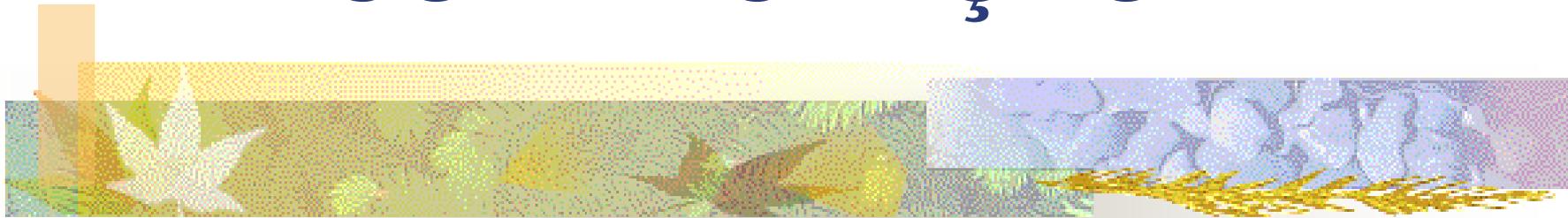


PEF3409 GEOTECNIA E RECUPERAÇÃO AMBIENTAL

COMPACTAÇÃO



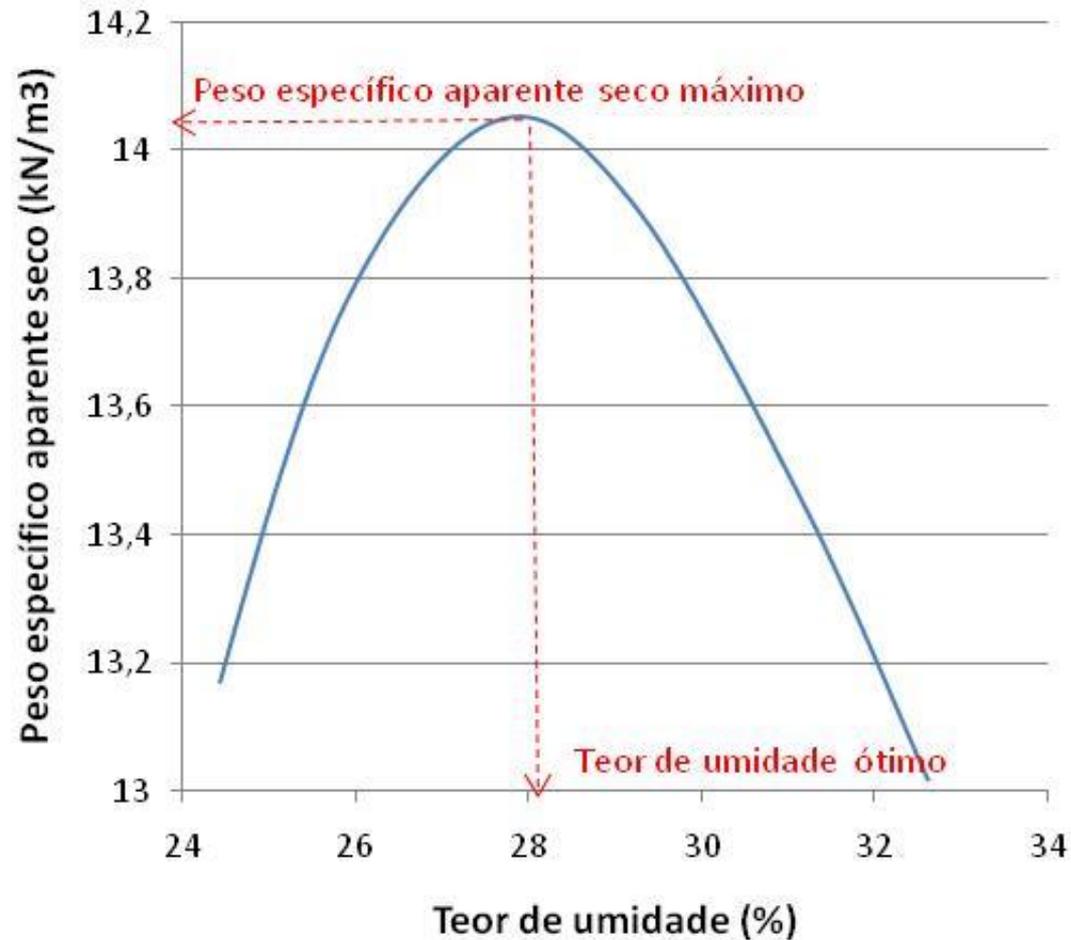
MARIA EUGENIA GIMENEZ BOSCOV



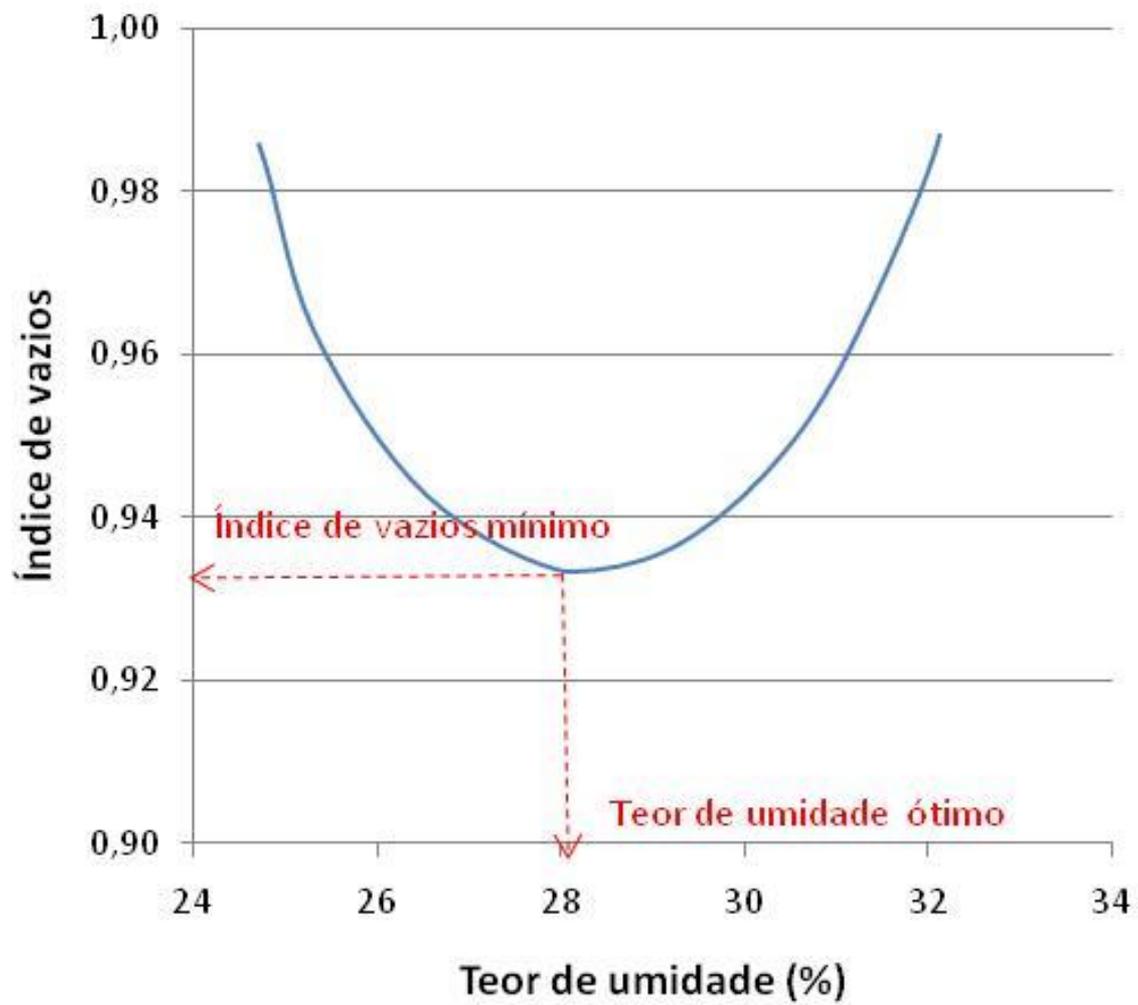
Compactação

- Compactação de um solo é a redução do índice de vazios por meio de processos mecânicos
- Objetiva homogeneizar o solo e melhorar suas propriedades de engenharia (aumentar resistência ao cisalhamento, reduzir recalques, diminuir permeabilidade etc.)

Curva de compactação



← **RAMO SECO** | **RAMO ÚMIDO** →





Teor ótimo de umidade

- Redução do volume de ar dos vazios é função da umidade; possível até um certo teor, a partir do qual a água adicionada passa a ocupar volume sem conseguir expulsar totalmente o ar.
- No ramo seco: à medida que se adiciona água, ocorre um efeito de lubrificação, que possibilita maior aproximação das partículas do solo.
- No ramo úmido: a água passa a existir em excesso, o que provoca um afastamento das partículas de solo e a conseqüente diminuição da densidade.



Breve histórico

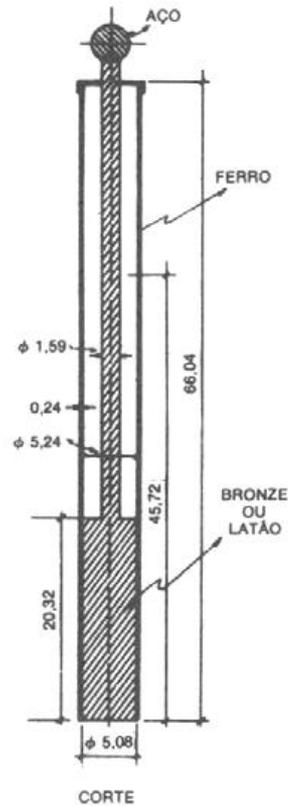
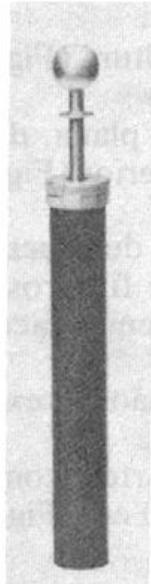
