



III Conferência Internacional de Gestão de Resíduos da América Latina

Novos Conceitos e Critérios Técnicos aplicados ao projeto de destinação de Resíduos Sólidos: Parâmetros Geomecânicos



Miriam Gonçalves Miguel

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

Objetivos

Apresentar alguns dos **parâmetros geomecânicos** dos resíduos sólidos urbanos (RSU) com base nos conceitos da **Mecânica dos Solos**, considerando as peculiaridades destes resíduos.

Conteúdo

- a) Compactação;
- b) Permeabilidade;
- c) Recalques;
- d) Resistência ao Cisalhamento;
- e) Considerações Finais.

Geomecânica dos RSU

Projetos de Aterros Sanitários

Necessidade do conhecimento do comportamento geomecânico dos resíduos sólidos urbanos (RSU), utilizando os modelos da Geotecnia e considerando peculiaridades destes resíduos.



(Boscov, 2008)

Geomecânica dos RSU

Porém, os modelos da Geotecnia não são apropriados:

- Características e propriedades do RSU diferem das dos solos;
- Dificuldade de obtenção das propriedades geomecânicas destes resíduos:



(Boscov, 2008)

Heterogeneidade

Geomecânica dos RSU



Difícil obtenção de amostras de RSU representativas



Alterações das propriedades com o tempo

Compactação

Compactação dos Solos

Aplicação de uma energia mecânica no solo, de curta duração, que acarreta redução de seus vazios devido a expulsão de ar.

Proporciona:

- Aumento de resistência;
- Diminuição da permeabilidade;
- Diminuição da compressibilidade;

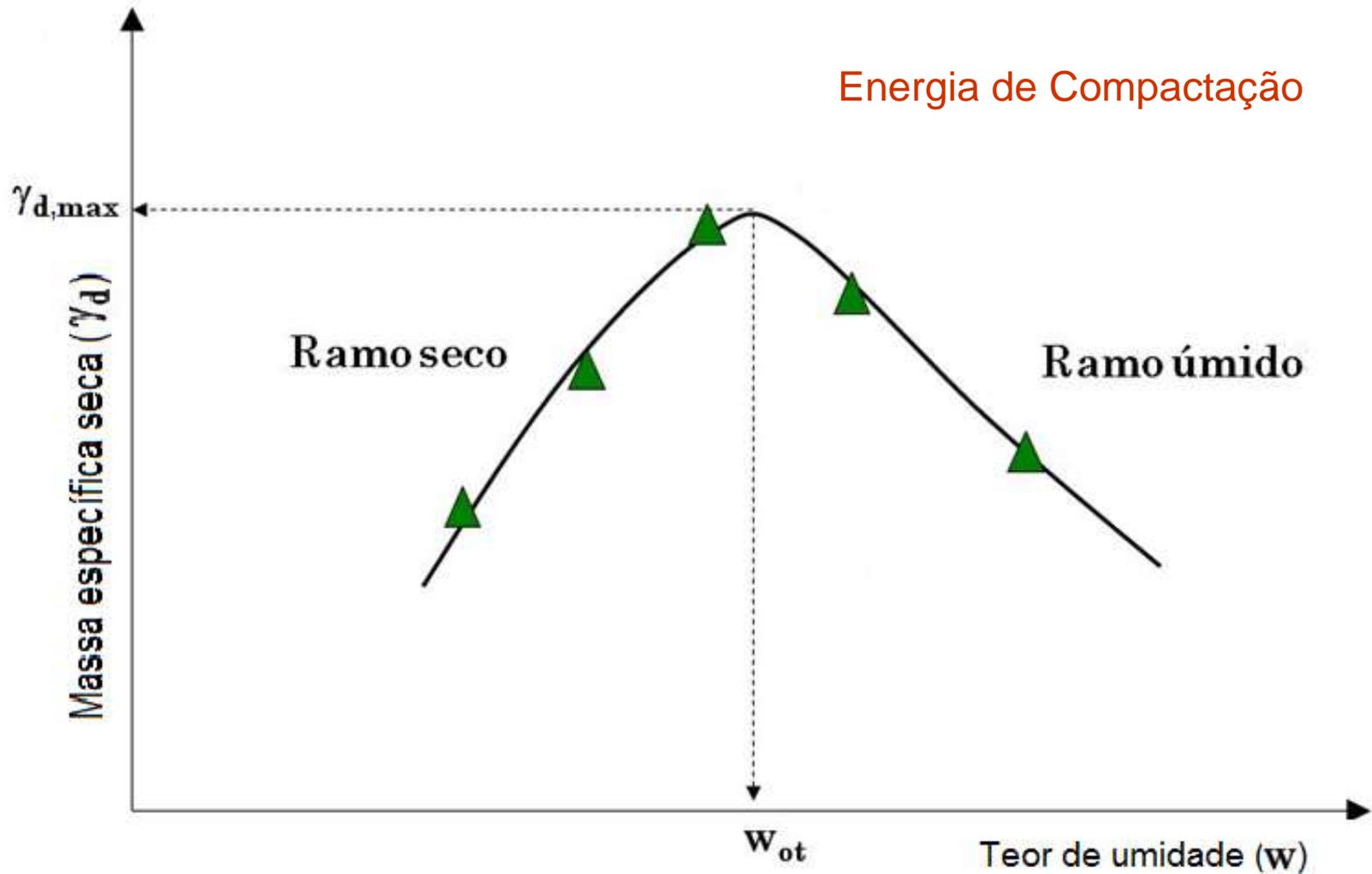


Compactação dos RSU

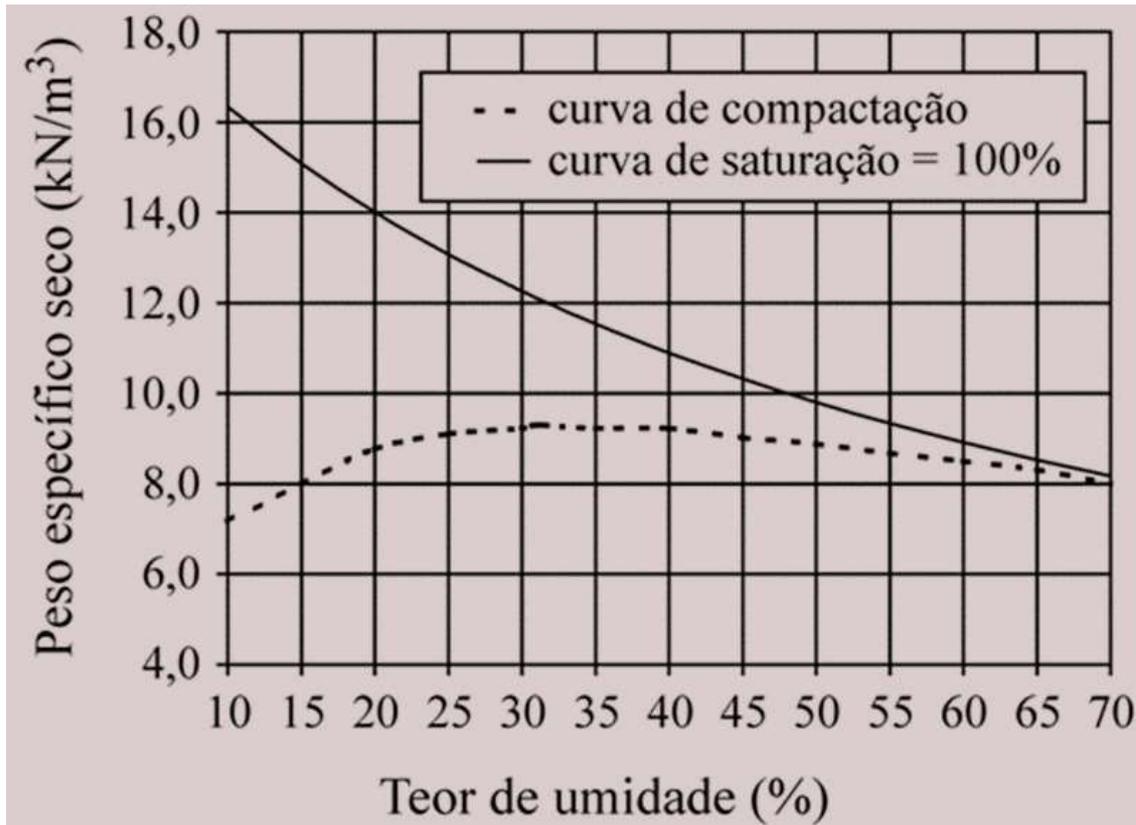
- Expulsão dos líquidos presentes nos resíduos durante a operação de compactação;
- Redução dos vazios e consequente diminuição da permeabilidade do maciço;
- Redução da quantidade de líquidos percolados;



