

PERMEABILIDADE DE SOLOS COMPACTADOS

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

(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

1958):

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

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 $C \approx (8 \text{ a } 12\%)$

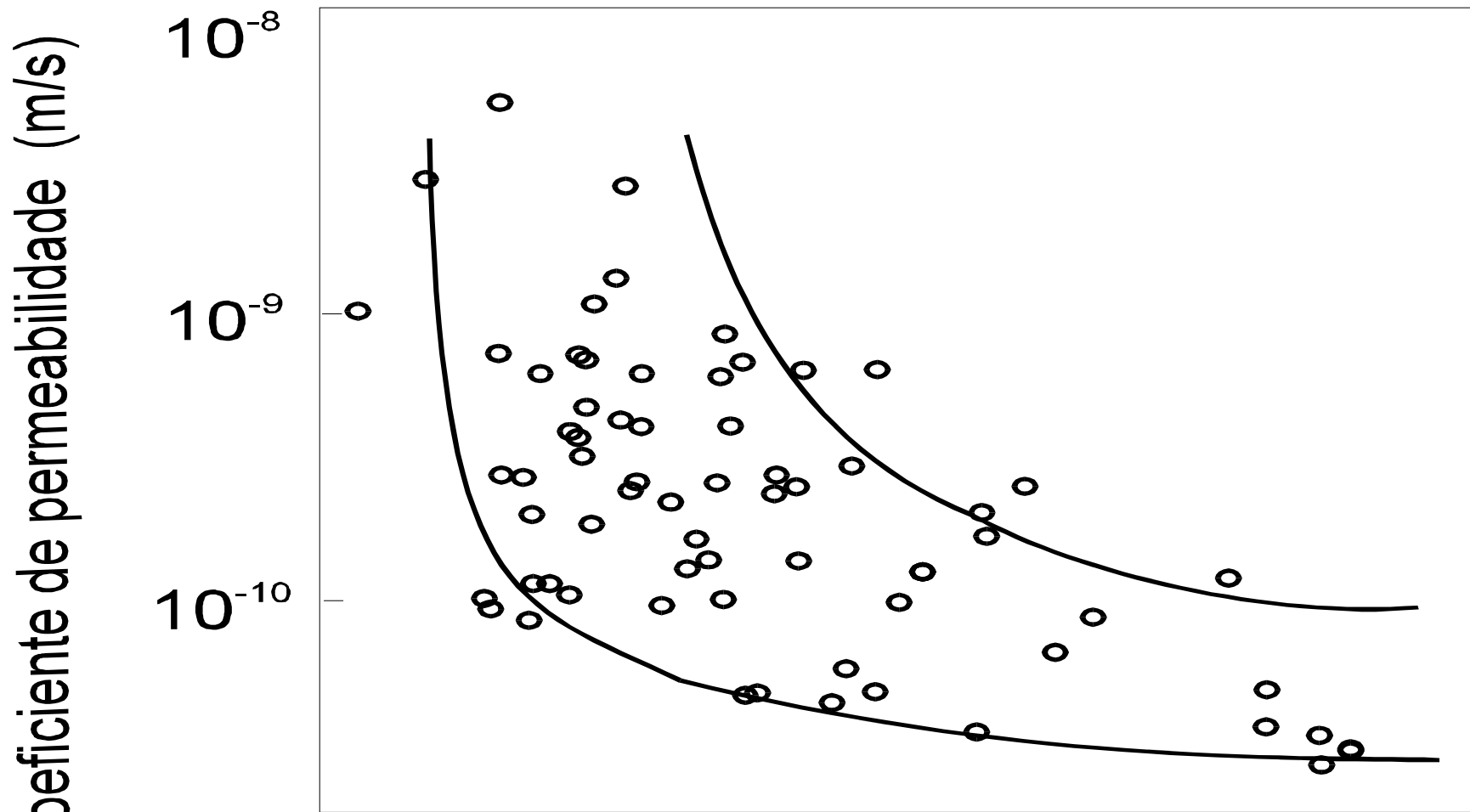
• k é mais sensível a F e C do que a G e S

• Benson et al. (1994).

maior IP, menor permeabilidade.

Solos compactados (Benson et al., 1994) :

67 aterros nos EUA, $2\% \leq IP \leq 62\%$, $44\% \leq F \leq 100\%$, $14\% \leq A \leq 75\%$.



Equação de Kozeny-Carman:

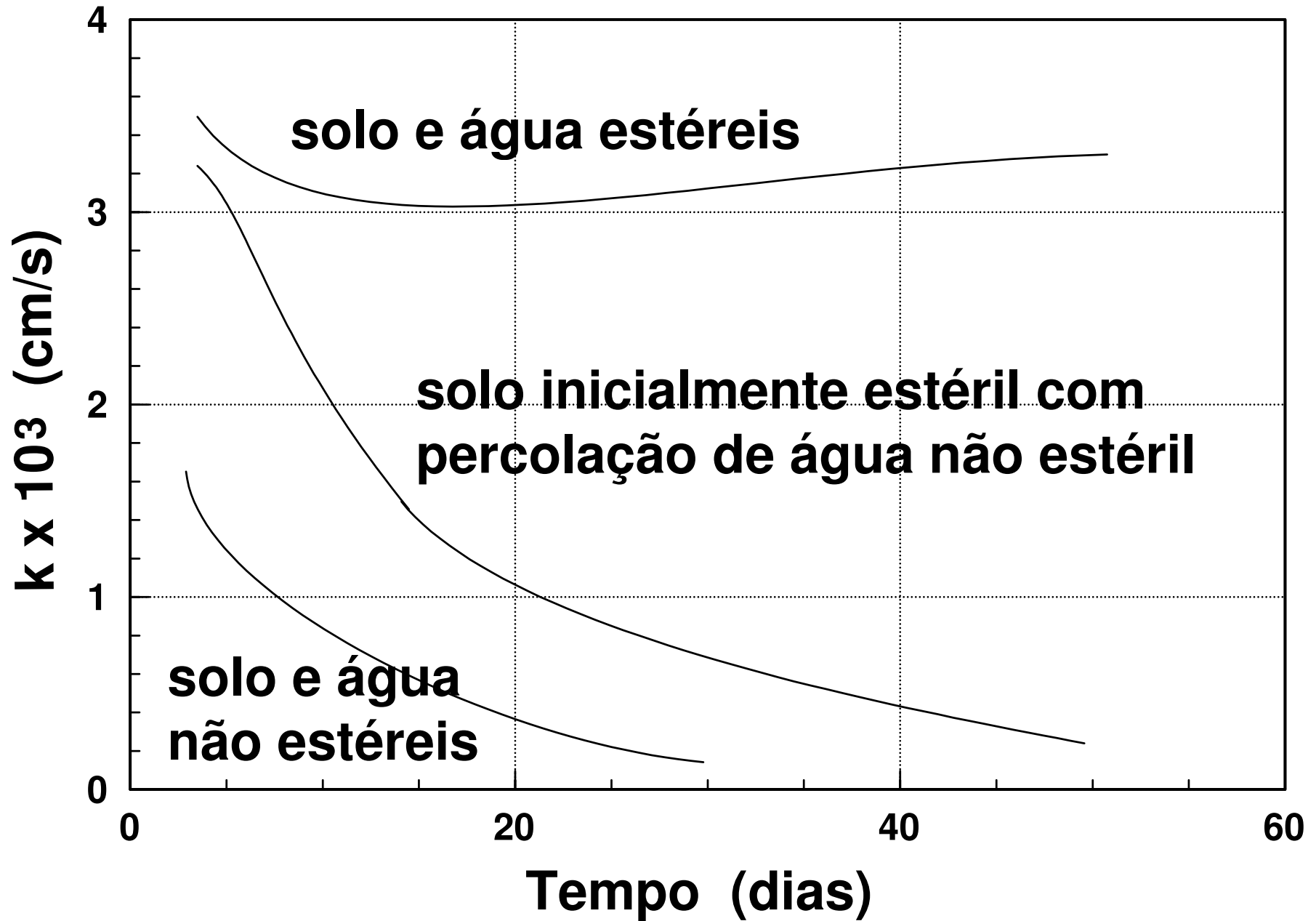
$$k = \frac{1}{k_0 S^2} \frac{e^3}{1+e}$$

K permeabilidade absoluta

e índice de vazios

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

Crescimento de microorganismos



permeabilidade tende a decrescer com o aumento do grau de saturação inicial (s_i associado a h_{moldagem} e a E)

para solo já compactado: aumento no grau de saturação com índice de vazios constante leva a um aumento na umidade