- Porter, California Division of Highways: método para determinar a umidade ótima de compactação dos solos (ponto de máxima compactação).
- Proctor (1933): padronização do ensaio.
- Correções posteriores para energias mais elevadas.
- Parsons (1976): método MCV.



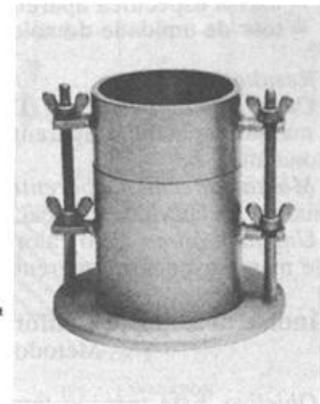
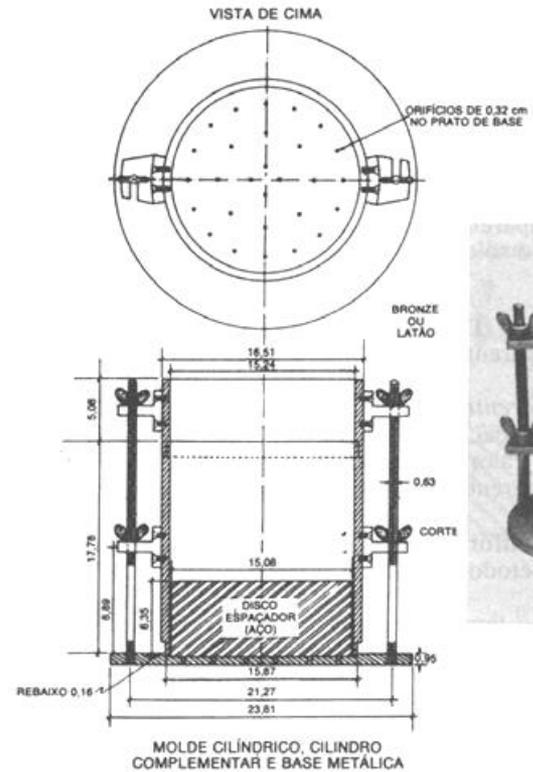
Ensaio de compactação

- NBR6457 Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização
- NBR7182 Solo - Ensaio de compactação
- O solo é seco ao ar e à sombra. O solo é homogeneizado.
- Compacta-se uma amostra de solo dentro de um recipiente cilíndrico (molde de 944 cm^3 de volume) em 3 (três) camadas sucessivas, sob a ação de 26 golpes de um soquete pesando 2,5 kg, caindo de 30 cm de altura.
- Determinam-se o peso do solo dentro do molde e o teor de umidade correspondente.
- Calcula-se o peso específico e o peso específico seco do solo compactado.
- Repete-se o procedimento para mais teores de umidade.

Ensaio de compactação



SOQUETE




$$\gamma = \frac{P}{V}$$

$$V = 1000 \text{ cm}^3$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + w}$$



