

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
PEF 2403 Obras de Terra

Compactação de Aterros

Introdução

Conceitualmente:

Compactação \neq Adensamento

DIFERENÇA RADICAL

- Compactação – expulsão de ar dos vazios
- Adensamento – expulsão de água dos vazios

Introdução

Por que compactar solos?

- Compactação significa, basicamente, promover a **redução do índice de vazios / densificação** de um solo por meio de processos mecânicos, geralmente utilizando rolos compactadores ou soquetes manuais
- Solos compactados são os únicos solos “produzidos” industrialmente pelo homem, que busca homogeneidade e características específicas.
- Solo lançado – fofo e heterogêneo

Introdução

- Compactação
 - ◆ Homogeneização do solo
 - ◆ Melhoria das propriedades de engenharia devido ao aumento do peso específico do solo
 - ◆ Resistência ao cisalhamento
 - ◆ Redução da compressibilidade (recalques)
 - ◆ Redução de permeabilidade
 - ◆ Aumento da resistência à erosão

Introdução

■ Aplicações

- ◆ Aterros em geral
 - ◆ Barragens – solos, transições ou enrocamento
 - ◆ Viários – terraplenos, fundação de pavimento
- ◆ Melhoria do solo de apoio de fundações diretas
- ◆ Terraplenos de muros de arrimo (back fills)
- ◆ Reaterro de valas
- ◆ Retaludamento de encostas naturais

Introdução

■ Aplicações

- ◆ A especificação de um determinado aterro compactado é função da finalidade de sua aplicação
 - ◆ Redução de recalques
 - ◆ Aumento da resistência ao cisalhamento
 - ◆ Evitar elevadas pressões neutras
 - ◆ Redução de permeabilidade

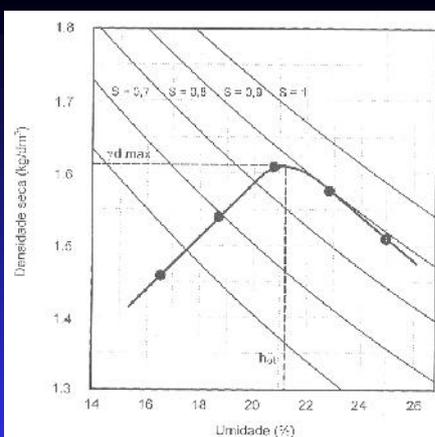
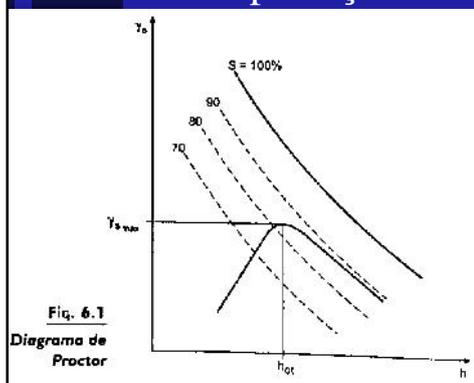
Laboratório

■ Ensaio de Proctor - Solos

- ◆ Determinação do ponto ótimo de compactação – maior peso específico
- ◆ **Curvas peso específico seco x umidade**
- ◆ Determinação das curvas de compactação do solo

Laboratório

Curva de compactação



$$e = \frac{\delta}{\gamma_s} - 1 \quad (1)$$

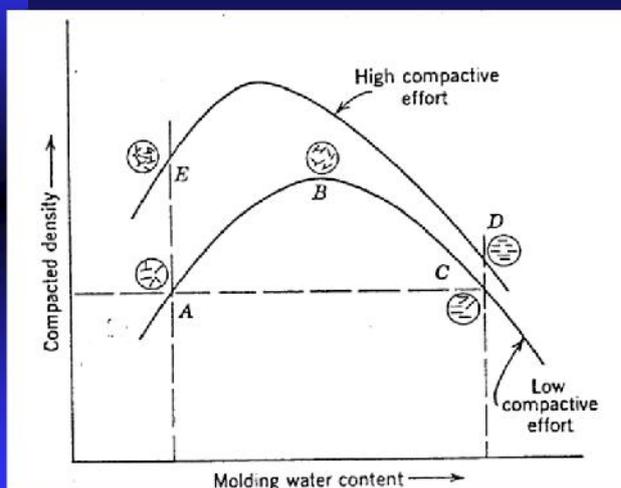
$$e = \frac{\delta h}{S}$$

Após algumas transformações, resulta em:

$$\gamma_s = \frac{1}{\frac{1}{\delta} + \frac{h}{S}} \quad (2)$$

Estrutura do solo

Quanto maior o teor de umidade ou maior a energia de compactação mais a estrutura é dispersa