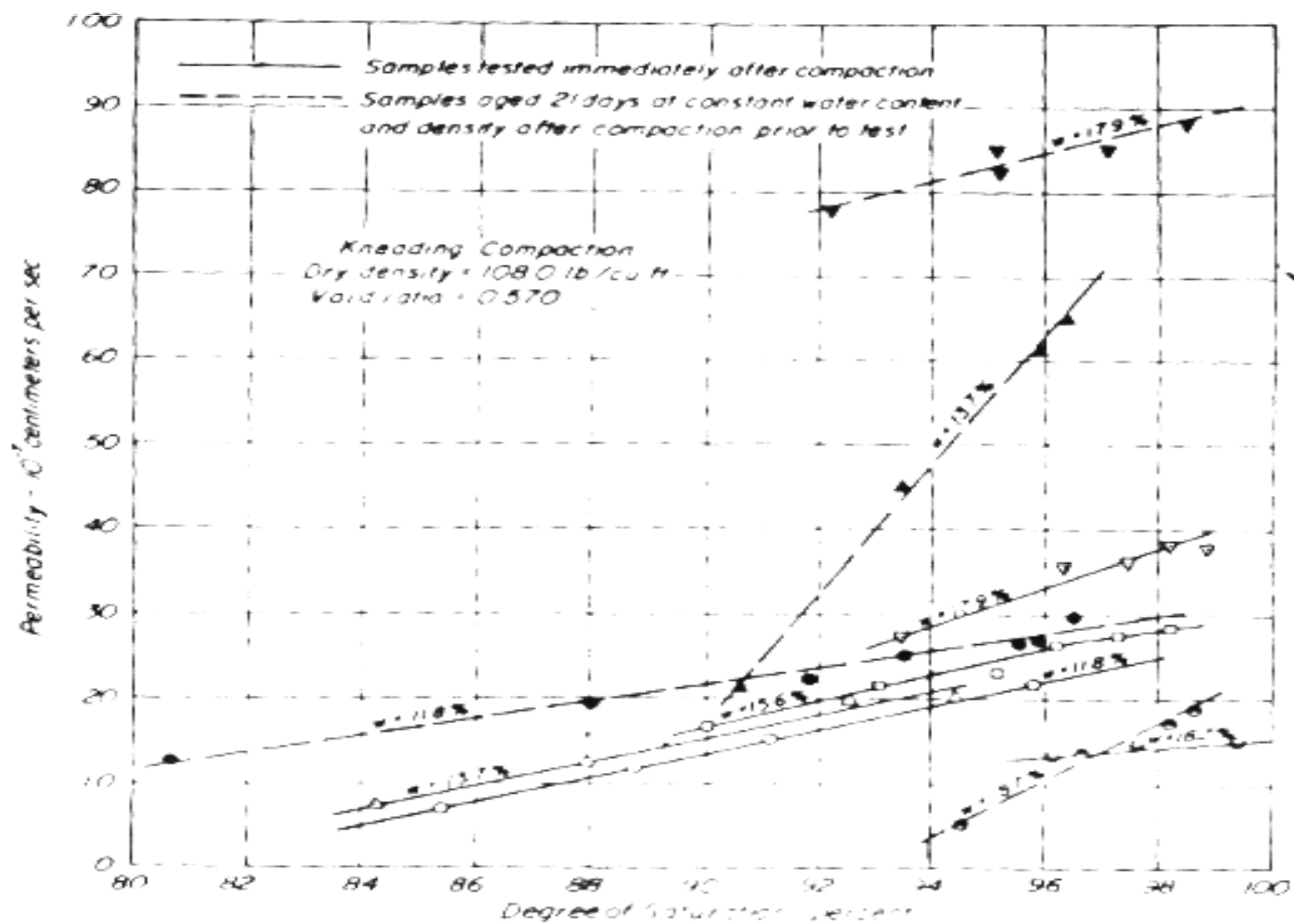
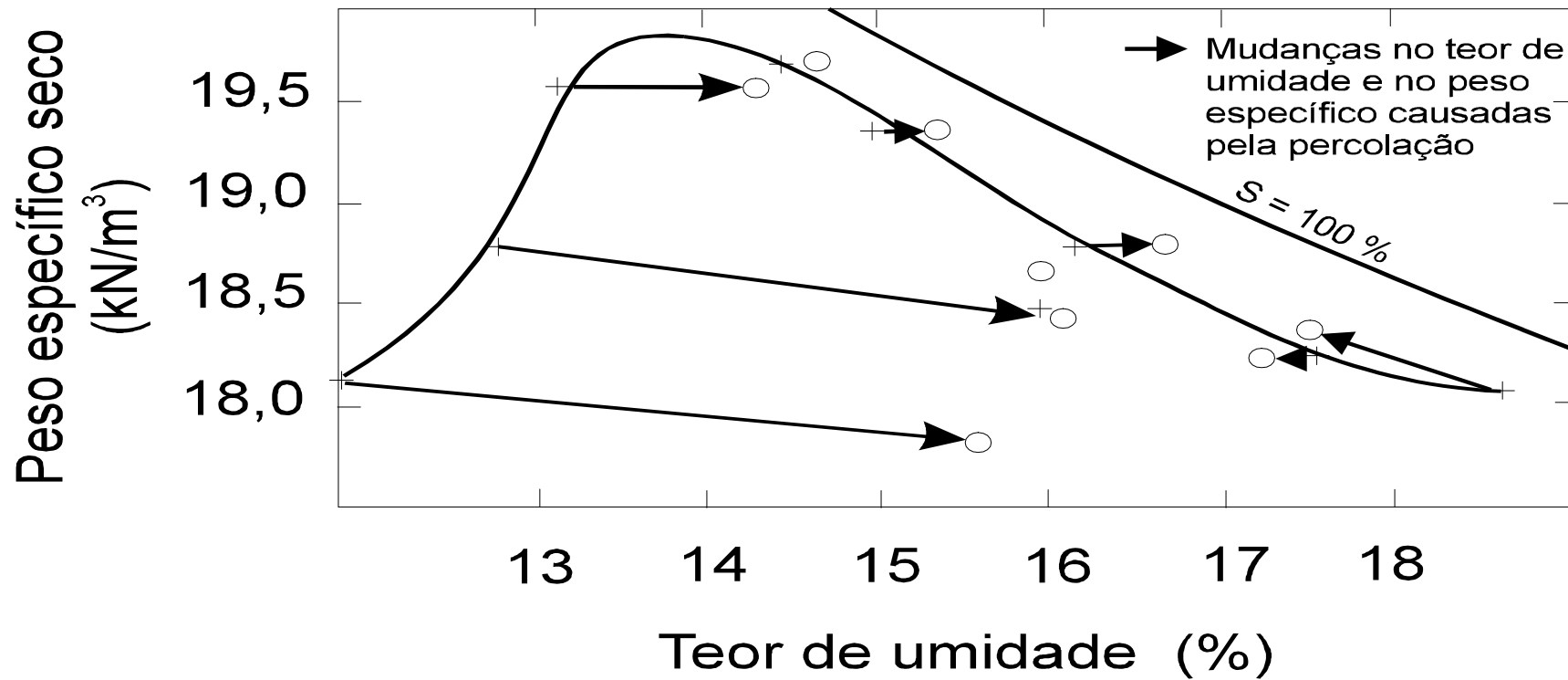
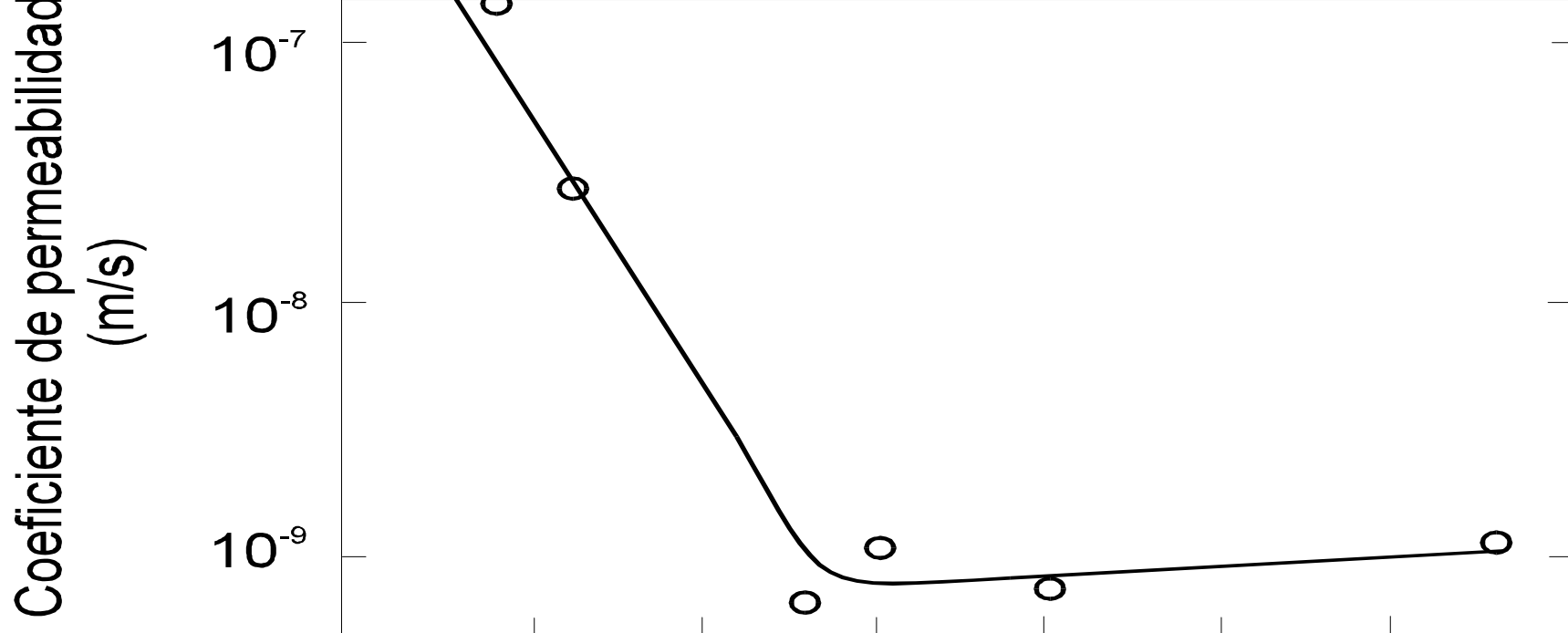
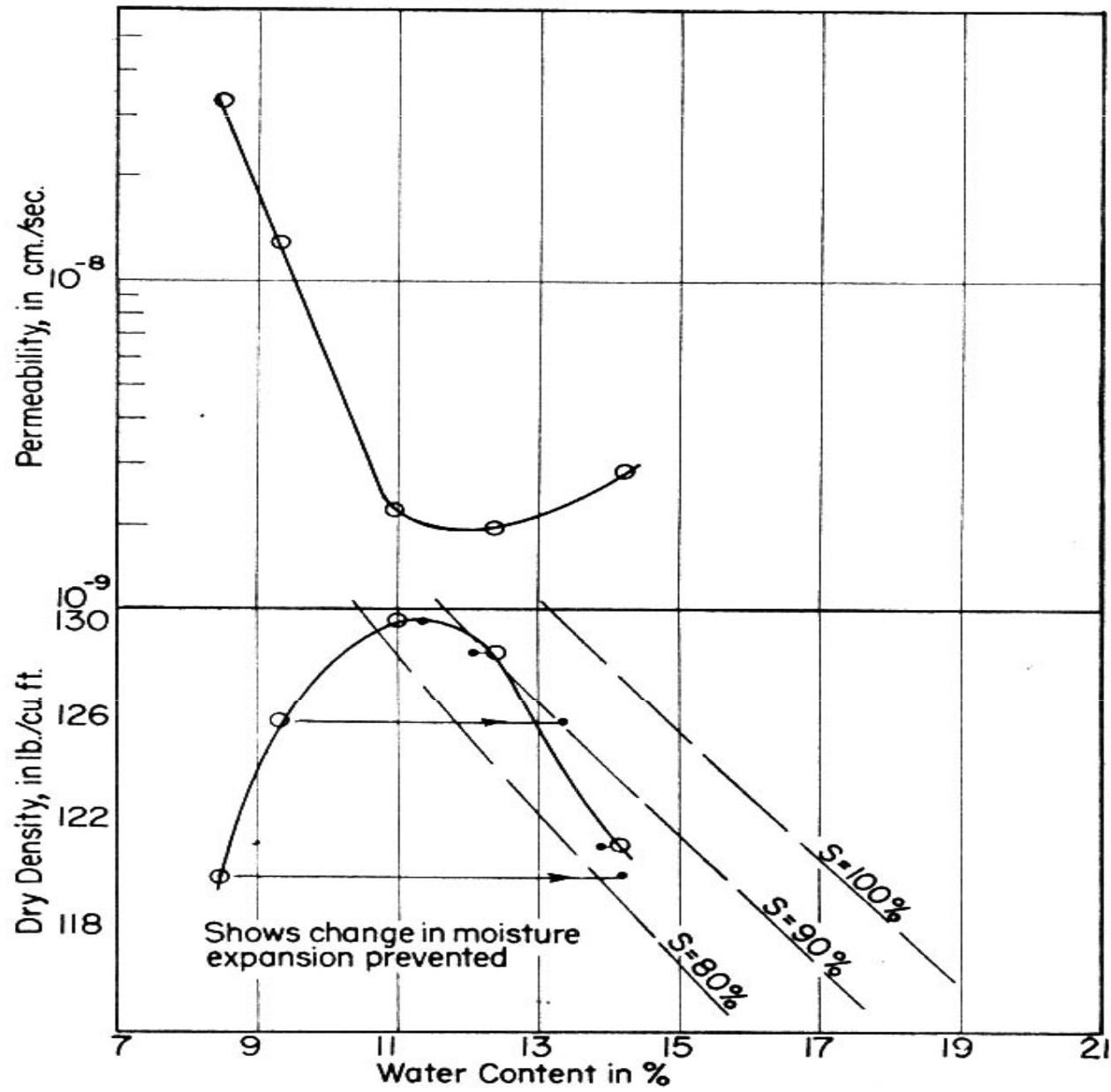
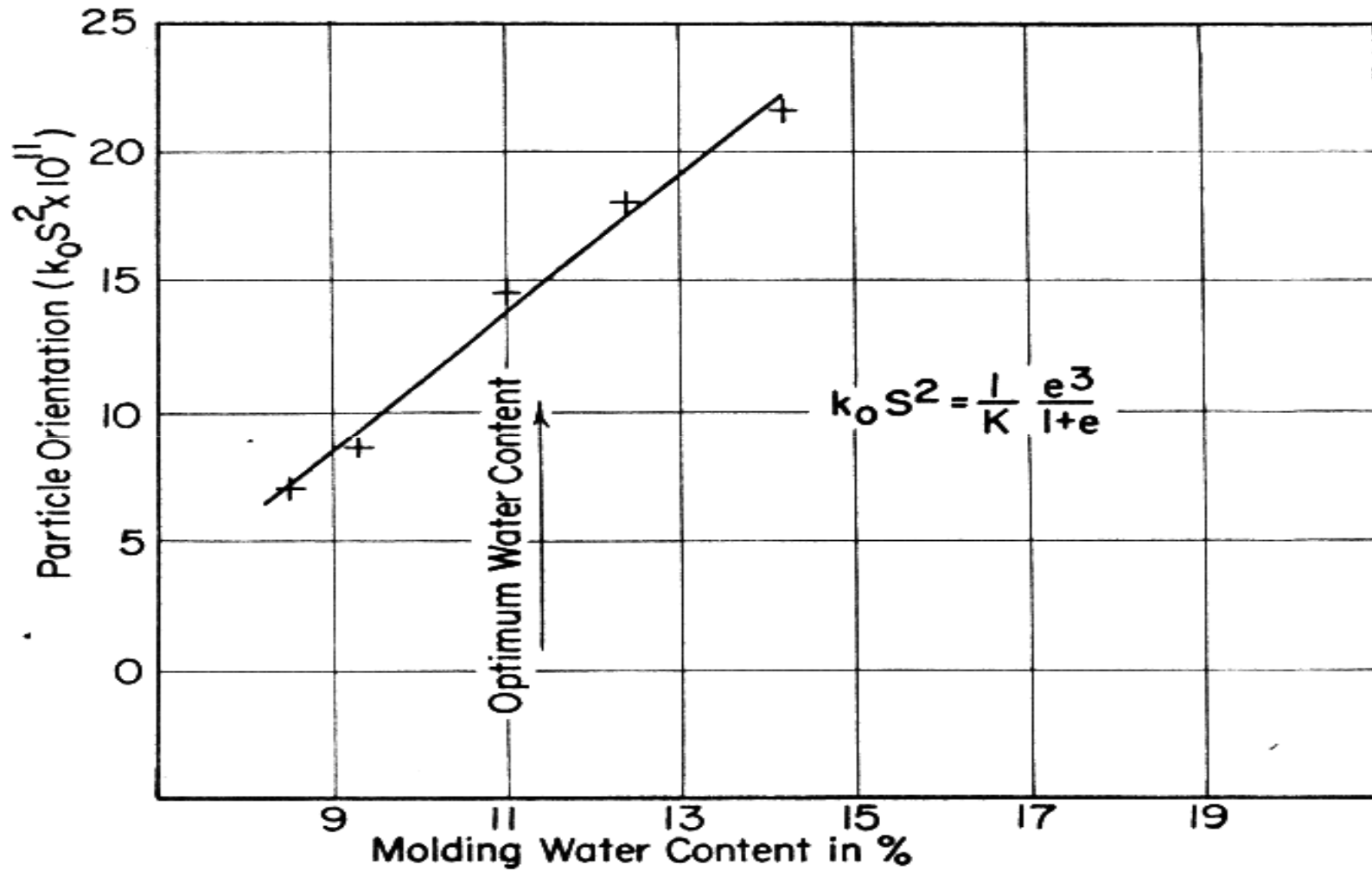


