



Física do Solo
CCR/UFSM

Propriedades mecânicas

Compactação do solo

J. Miguel Reichert, PhD

(prof. R. Horn-Kiel Univ.; prof. M.K. Shukla-Arizona St. Univ.;
prof. Sivakugan; prof. J. Han- Univ. of Kansas)

Consistência do solo

CONSISTÊNCIA DO SOLO

Resposta do solo às forças externas que tentam deformá-lo ou rompê-lo.

Manifestação das forças de coesão e adesão sob diferentes condições de umidade.

CONSISTÊNCIA DO SOLO

➤ **COESÃO:** atração entre partículas de mesma natureza (S-S) devido a:

Atração eletrostática entre superfícies

Atração molecular (Van der Waals)

Materiais coloidais

$$f = \{ASE, H_2O, \text{distância, orientação}\}$$

➤ **ADESÃO:** atração entre partículas de natureza distinta (L-S) devido a:

Tensão superficial d'água (há necessidade ar)

Soil Plasticity

It is soils ability to change shape without cracking

It depends on clay content of soil

Sandy/coarse textured soils are not plastic

Plasticity Theories

1. Water Film Theory: soil cohesion depends on van der Waals forces, electrostatic forces, cation bridging, surface tension etc. water content increases soil cohesion decreases

2. Critical State Theory: Soil is deformed but does not change volume. Soil is plastic and at critical state

Atterberg Limits

Shrinkage Limit: It is the lower limit of soil moisture content at which no further change in soil volume occurs.

Lower Plastic Limit: Moisture content corresponding to lower limit of plastic range (suction of 500 to 2000 cm of water)

Cohesion Limit: moisture content at which crumbs of soil cease to adhere when placed in contact with one another

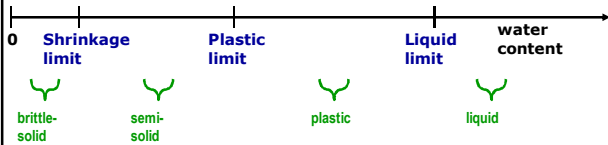
Sticky Limit: Lower limit of moisture content at which soil sticks to a steel spatula

Upper Plastic Limit: this is known as liquid limit or lower limit of viscous flow. Soil water mixture starts flowing at this stage.

Upper Limit of Viscous Flow: mixture of soil and water flows like a liquid

Atterberg Limits

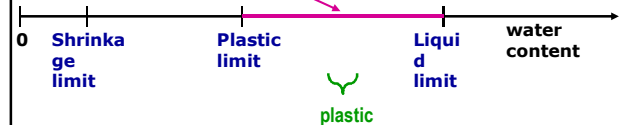
Border line **water contents**, separating the different **states** of a fine grained soil



Plasticity Index (PI)

≠ Range of water content over which the soil remains plastic

$$\text{Plasticity Index} = \text{Liquid Limit} - \text{Plastic Limit}$$



Atterberg Limits

Liquid Limit (w_L or LL):

Clay flows like liquid when $w > LL$

Plastic Limit (w_p or PL):

Lowest water content where the clay is still plastic

Shrinkage Limit (w_s or SL):

At $w < SL$, no volume reduction on drying

Soil Indices

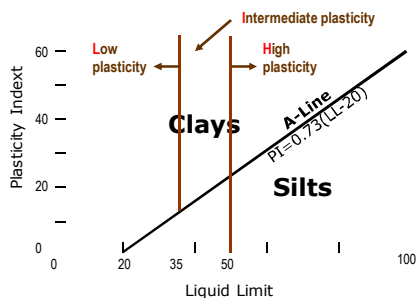
Plasticity Index: $PI = UPL - LPL$

Liquidity Index: $LI = [w(\%) - UPL] / PI$

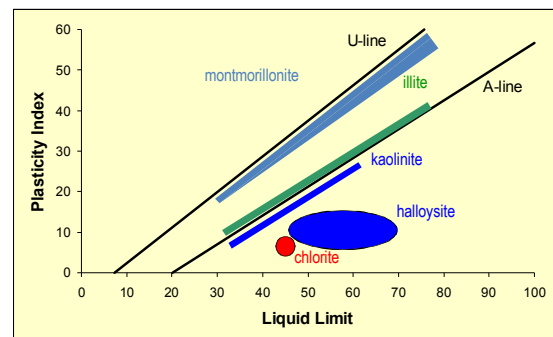
Activity Ratio: $AR = PI / \text{Clay content } (\%)$

Classifying Fines

Purely based on LL and PI



Casagrande's PI-LL Chart



Factors Affecting Atterberg's Limits

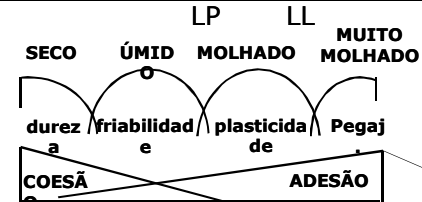
1. Clay Content
2. Clay Minerals
3. Exchangeable cation
4. Soil organic matter (no net effect)

Methods of Measurement

1. Casagrande Test
2. Drop-Cone test
3. Indirect methods:
 1. Proctor Test
 2. pF Curve
 3. Hydraulic Conductivity
 4. Viscosity
 5. Shear Strength

CONSISTÊNCIA DO SOLO

Estado de umidade	Seco	Úmido	Molhado		
Teores de água	Equilíbrio com o ar	Umidade equivalente	Capacidade de campo	Acima da capacidade de campo	Predomínio da fase líquida
Formas de consistência	Tenaz	Friável	Plástica	Aderente ou pegajosa	Fluída



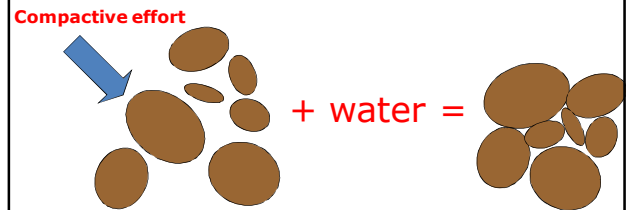
Compressibilidade

Cisalhamento

Compacção

What is compaction? (Sob a ótica da engenharia civil)

A simple **ground improvement** technique, where the soil is densified through external compactive effort.