Laboratório

■ Ensaio de Proctor

- ◆ Compactação de solo com determinada energia em **molde cilíndrico** de volume conhecido
- ◆ **Energia de compactação** - padronizada
 - ◆ Energia Normal de Proctor – soquete com massa de 2,5kg, caindo de 30,5cm de altura por 26 vezes
 - ◆ Energias Intermediária e Modificada

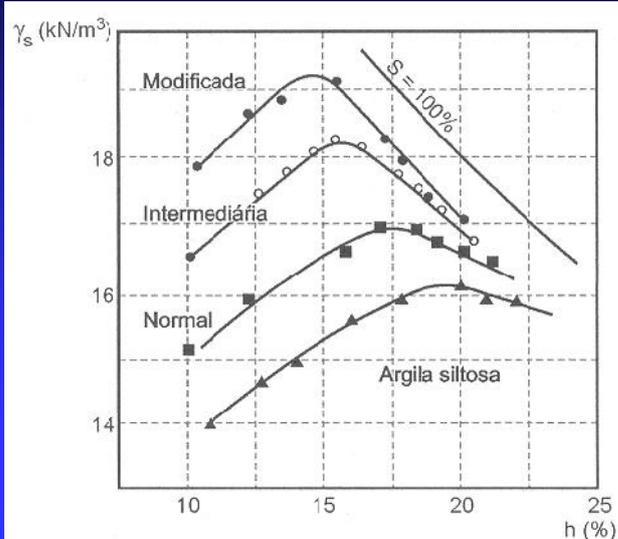
Laboratório

◆ Energia de compactação – padronizada

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

Laboratório

Curvas de compactação de um solo para diferentes energias de compactação



Laboratório

■ Ensaio de Proctor

- ◆ Com ou sem **reuso de material** – reuso pode provocar quebra de partículas e alteração da granulometria do solo
- ◆ Com ou sem **secagem prévia** – problemas ligados geralmente a estrutura de argilo minerais e sua interação com a água
- ◆ Sempre **SEM Reuso de Material e SEM Secagem Prévia**

Comportamento Aterro Compactado

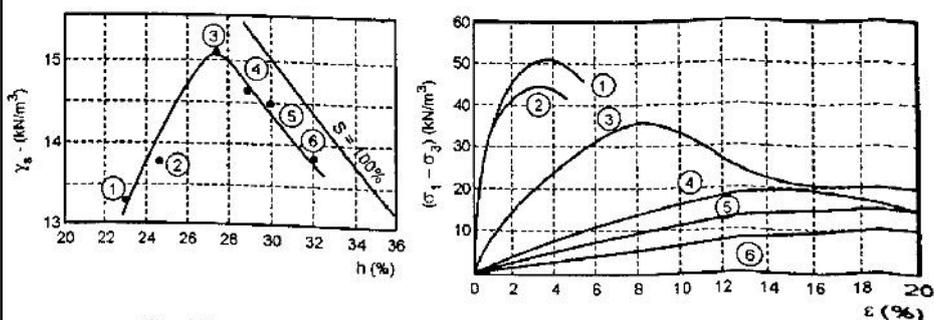


Fig. 6.9

Resistência ao cisalhamento em função da umidade de compactação (Lambe e Whitman, 1969)