Curva de compactação de solos



Curva de Compactação de RSU Obtida em Laboratório (Gabr & Valero, 1995).

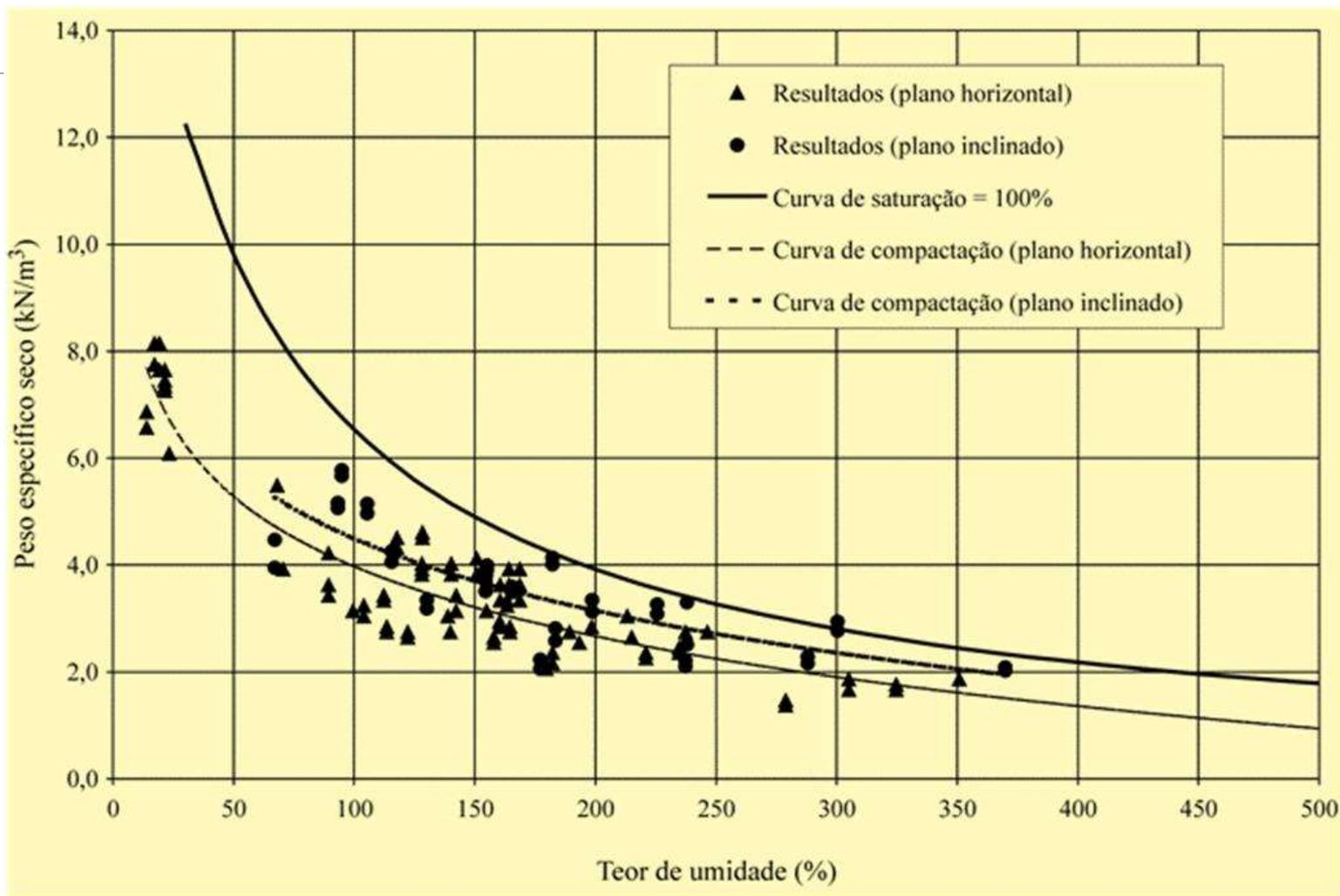


Resíduos domiciliares com idade entre 15 e 30 anos

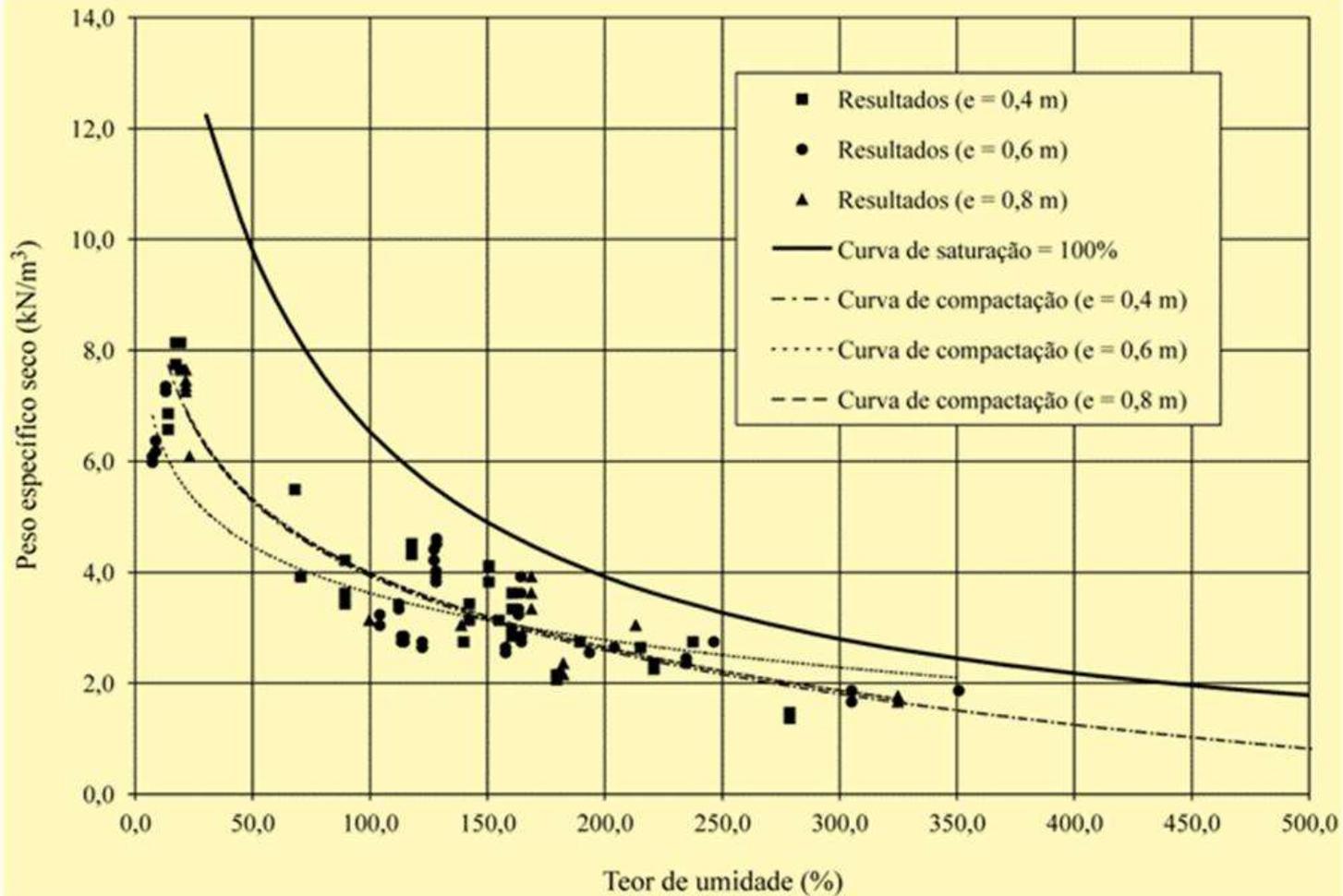
$$\gamma_{d,\max} = 9,3 \text{ kN} / \text{m}^3$$

