

PERMEABILIDADE DE SOLOS COMPACTADOS

COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DO SOLO

$$Q = k i A \quad \text{ou} \quad v = k i$$

(Lei de Darcy, 1856)

Q ... vazão

k ... coeficiente de permeabilidade

i ... gradiente hidráulico

A ... área total da seção transversal de solo

v ... velocidade aparente de fluxo

$$k = K \gamma / \mu$$

k ... coeficiente de permeabilidade

K ... permeabilidade intrínseca do solo

γ ... peso específico do fluido

μ ... viscosidade dinâmica do fluido

Fatores que mais afetam a permeabilidade dos solos (Lambe, 1958):

- composição do solo (limites de consistência e distribuição granulométrica)**
- características do fluido**
- índice de vazios**
- estrutura**
- grau de saturação**

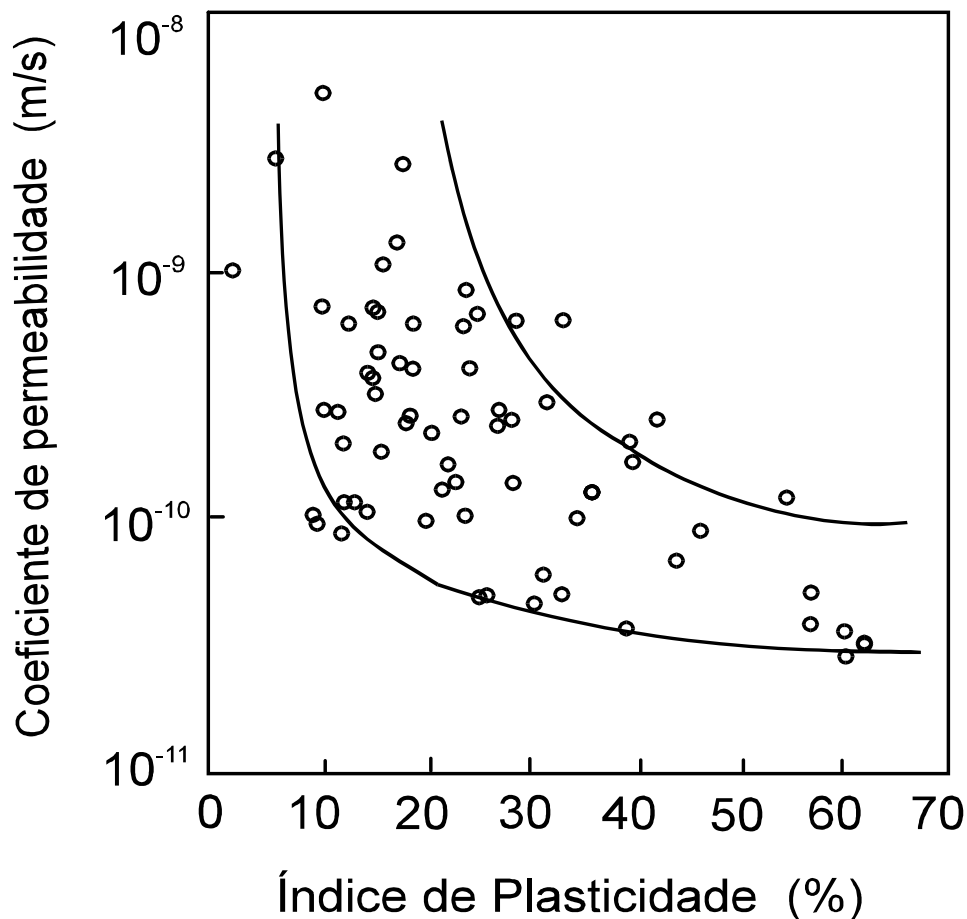
COMPOSIÇÃO DO SOLO

- tamanho dos vazios depende da proporção relativa entre partículas de diversos tamanhos
- k tende a ser baixo para solo bem graduado e para matriz argilosa
- k diminui com a porcentagem de finos até $F \approx 30\%$
- k diminui com porcentagem de argila até $C \approx (8 \text{ a } 12\%)$
- k é mais sensível a F e C do que a G e S
- Benson et al. (1994):
Para $k \leq 10^{-9}$ m/s: $F \geq 30\%$ e $C \geq 15\%$
 $A \geq 0,3$

COMPOSIÇÃO DO SOLO

Plasticidade está associada à quantidade e atividade das partículas de argila: maior IP, menor permeabilidade.