Comportamento Aterro Compactado

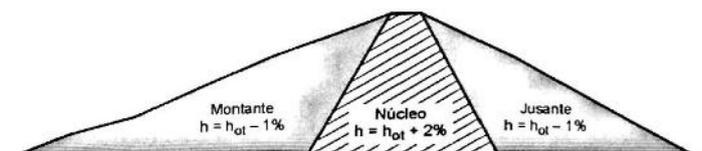


Fig. 6.10
Otimização de seção de barragem

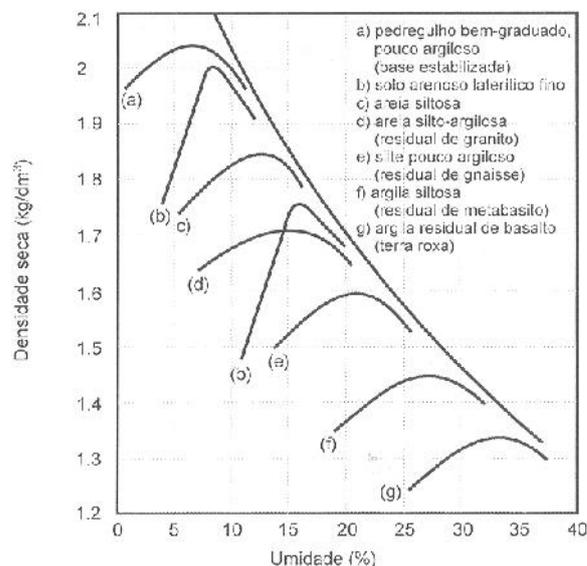
Laboratório

■ Procedimento – ensaio de Proctor

- ◆ Realiza-se a compactação do solo, no interior do cilindro, com **diversas umidades** – 5 teores diferentes e crescentes
- ◆ Molde e solo pesados para cada teor de umidade
- ◆ Determinação da umidade do solo para cada teor de umidade

Laboratório

■ Valores típicos



Campo

■ Compactação de campo

- ◆ Escolha do material – empréstimo / jazida
- ◆ Determinação da umidade natural e decisão de eventual macro correção da umidade
- ◆ Escavação, transporte e espalhamento
- ◆ Ajuste micro da umidade e homogeneização
- ◆ Compactação propriamente dita

Campo - Equipamentos

- Rolos compactadores
 - ◆ Liso - argilas
 - ◆ Pneumático – silte, areia com finos
 - ◆ Pé de carneiro – argilas e siltes
 - ◆ Vibradores - areias
- Compactadores de impacto – soquete manual / sapo mecânico → pequenas áreas

Compactação de Campo

Tab. 6.2 Equipamentos de Compactação

Tipo	Solo	Modo de compactar	Parâmetros dos equipamentos			
			e (cm)	N	v (km/h)	p ou P
Rolo pé de carneiro	Argila ou silte	De baixo para cima	20 a 25	8 a 10	≤ 4	2.000 a 3.000 kPa
Rolo pneumático	Silte, areia com finos	De cima para baixo	30 a 40	4 a 6	4 a 6	500 a 700 kPa
Rolo vibratório	Material granular	Vibração	60 a 100	2 a 4	≥ 8	50 a 100 kN

Legenda: e = Espessura da camada de solo solto p = Pressão na pata ou no pneu
 N = Número de passadas do rolo compactador P = Peso do rolo vibratório
 v = Velocidade do rolo compactador

Campo - Equipamentos

Rolo liso



Rolo vibratório liso



Rolo Pé de Carneiro



Campo - Equipamentos

Rolo Pé de Carneiro



Rolo Pé de Carneiro estático

Compactação de Campo



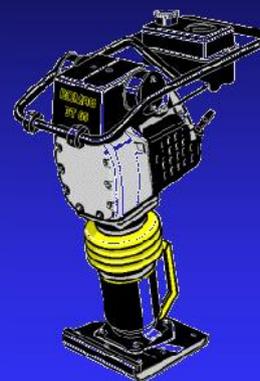
Compactação de Campo



Rolo Liso



Manual



Especificação de compactação

A partir dos resultados obtidos em **laboratório** e do comportamento / desempenho requerido para o aterro compactado acabado, são definidas as diretrizes da compactação de campo através da **especificação de compactação**

Especificação de compactação

- Grau de compactação

$$GC = \gamma_{s \text{ campo}} / \gamma_{s \text{ max laboratório}}$$

Geralmente exige-se um valor numa determinada faixa (entre 95% e 105% , por exemplo)

- Desvio de umidade

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

Geralmente estipula-se uma variação máxima (Δw entre -2% e +1% , por exemplo)

Este conceito, apesar de ainda muito usado não é coerente: o melhor é definir $0,9 w_{\text{ótima}} < w_{\text{campo}} < 1,1 w_{\text{ótima}}$

