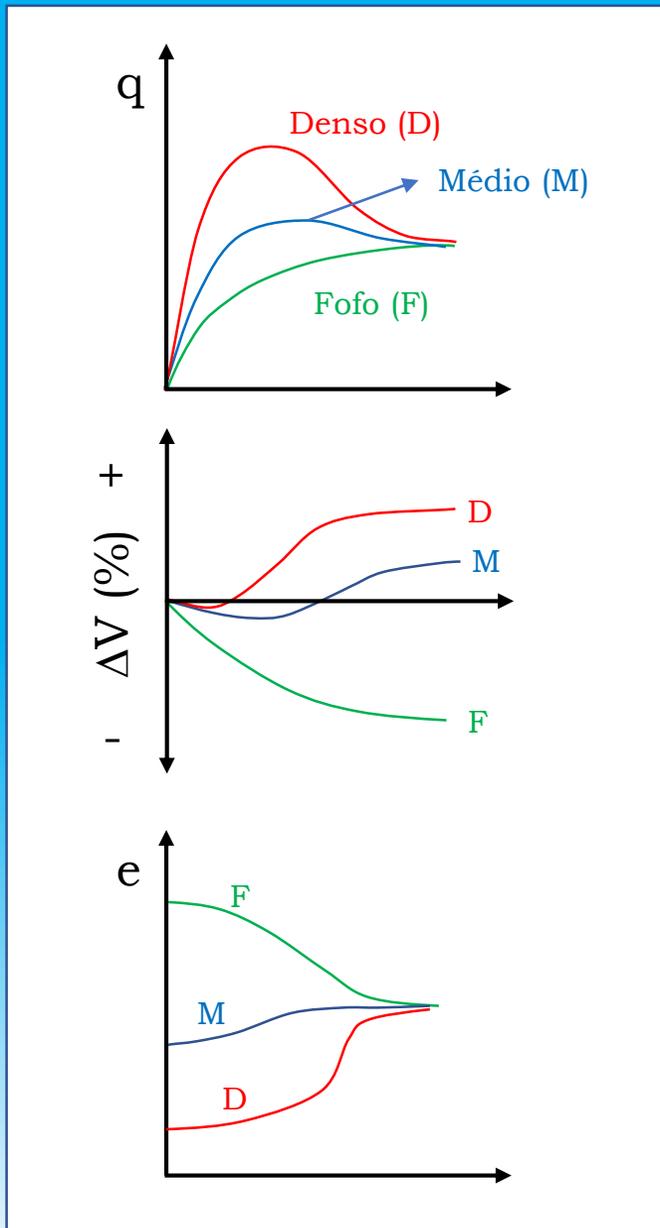


Solos compactados

Fernando A. M. Marinho

2019

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 resistência do solo para valores adequados ao projeto.

Área de empréstimo

A densidade do material na área de empréstimo é, em geral, diferente da que será utilizada na compactação.

Deve-se considerar as seguintes perdas:

- Durante a remoção
- Transporte
- Material inadequado (e.g. pedregulhos)



$$V_{empréstimo} = \frac{\gamma_{d,aterro}}{\gamma_{d,empréstimo}} V_{requerido(aterro)} + \frac{W_{perdas}}{\gamma_{d,empréstimo}}$$

Estimativa

$$V_{empréstimo} = \omega V_{requerido(aterro)}$$

ω varia de 1,1 a 1,15 para solos



Área de empréstimo

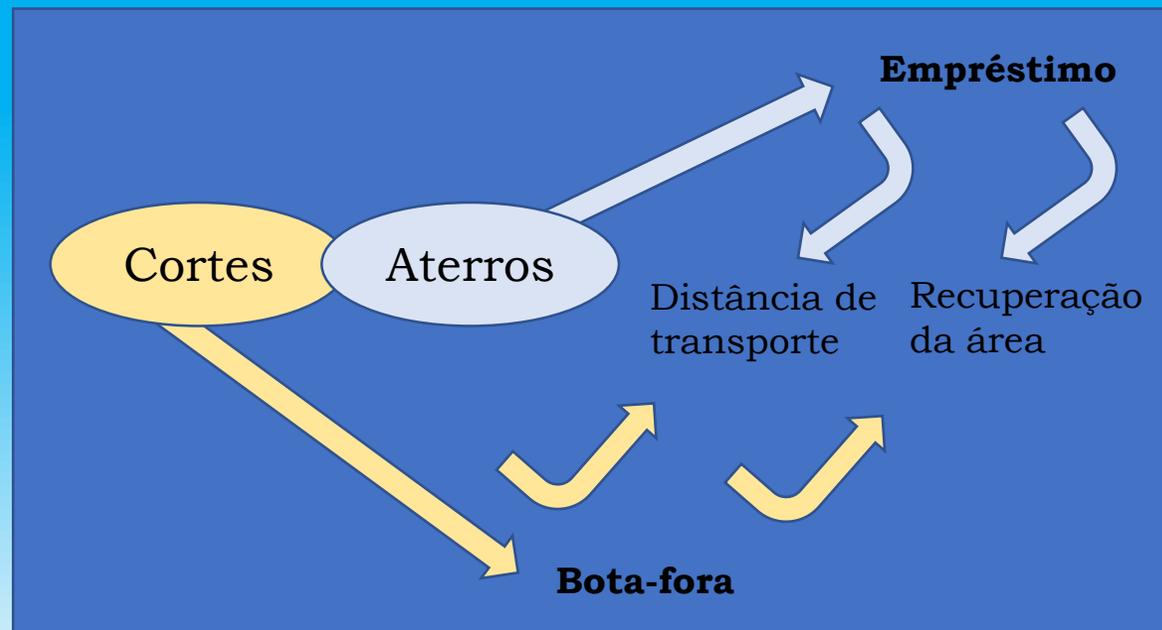


Área de Empréstimo

A escolha da área de empréstimo deve atender às necessidades da obra:

- Tipo de solo (Técnico)
- Volume necessário (Técnico)
- Distância de transporte (Econômico)

Deve-se otimizar

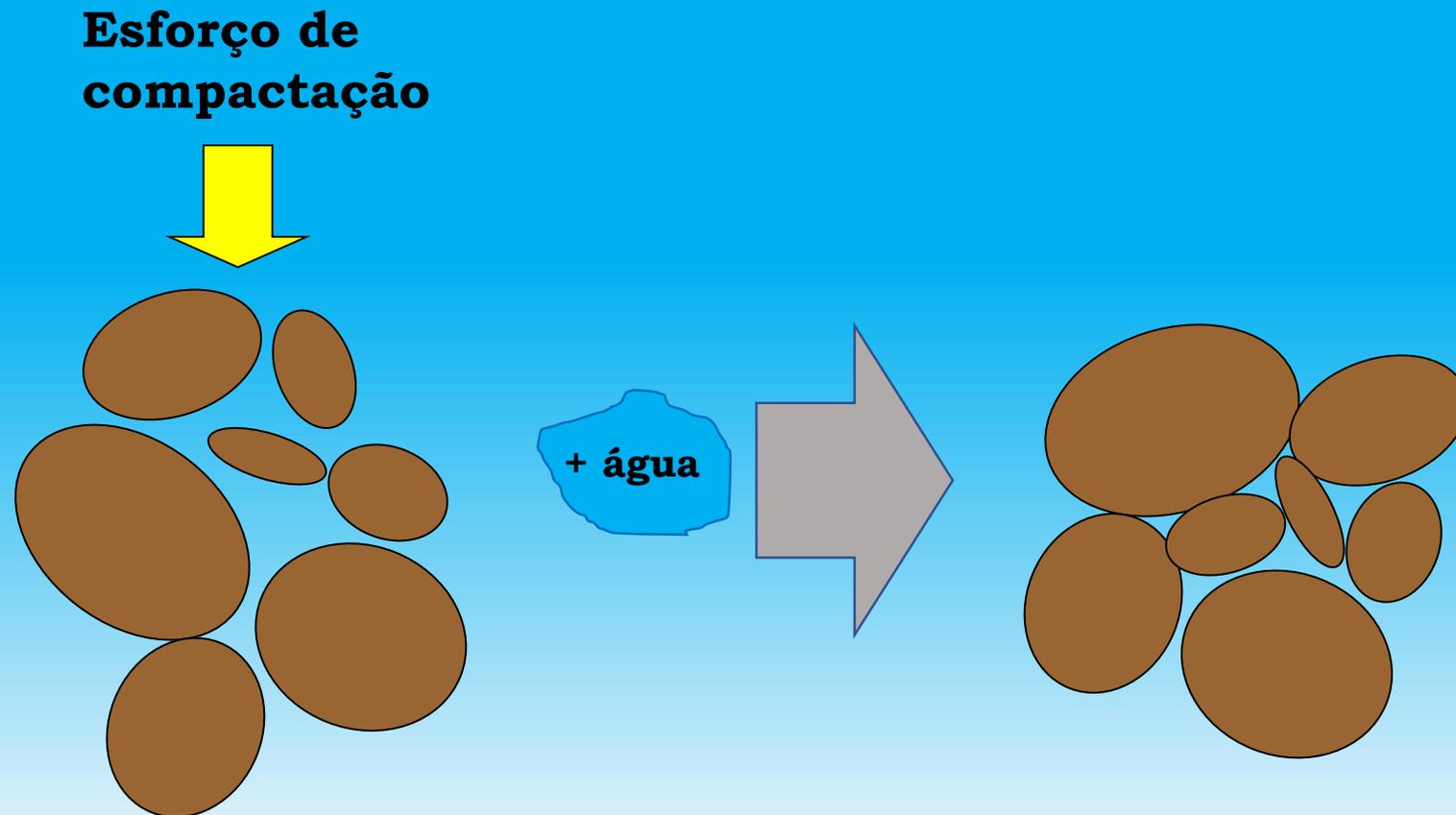


Fatores que Controlam a Compactação

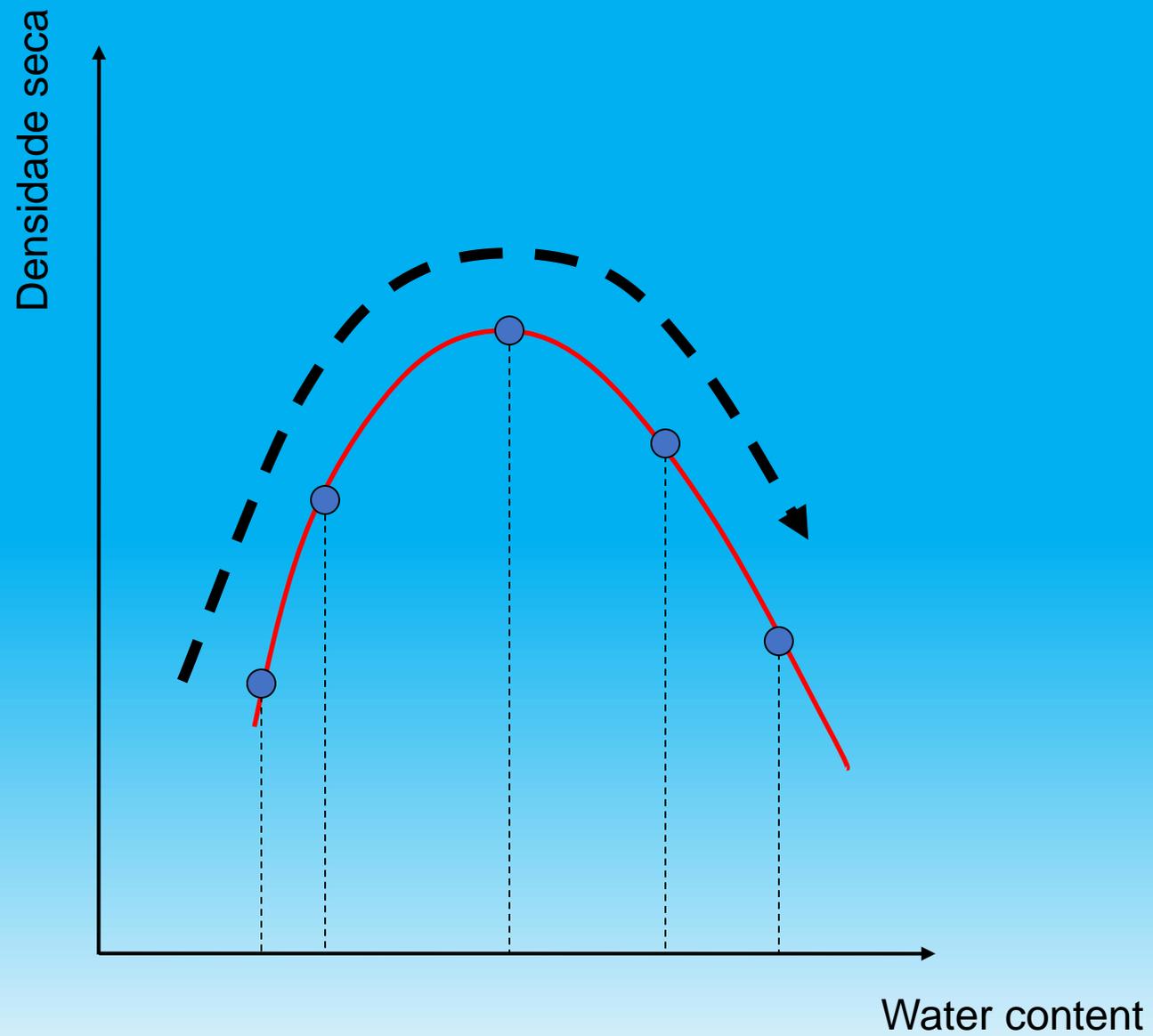
1. Energia de compactação.
2. Tipo de solo e distribuição granulométrica.
3. Teor de umidade.

O que é Compactação?

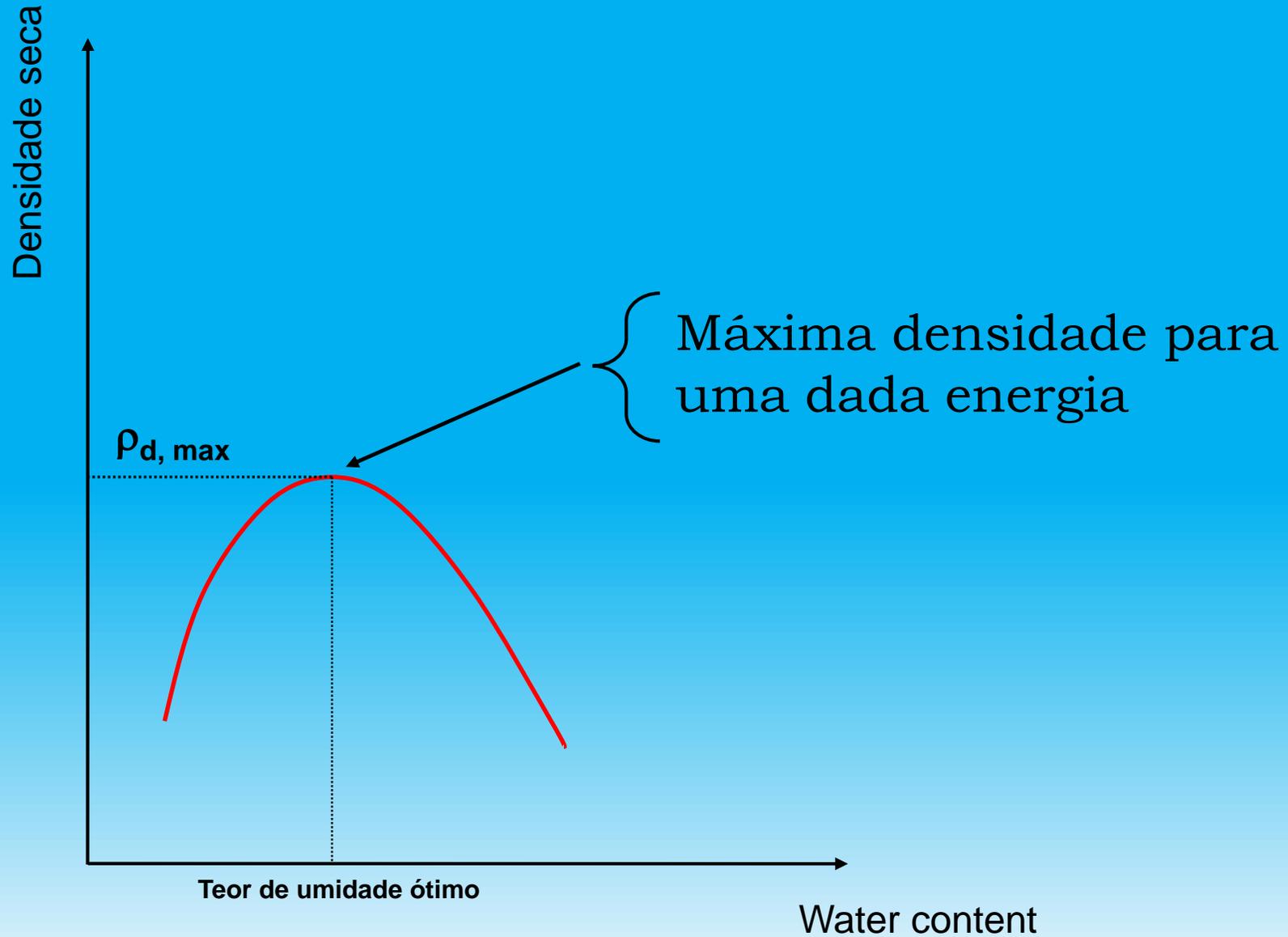
É uma técnica de melhoramento do solo, onde o solo é densificado pela aplicação de um esforço externo. O solo reduz o índice de vazios pela saída de ar.



A Curva de Compactação

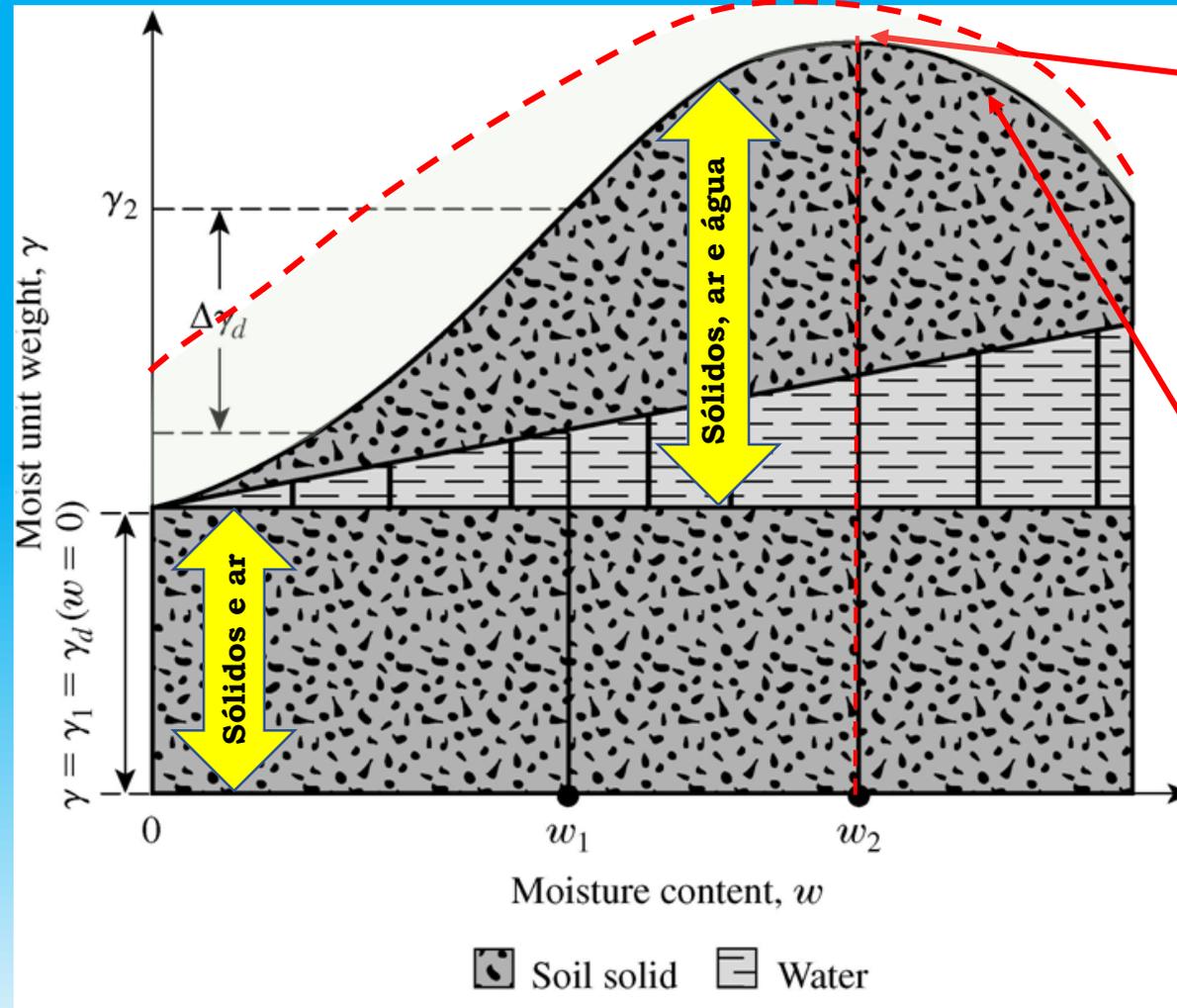


Curva de Compactação



Curva de Compactação

As três fases durante o processo de compactação.

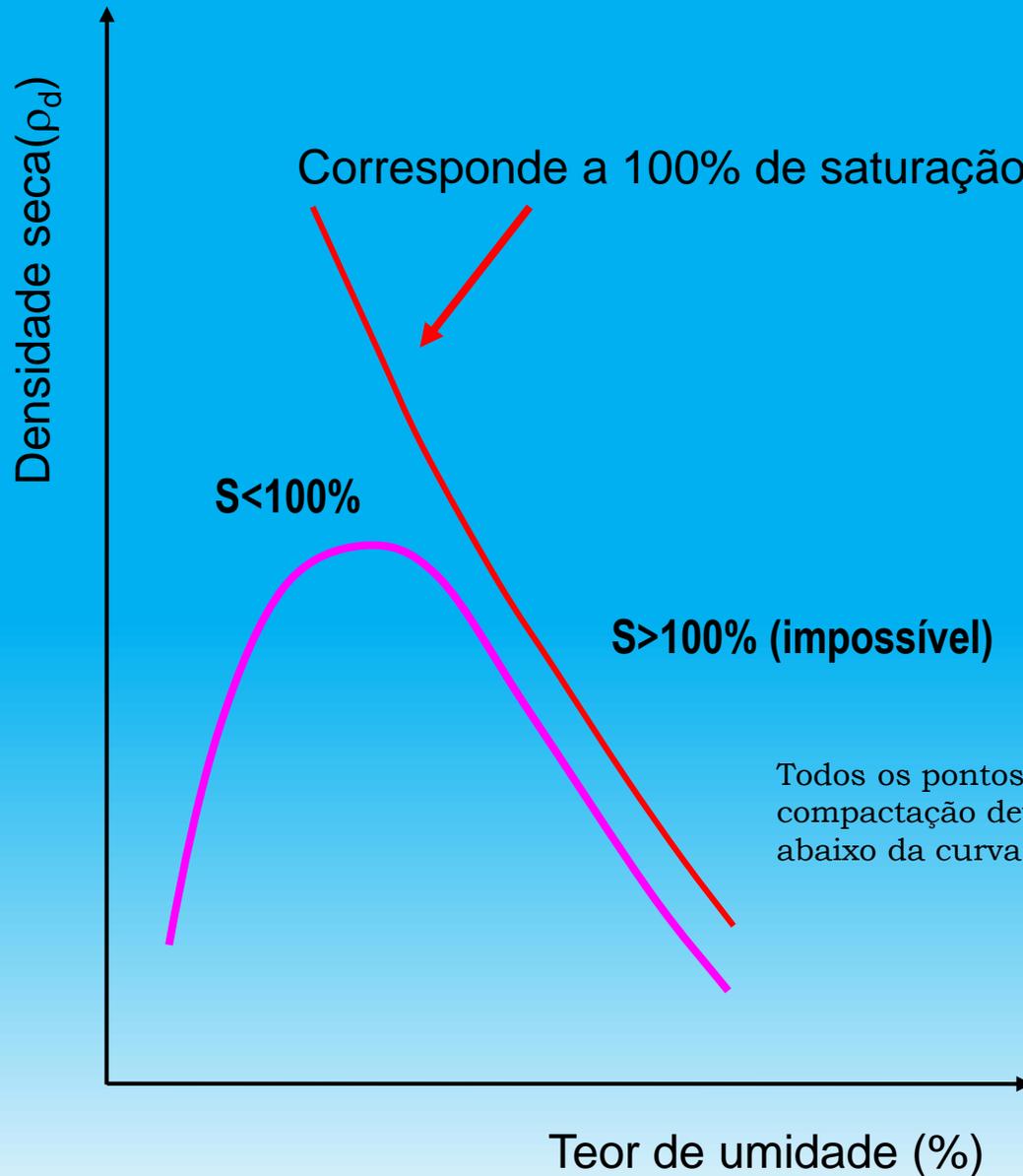


Menor índice de vazios e maior densidade seca no teor de umidade ótimo

Dificuldade em expulsar o ar

Em massa só o sólido (w)
Em volume todo o sistema (S)

Curva de 100% de saturação

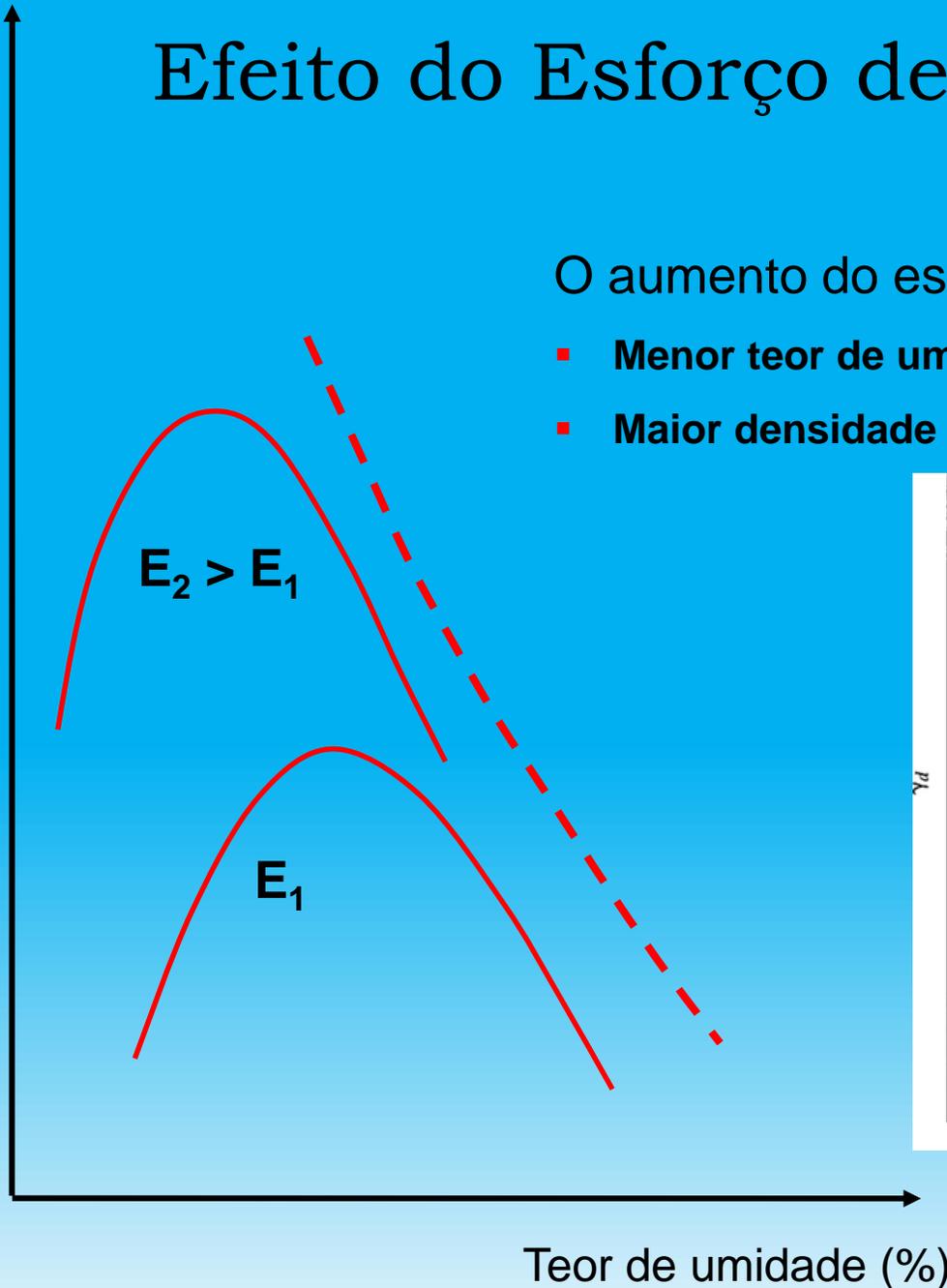


$$\rho_d = \frac{G_s \rho_w}{1 + wG_s}$$

$$S = \frac{V_w}{V_v}$$

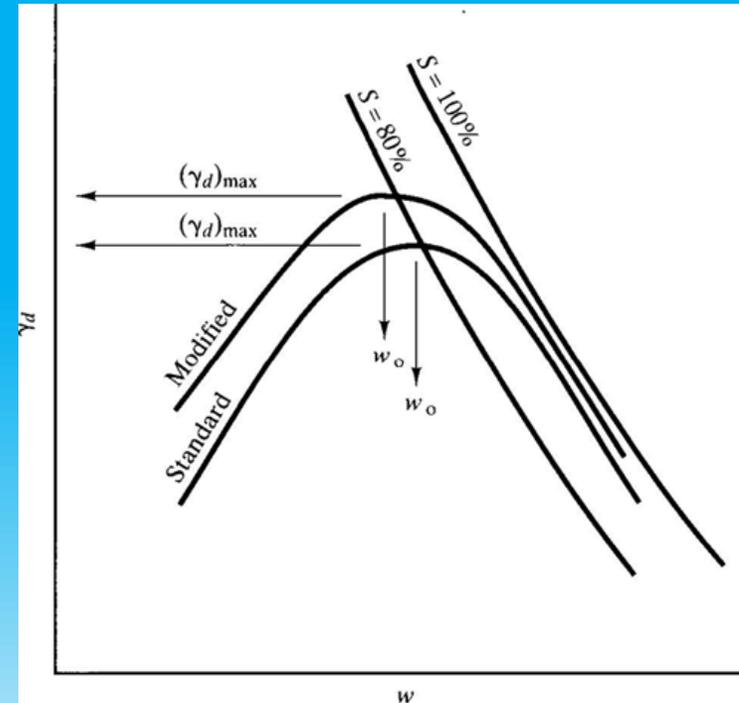
Efeito do Esforço de Compactação

Densidade seca (ρ_d)



O aumento do esforço de compactação causa:

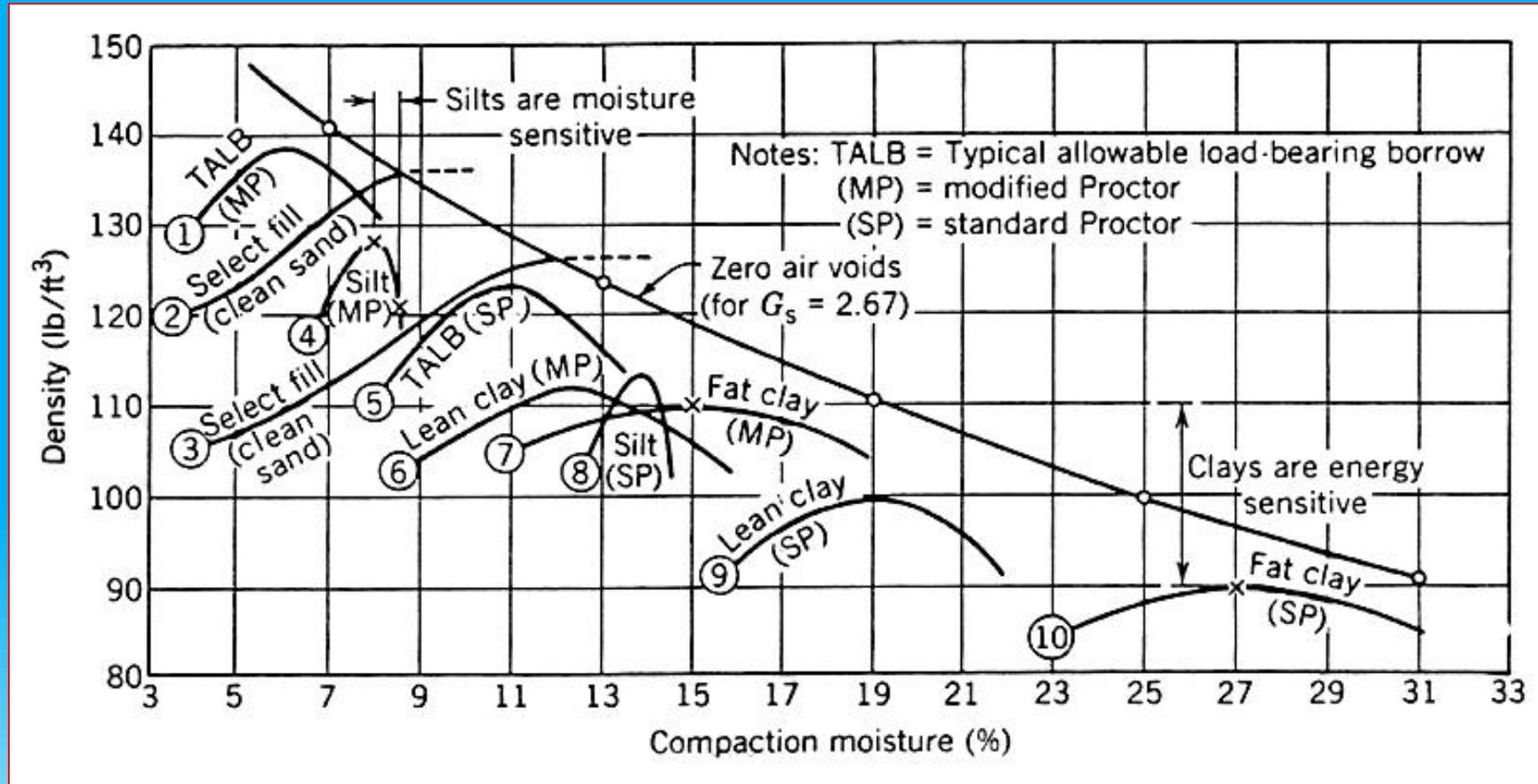
- Menor teor de umidade ótimo
- Maior densidade seca máxima.



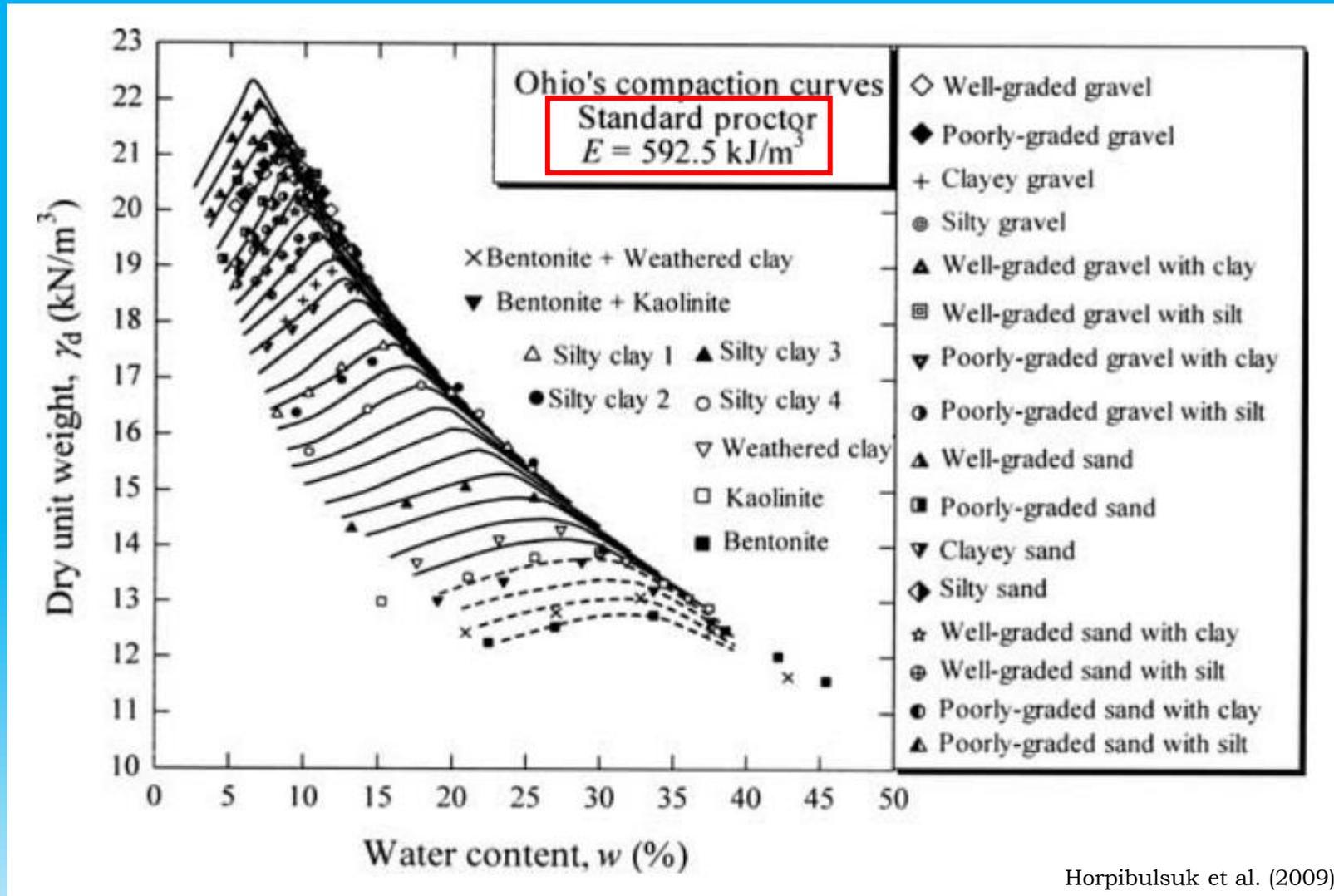
Teor de umidade (%)

Lembrar que a energia no campo depende de vários fatores

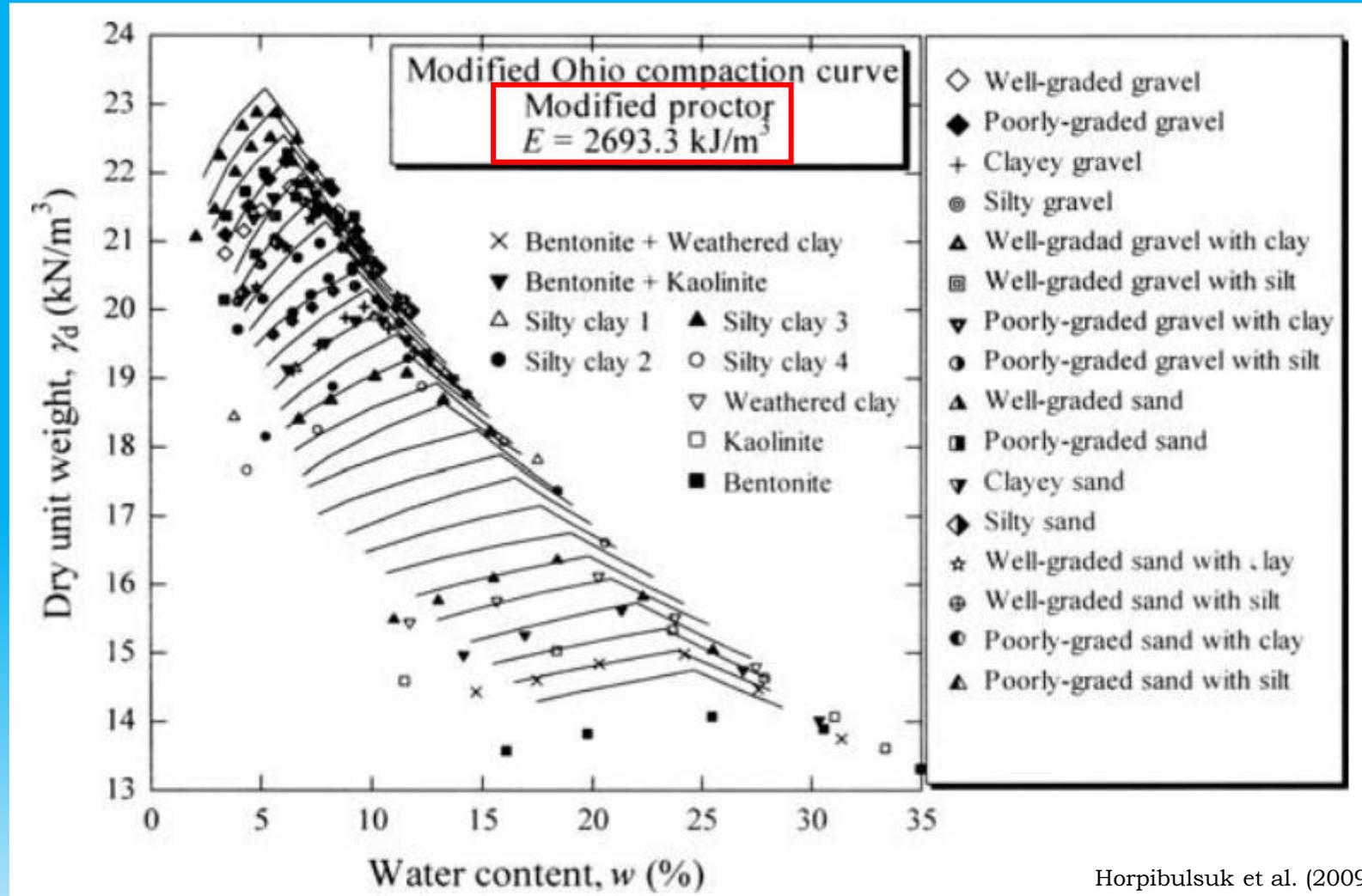
Efeito do Tipo de Solo e Esforço de Compactação



Efeito do Tipo de Solo e Esforço de Compactação

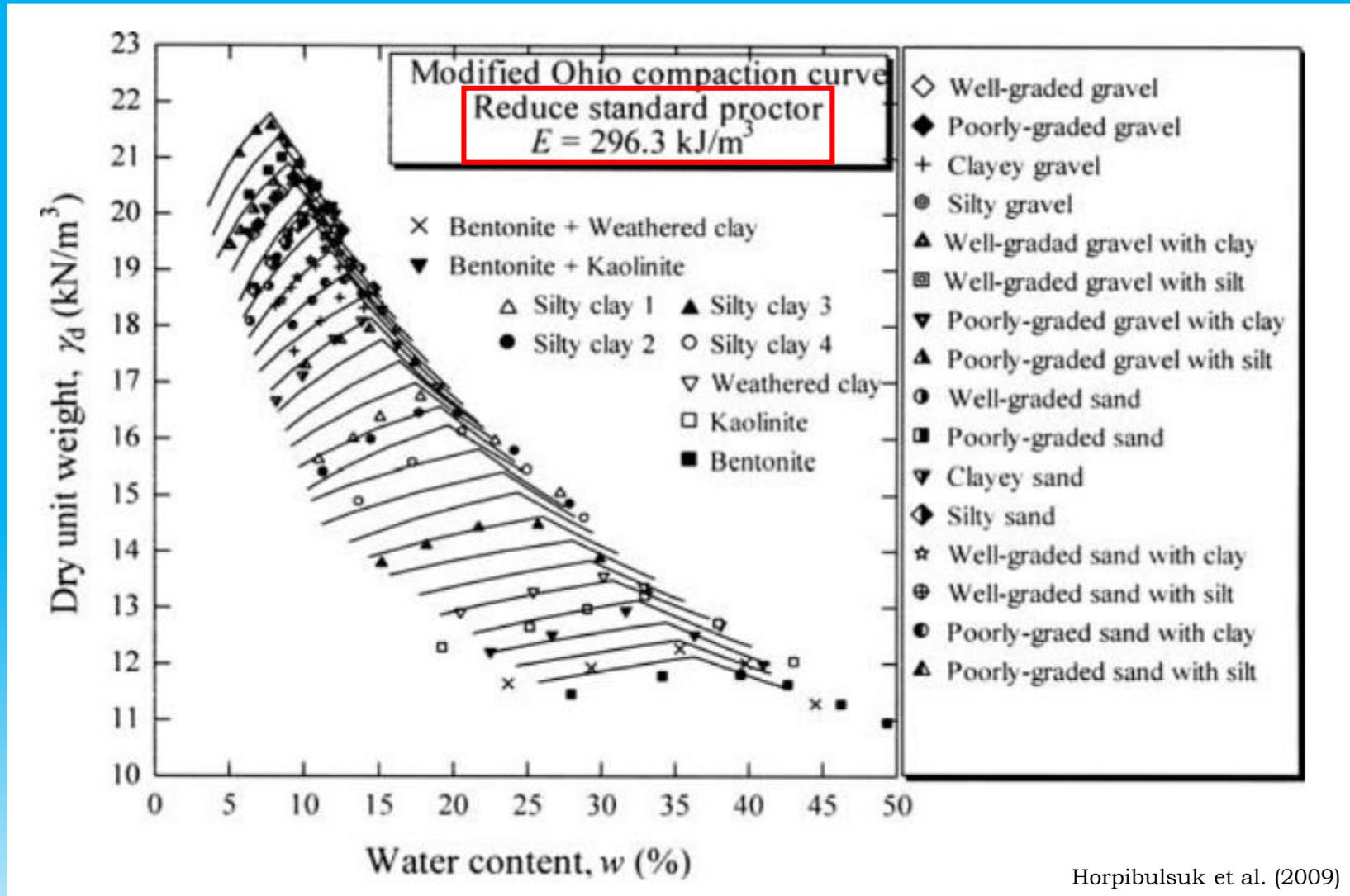


Efeito do Tipo de Solo e Esforço de Compactação

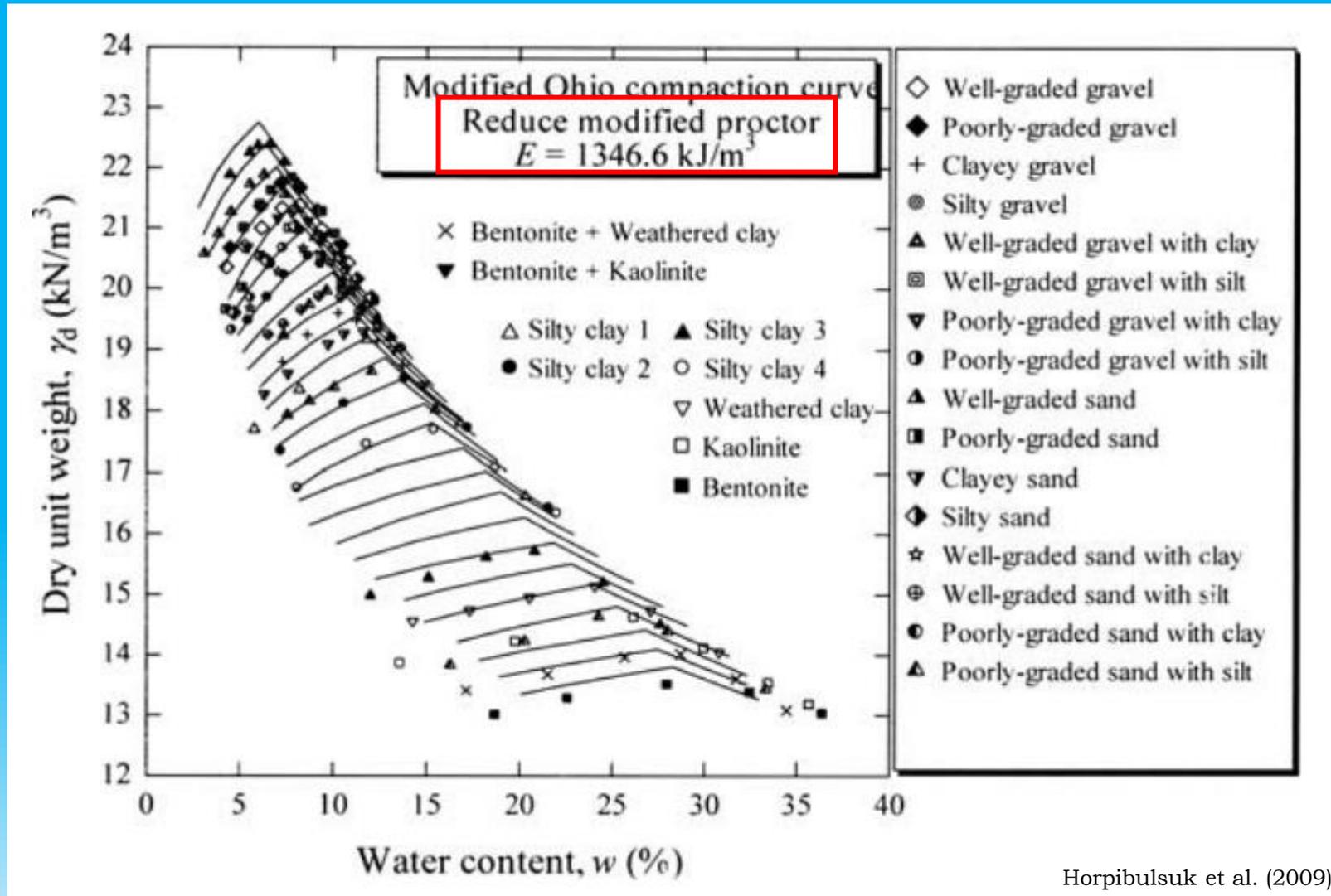


Horpibulsuk et al. (2009)