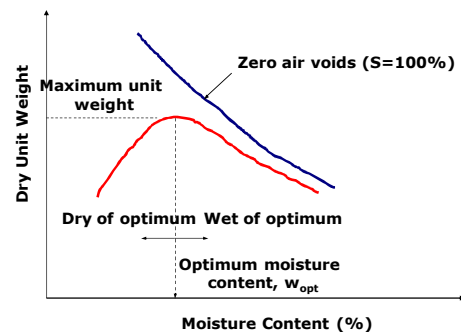
Compacção do solo (sob a ótica agrícola)

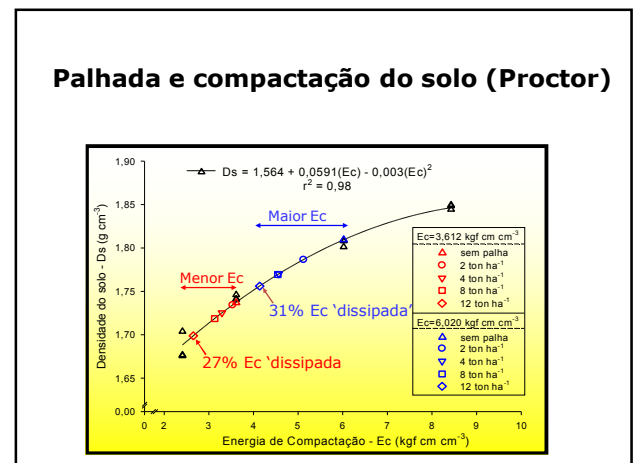
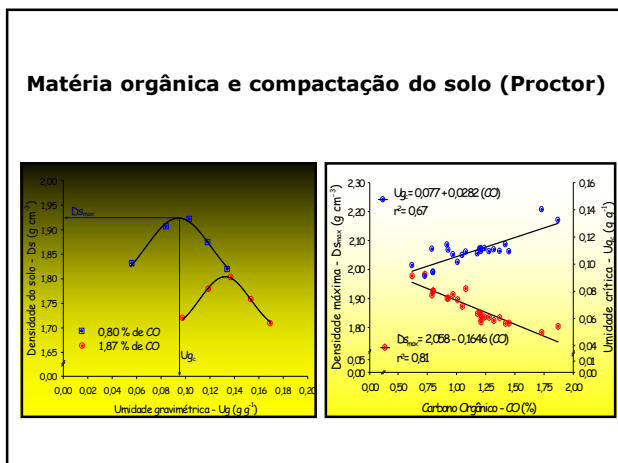
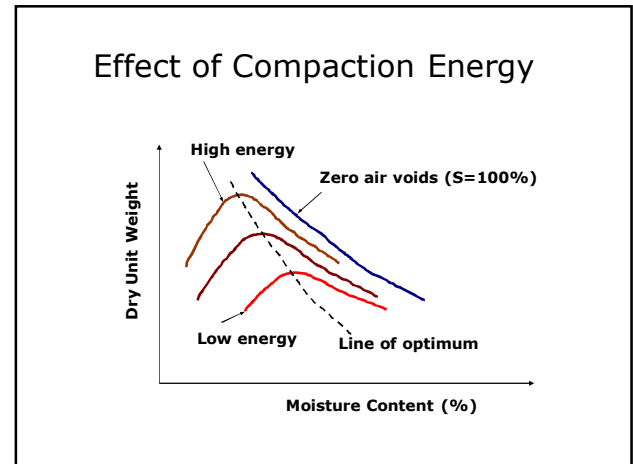
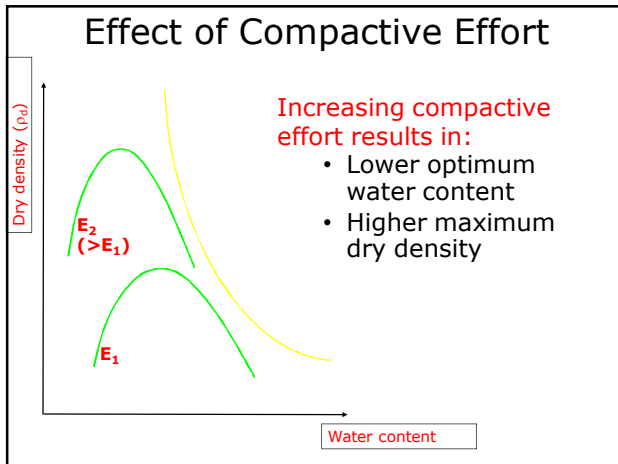
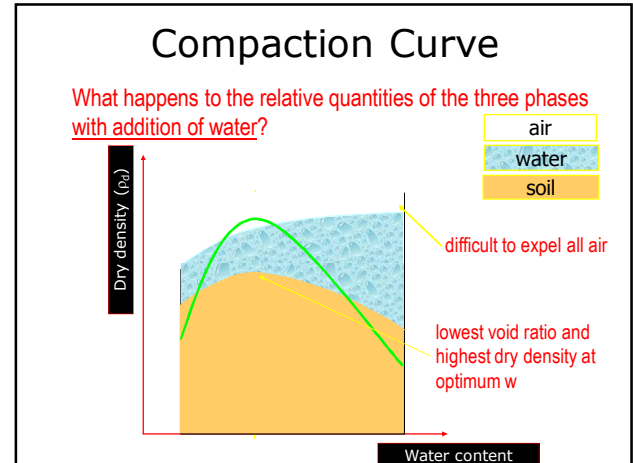
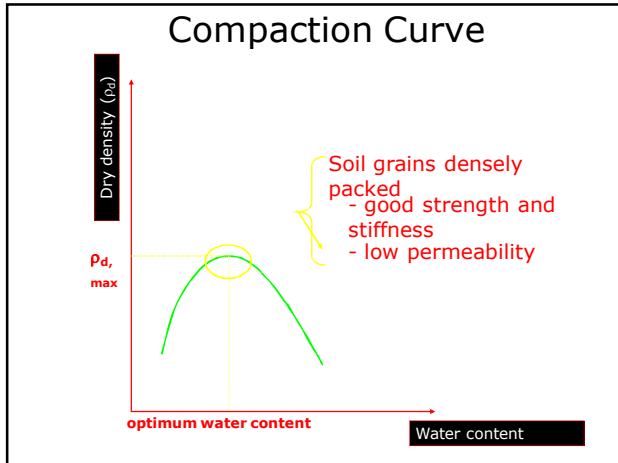
História das pressões associada aos valores de umidade do solo

=
Estado ou Nível de compactação

▲ = Forças compressivas **MENOS**
"Forças" descompactadoras
(manejo do solo!)

