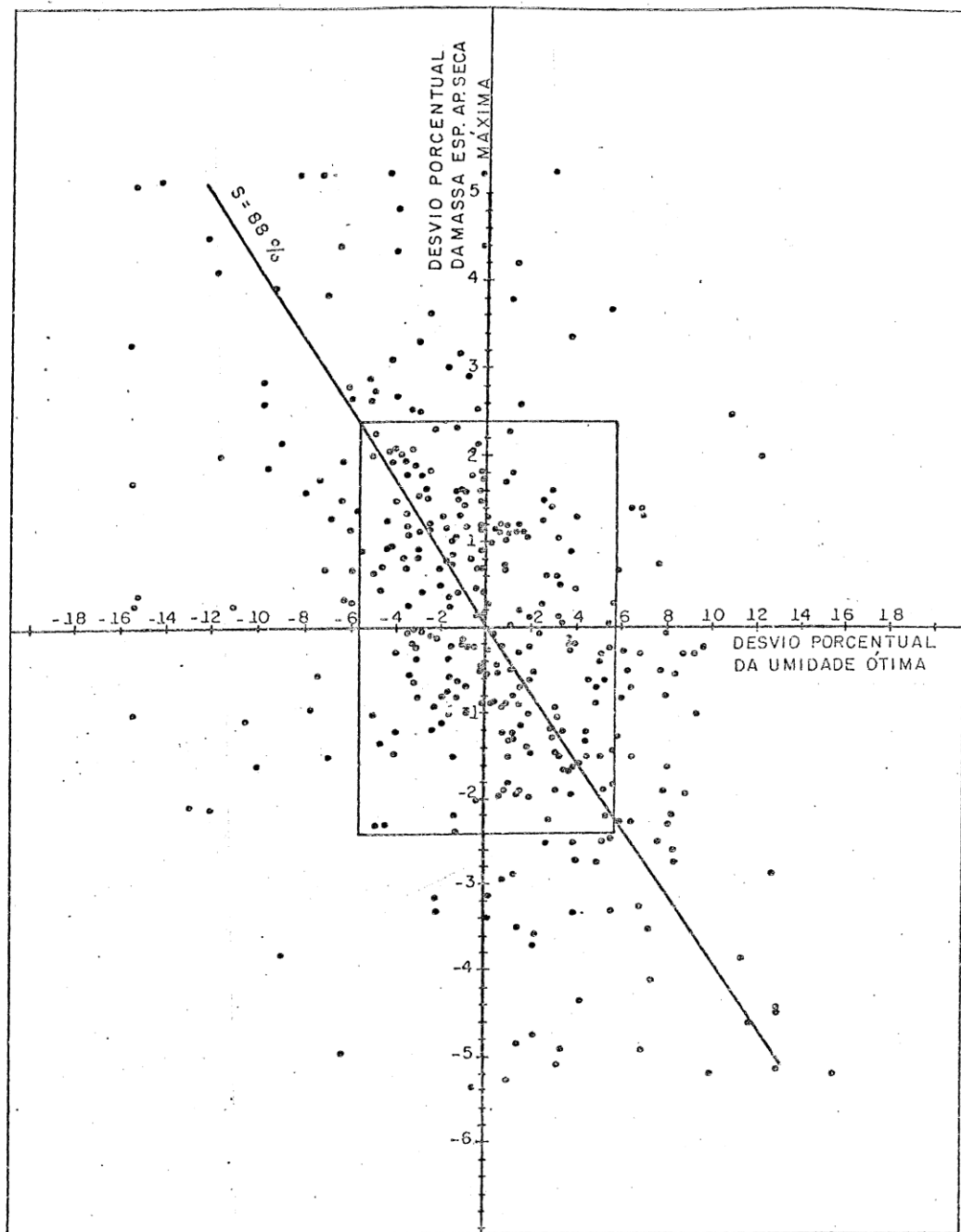
Volume do molde 1000 ml



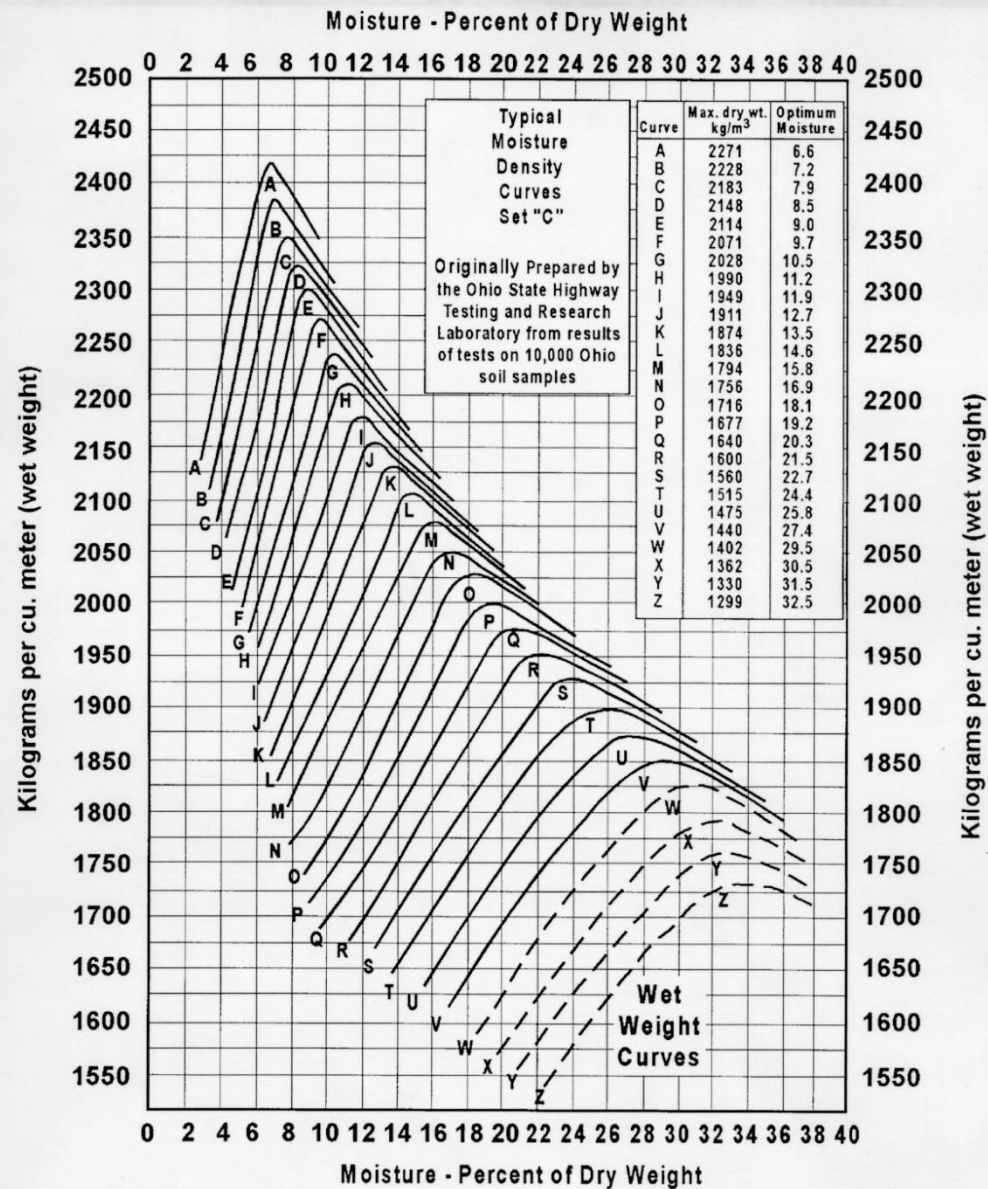
Curvas de compactação com três energias.



Variação da massa específica com a energia de compactação para três teores de umidade.