**Solos compactados (Benson et al., 1994) :
67 aterros nos EUA, $2\% \leq IP \leq 62\%$, $44\% \leq F \leq 100\%$, $14\% \leq A \leq 75\%$.**



Para $k \leq 10^{-9}$ m/s: $LL \geq 20\%$ e $IP \geq 7\%$

Índice de vazios

Equação de Kozeny-Carman:

$$k = \frac{1}{k_0 S^2} \frac{e^3}{1+e}$$

K permeabilidade absoluta

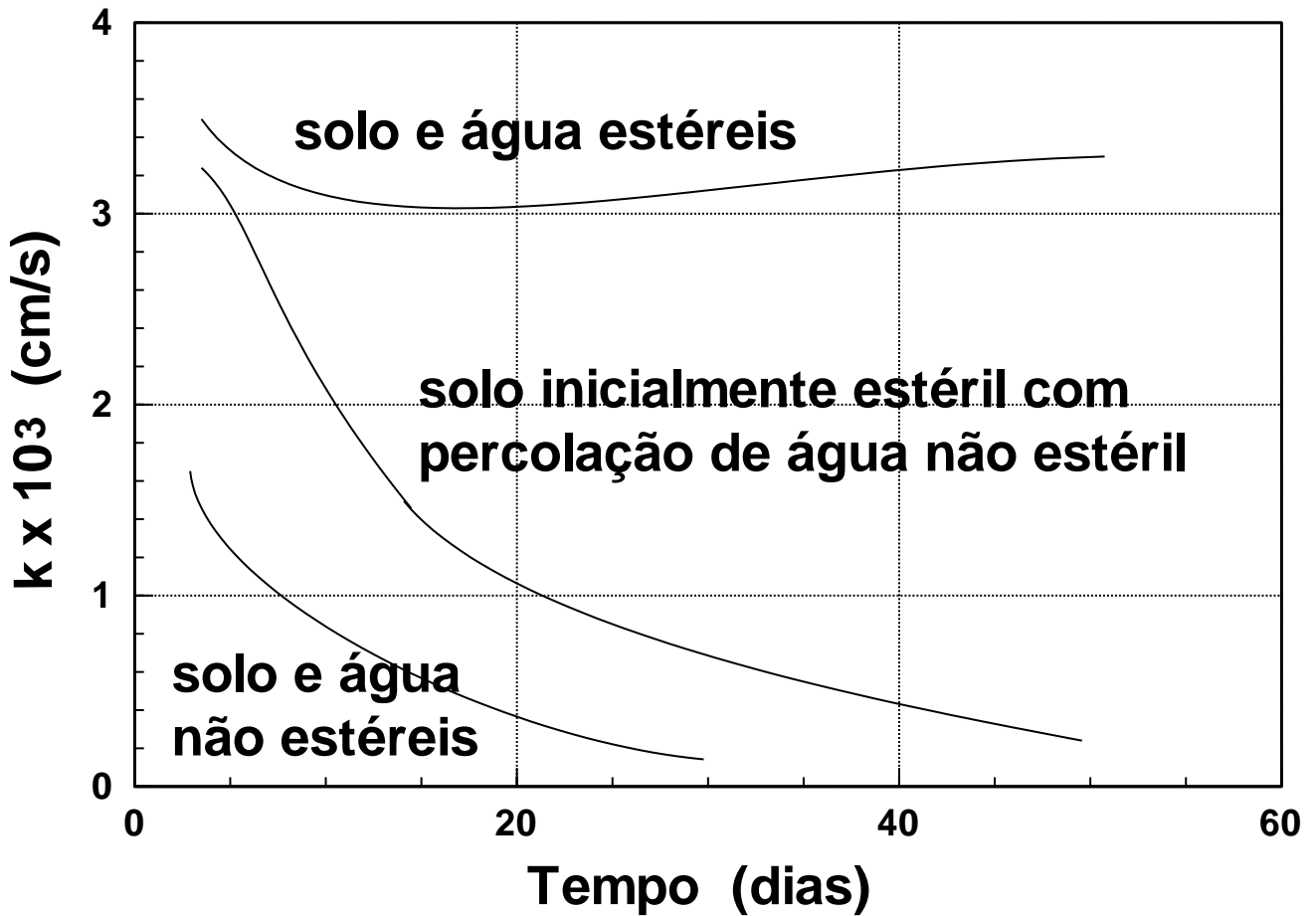
e índice de vazios

k_0 constante dependente da forma dos vazios e da tortuosidade do fluxo

S superfície específica

Fluido

Crescimento de microorganismos



Allison, 1947 apud Olson & Daniel, 1981

Grau de saturação

- **Permeabilidade é máxima para solo saturado**
- **Curva de coeficiente de permeabilidade em função da saturação, teor de umidade ou sucção**
- **Para solo já compactado: aumento no grau de saturação com índice de vazios constante leva a um aumento na permeabilidade**
- **Mitchell et al. (1965):**
 $k = f (s^3)$