FIG. 20.—INFLUENCE OF DEGREE OF SATURATION ON PERMEABILITY OF COMPACTED SILTY CLAY





Argila Siburua



Argila Siburu

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

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.

Lambe (1958):

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

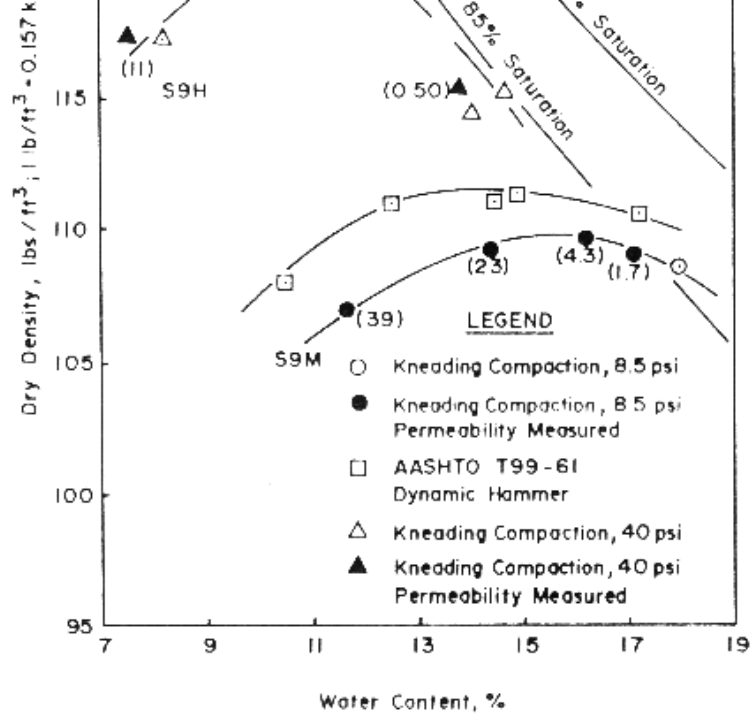
Olsen (1962):

modelo de “clusters”

Barden et al (1970), Garcia-Bengochea et al. (1979):

Garcia-Benito et al (1979).

- porosimetria de mercúrio (0,016 a 600 μm)
- Misturas de silte natural (S) com caulinita comercial (C): 90%S+10%C, 70%S+30%C e 50%S+50%C
- Ensaio de permeabilidade de carga variável com saturação por contra-pressão
- Compactação por pisoteamento
- Três energias de compactação



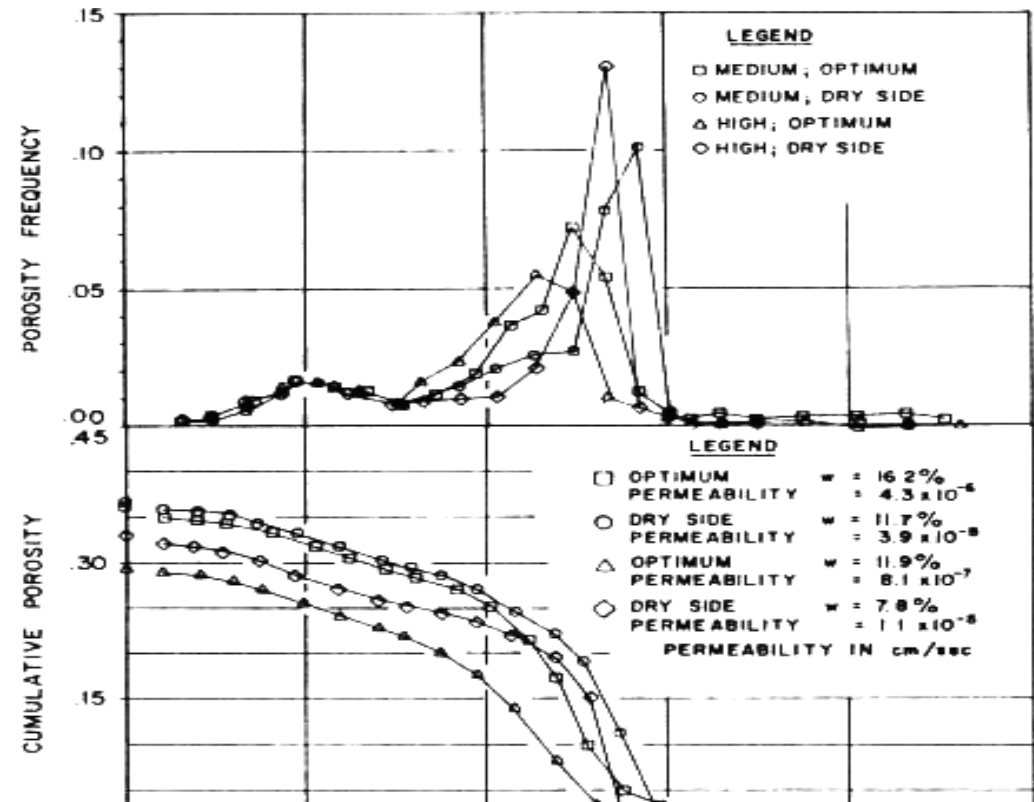
Curvas de compactação

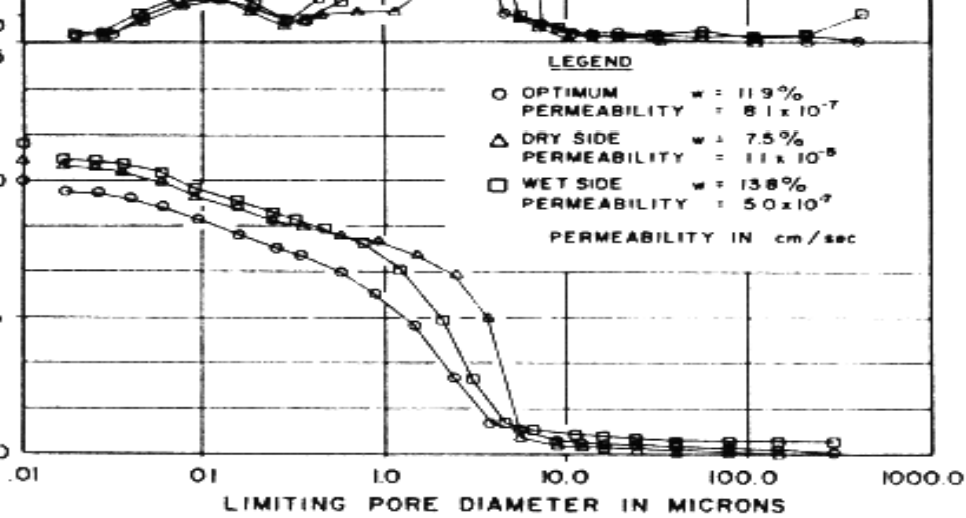
Distribuição

porosimétrica:

$h < h_{ot}$ e $h > h_{ot}$

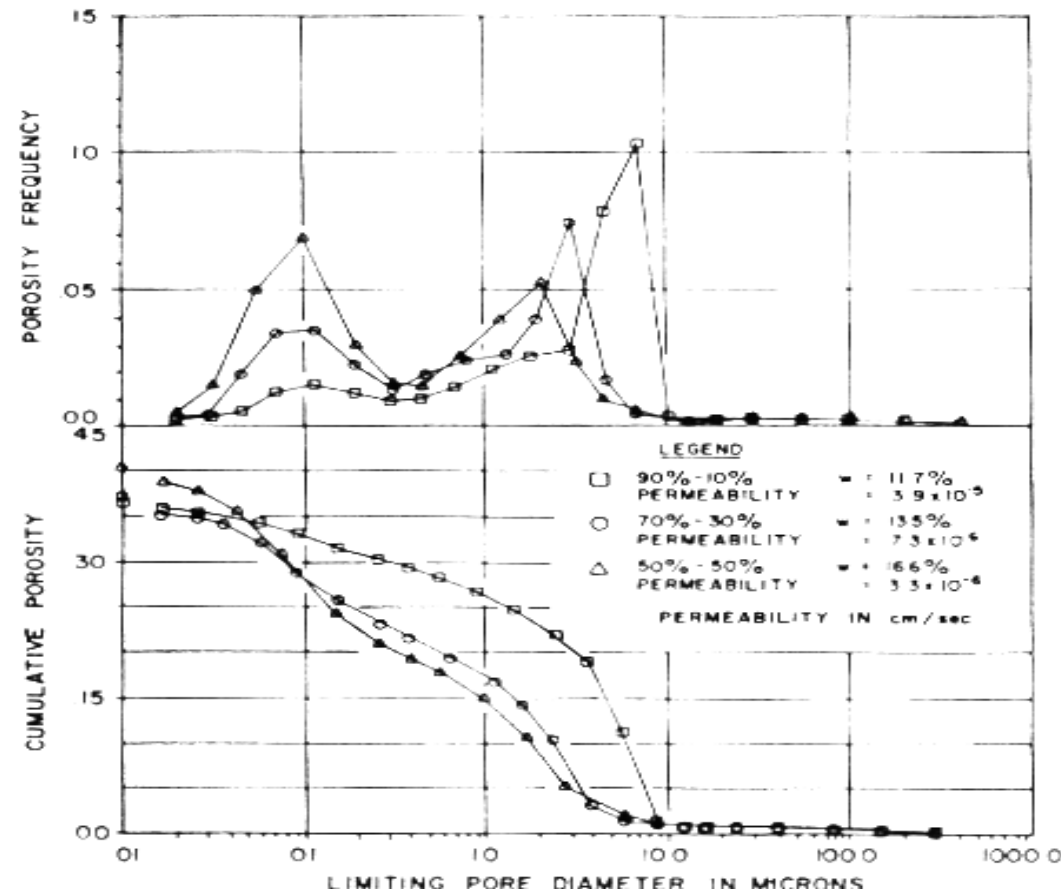
energias média e alta





$h < h_{ot}, h = h_{ot} \text{ e } h > h_{ot}$
energia alta

Distribuição
porosimétrica:
três misturas
 $h < h_{ot}$
energia média



varia 100 vezes para a mesma umidade e diferentes energias de compactação

aumento de E acarreta aumento de γ_{smax} e diminuição de h_{ot} ; *para um dado teor de umidade, a estrutura depende da energia de compactação*