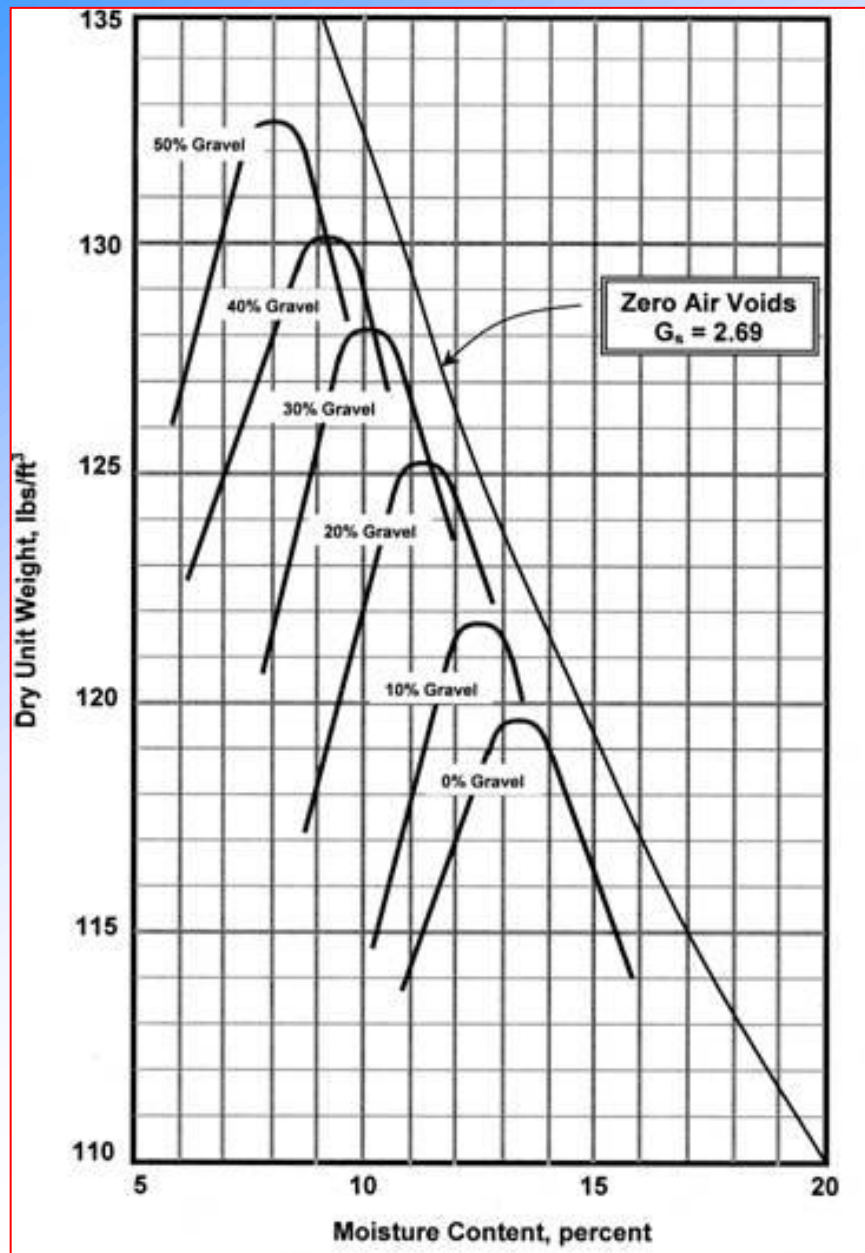
Desvio percentual do teor de umidade ótimo versus desvio percentual de densidade seca máxima.