Efeito do Tipo de Solo e Esforço de Compactação

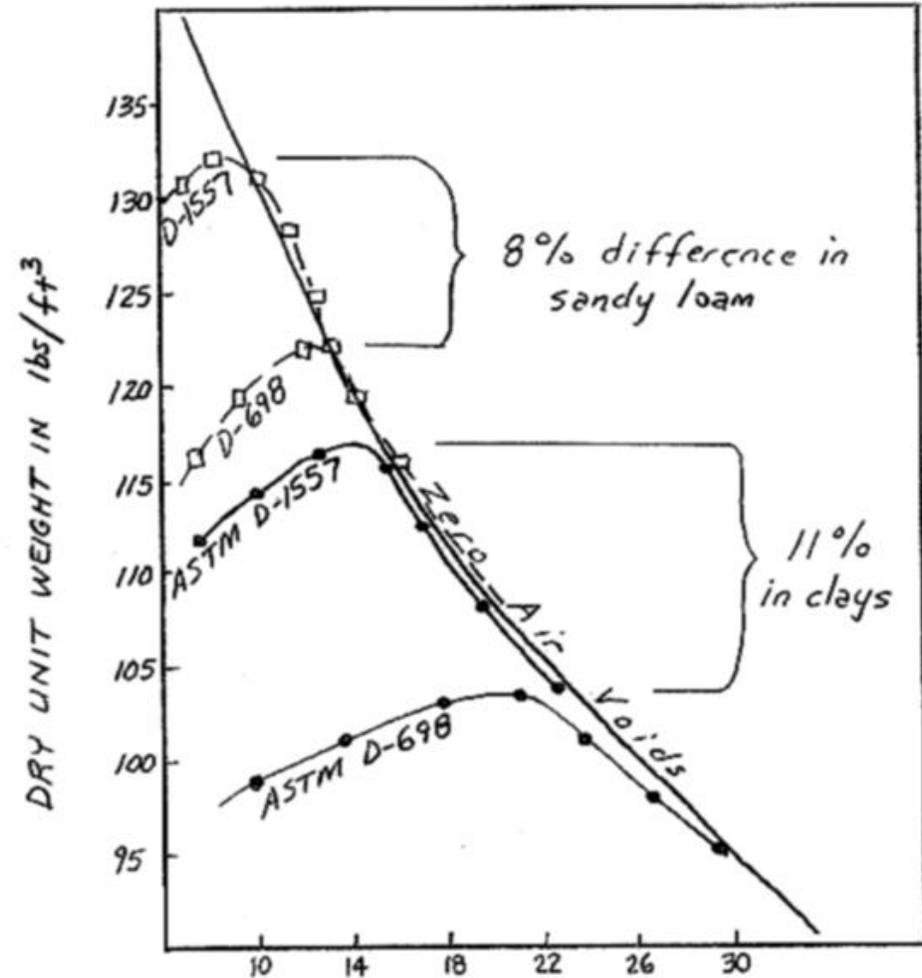


Efeito do Tipo de Solo e Esforço de Compactação

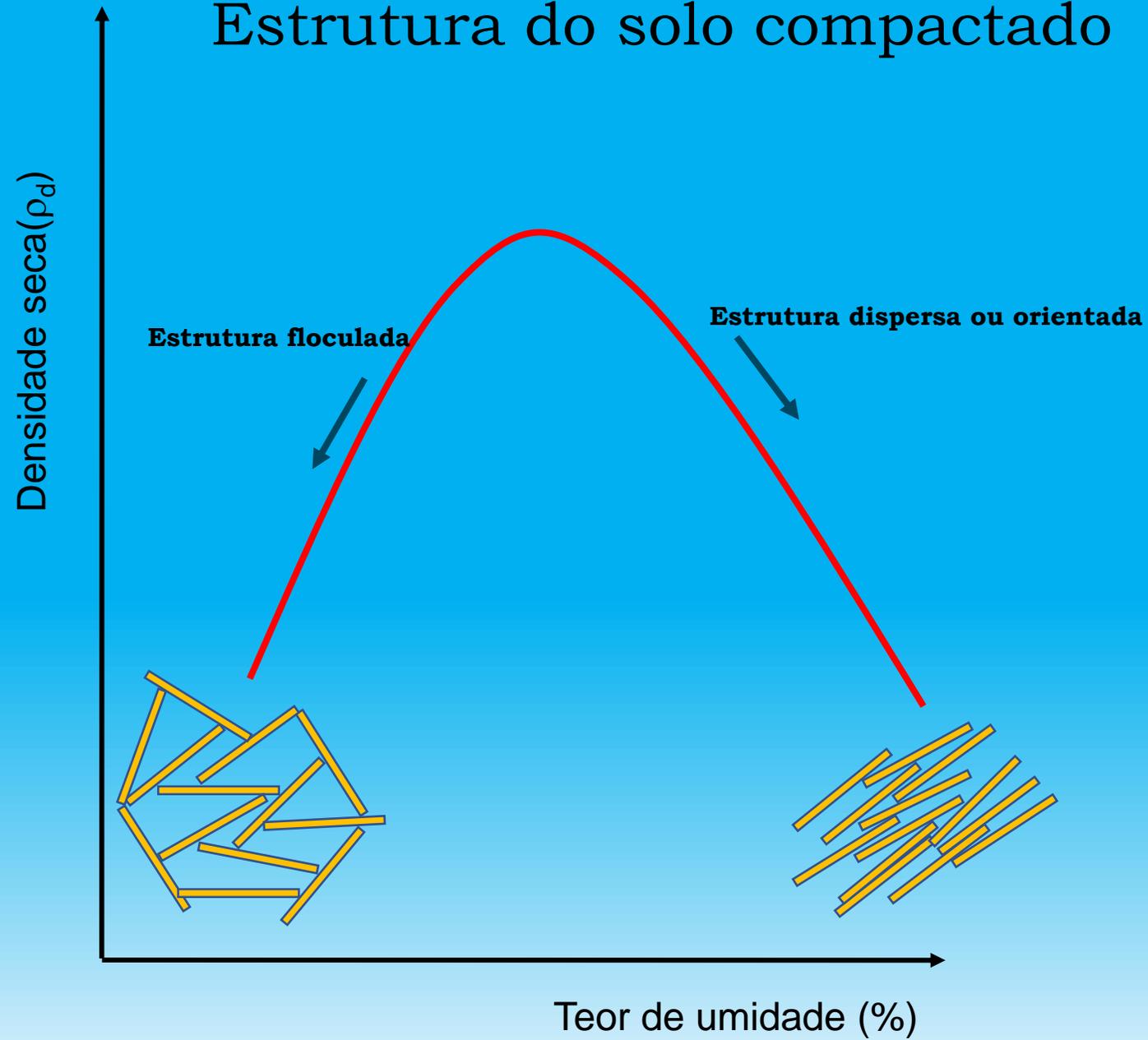


Efeito do Tipo de Solo e Esforço de Compactação

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

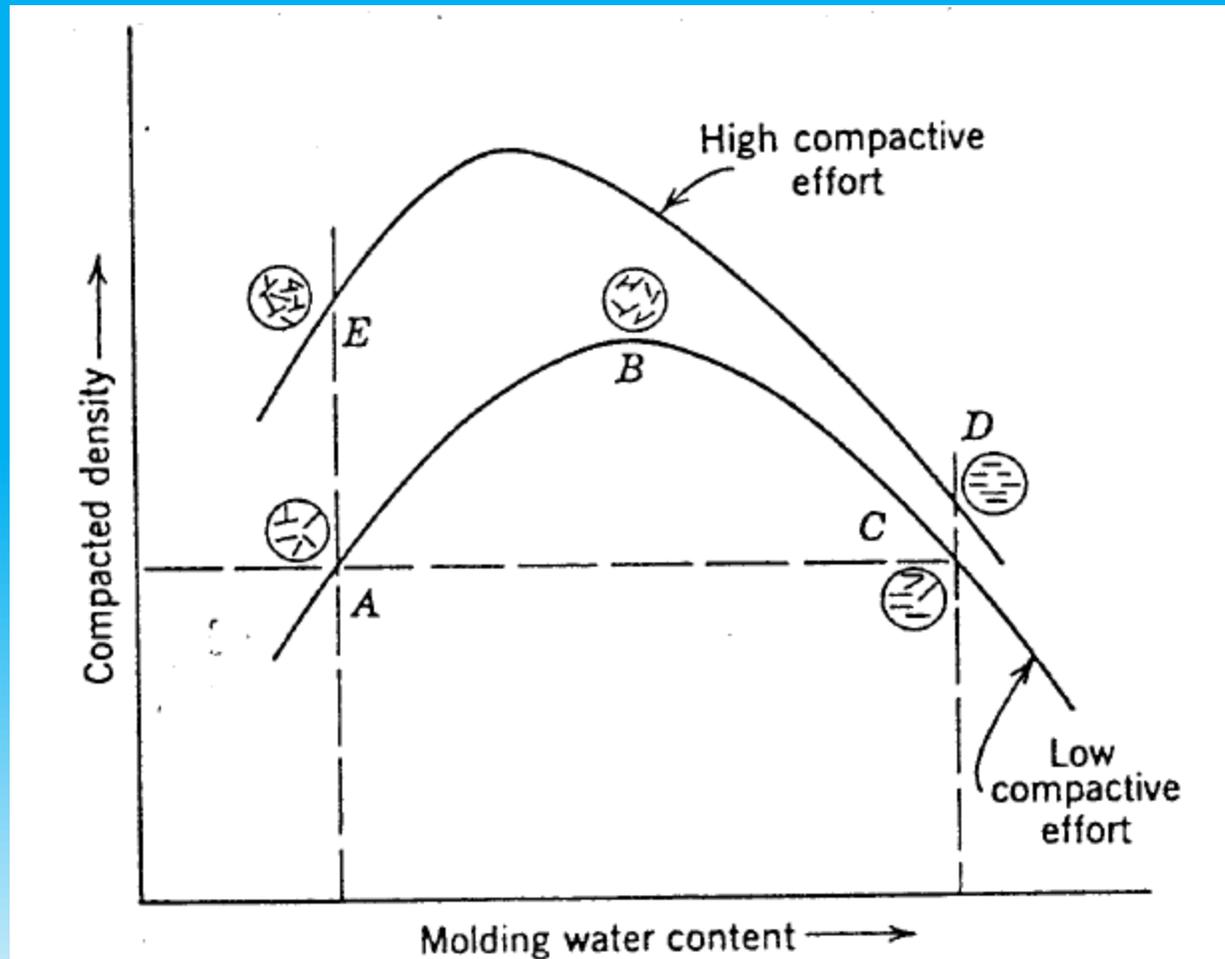


Estrutura do solo compactado



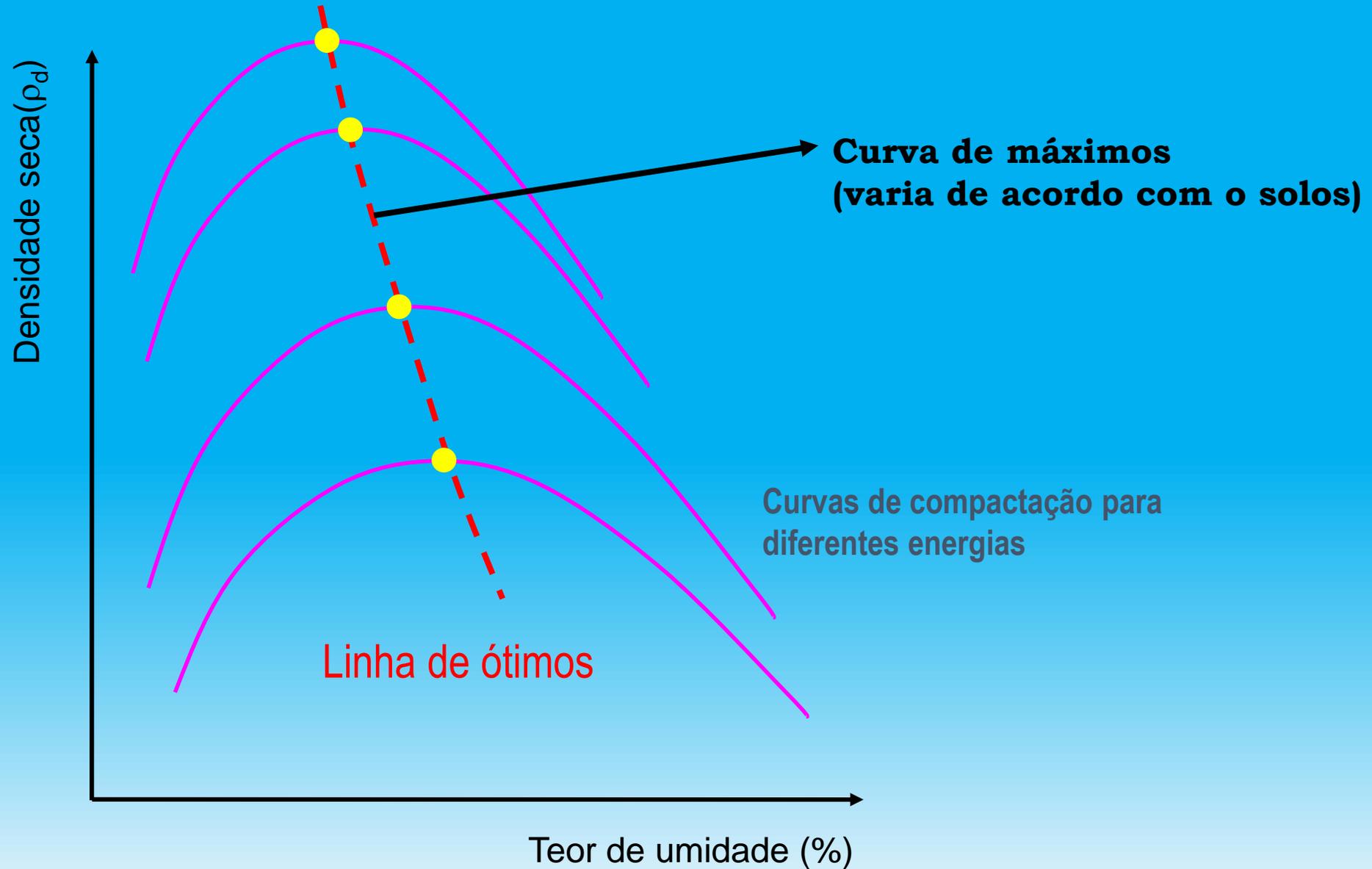
Estrutura do solo compactado

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

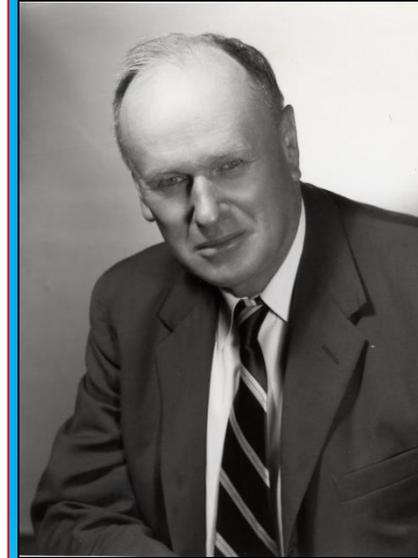
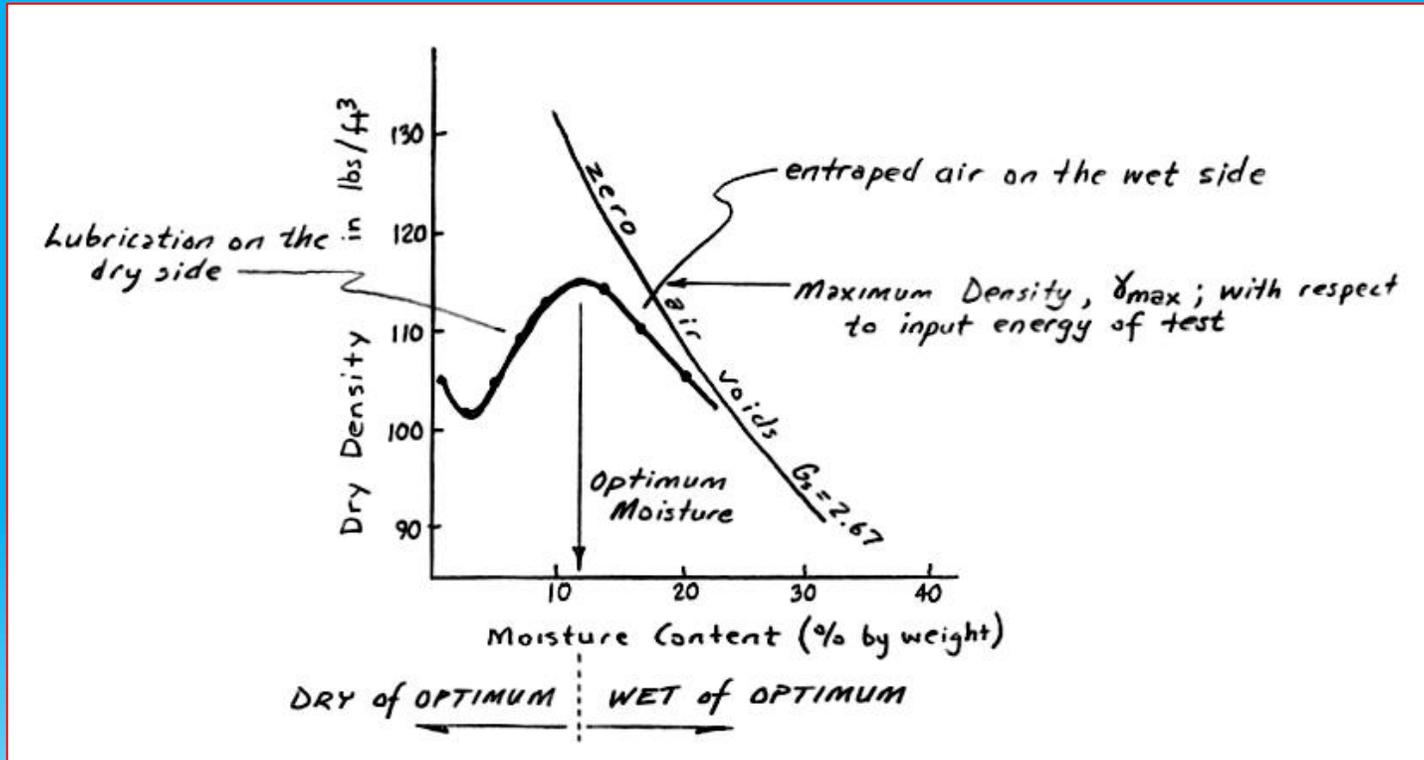


Lambe (1962)

Linha de Ótimos

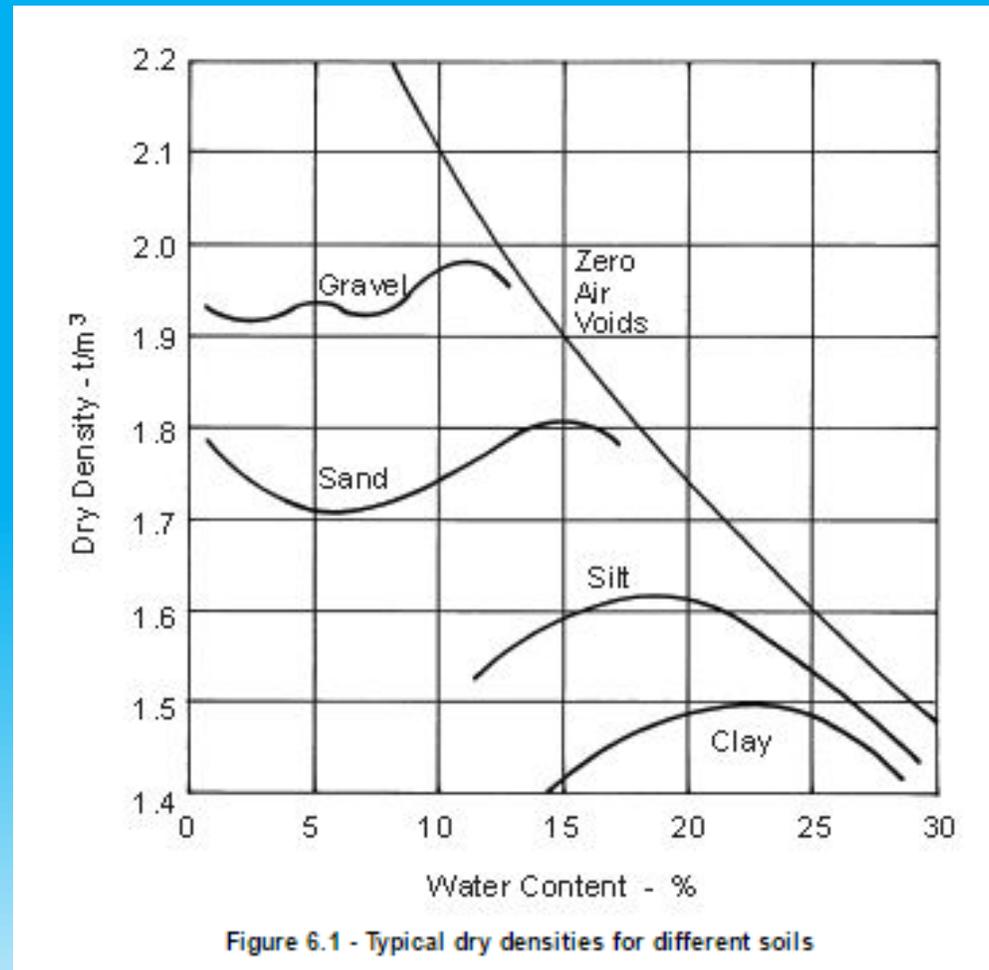


Ralph Proctor



Ralph Proctor 1894-1962

Características das curvas de Compactação



Ensaio de Compactação de laboratório

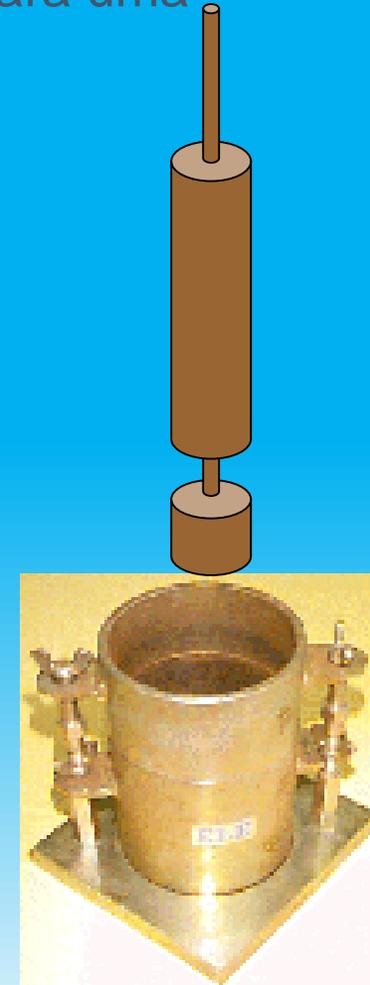
O objetivo do ensaio é obter a curva de compactação e definir o teor de umidade ótimo e densidade seca máxima para uma energia especificada.

Proctor Normal:

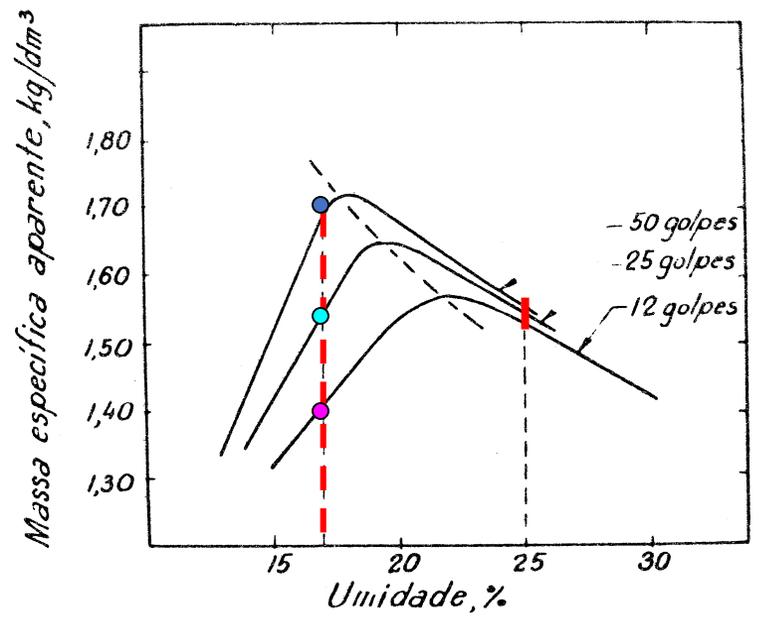
- 3 camadas
- 26 golpes por camada
- Soquete de 2.5 kg
- Altura de queda 305 mm

Proctor Modificado:

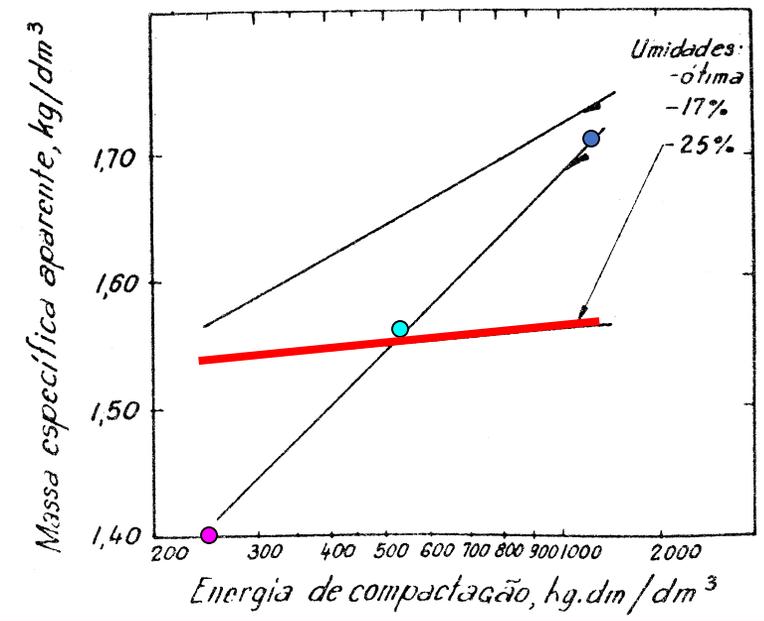
- 5 camadas
- 27 golpes por camada
- Soquete de 4.5 kg
- Altura de queda 457 mm



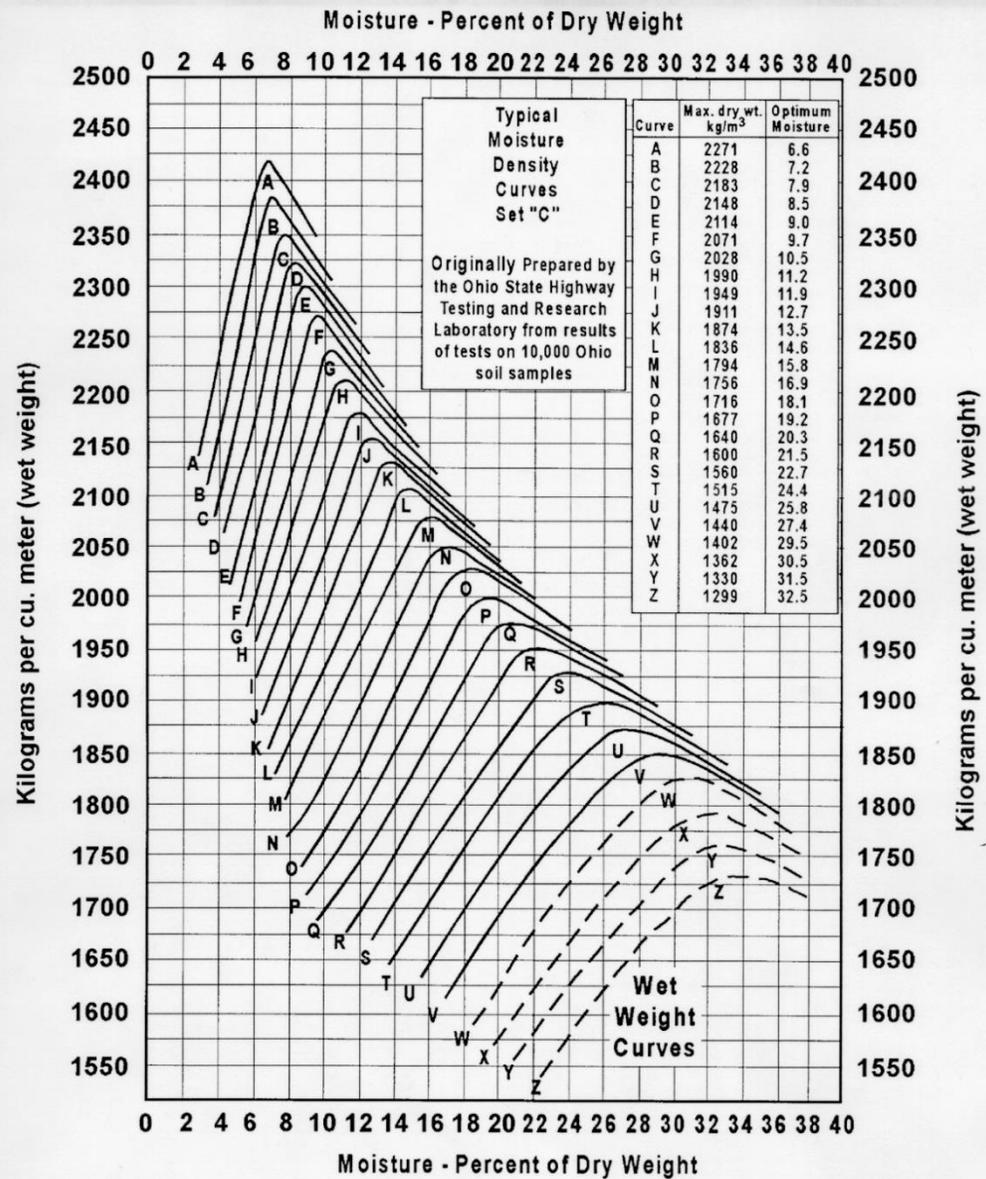
Volume do molde 1000 ml



Curvas de compactação com três energias.



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

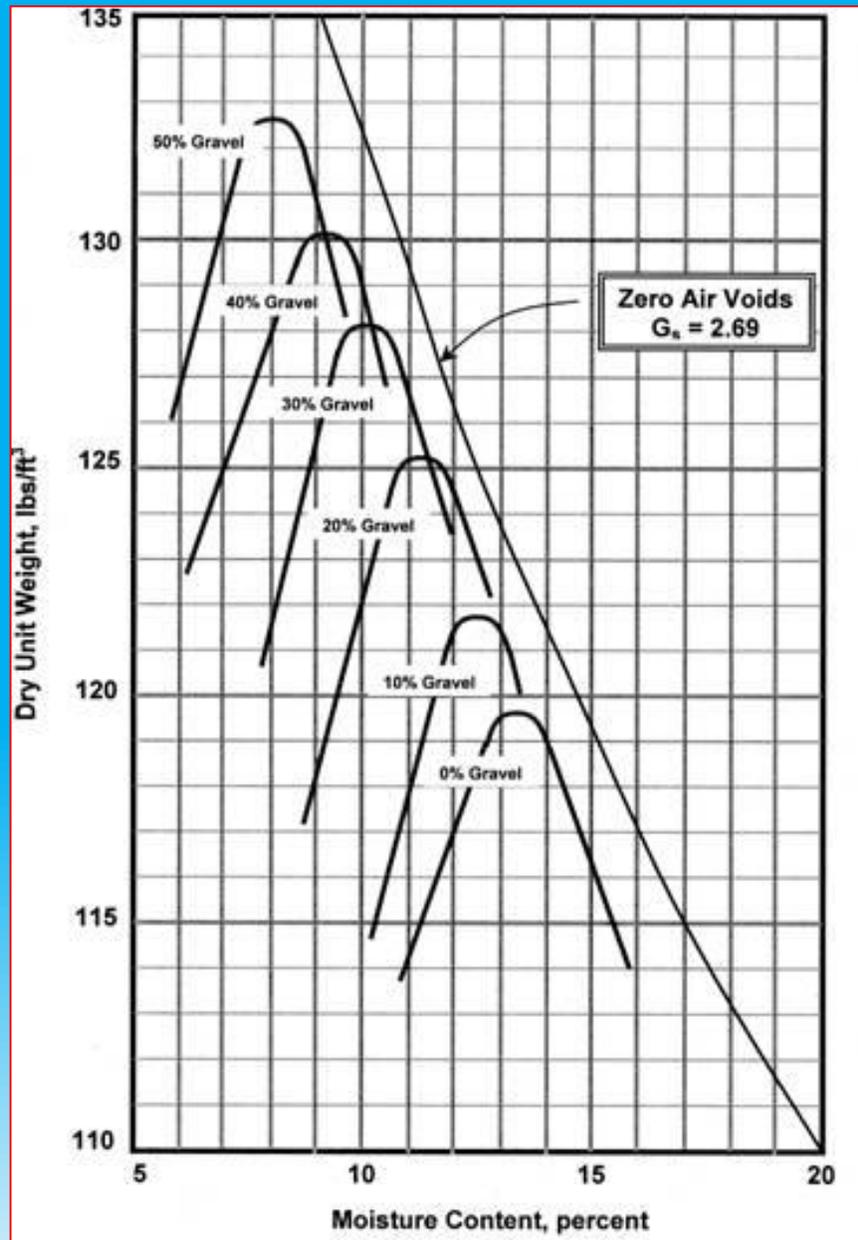


* Computer re-drawn February 1996

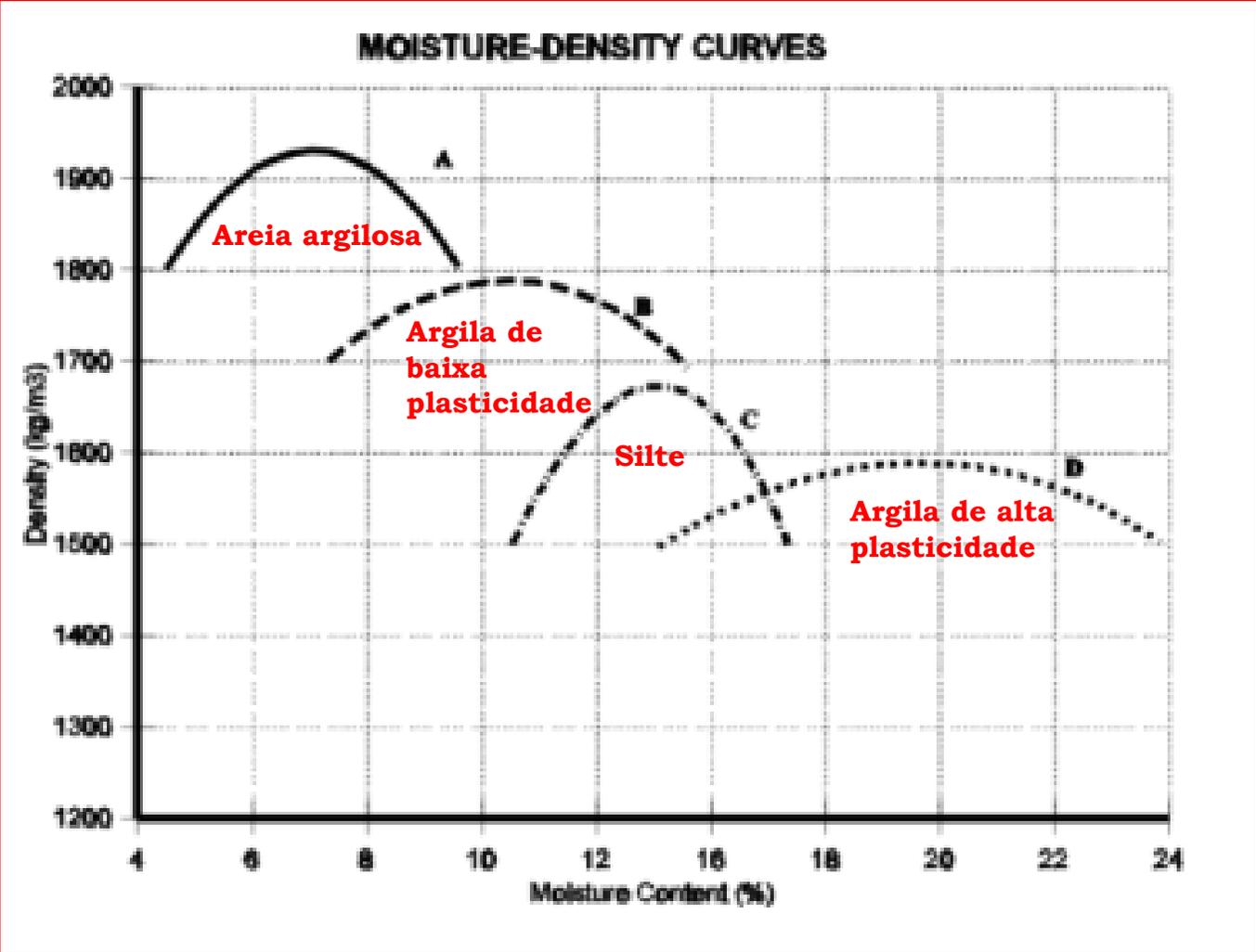
Use for C-90M + C-135B-M

Curvas típicas dos solos de Ohio

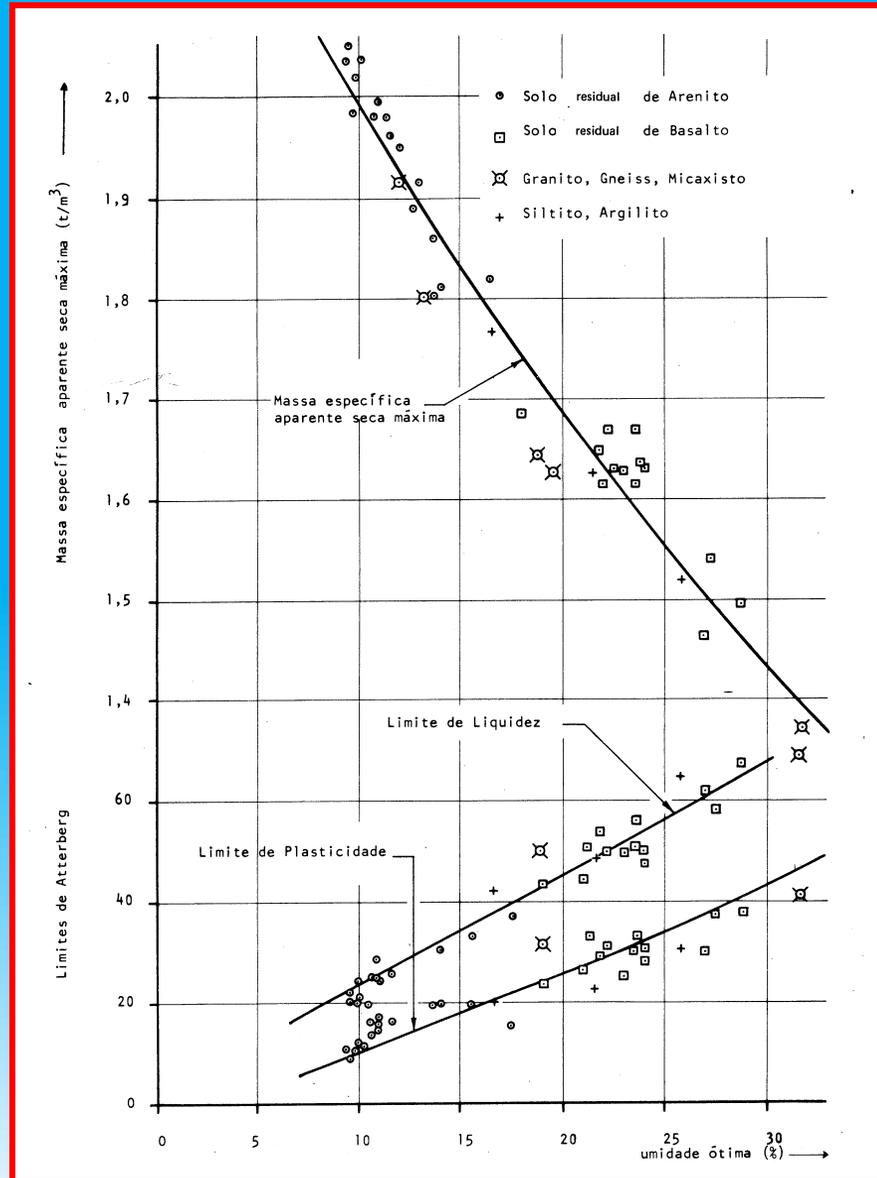
Efeito da presença de material mais grosso



Efeito do tipo de solo



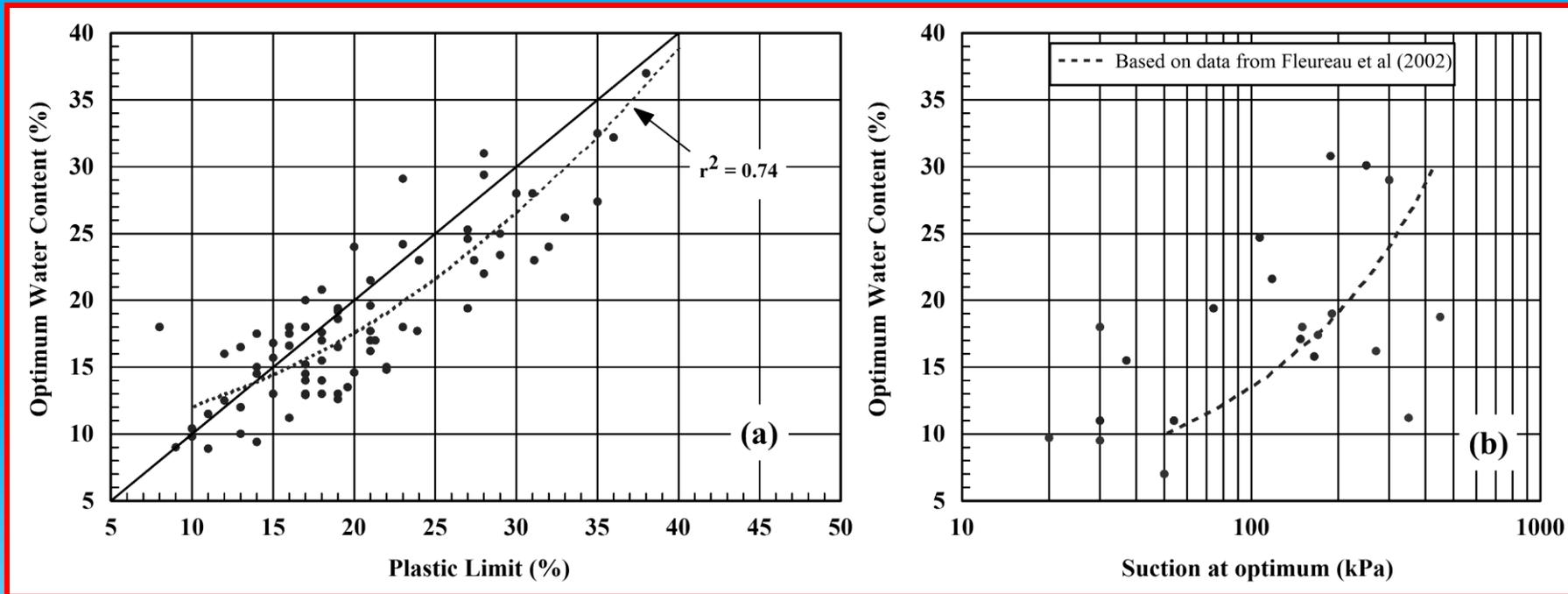
- O valor de w_{ot} pode ser estimado por correlações estatísticas entre umidades ótimas e densidade úmida.