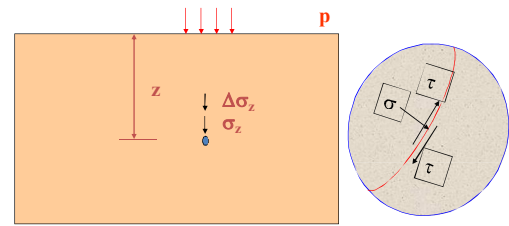
Compaction Curve





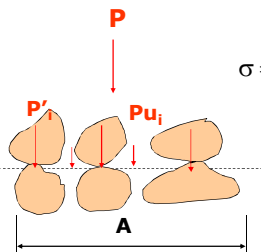
Tensões no Solo

Tensões no Solo



σ_z = Tensão in situ devido ao peso do solo
 $\Delta\sigma_z$ = Tensão adicional devido a cargas externas

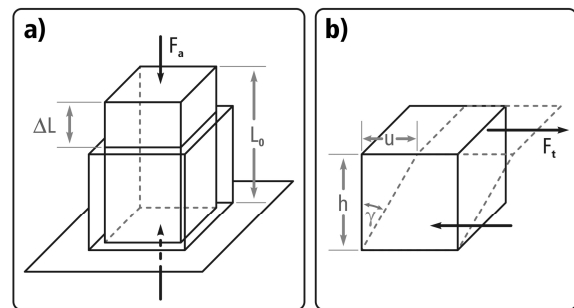
Tensão Total e Efetiva



$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{\sum P_i' + \sum P u_i}{A} = \sigma' + u$$

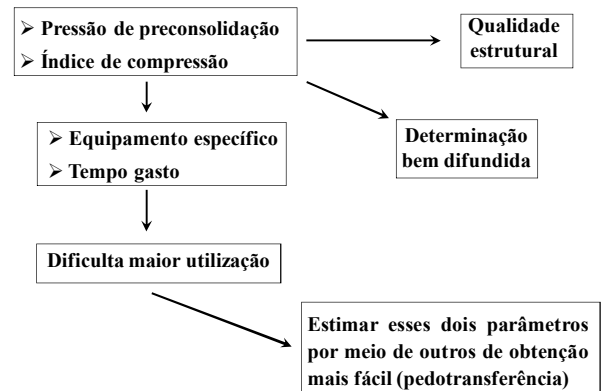
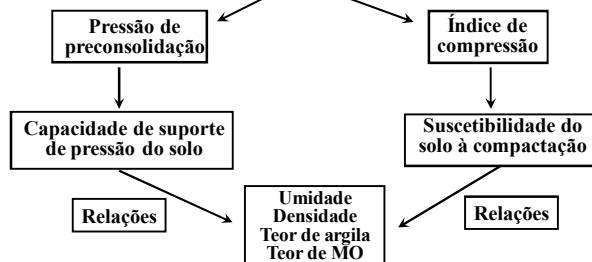
σ = tensão total;
 σ' = tensão efetiva
 u = potencial matricial
 (pore water pressure)

Deformação longitudinal de um corpo submetido a pressão axial e deformação angular



Pressão de preconsolidação e índice de compressão

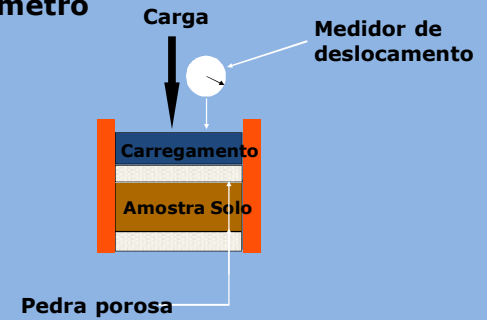
Estudos sobre compactação dos solos



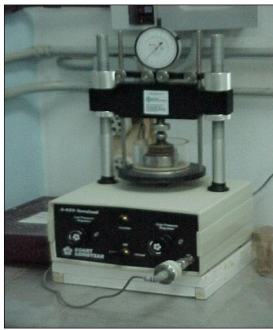
Compressibilidade do Solo

Ensaio de Compressibilidade

Oedômetro

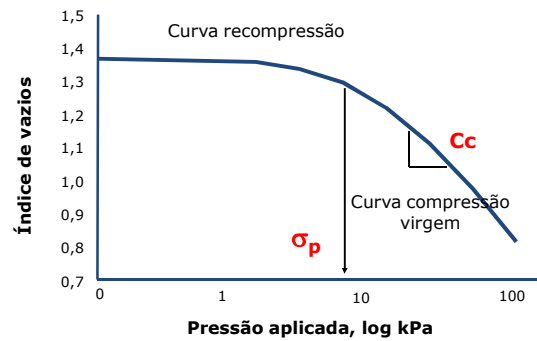


Compressibilidade

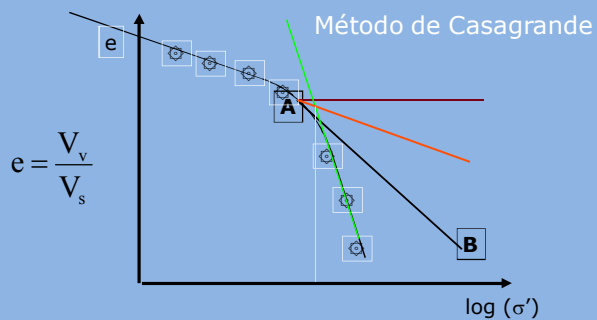


Prensa de adensamento uniaxial

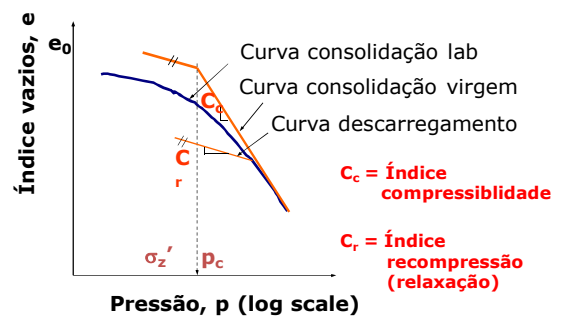
Compressibilidade



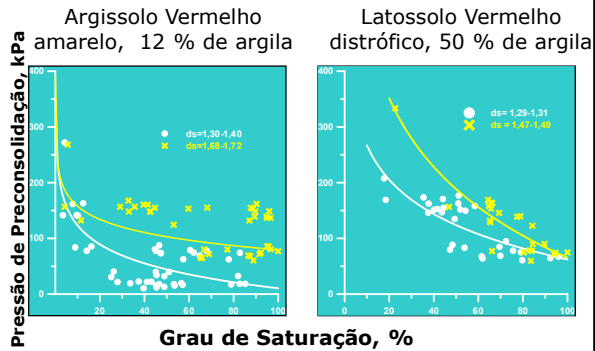
Estimativa da pressão de preconsolidação