* Computer re-drawn February 1996

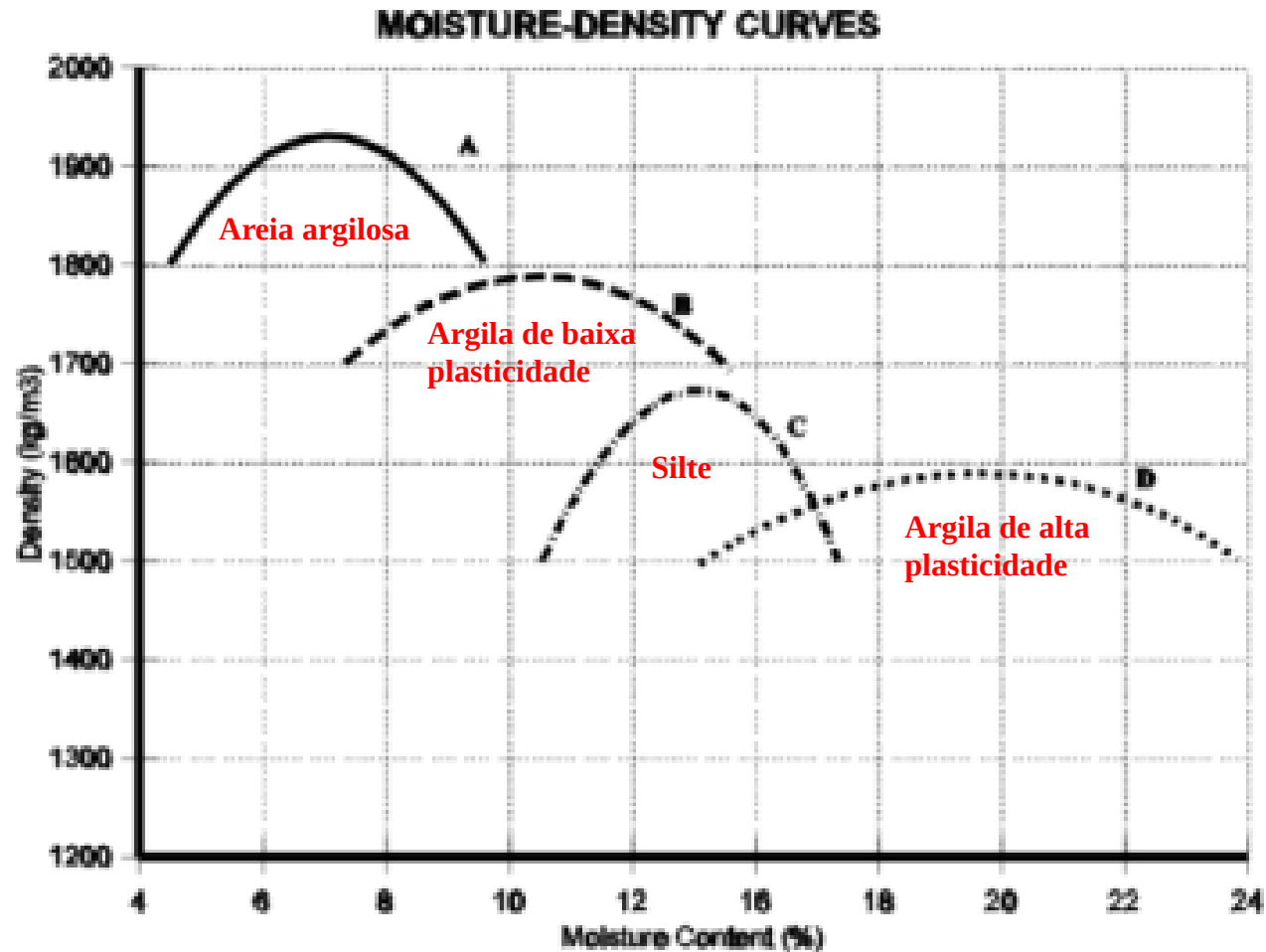
Use for C-90M + C-135B-M

Curvas típicas dos solos de Ohio

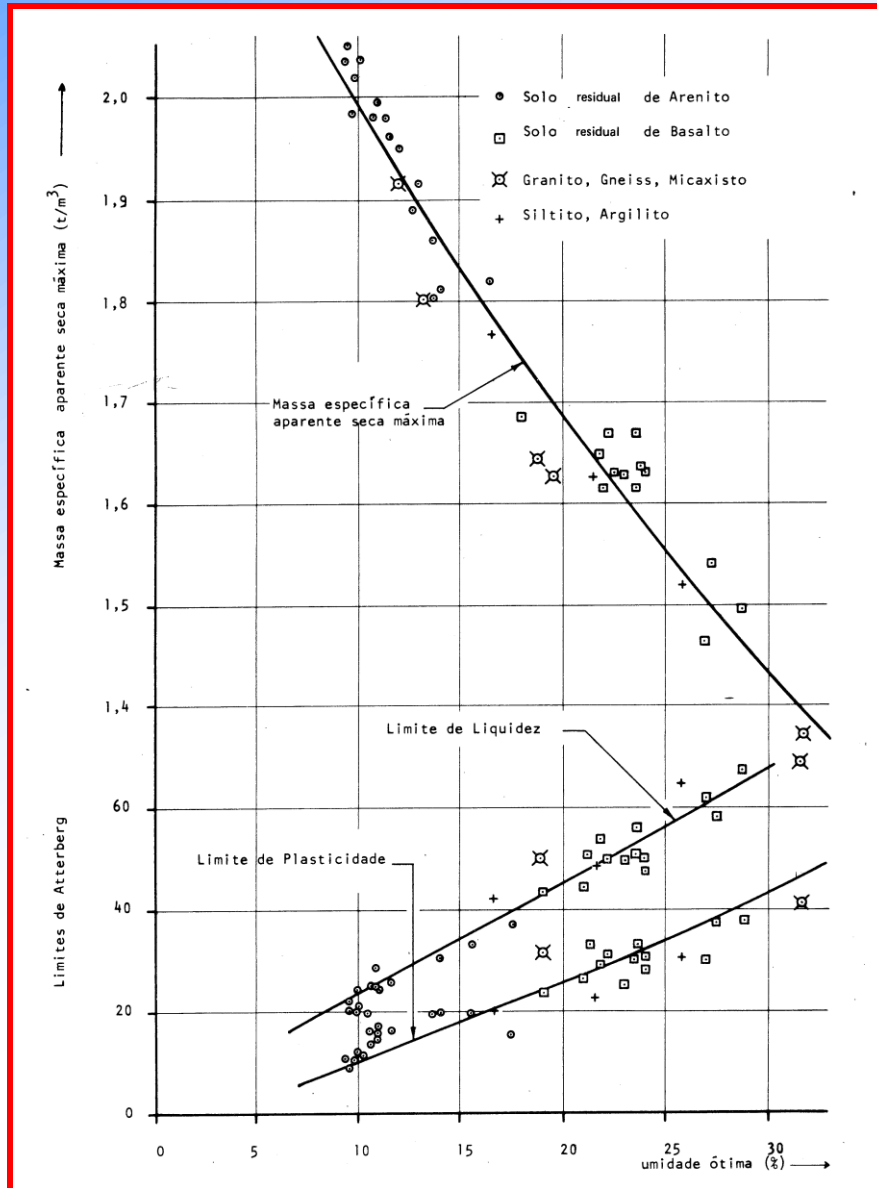


Efeito da presença de material mais grosso

Efeito do tipo de solo



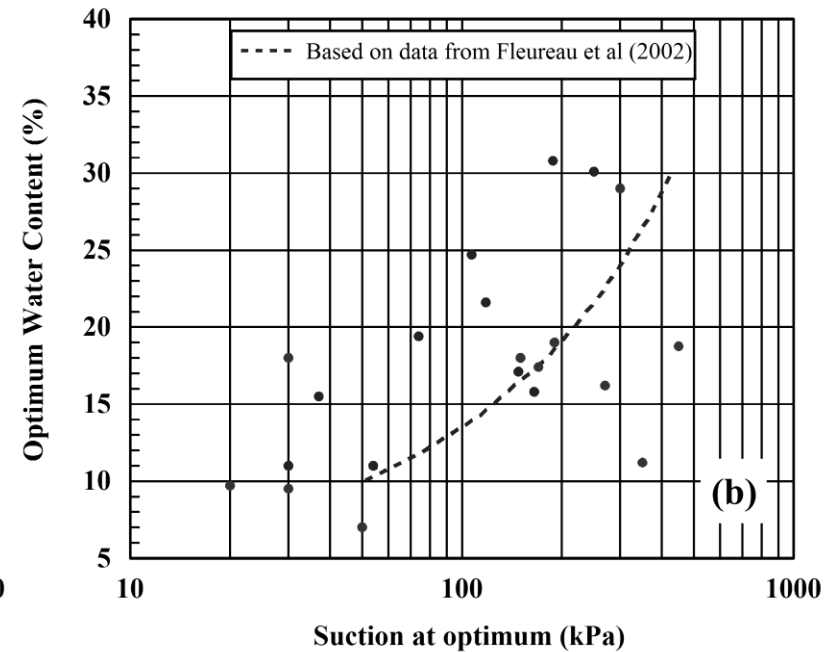
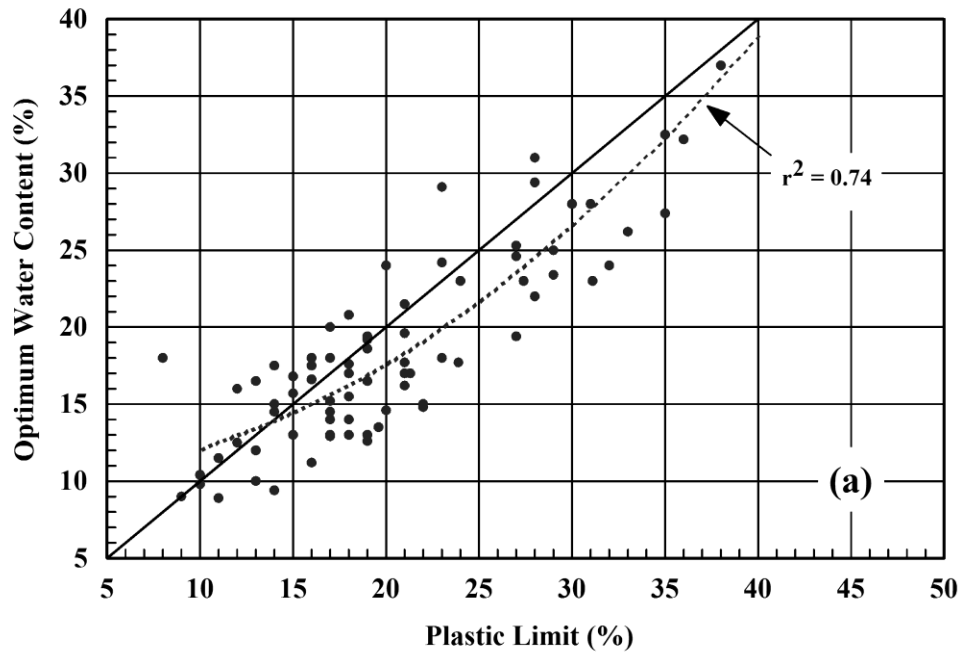
- O valor de w_{ot} pode ser estimado por correlações estatísticas entre umidades ótimas e densidade úmida.



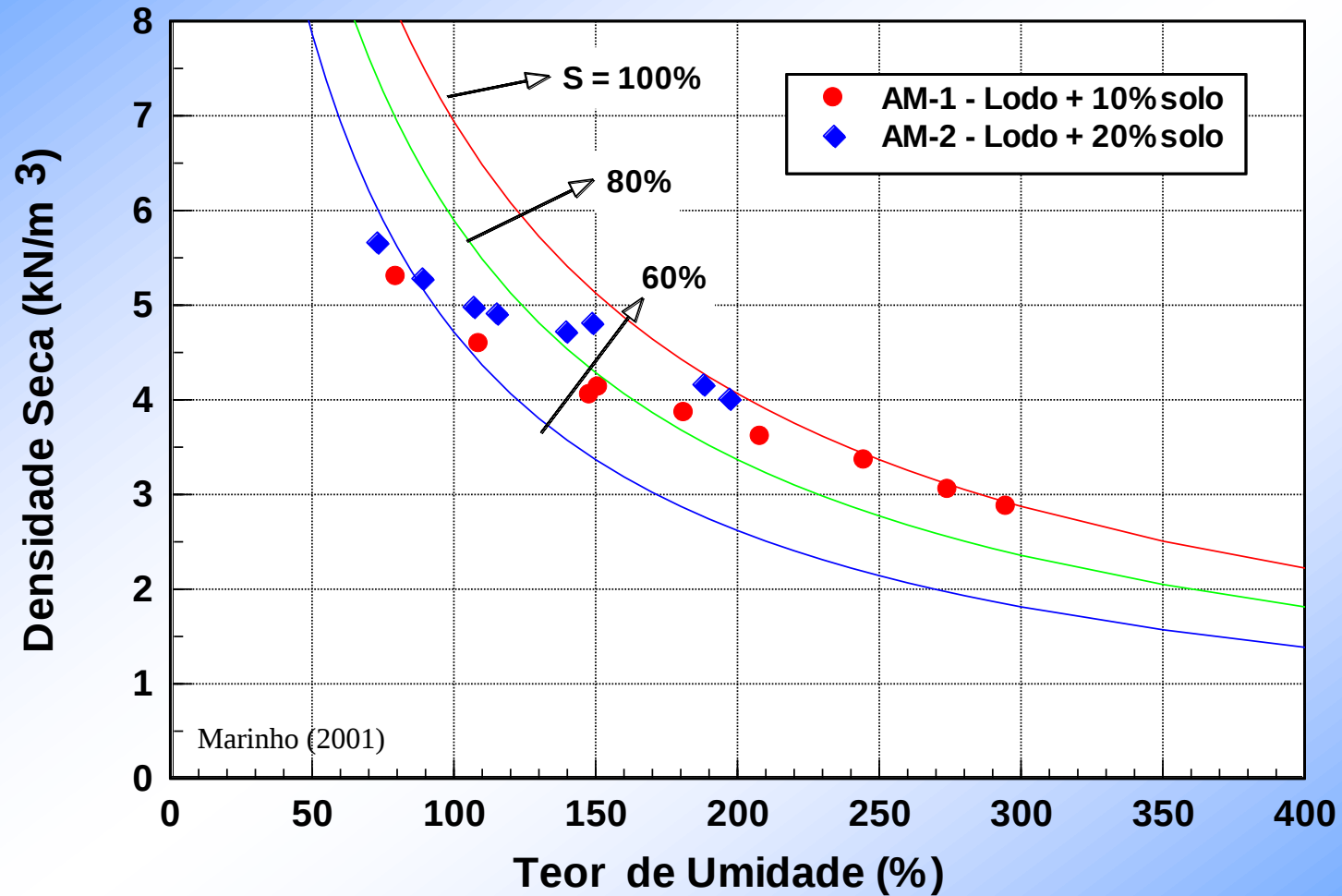
$$\gamma_u = \gamma_d (1 + w)$$

Correlação entre parâmetros de compactação e limites de Atterberg (Vargas, 1981)