$$w_{\text{otimo}} = 31\%$$

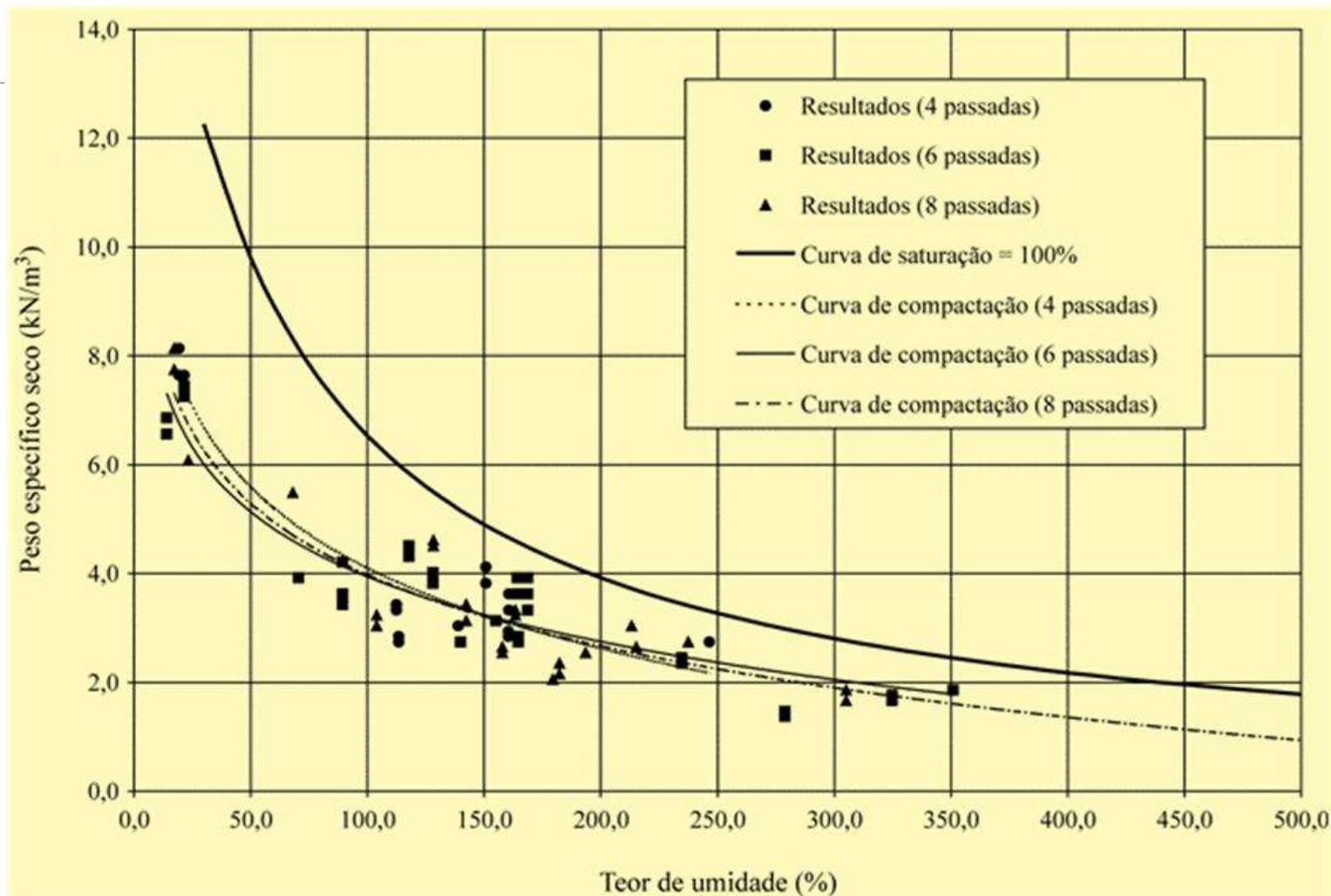
Relação Teor de Umidade x Peso Específico Seco para Diferentes Planos de Compactação Utilizando Trator de Esteiras Tipo D6. (Marques et al., 2002).



Relação Teor de Umidade x Peso Específico Seco para Diferentes Espessuras de Camadas, Obtidas em Plano Horizontal, com Equipamento Trator de Esteiras Tipo D6 (Marques et al., 2002).



Relação Teor de Umidade x Peso Específico Seco para Diferente Número de Passadas do Equipamento Trator de Esteiras Tipo D6, em Plano Horizontal (Marques et al., 2002).



Permeabilidade

Permeabilidade dos Solos

Permeabilidade \Rightarrow propriedade que expressa a maior ou menor facilidade que a água tem de fluir por entre os vazios do solo.