Especificação de compactação

- Espessura máxima da camada

- Número de passadas do rolo compactador – como o equipamento é função da disponibilidade da executora, a quantidade de passadas deve ser ajustada em função dos demais parâmetros

- Tratamento da superfície da camada acabada anterior para recebimento de uma nova camada

Controle de compactação

- Como controlar a compactação realizada?

$$GC = \frac{\gamma_{s\text{campo}}}{\gamma_{s\text{max}}} \quad (3)$$

$$\Delta b = h_{\text{campo}} - h_{\text{ot}} \quad (4)$$

Controle de compactação

- **Laboratório** – muito tempo até obter os resultados
– pouca eficiência na solução de problemas / não adequação, principalmente a obtenção da umidade de campo, que depende de tempo em forno
- **Métodos expeditos de campo**
 - ◆ Determinação da densidade natural – dificuldade baixa
 - ◆ Determinação da umidade – dificuldade média a grande

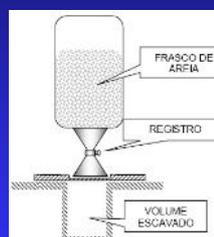
Controle de compactação

■ Determinação da densidade natural

- ◆ Cilindro bizelado – cravado / volume conhecido
- ◆ Frasco de areia – escavação preenchida com areia em volume conhecido
- ◆ Balança hidrostática – retirada de amostra indeformada

Controle de Compactação

Densidade do Aterro no Campo (γ_{1a})



$$\gamma_{sp} = \frac{\gamma_{ms}}{1 + b_a} \quad (6)$$

■ Determinação da umidade

- ◆ **Determinação convencional** – forno 24hrs
- ◆ **Ensaio Speedy** (Speedy moisture test) – solos arenosos – mede-se a pressão do gás liberado na reação da água presente no solo com carbureto de cálcio
- ◆ **Estufa de raios infra vermelhos** – medida da umidade do solo em tempo reduzido / pode implicar erros
- ◆ “Processo da frigideira” – secagem do solo em frigideira sobre chama direta- resultados pouco confiáveis

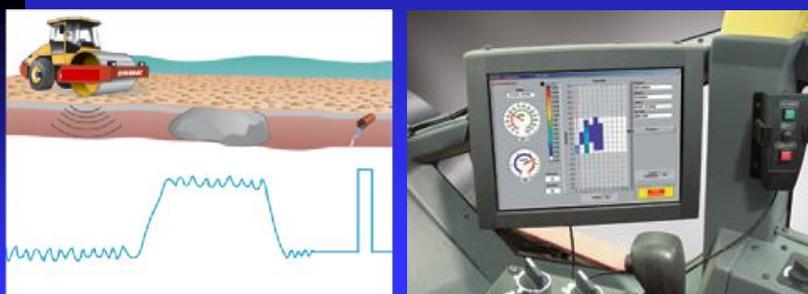
Controle de compactação

■ Método de Hilf

- ◆ Método expedito de campo para determinação dos parâmetros de compactação do solo – grau de compactação e **desvio de umidade**
- ◆ Ajuste da curva de Proctor e Hilf

Controle de compactação

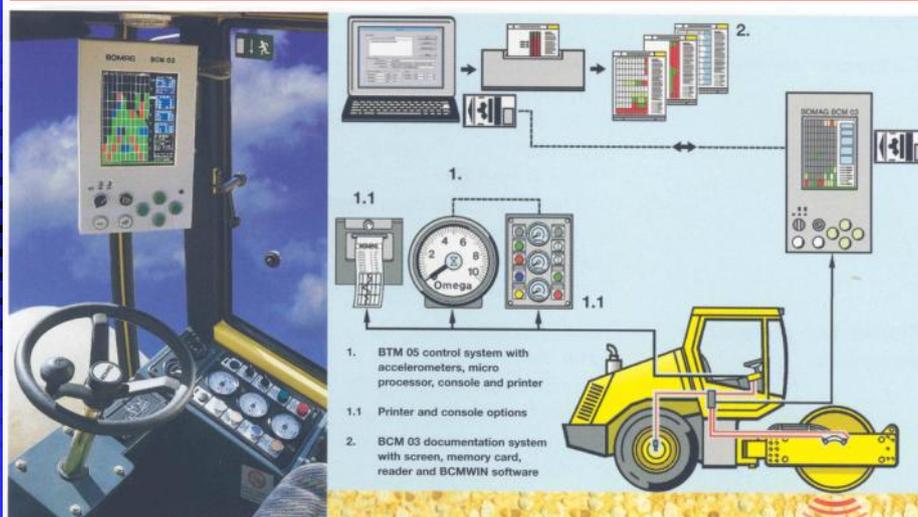
- **Controle Contínuo de Campo** - análise das ondas refletidas pelo solo e geradas por vibração imposta ao solo após sua compactação