**Correlação entre parâmetros de compactação,
limites de Atterberg e sucção na umidade ótima.**



Outros materiais - Lodo de ETA



Compactação no campo

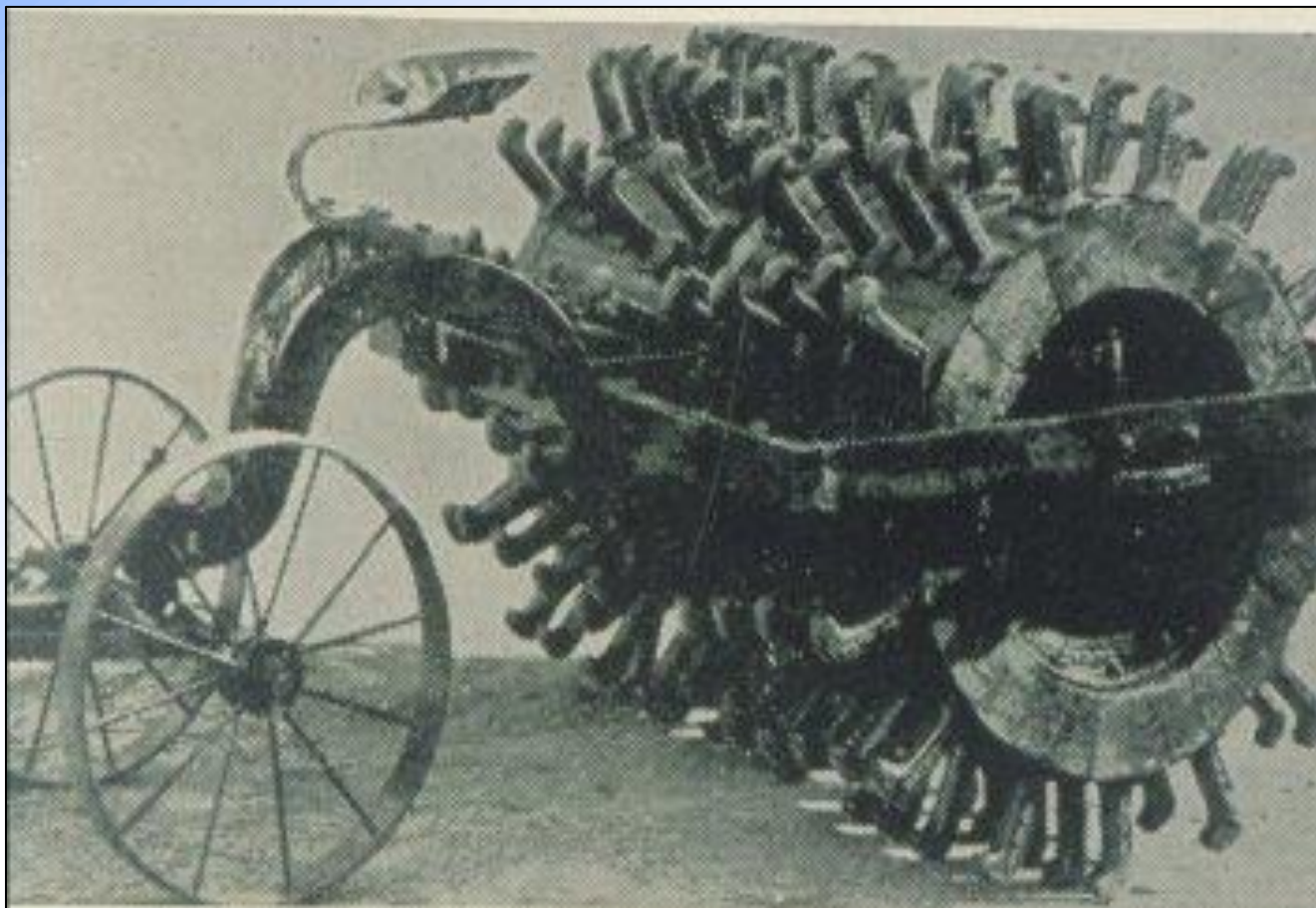
Tipos de compactadores:

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

Compactação no campo



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



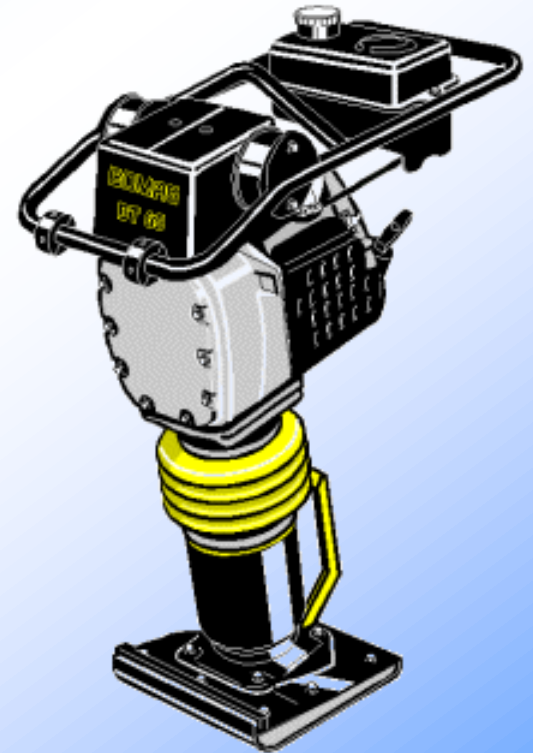
Compactação Pneumática



Rolo Liso



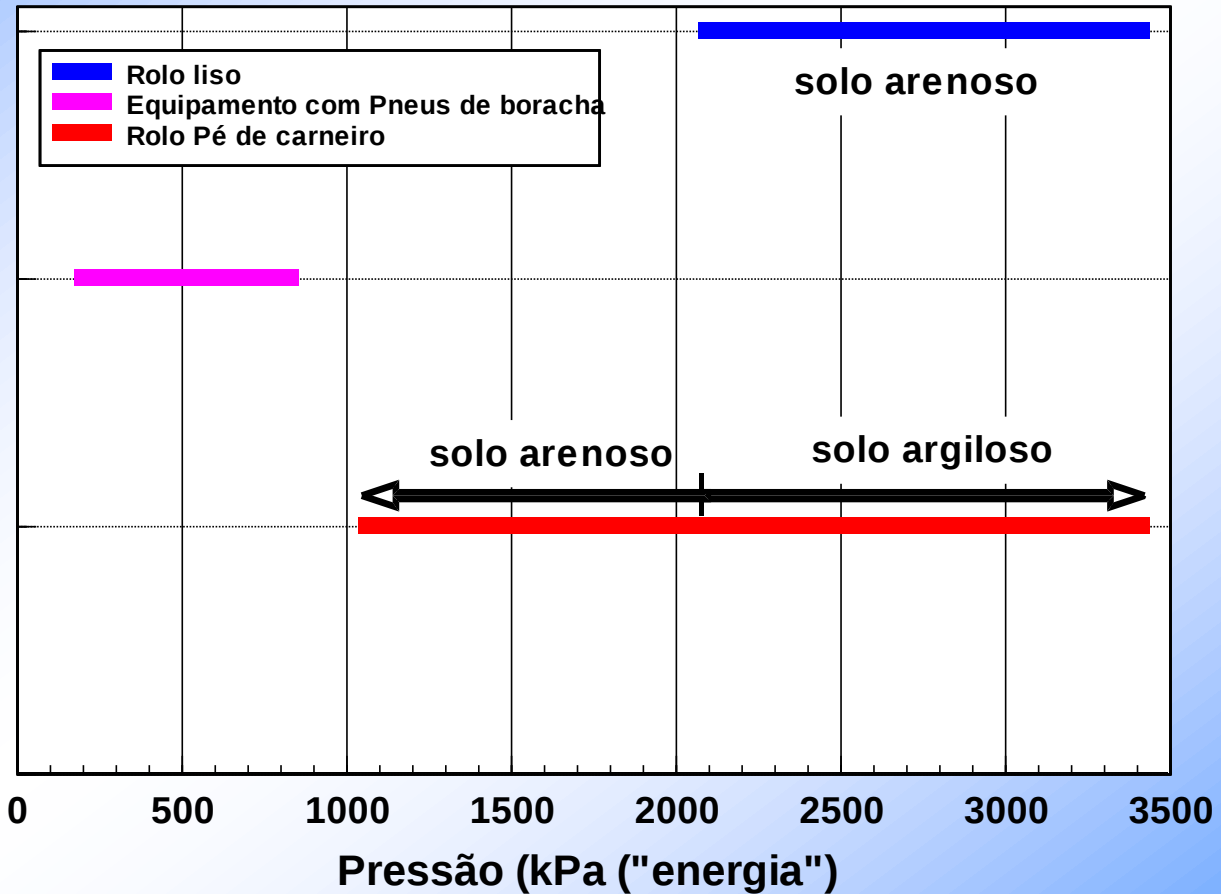
Manual



Compactação por impacto



Tipos de compactadores a aplicação e “energia”