diminui com o aumento de h ou com o aumento de energia

escala macroscópica: quebra de agregados e eliminação de poros inter-agregados

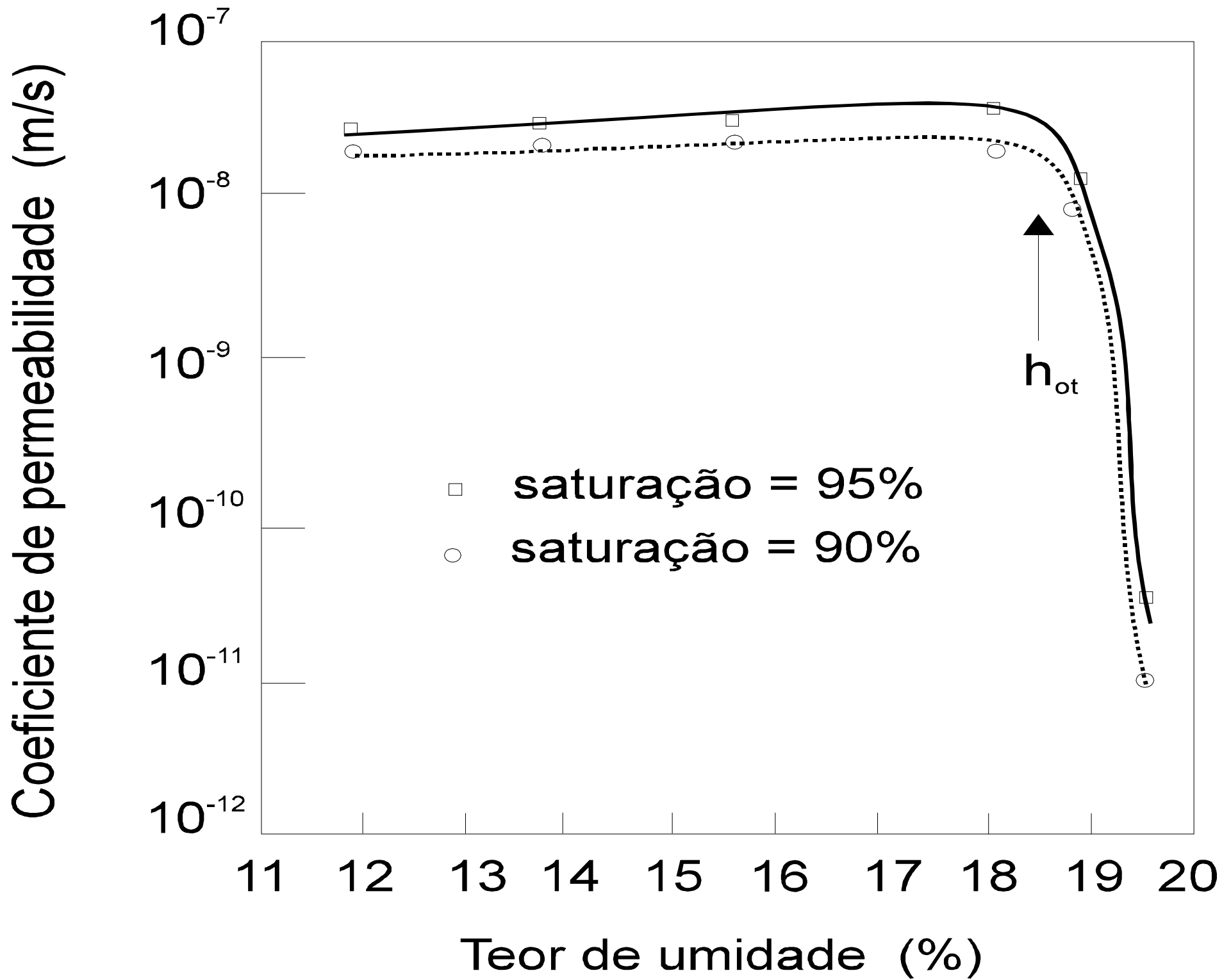
estrutura é influenciada pelos esforços de cisalhamento durante a compactação

Mitchell et al. (1965): acima de h_{ot} , $k(\text{compactação estática}) = 5 k(\text{pisoteamento})$;

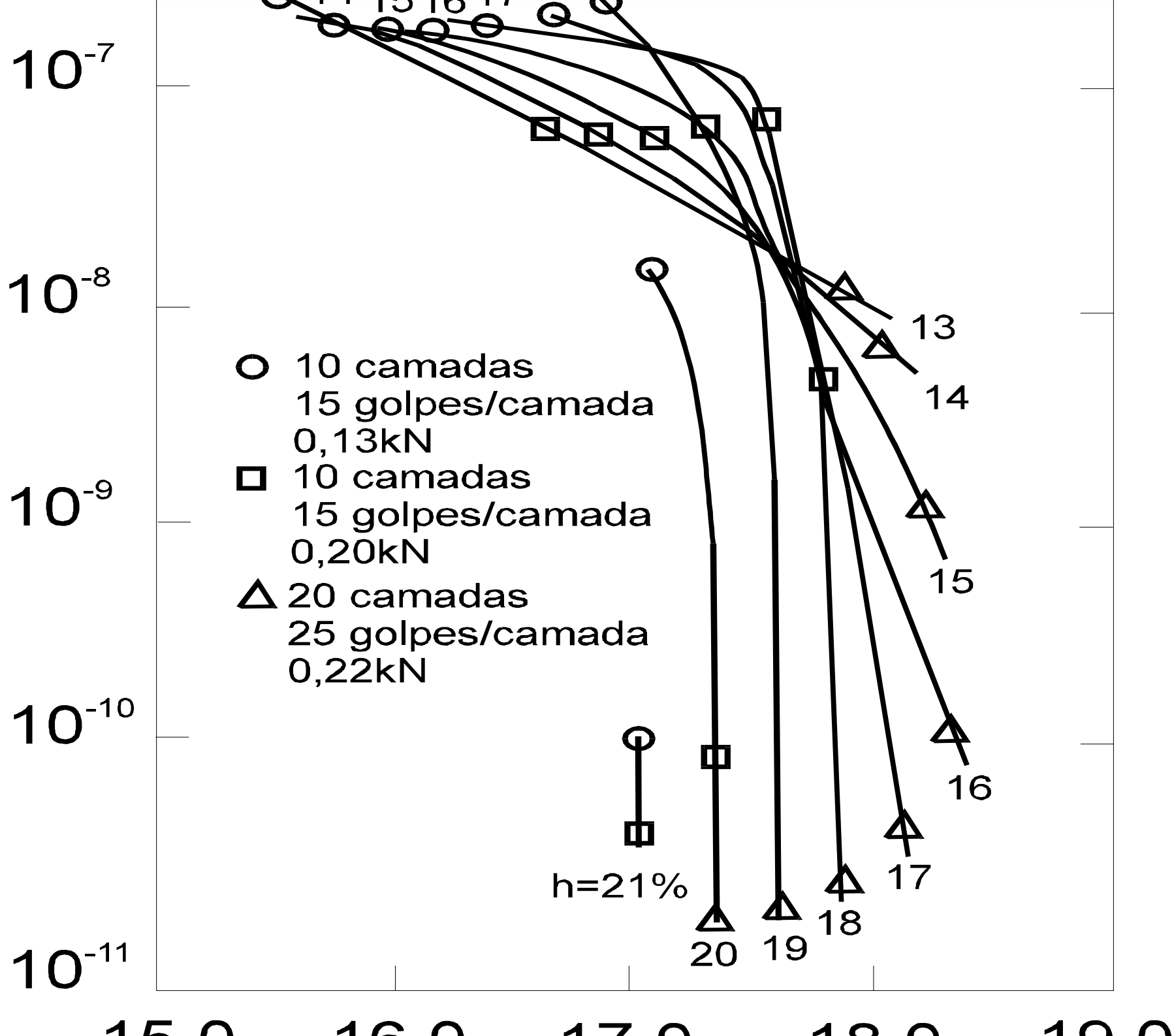
no ramo seco, resultados semelhantes

no ramo seco: menores esforços cisa-lhantes, menor quantidade de água para lubrificação e rearranjo de partículas

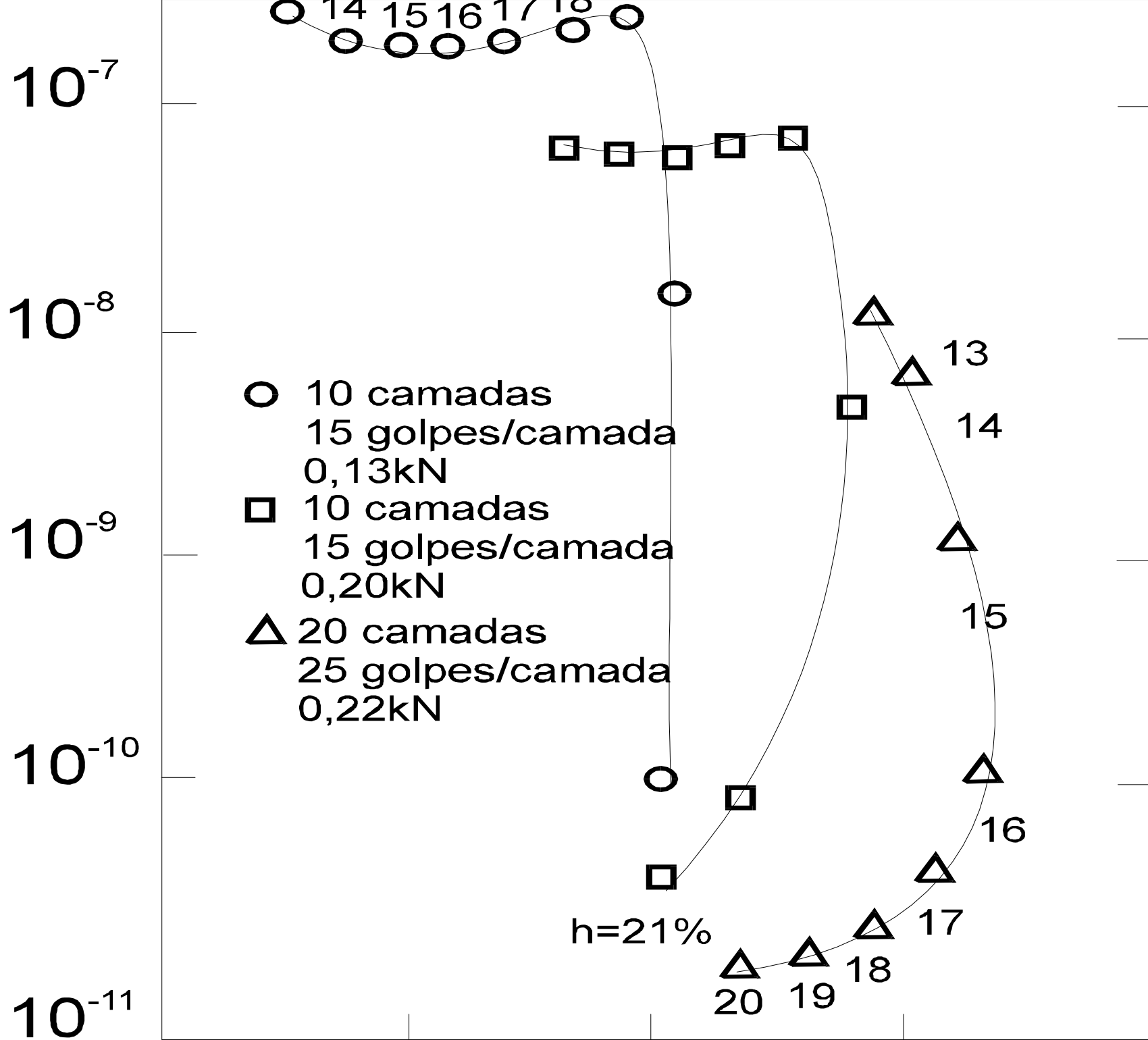
Benson et al. (1994): $k=f(\text{tipo e peso do})$



Coeficiente de permeabilidade (m/s)



Coeficiente de permeabilidade (m/s)



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

on & Daniel, 1981:

olos 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.

erturbação das amostras.

rrros experimentais.

endência a selecionar amostras mais uniformes para

esaios

(Olson & Daniel, 1981)

azios formados durante a preparação dos corpos-de-
prova: desbastamento das arestas, alívio de tensões.