Energia de compactação

$$E = \frac{P H N n}{V}$$

E = energia aplicada ao solo, por unidade de volume

P = peso do soquete

H = altura de queda do soquete

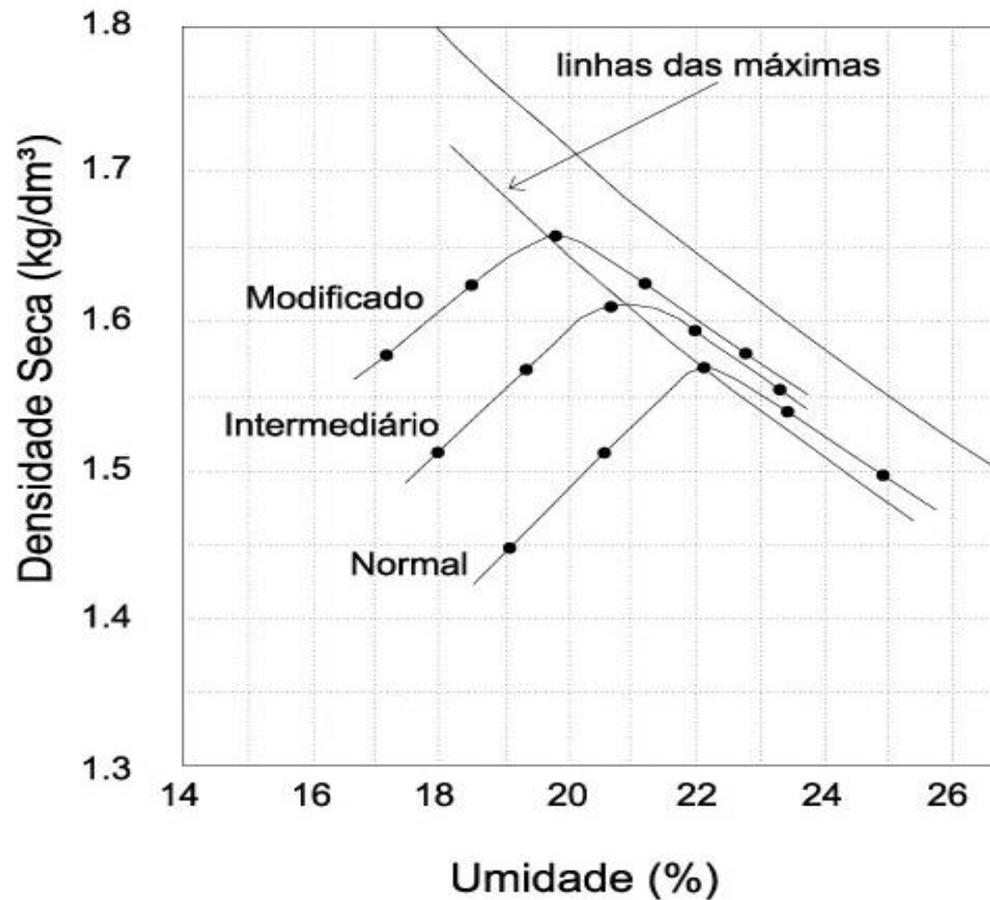
n = número de camadas

N = número de golpes aplicados a cada camada

V = volume do cilindro

Energia normal: $E \approx 6 \text{ Kg.cm/cm}^3 \approx 593 \text{ kJ/m}^3 \approx 593 \text{ kN.m/m}^3$

Energia de compactação



Energia de compactação

Designação	Massa (Kg)	Altura de queda (cm)	Número de camadas	Número de golpes	Volume do cilindro (cm ³)	Energia (Kgf.cm/cm ³)
Normal	2,5	30,5	3	26	1000	5,9
Normal	4,5	45,7	5	12	2000	6,2
Intermediária	4,5	45,7	5	26	2000	13,4
Modificada	4,5	45,7	5	55	2000	28,3



Energia de compactação

- Densidade seca máxima varia linearmente com o logaritmo da energia aplicada.



Grau de saturação

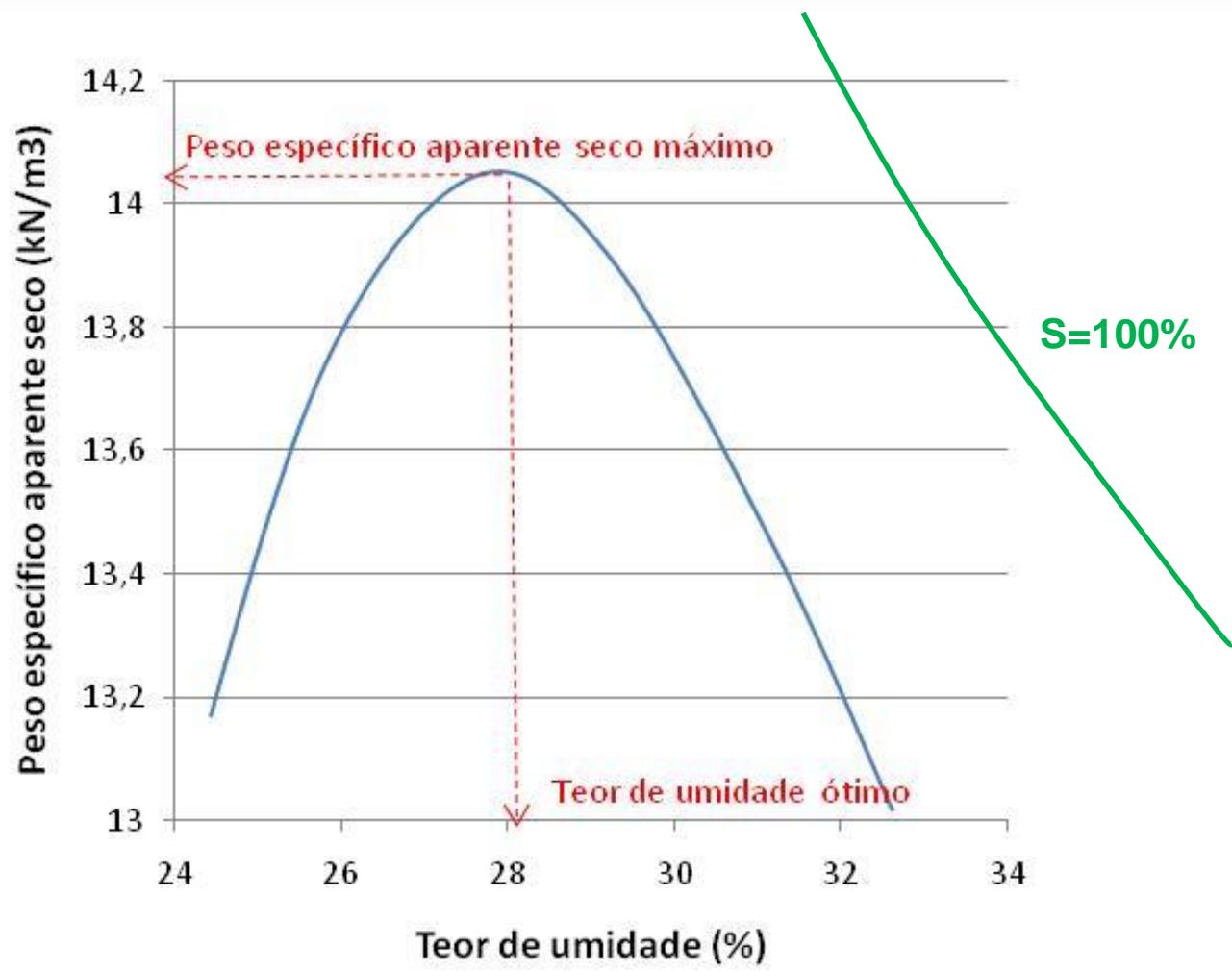
$$\gamma_d = \frac{1}{\frac{1}{\gamma_s} + \frac{w}{s}}$$

γ_d = peso específico aparente seco

γ_s = peso específico dos grãos

w = teor de umidade ótimo

s = grau de saturação





Grau de saturação

- O solo compactado é um solo não saturado!!!
- A linha de ótimos é aproximadamente uma linha de igual grau de saturação.