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

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

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



Marinho & Oliveira
(2011)

Compactação no campo

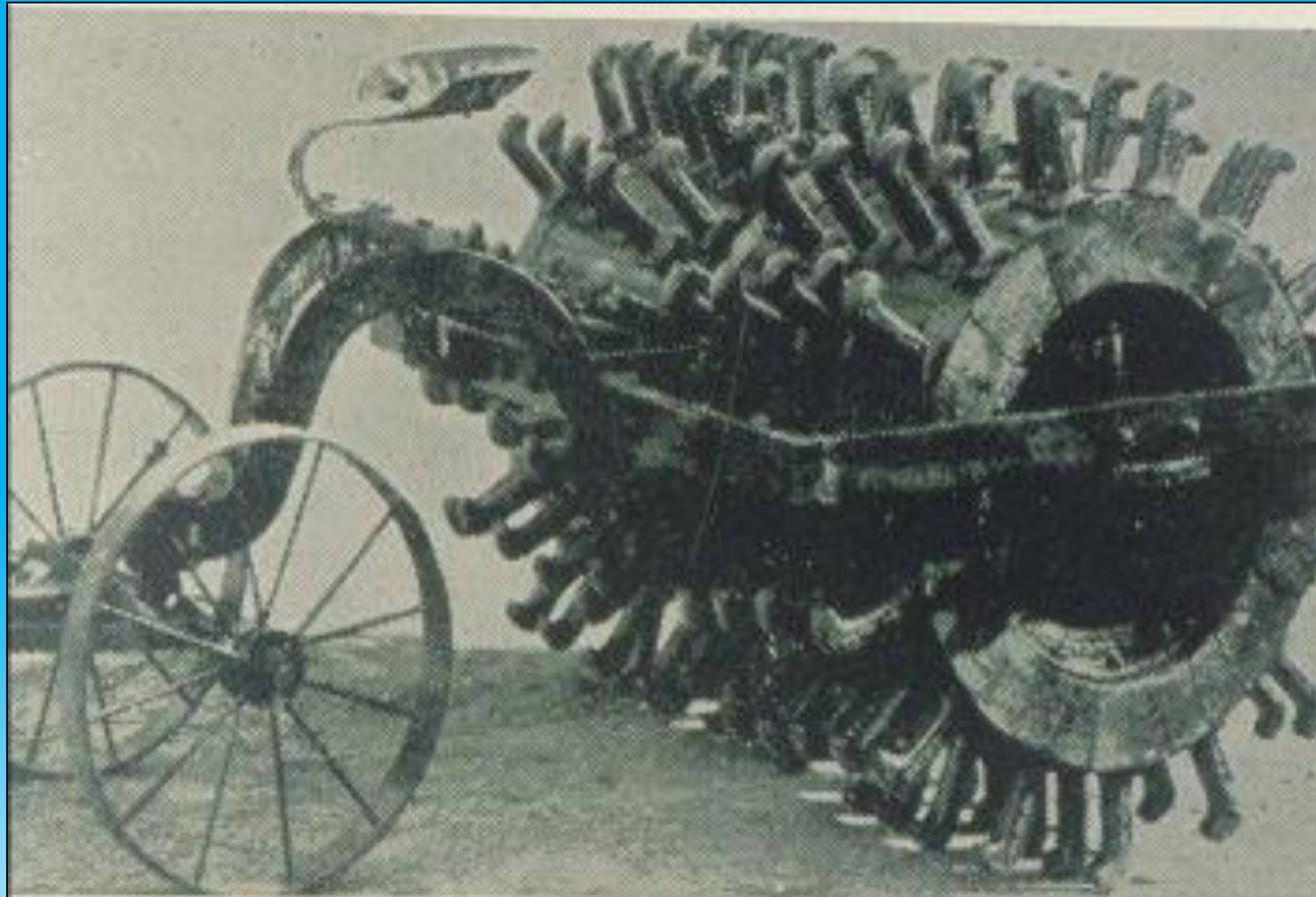
Tipos de compactadores:

- 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 liso



Rolo Pé de Carneiro



Compactação Pneumática

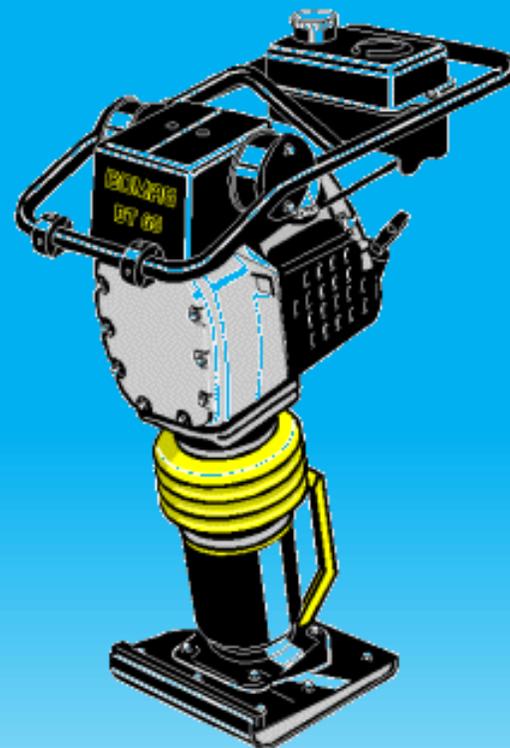


Rolo Liso





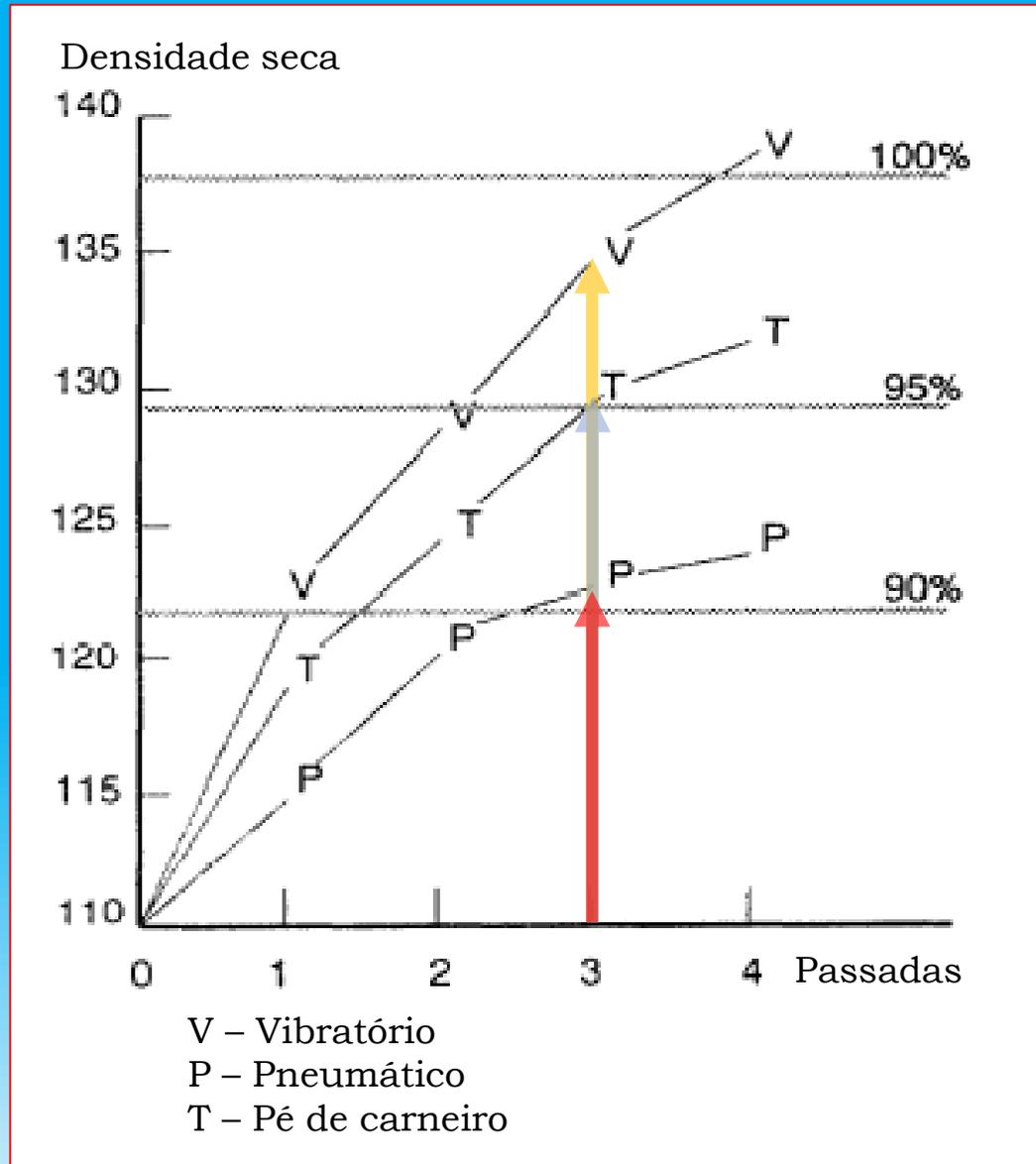
Manual



Compactação por impacto

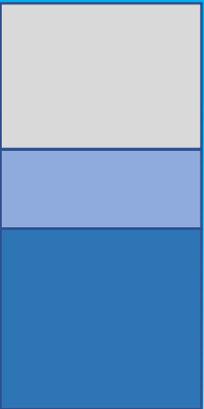


Ajuste da energia no campo

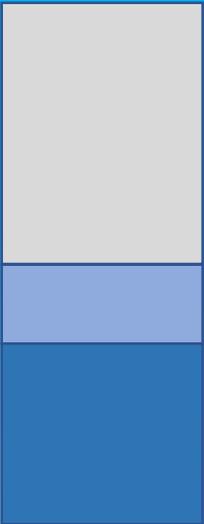


Material Granular

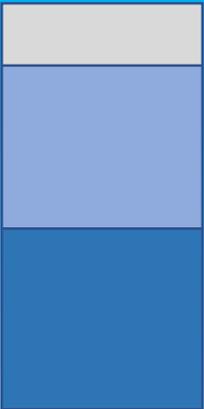
Estados do solo da jazida para o aterro



Escavação



Ajuste do teor de umidade



Estado natural na jazida

Estado do solo escavado

Estado do solo compactado

Ajuste de Teor de Umidade



Boulanger

Homogeneização do material lançado



Ajuste de Teor de Umidade



A observação ainda é um dos melhores métodos de controle.

Excesso de poeira é um indício de teor de umidade abaixo do ótimo.

Espessura da Camada Lançada



Especificação de Compactação

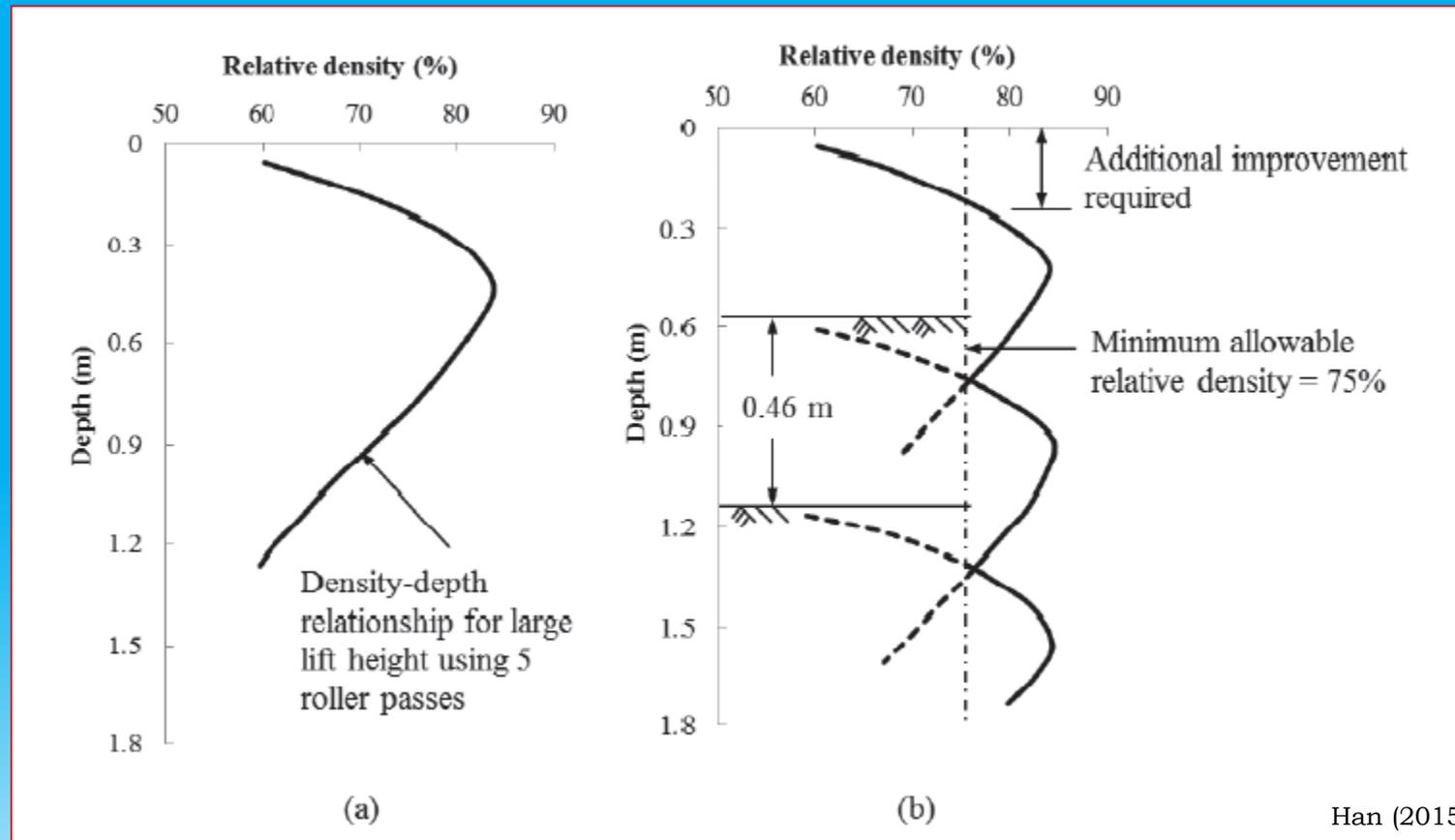
1. Especificação de execução

O que fazer e como fazer

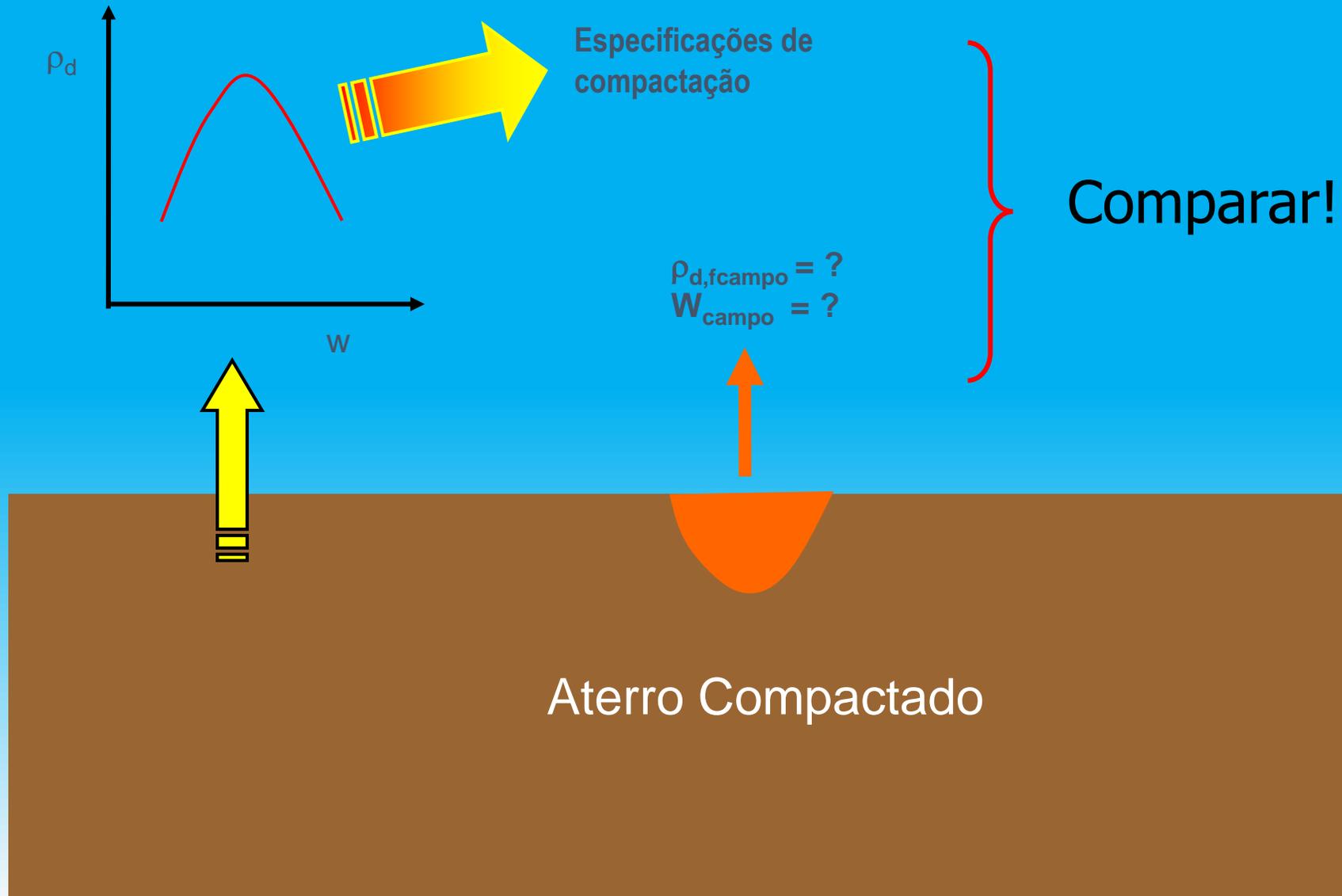
2. Especificação de Performance

Controle de grau de compactação (ensaios)

Espessura das camadas lançadas



Princípio do Controle de Compactação



Controle de Compactação

O controle de qualidade do aterro envolve os seguintes aspectos:

- Qualidade do material do aterro: tipo de material, distribuição granulométrica, limites de consistência.
- Tipo de peso do equipamento.
- Espessura da camada lançada
- Teor de umidade de compactação
- Número de passadas.

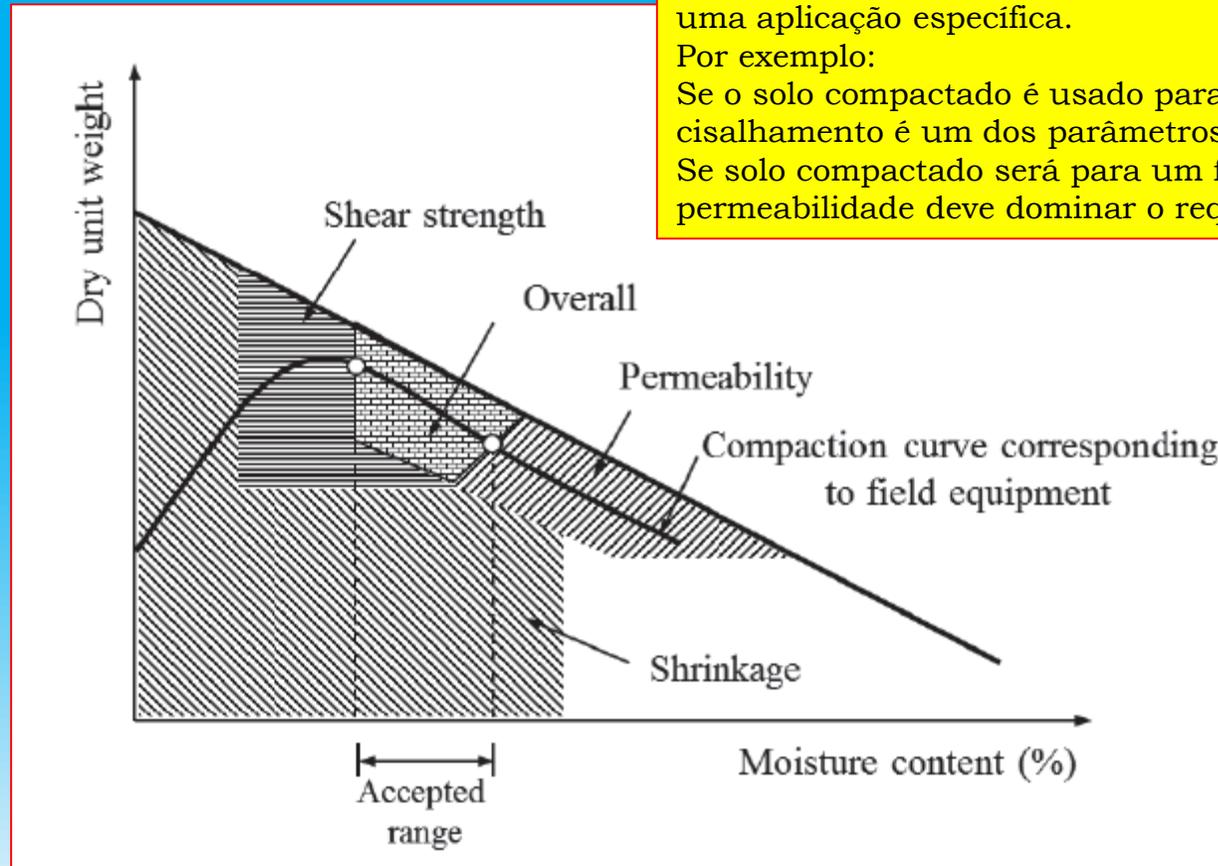
Table 3.3 Lift Thickness and Number of Passes for Different Compaction Equipment

Equipment Type	Applicability	Compacted Lift Thickness (mm)	Number of Passes
Sheepsfoot rollers	For fine-grained fills or coarse-grained fills with more than 20% fines	150	4–6 for fine-grained fills 6–8 for coarse-grained fills
Rubber tire roller	For clean, coarse-grained fills with 4–8% fines	250	3–5
	For fine-grained fills or well-graded coarse-grained fills with more than 8% fines	150–200	4–6
Smooth wheel rollers	Appropriate for subgrade or base course compaction of well-graded sand-gravel mixtures	200–300	4
	May be used for fine-grained fills other than earth dams	150–200	6
Vibrating sheepsfoot rollers	For coarse-grained fills and sand-gravel mixtures	200–300	3–5
			3–5
Vibrating smooth drum rollers	For coarse-grained fills and sand-gravel mixtures—rock fills	200–300 (soil) to 900 (rock)	4–6
Vibrating plate compactors	For coarse-grained fills with less than 4–8% fines, placed thoroughly wet	200–250	3–4
Crawler tractor	Best suited for coarse-grained fills with less than 4–8% fines, placed thoroughly wet	150–250	3–4
Power tamper or rammer	For difficult access, trench backfill. Suitable for all inorganic fills	100–150 for silt or clay, 150 for coarse-grained fills	2

Source: Modified from U.S. Navy (1986).

Controle de Compactação

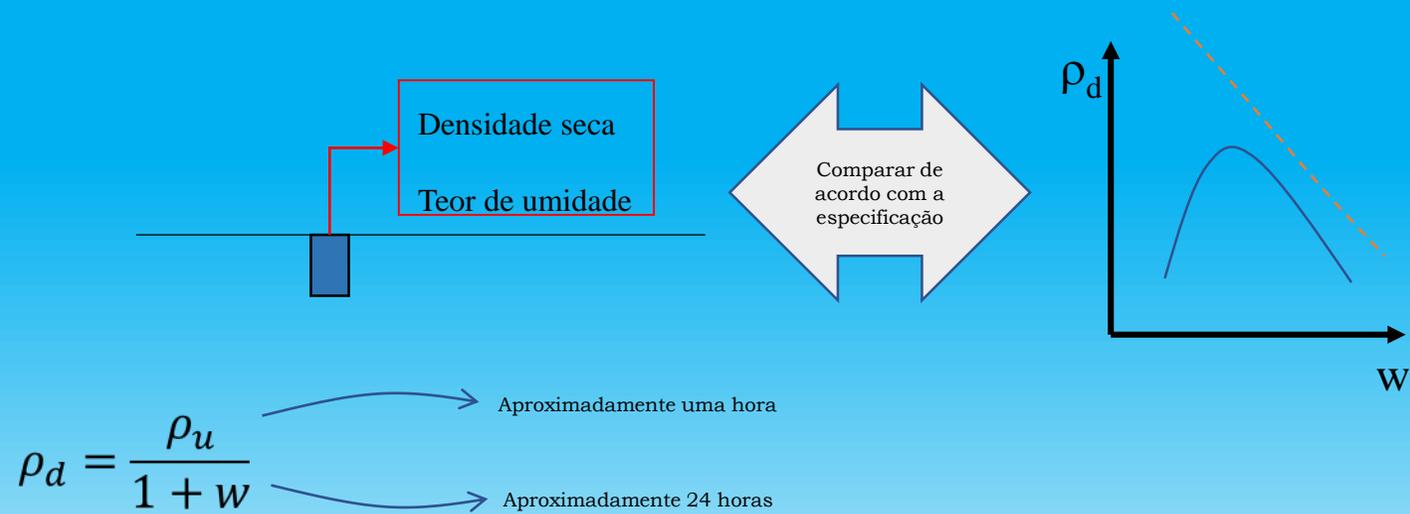
Zonas de aceitação do solo compactado em função da performance.



A compactação associada ao desempenho deve ser feita com base em uma aplicação específica.
Por exemplo:
Se o solo compactado é usado para taludes a resistência ao cisalhamento é um dos parâmetros mais importantes a ser considerado.
Se solo compactado será para um fundo de aterro sanitário a permeabilidade deve dominar o requisito de desempenho.

Controle de Compactação

O controle de compactação de solos coesivos não é apenas a determinação do teor de umidade e densidade seca do aterro. É necessária a comparação com os dados de compactação de laboratório



Controle indireto de compactação

Table 2 – List of the Operation Characteristics of the Devices

Features	NDG	SCS	Utility DCP	Geogauge	Clegg Hammer 10-Kg	Clegg Hammer 20-Kg	DCP	PANDA
Measurement	Wet & Dry Soil Density, Soil Moisture	Max. Attainable Compaction	Penetration (blow count)	Soil Stiffness & Young's Modules	Clegg Impact Value (IV)	Clegg Impact Value (IV)	Penetration (blow count)	Tip Resistance and Penetration
Moisture Readings	Yes , higher than oven-dried	No	No	No	No	No	No	No
Calibration of Device	Requires field calibration	Pre-set System	No	calibration plate	Factory calibrated	Factory calibrated	No	Factory calibrated
Portability ⁽¹⁾	Good	Good	Good	Good	Medium	Poor	Medium	Medium
Durability ⁽²⁾	Good	Box - Good Sensors – Fair	Good	Good	Poor	Poor	Good	Good
Standard Procedure	ASTM D-2922 ASTM D-3017	None	None	ASTM 6758	ASTM D-5874	ASTM D-5874	ASTM D-6951	(French Standard)
Operator skill	Licensed Technician	Worker	Worker	Worker	Worker	Worker	Worker	Technician
Ease of use- Training	Medium –Requires Training	Easy –Minimal training	Easy –Minimal training	Easy-Minimal training	Easy –Minimal training	Easy –Minimal training	Easy-Require data plotting	Medium- Extensive training
Initial Cost	About \$6,200	About \$1,650	About \$300	About \$5,300	About \$2,400	About 2,400	About \$900	About \$7,500

(1) Portability: Weight and ease of mobility on site

(2) Durability: The device ability to withstand daily use without damage or breakdown

Controle indireto de compactação

Table 6 - The Compaction Measuring Devices

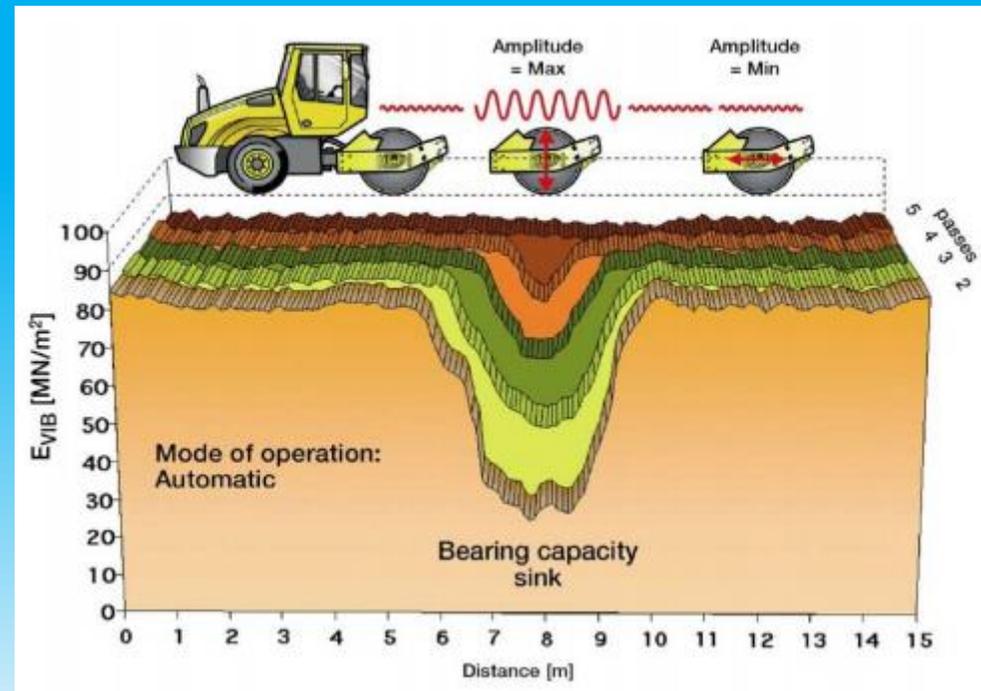
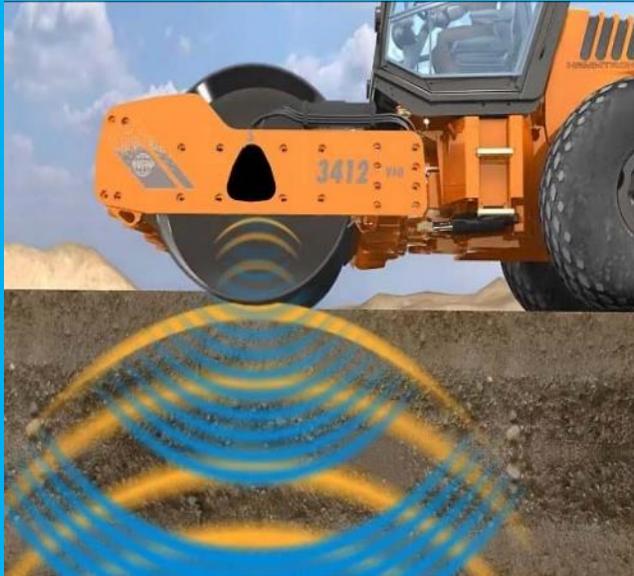
	Device	
1	Nuclear Density Gauge [NDG] [Troxler Model 3440]	
2	Sand-Cone Density Apparatus	
3	Soil Compaction Supervisor [SCS]	
4	Dynamic Cone Penetrometer [Utility DCP]	
5	Dynamic Cone Penetrometer [Standard DCP]	
6	Geogauge	
7	Clegg Hammers [10-kg & 20-kg Hammers]	
8	PANDA	

Light Drop-Weight tester



<http://tpj.com.my/hmp.html>

Controle de Compactação em Campo

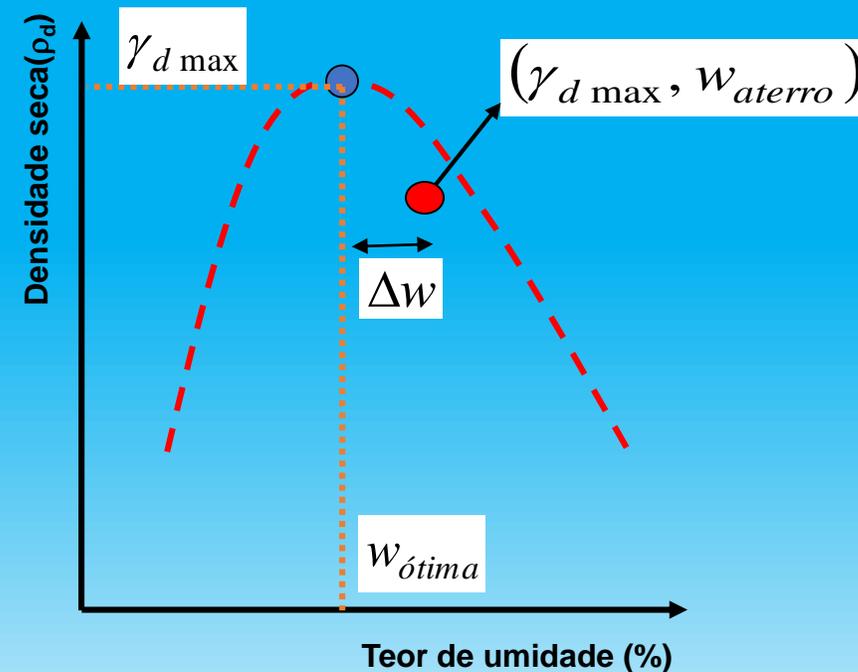


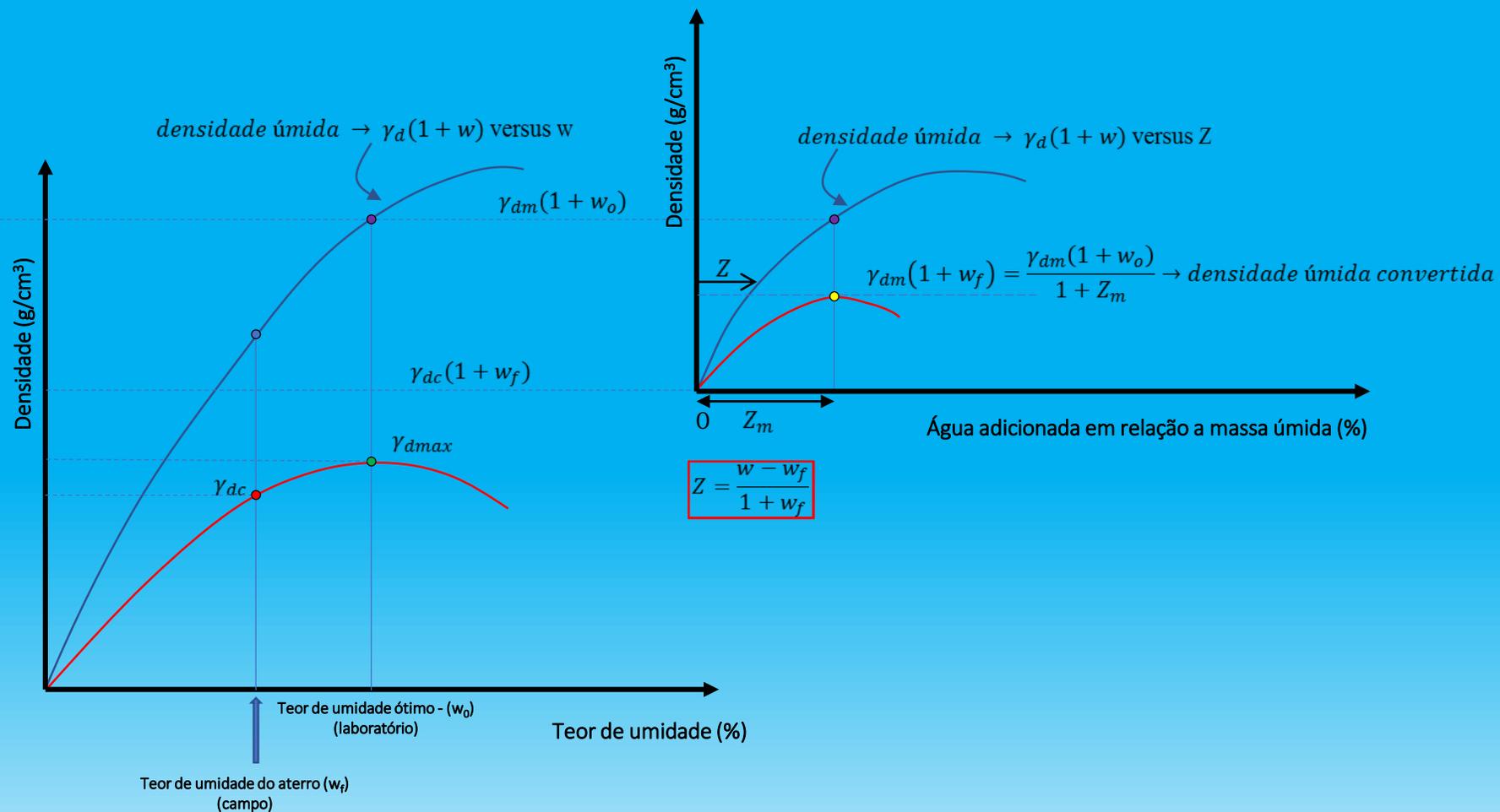
Objetivo do controle de compactação

- Evitar que uma camada inadequadamente compactada seja coberta por outra.

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

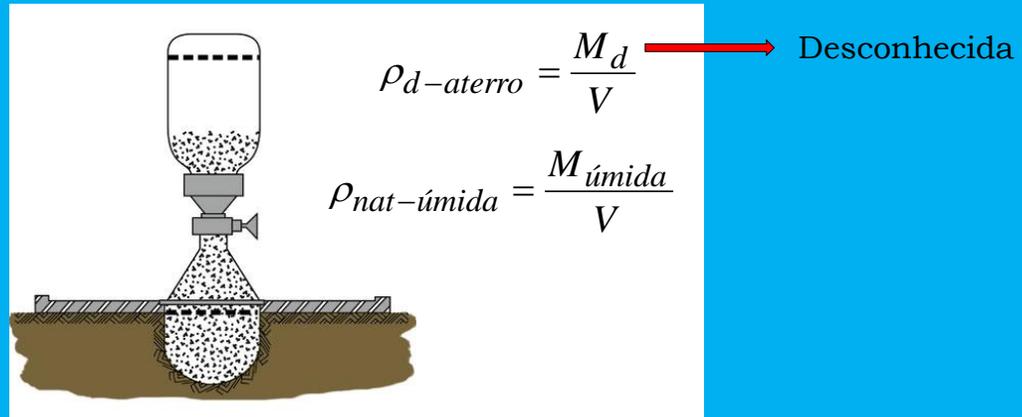
$$\Delta w = w_{\text{aterro}} - w_{\text{ótima}}$$





Determinação da densidade úmida no campo

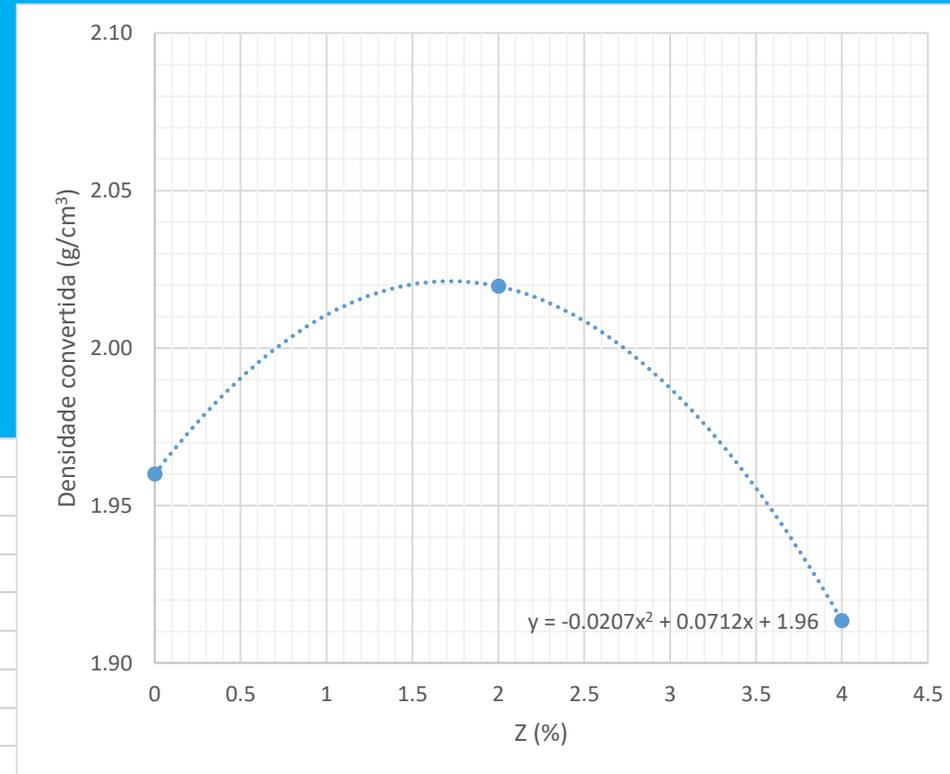
Método de Hilf



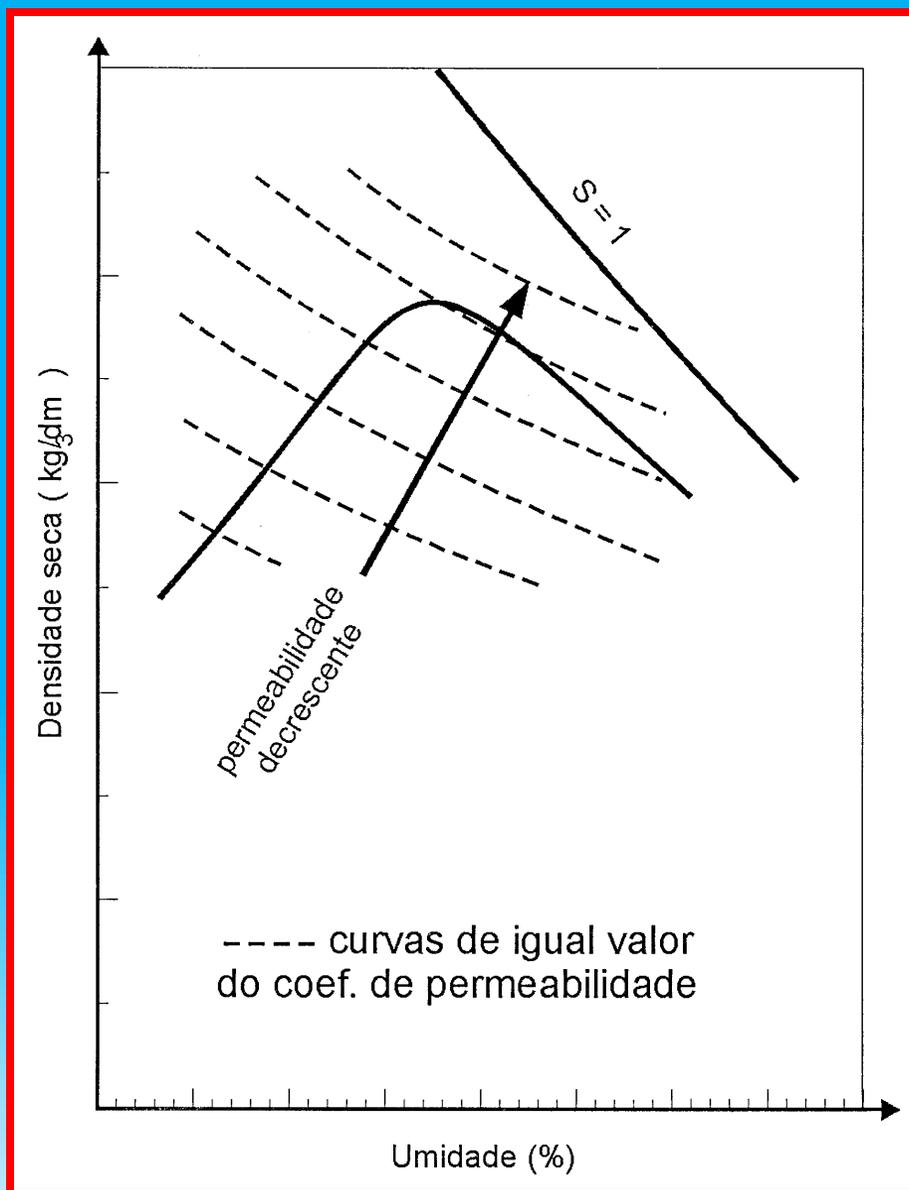
- Retirar amostra na região da determinação da densidade de campo
- Aproximadamente 3,5 kg por ponto
- Mínimo de três pontos