Grau de saturação

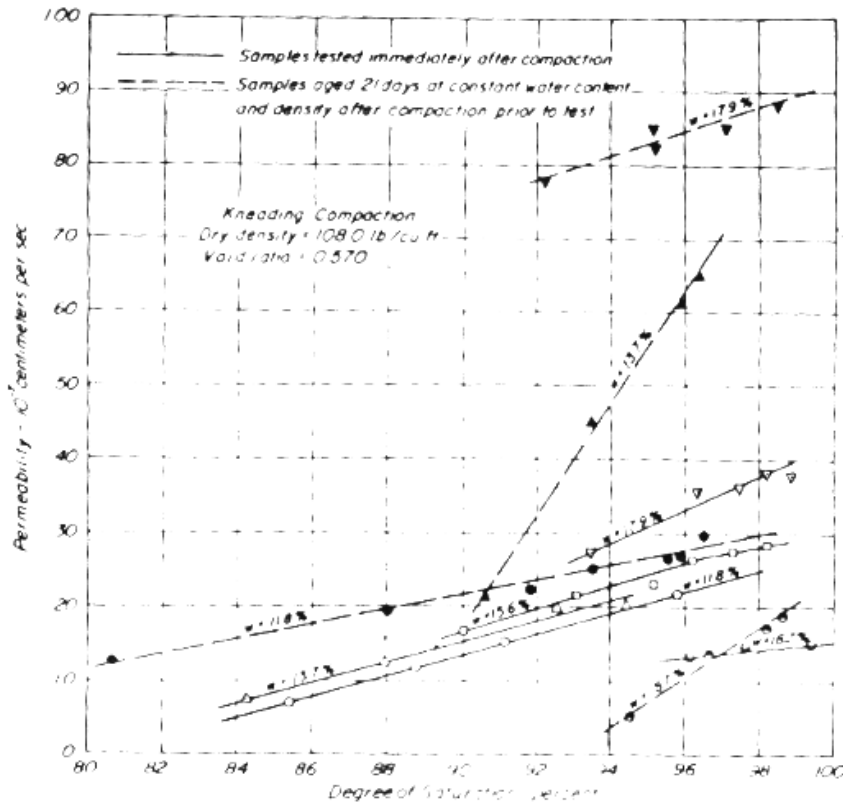
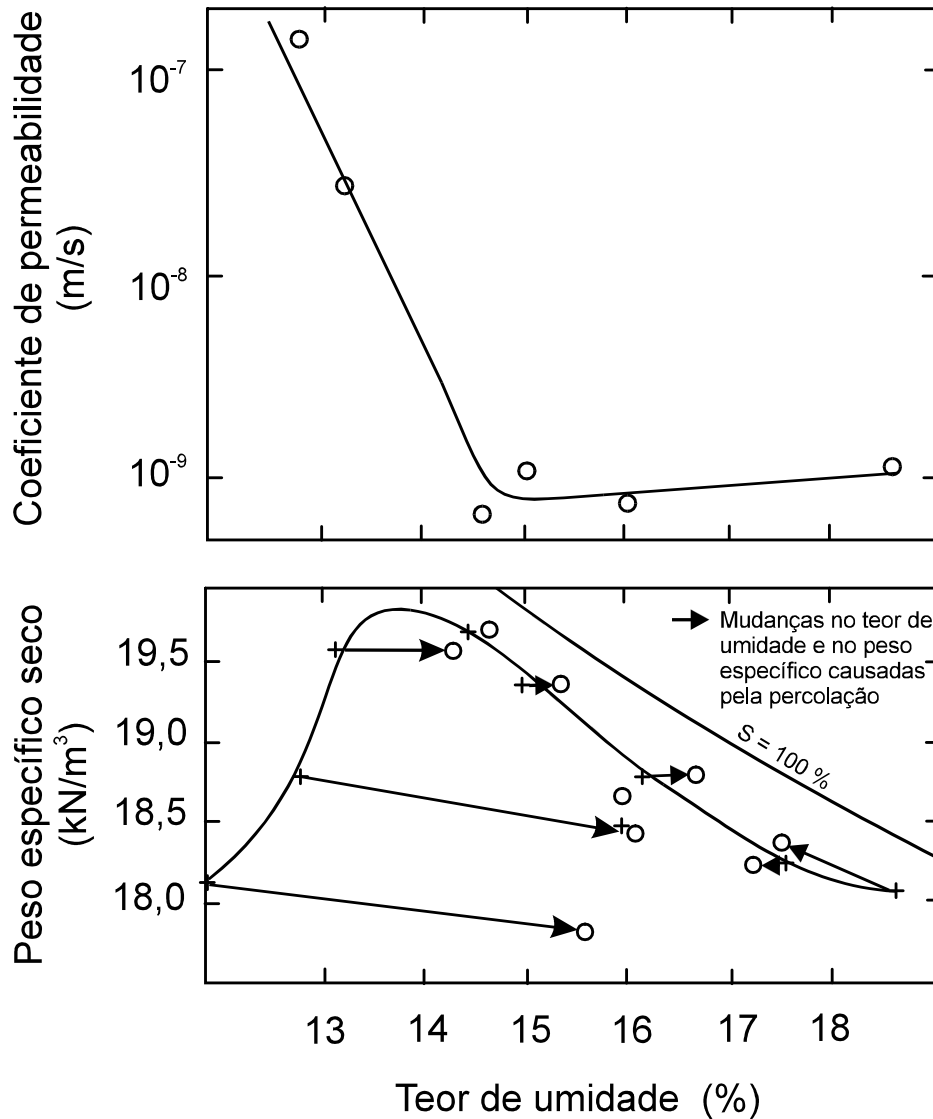