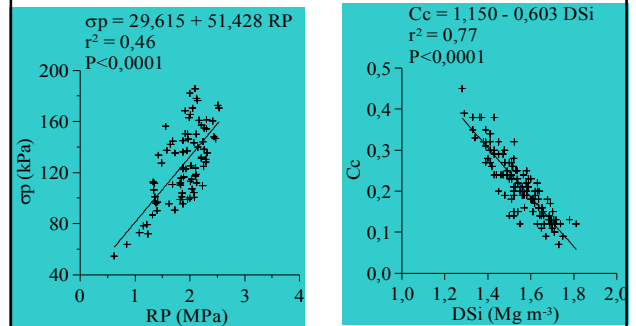
Curva e - log(p)



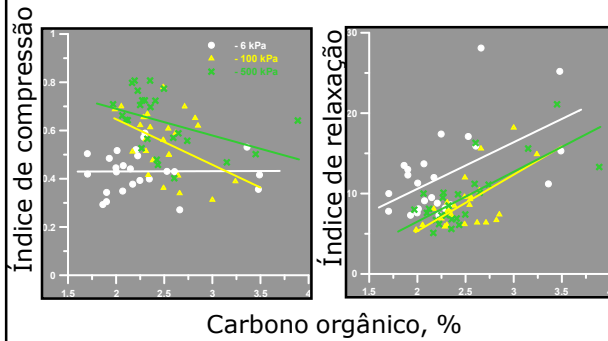
Capacidade suporte, densidade e saturação do solo



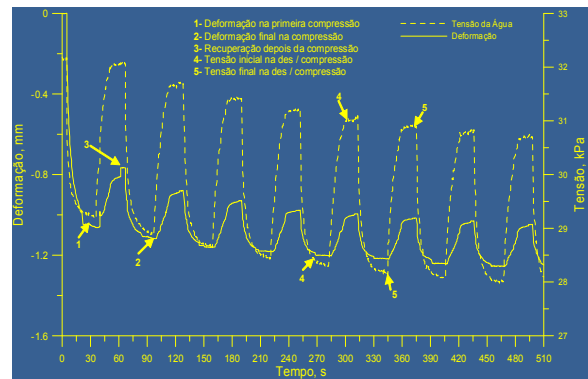
Pressão de preconsolidação e Coeficiente de compressão



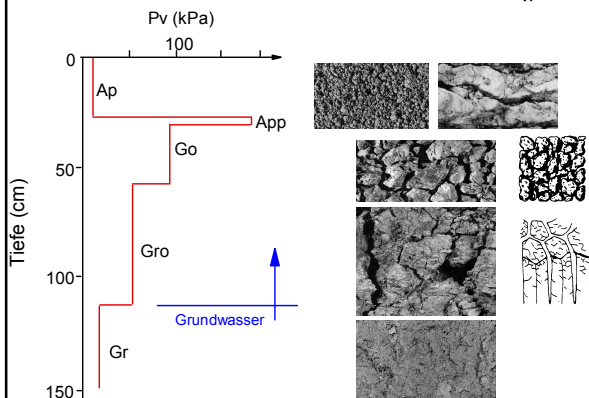
Matéria orgânica e compressibilidade do solo



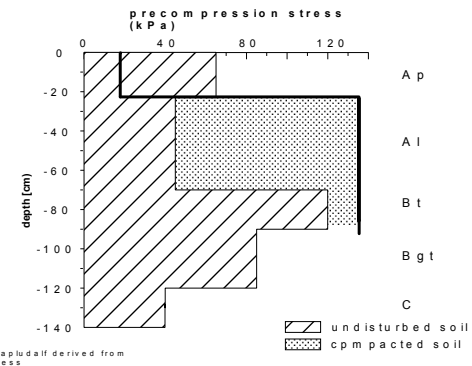
Compressibilidade cíclica



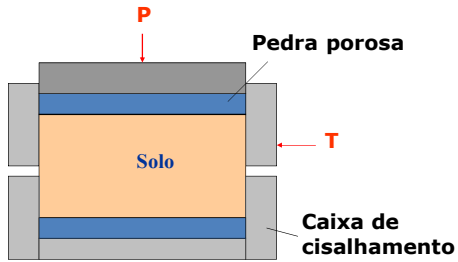
Precompression stress: chalk marsh under arable field conditions (pF 1.8)



Effect of soil development and anthropogenic activity on soil strength



Ensaio de Cisalhamento Direto



Tensão normal

$$\sigma_n = \frac{P}{A}$$

Tensão cisalhante

$$\tau = \frac{T}{A}$$

Cisalhamento



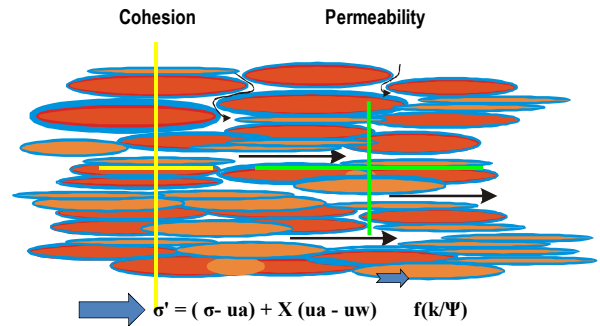
Prensa de cisalhamento direto



Ensaio Cisalhamento Direto



Structure orientation on soil properties in a plough pan due to shearing and compaction



Effect of stress application on pore functions

Mögliche Gefügestände ①-⑤

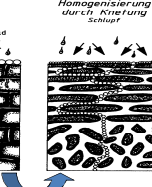
Soil deformation by compaction and shearing

Reduced hydraulic conductivity in combination with shear processes result in strength decline (=puddling)

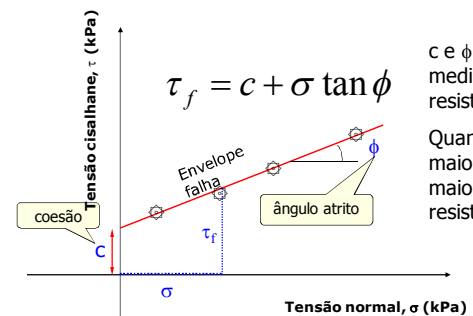


① dichteste Kugelpackung

③ Homogenisierung durch Knetung Schluff



Cr terio de falha de Mohr-Coulomb

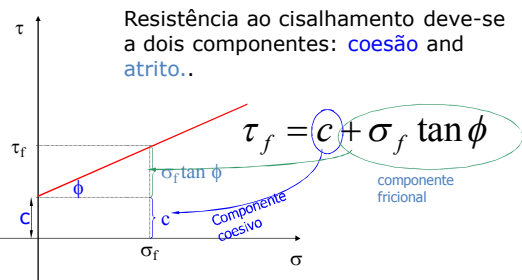


c e ϕ são medidas de resistência.