Método de Hilf

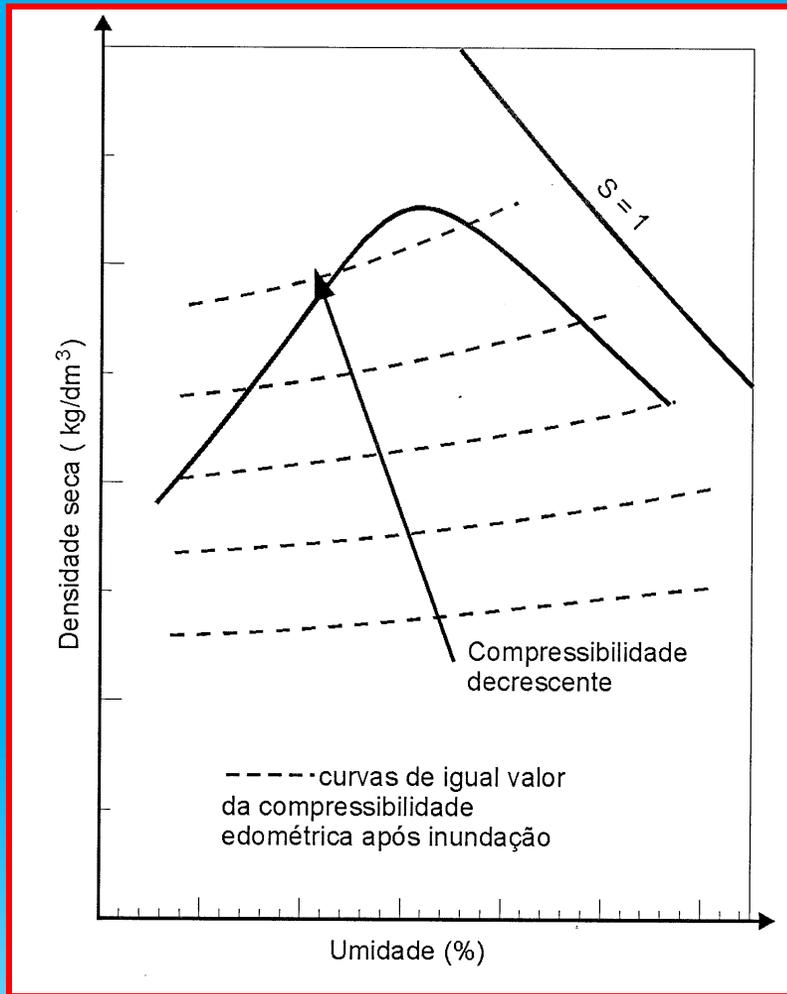
$\rho_{u-campo}$	2.04	g/cm^3	
Ponto	$\rho_{u-cilindro}$	Z	$\rho_{u-cilindro}/(1+Z)$
1	1.96	0	1.96
2	2.06	2	2.02
3	1.99	4	1.91
		a =	-0.0207
		b =	0.0712
		c =	1.96
		$Z_m =$	1.72 %
		$(\rho_{u-cilindro}/(1+Z_m)) =$	2.02 g/cm^3
		Grau de compactação =	101 %
		Umidade ótima estimada =	15 %
		$\Delta w =$	-1.9 %



Características Mecânicas, Hidráulicas e de Defomabilidade de Solos Compactados

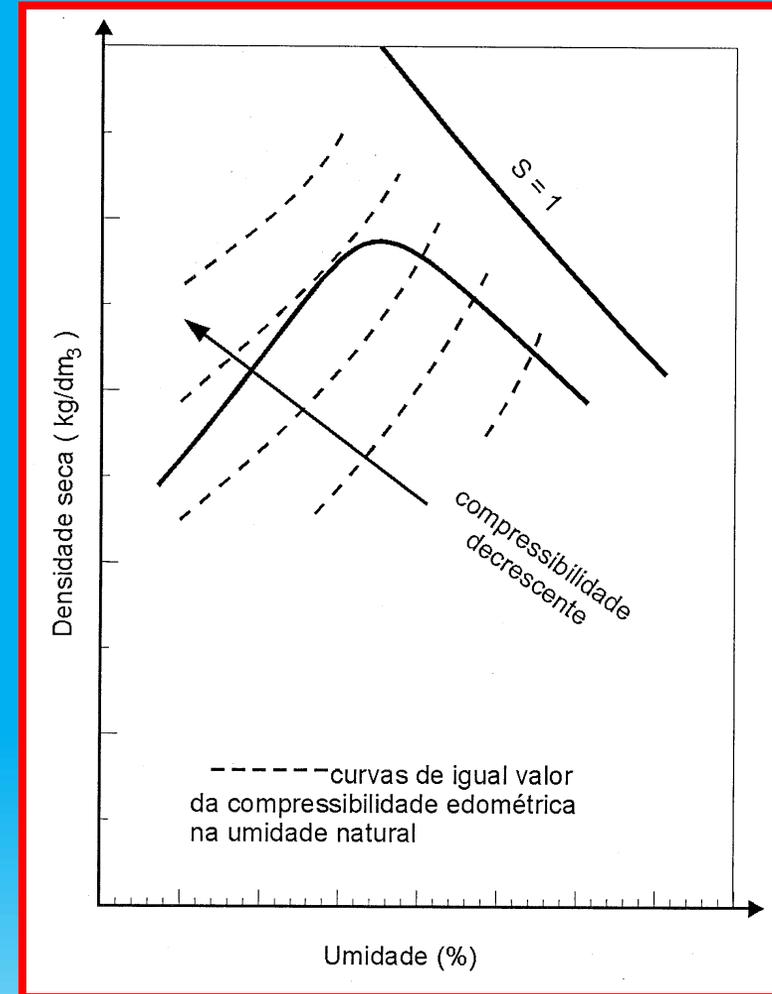


Variação do coeficiente de permeabilidade com a umidade e a densidade de compactação



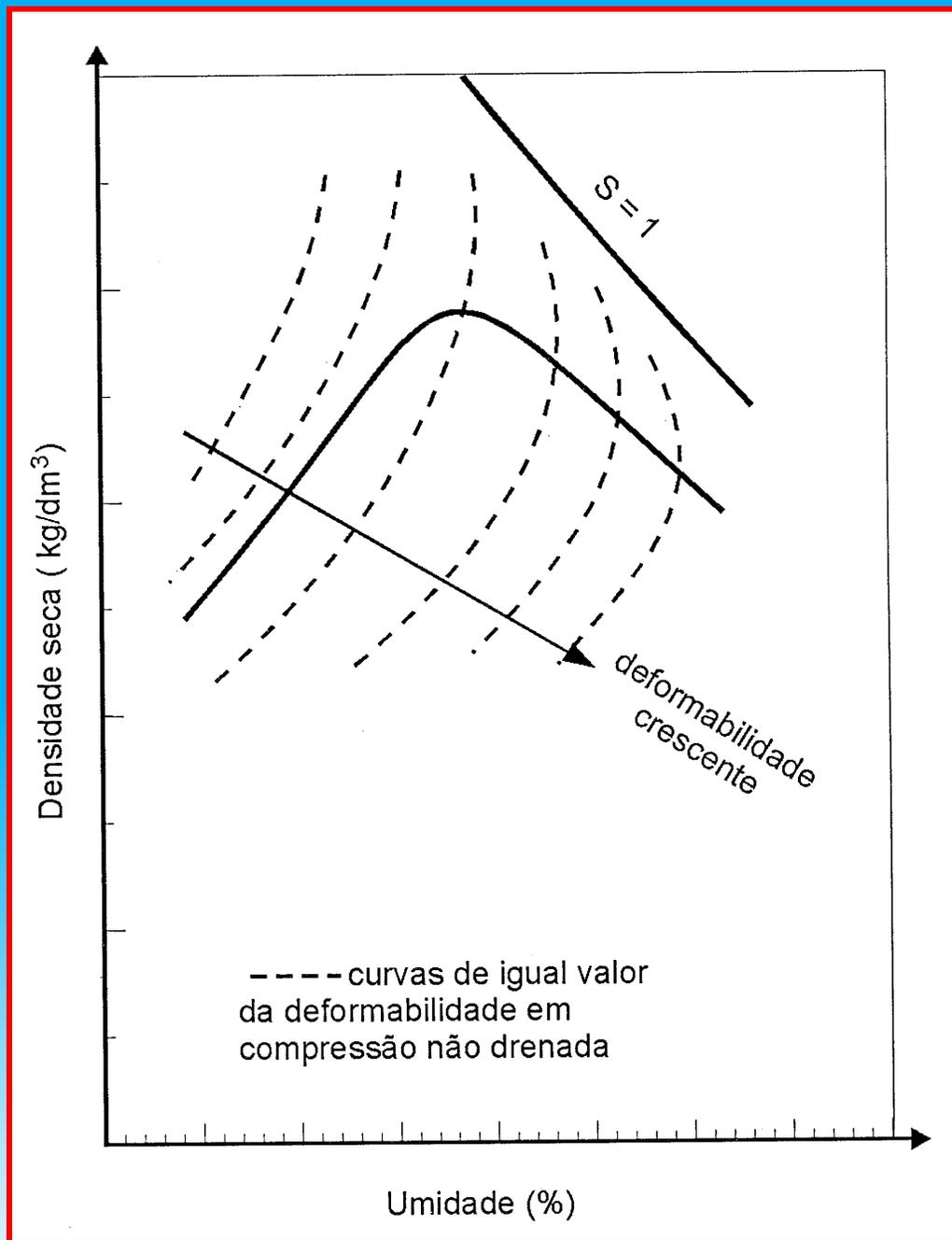
Sousa Pinto (2000)

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

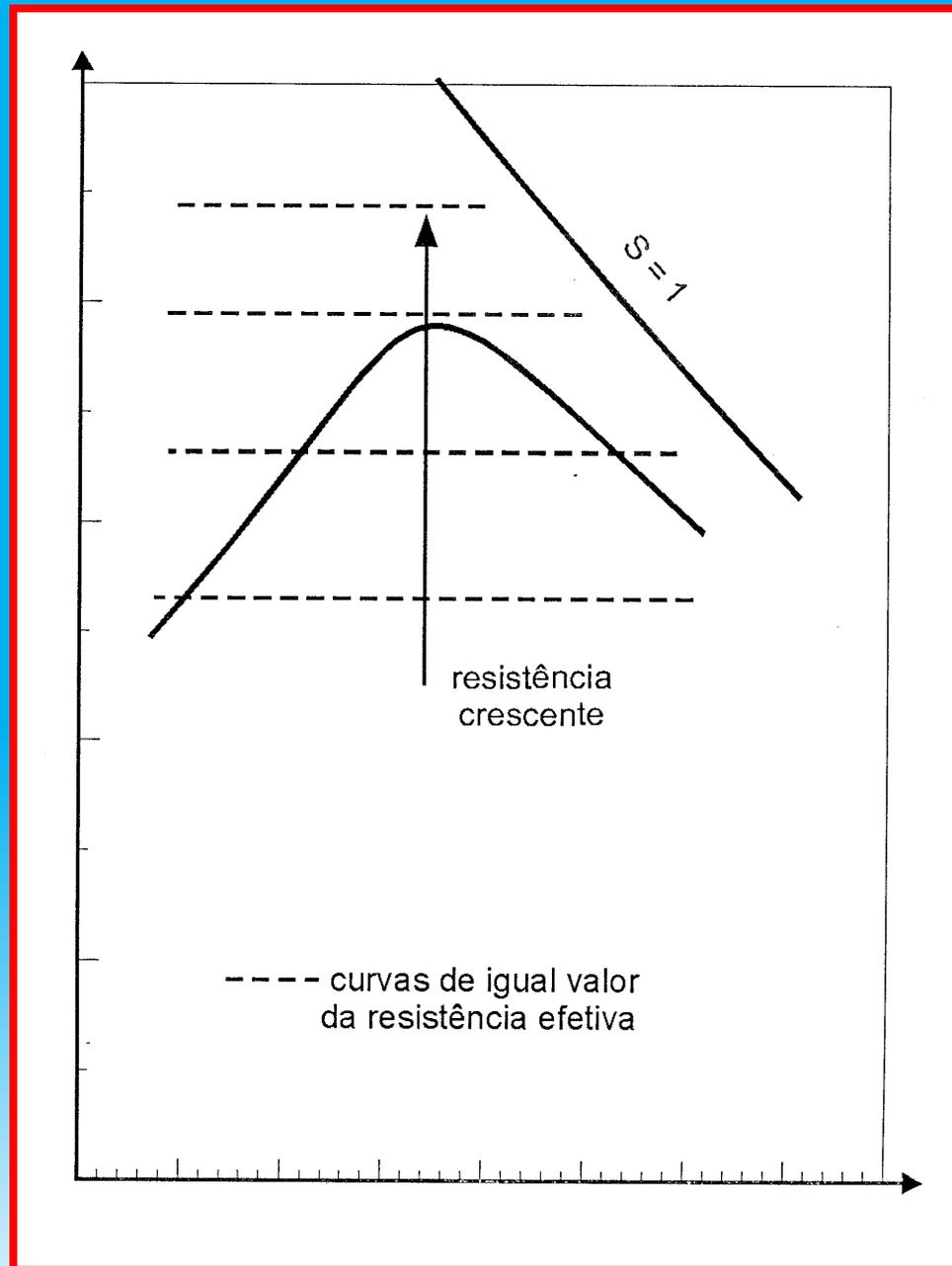


Sousa Pinto (2000)

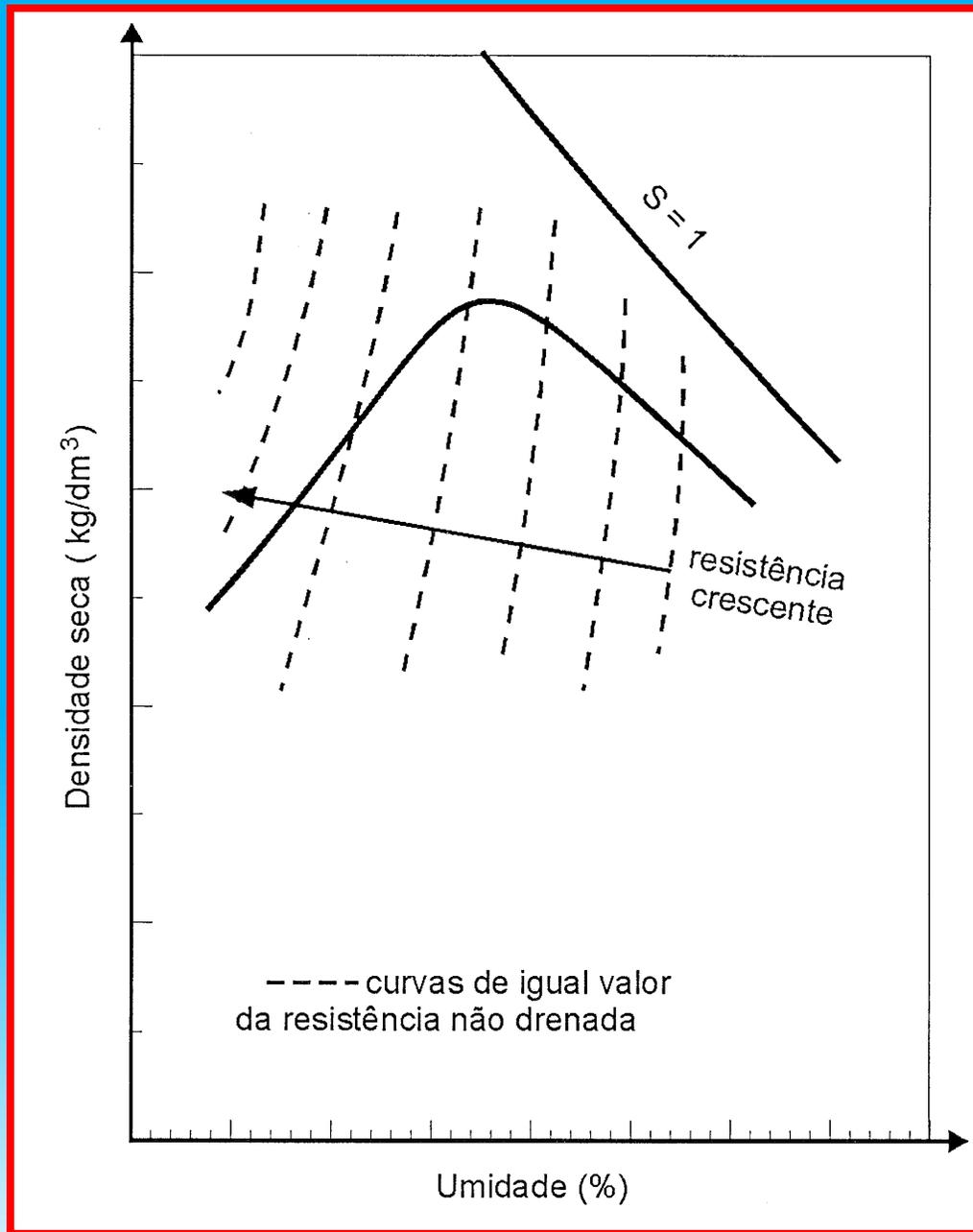
Variação da compressibilidade edométrica com a umidade e a densidade de compactação, com o solo na umidade de moldagem.



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

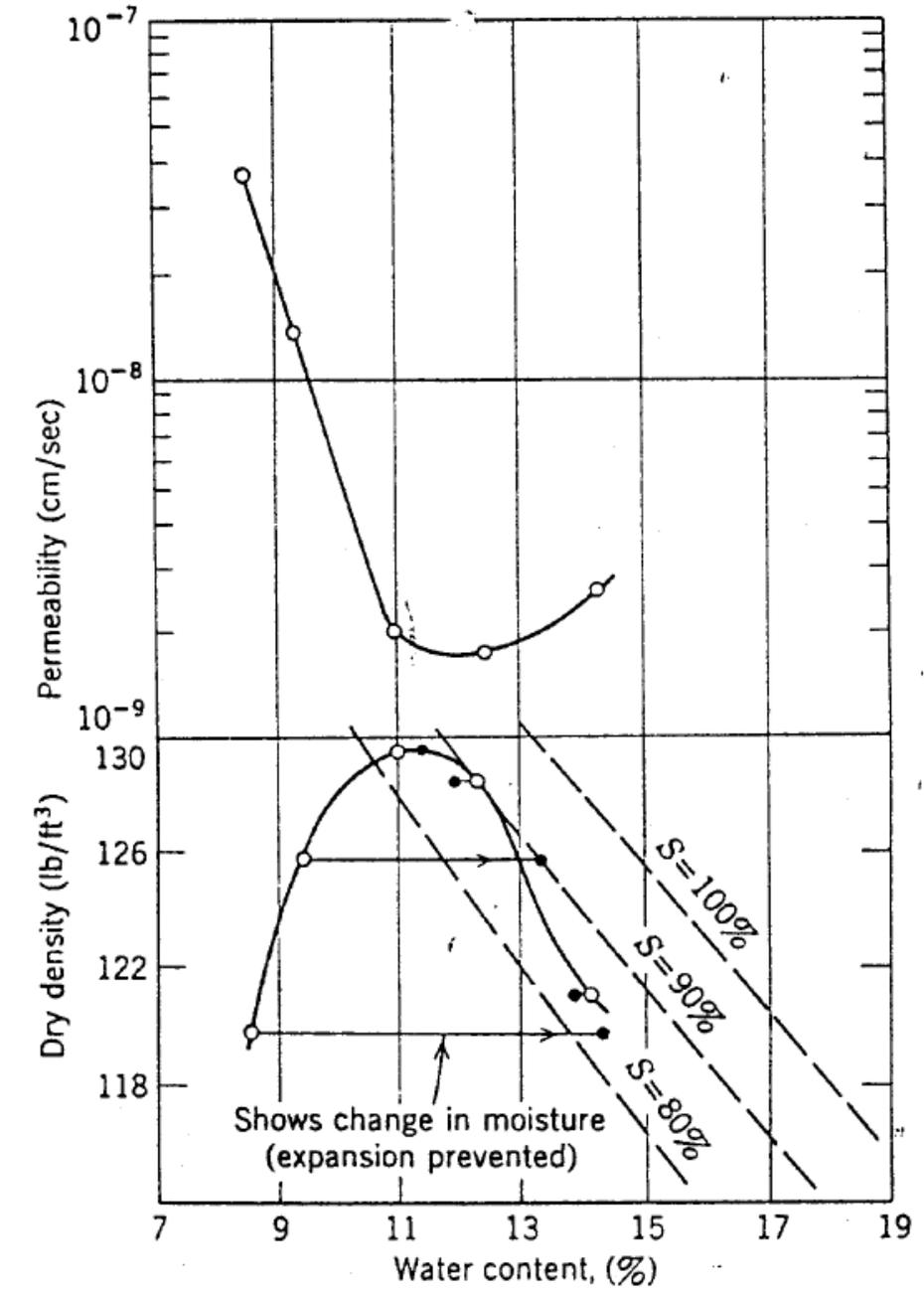


Varição da resistência em termos de tensão efetivas, com a umidade e a densidade de compactação.

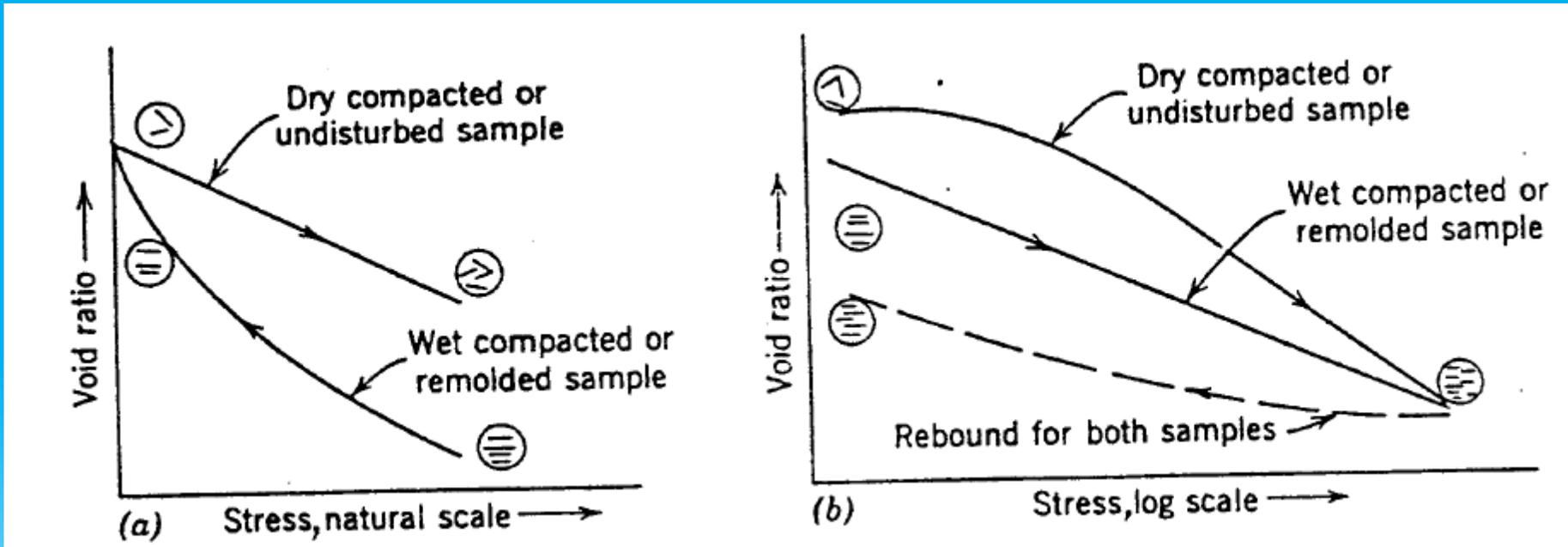


Varição da resistência em ensaios triaxiais não drenados com a umidade e a densidade de compactação.

Condutividade hidráulica saturada ao longo da curva de compactação

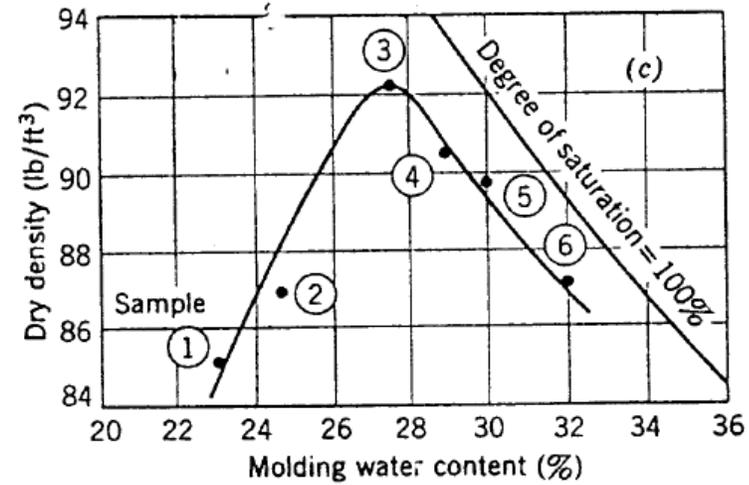
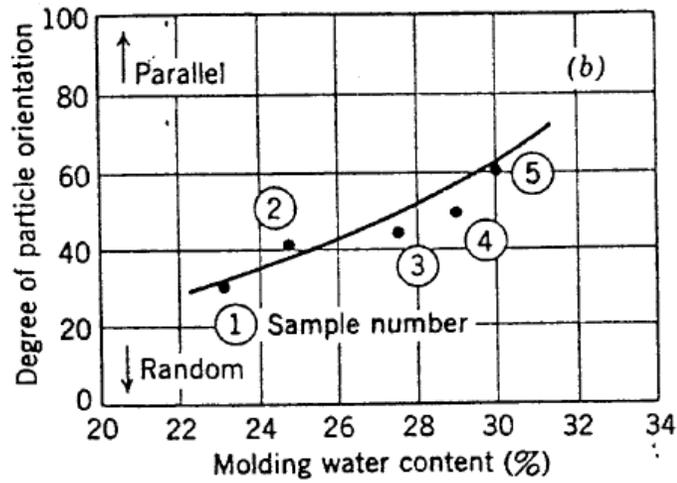
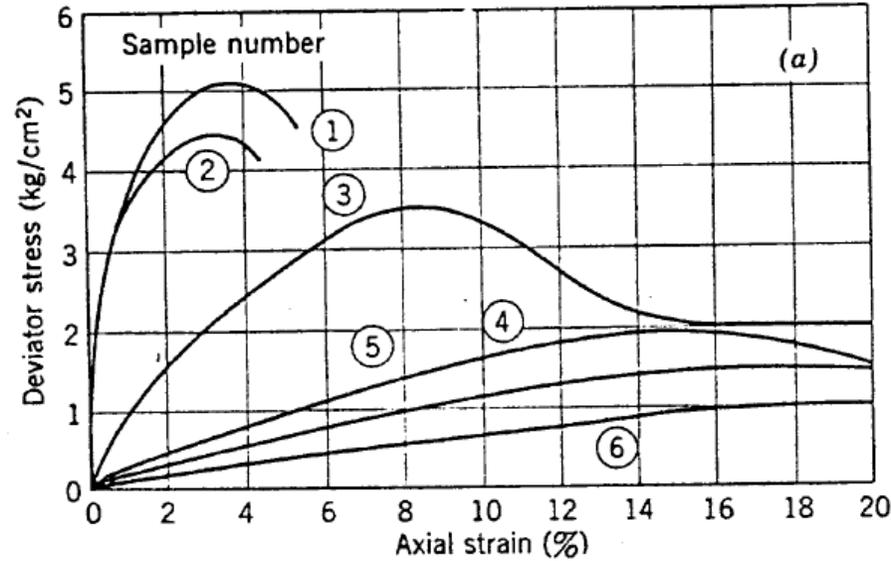


Efeito da compressão uni-dimensional na estrutura

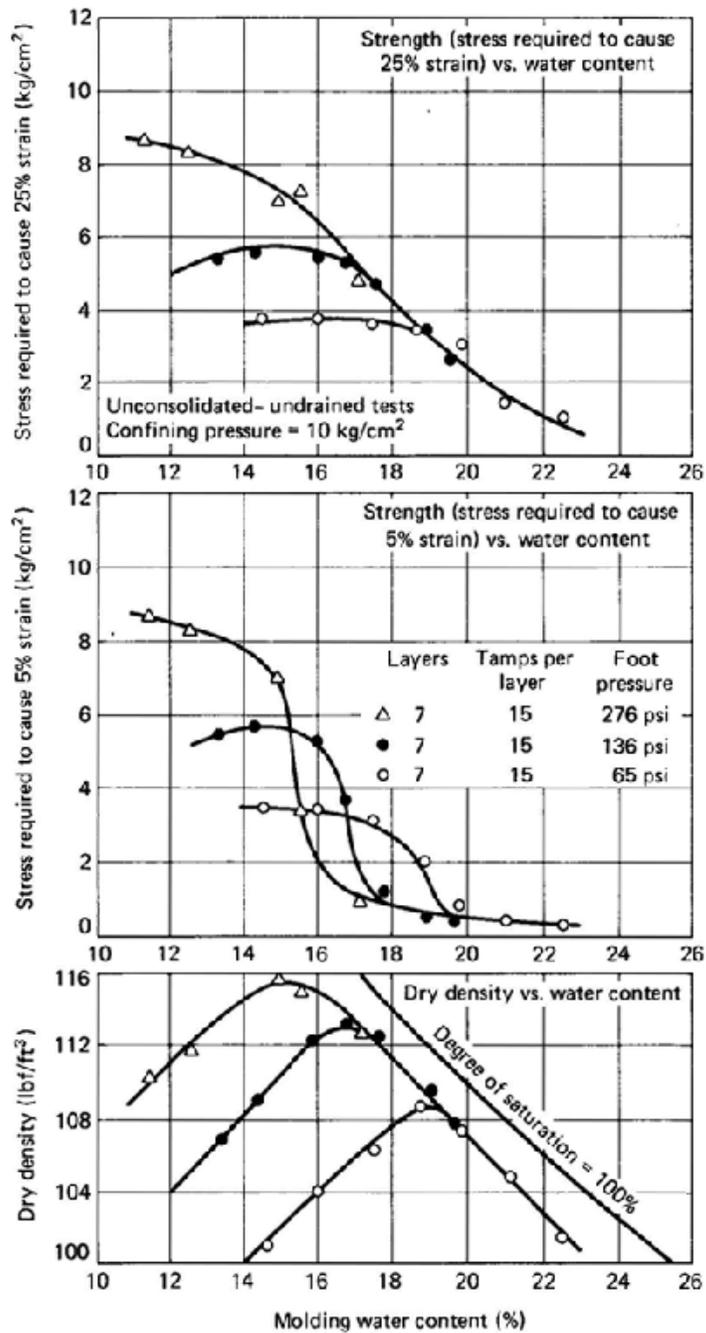


Lambe (1962)

Influência do teor de umidade de moldagem na estrutura e na relação tensão -deformação



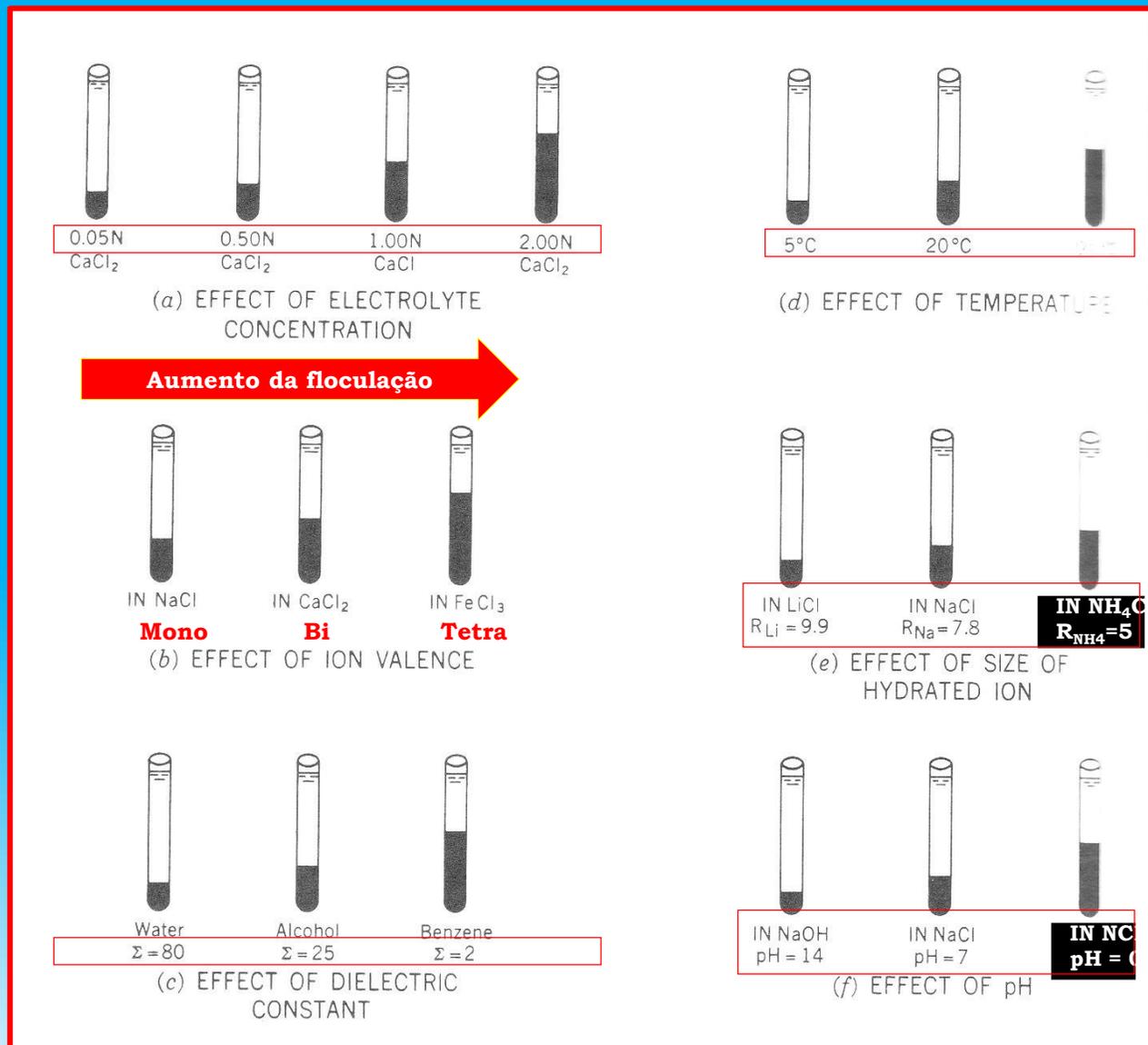
Rigidez em função da energia de compactação e teor de umidade (Holtz and Kovacs, 1981)



Estrutura dos Solos Compactados



Efeitos das Características do Sistema na Sedimentação



Afetam a estabilidade coloidal:

- Concentração eletrolítica
- Valência iônica
- Constante dielétrica
- Temperatura
- Tamanho do ion hidratado
- pH
- Adsorção de anions

Causam Floculação

Aumento de:

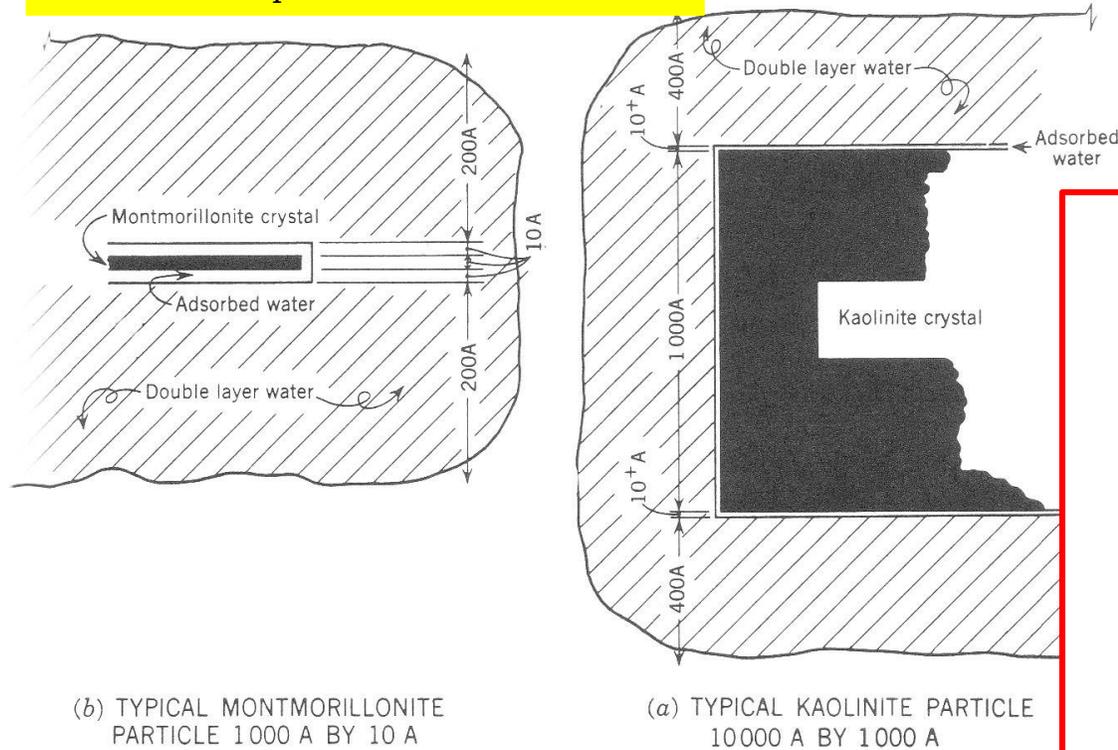
- Concentração eletrolítica
- Valência iônica
- Temperatura

Decréscimo de:

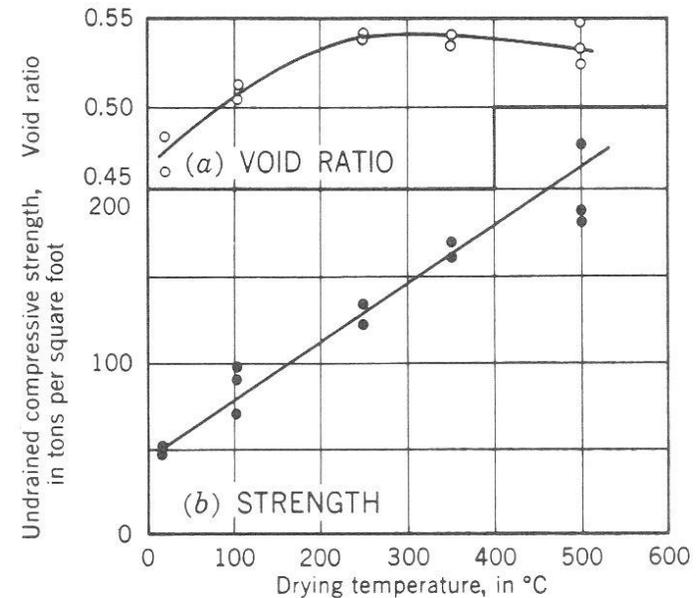
- Constante dielétrica
- Tamanho do ion hidratado
- pH
- Adsorção de ion

A Água das Argilas

Toda a água dos poros das argilas está dentro da camada dupla, para condições usuais de campo.



Lambe (1958)



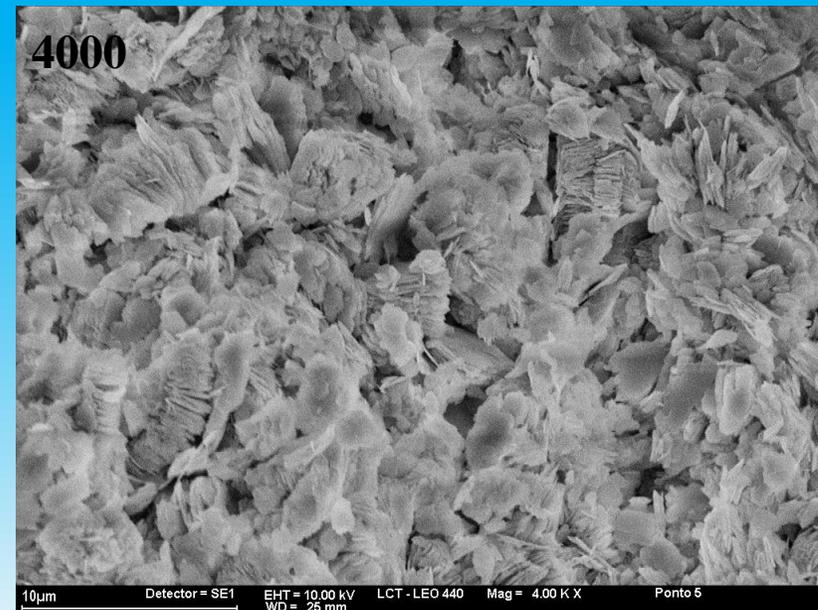
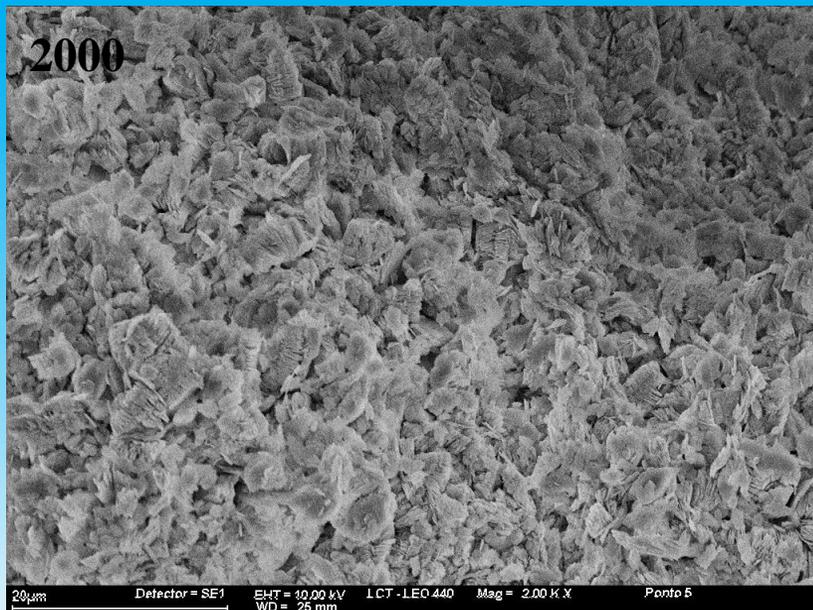
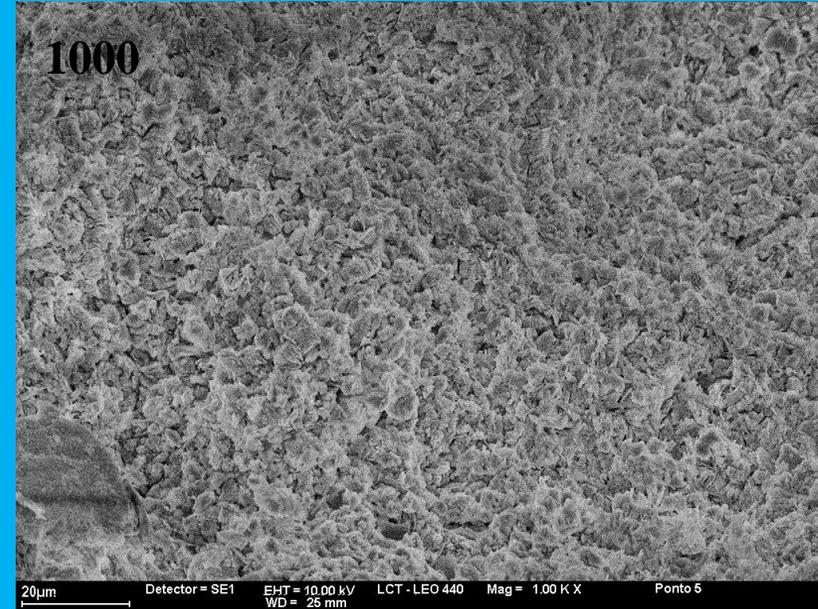
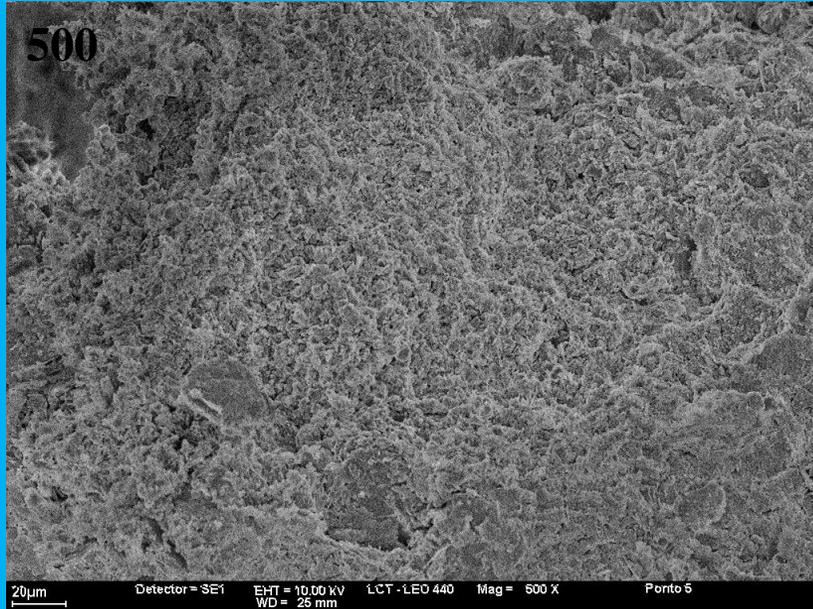
Estes dados mostram que a remoção de água a partir de um determinado nível não causa variação de volume, mas continua induzindo aumento de resistência da argila.