TIPO DE SOLO

- Solos arenosos possuem teores de umidade ótima menores e densidades secas máximas maiores do que solos solos siltosos e argilosos



Estrutura do solo compactado

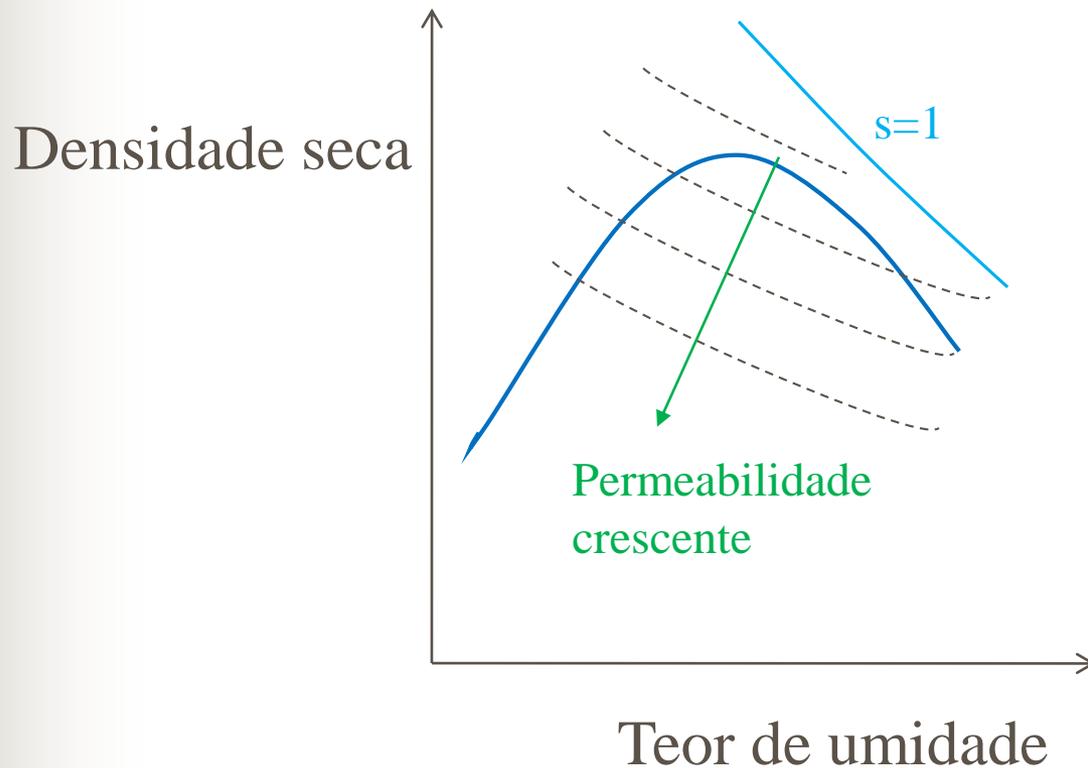
- Lambe (1958): arranjos disperso e flocculado (partículas individuais de argila)
- Seed e Chan (1959): influência do tipo de compactação na estrutura
- Olsen (1962): modelo de agregados (“clusters”)
- Barden et al (1970), Garcia-Bengochea et al. (1979): agregados deformáveis

(PEF-2408)



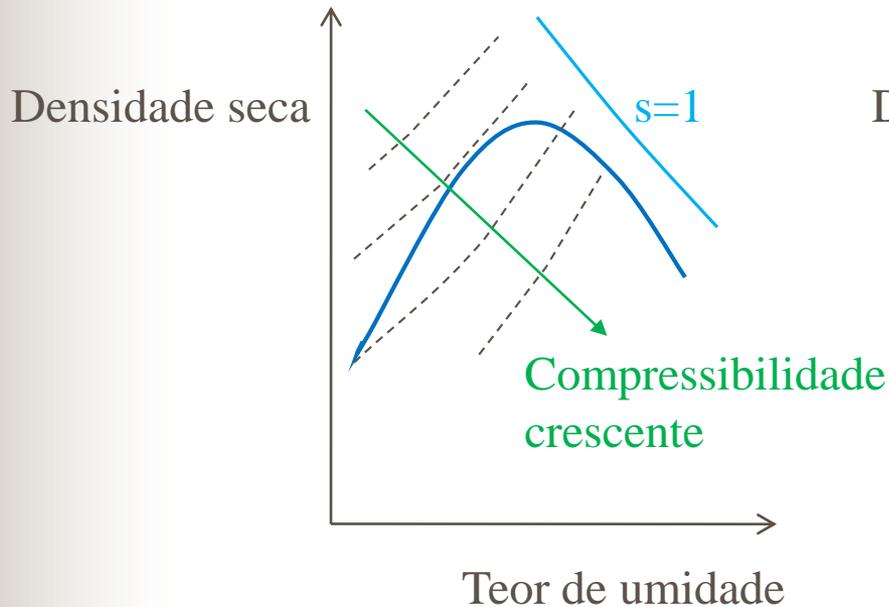
Propriedades dos solos compactados

Permeabilidade

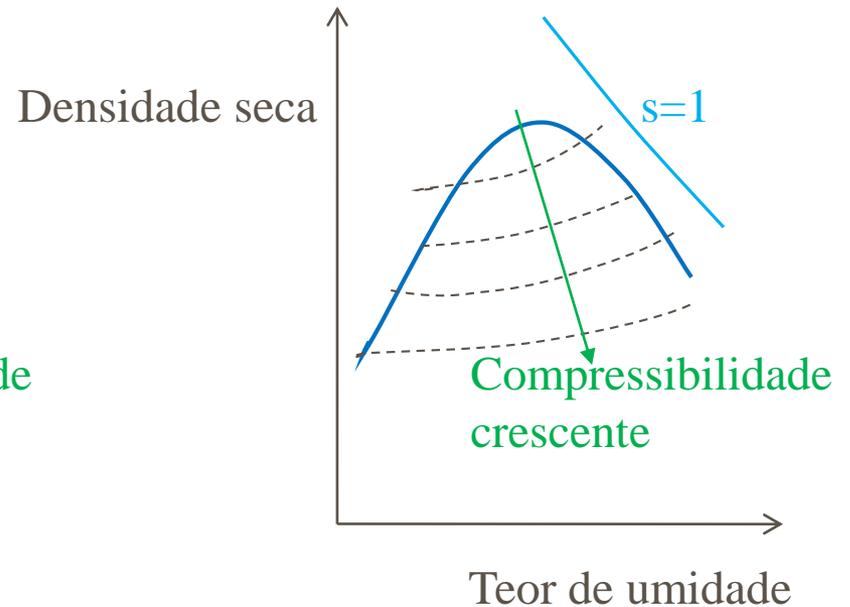


(Pinto, 2000)