FIG. 20.—INFLUENCE OF DEGREE OF SATURATION ON PERMEABILITY OF COMPACTED SILTY CLAY

(Mitchell et al, 1965)

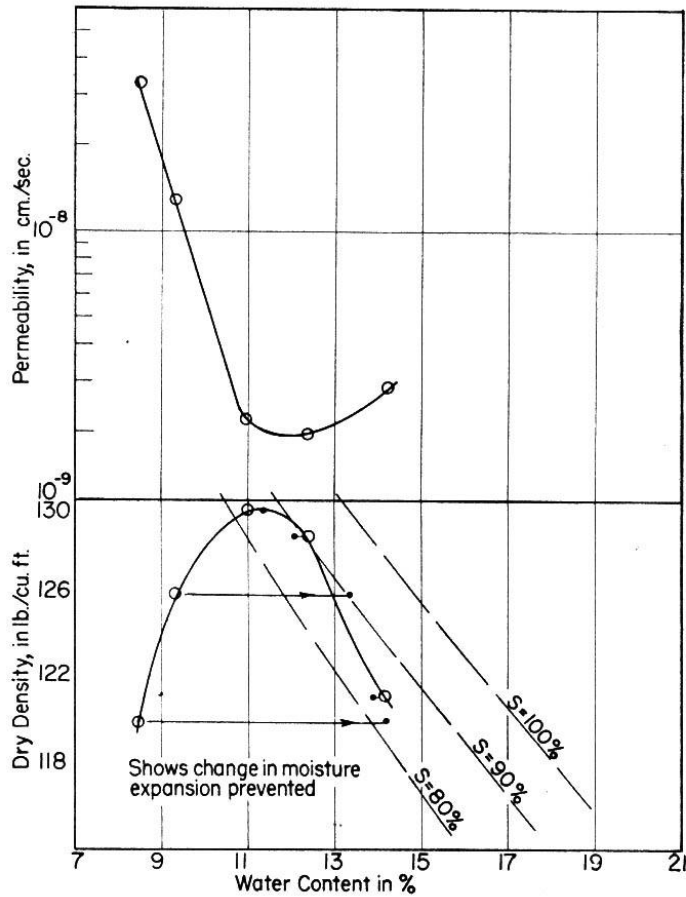
Estrutura



Lambe, 1958:

estrutura é o fator fundamental que comanda a permeabilidade dos solos compactados

Estrutura



**Argila Siburua
(Lambe, 1958)**

Estrutura

Lambe (1958):

Ramo seco:

- Estrutura floculada
- Orientação aleatória das partículas
- Vazios maiores
- Menor caminho de fluxo
- Maior permeabilidade

Ramo úmido:

- Estrutura dispersa
- Arranjo paralelo das partículas
- Vazios menores
- Fluxo mais tortuoso
- Menor permeabilidade

Estrutura

Permeabilidade no ramo seco é de 1 a 3 ordens de magnitude maior do que a permeabilidade no teor de umidade ótimo ou no ramo úmido.

Permeabilidade é semelhante no teor de umidade ótimo e no ramo úmido para uma dada energia de compactação e um dado tipo de solo.

Modelos de Estrutura da Argila Compactada

Lambe (1958):

partículas individuais de argila são as unidades predominantes (arranjos floculado e disperso).