Fatores que Controlam a Compactação

1. Energia de compactação.
2. Tipo de solo e distribuição granulométrica.
3. Teor de umidade.
4. Densidade seca (Peso específico seco).

Equipamentos



Área de Empréstimo – Tipo de Solo



Ajuste de Teor de Umidade



Ajuste de Teor de Umidade



Observação ainda é um dos melhores métodos de controle. Excesso de poeira é um indício de teor de umidade abaixo do ótimo.

Ajuste de Teor de Umidade



Espessura da Camada Lançada



Especificação de Compactação

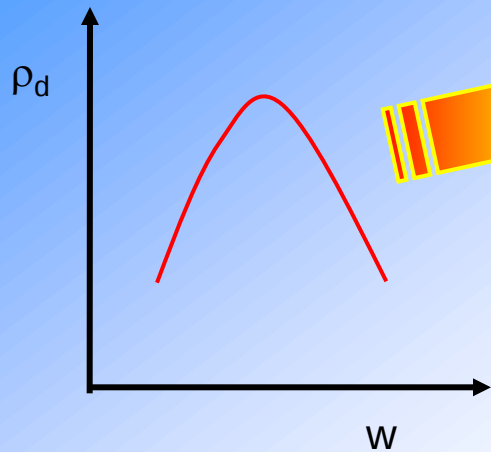
1. Especificação de execução

O que fazer e como fazer

2. Especificação de Performance

Controle de grau de compactação (ensaio)

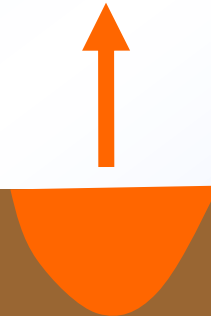
Princípio do Controle de Compactação



Specificações de compactação

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

Compare!



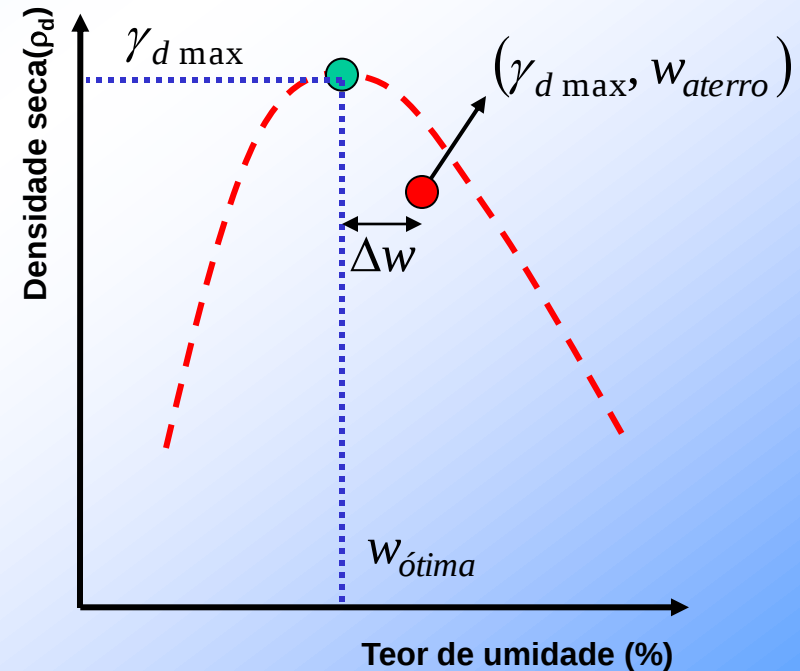
Aterro Compactado

Objetivo do controle de compactação

- Evitar que uma camada indequadamente compactada seja coberta por outra antes da análise.

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

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



Controle de Compactação

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



1 teste por 1000 m³
de solo compactado



•Densidade (grau de compactação)
•Teor de umidade

- Formas de se monitorar a densidade no campo:
 - Frasco de areia
 - Densímetro nuclear
 - TDR
- Método de Hilf





➤ Método de Hilf

- Determina-se a densidade úmida do aterro compactado (γ_a), sem se preocupar em obter a umidade (w_a).
- Acrescenta-se água ou seca-se a amostra em quantidades determinadas (Δm_{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 γ_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 Δ que, é dada pela expressão:

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

TDR



Template for Positioning Probes



Probes in Ground (Template Removed)