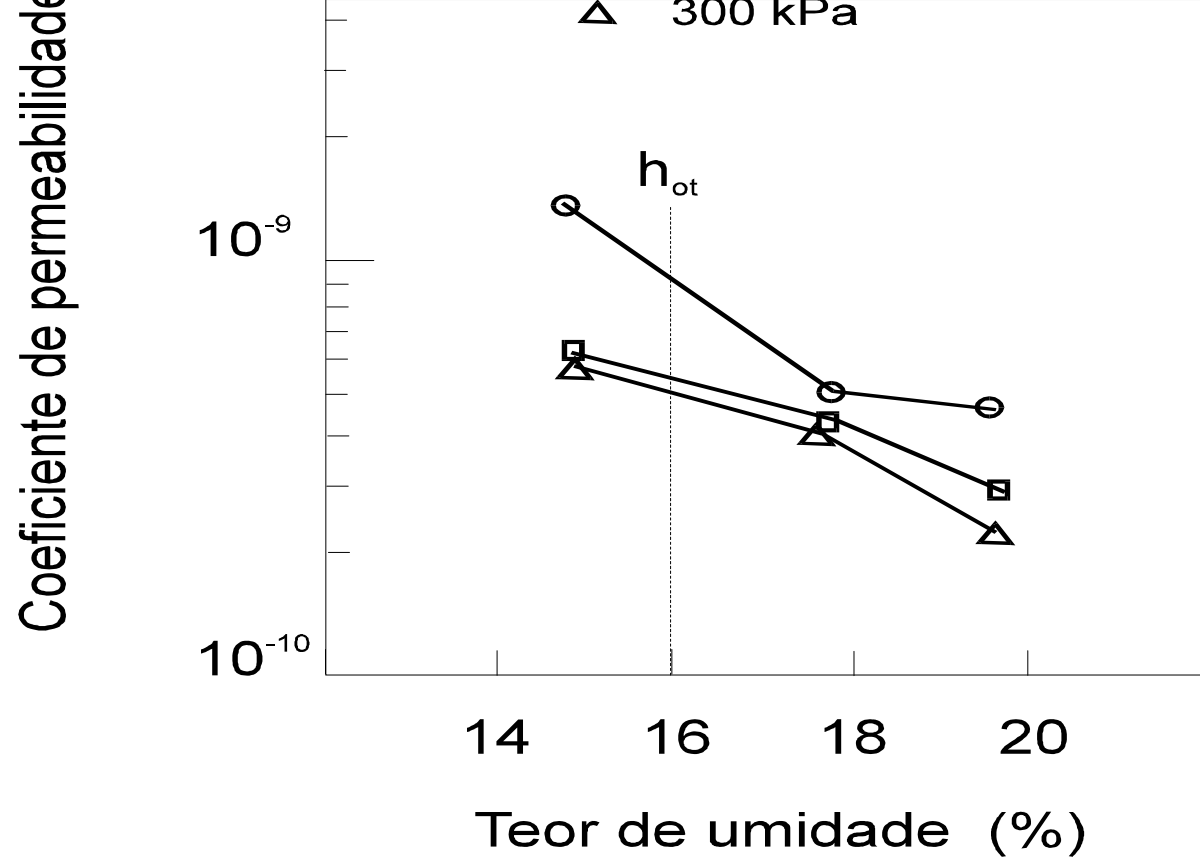
zonas amolgadas (0,2 cm).

r na amostra (bolhas aprisionadas na saída, bolhas
formadas por decréscimo de pressão).

rescimento de microorganismos.

problemas de meniscos em tubos capilares.

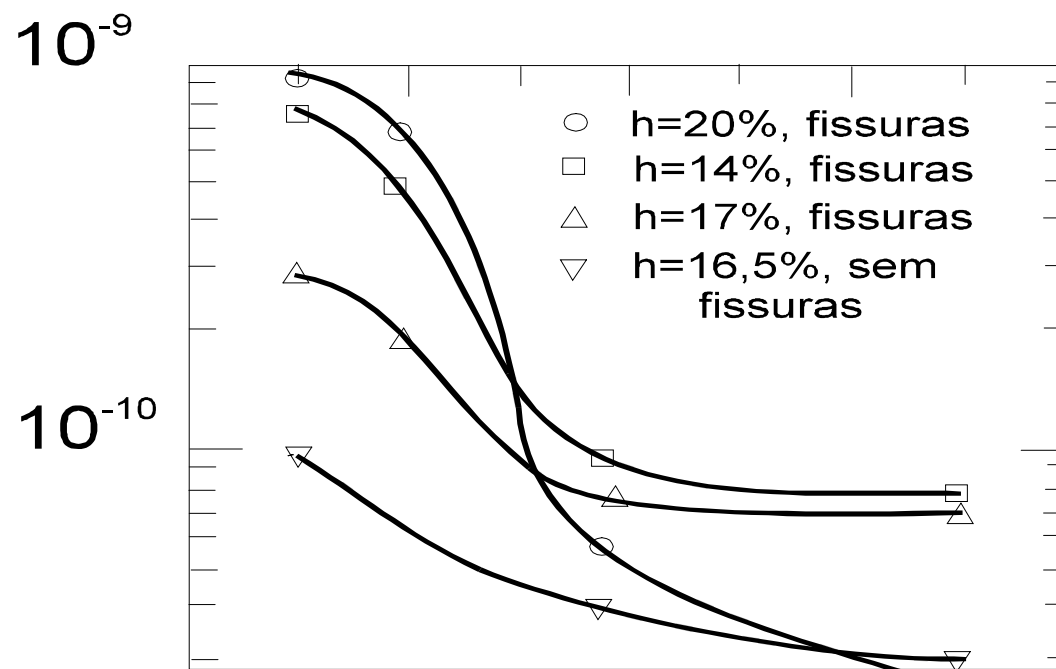
variação volumétrica decorrente de mudança no estado



(Meriggi & Zagolin, 1994)

(Boynton & Daniel, 1985)

Coeficiente de permeabilidade (m/s)



Olson & Daniel, 1981:

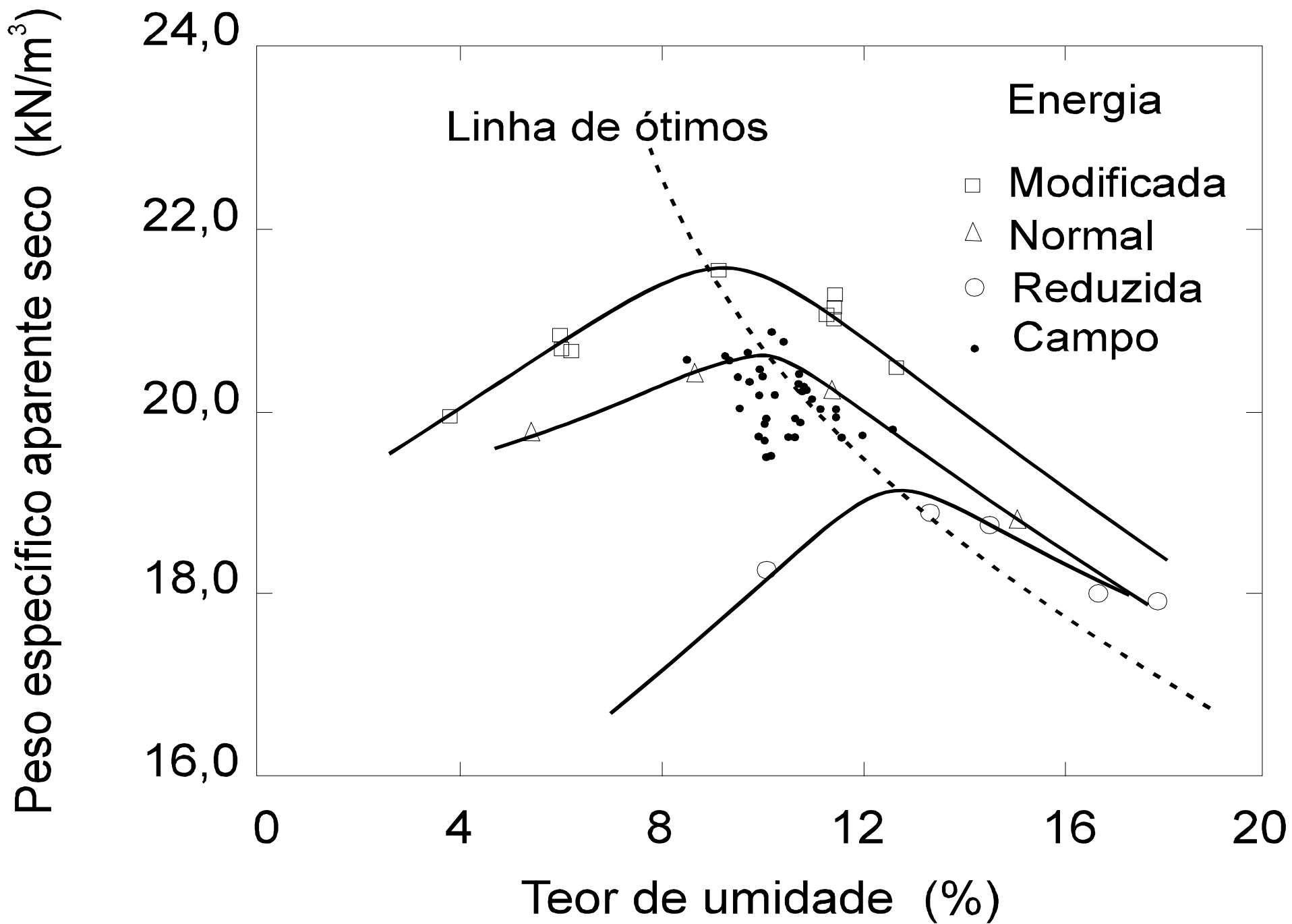
- Ensaaios de laboratório são mais econômicos.
- Ensaaios de laboratório são apropriados para solos compactados (várias densidades e teores de umidade).
- Para solos não saturados, ensaios de laboratório estão mais desenvolvidos do que os métodos de campo.