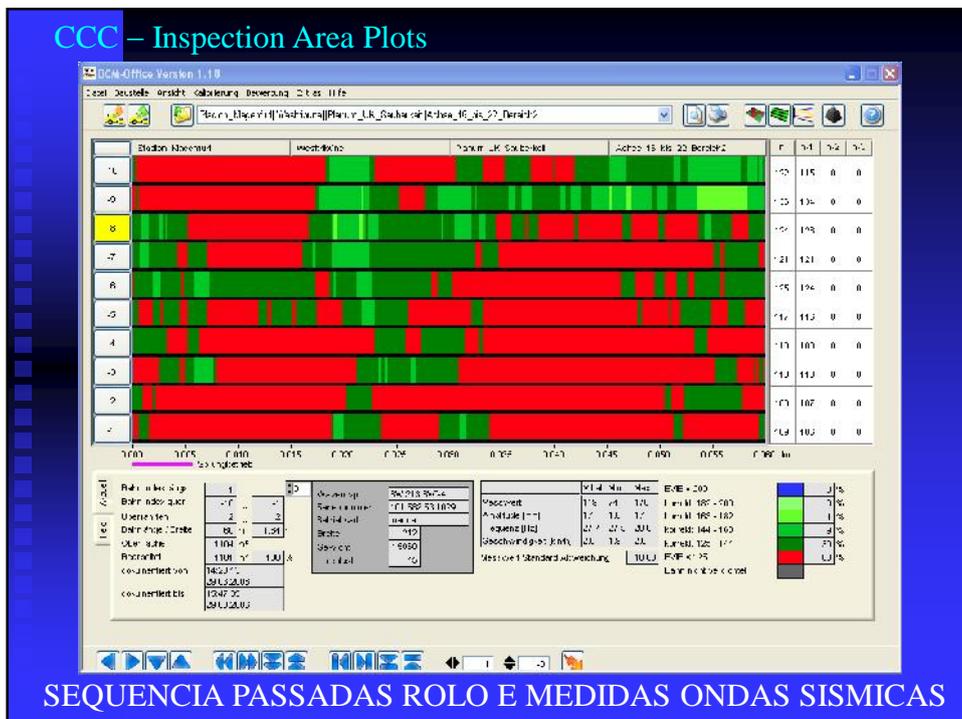


MÉTODO MODERNO E FUTURO CONTROLES COMPACTAÇÃO

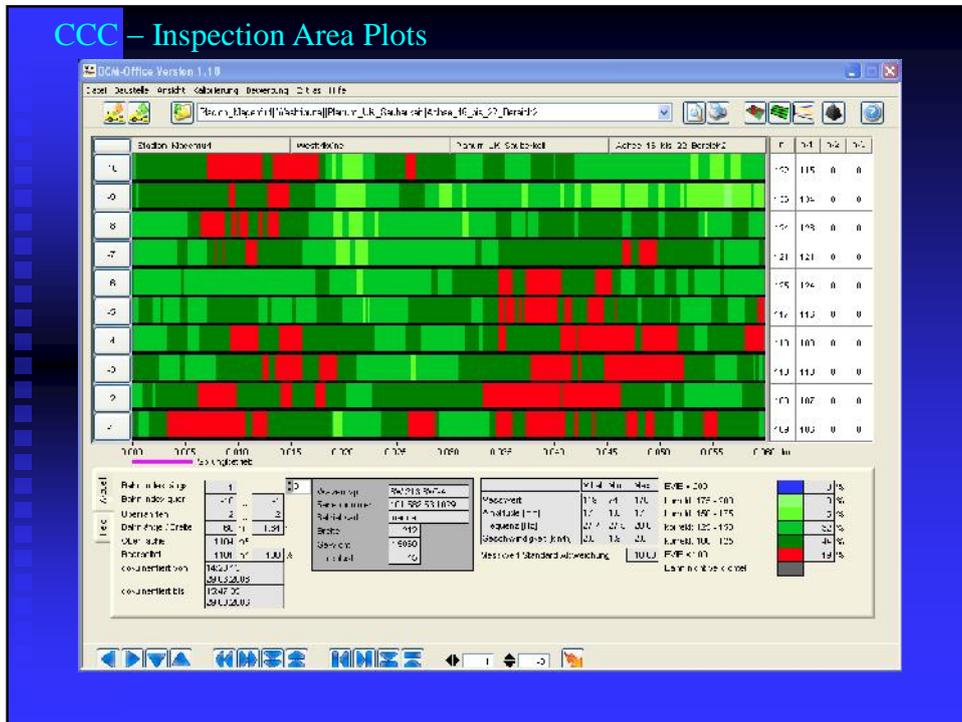
Quality Assurance – Compaction Control

Continuous Compaction Control (CCC)