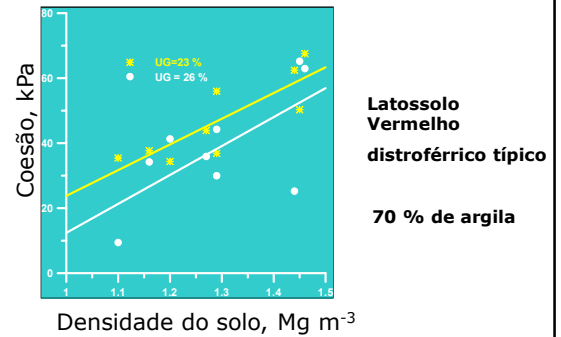
Quanto maiores, maior a resistência.

τ_f   a tensão cisalhante máxima que o solo suporta sem falhar, quando sujeito a uma tensão normal σ .

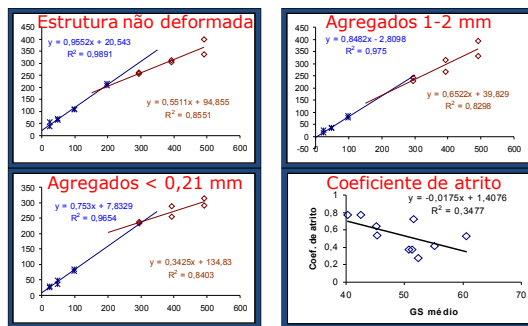
Cr terio de falha de Mohr-Coulomb



Coes o: efeito da densidade do solo

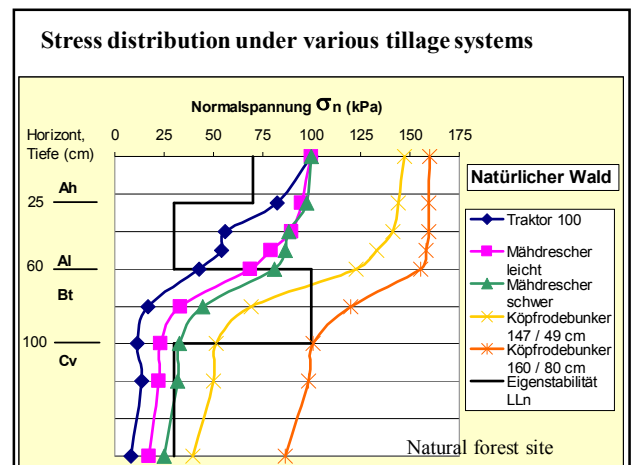
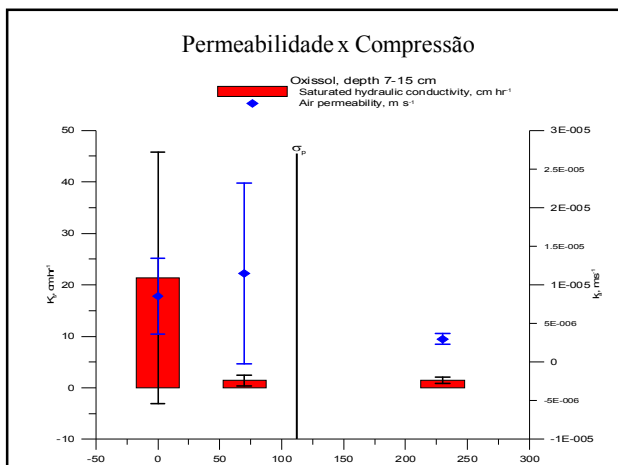
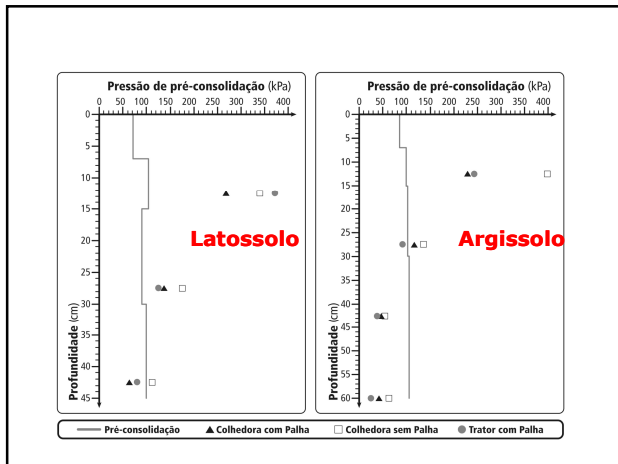
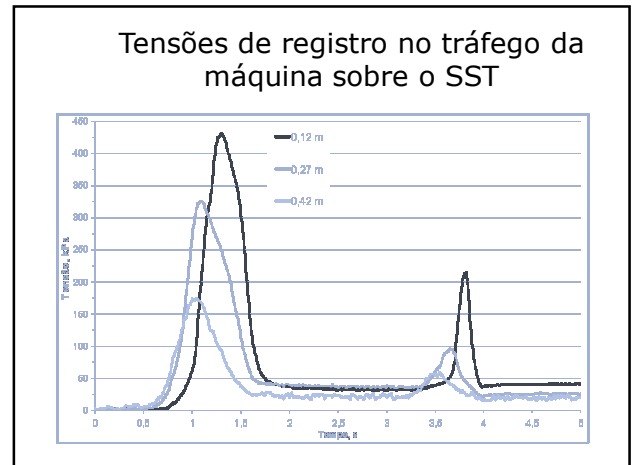
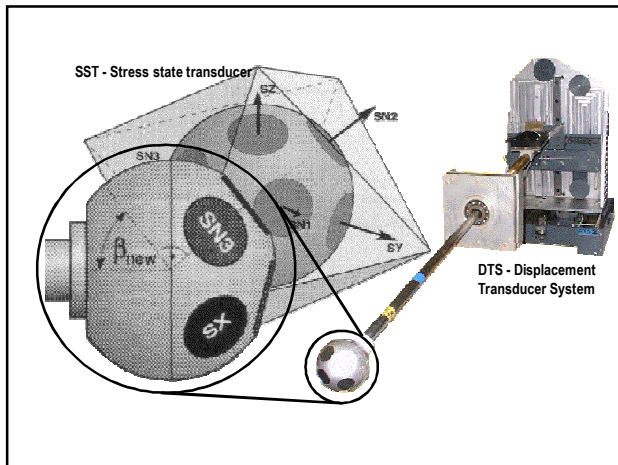