Olsen (1962):

modelo de “clusters”

Barden et al (1970), Garcia-

Bengochea et al. (1979):

agregados deformáveis

Energia de compactação

- **Benson et al. (1994):**
k varia 100 vezes para a mesma umidade e diferentes energias de compactação
- **aumento de E acarreta aumento de γ_{dmax} e diminuição de w_{ot} ; *para um dado teor de umidade, a estrutura depende da energia de compactação***
- **k diminui com o aumento de w ou com o aumento da energia**
- **escala macroscópica: quebra de agregados e eliminação de poros inter-agregados**
- **escala microscópica: reorientação das partículas e diminuição dos poros inter-partículas**

Processo de compactação

- estrutura é influenciada pelos esforços de cisalhamento durante a compactação
- Mitchell et al. (1965): acima de w_{ot} ,
 $k(\text{compactação estática}) = 5 k(\text{pisoteamento})$;
no ramo seco, resultados semelhantes
- no ramo seco: menores esforços cisalhantes, menor quantidade de água para lubrificação e rearranjo de partículas
- Benson et al. (1994): $k=f(\text{tipo e peso do equipamento de compactação})$
 $k(\text{pneu-de-borracha}) = 4 k(\text{pé-de-carneiro})$

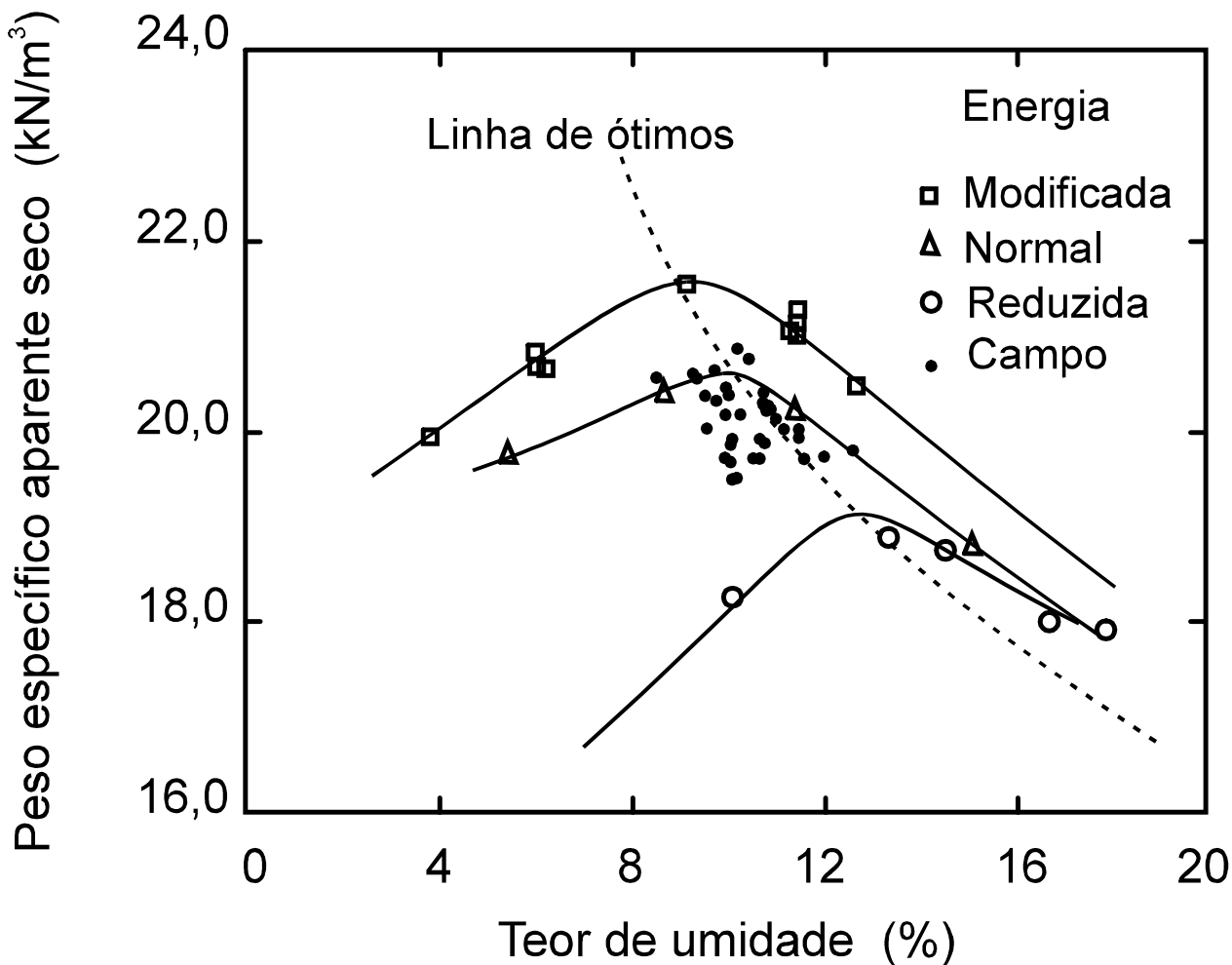
Previsão de permeabilidade de campo

Daniel (1984):

permeabilidade de campo de “clay liners” era de 10 a 1000 vezes maior do que a determinada em laboratório