Isto sugere que:

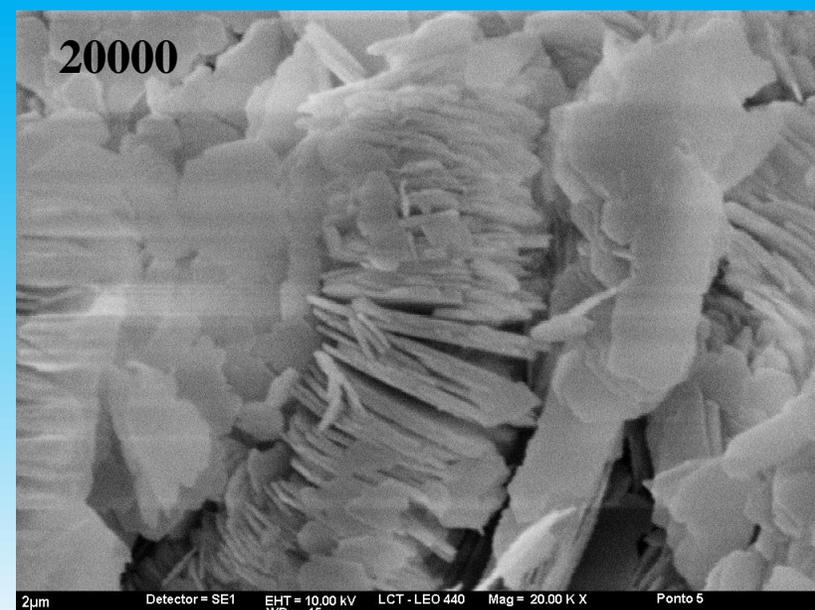
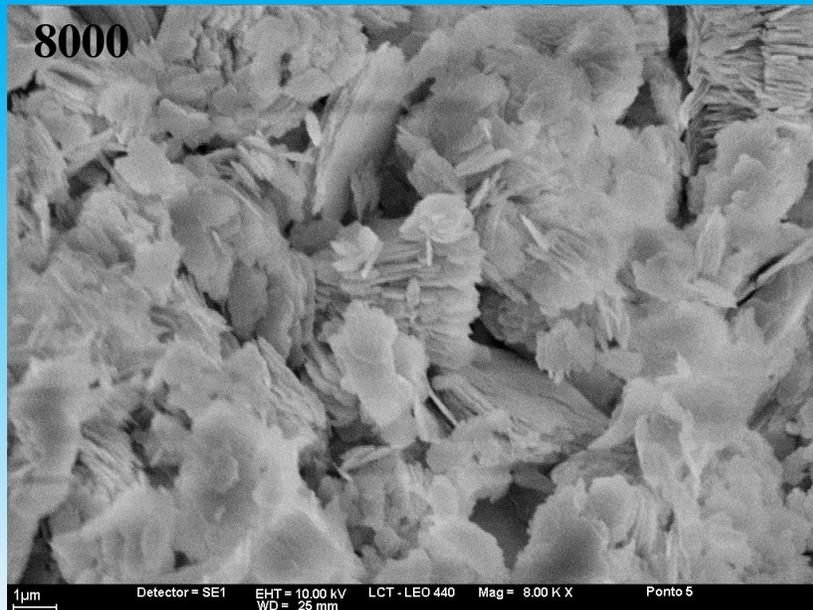
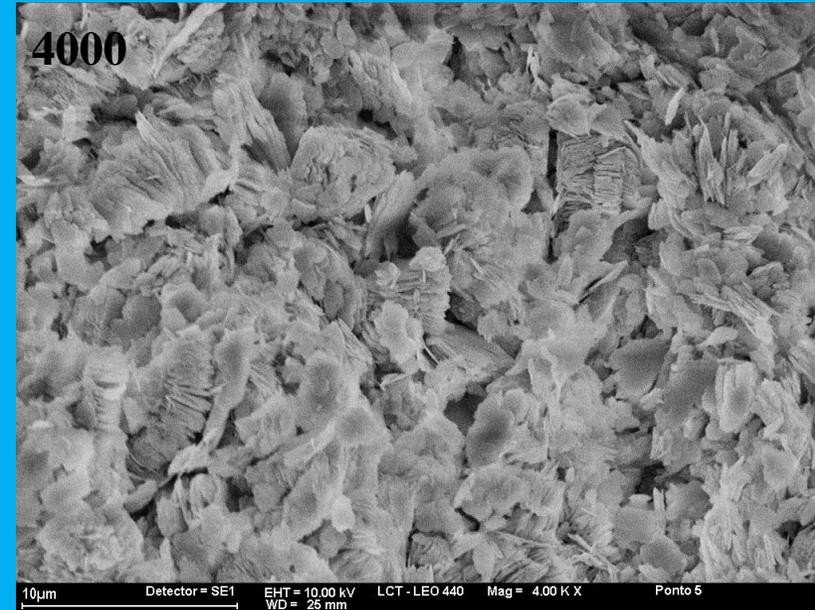
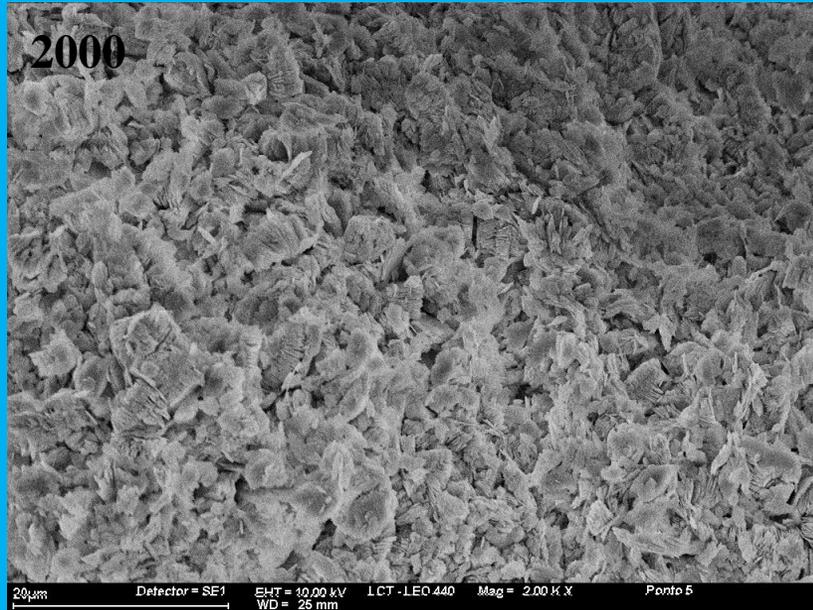
Não há água entre as partículas.

A água não é responsável pela coesão em argilas secas.

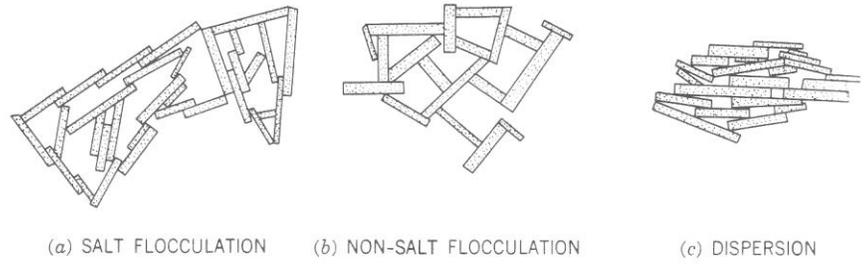
Solo Residual de Gnaise - compactado



Solo Residual de Gnaise - compactado

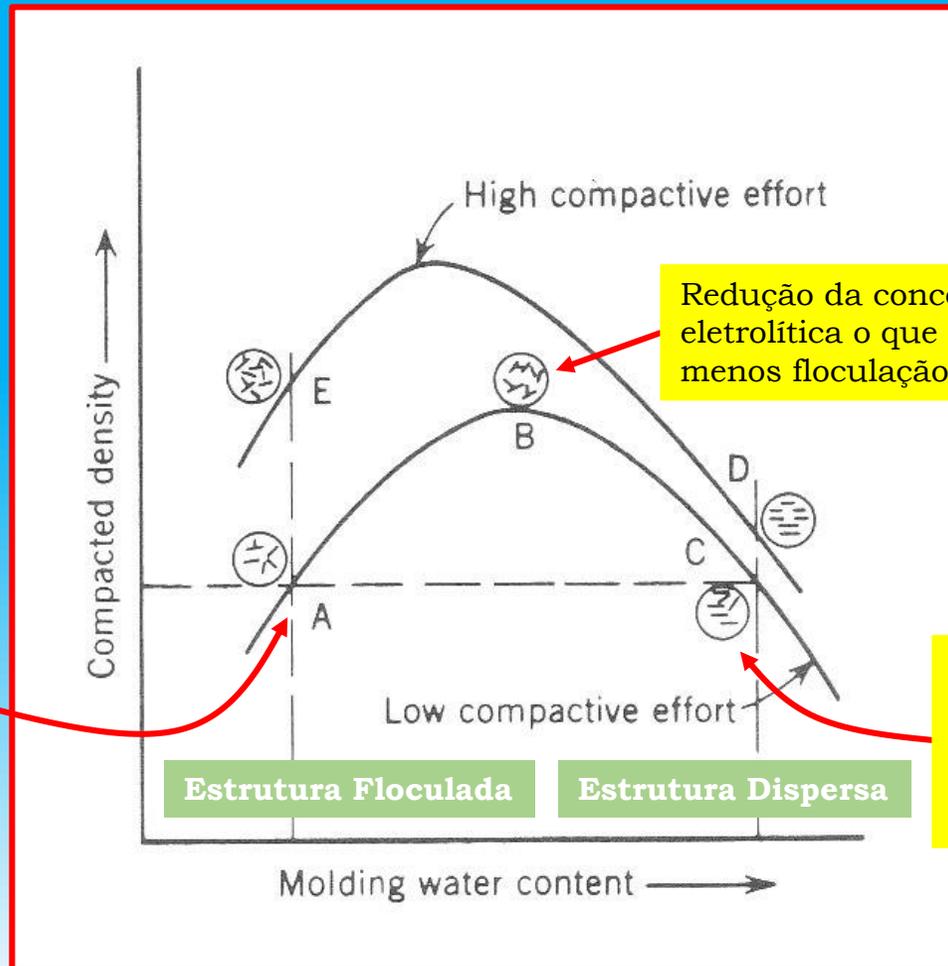


Estruturas de Sedimentos



Lambe (1958)

Efeito da compactação na estrutura dos solos



Elevada concentração eletrolítica o que leva a floculação

Redução da concentração eletrolítica o que leva a menos floculação

Redução ainda maior da concentração eletrolítica o que leva a menos floculação. Orientação das partículas

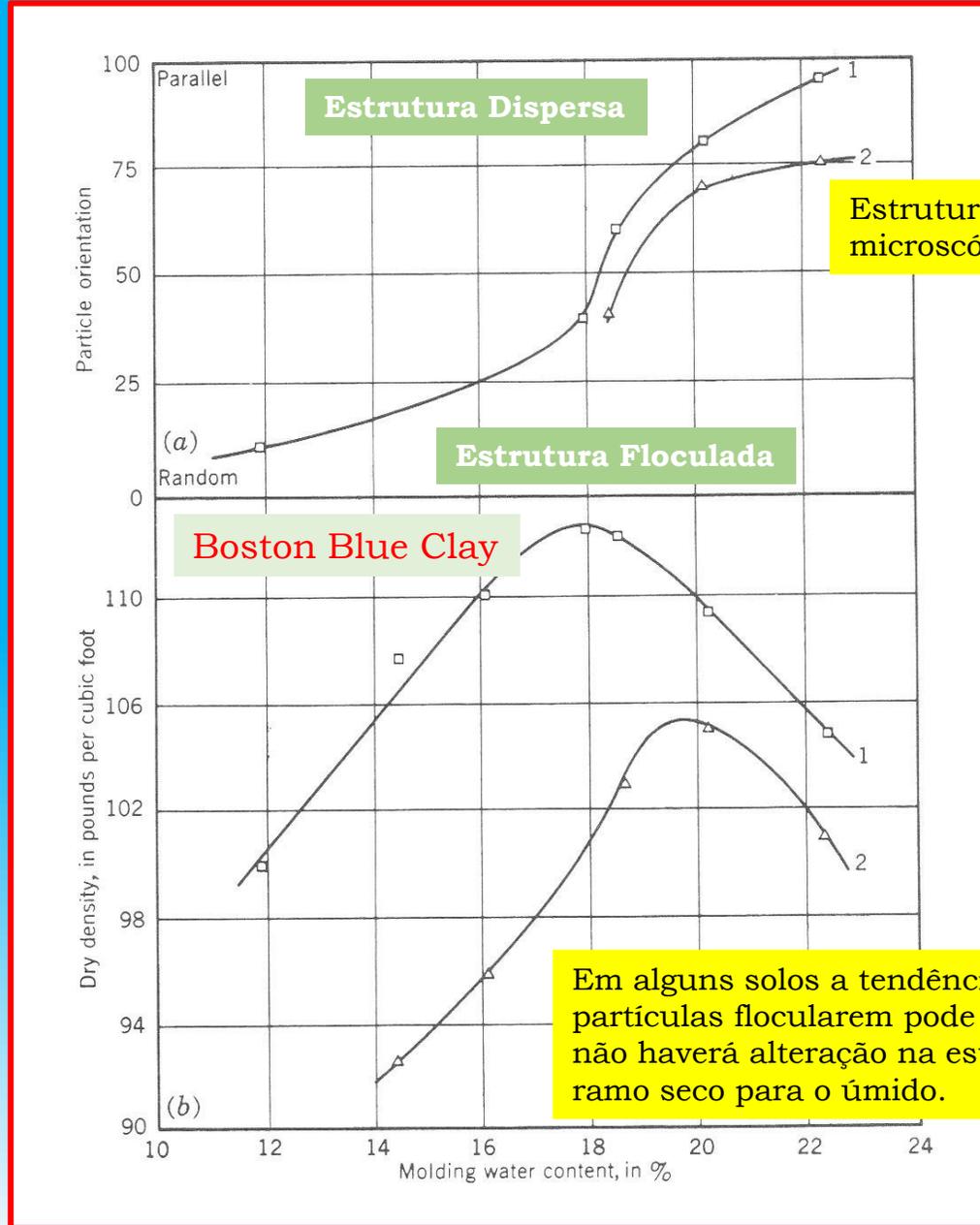
Lambe (1960)

Influência do Teor de Umidade de Moldagem na Orientação das Partículas de Solo

Compactado usando o compactador miniatura Harvard



Seed and Chan (1959)



Estrutura Dispersa

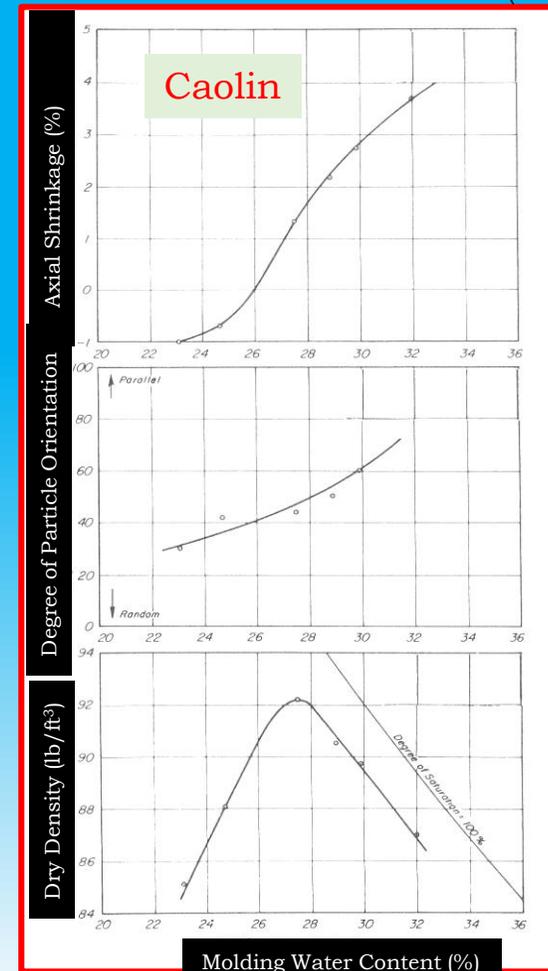
Estrutura identificada por microscópio

Estrutura Floculada

Boston Blue Clay

Em alguns solos a tendência das partículas flocularem pode ser elevada e não haverá alteração na estrutura indo do ramo seco para o úmido.

Pacey (1956)



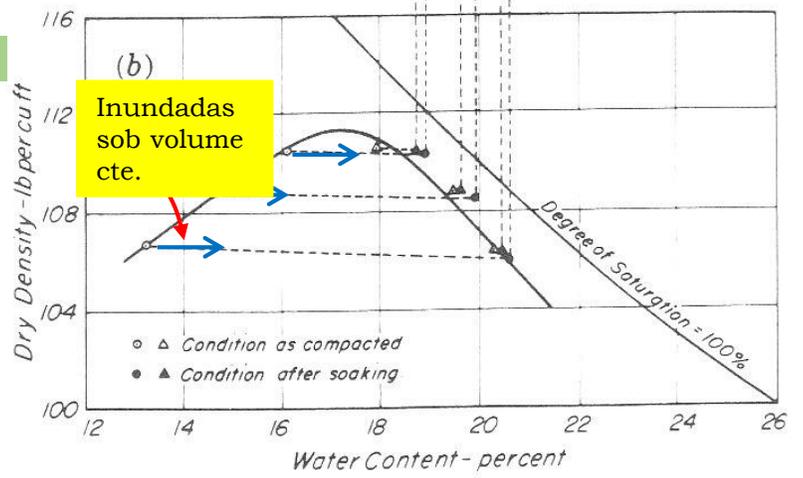
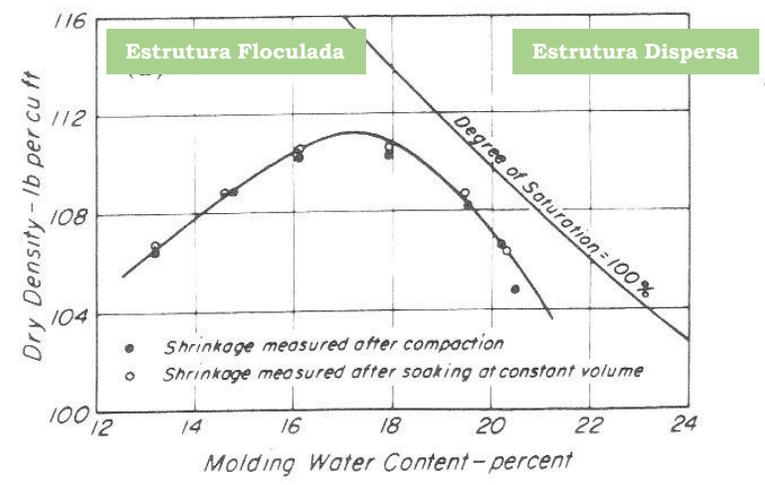
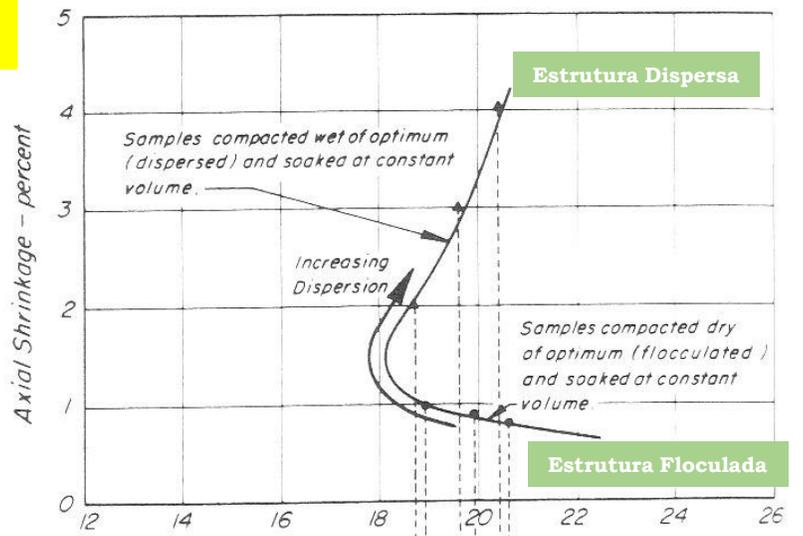
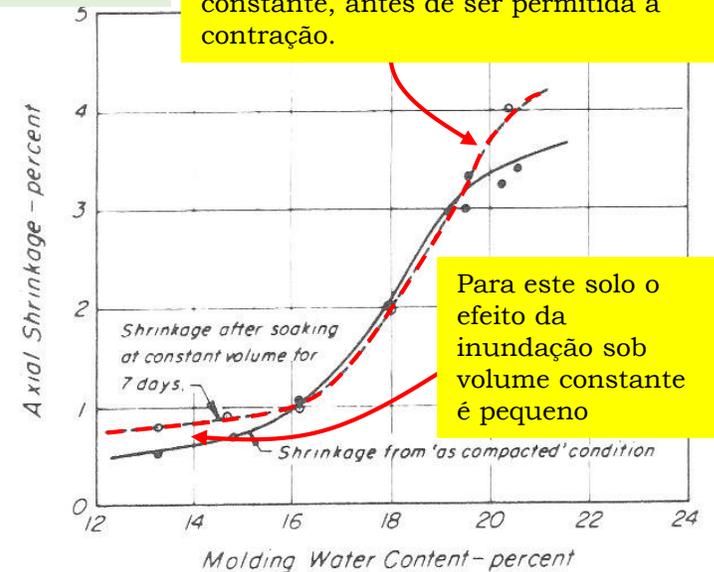
Molding Water Content (%)

Influência da Estrutura na Contração dos Solos

A influência da estrutura na contração só pode ser avaliada se as amostras compactadas no ramo seco forem submetidas à inundação sob volume constante, antes de ser permitida a contração.

Amostras compactadas no ramo seco contraem menos

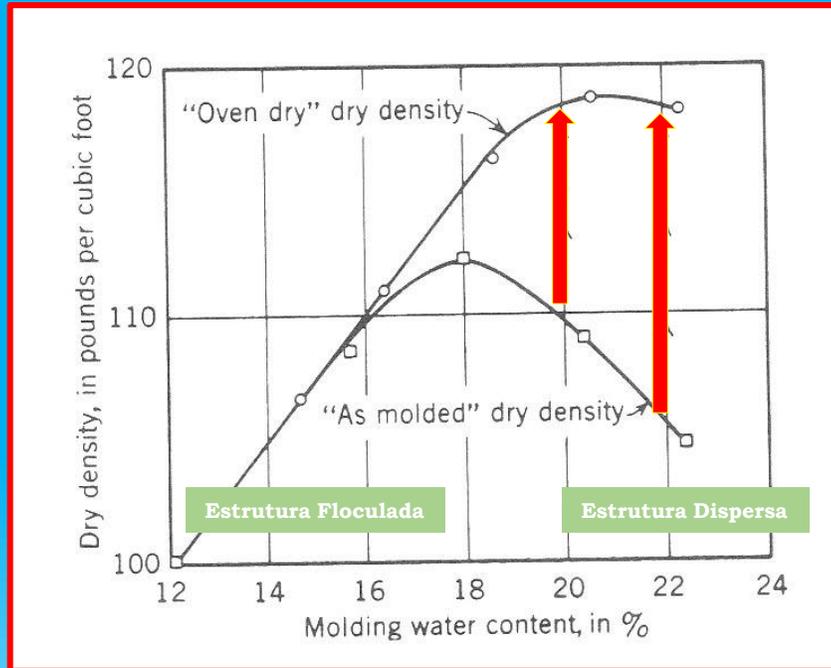
Argila Siltosa



Contração e a Estrutura da Argila

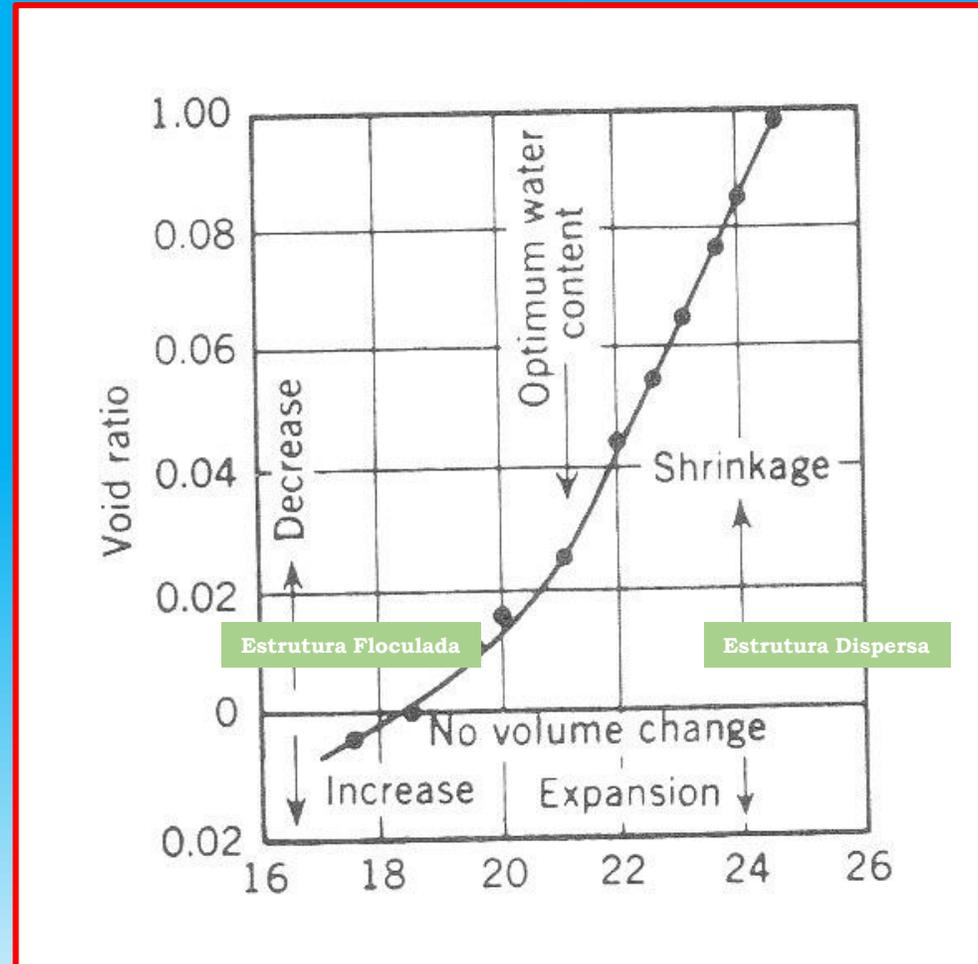
Argila de Boston

Contração e densidade



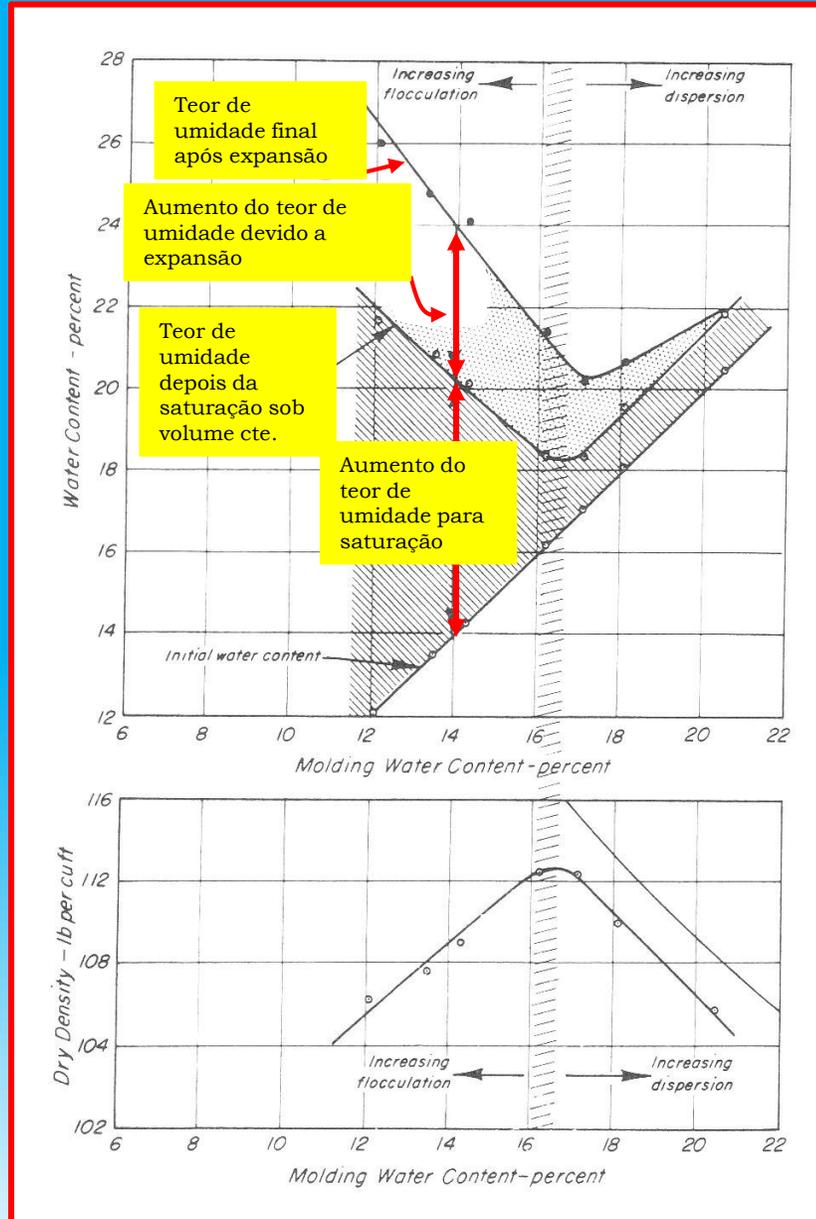
Lambe (1960)

Variação de volume quando seco em estufa



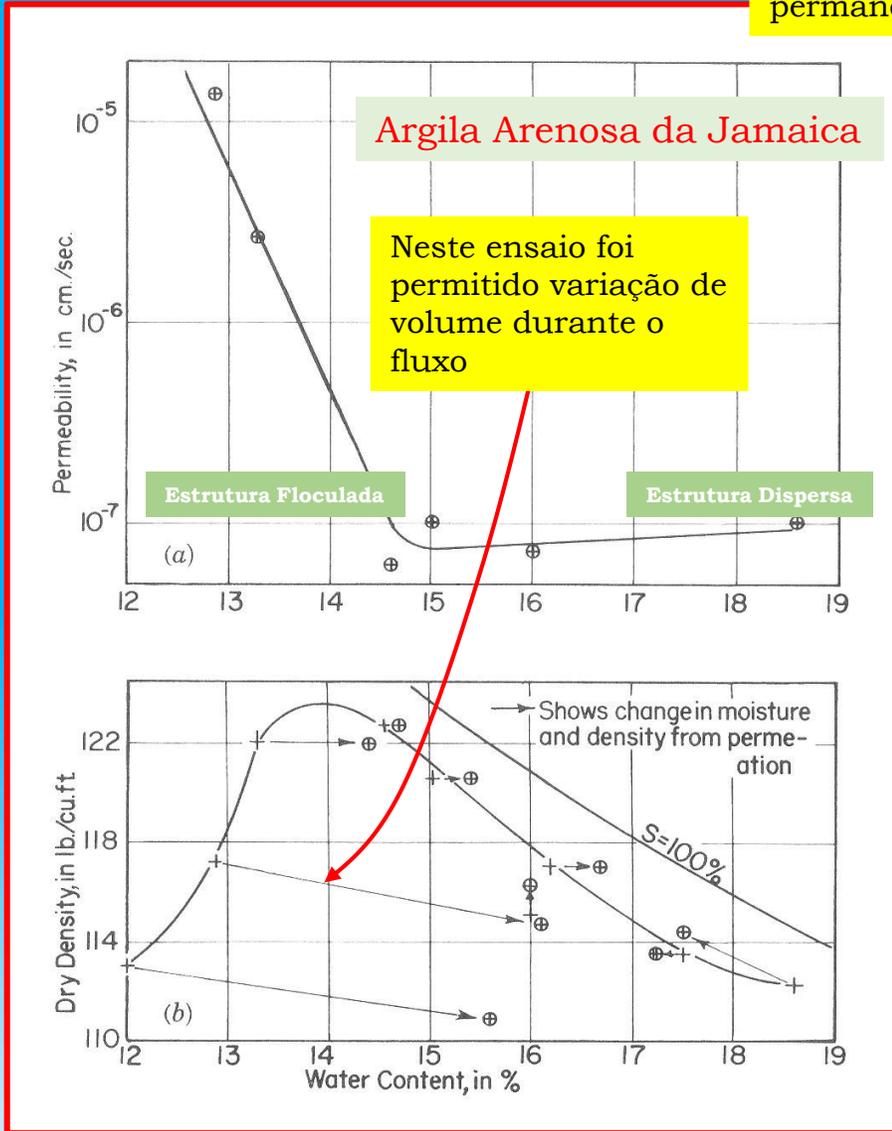
Lambe (1960)

Expansão - Teor de Umidade e Estrutura

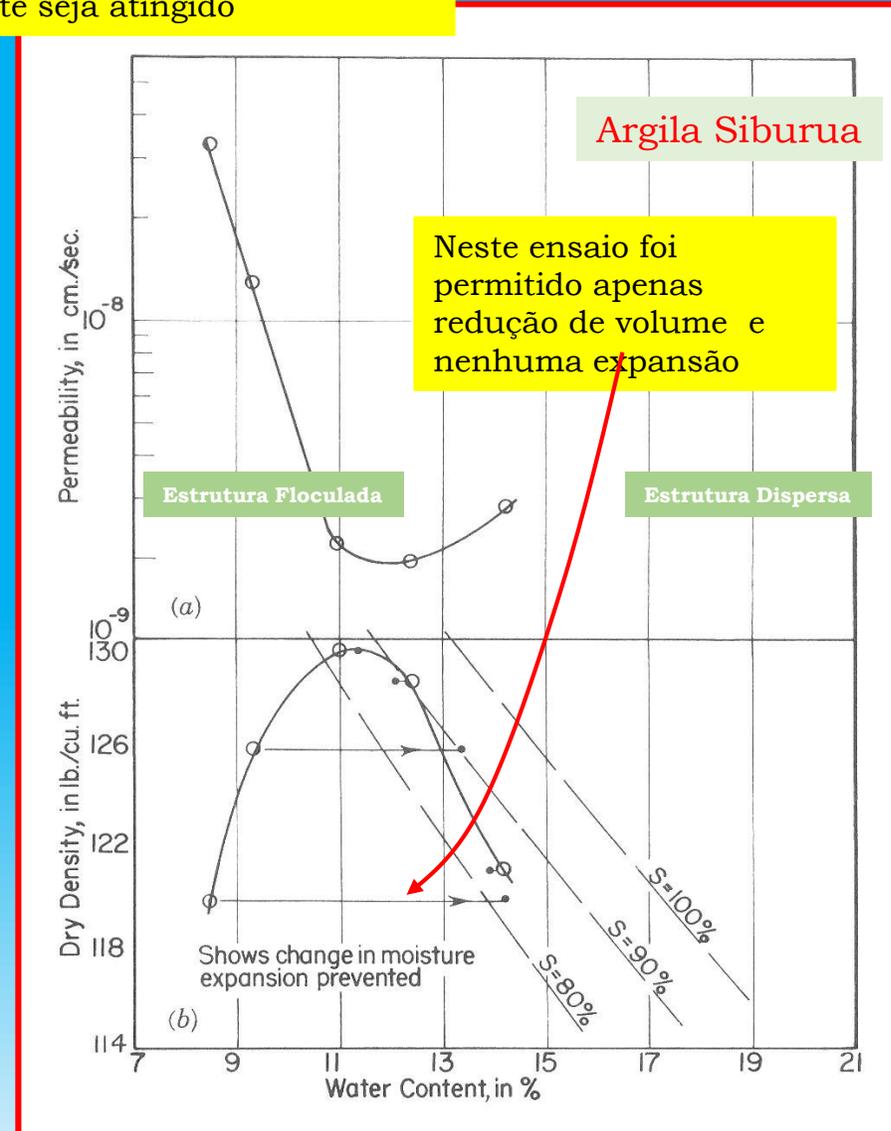


Efeito da Estrutura na Condutividade Hidráulica

Espécimes compactadas e submetidas a fluxo até que regime permanente seja atingido

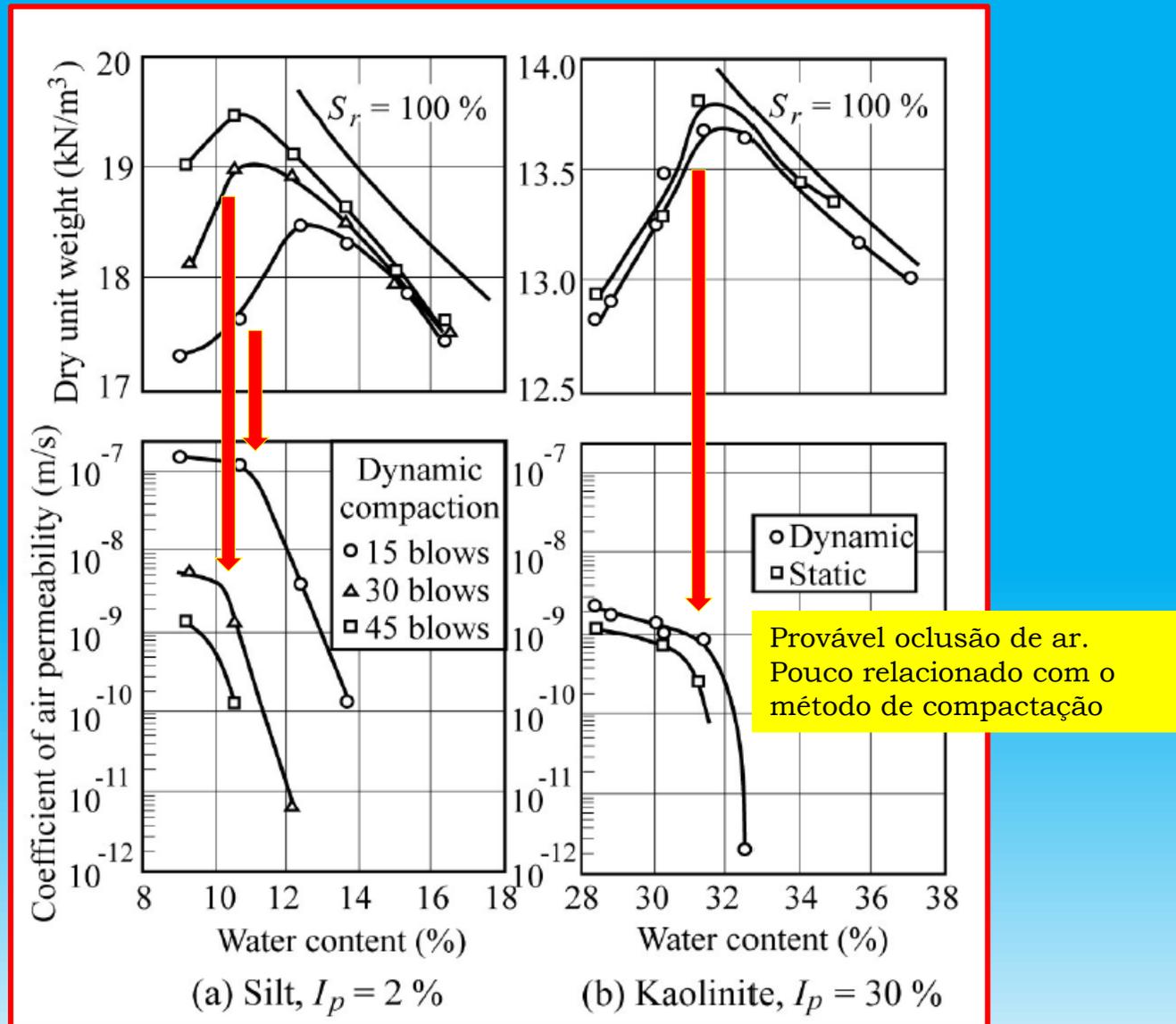


Lambe (1958)



Lambe (1958)

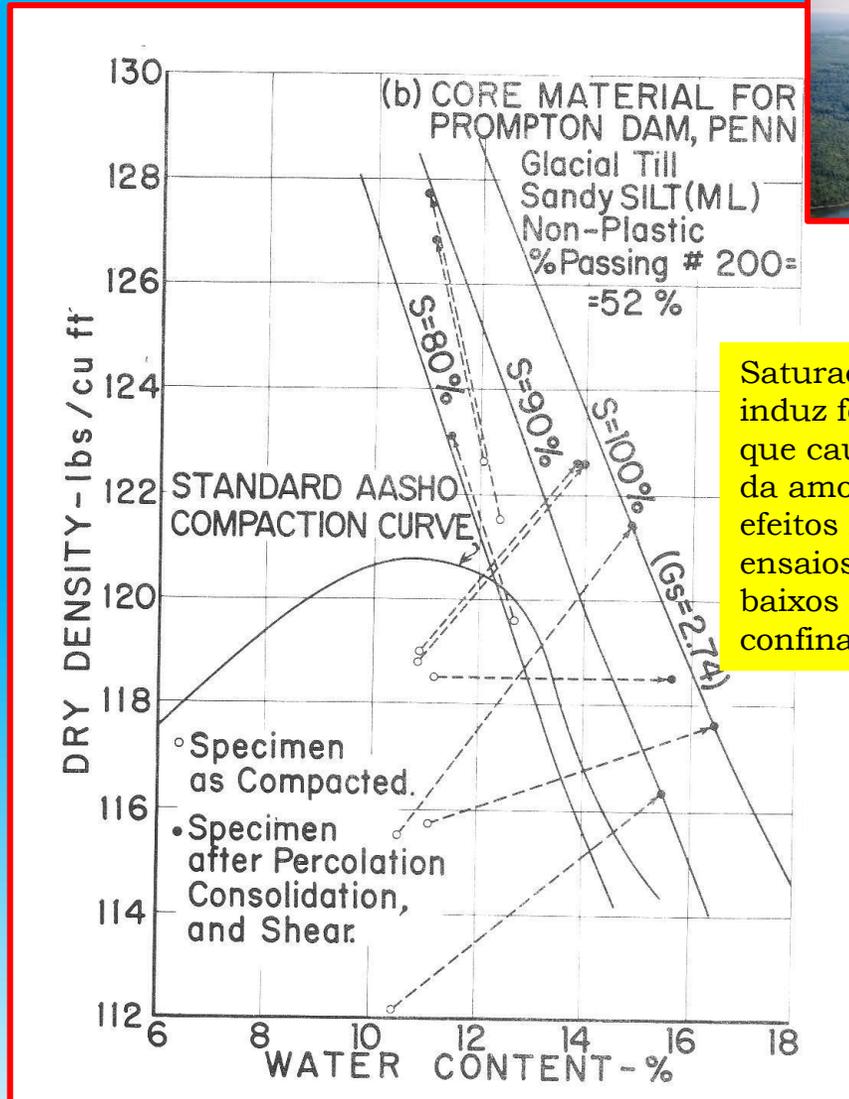
Efeitos da Compactação na Permeabilidade ao Ar



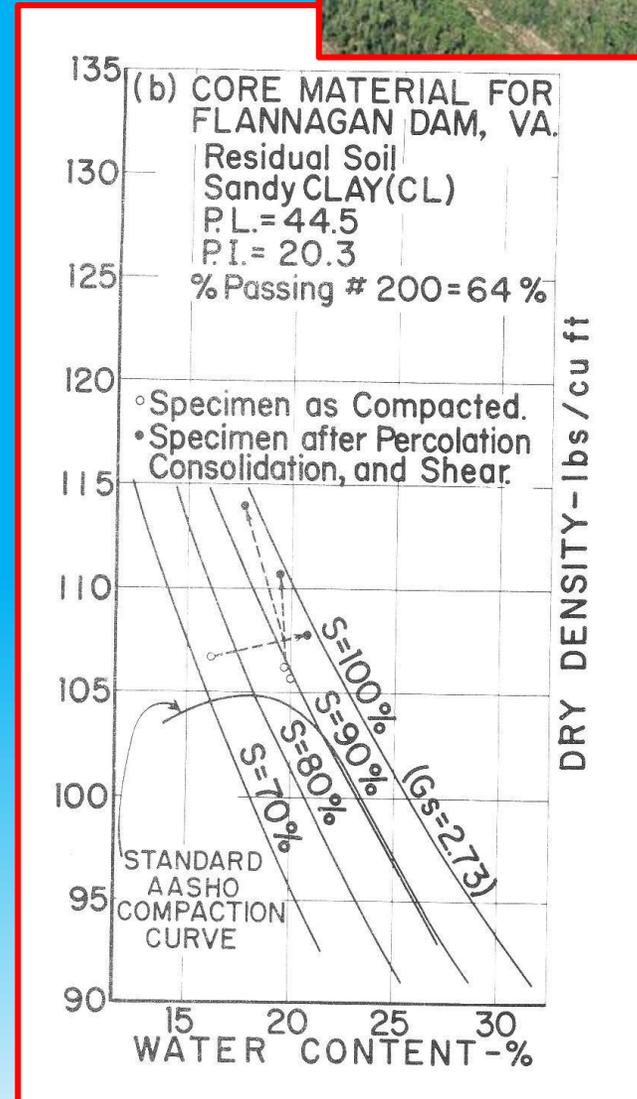
Saturação de Solos Compactados



Saturação de amostras compactadas por percolação



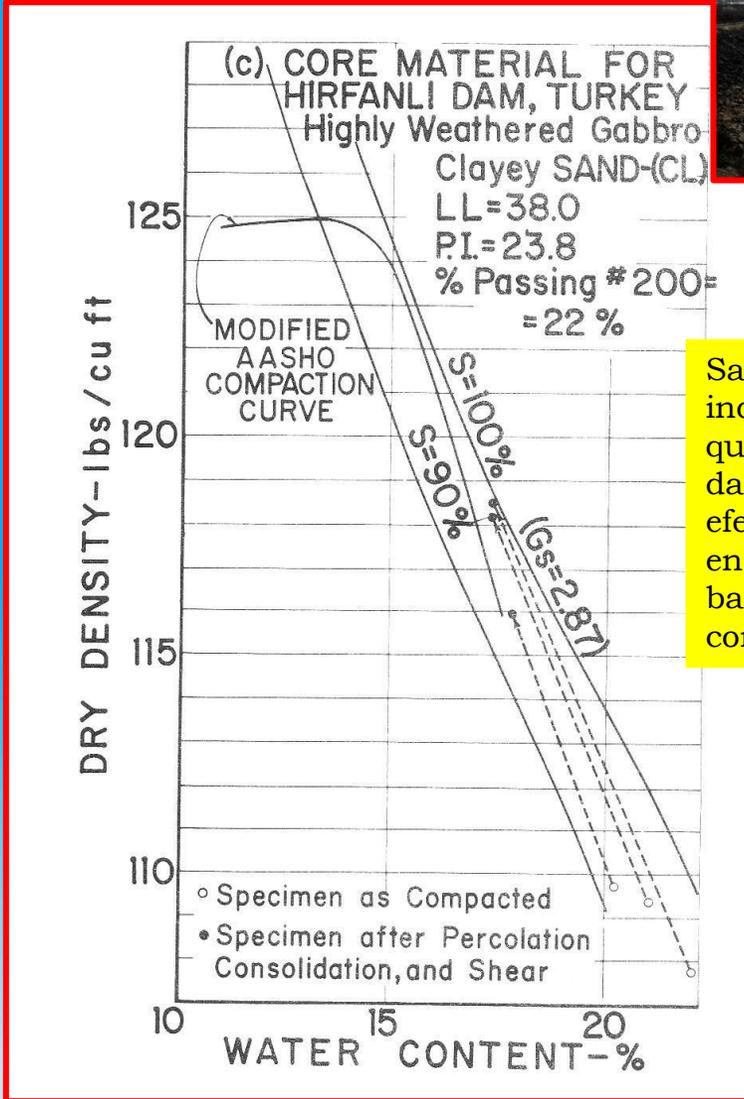
Saturação por percolação induz forças de percolação que causam adensamento da amostra. Isto pode ter efeitos não desejados em ensaios realizados com baixos valores de pressão confinante.