TDR Measurement in-situ



Remove Material from Test Area



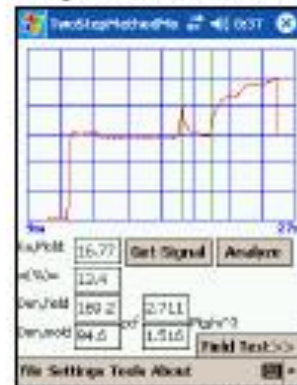
Compact Soil in TDR Mold



Determine Wet Density

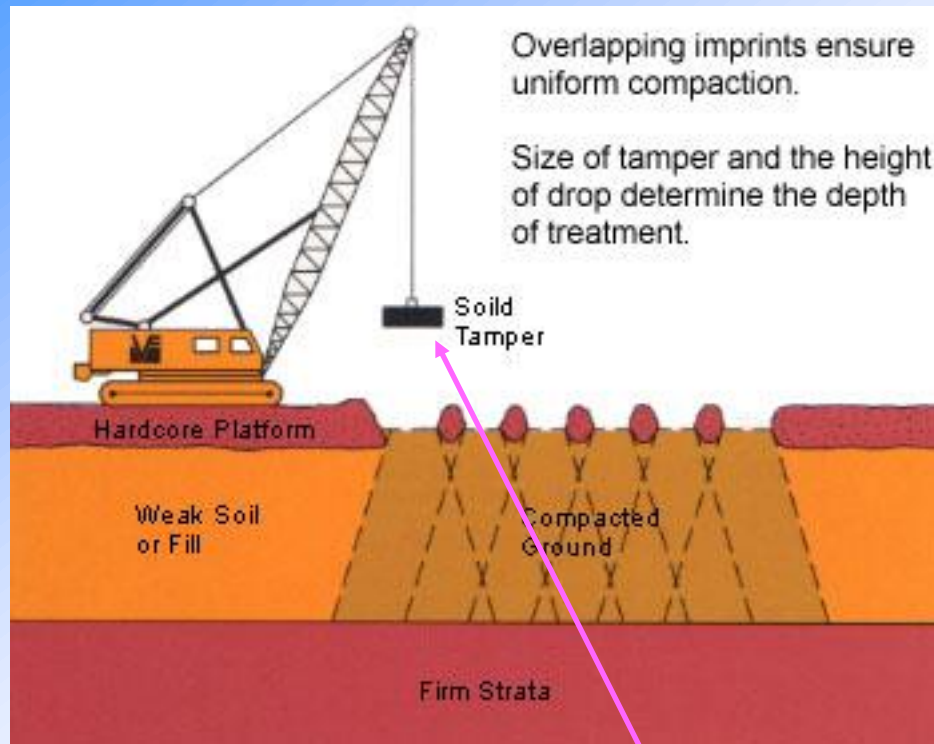


TDR Measurement in Mold



TDR Waveform and Results

Compactação Dinâmica

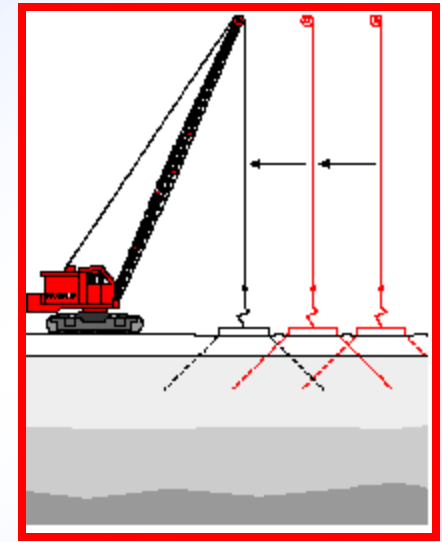
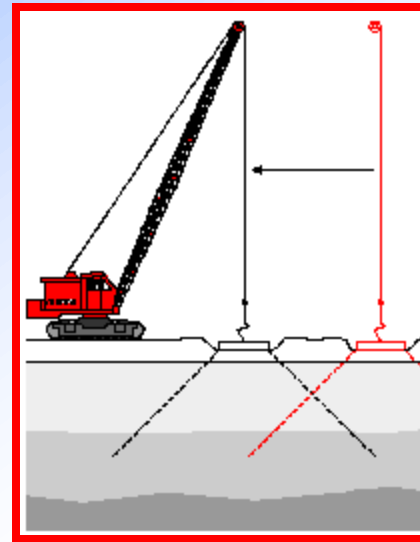
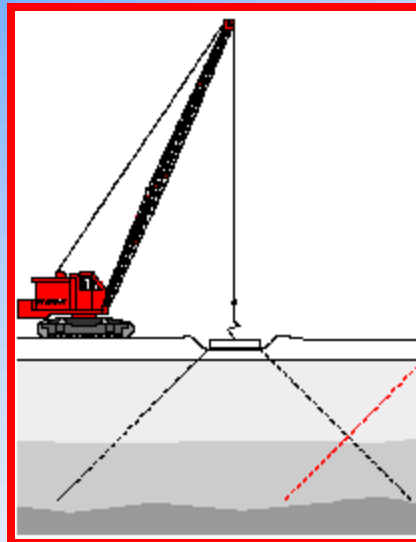
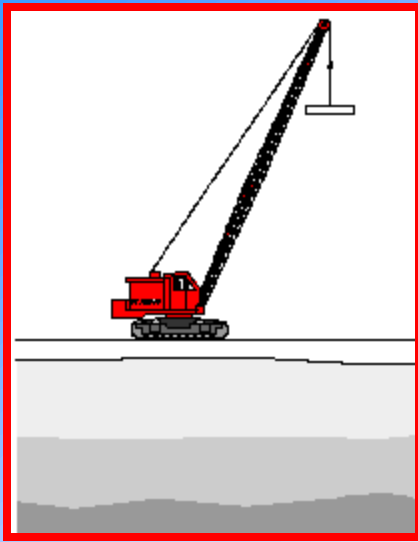