Coes o: efeito da mat ria orgânica do solo

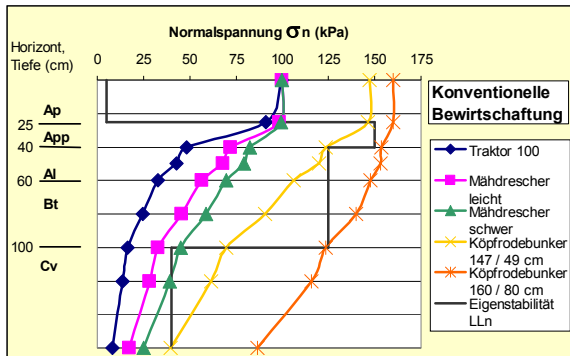


Transmiss o de Tensões no Solo

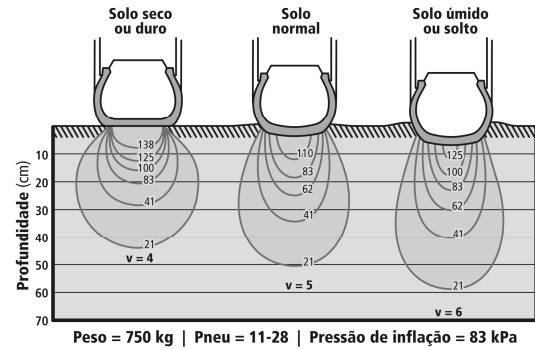




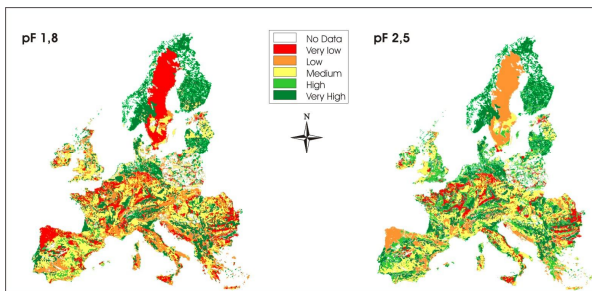
Stress distribution in arable soils



Compactação: tipo solo



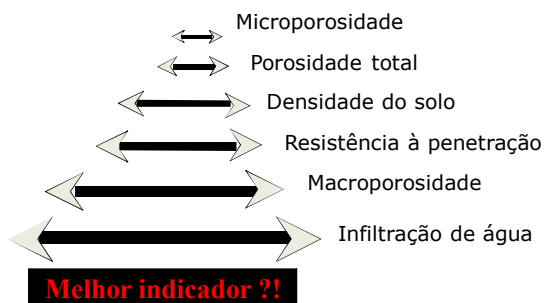
Mechanical strength (precompression stress) for subsoils (30-60 cm) European scale (1:1000000)



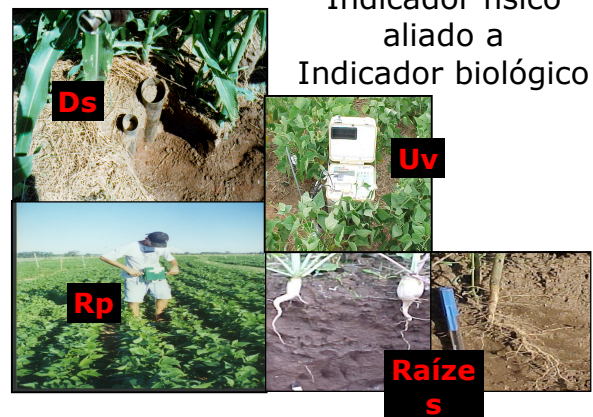
Estado de compactação

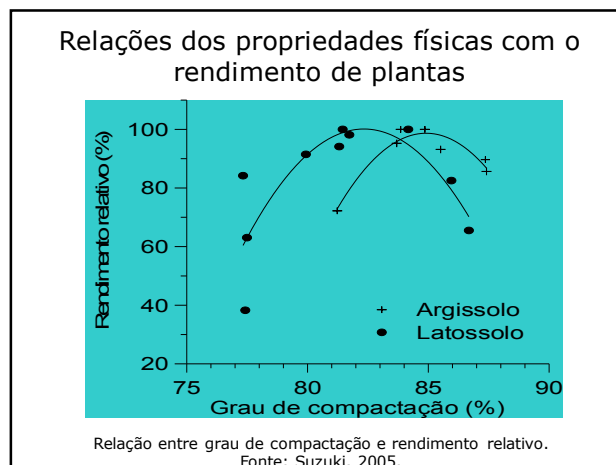
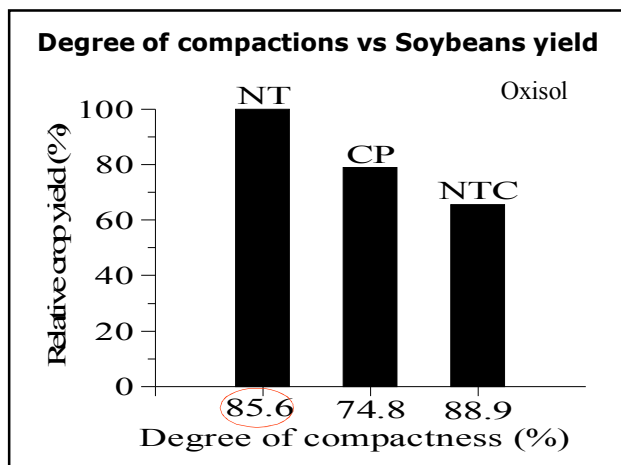


Compactação: Indicadores físicos



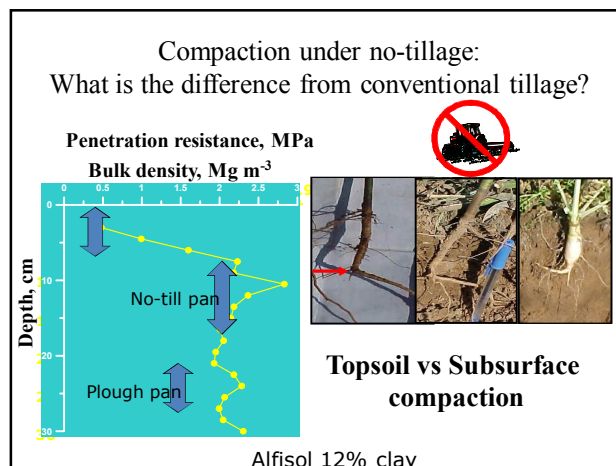
Indicador físico aliado a Indicador biológico





Relações das propriedades físicas com o rendimento de plantas

Solo muito solto Sem estrutura	Solo bem estruturado	Solo compactado Estrutura degradada
✓ Muitos torrões ✓ Baixa retenção de água ✓ Contato solo-semente deficiente ✓ Contato solo-raiz deficiente ✓ Suscetibilidade da cultura à seca	✓ Boa aeração ✓ Boa retenção de água ✓ Boa infiltração de água ✓ Diminuição de riscos da cultura à seca	✓ Baixa aeração ✓ Suscetibilidade da cultura à seca ✓ Restrições ao crescimento radicular ✓ Baixa infiltração de água-escoamento superficial