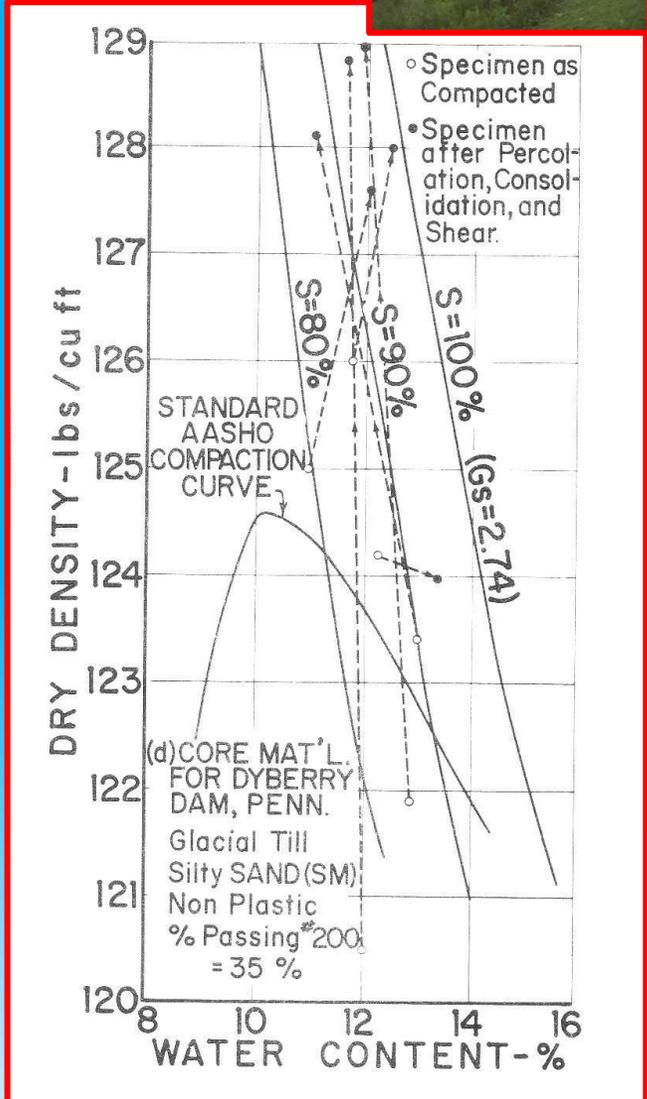
Lowe and Johnson (1960)

Lowe and Johnson (1960)

Saturação de amostras compactadas por percolação



Saturação por percolação induz forças de percolação que causam adensamento da amostra. Isto pode ter efeitos não desejados em ensaios realizados com baixos valores de pressão confinante.



Lowe and Johnson (1960)

Lowe and Johnson (1960)

Saturação de amostras compactadas por contra-pressão

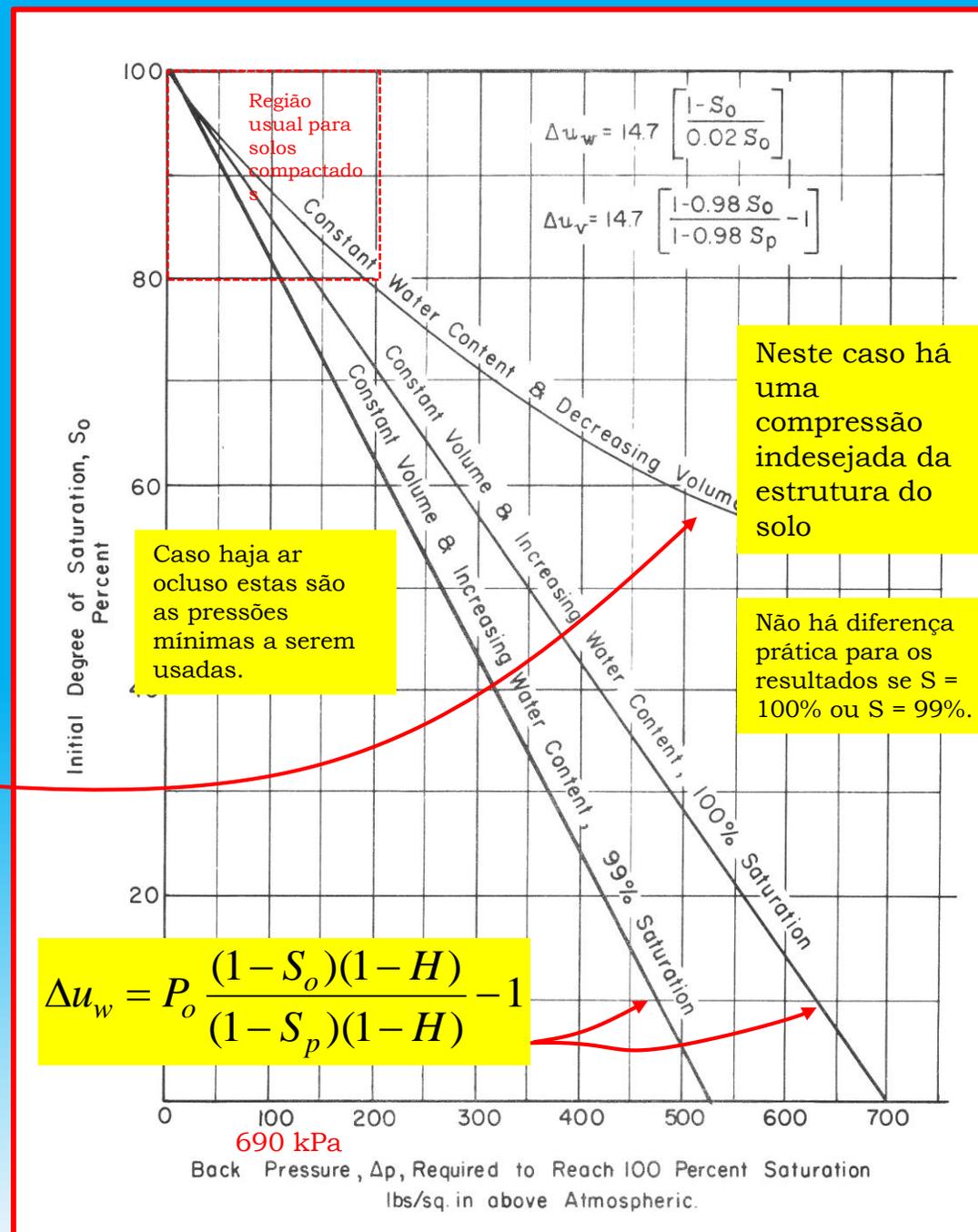
O aumento da pressão dos poros em um solo não saturado afeta o volume do ar presente nos poros de duas maneiras:

1. O ar reduz seu volume por compressão de acordo com a lei de Boyle.
2. Pela aplicação de pressão elevada o ar pode ser dissolvido na água dos poros de acordo com a lei de Henry.

$$\Delta u_w = P_o \frac{(1 - S_o)}{S_o H}$$

Bishop and Eldin (1950)

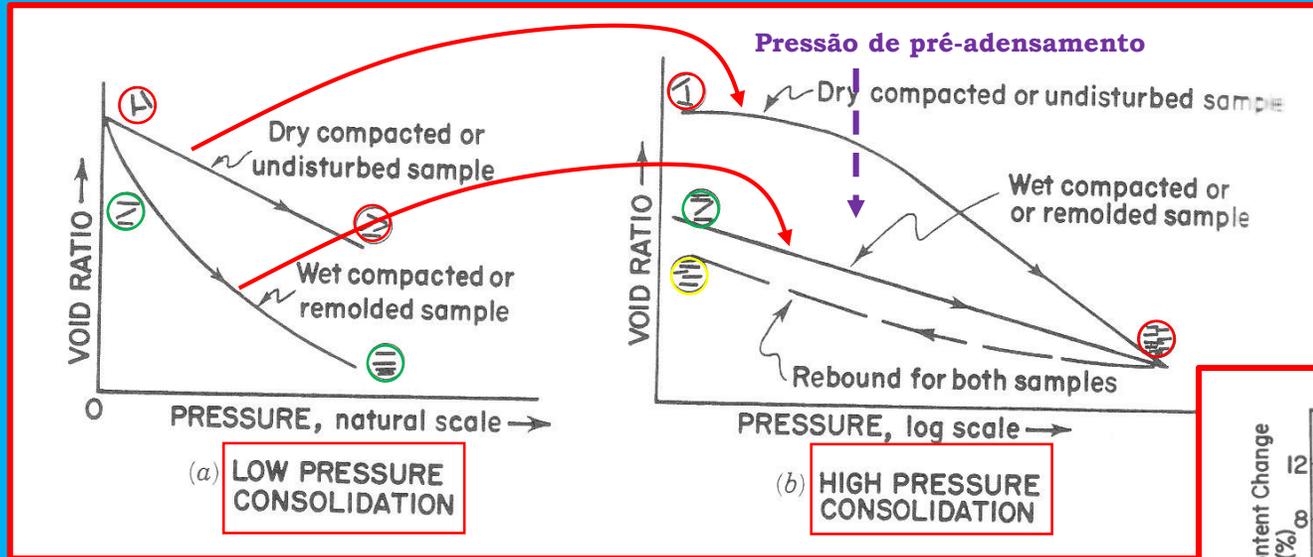
P_o = pressão inicial do ar nos poros
 S_o - grau de saturação inicial
 S_p - grau de saturação a ser obtido
 H = Coeficiente de solubilidade ($0.02 V_{air}/V_w$)



Comportamento de Engenharia



Efeito da compressão unidimensional na



Lambe (1958)

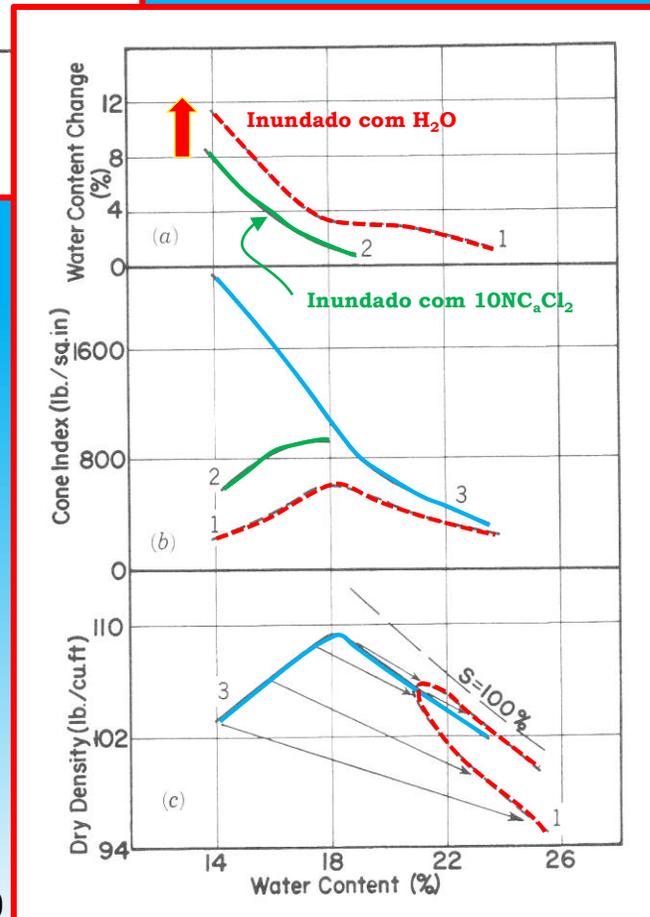


O carregamento unidimensional tende a alinhar as partículas de forma paralela. No caso de amostras compactadas no ramo úmido ou remoldadas as partículas já estão paralelas e a compressão apenas aproximam mais as partículas

O descarregamento não altera significativamente a estrutura

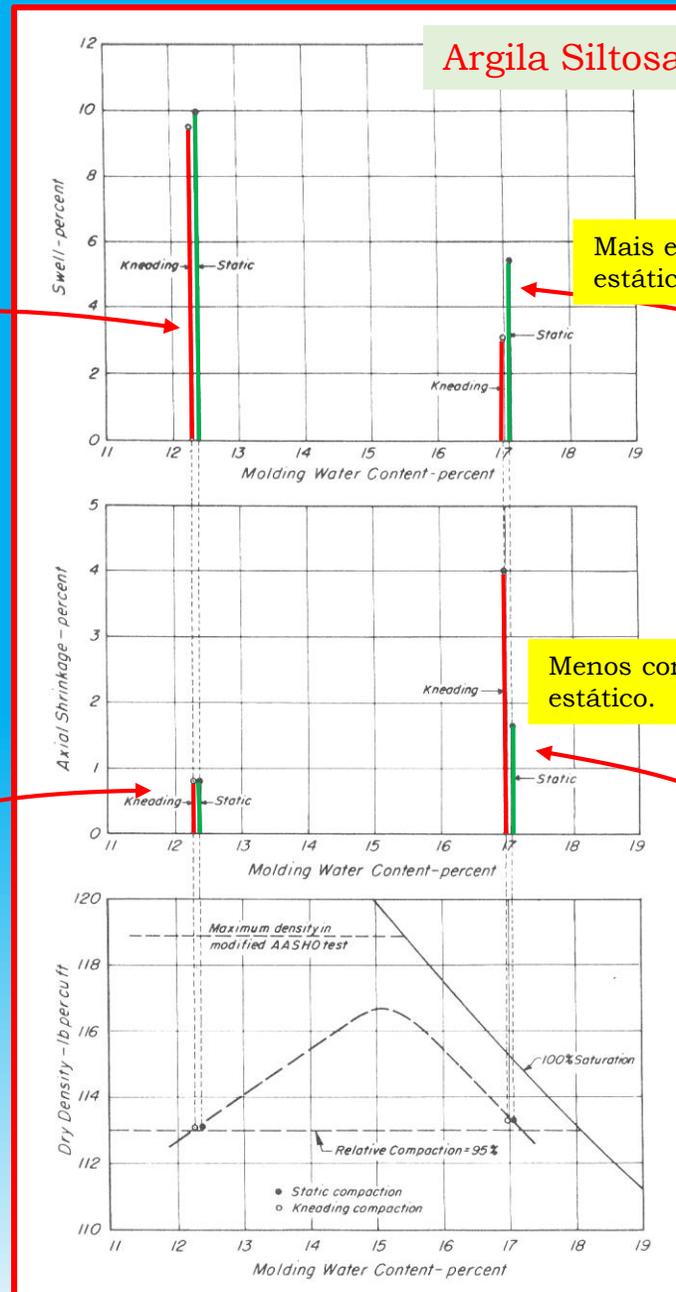
O carregamento unidimensional sob elevada pressão orienta e aproxima as partículas de amostras compactadas no ramo seco. No caso do ramo úmido a aproximação das partículas ocorre. A compressão sob elevada pressão cria teoricamente a mesma estrutura ao final, independentemente da estrutura inicial.

Compactação, Inundação e Resistência



Lambe (1958)

Efeito do Método de Compactação Estática e pisoteamento



Mais expansão no método estático.

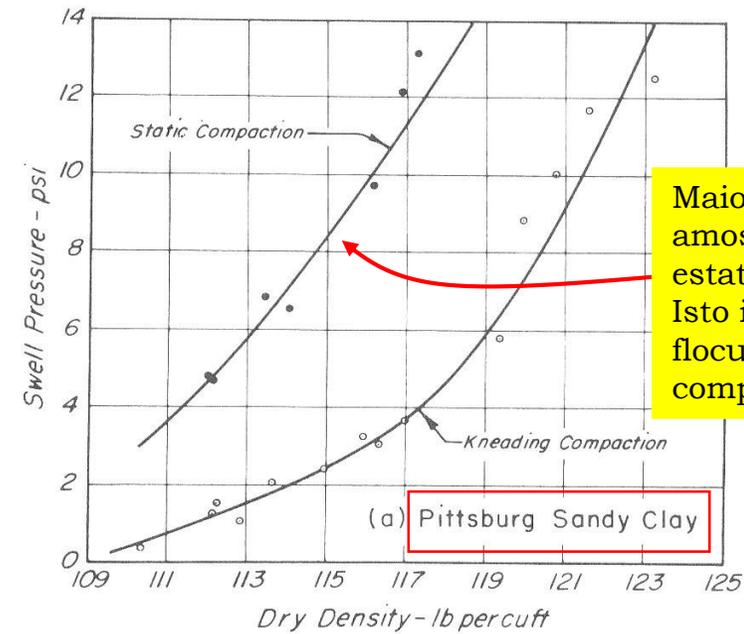
Menos contração no método estático.

Amostras compactadas no ramo seco apresentam o mesmo comportamento em termos de expansão e contração independentemente do método de compactação.

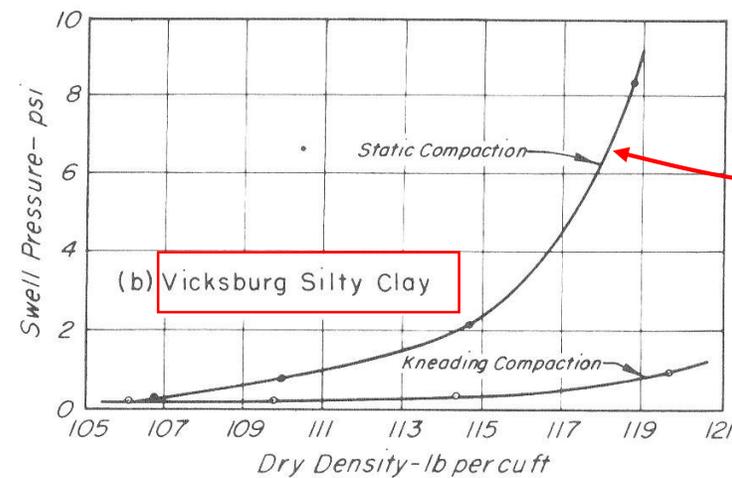
Amostras compactadas no ramo úmido apresentam comportamento diferentes em termos de expansão e contração de acordo com o método de compactação.

Efeito do Método de Compactação na Pressão de Expansão.

Amostras preparadas acima do teor de umidade ótimo.



Maior pressão de expansão nas amostras compactadas estaticamente. Isto indica uma maior grau de floculação nas amostras compactadas estaticamente

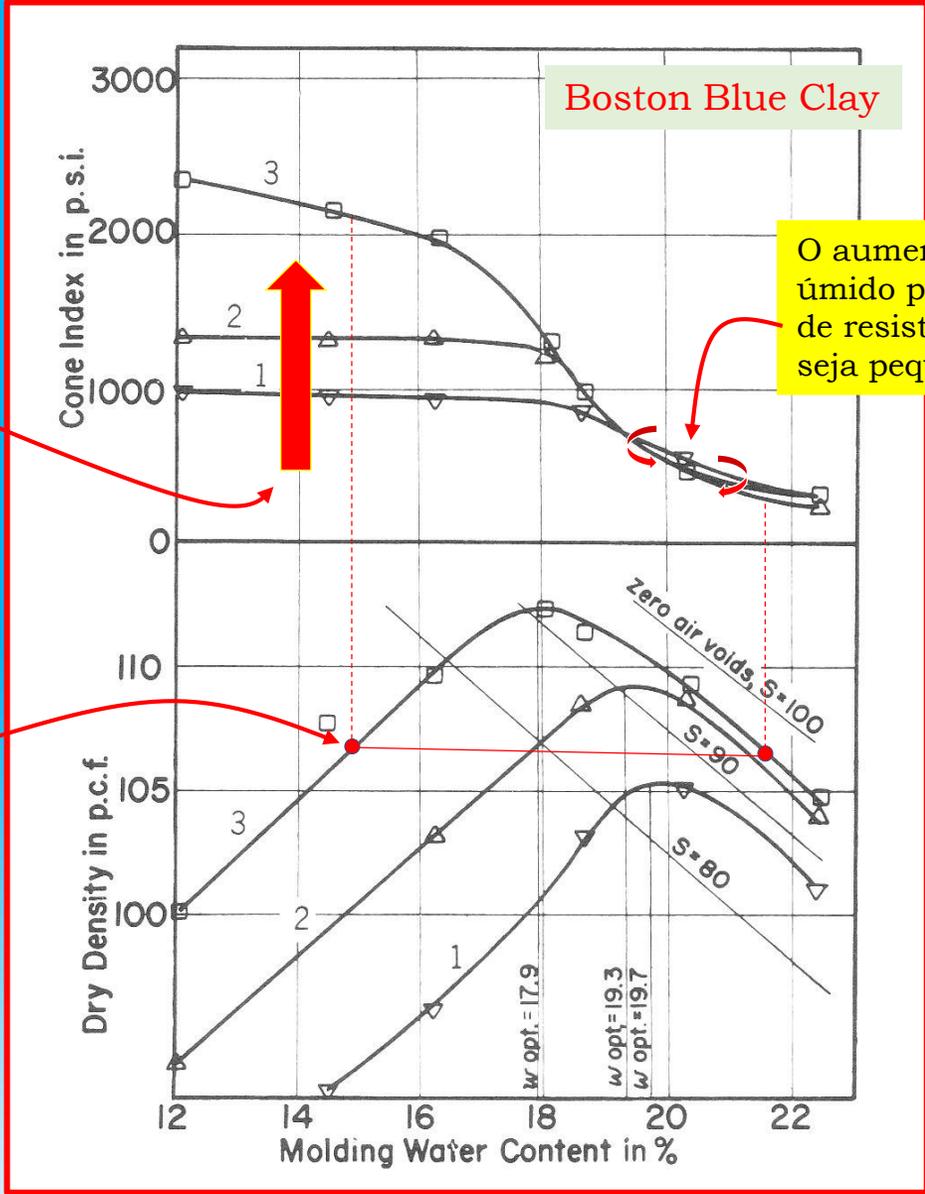


Efeito da Compactação na Resistência

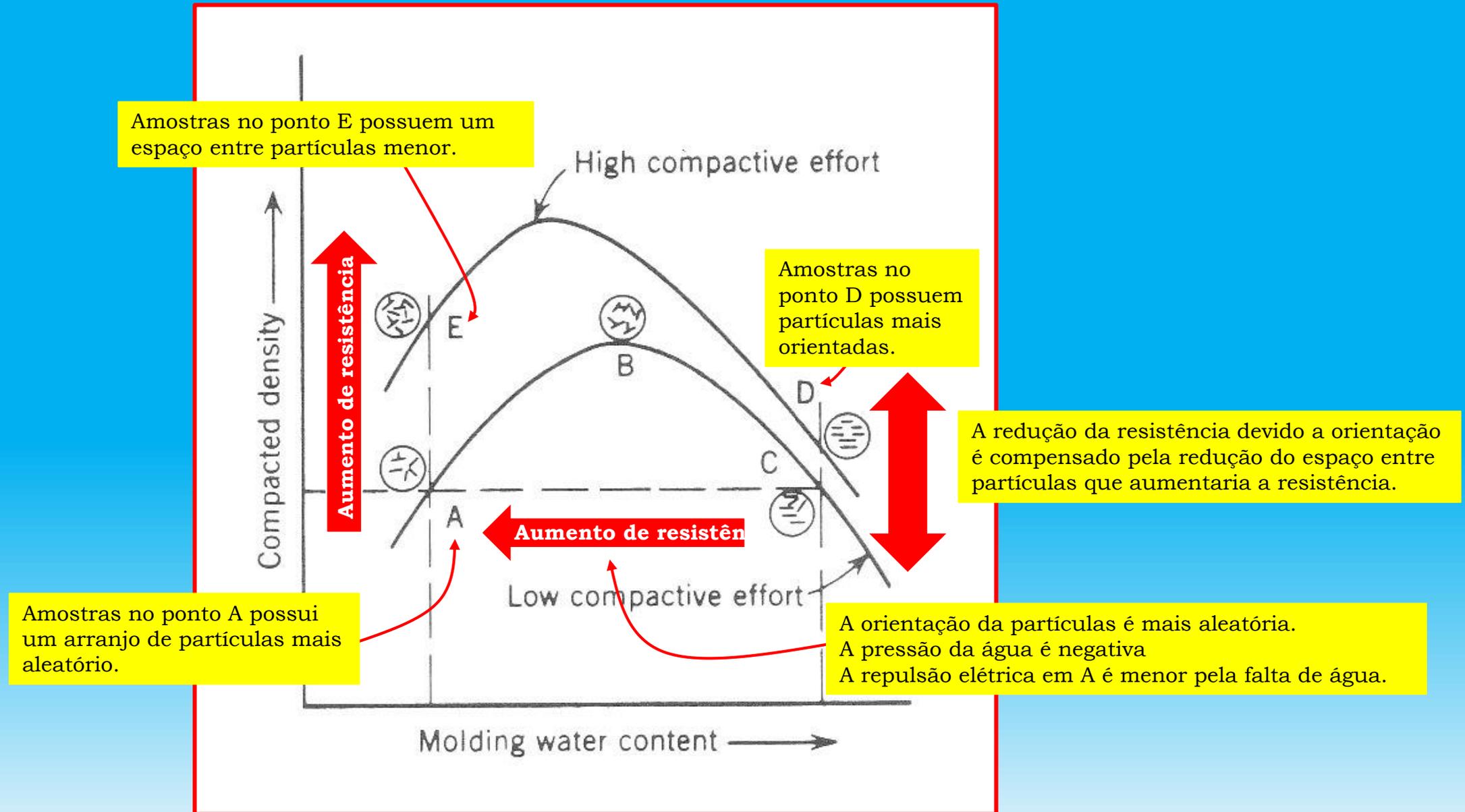


O aumento da energia no ramo seco aumenta a resistência

Para a mesma energia de compactação e mesma densidade, o lado seco apresenta uma maior resistência em relação ao ramos úmido.

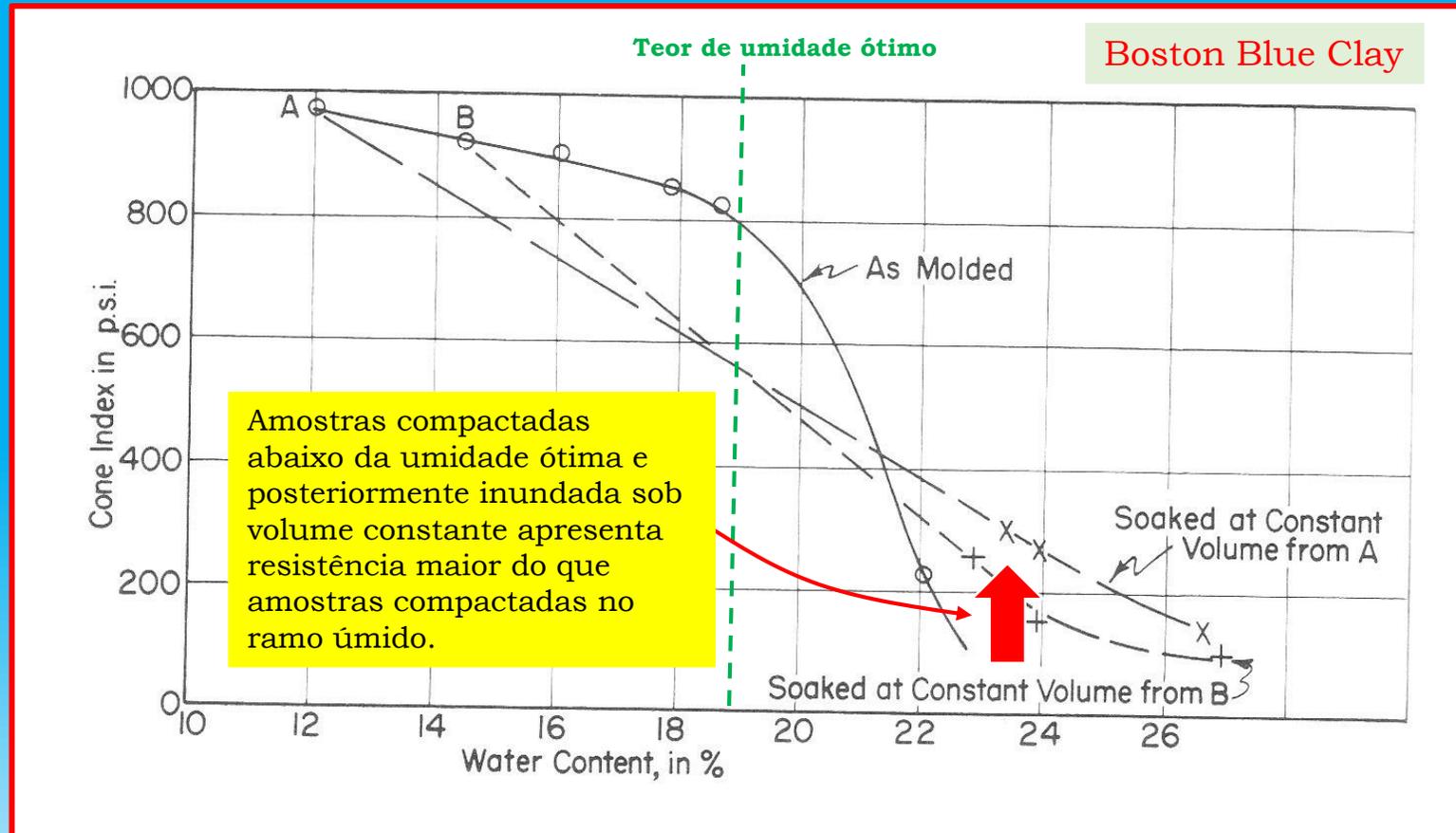


Efeito da Compactação na Resistência



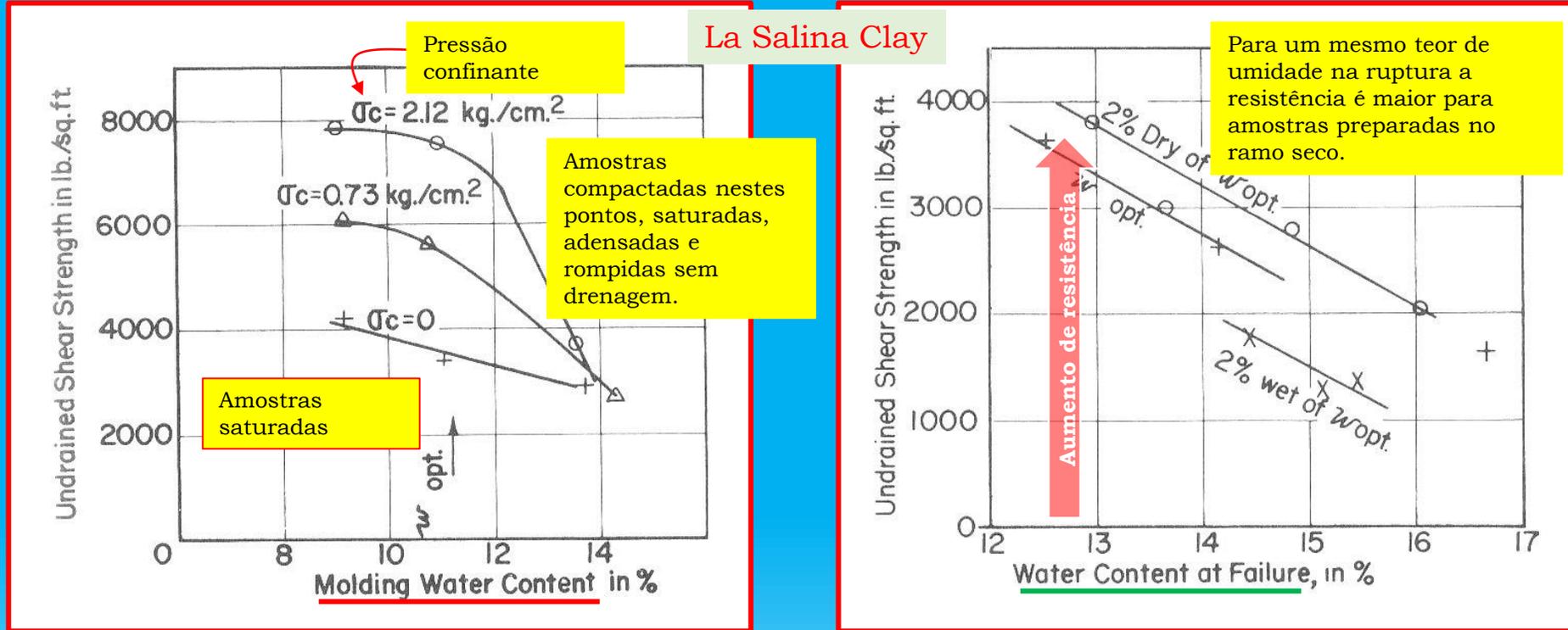
Efeito da Compactação na Resistência

Usando o cone de laboratório



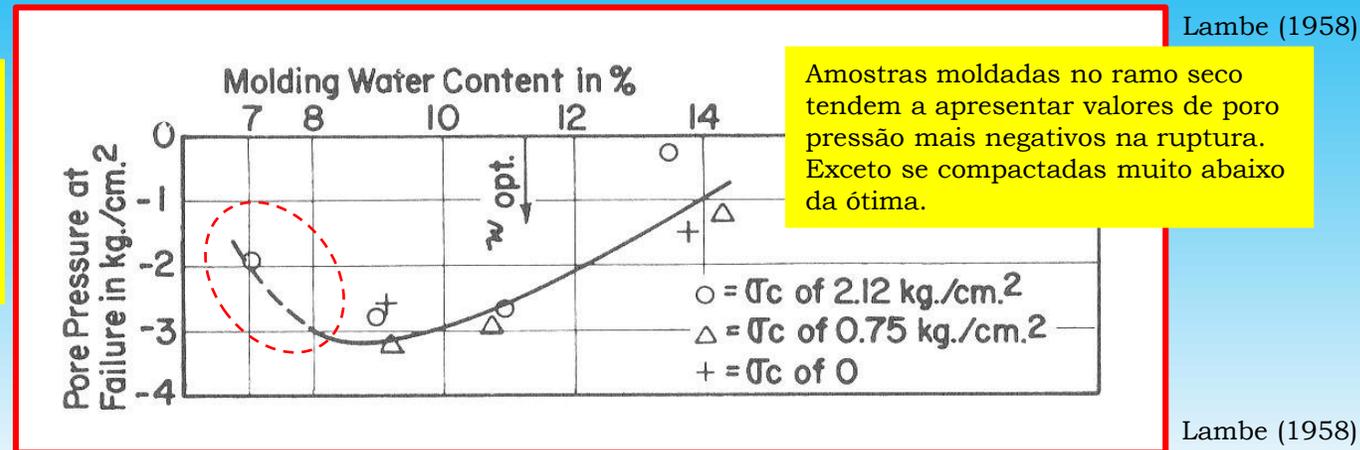
Efeito da Compactação na Resistência

Usando o Triaxial



Lambe (1958)

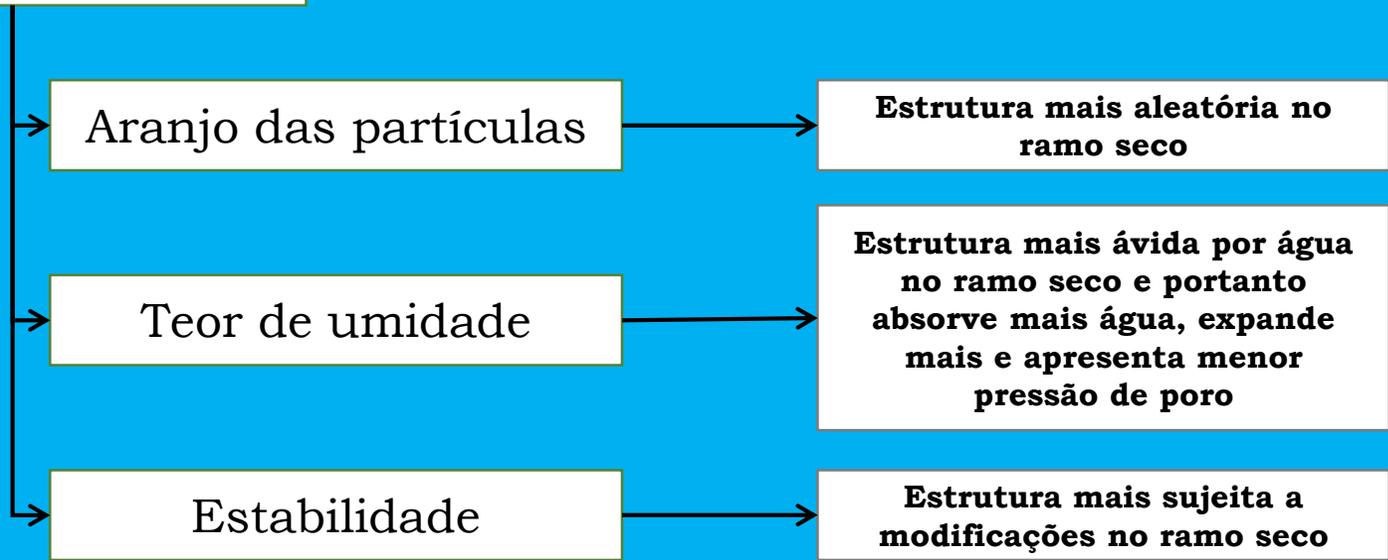
Durante a saturação não houve prevenção da variação de volume. O processo de saturação submeteu as amostras a tensões severas que não são esperadas em campo. Estas tensões causaram alterações na estrutura do solo. Estes aspectos dificultam a interpretação do comportamento na condição drenada.



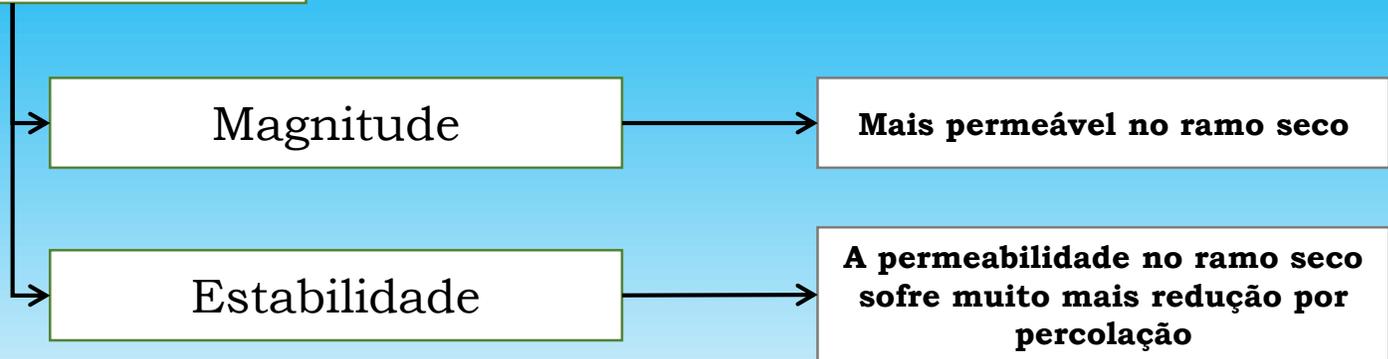
Lambe (1958)

Lambe (1958)

Estrutura



Condutividade Hidráulica



Compressibilidade

Magnitude

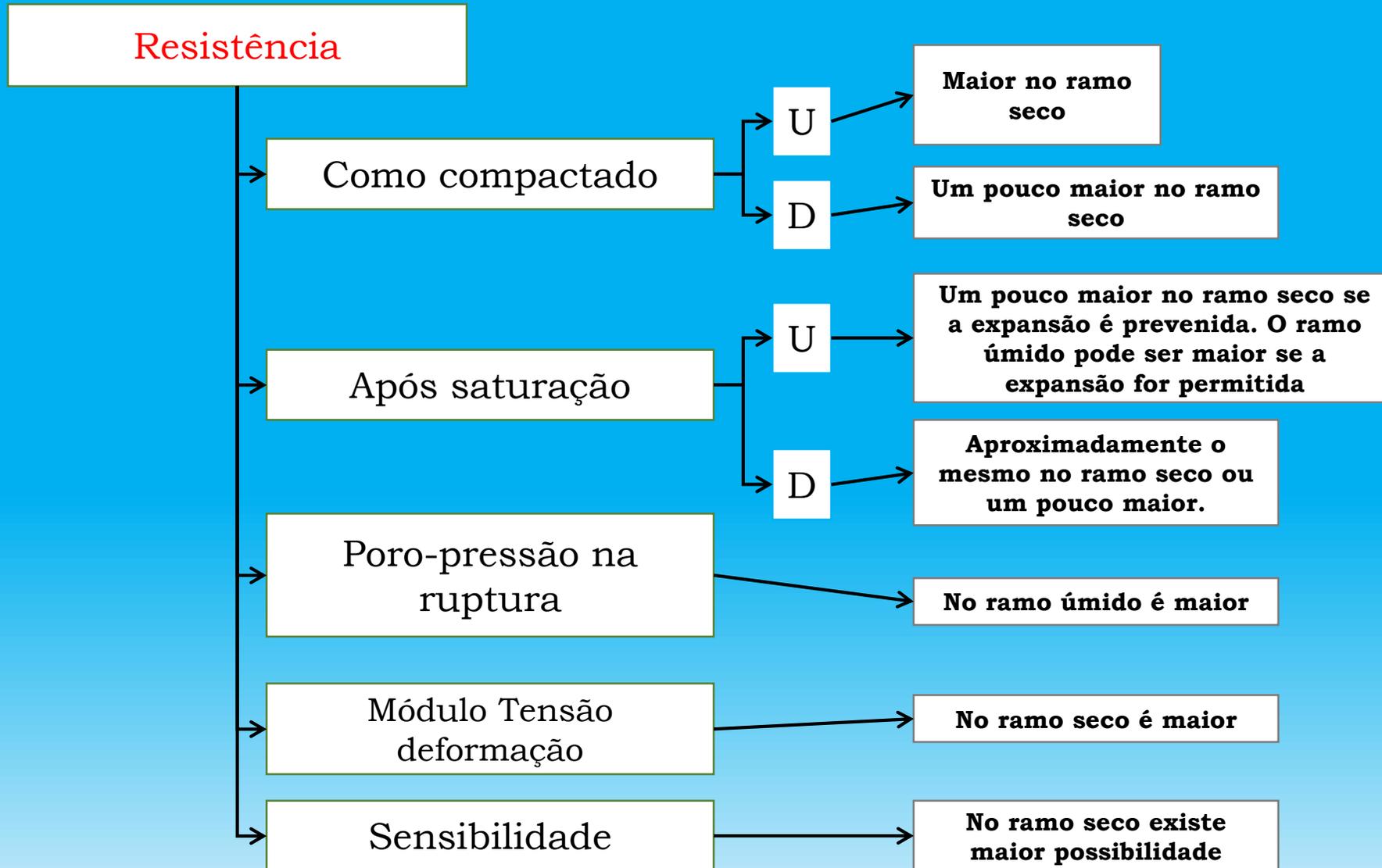
Mais compressível no ramo úmido sob baixa pressão e mais compressível no ramo seco quando sob alta pressão.