Lei de Darcy

$$Q = k \cdot i \cdot A$$

- $Q \Rightarrow$ vazão
- $k \Rightarrow$ coeficiente de permeabilidade;
- $i \Rightarrow$ gradiente hidráulico
- $\Delta H \Rightarrow$ perda de carga
- $L \Rightarrow$ distância de percolação
- $A \Rightarrow$ secção transversal

$$i = \frac{\Delta H}{L}$$

Valores típicos de k

Solos Sedimentares

- Argilas $\Rightarrow k < 10^{-7}$ cm/s
- Siltes $\Rightarrow 10^{-7} < k < 10^{-4}$ cm/s
- Areias Argilosas $\Rightarrow k = 10^{-5}$ cm/s
- Areias Finas $\Rightarrow k = 10^{-3}$ cm/s
- Areias Médias $\Rightarrow k = 10^{-2}$ cm/s
- Areias Grossas $\Rightarrow k = 10^0$ cm/s

(Pinto, 2002)

Permeômetros para solos



$D = 9,7 \text{ cm}; H = 12,0 \text{ cm}$

(Belinassi, 2009)



$D = 6,35 \text{ cm}; H = 7,62 \text{ cm}$

(Barreto, 2011)

Permeâmetros para o RSU



Compactação do RSU

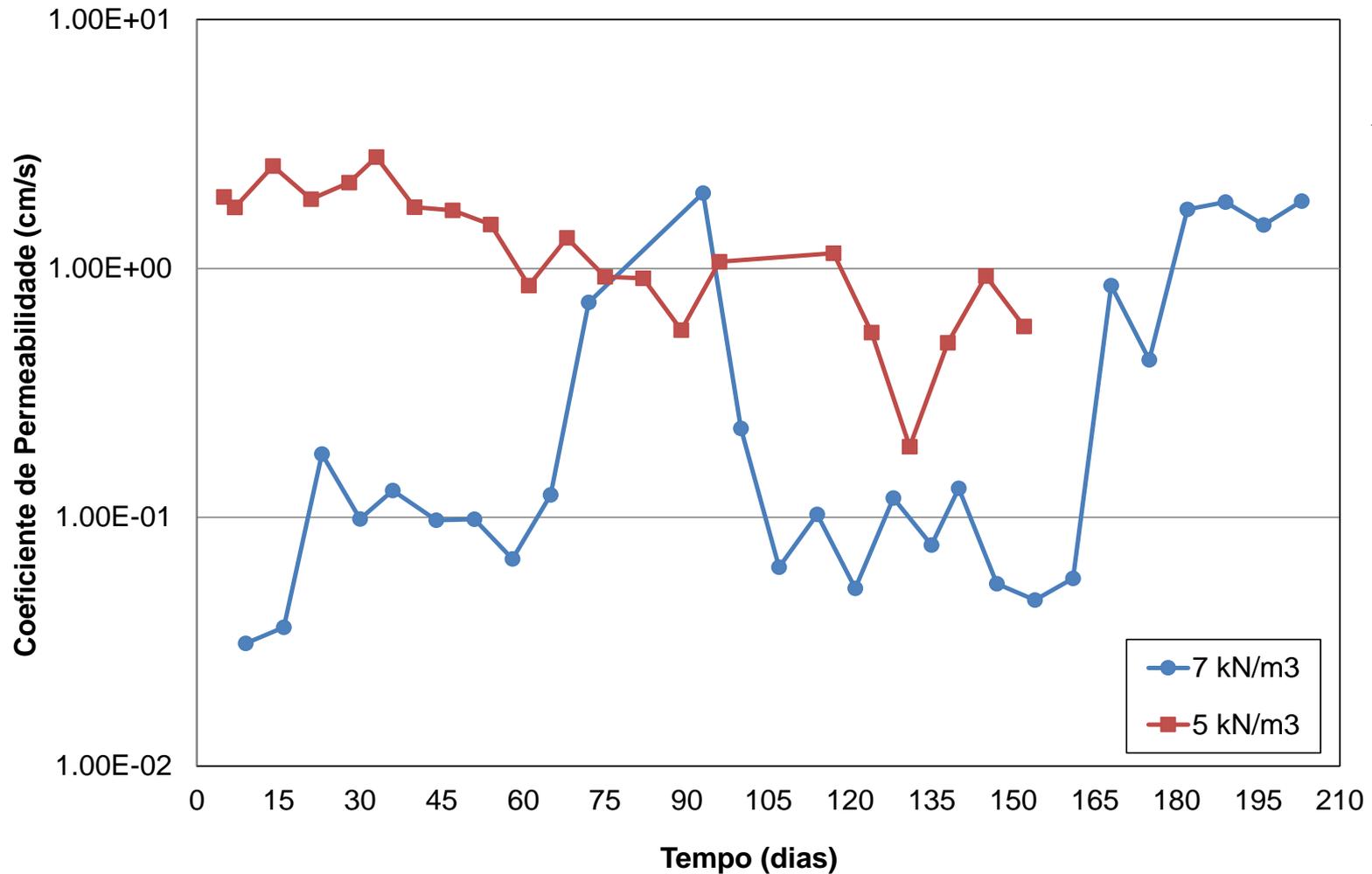


$D = 30\text{cm}$ e $H = 100\text{cm}$

Coeficiente de Permeabilidade e Capacidade de campo de RSU (Rocha & Azevedo, 2008).

| RSU Novo | | | |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| γ (kN/m ³) | 3,47 | 7,0 | 10,0 |
| w_i (%) | 42,57 | 65,02 | 65,48 |
| γ_d (kN/m ³) | 2,43 | 4,24 | 6,04 |
| w_θ (%) | 61,76 | 59,21 | 65,83 |
| k (cm/s) | $3,64 \times 10^{-2}$ | $3,34 \times 10^{-3}$ | $9,74 \times 10^{-4}$ |
| RSU Velho | | | |
| γ (kN/m ³) | 3,50 | 7,00 | 10,00 |
| w_i (%) | 27,24 | 31,45 | 51,94 |
| γ_d (kN/m ³) | 2,75 | 5,23 | 6,58 |
| w_θ (%) | 32,58 | 28,83 | 29,25 |
| k (cm/s) | $3,74 \times 10^{-2}$ | $6,07 \times 10^{-3}$ | $1,63 \times 10^{-3}$ |

Permeabilidade do RSU



(Gregorio, 2013)

Recalques

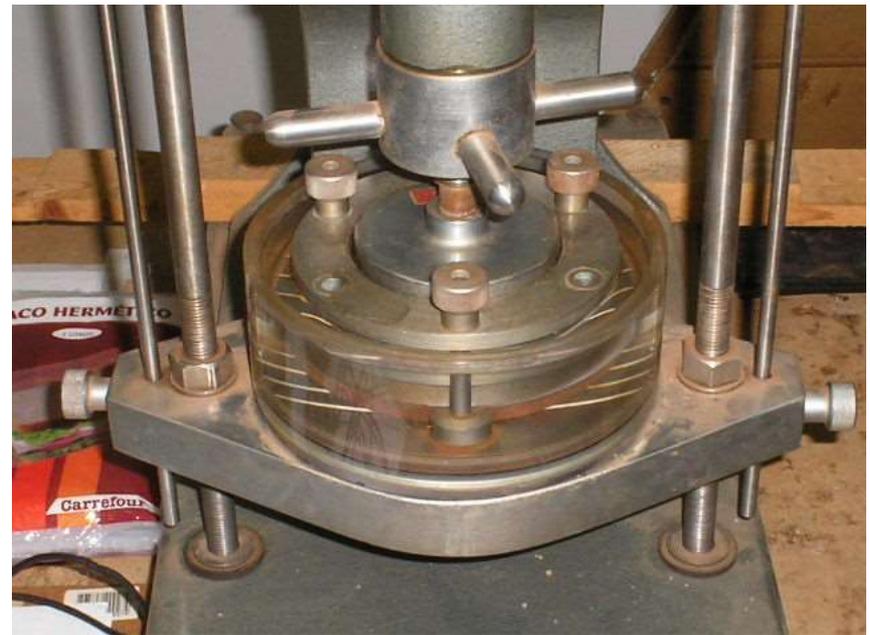
Adensamento dos Solos

- Variações volumétricas dos solos finos, ao longo do tempo, responsáveis pelos recalques das estruturas.
- **Recalque Total**
 - Imediato \Rightarrow elasticidade
 - **Primário \Rightarrow expulsão de água**
 - Secundário \Rightarrow deformações da fase sólida