Martelo

Massa = 5-30 t

Queda = 10-30 m

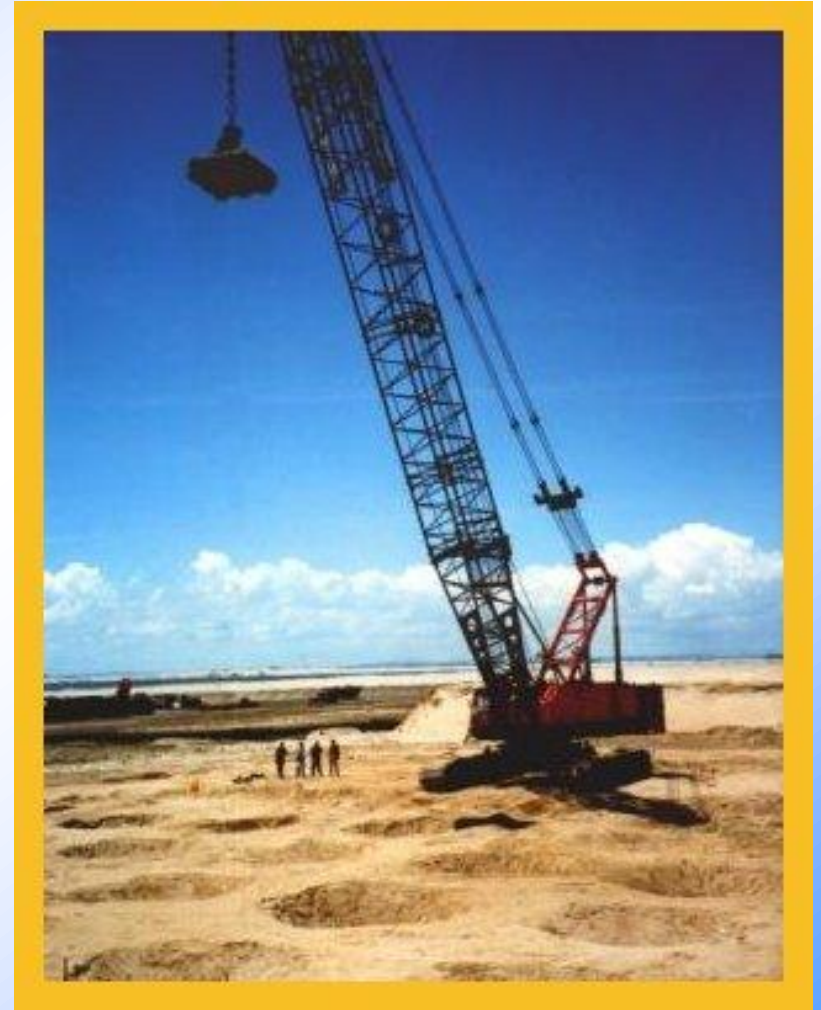




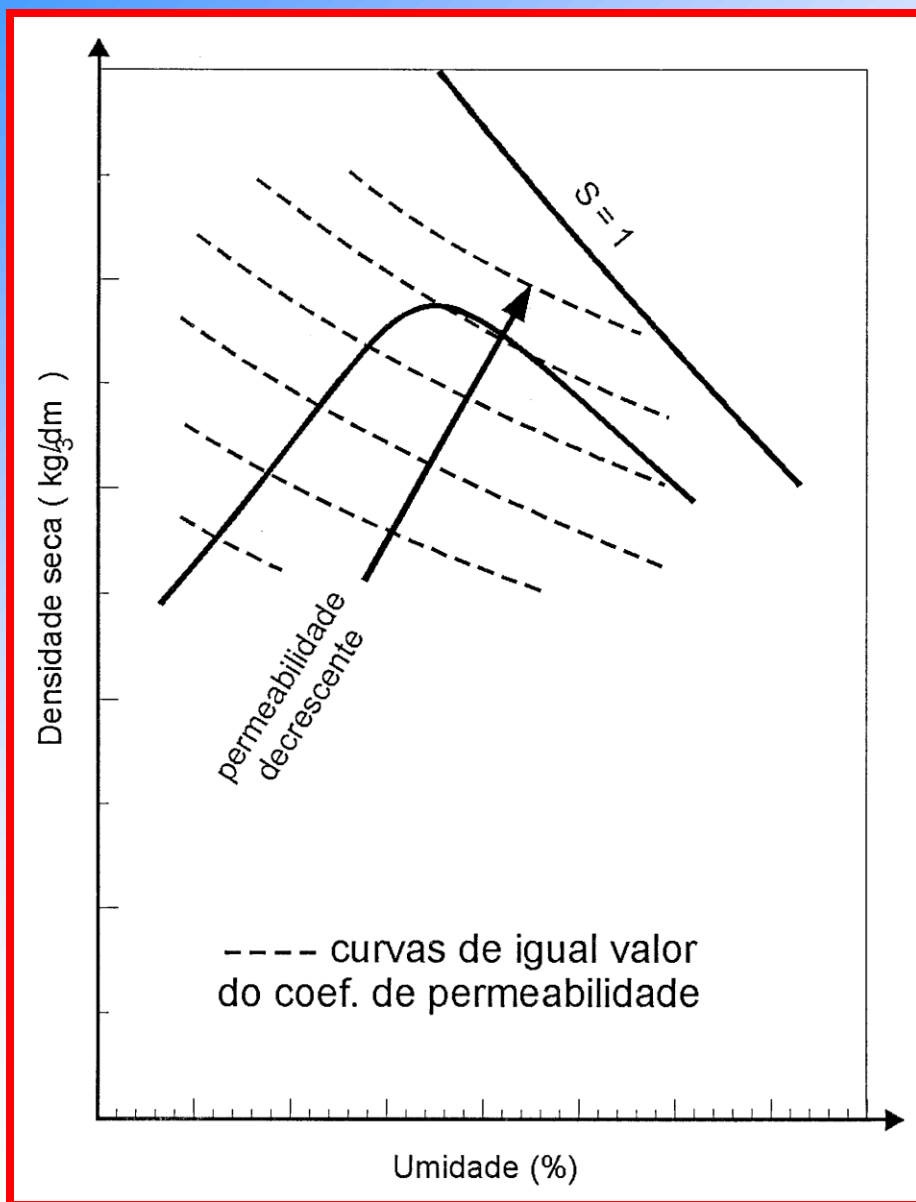
Compactação Dinâmica



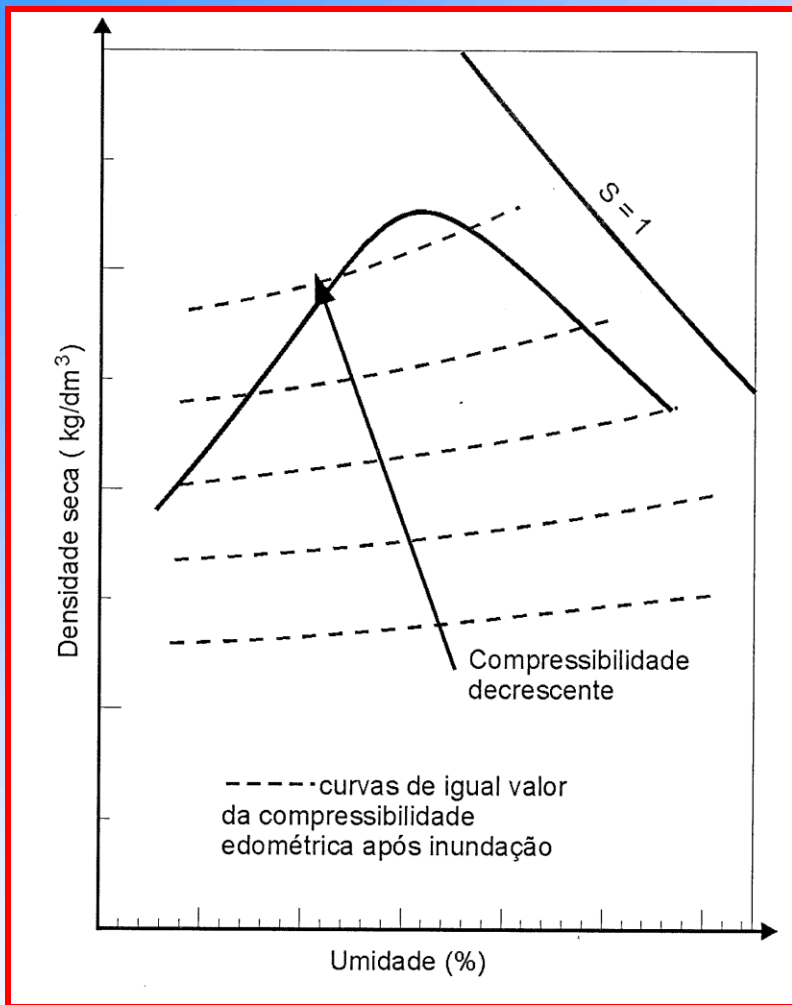
Compactação Dinâmica



Características Mecânicas, Hidráulicas e de Defomabilidade de Solos Compactados

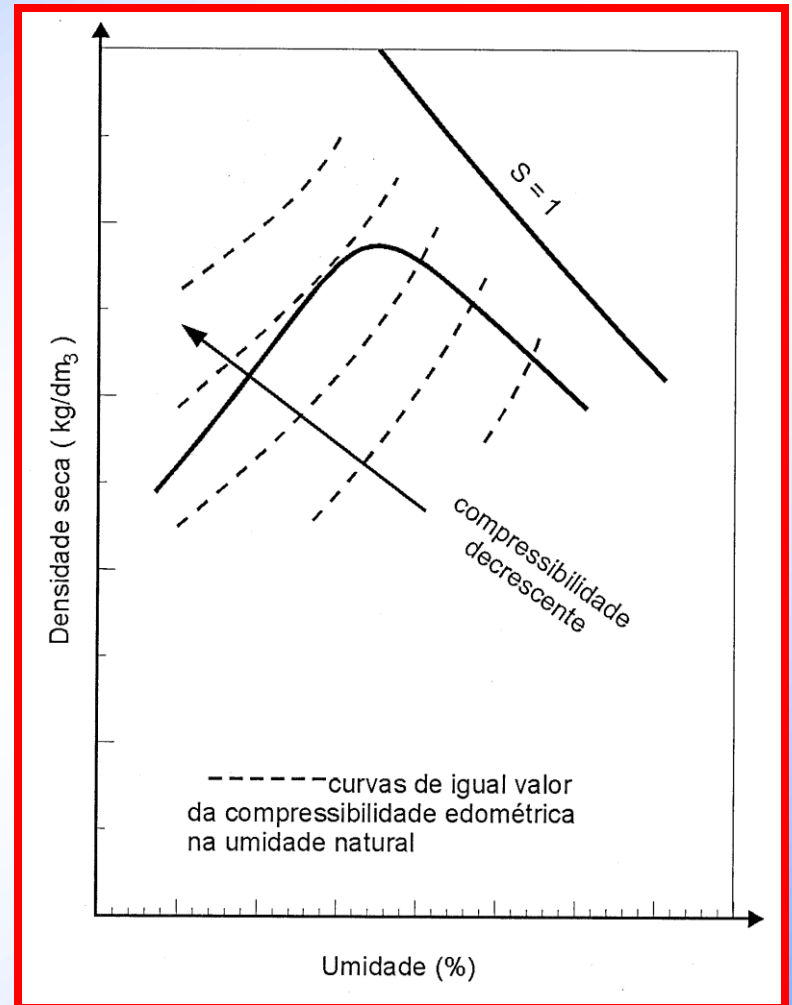


Variação do coeficiente de permeabilidade com a umidade e a densidade de compactação



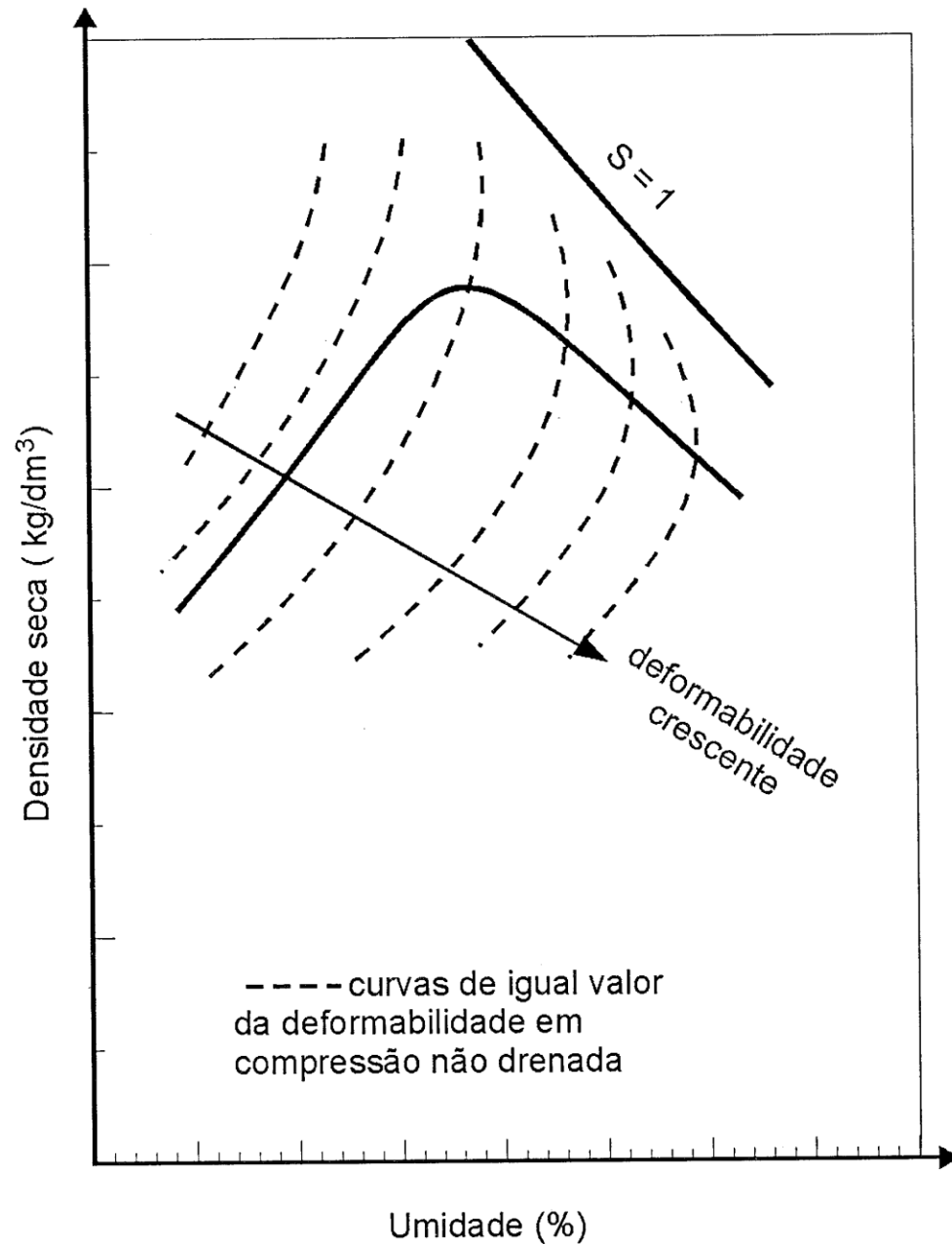
Sousa Pinto (2000)

Variação da deformabilidade edométrica com a umidade e a densidade de compactação, com o solo inundado.