- trincas de secagem**
- defeitos hidráulicos**
- obtenção de amostra representativa (rochas, raízes, fração do solo)**
- fluido diferente**
- gradientes hidráulicos excessivos**
- pressão confinante excessiva**
- temperatura**
- zonas cisalhadas no corpo-de-prova durante a moldagem**
- método de compactação**

Compactação de laboratório e de campo



(Benson et al., 1992)

Permeabilidade de solos finos: laboratório e campo

Olson & Daniel, 1981:

- Solos finos são heterogêneos: estratificados em escala maior; areia, fissuras, juntas e raízes em escala menor. O volume de solo ensaiado deveria ser grande o suficiente para conter uma distribuição estatisticamente significativa dessas feições.
- Perturbação das amostras.
- Erros experimentais.
- Tendência a selecionar amostras mais uniformes para ensaios.
- Tendência a medir k vertical no laboratório e k horizontal no campo.

Permeabilidade de solos finos: laboratório

Erros experimentais (Olson & Daniel, 1981)

- Vazios formados durante a preparação dos corpos-de-prova: desbastamento das arestas, alívio de tensões.
- Zonas amolgadas (0,2 cm).
- Ar na amostra (bolhas aprisionadas na saída, bolhas formadas por decréscimo de pressão).
- Crescimento de microorganismos.
- Problemas de meniscos em tubos capilares.
- Variação volumétrica decorrente de mudança no estado de tensões.
- Direção do fluxo

Permeabilidade de solos finos: laboratório e campo

Olson & Daniel, 1981:

- Ensaio de laboratório são mais econômicos.
- Ensaio de laboratório são apropriados para solos compactados (várias densidades e teores de umidade).
- Para solos não saturados, ensaios de laboratório estão mais desenvolvidos do que os métodos de campo.

Permeabilidade de solos finos: laboratório e campo

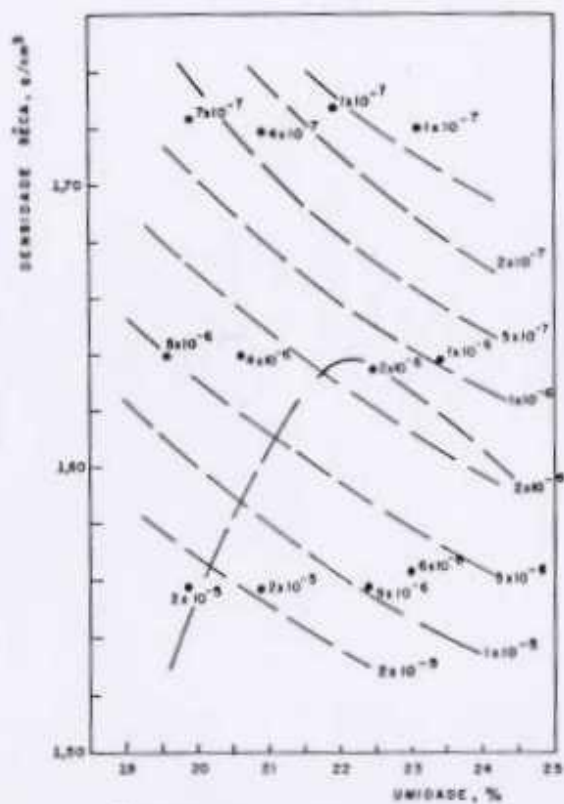
Olson & Daniel, 1981:

Tabela $k_{\text{campo}} / k_{\text{laboratório}}$:

0,3 a 46000, com 90% entre 0,38 e 64

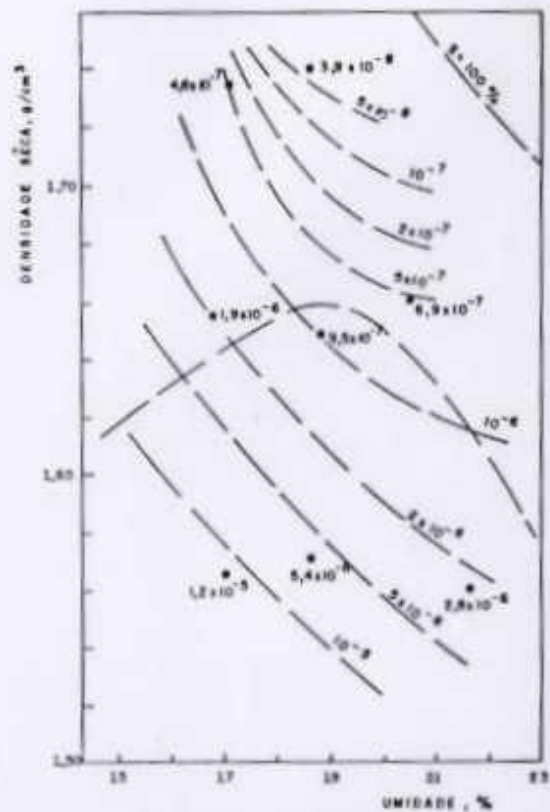
- Ensaios de campo são preferíveis aos de laboratório, por envolverem maior volume de solo, assim levando em conta efeitos da macroestrutura.
- Ensaios de campo são mais caros do que os de laboratório.
- Longos tempos envolvidos nos ensaios de campo.
- Maior desconhecimento dos métodos de testes de permeabilidade de campo.

Permeabilidade de solos tropicais



• 2×10^{-9} = COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE, cm/seg

PERMEABILIDADE - SOLO A

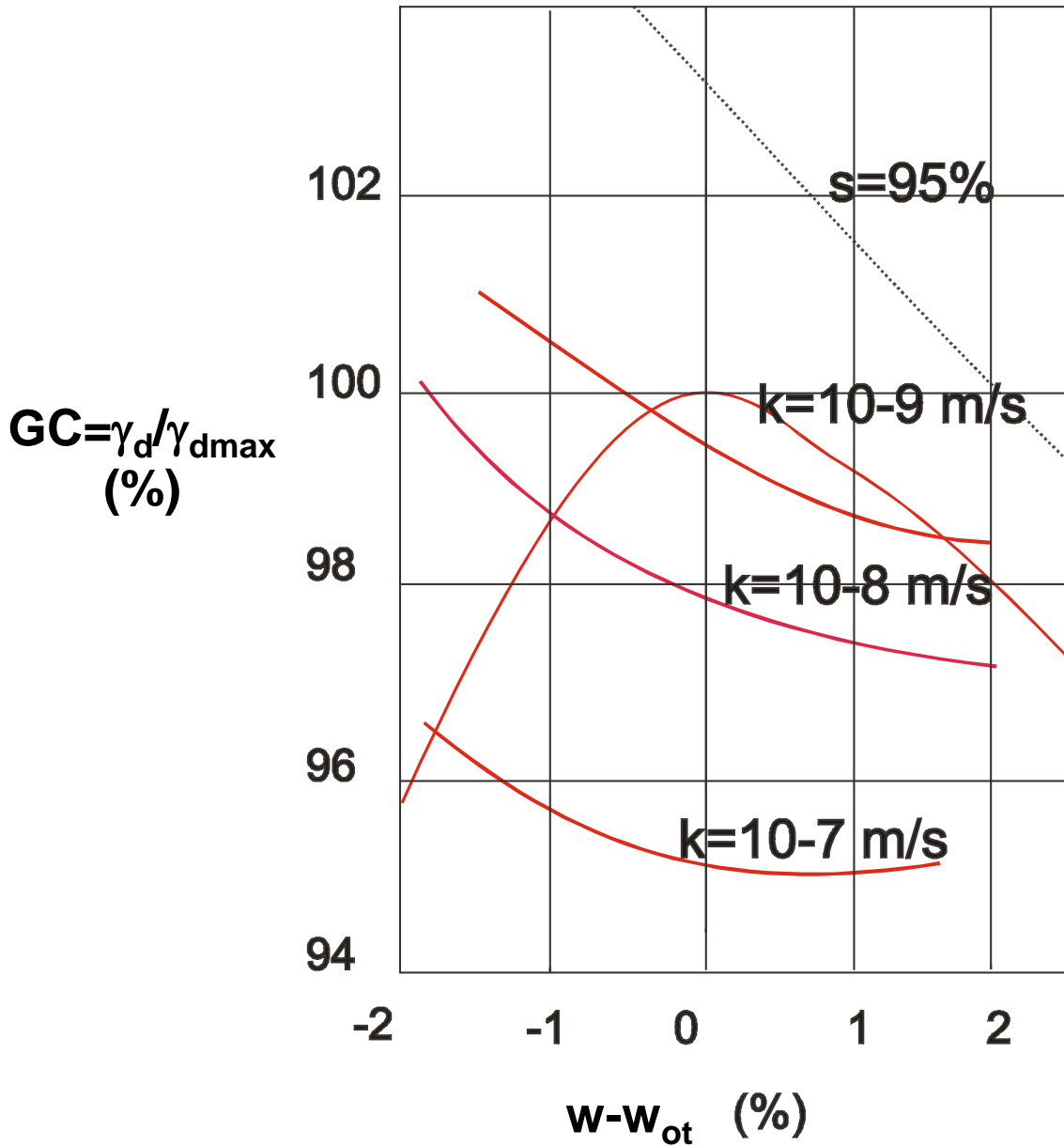


• $3,5 \times 10^{-7}$ = COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE, cm/seg