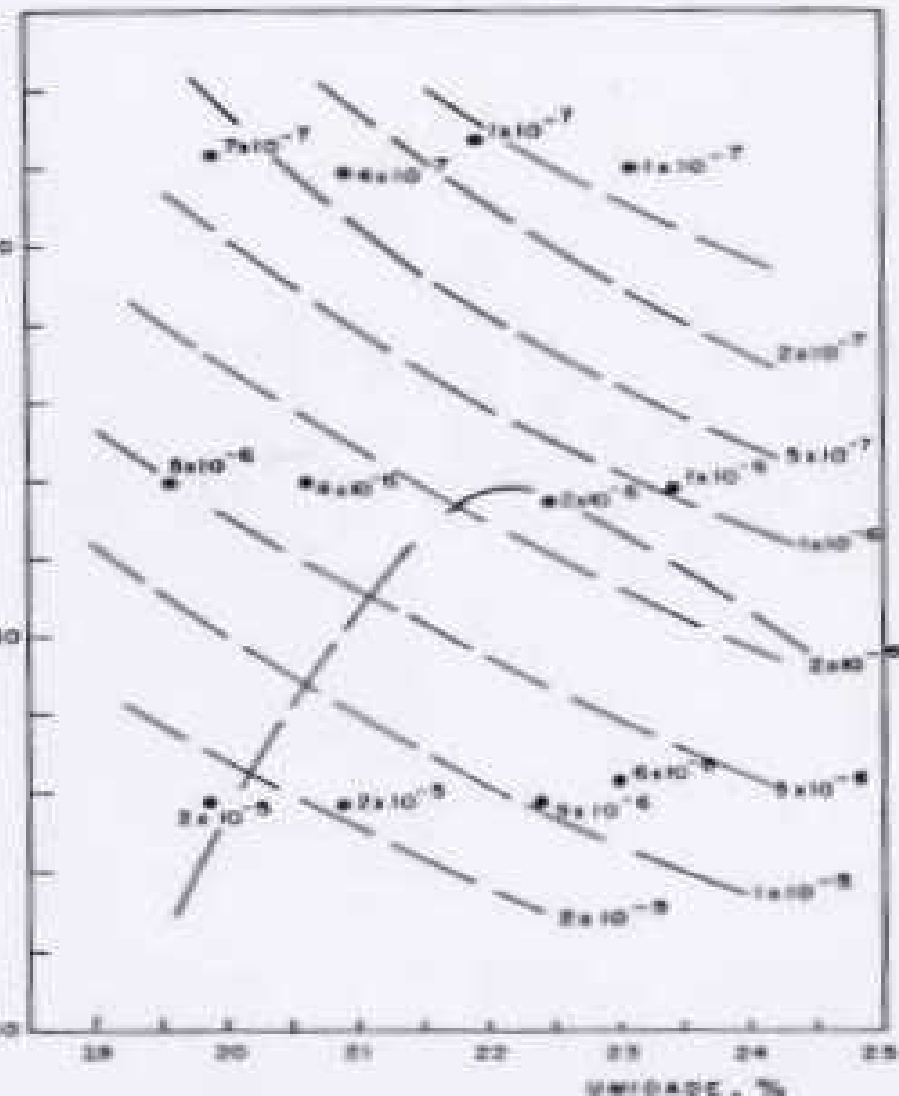
Olson & Daniel, 1981:

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

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

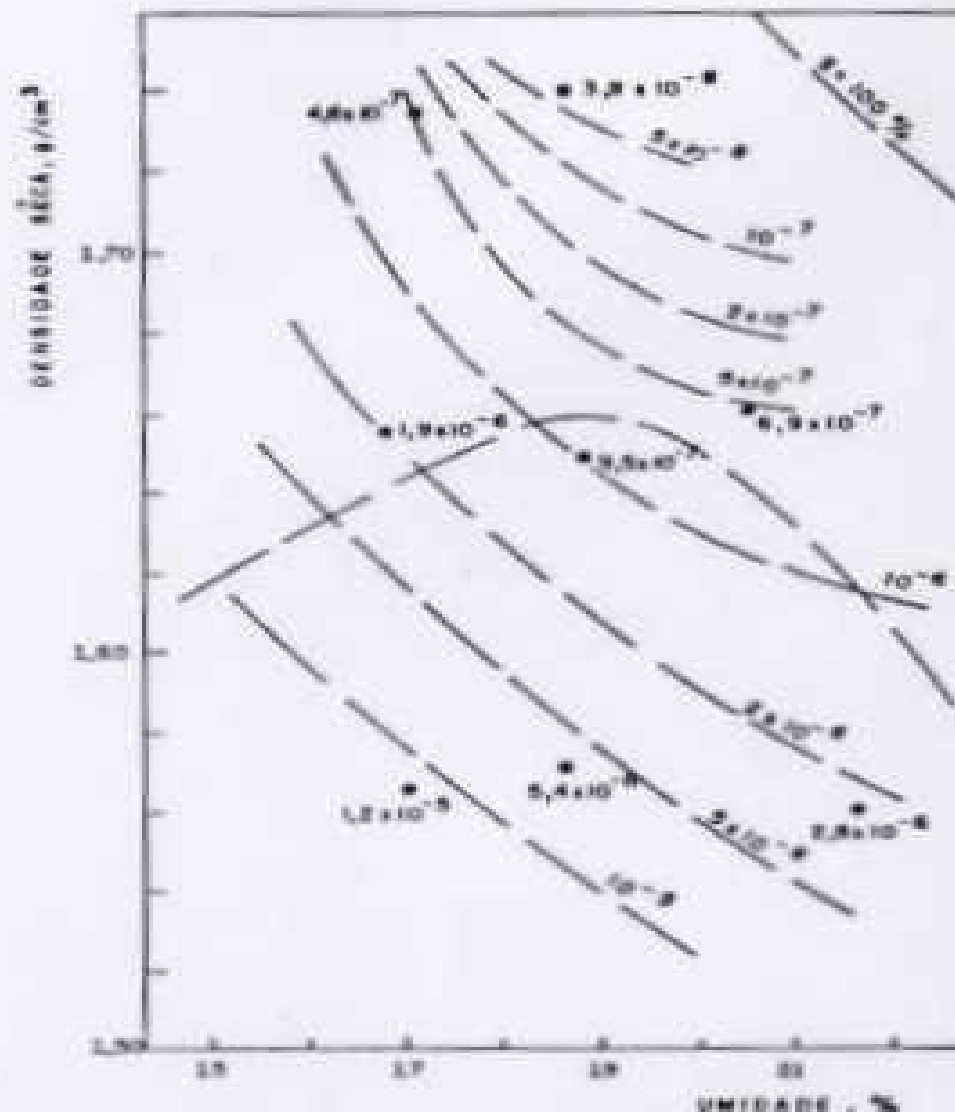
- Ensaios de campo são preferíveis aos de laboratório, por envolverem maior volume de solo, assim levando em conta efeitos da macroestrutura.
- Ensaios de campo são mais caros do que os de laboratório.
- Longos tempos envolvidos nos ensaios de





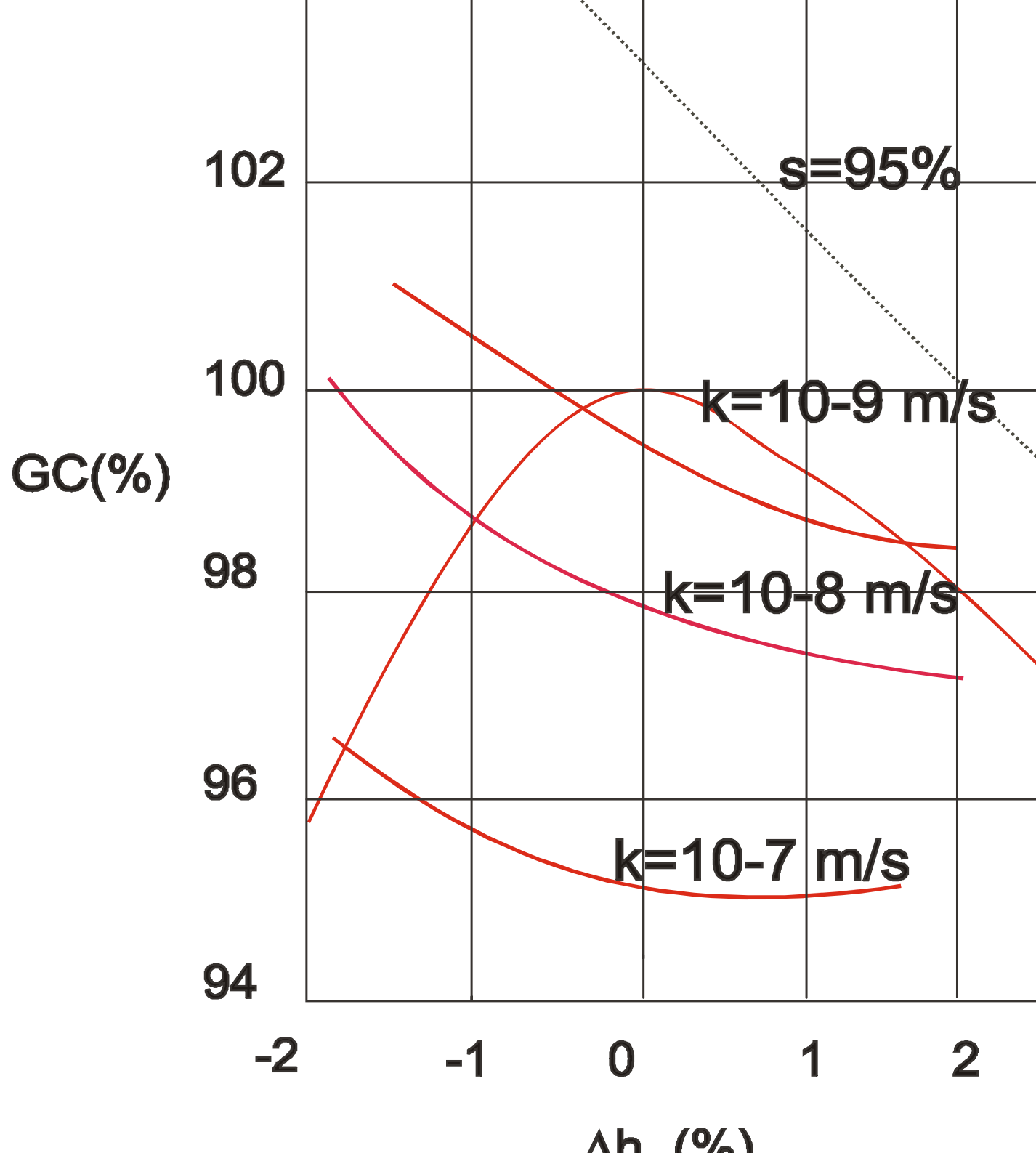
2×10^{-8} - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE, cm²/seg