Compressibilidade edométrica

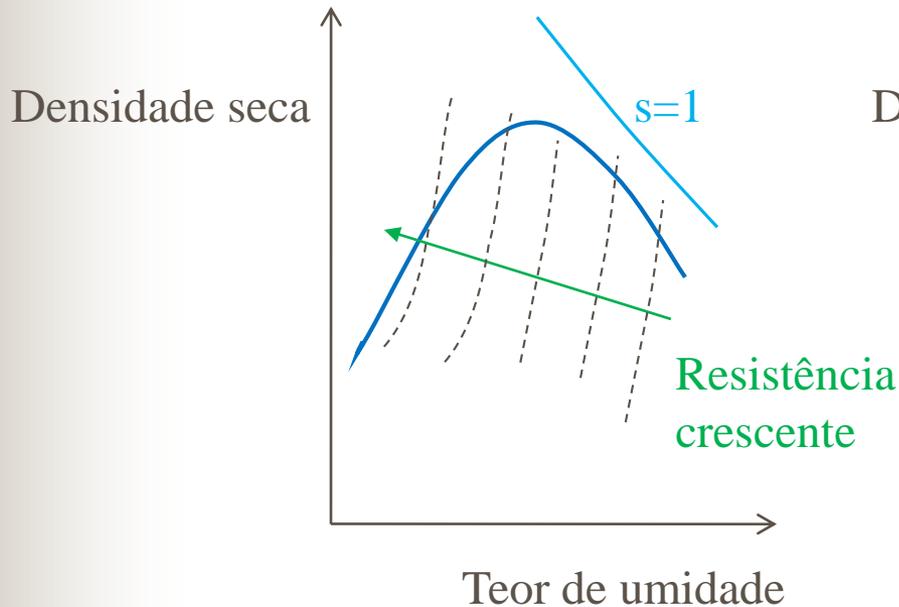


Umidade natural

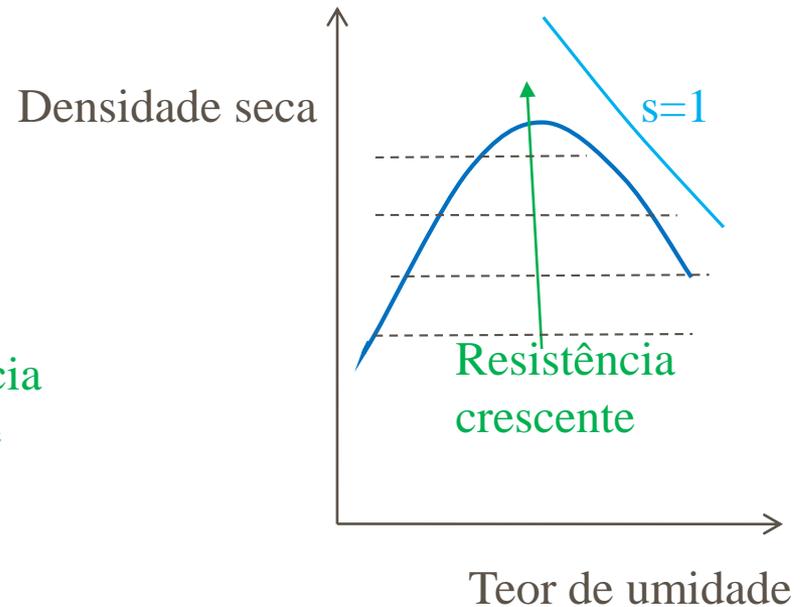


Após inundação

Resistência



Resistência não drenada (ensaio UU)



Resistência efetiva
(ensaios CD ou CU)



Etapas no campo

- Escolha da área de empréstimo (jazida)
- Desmatamento
- Limpeza do terreno
- Escavação
- Transporte
- Espalhamento
- Acerto de umidade (irrigação ou aeração)
- Homogeneização e destorroamento
- Compactação propriamente dita
- Controle de compactação



Terraplenagem

- Transformação da configuração inicial do terreno para atender às condições topográficas de um determinado projeto.
- Os serviços de terraplenagem são sempre os primeiros a serem executados em uma obra, pois mesmo para a instalação do canteiro é necessária alguma terraplenagem.



Escolha da área de empréstimo

- tipo de solo
- distância de transporte
- volume de material
- teor de umidade
- homogeneidade



Desmatamento, destocamento, limpeza e raspagem

- Desmatamento é o corte das árvores logo acima do terreno
- Destocamento é a remoção dos tocos e raízes
- Limpeza é a remoção da vegetação de pequeno porte.
- Raspagem é a remoção do solo orgânico (~30 cm); usualmente este material é estocado e recolocado no terreno para recomposição paisagística.



Escavação

Materiais são divididos em três categorias:

- Solos: podem ser escavados com ferramentas manuais ou máquinas, sem necessidade de prévia desagregação
- Rochas brandas ou misturas de solos com rochas: precisam ser desagregados antes de serem escavados (lâmina de trator de esteira, uso moderado de explosivos etc.)
- Rochas sãs: só podem ser escavados com o uso de explosivos



Deposição e espalhamento

- Camadas de espessura definida em projeto para obter o grau de compactação especificado.
- Ajuste da umidade: umedecimento ou secagem
- Homogeneização (gradeamento)



Equipamentos

- Trator de esteira: todos os serviços; escavação; transporte/espalhamento; com implementos: desmatamento, destocamento, limpeza, raspagem, escarificação
- Trator de pneu: reboque de compactadores, de grades de discos, etc.
- Pás-carregadeiras: carregamento, trabalhando em conjunto com caminhões basculantes (rodas ou esteira)
- Caminhões basculantes: transporte



Equipamentos

- Moto-scrapers: escavação, carregamento e transporte
- Escavadeiras: escavação e carregamento
- Motoniveladoras: espalhamento preciso, homogeneização, nivelamento, acabamento de taludes.
- Caminhões ou tanques irrigadores: acerto de umidade
- Grades de disco: aeração e homogeneização da umidade (precisam de reboque)



Retroescavadeira

(Bernardes Jr e Ferrari, 2004)



Retroescavadeira

(Bentonit, 2004)



Trator de esteira

(Bentonit, 2004)



Caminhão irrigador – acerto de umidade

(Bentonit, 2004)



Trator de roda - Gradeamento

(Bentonit, 2004)



Equipamentos de compactação propriamente dita



Tipos de compactadores

- Pressão, impacto e vibração; ou pela combinação de dois ou todos eles.
- Compressores: rolo liso, rolo de rodas pneumático e rolo pé-de-carneiro.
- Aparelhos de impacto: soquetes pneumáticos ou de combustão interna ou grandes pesos caindo de grandes alturas.
- Vibradores: vibração por meio de placa ou rolo compressor.



Processos de compactação

Campo:

- Rolo liso
- Rolo pneumático
- Rolo pé-de-carneiro
- Rolo “tamping”
- Rolo vibratório
- Dozer
- Placa vibratória
- Sapo manual
- Sapo mecânico

Rolo liso





Rolo pneumático



Rolo pé-de-carneiro

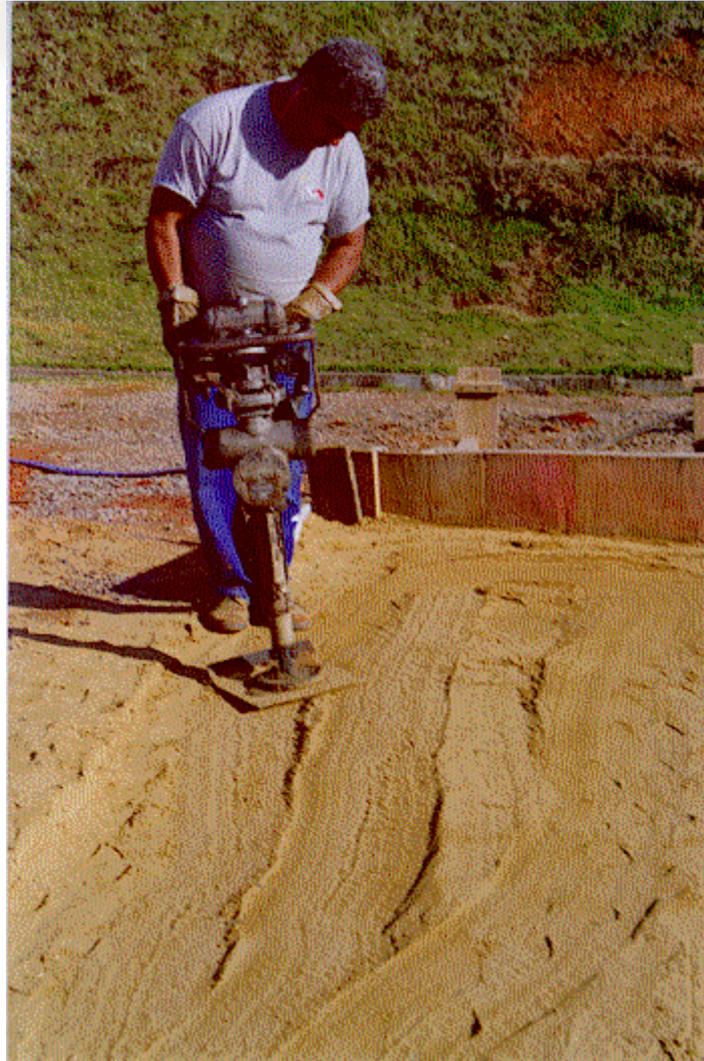


Rolo “tamping”