PERMEABILIDADE - SOLO B

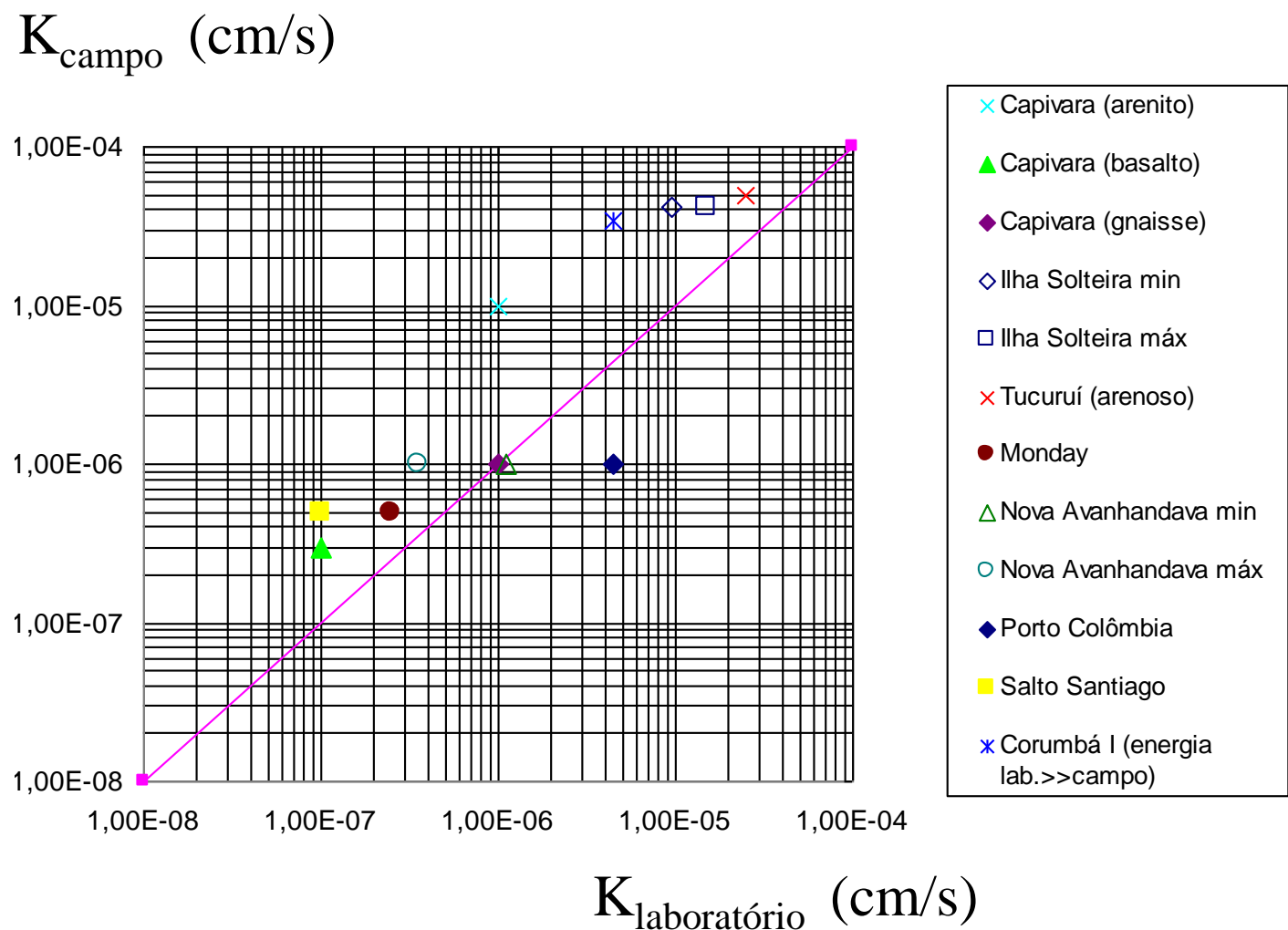
(Pinto, 1966)

Permeabilidade de solo laterítico



(Bosco, 1997)

Permeabilidade: laboratório e campo



(de Mello e Boscov, 1998)