Velocidade de adensamento

O adensamento é mais rápido em amostras compactadas no ramo úmido

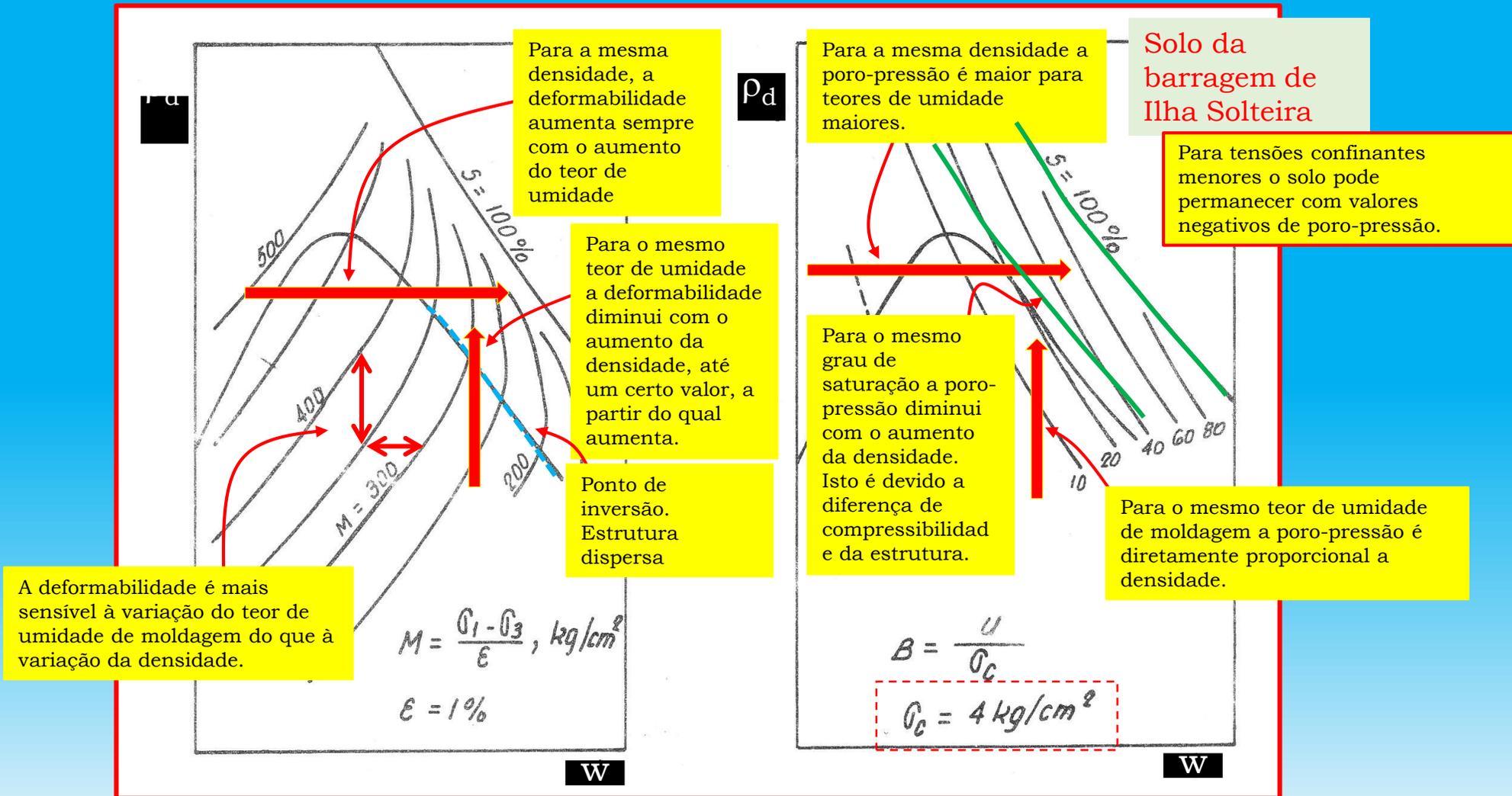
“Rebound”

O “rebound” é maior no ramo úmido

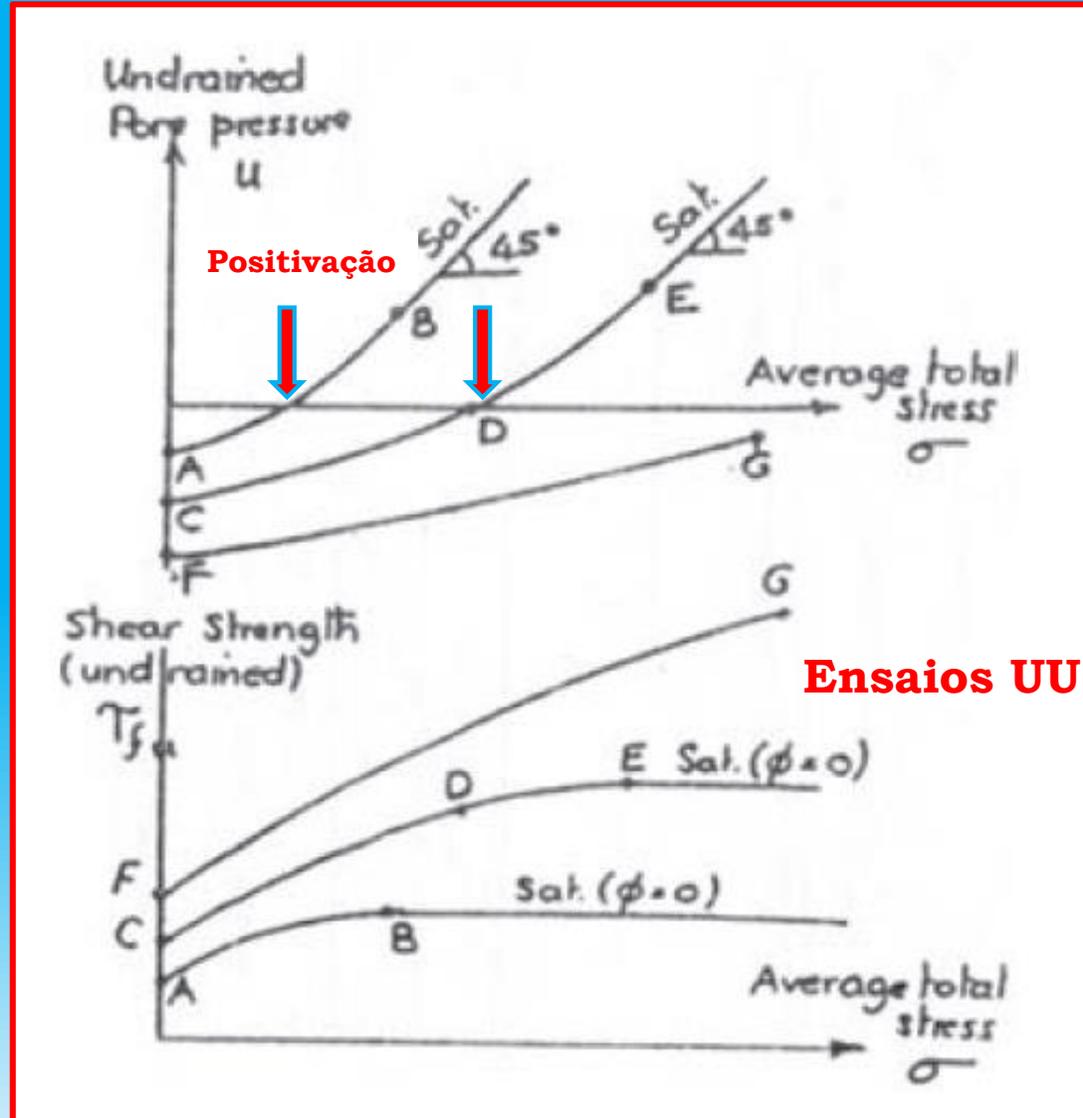


Deformabilidade

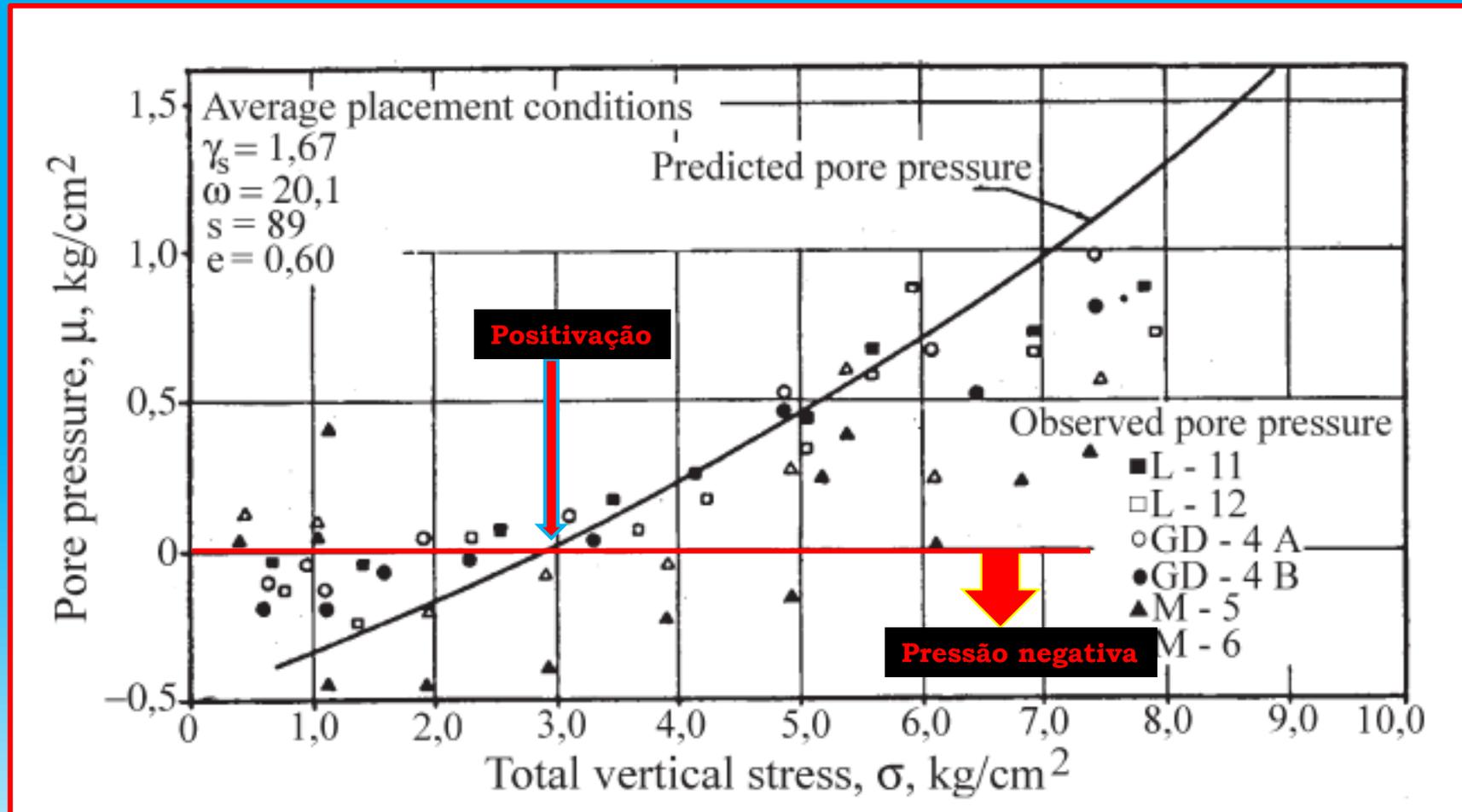
Poro-Pressões



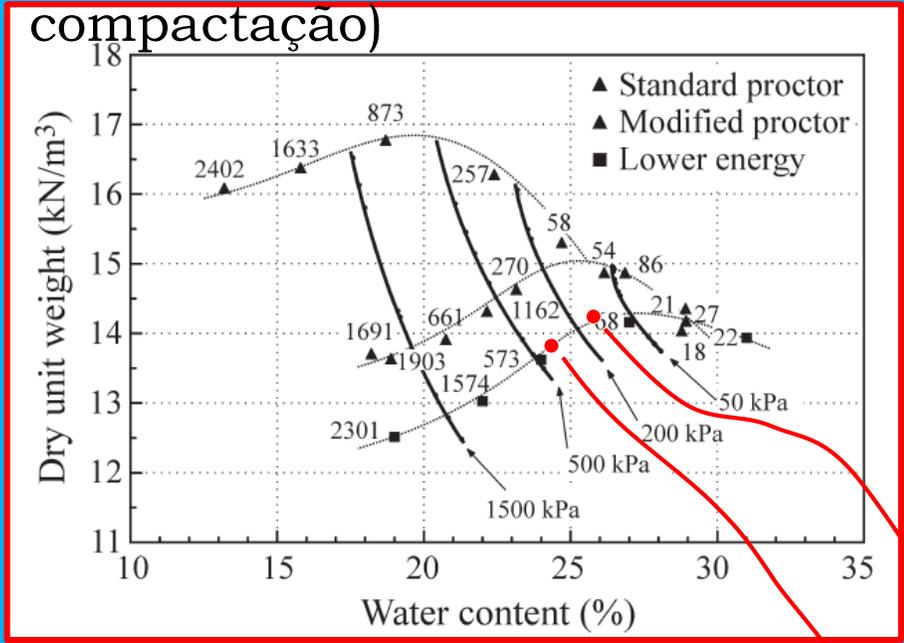
Resposta da poro-pressão e a resistência ao cisalhamento em resposta a aplicação de tensão total (Vaughan, 1982).



Comparação entre valores de poro-pressão previstos e medidos

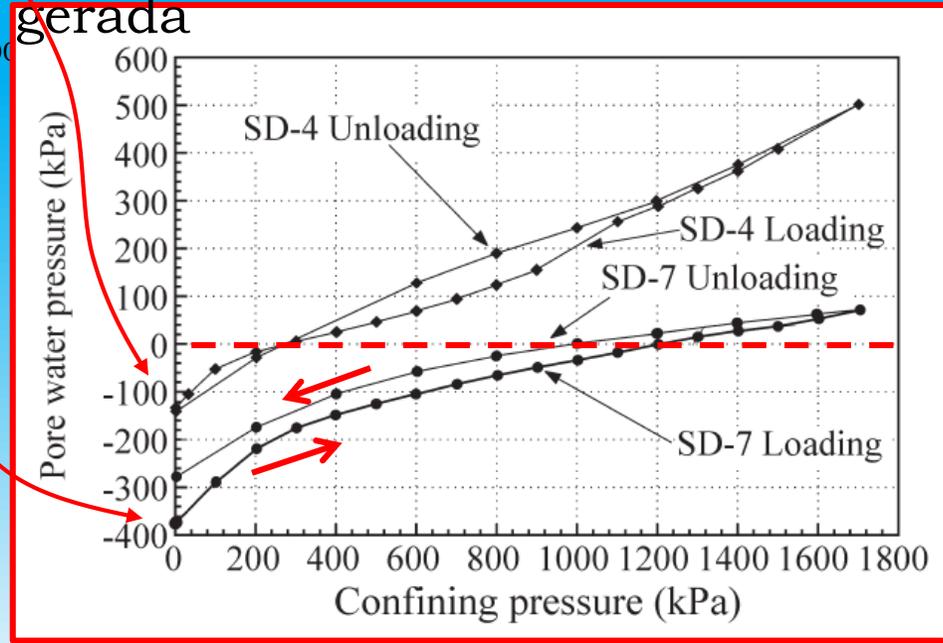


Curvas de Compactação e curvas de iso-sucções (após compactação)



Marinho & Stuermer (2003)

Efeito do carregamento e descarregamento na poro-pressão gerada

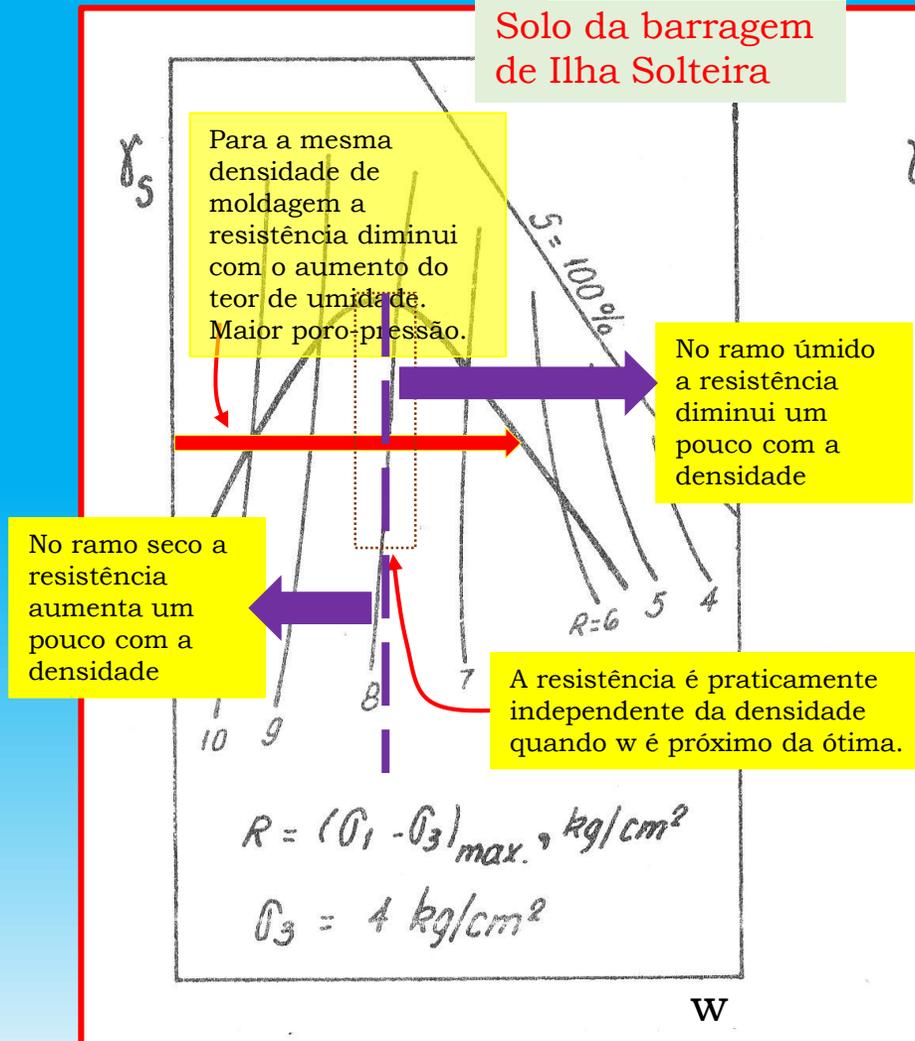


Marinho et al. (2003)



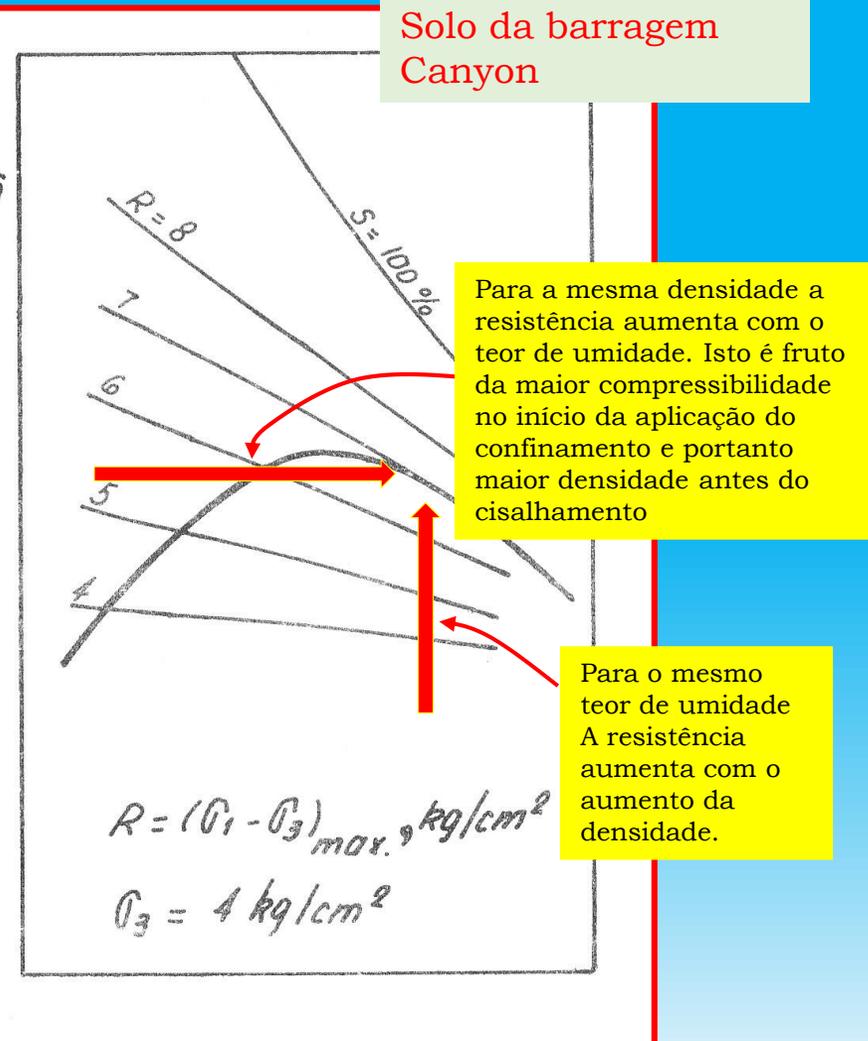
Ensaio UU

Solo da barragem de Ilha Solteira

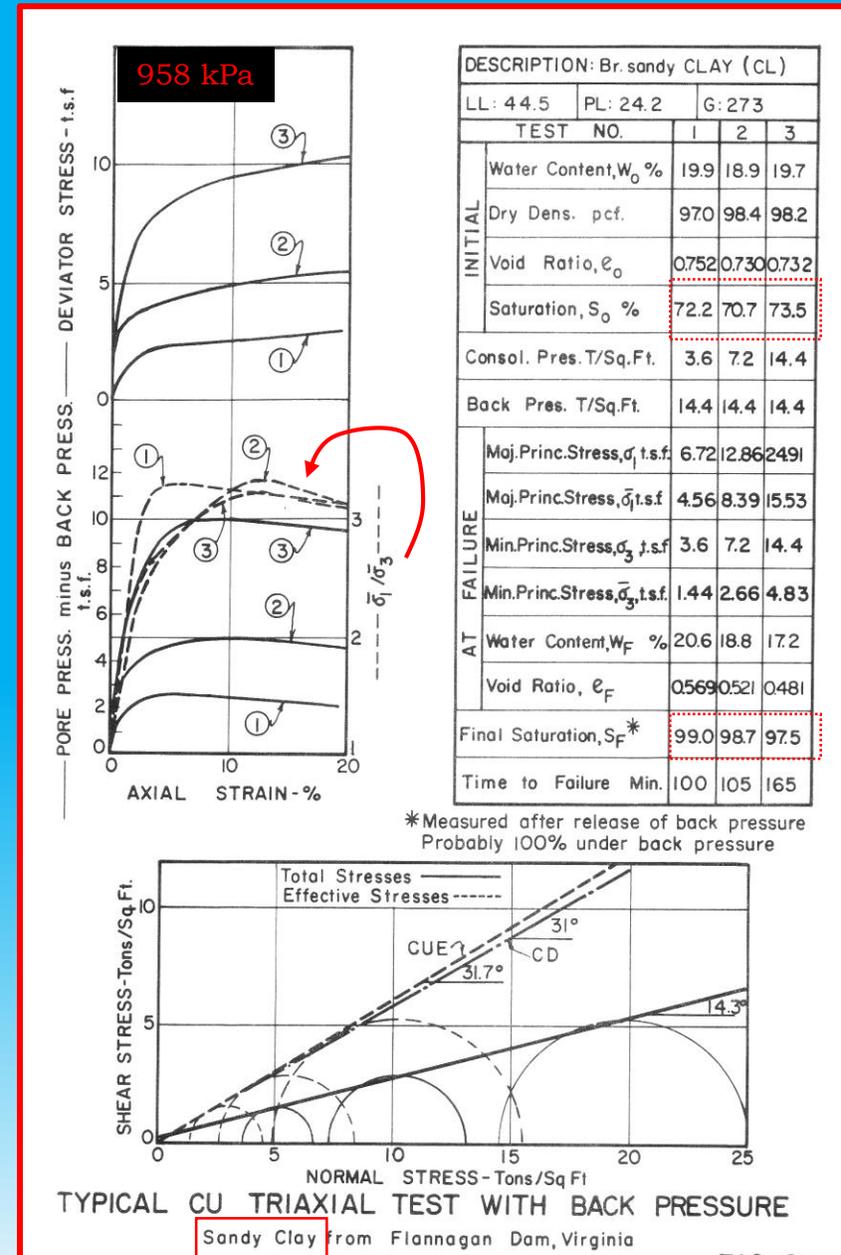


Ensaio CU

Solo da barragem Canyon

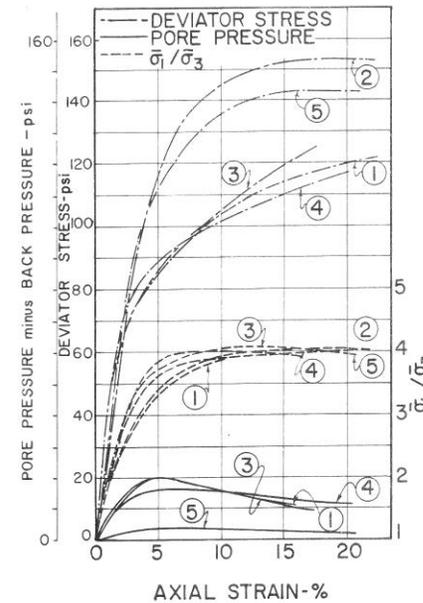


Avaliação dos ensaios CU e CD



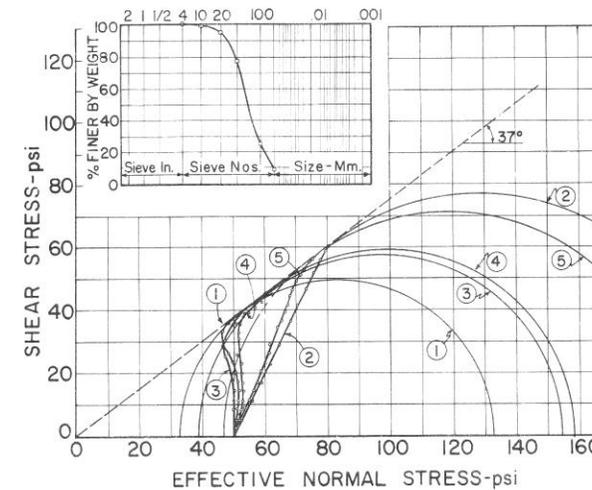
Avaliação dos processos de saturação e seus efeitos na envoltória em AREIA

- A técnica da aplicação da contra-pressão é válida.
- Nos ensaios em areia o método de percolação mostra-se satisfatório.
- Ensaios em argilas não apresentam o mesmo comportamento pois a saturação por percolação não é adequada.



DESCRIPTION: Br.Silty fine Sand (SP-SM)

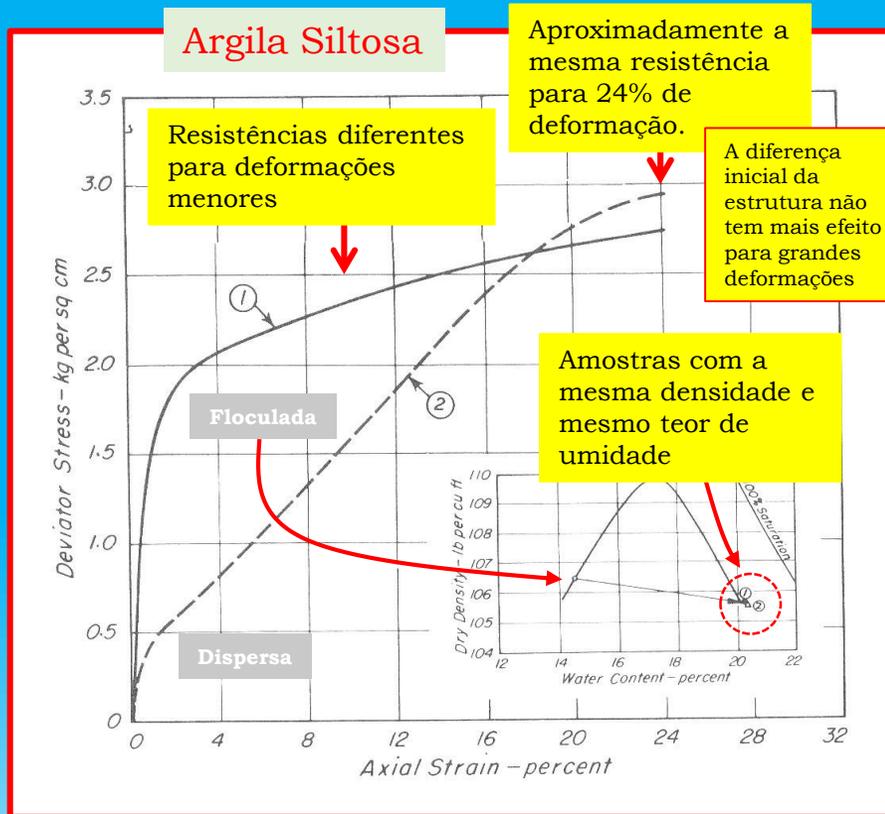
NON PLASTIC		G : 2.76				
TEST NO.		1	2	3	4	5
INITIAL	Water Content, W_0 %	3.3	4.7	4.1	4.6	4.5
	Dry Density p.c.f.	104.6	103.9	103.9	104.0	104.0
	Void Ratio, e_0	0.649	0.658	0.659	0.656	0.658
	Saturation, S_0 %	14.0	19.7	17.2	19.4	18.9
Type of Test	CU	CD	CU	CU	CU	
Method of Saturation	Percolation	Percolation	Back Pressure	Back Pressure	None	
Consolidation Press.-p.s.i.	500	500	500	500	500	
Back Pressure - p.s.i.	0	0	100.0	35.0	0	
Final Water Content W_f %	24.7	24.0	25.2	24.3	20.4	
Final Void Ratio, e_f	0.690	0.670	0.718	0.749	0.699	
Final Saturation, S_f %	98.9	99.0	97.0	89.5	80.5	
Time to Failure min.	140	195	150	150	200	



COMPARATIVE TRIAXIAL TESTS ON SAND

Influência da Estrutura na Poro- pressão e na Resistência não Drenada

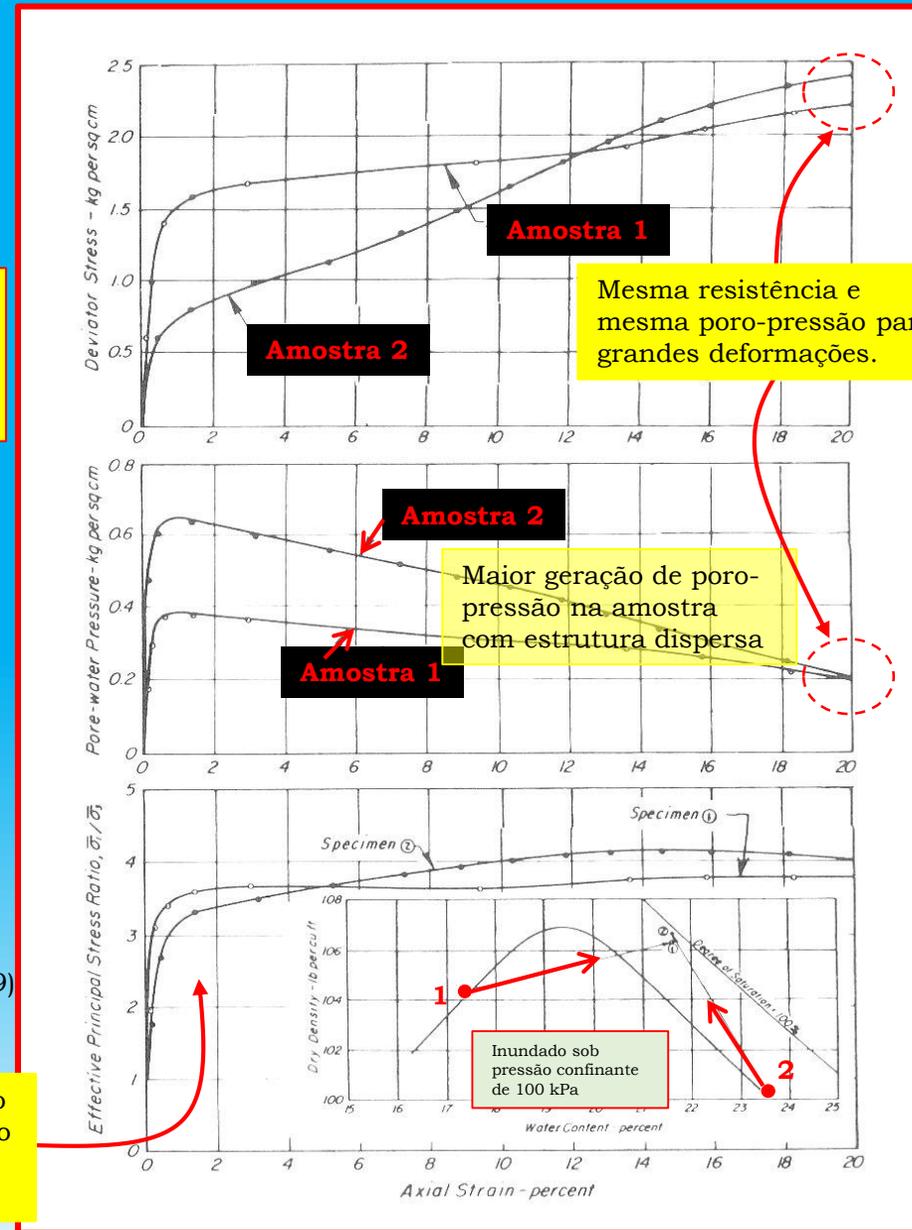
Influência da Estrutura na Resistência não Drenada



Seed & Chan (1959)

Ensaio CU

Quando avaliado em termos de tensão efetiva os resultados indicam o mesmo comportamento, independentemente da estrutura inicial



Seed & Chan (1959)

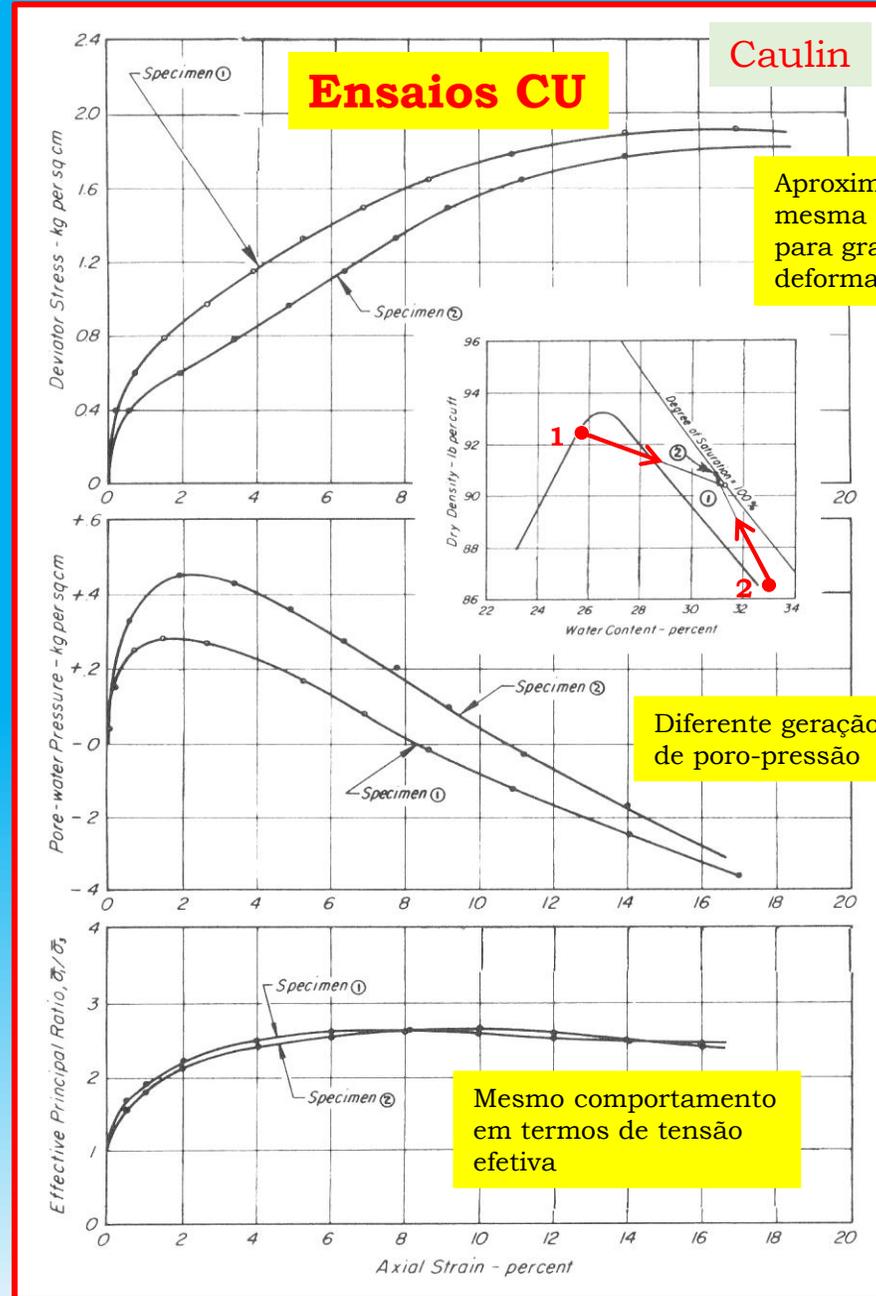
Influência da Estrutura na Poro-pressão e na Resistência não Drenada

Explicação menos fundamental, mas a poro-pressão pode ser medida

As duas amostras exibem curvas tensão deformação diferentes porque desenvolvem poro-pressões diferentes durante o carregamento

As duas amostras exibem curvas tensão deformação diferentes porque possuem estruturas diferentes

Explicação mais fundamental, mas não pode ser “medida”

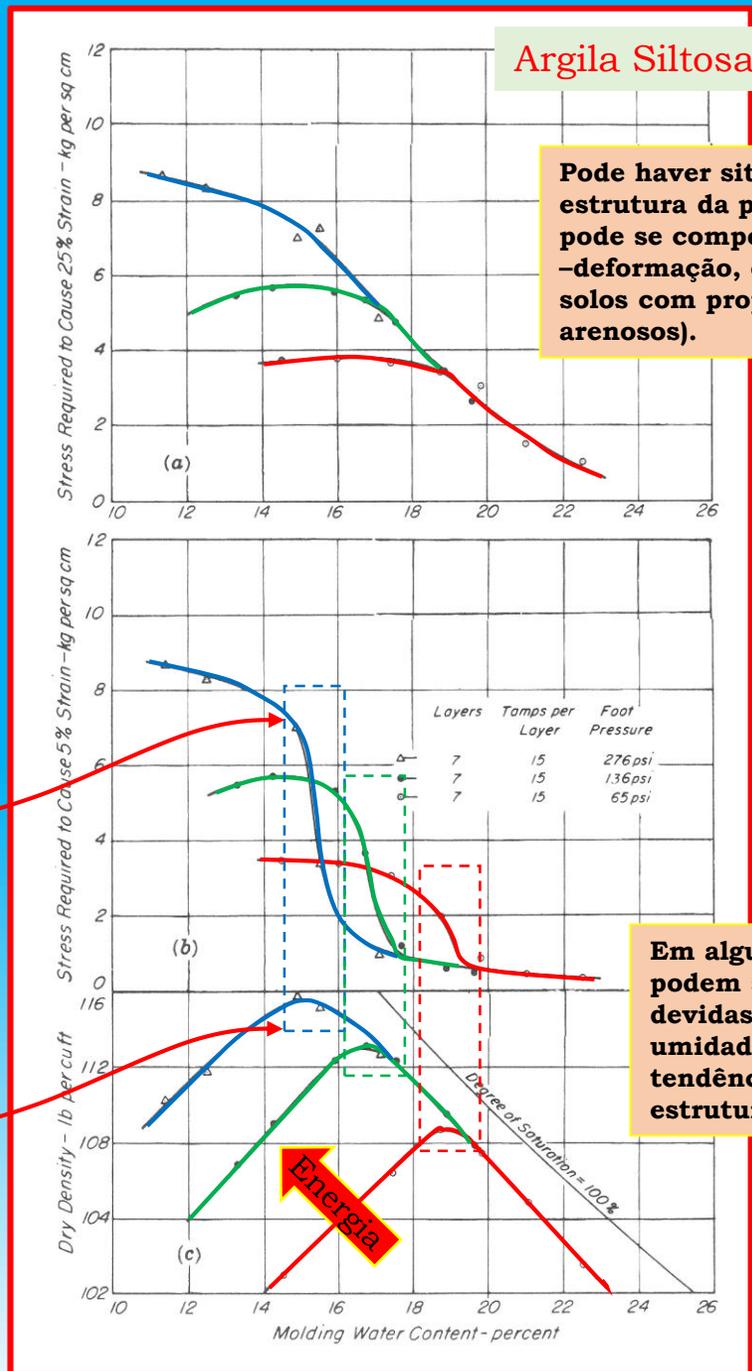


Influência da Estrutura na Poro-pressão e na Resistência não Drenada

“as compacted”

Quando a resistência é determinada na baixos níveis de deformação (5%) observa-se um forte decréscimo na resistência com o aumento da densidade além de um certo ponto.

Este ponto parece estar associado a densidades e teores de umidades correspondentes a altos graus de saturação, ou a condições de compactação que estão acima do teor de umidade ótimo.



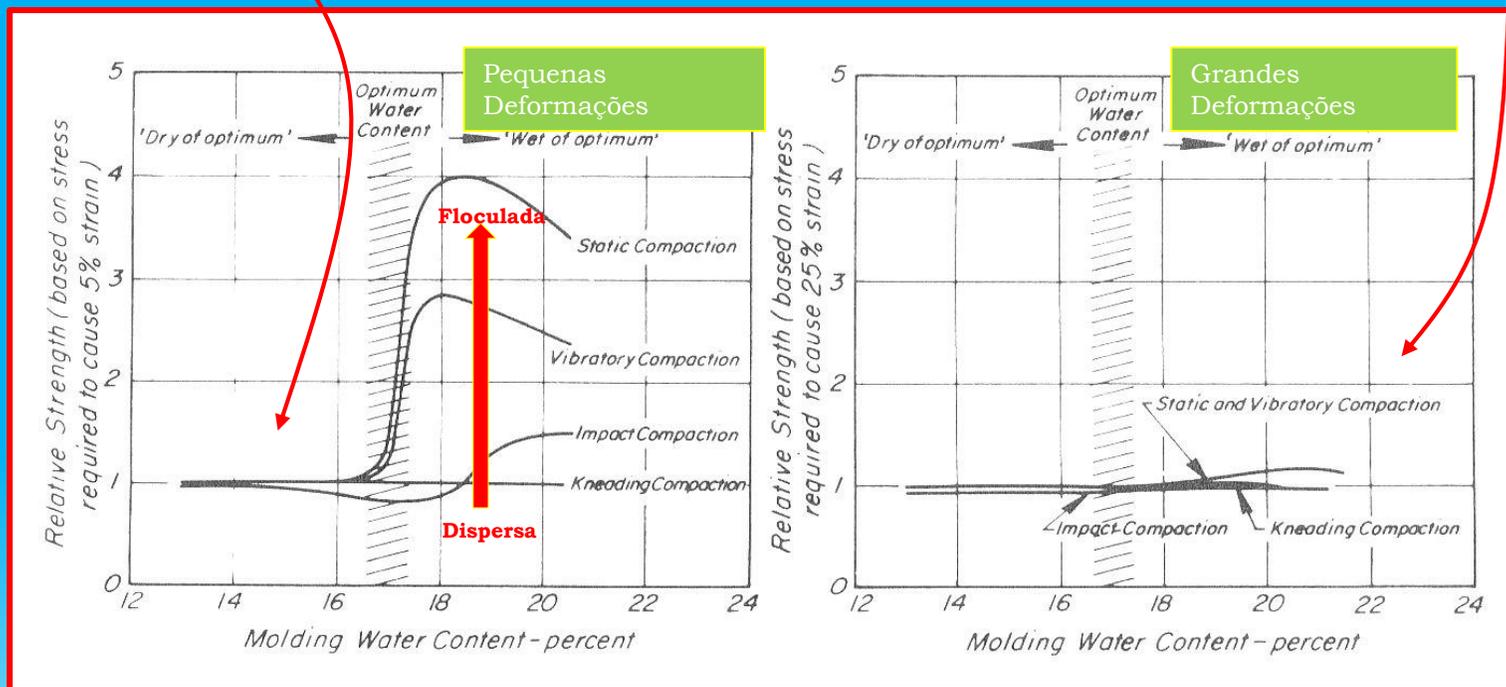
Pode haver situações de solos que possuam uma estrutura da parte argilosa dispersa e a amostra pode se comportar, do ponto de vista de tensão-deformação, como se fosse floculada. (e.g. solos com proporção importante de grãos arenosos).

Em alguns solos as forças entre partículas podem ser tão fortes que as mudanças devidas a compactação com vários teores de umidade são insuficientes para afetar a tendências das partículas de formarem uma estrutura floculada ou dispersa.

Influência do Método de Compactação na Resistência.

A resistências das amostras compactadas no ramo seco não são afetadas pelo método de compactação

A resistências para grandes deformações não apresentam diferenças importantes com relação ao método de compactação. A estrutura inicial perde sua importância.



Seed & Chan (1959)

Avaliação Geral dos Métodos de Compactação.

Compactação por pisoteamento:

- Causa maior deformação de cisalhamento e, portanto maior dispersão dos grãos.
- Causa maior desenvolvimento de poro-pressão da água.
- Menor resistência para baixas deformações.
- Maior contração.

Compactação por impacto:

- Causa um pouco menos deformação de cisalhamento e, portanto o grau de dispersão é menor
- A resistência é um pouco maior.
- A contração também é menor

Compactação Estática:

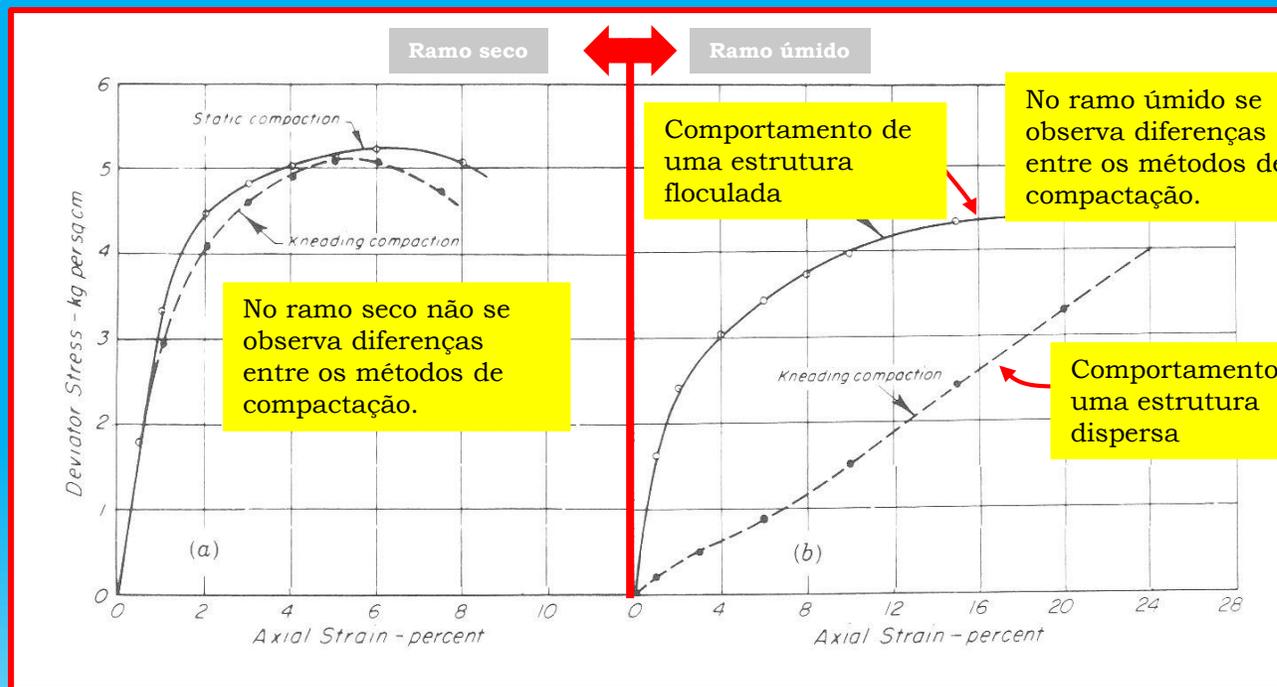
- Causa pouca deformação cisalhante durante a compactação, o que resulta em uma estrutura floclada
- O desenvolvimento de poro-pressão é o menor.
- Apresenta a maior resistência para baixas deformações.
- Apresenta a menor contração.

Compactação por Vibração:

- Causa muito pouca deformação cisalhante durante a compactação, o que resulta em uma estrutura semelhante a compactação estática.
- Pode gerar uma excessiva floclação, que pode resultar em uma menor resistência para baixas deformações.
- Maior contração.

Relação tensão – deformação

Estática e pisoteamento



Ensaio UU

Seed & Chan (1959)

Influência da Estrutura do Solo na Poro-pressão e nas Características de Resistência.