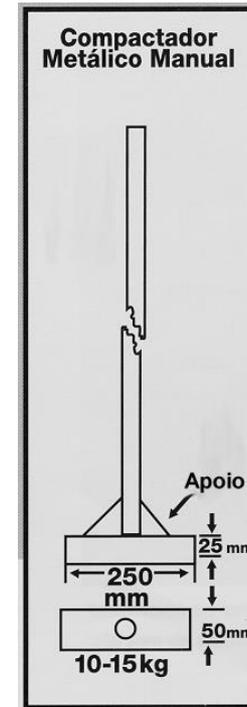
Rolo em campo com “tamping”

(Ferrari, 2005)



Sapo mecânico

(Convênio EPUSP-PTR-LTP / TIGRE, 2003)



Compactador metálico manual

(Convênio EPUSP-PTR-LTP / TIGRE, 2003)



Processos de compactação

Laboratório:

- Impacto
- Pisoteamento
- Vibração
- Estática



Processos de compactação

- No ramo seco, qualquer um desses tipos de compactação conduz a um estrutura floculada
- No ramo úmido, quanto mais a intensa a aplicação de esforços cisalhantes, maior é a orientação das partículas (mais dispersa é a estrutura)
- Conseqüência: o tipo de processo tem mais influência no ramo úmido



Especificação

Mello (1975)

- Especificar pelo produto final
- Especificar pelo método construtivo: tipo de rolo compactador, número de passadas, velocidade, espessura das camadas (solta e acabada)
- Especificar o produto final com indicações quanto ao método construtivo

Grau de compactação e desvio de umidade

- 
- Estabilidade de taludes: umidade após compactação (pouca influência da densidade na resistência sem drenagem)
 - Estabilidade a longo prazo: grau de compactação
 - Deformabilidade: fundações deformáveis e solo rígido; fundação não deformável e recalque diferencial do maciço



Controle de compactação

- Grau de compactação e desvio de umidade

$$GC = \frac{\gamma_{da}}{\gamma_{dm\acute{a}x}}$$

$$\Delta w = w_a - w_{ot}$$

- Propriedades desejadas

Permeabilidade, resist\encia, resili\encia etc.



Grau de compactação

Peso específico aparente in situ:

- Cravação de cilindro
- Funil de areia
- Óleo
- Extração de blocos indeformados
- Método de Hilf
- Método nuclear

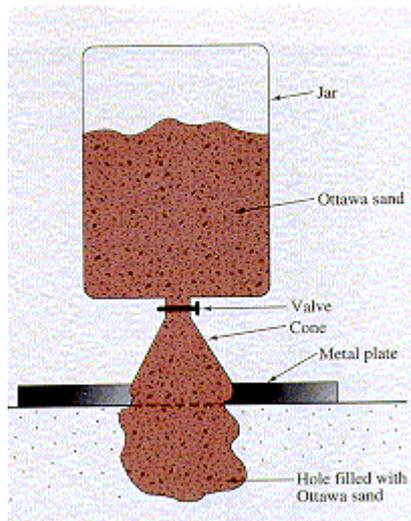
Cravação de cilindro



NBR 9813



Funil de areia





Fonte:
<http://geotech.uta.edu/lab/Main/SandCone/index.htm>





Óleo

- Furo de 10 cm de diâmetro por 15 a 20 cm de altura, retirando-se cuidadosamente o solo.
- Determina-se o peso úmido do material que ocupava o volume do furo
- Coloca-se numa proveta certa quantidade de óleo de motor (SAE 30) de peso específico conhecido.
- Enche-se o furo com o óleo.
- Por diferença de peso determina-se o volume do furo.

Densímetro nuclear



Extração de blocos indeformados





Método de Hilf

- NBR12102
- Curva de compactação in situ acrescentando água
- O aterro está com densidade γ_a e umidade w_a (desconhecidas)

$$\gamma_a = \gamma_{da} (1 + w_a)$$

- Deseja-se obter GC e Δw

$$GC = \frac{\gamma_{da}}{\gamma_{dm\acute{a}x}} \quad \text{e} \quad \Delta w = w_a - w_{ot}$$



- Massad, 2003

- Quarteia-se uma amostra de solo do aterro e acrescentam-se diferentes quantidades de água a cada quarto.

- z_i = massa de água adicionada à amostra i em relação à massa inicial da amostra

$$\gamma_i = \gamma_a (1 + z_i) = \gamma_d (1 + w_a)(1 + z_i)$$

- O teor de umidade correspondente é:

$$w_i = \frac{P_w}{P_s} = \frac{w_a P_s + z_i [P_s (1 + w_a)]}{P_s}$$

$$w_i = w_a + z_i (1 + w_a)$$

- Define-se o parâmetro γ_c :

$$\gamma_{ci} = \frac{\gamma_i}{1+z} = \frac{\gamma_d(1+w_a)(1+z)}{1+z} = \gamma_d(1+w_a)$$

- Com os pares γ_c e z_i constrói-se uma curva, de onde se obtêm γ_{cmax} e z_m .

- Cálculo exato de GC:

$$GC = \frac{\gamma_{da}}{\gamma_{dmáx}} = \frac{\gamma_{da}(1+w_a)}{\gamma_{dmáx}(1+w_a)} = \frac{\gamma_a}{\gamma_{cmáx}}$$

- 
- Estimativa do desvio de umidade:

$$1 + w_i = 1 + w_a + z_i(1 + w_a)$$

$$1 + w_i = (1 + w_a)(1 + z_i)$$

$$1 + w_{ot} = (1 + w_a)(1 + z_m)$$

$$\Delta w = w_a - w_{ot} = (1 + w_a) - (1 + w_{ot})$$

$$\Delta w = \frac{-z_m}{1 + z_m} (1 + w_{ot})$$

- Estima-se w_{ot} ou adotam-se equações empíricas para linhas de ótimos

- 
- Estima-se w_{ot} ou adotam-se equações empíricas para linhas de ótimos.

- Hipérbole de Kucsinski (1950), solos brasileiros:

$$\gamma_{dmax} = \frac{25,37}{1 + 2,6w_{ot}} \pm 0,5 (\text{kN/m}^3)$$

- Bernucci (1995), solos lateríticos:

$$\gamma_{dmax} = 22,62 - 0,26 w_{ot} (\text{kN/m}^3)$$



Teor de umidade

24 horas para ser obtido!

- Tato
- Frigideira
- Speedy
- Estufa de raios infra-vermelhos
- Micro-ondas
- Método nuclear

Speedy (Speedy Moisture Test)

- DNER ME 052/94



(carbureto de cálcio + água → acetileno e hidróxido de cálcio)

O gás acetileno ao expandir-se gera pressão proporcional à quantidade de água existente no ambiente. A leitura dessa pressão em um manômetro permite avaliar o teor de umidade.