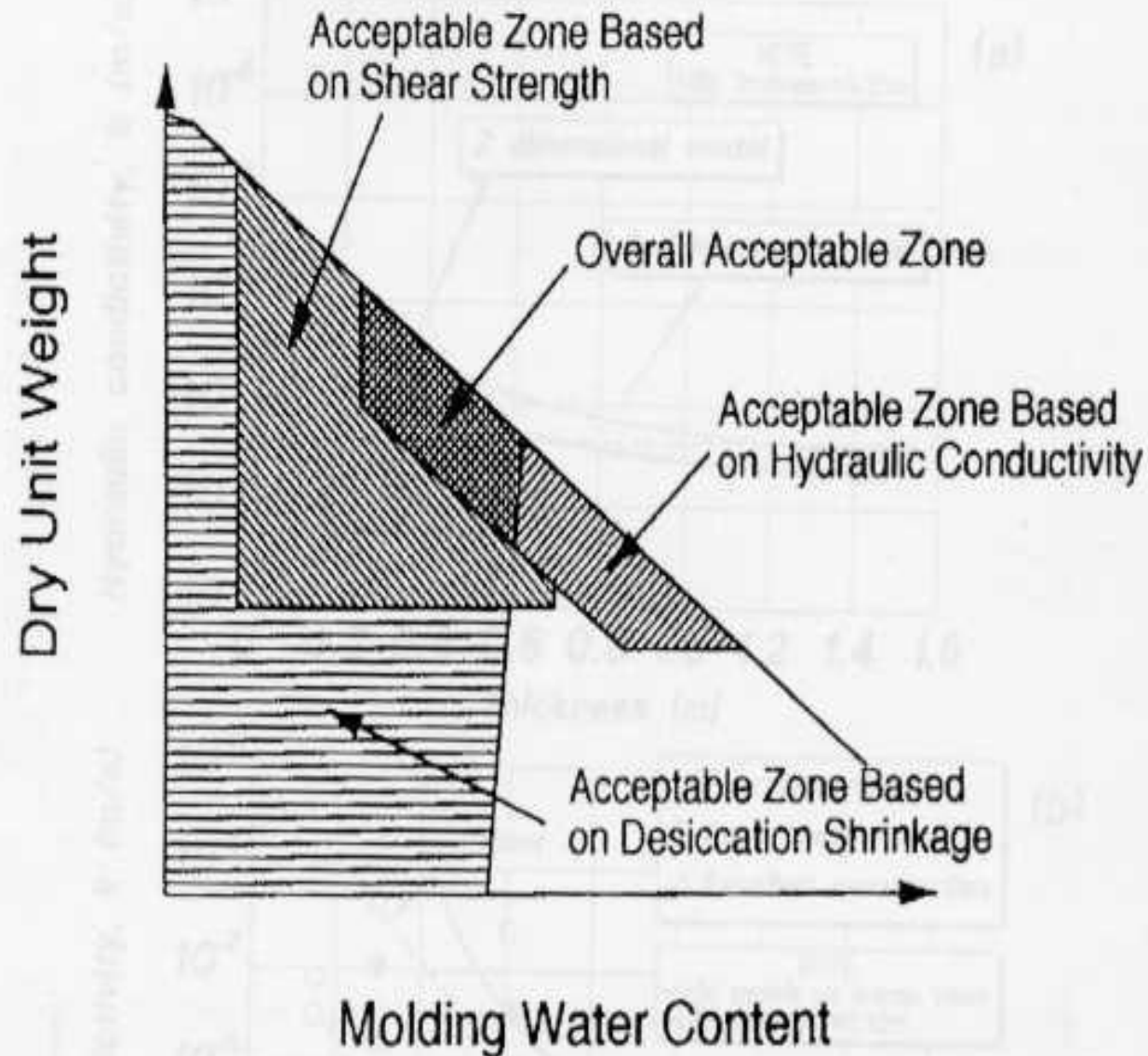
PERMEABILIDADE - SOL A



$9,9 \times 10^{-7}$ - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE, cm²/seg

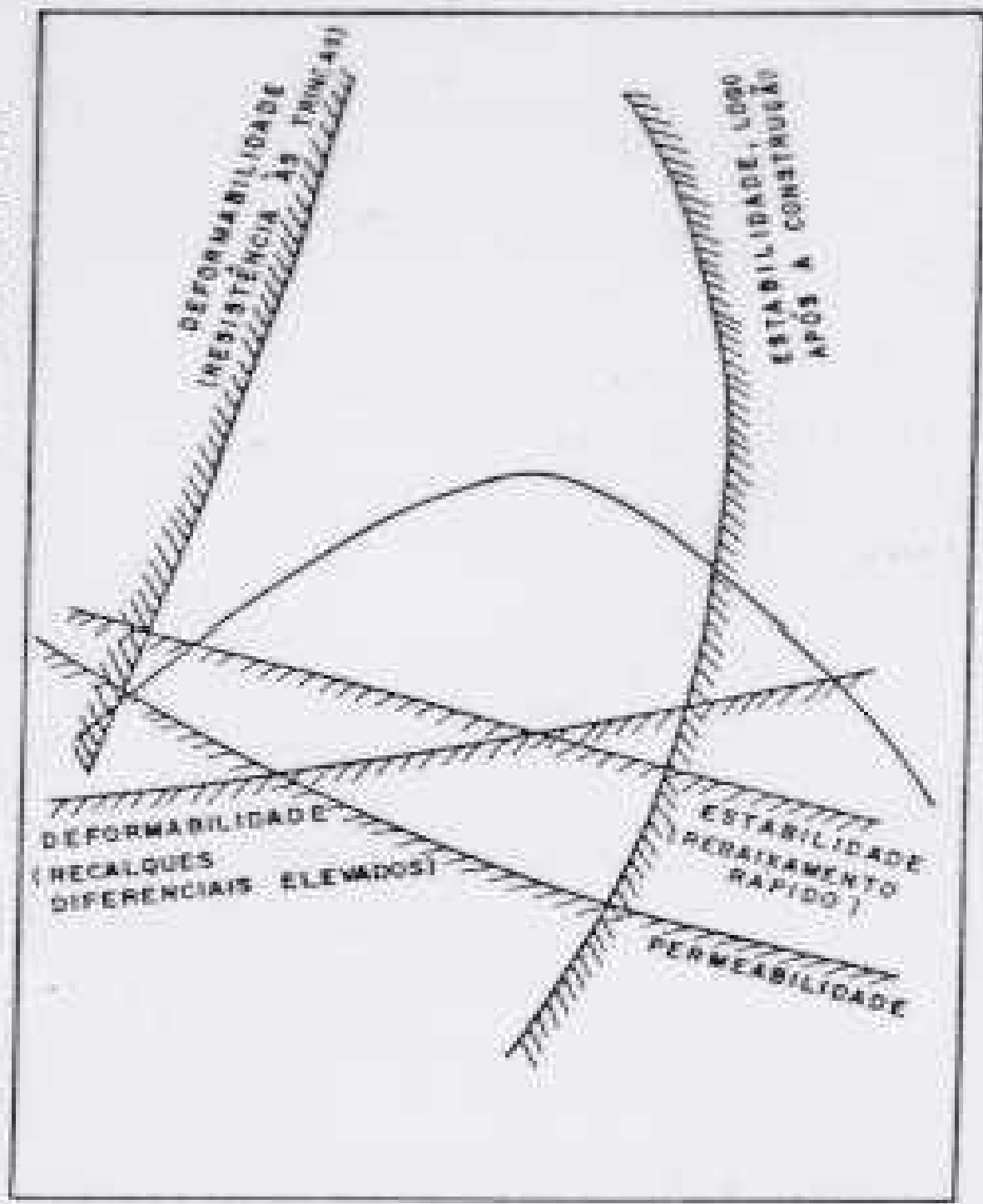
PERMEABILIDADE - SOL B





Overall acceptable zone for compacted soil liners based on hydraulic conductivity, shear strength and shrinkage upon desiccation (Daniel, 1993)

DENSIDADE SECA, g/cm³



DEFORMABILIDADE
(RESISTÊNCIA AS TRINCRAS)

ESTABILIDADE, LOGO
APÓS A CONSTRUÇÃO

DEFORMABILIDADE
(RECALQUES
DIFERENCIAIS ELEVADOS)

ESTABILIDADE
(RETRAIAMENTO
RÁPIDO)

PERMEABILIDADE

UMIDADE, %

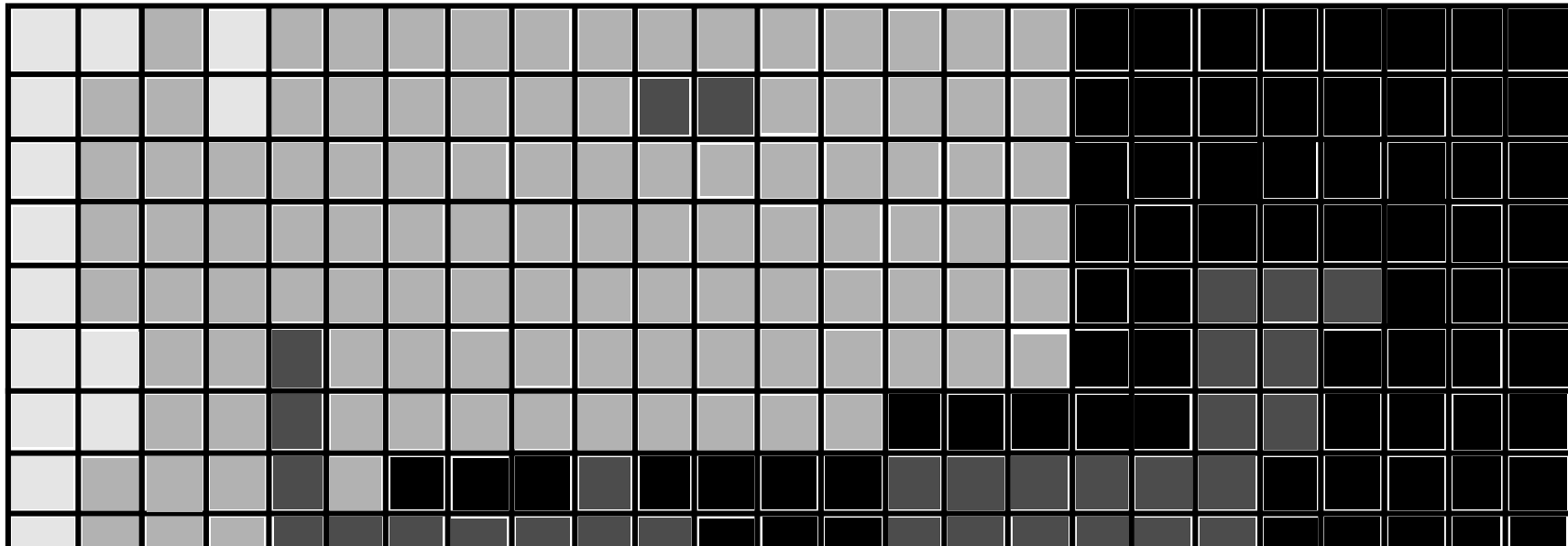
função densidade de probabilidade.