Ensaio de Adensamento



- Amostra de solo dentro de um anel de latão de altura 2,5 cm e $D \approx 3 \times$ altura;



Curva e x $\log \sigma'$

Três trechos

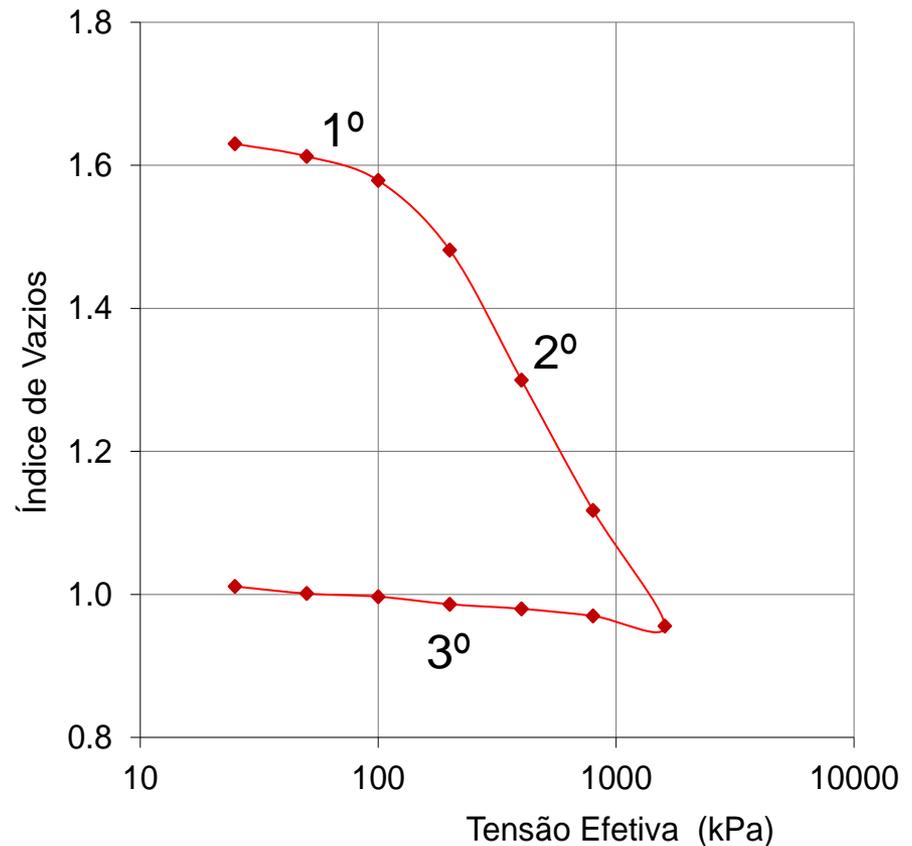
1º trecho \Rightarrow recompressão

2º trecho \Rightarrow reta virgem

3º trecho \Rightarrow descarregamento

$$\Delta H = \frac{C_r \cdot H}{1 + e_i} \log \frac{\sigma'_f}{\sigma'_i}$$

$$\Delta H = \frac{\Delta e}{1 + e_i} \cdot H = \frac{C_c \cdot H}{1 + e_i} \log \frac{\sigma'_f}{\sigma'_i}$$



Recalques do RSU

Inicial ⇒ compressão inicial

- Devido às pressões externas impostas por máquinas compactadoras no instante de deposição;

Primários ⇒ compressão primária

- Ocorrem nos primeiros 30 dias;
- Expulsão de **líquidos** e **gases** do interior da massa de lixo

Secundários ⇒ compressão secundária

- Ocorrem exclusivamente devido à **biodegradação**;
- Prolonga-se com o tempo e sofre influências do conteúdo e fluxo de umidade, composição e compactação inicial.

Mecanismos de Recalques

Solicitação mecânica;

Ravinamento interno;

Alterações físico-químicas;

Biodegradação;

Inter-relação entre os materiais;

Dissipação das pressões neutras de líquidos e gases;

(Sowers, 1973)

Fatores Influentes

Material Constituinte do RSU;

Permeabilidade do RSU;

Temperatura ambiente;

Índices pluviométricos;

Umidade;

Quantidade de material putrescível;

Dimensões do aterro;

Eficiência no sistema de drenagem;

Idade do aterro sanitário;

Oedômetro de grandes dimensões

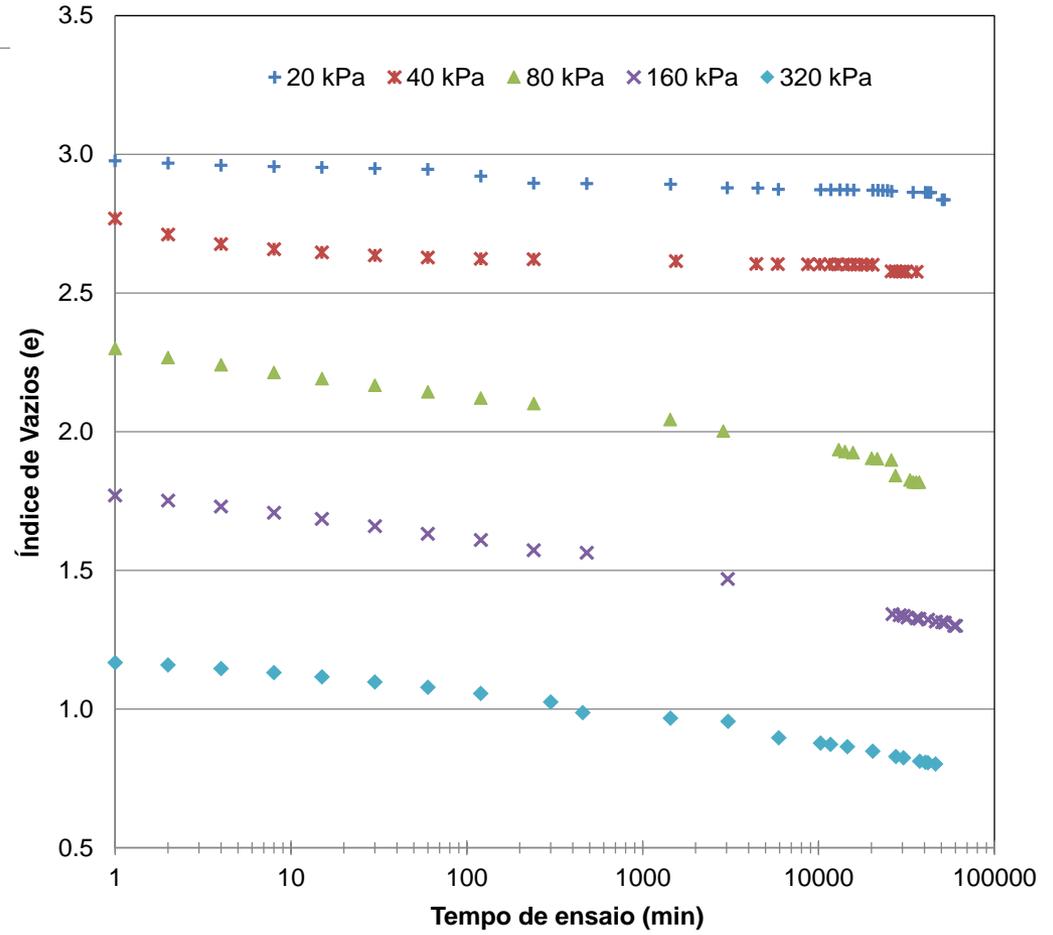
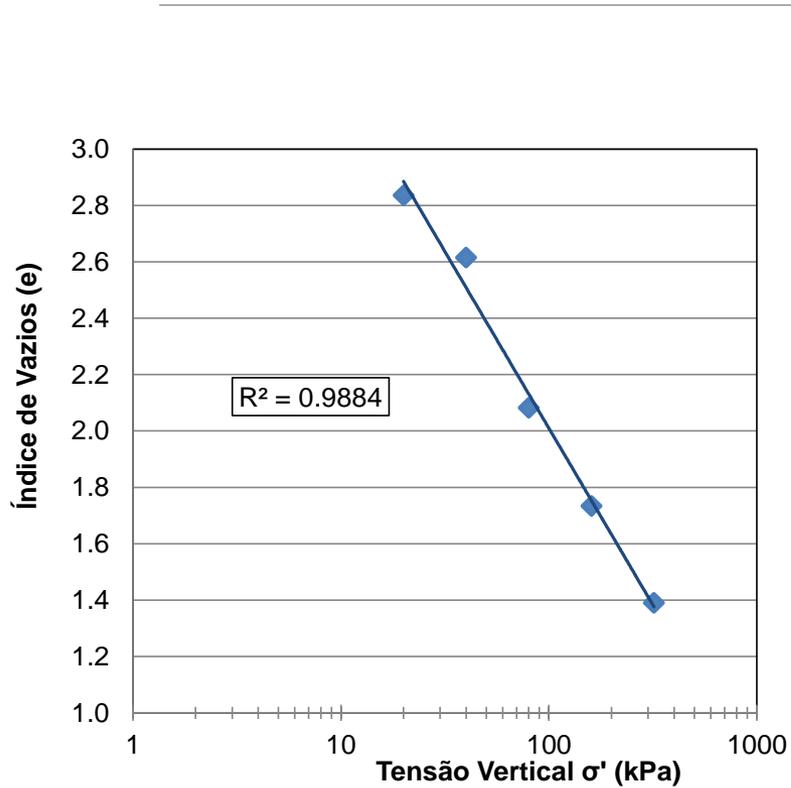