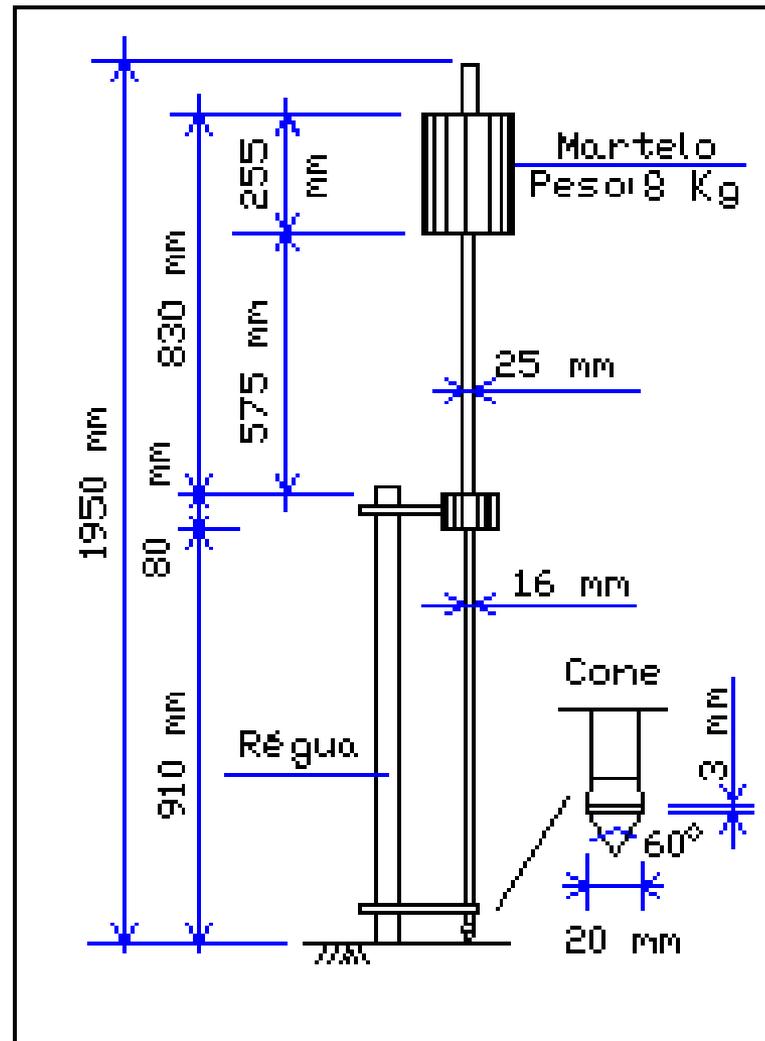
Outros métodos de controle de compactação

- Método de resistividade
- Ensaio de penetração: agulha de Proctor, CBR in situ
- Método MCV
- Pavimentos: deflexão com a viga Benkelman ou FWD (Falling weight deflectometer)



DCP – Penetrômetro Dinâmico de Cone

- Dynamic Cone Penetrometer (Kleyn, 1975)
- capacidade de suporte no estado natural ou compactado
- várias correlações de calibração entre o DCP e outros parâmetros do solo tradicionalmente medidos
- no Brasil, o DCP vem sendo utilizado principalmente em pesquisa (DER-SP/IPAI, 1977; Trichês e Cardoso, 1999)

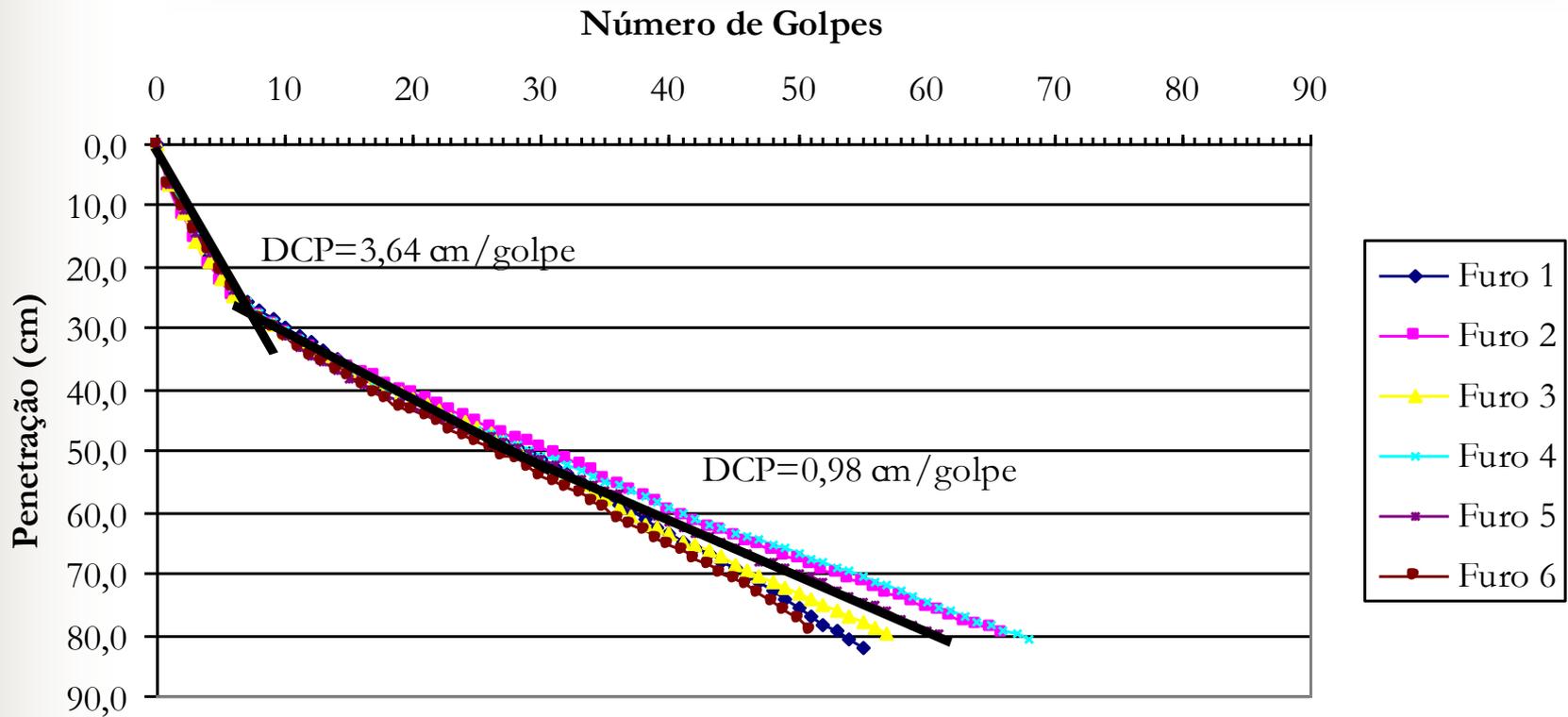


**Penetrômetro Dinâmico de Cone
(Trichês e Cardoso, 1999)**



DCP – Penetrômetro Dinâmico de Cone

- Recomendado para solos arenosos (pode ser utilizado em solos finos, Röhm 1984).
- Durante o ensaio mede-se a penetração no solo por meio de uma régua acoplada ao equipamento
- Relaciona-se essa medida com o número de golpes necessário para tal deslocamento.
- Representa-se o número de golpes acumulado em função da profundidade penetrada pelo equipamento.
- O índice de penetração é a tangente desta curva, ou seja, a razão entre a profundidade e o número de golpes necessários para penetrar a respectiva profundidade.