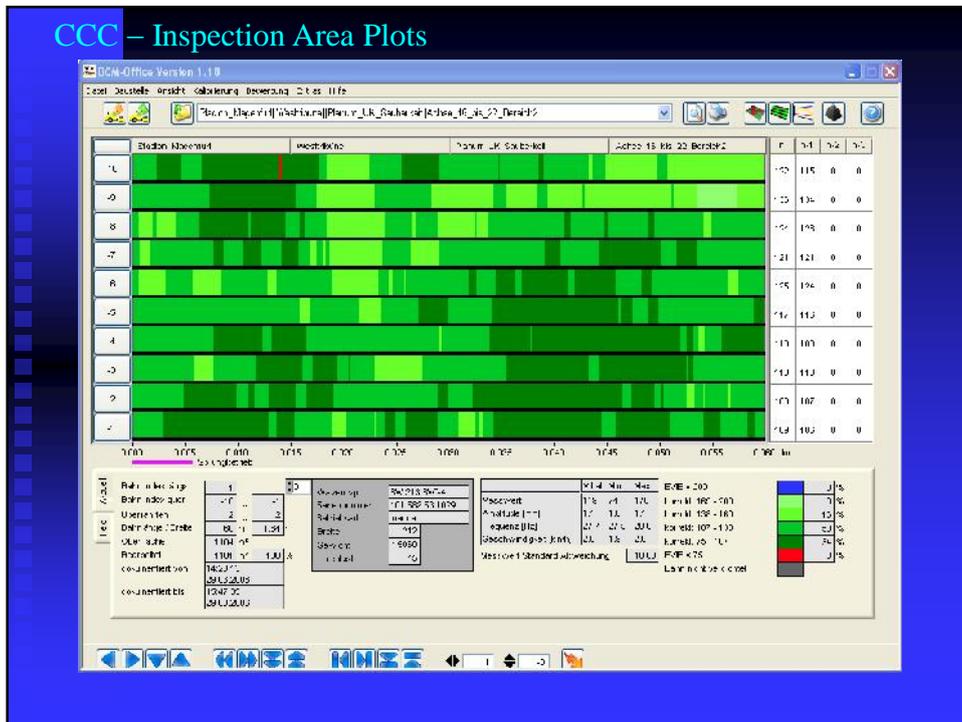




CCC – Inspection Area Plots



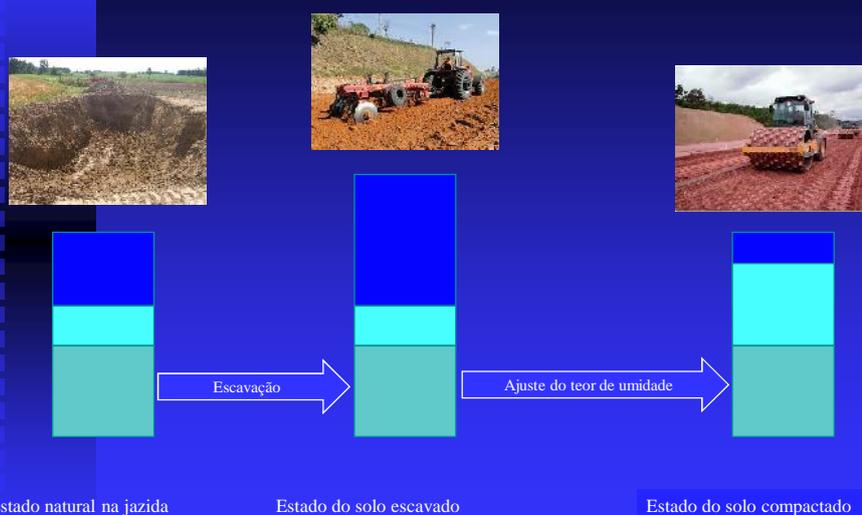
CCC – Inspection Area Plots



Aterro experimental

- Comum quando da realização de aterros compactados de grandes proporções
- Construção de aterro modelo
 - ◆ auxiliar a escolha do equipamento,
 - ◆ determinar o número de passadas e velocidade ideais para se atingir o produto final requerido

Estados do solo da jazida para o aterro

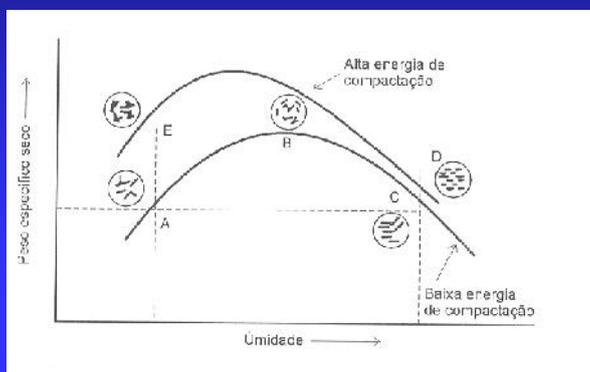


Problemas na compactação

- Solos argilosos com umidade natural excessiva – **PERIGO** - solo “borrachudo” – elevadas sobre pressões neutras devidas a compactação – eventual ruptura