Espécime 1

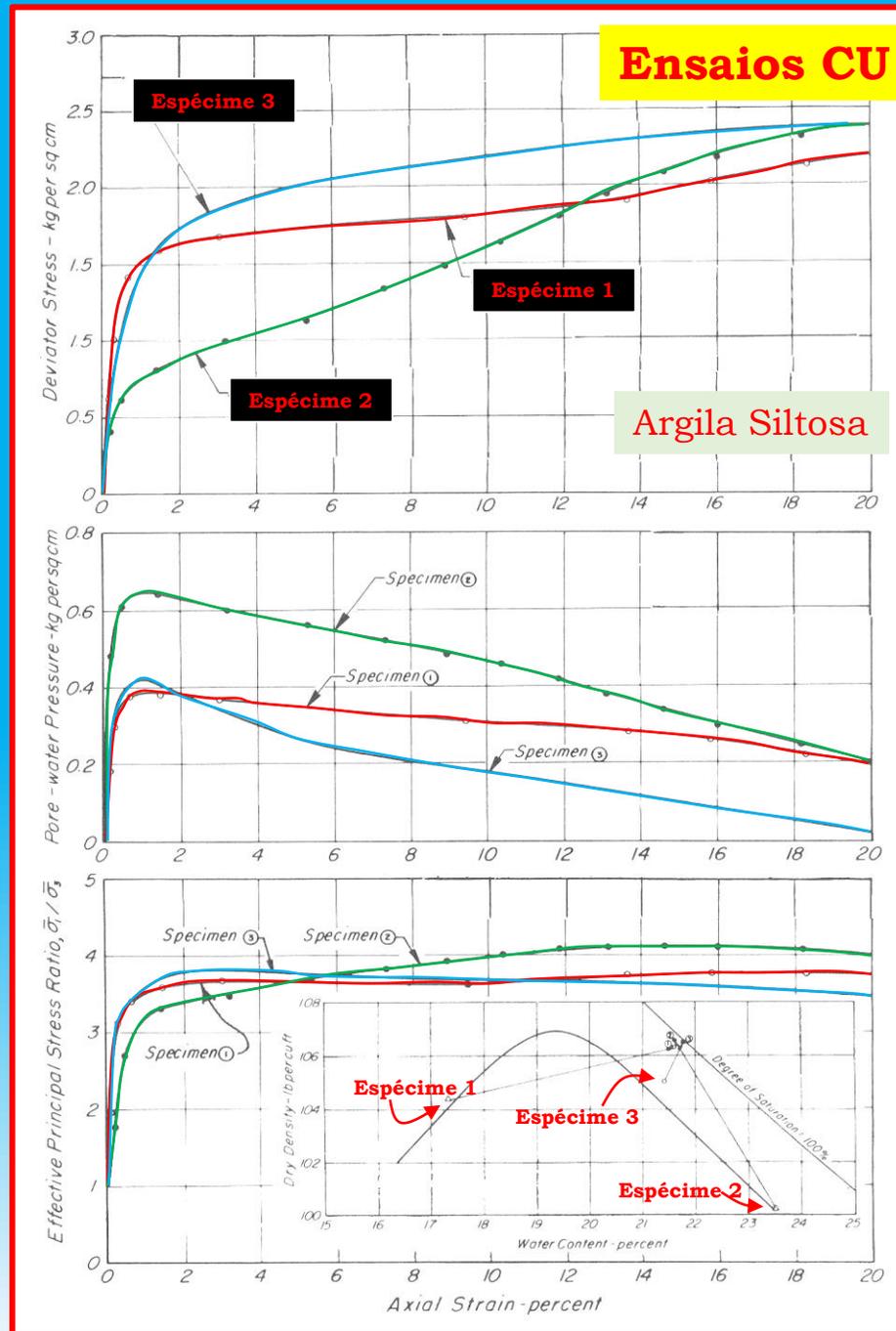
Compactação por pisoteamento.
No ramo seco.
Estrutura floculada.
Inundada sob volume

Espécime 2

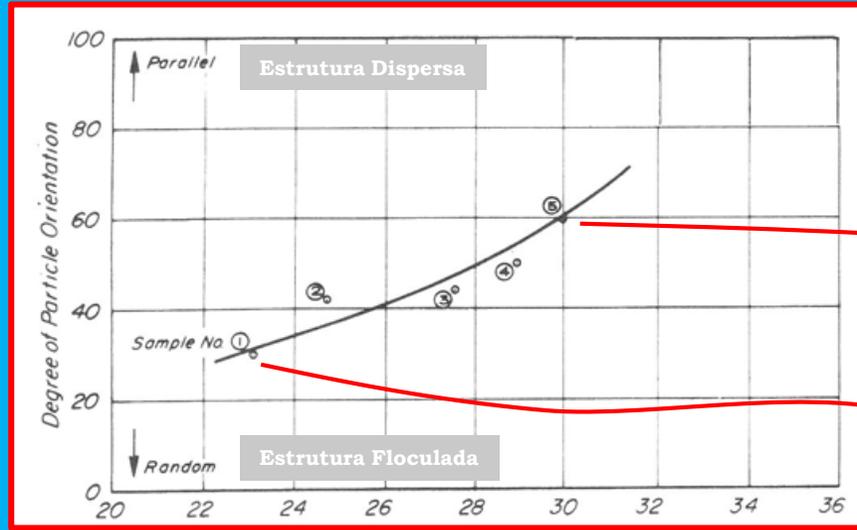
Compactação por pisoteamento.
No ramo úmido.
Estrutura dispersa.

Espécime 3

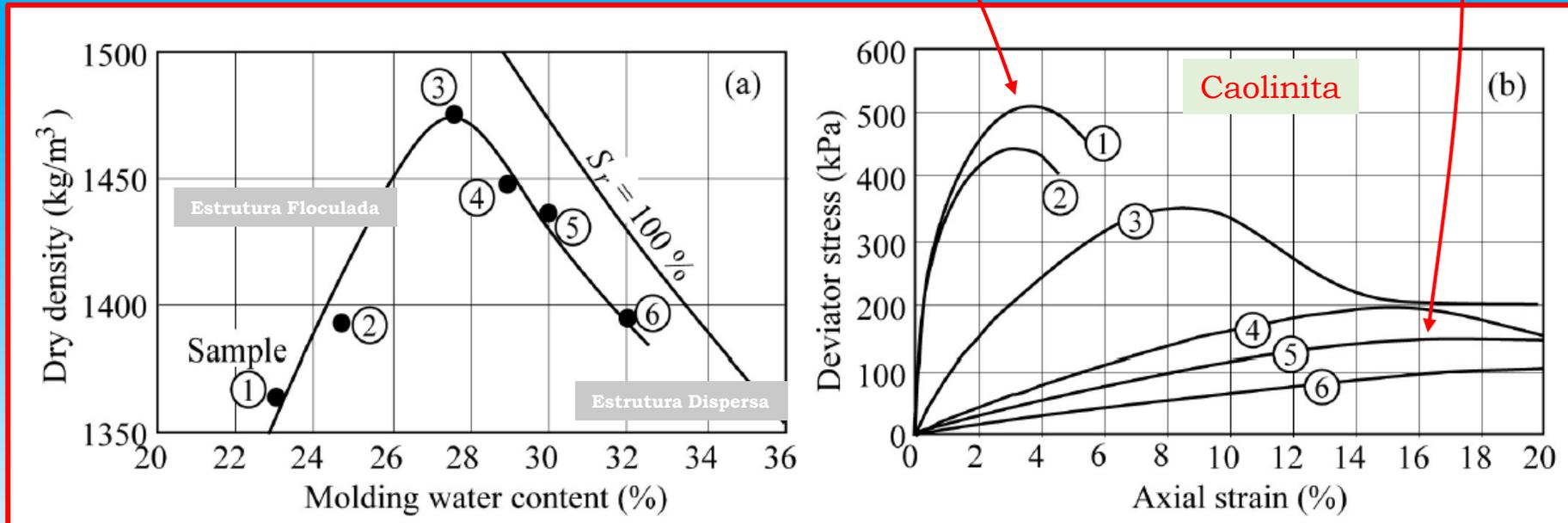
Compactação estática.
No ramo úmido.



Teor de Umidade de Moldagem – Estrutura e Comportamento Tensão Deformação



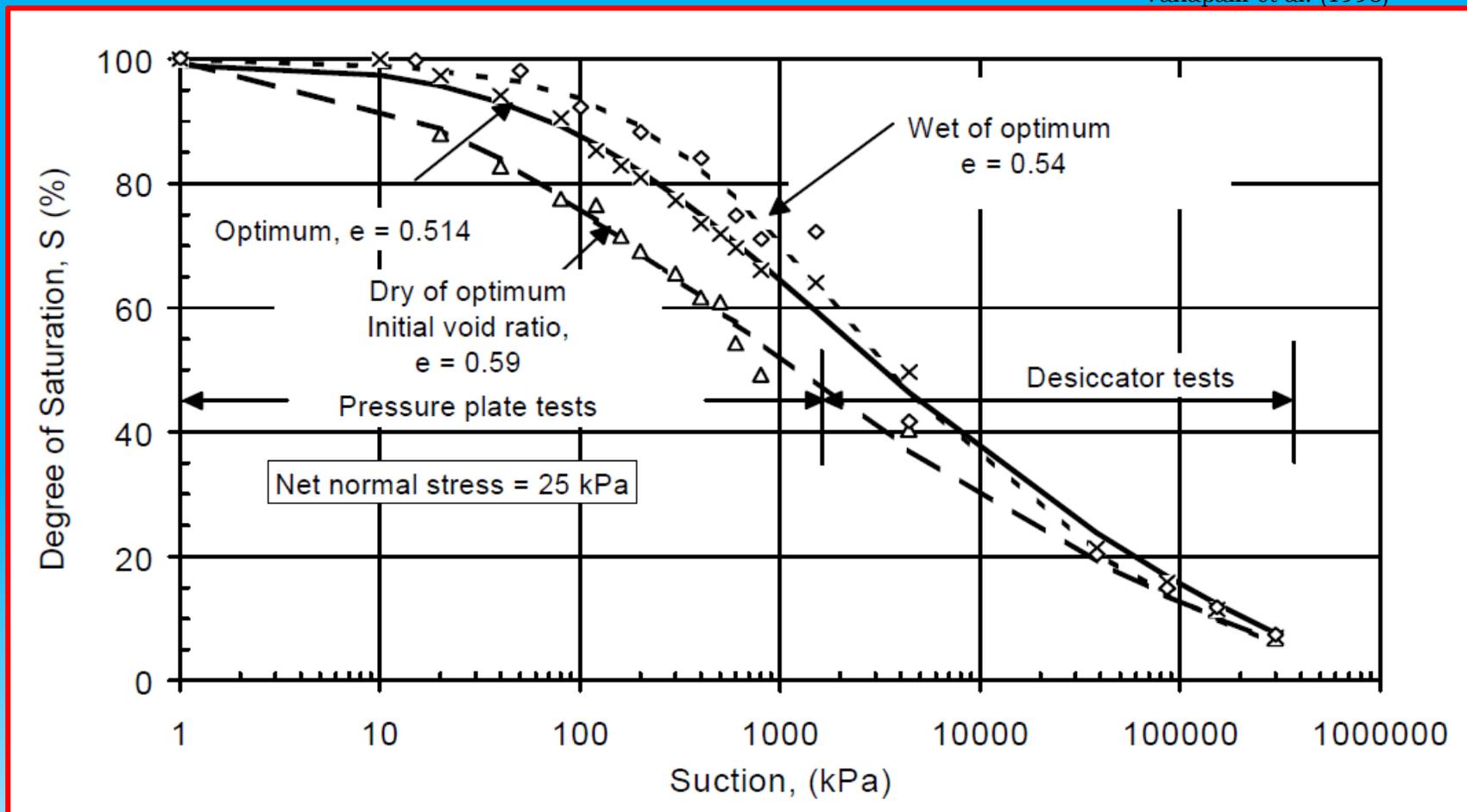
Seed & Chan (1959)



Seed & Chan (1959) modified by Leroueil & Hight (2013)

Efeitos da Compactação na Condição de Não Saturação

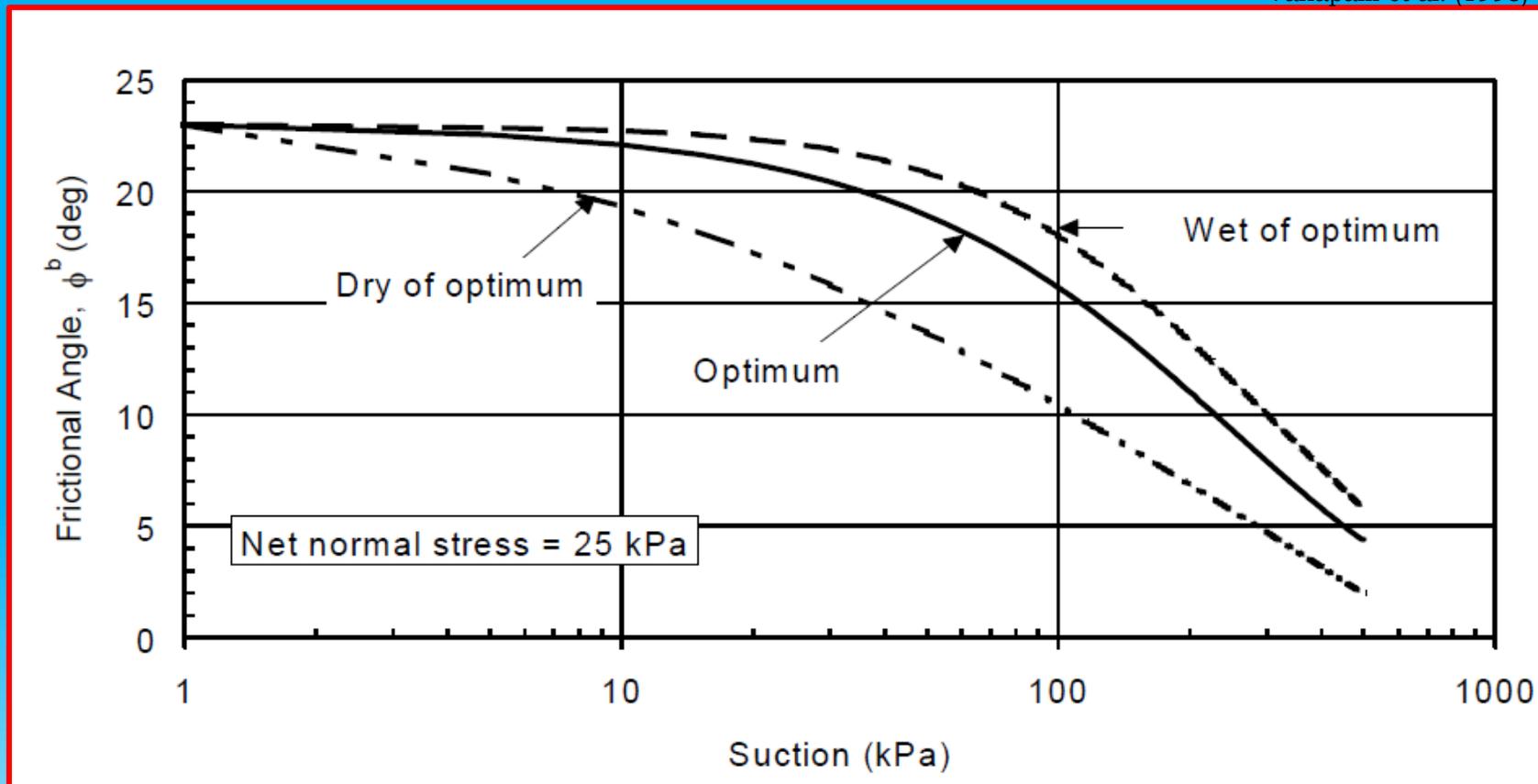
Vanapalli et al. (1998)



Curvas de Retenção de Água de Amostras Compactadas com Diferentes Teores de Umidade

Efeitos da Compactação na Condição de Não Saturação

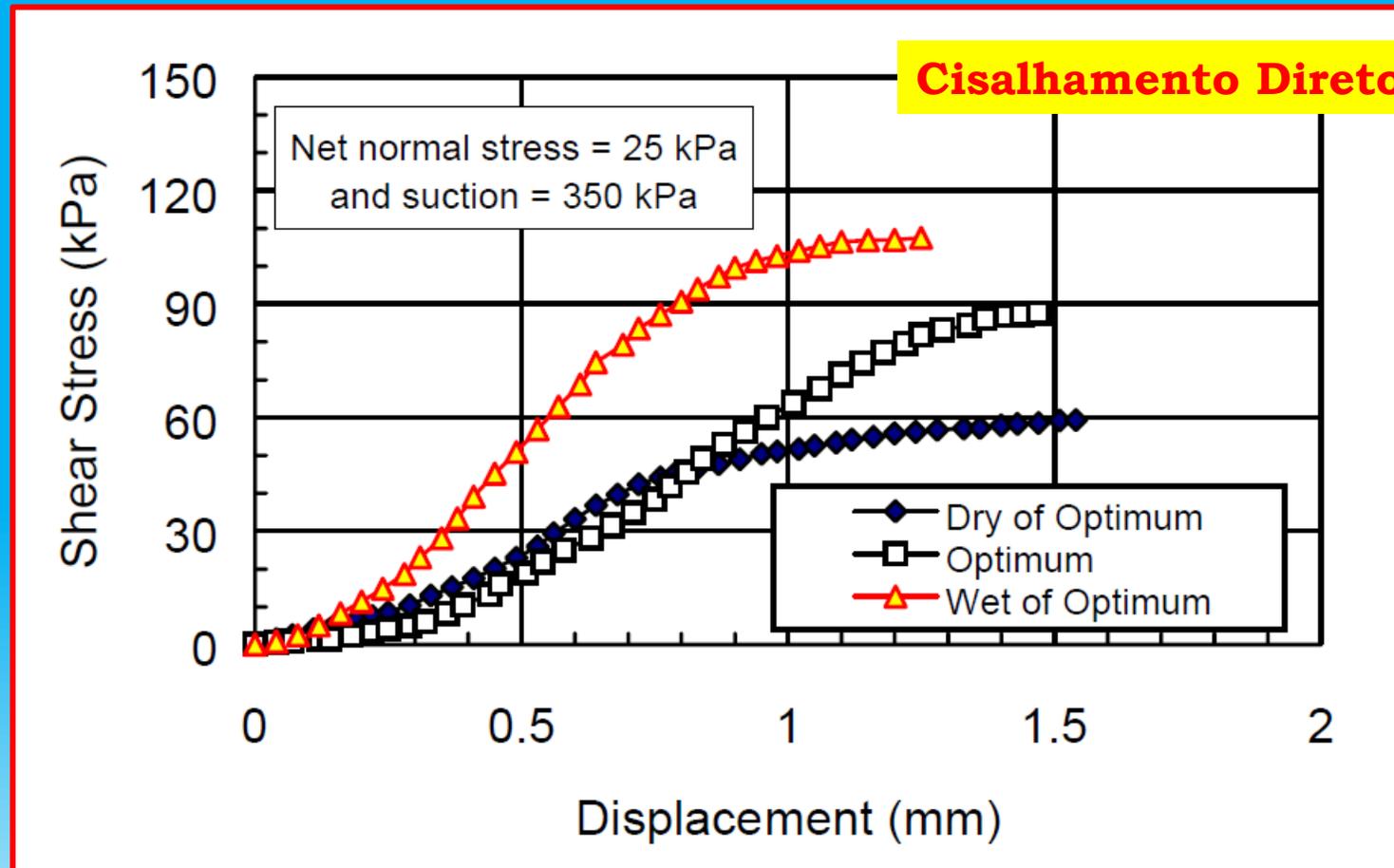
Vanapalli et al. (1998)



ϕ^b versus sucção, para uma tensão líquida normal de 25 kPa

Efeitos da Compactação na Condição de Não Saturação

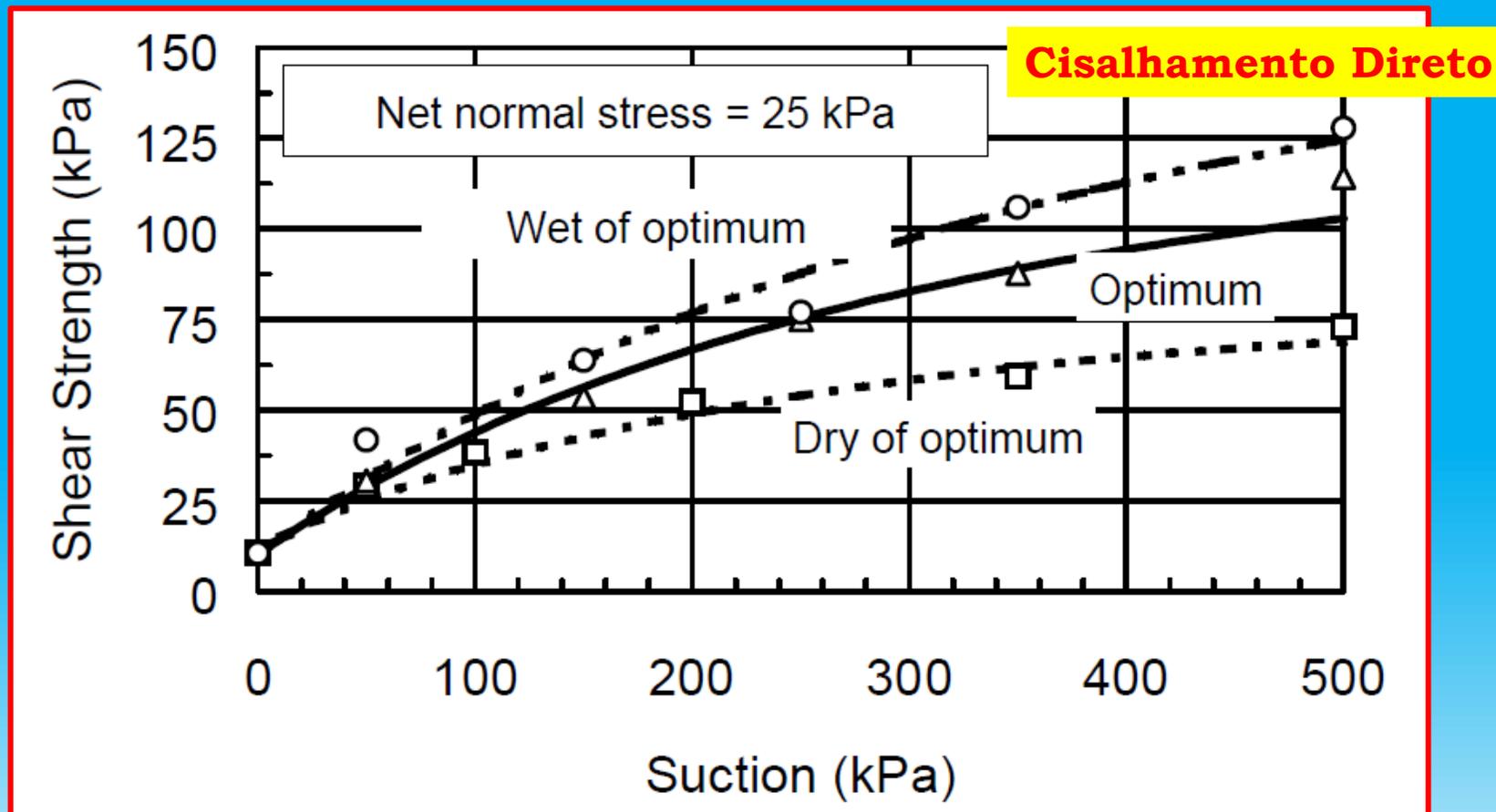
Vanapalli et al. (1998)



Tensão Cisalhante versus deslocamento horizontal

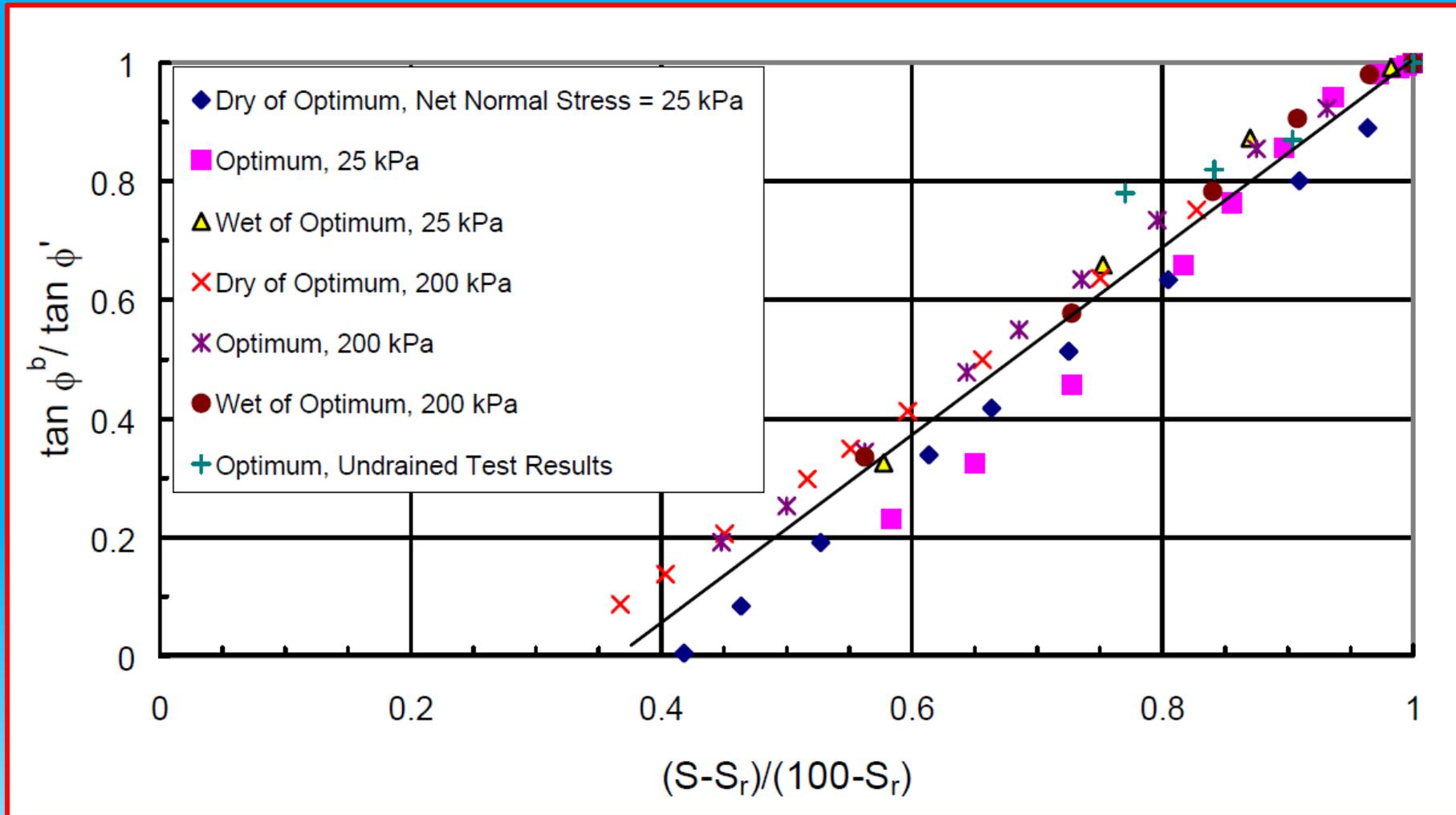
Efeitos da Compactação na Condição de Não Saturação

Vanapalli et al. (1998)

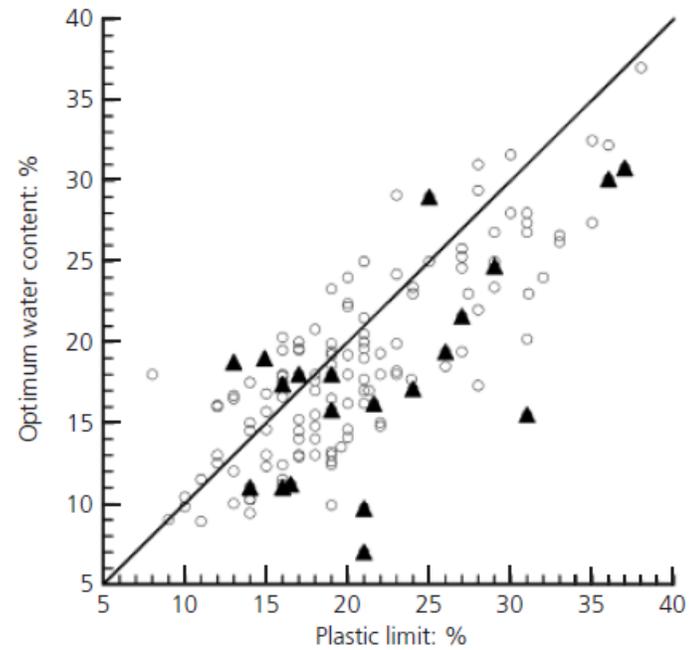


Resistência ao cisalhamento versus sucção para três condições de teor de umidade

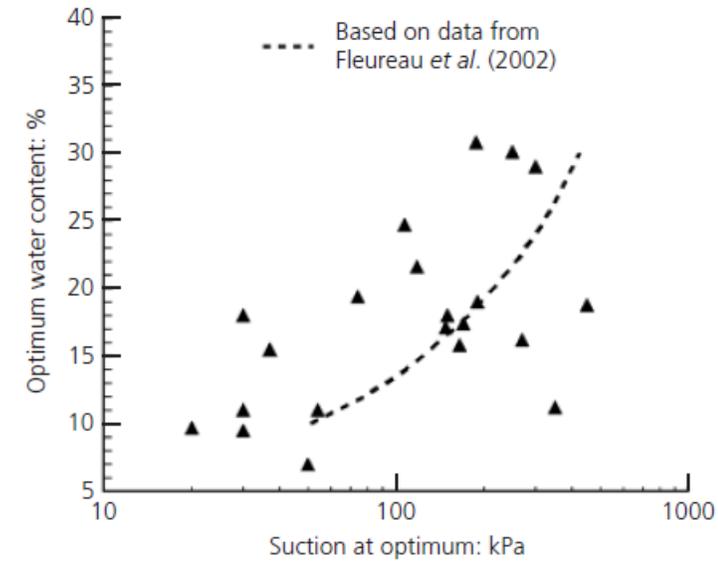
Efeitos da Compactação na Condição de Não Saturação



Correlação entre o teor de umidade ótimo, o limite de plasticidade e a sucção no teor de umidade ótimo

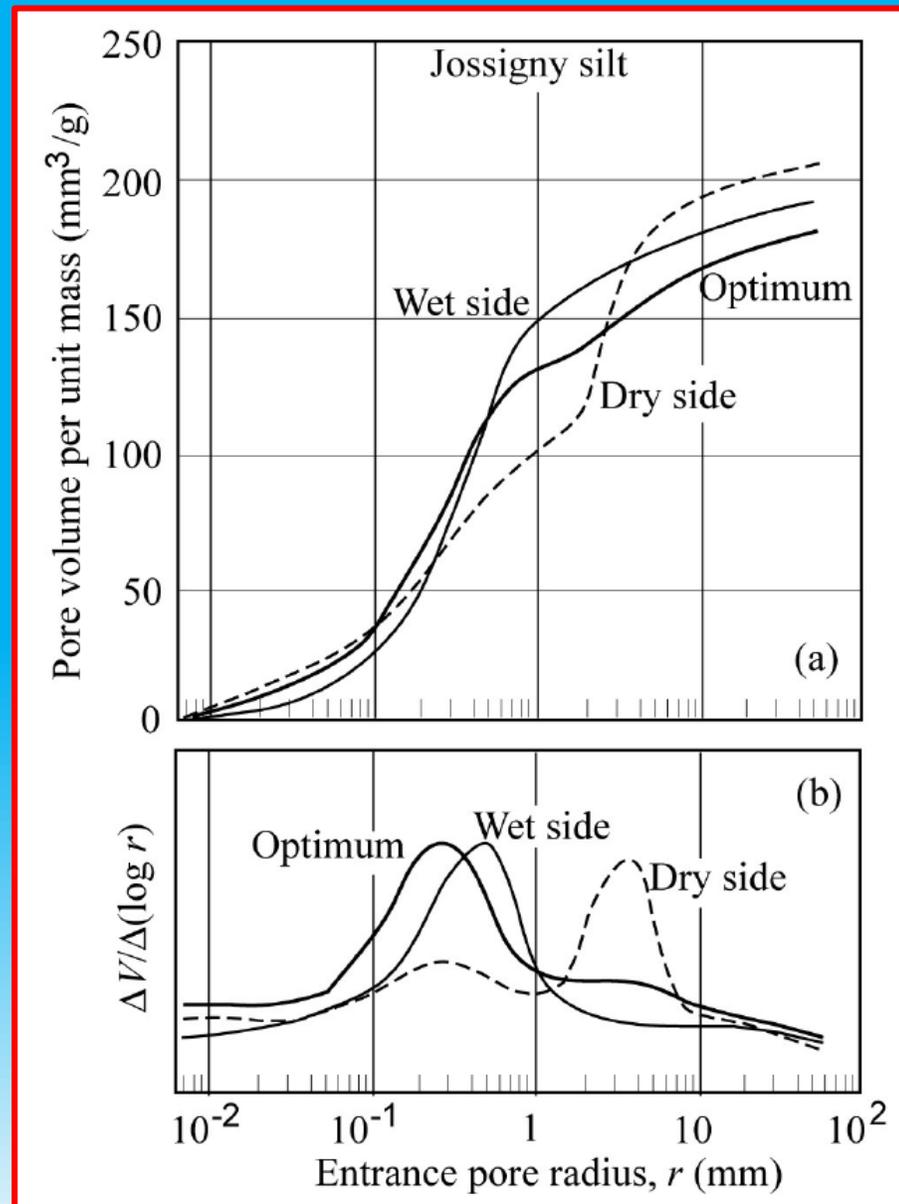


(a)

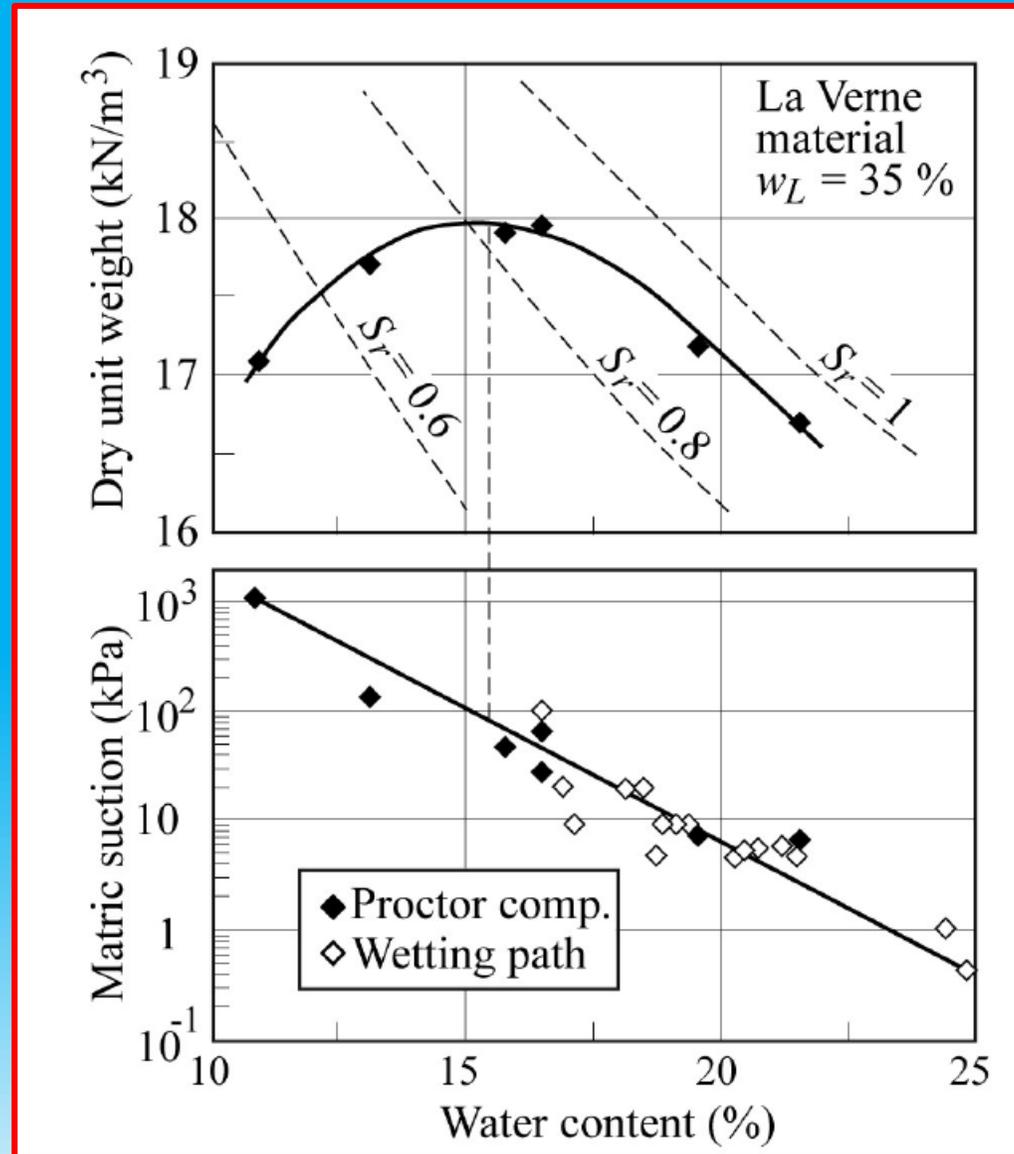


(b)

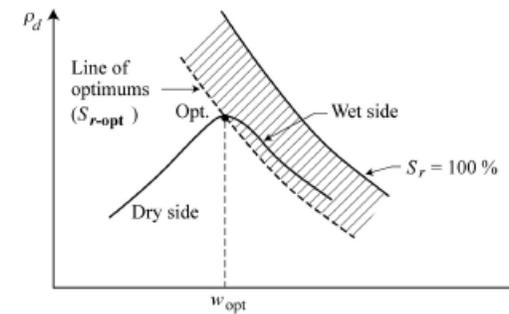
Efeitos da Compactação na Distribuição de Poros



Curva de Compactação e a sucção

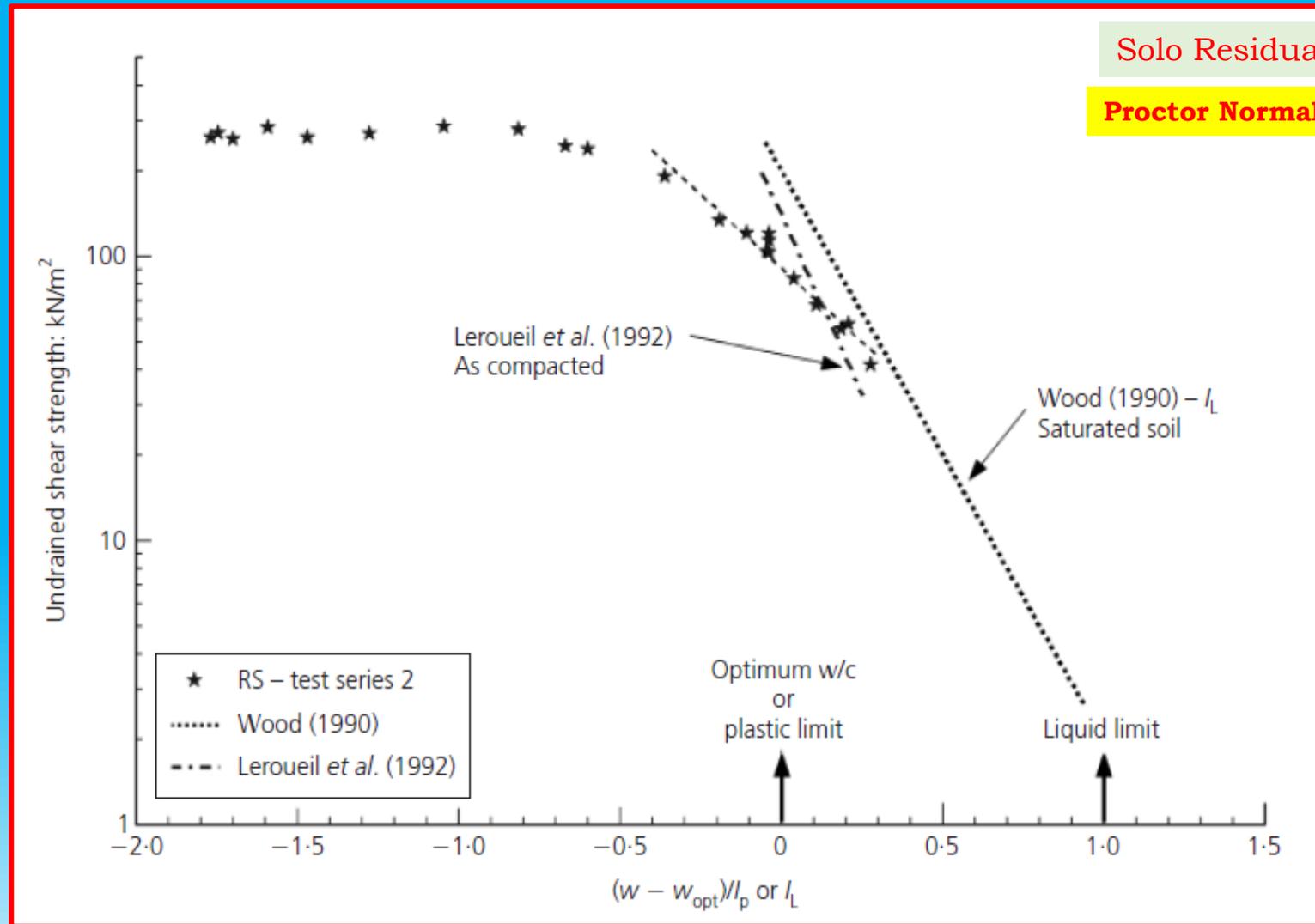


Síntese do comportamento do solos não saturados. Da compactação até a saturação



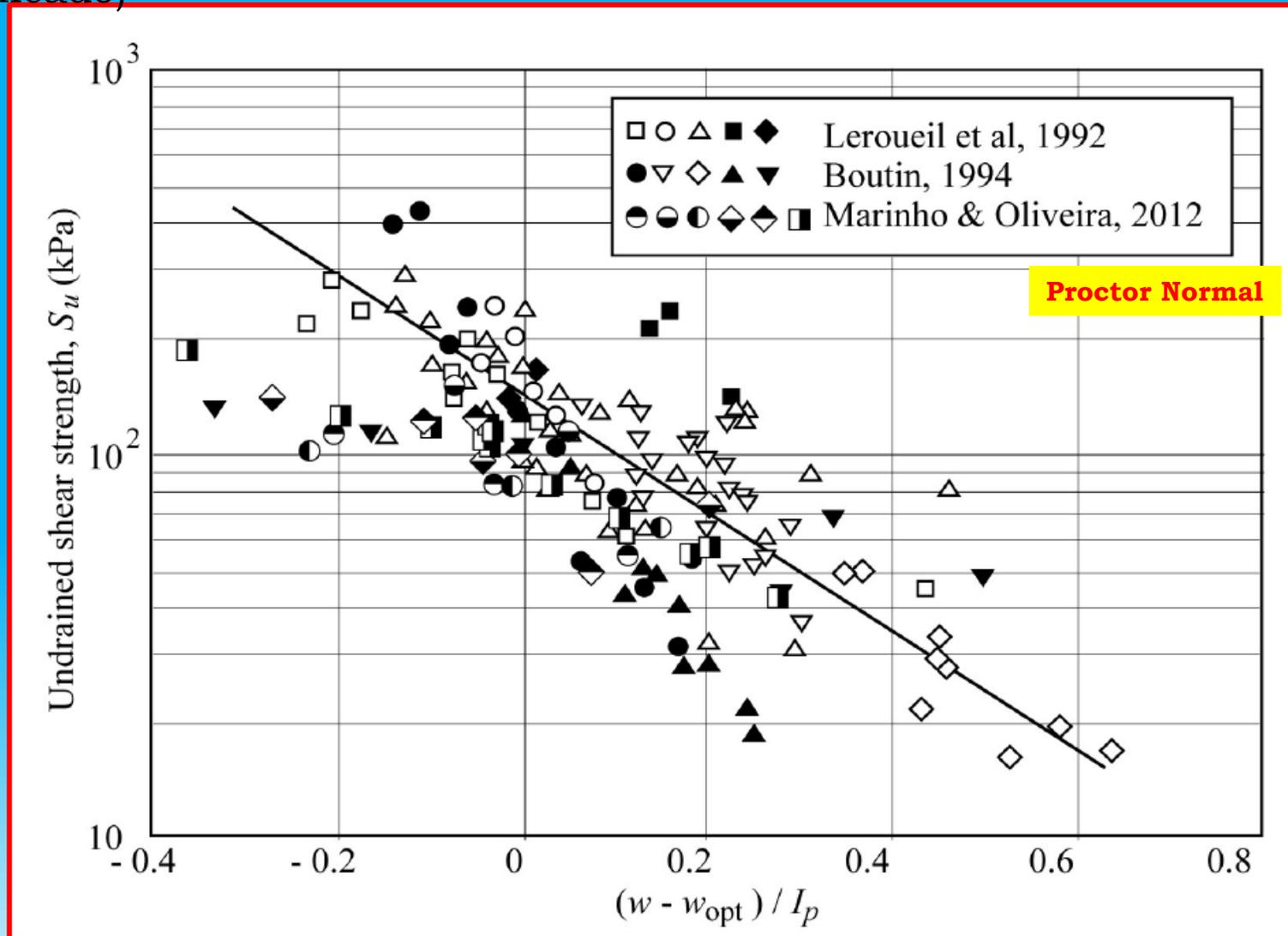
Dry side ($S_r < S_r\text{-opt}$)	Wet side ($S_r > S_r\text{-opt}$)
(a) After compaction	
<ul style="list-style-type: none"> • Relatively high suction • Aggregated fabric with large inter-aggregate pores • Continuous air phase • High values of air permeability • Mechanical behaviour controlled by unsaturated soil mechanics, i.e. by, inter alia, net stress ($\sigma - u_a$) and suction ($u_a - u_w$) 	<ul style="list-style-type: none"> • Relatively low suction • Homogeneous fabric with small pores • Occluded air • Very low air permeability • Mechanical behaviour controlled by effective stresses ($\sigma - u_w$) and a compressible pore fluid
(b) During wetting or submergence	
<ul style="list-style-type: none"> • Some air is displaced by the water front • Volume changes due to the decrease in suction 	<ul style="list-style-type: none"> • Most of air remains trapped • Relatively small volume changes
(c) After wetting or submergence: $S_{r\text{-sub}}$	
<ul style="list-style-type: none"> • The degree of saturation is larger than that after compaction ($S_{r\text{-sub}} > S_{r0}$ with $S_{r\text{-sub}}$ often close to the degree of saturation at the optimum) • Remaining air is occluded • Mechanical behaviour controlled by effective stresses ($\sigma - u_w$) and a compressible pore fluid 	<ul style="list-style-type: none"> • The degree of saturation is close to that after compaction ($S_{r\text{-sub}} \sim S_{r0}$) • Air remains occluded • Mechanical behaviour controlled by effective stresses ($\sigma - u_w$) and a compressible pore fluid
(d) After saturation: $k_{w\text{-sat}}$	
<ul style="list-style-type: none"> • $k_{w\text{-sat}}$ relatively high • Mechanical behaviour controlled by effective stresses and an incompressible pore fluid 	<ul style="list-style-type: none"> • $k_{w\text{-sat}}$ relatively low • Mechanical behaviour controlled by effective stresses and an incompressible pore fluid

Efeitos da Compactação na Condição de Não Saturação



Resistência não confinada versus o índice de liquidez (modificado)

Resistência não confinada versus o índice de liquidez (modificado)



Qual o teor de umidade que devemos usar?