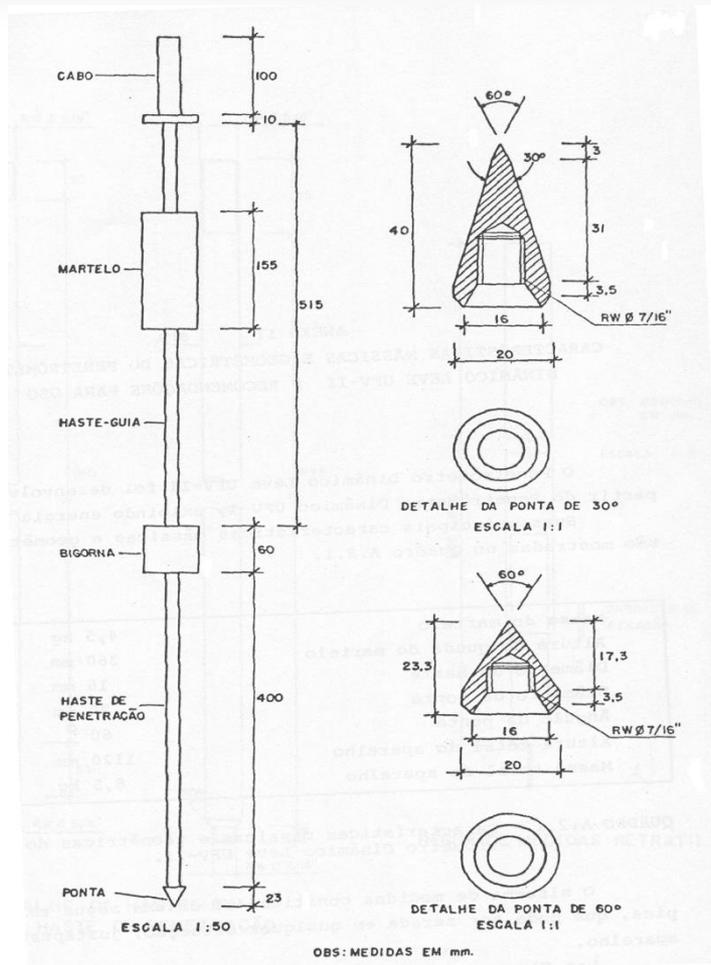
Resultados de controle de compactação com DCP

(CONVÊNIO EPUSP-PTR-LTP / TIGRE TUBOS E CONEXÕES SA)



Penetrômetro dinâmico leve UFV-II

- Também conhecido como mini-cone, é um equipamento que funciona de maneira semelhante ao Penetrômetro Dinâmico de Cone, só que com dimensões reduzidas. O equipamento foi desenvolvido na Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais (Röhm, 1984).



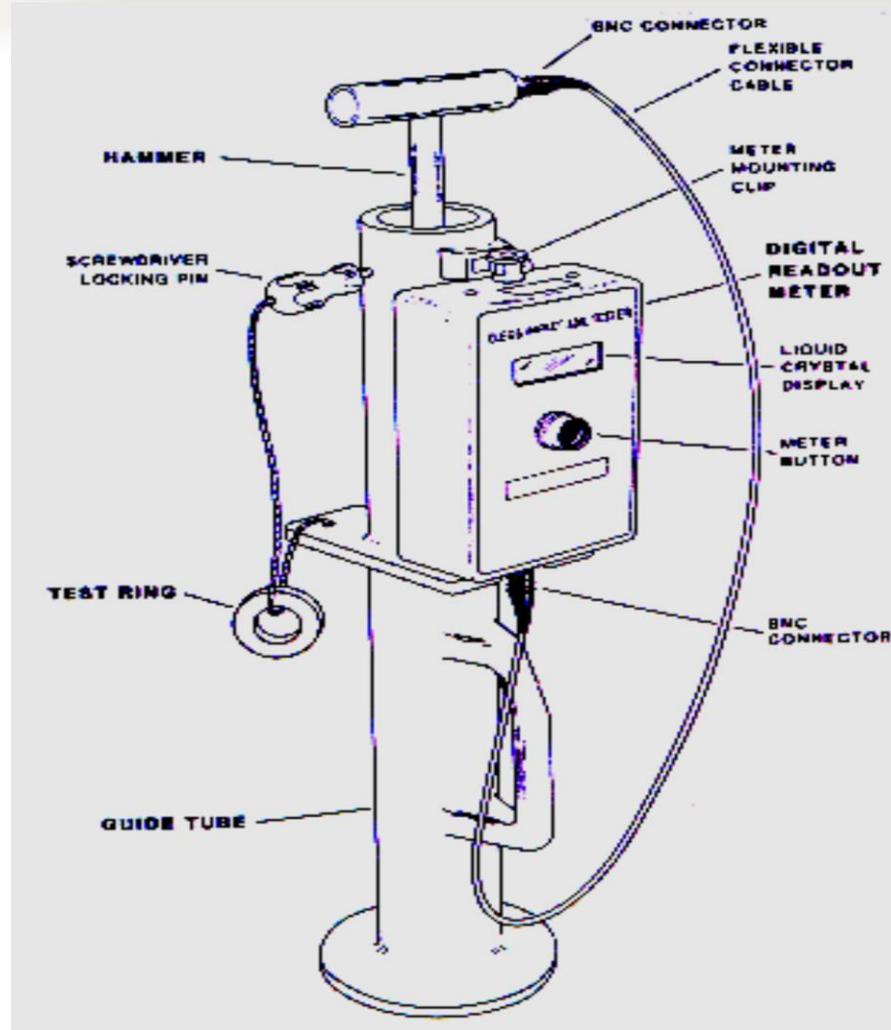
Vista geral do Penetrômetro Dinâmico Leve UFV-II e detalhes das pontas de 30° e 60° (Röhm, 1984)





Equipamento de impacto Clegg

- composto de soquete de impacto munido com sensor de tensão, tubo-guia com base alargada, alça para transporte manual, display digital para registro da força de repique.
- um acelerômetro na extremidade de um soquete cai de uma altura padronizada e registra em um visor digital um número que se relaciona com a rigidez da camada.
- avalia a “intensidade” no repique ao impacto.
- é utilizado em superfície, mas avalia a camada superficial em conjunto com as subjacentes, pois mede o repique resultante da resposta elástica de uma certa massa de solo, cuja profundidade depende de algumas características de natureza e estado do material.



**Equipamento de Impacto Clegg
(Trevor Deakin Consultants Ltd)**



Equipamento de Impacto Clegg para controle de compactação
(CONVÊNIO EPUSP-PTR-LTP / TIGRE TUBOS E CONEXÕES SA)



O soquete cai livremente de uma altura fixa, dentro do tubo-guia, bate na superfície e desacelera a uma velocidade determinada pela capacidade de suporte ou rigidez do material que sofreu o impacto. O acelerômetro marca a desaceleração do soquete no impacto. São aplicados golpes consecutivos no mesmo lugar; a leitura obtida no quarto golpe é o valor de impacto (IV – Impact Value) do material que está sendo testado.

Quanto maior o grau de compactação da camada, ou seja, quanto mais rígido e resistente for o material, maior será o valor de impacto.

O valor de impacto obtido no quarto golpe pode ser convertido num valor de “CBR equivalente”:

$$CBR_{equivalente} = 0,07(IV_4)^2$$