Compactação do RSU



D = 50cm e H = 80cm.

Resultados



Método de Sowers (1973)

Sendo:

ΔH_1 : recalque primário;

ΔH_2 : recalque secundário;

e_0 : índice de vazios inicial;

C_c : índice de compressão primária;

C_α : índice de compressão secundária;

σ_0 : tensão vertical inicial atuante no meio da camada;

$\Delta\sigma$: acréscimo de tensão vertical no meio da camada em consideração;

t_1 : tempo inicial do período para obtenção do recalque secundário;

t_2 : tempo final do período para obtenção do recalque secundário.

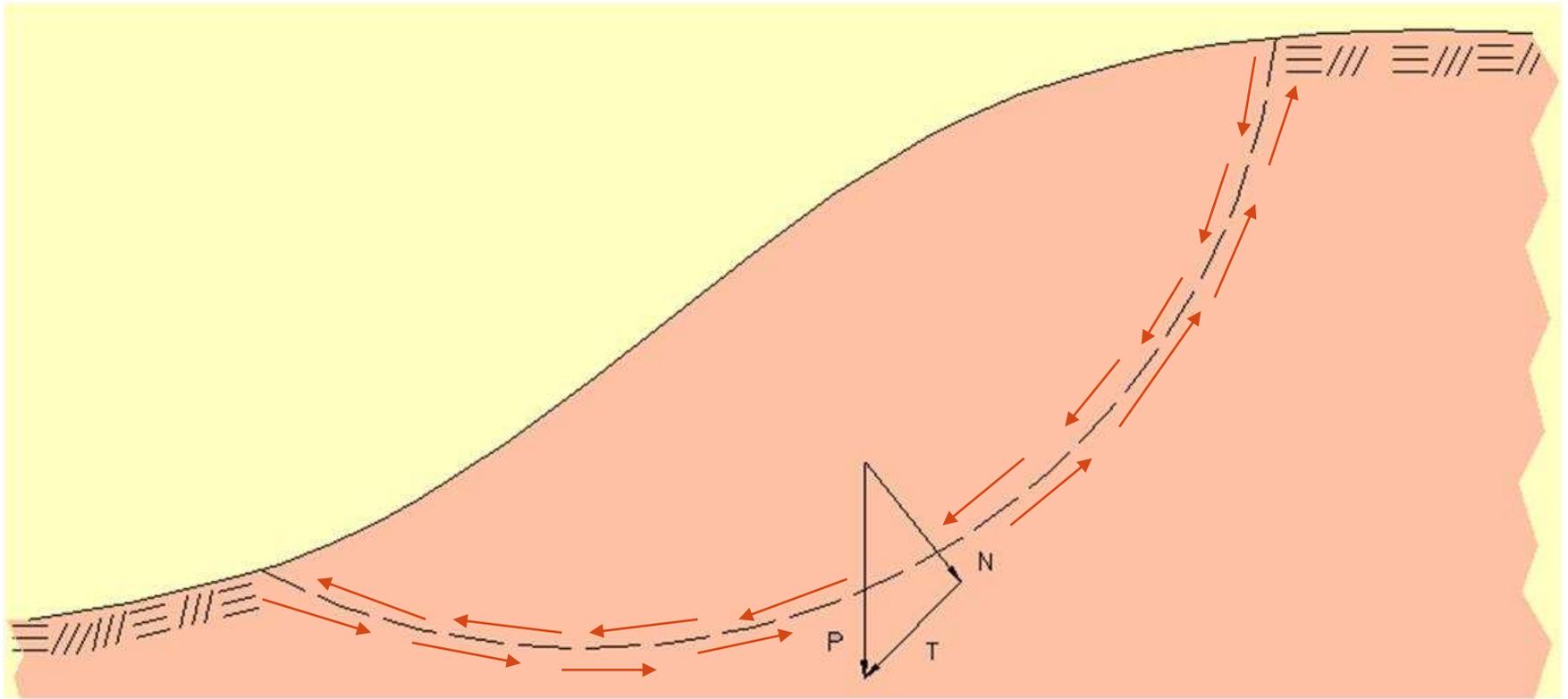
$$\Delta H_1 = \frac{H \cdot C_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0}$$
$$\Delta H_2 = \frac{H \cdot C_\alpha}{1 + e_0} \log \frac{t_2}{t_1}$$

Resultados

| Referência | γ_o (kN/m ³) | γ_d (kN/m ³) | γ_s (kN/m ³) | w (%) | e_0 | C_c | $C_{\alpha, \text{medio}}$ |
|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------|-------|-------|----------------------------|
| Nascimento (2008) | 7,11 | 4,05 | 17,29 | 114 | 4,134 | 1,459 | 0,025 |
| Vilela (2013) | 8,00 | 3,17 | 13,55 | 152 | 3,260 | 1,201 | 0,140 |
| Benatti et al (2012) | 9,76 | 4,50 | 17,00 | 117 | 2,840 | 0,821 | 0,051 |

Resistência ao Cisalhamento

Resistência ao Cisalhamento dos Solos



Resistência ao Cisalhamento dos Solos



Fig. 9.16 Aspecto geral de um escorregamento com depósito incoerente. Notar forma em meia-lua e escalonamento da cicatriz de escorregamento. Proximidades do km 33 da Rodovia SC-032 (Ituporanga – Alfredo Wagner). Foto: P. C. F. Giannini.