Degradação estrutural em pastagens

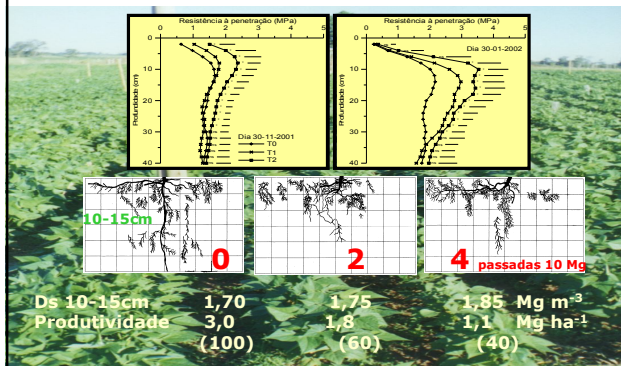
Pastoreio rotativo - 2h/piquete
Gado leiteiro
Pastagem: Trevo + tifton
Sem mobilização do solo
Latosso solo muito argiloso

Compactação superficial (5 cm)
 $D_s = 1,5\ Mg\ m^{-3}$
 $M_p = 5\ a\ 8\%$

Estado compactação x Rendimento culturas

- Trigo → redução (25%), por falta de oxigênio.
- Soja → menor resposta aos estados de compactação.
- Milho → redução (15%) do rendimento.
- Feijão redução até 60%, por doenças de raiz.

Compactação induzida & produtividade de feijão safra 2001/2002 (chuva escassa)



Compactação induzida & produtividade feijoeiro safra 2002/2003 (chuvas regulares)

Emergência = sem efeito significativo
Área foliar, Altura & Produtividade = efeito significativo

Treatamento	Compactação 2001 Soja	Compactação 2001 Feijão	Compactação 2002
		Mg ha^{-1}	
SPD	1,5 a	1,5 a	1,4 a
SPD + esc. + grad.	1,3 a	1,5 a	1,4 a
SPD + comp. ad.	0,6 b	1,1 a	0,6 b

Mitigação solos compactados

Via mecânica



Via biológica



Mitigação solos compactados



Melhoria da estrutura do solo sob SPD

Rotação de culturas + sistema radicular subsolante

Controle tráfego x umidade

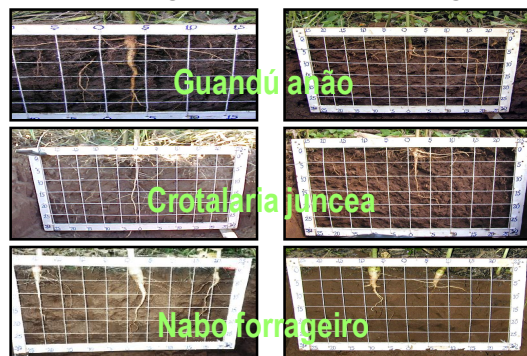
Raízes: rotação cultural e poros biológicos

Mecanismos sulcadores de semeadoras

Raízes plantas recuperadoras

Ds < 1,75 Mg m^{-3}

Ds > 1,85 Mg m^{-3}



Argissolo Vermelho Amarelo, 12 % de argila

Grau de compactação e densidade referência

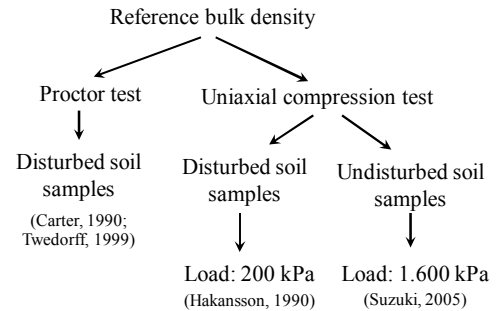
Degree of compactness

$$DC = BD / B_{dref} * 100$$

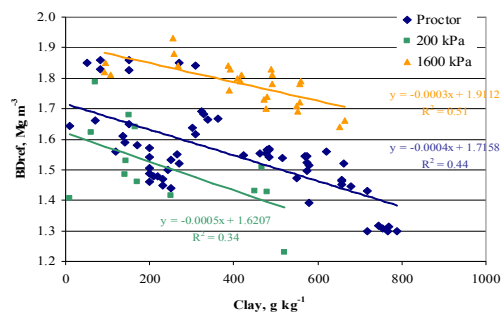
Current bulk
density

Bulk density in a
reference state

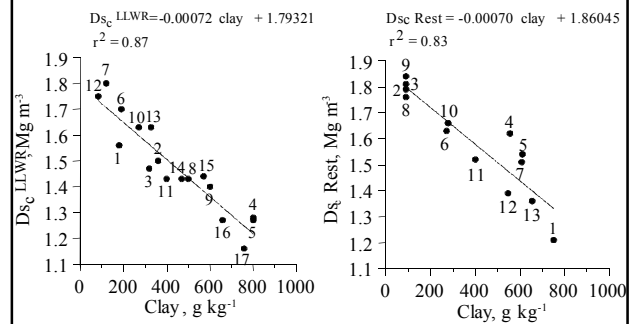
Grau de compactação e densidade referência



Grau de compactação e Opções de densidade referência



Densidade crítica com base no IHO e restrição às raízes



Qual densidade referência usar?

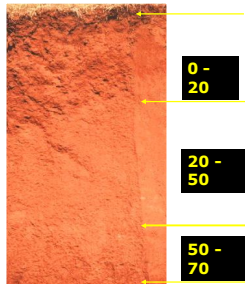
Ds referência	<u>Coef. angular</u>	<u>Intercepto</u>
IHO	-0.00072	<u>1.7932</u>
Restrição raízes	-0.0007	<u>1.8604</u>
1600 kPa	-0.0003	<u>1.9112</u>
Proctor	-0.0004	<u>1.7158</u>
200 kPa	-0.0005	<u>1.6207</u>

Exemplo de uso extensivo de indicadores físicos de QS

- Áreas irrigadas por aspersão
- Projeto Irriga – pivô central
- RS e Cerrados
- Planejamento da irrigação
- Caracterização dos solos

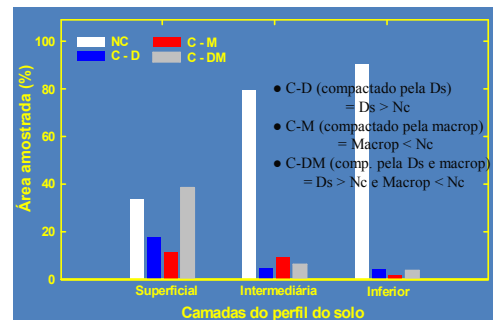
Coleta no campo:

- Uma trincheira a cada 40ha.
- Separação dos horizontes (camadas) do perfil do solo de acordo com a cor, espessura e textura (tato).
- Coleta realizada na metade de cada camada



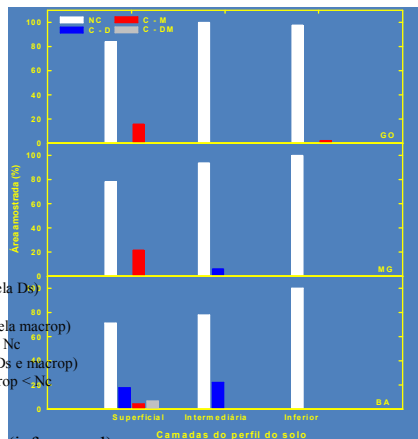
Fonte: Carlesso (inf. pessoal)

Situação no RS



Fonte: Carlesso (inf. pessoal)

Situação nos Cerrados



- C-D (compactado pela Ds) = $D_s > N_c$
- C-M (compactado pela macrop) = $Macrop < N_c$
- C-DM (comp. pela Ds e macrop) = $D_s > N_c$ e $Macrop < N_c$

Fonte: Carlesso (inf. pessoal)

Considerações

Na agricultura, procura-se desenvolver e adotar manejos e tecnologias que contribuam para a sustentabilidade dos agroecossistemas.

➤ Essa contribuição pode e deve ser monitorada através de indicadores de qualidade do solo, os quais devem ser integradores de processos e relacionarem-se claramente com funções do solo.

➤ A integração de três propriedades do solo para formar o intervalo hídrico ótimo e, a partir dele, estabelecer a densidade crítica do solo para o desenvolvimento de plantas é um avanço na área de biofísica do solo.

➤ Contudo, indicadores mais simples e de fácil obtenção devem ser usados para orientar a tomada de decisão no campo, por extensionistas e consultores agrícolas.

Considerações

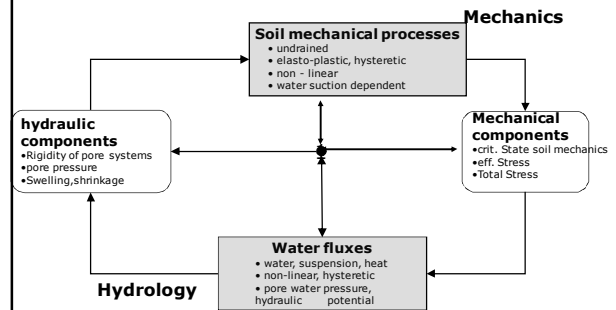
- Estratégias mais simples envolvendo a avaliação qualitativa do solo, que permitam ao técnico e ao agricultor visualizar aspectos do solo limitantes ao crescimento das plantas e a qualidade ambiental são apontadas.
- Essas estratégias, embora simples, normalmente não são utilizadas.
- Um bom indicador de qualidade física do solo é a distribuição das raízes das plantas, visualizadas em trincheiras abertas próxima às plantas em pleno florescimento. Uma pá, um canivete e um observador atento são suficientes para avaliar a dimensão vertical (em profundidade), onde a qualidade do solo se expressa.

Fronteiras ?!

Algumas Fronteiras (prof. Mitchell-USA)

- ❖ Micro-mecânica
- ❖ Nano-tecnologia
- ❖ Processos biológicos
- ❖ "Seeing into the earth"
- ❖

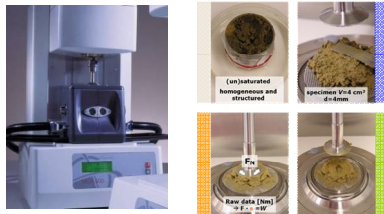
CONCEPTUAL MODEL OF COUPLED MECHANICAL AND HYDRAULIC PROCESSES



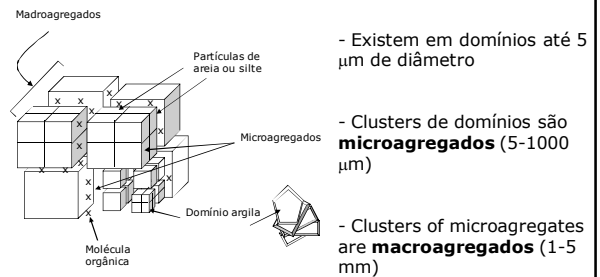
Richards et al 2000

Microestrutura - Reologia do solo

A partir da relação tensão-deformação em condição de oscilação, com deformação predefinida γ (amplitude de varredura), parâmetros específicos tais como o **módulo de armazenamento G'** , representando a elasticidade, dureza ou rigidez do material, e o **módulo de perda G''** (parte viscosa), **viscosidade η** , **tensão de escoamento** (intersecção de G' com G''), área de escoamento e a região de deformação viscoelástica linear.



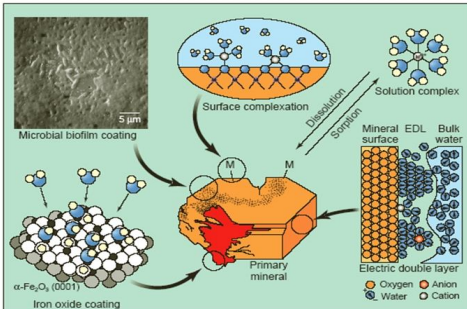
"Nature has been practicing nano-technology since the beginning of the Universe." Navrotsky (2003)



Clay Domain Theory (Williams et al., 1967)

A interação do solo ou rocha com fluidos (e.g., intemperismo) é um fenômeno de nano-superfície.

Brown, G.E. (2001), "How Minerals React with Water," Science, 294, pp. 67-69



A complex interface. This mineral-aqueous solution interface shows microbial biofilm and iron oxide coatings and some of the molecular-scale processes occurring at this interface, including interaction with water, sorption or surface complexation of aqueous metal ions, and dissolution. Also shown is a model of the EDL.

O quê nos espera ...

"Predictions are very difficult – especially about the future"

(Neils Bohr)

- ❖ "Heavier than air flying machines are impossible."
(Lord Kelvin, 1895)
- ❖ "I think there is a world market for maybe five computers."
(Thomas Watson, Chairman of IBM, 1943)
- ❖ "We don't like their sound, and guitar music is on the way out."
(Decca Records rejection of the Beatles, 1962)
- ❖ "640 K ought to be enough for anybody."
(Bill Gates, 1981)



Próximo assunto:

Água no solo