- **Correção de umidade e homogeneização** – através de irrigação (calcula-se a quantidade de água necessária) e passagem de grade – mais difícil quanto mais argiloso o solo
- “Selagem” da superfície em **períodos de chuva** – passagem de rolo liso sobre camada previamente umedecida

Estrutura do solo compactado

- Arranjo das partículas
- Ramo seco x ramo úmido

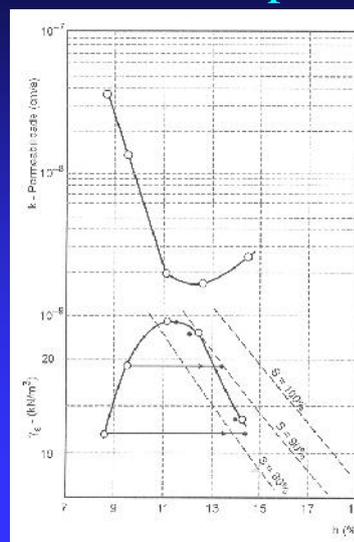


Comportamento – solos compactados

- Comportamento do solo compactado
 - ◆ insaturado
 - ◆ sobreadensado ($P_a \approx 35$ a 50 kPa)

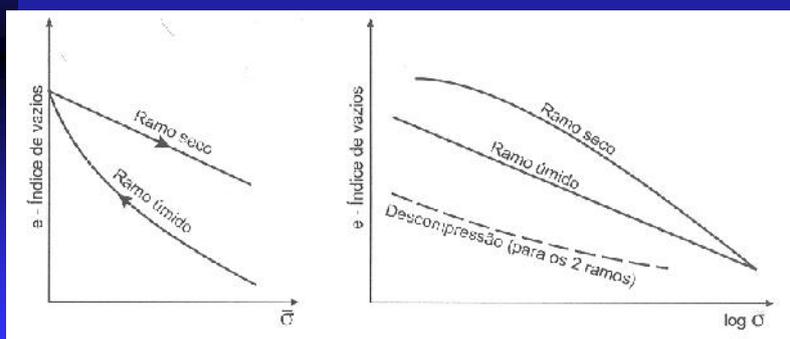
Comportamento – solos compactados

- Permeabilidade



Comportamento – solos compactados

■ Deformabilidade



Comportamento – solos compactados

■ Resistência ao cisalhamento