Fonte: Decifrando a Terra / TEIXEIRA, TOLEDO, FAIRCHILD e TAIOLI - São Paulo: Oficina de Textos, 2000

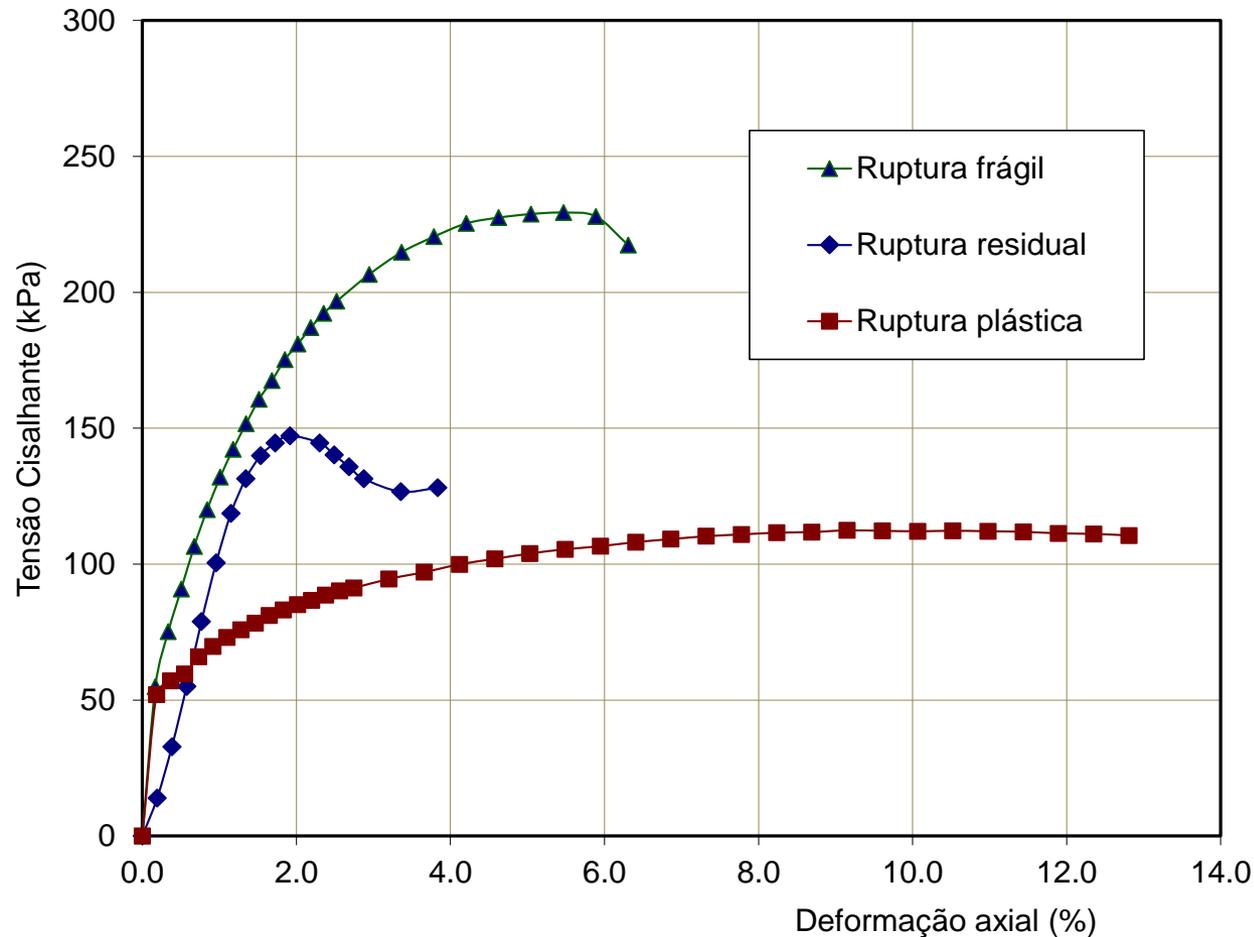
Resistência ao Cisalhamento



Resistência ao Cisalhamento

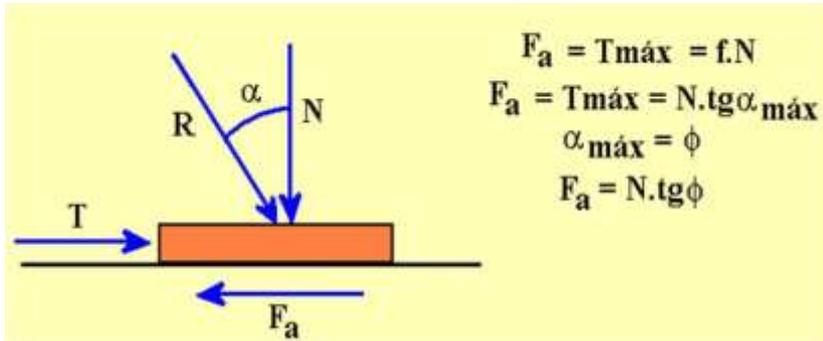


Resistência ao Cisalhamento dos Solos



Resistência ao cisalhamento

ATRITO



Contato grão a grão;

Dependente das tensões normais aplicadas nos planos de cisalhamento.