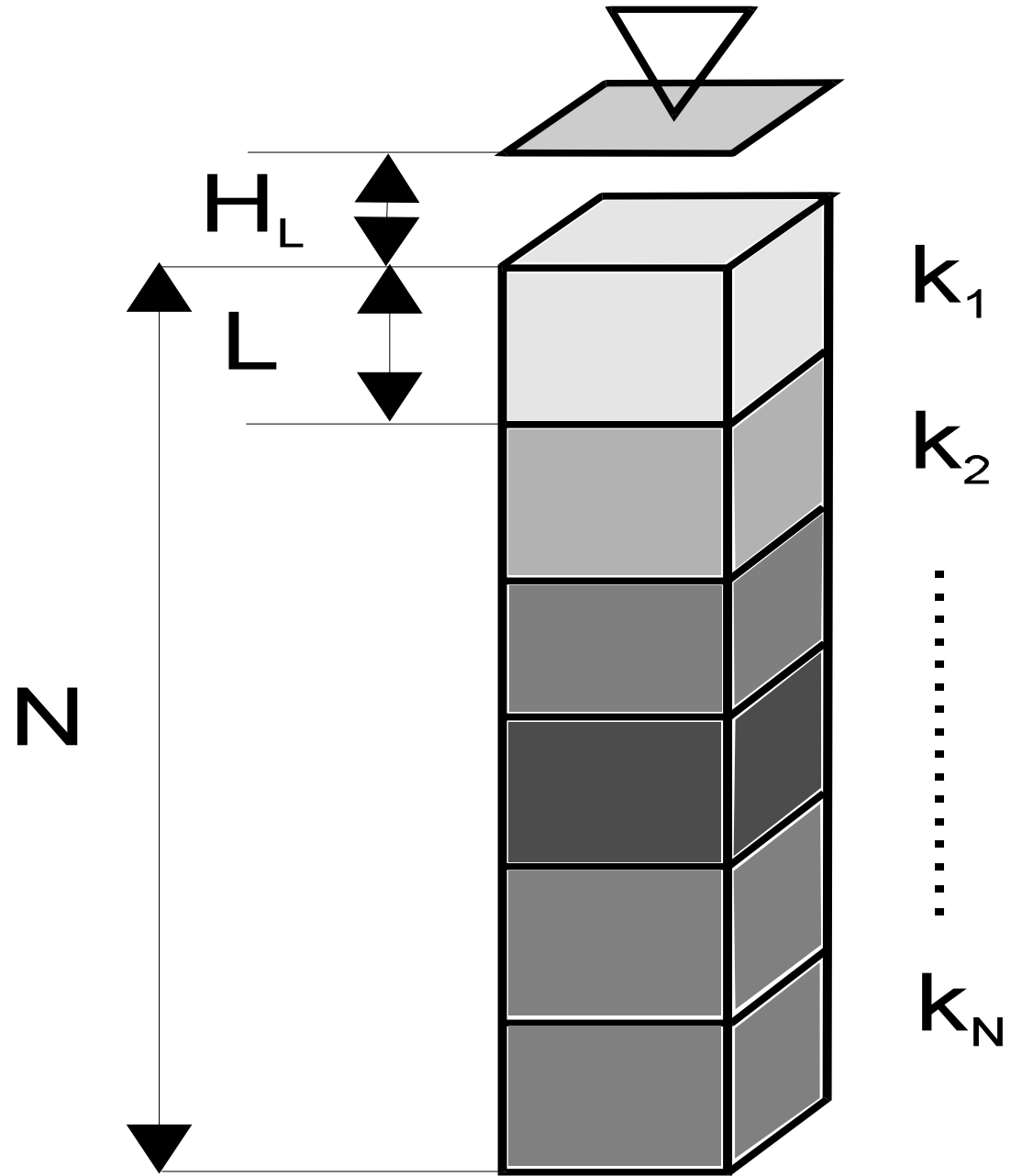
distribuições gama e lognormal

intervalos de confiança: $\int_0^{k_{95}} f_k(k) dk = 0,95$

escala de flutuação

$R = P[K < K_0]$





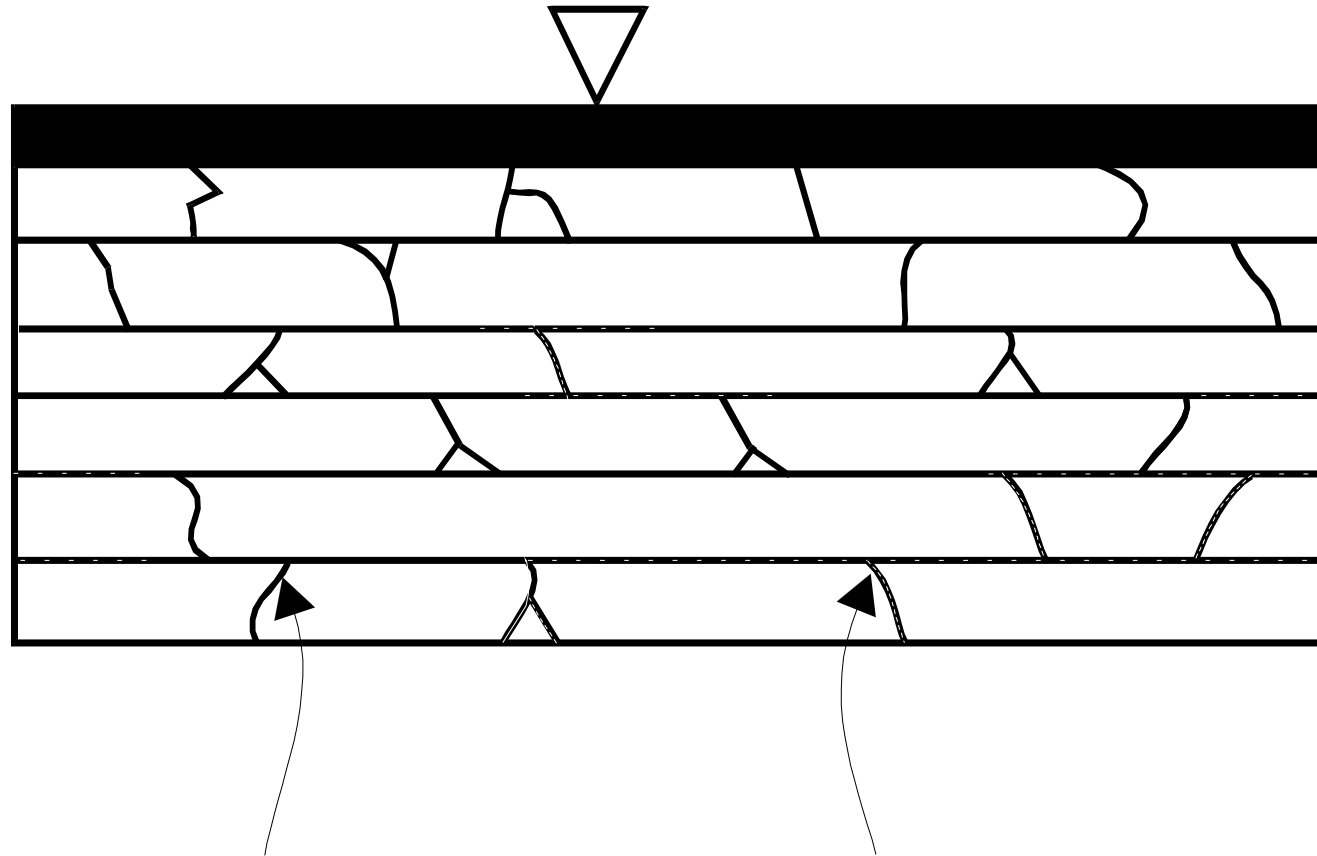
Distribuição espacial da permeabilidade de uma camada é independente das outras camadas.

Em um sistema multicamadas, a permeabilidade vertical é restrita pela camada menos permeável e a permeabilidade horizontal é comandada pela camada mais permeável.

Válido se todas as colunas que cercam a coluna esquematizada forem perfeitamente correlacionadas (escala de flutuação muito grande).

Escala de flutuação de 13 m para a argila silto-

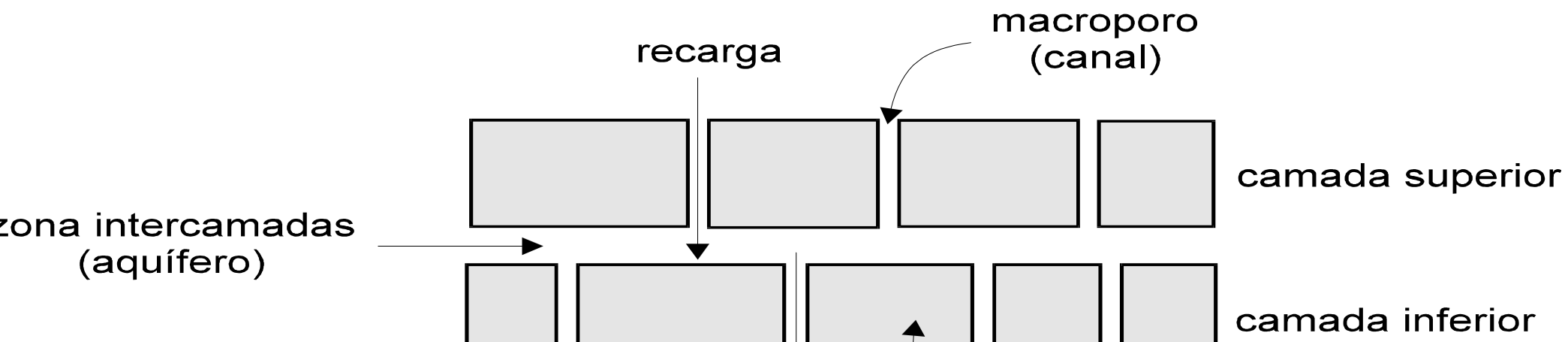
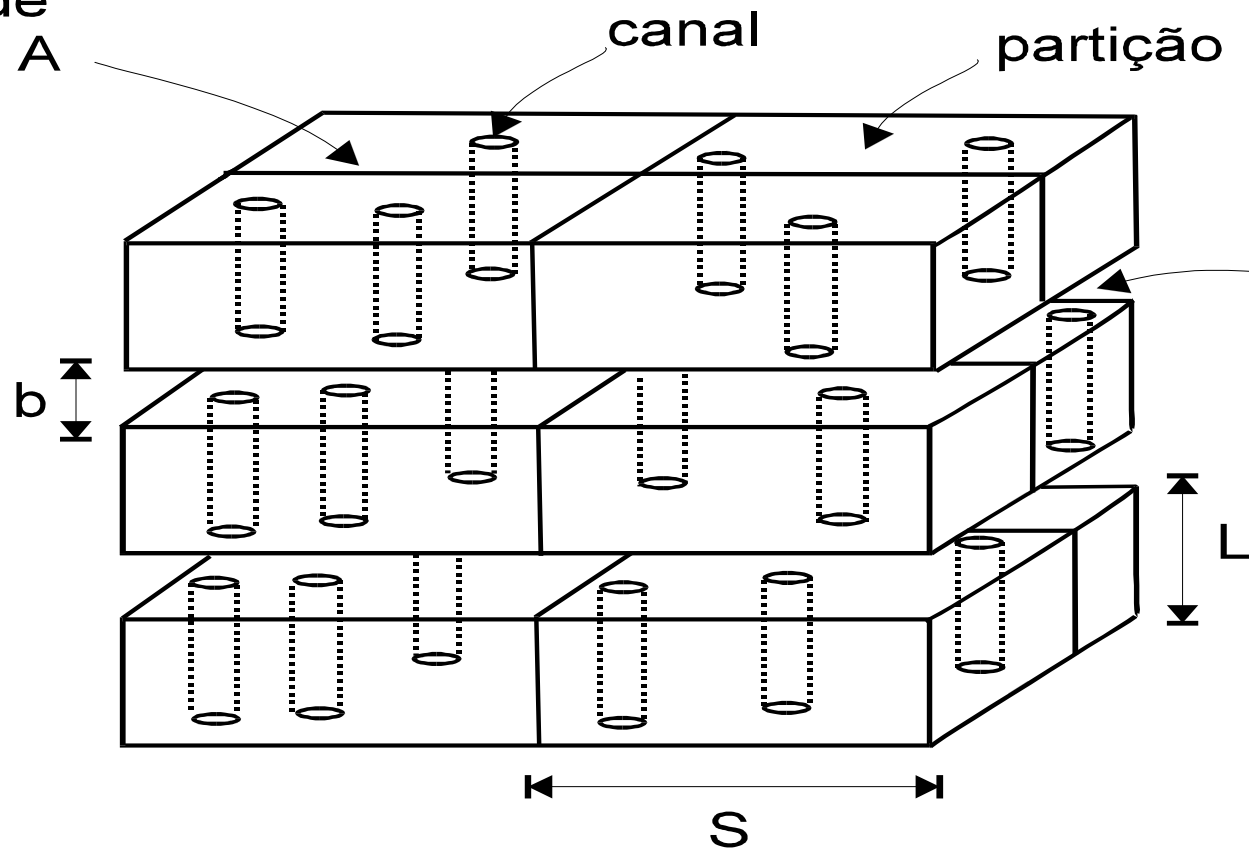
hidráulico vertical



macroporos
através dos quais
a frente já avançou

macroporos através
dos quais a frente
ainda não avançou

camada de área de
ção transversal A



injeção e descarga.

- Tempo de primeira passagem e fluxo efluente na base.
- Distribuições para número de canais em cada partição, seção transversal dos vazios e transmissividade da zona intercamadas.
- Geração de amostras aleatórias das propriedades do revestimento e cálculo determinístico do comportamento

Mais eficiente diminuir a permeabilidade média de cada camada do que a dispersão da permeabilidade da camada → compactação cuidadosa diminui os dois!

Permeabilidade do revestimento diminui com número de camadas, tanto mal com bem construídas, até espessuras de 60 a 90 cm.

Para número de camadas maior ou igual a 4, qualidade da ligação entre camadas é mais importante do que o número de camadas: um

para o revestimento.

- Observação: hipótese inicial incorreta → partições são consideradas independentes.