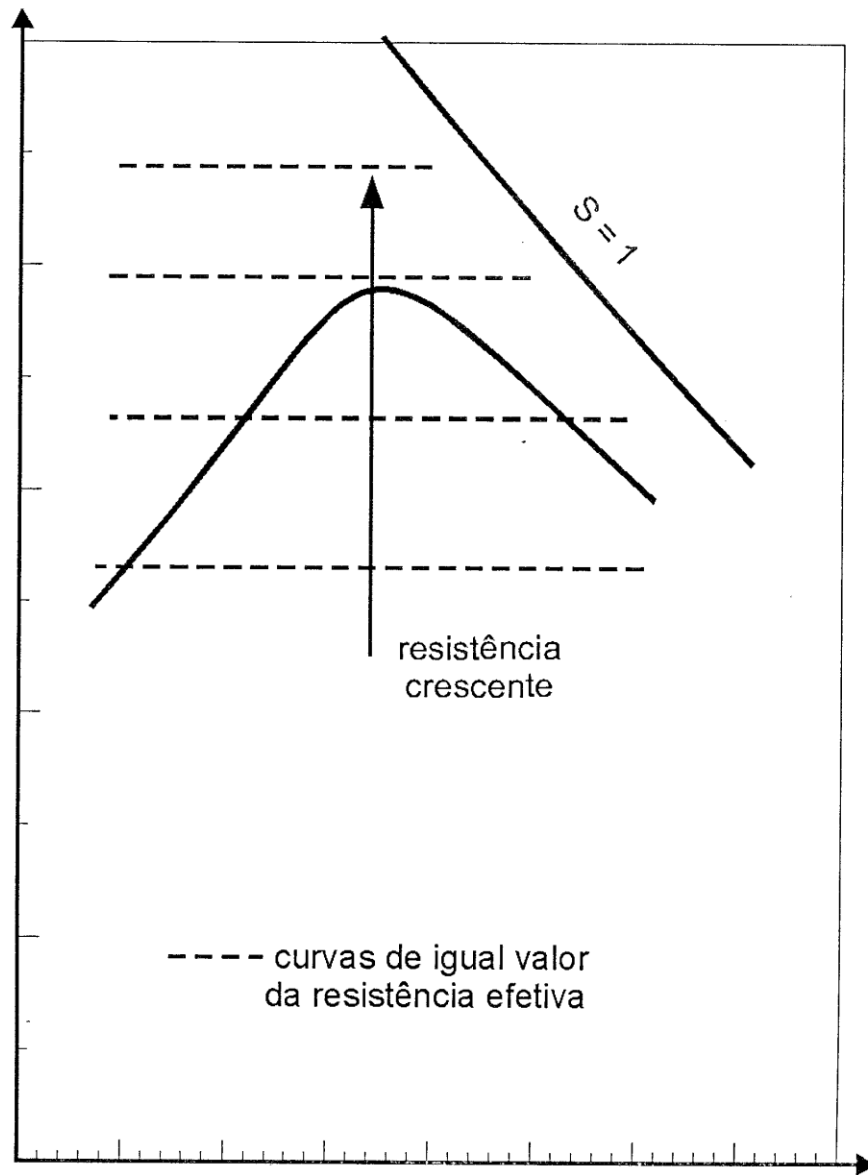


Sousa Pinto (2000)

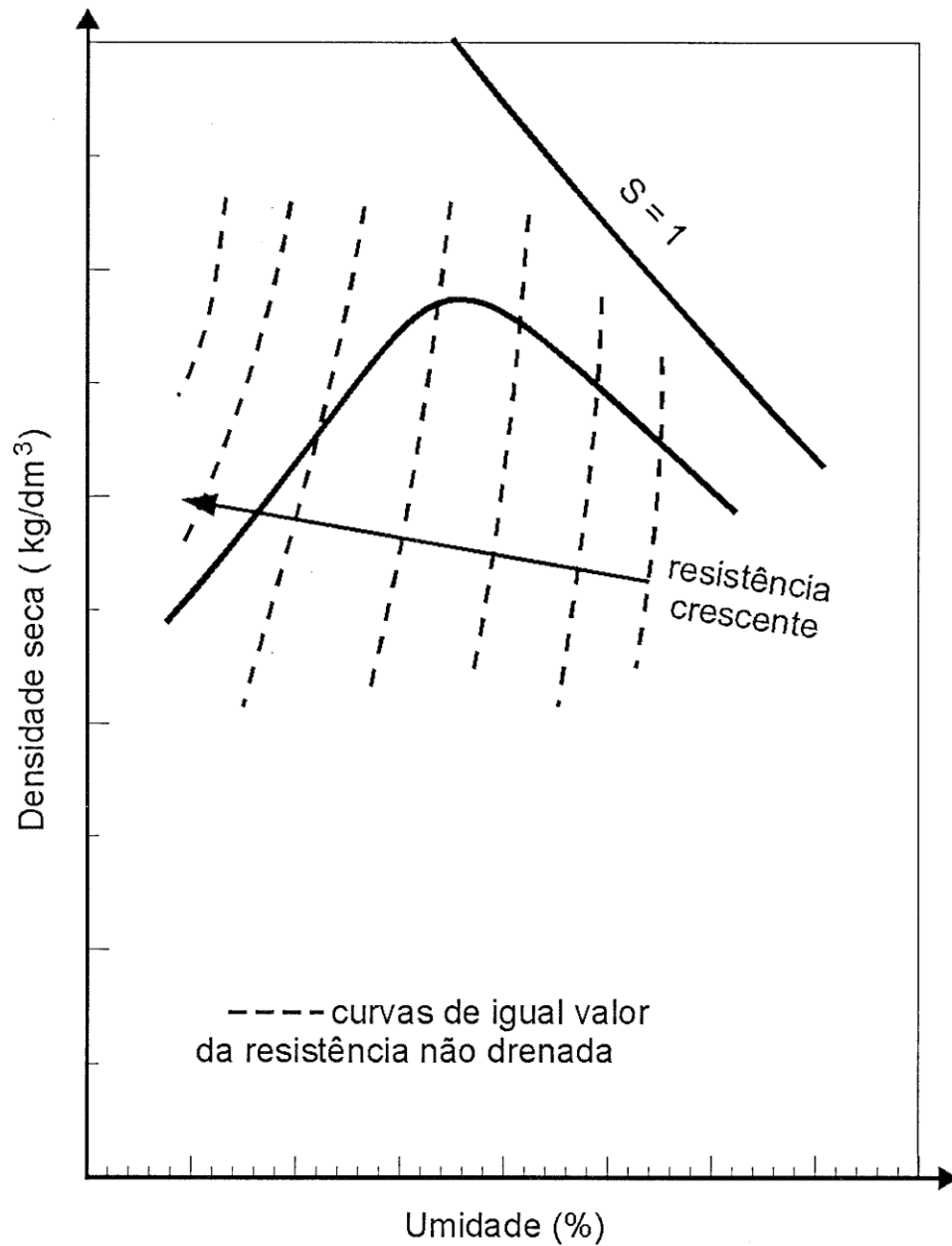
Variação da compressibilidade edométrica com a umidade e a densidade de compactação, com o solo na umidade de moldagem.



Variação da deformabilidade em ensaios triaxiais não drenados com a umidade e densidade de compactação.



Variação da resistência em termos de tensão efetivas, com a umidade e a densidade de compactação.



Variação da resistência em ensaios triaxiais não drenados com a umidade e a densidade de compactação.