COESÃO

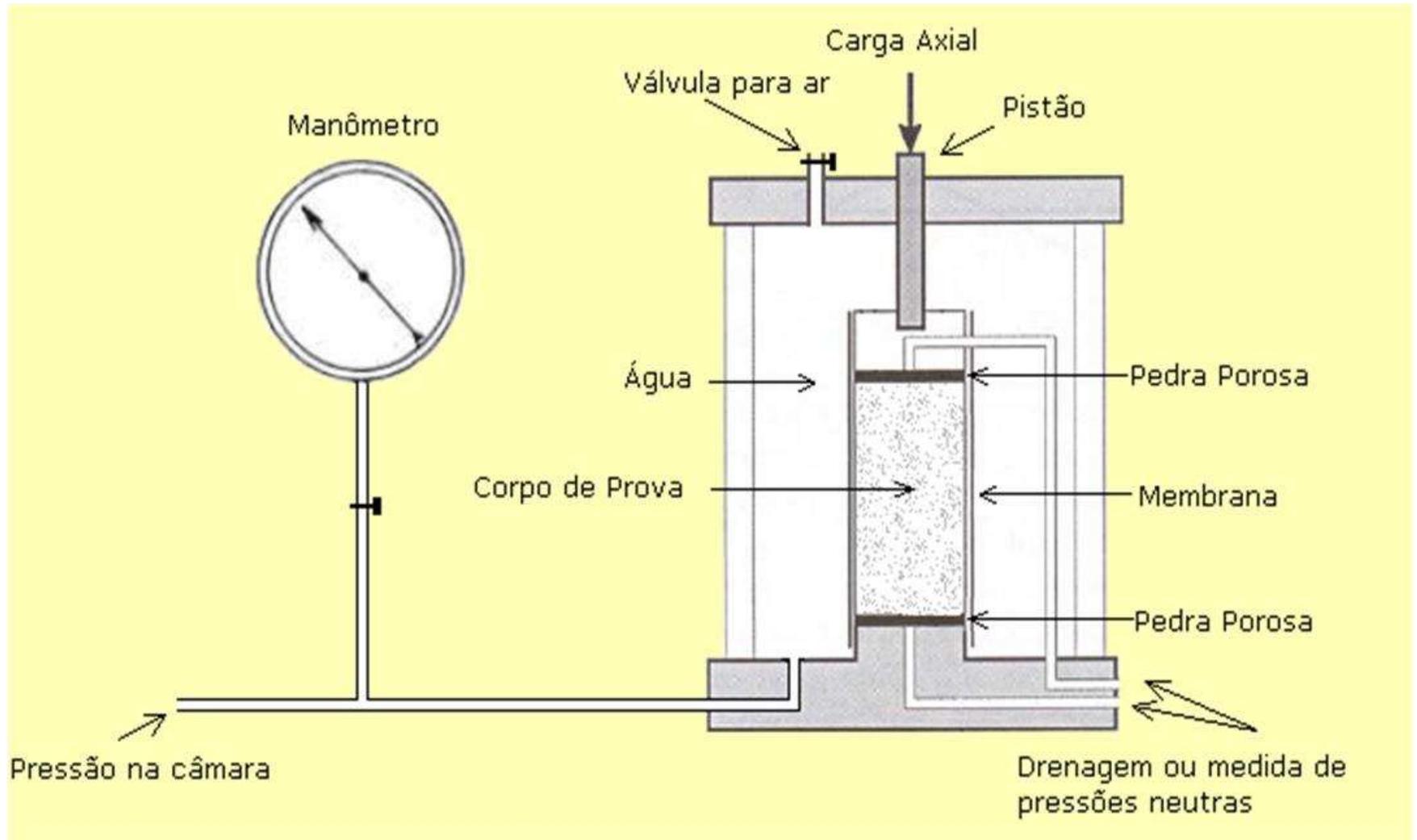
Coesão Verdadeira

- Intemperismo: cimentação entre partículas por sílica, carbonatos, óxidos de ferro \Rightarrow agentes cimentantes;
- Forças Interpartículas:

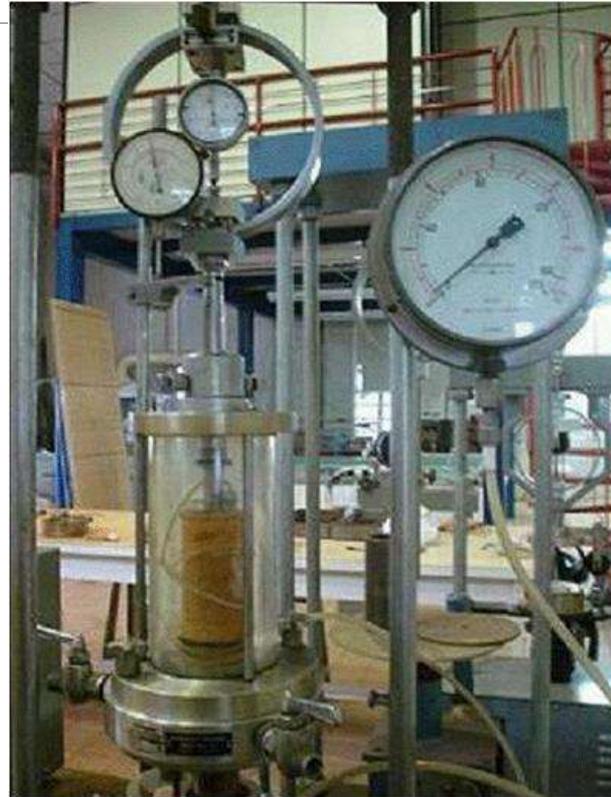
Coesão Aparente

- Solos parcialmente saturados: efeito da capilaridade na água intersticial.

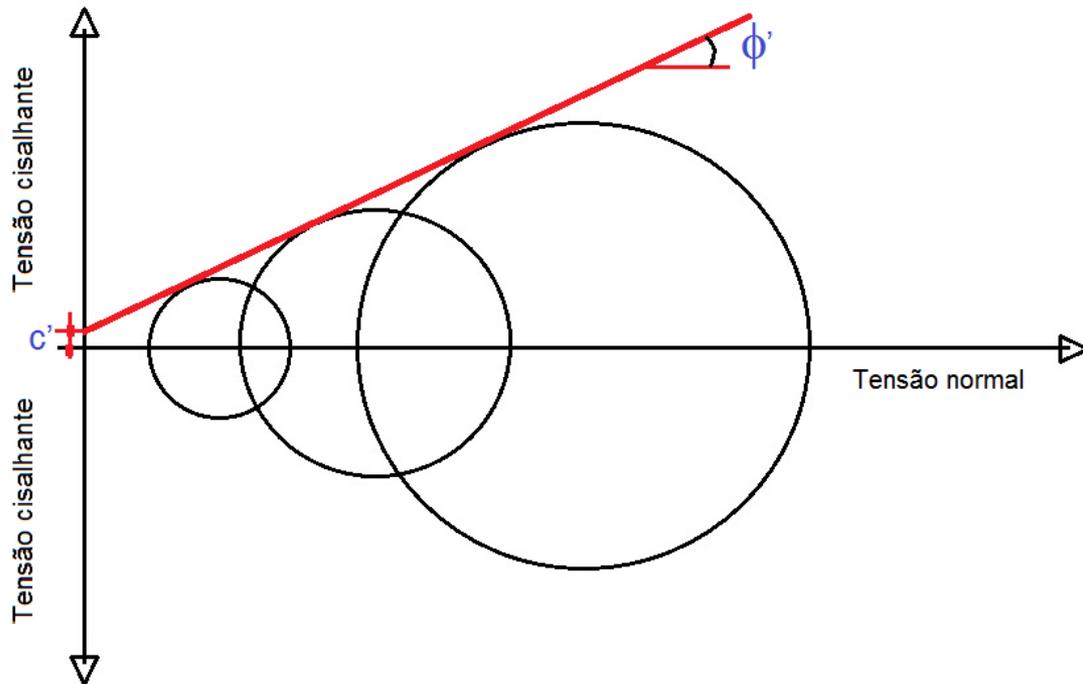
Ensaio triaxial



Ensaio triaxial em solos



Critério de ruptura



Circulo de Mohr

Envoltória de ruptura

- Aproximação de uma reta tangente aos pontos de ruptura.

Mohr-Coulomb

$$s' = c' + \sigma' \cdot \operatorname{tg} \phi'$$

s' \Rightarrow resistência ao cisalhamento

c' \Rightarrow intercepto coesivo efetivo

σ' \Rightarrow tensão efetiva normal

ϕ' \Rightarrow ângulo de atrito efetivo

Tipos de Ensaio Triaxiais

Ensaio Lento (S) ou Adensado Drenado (CD)

- Permite a dissipação das pressões neutras nas fases de confinamento e de cisalhamento ⇒ **tensões são efetivas.**

Ensaio Adensado-Não-Drenado (CU)

- Permite a dissipação das pressões neutras na fase de confinamento, mas não na fase de cisalhamento ⇒ **tensões são totais.**

Ensaio Rápido (Q) ou Não Adensado Não Drenado (UU)

- Não se permite dissipação de pressões neutras em nenhuma fase ⇒ **tensões são totais.**

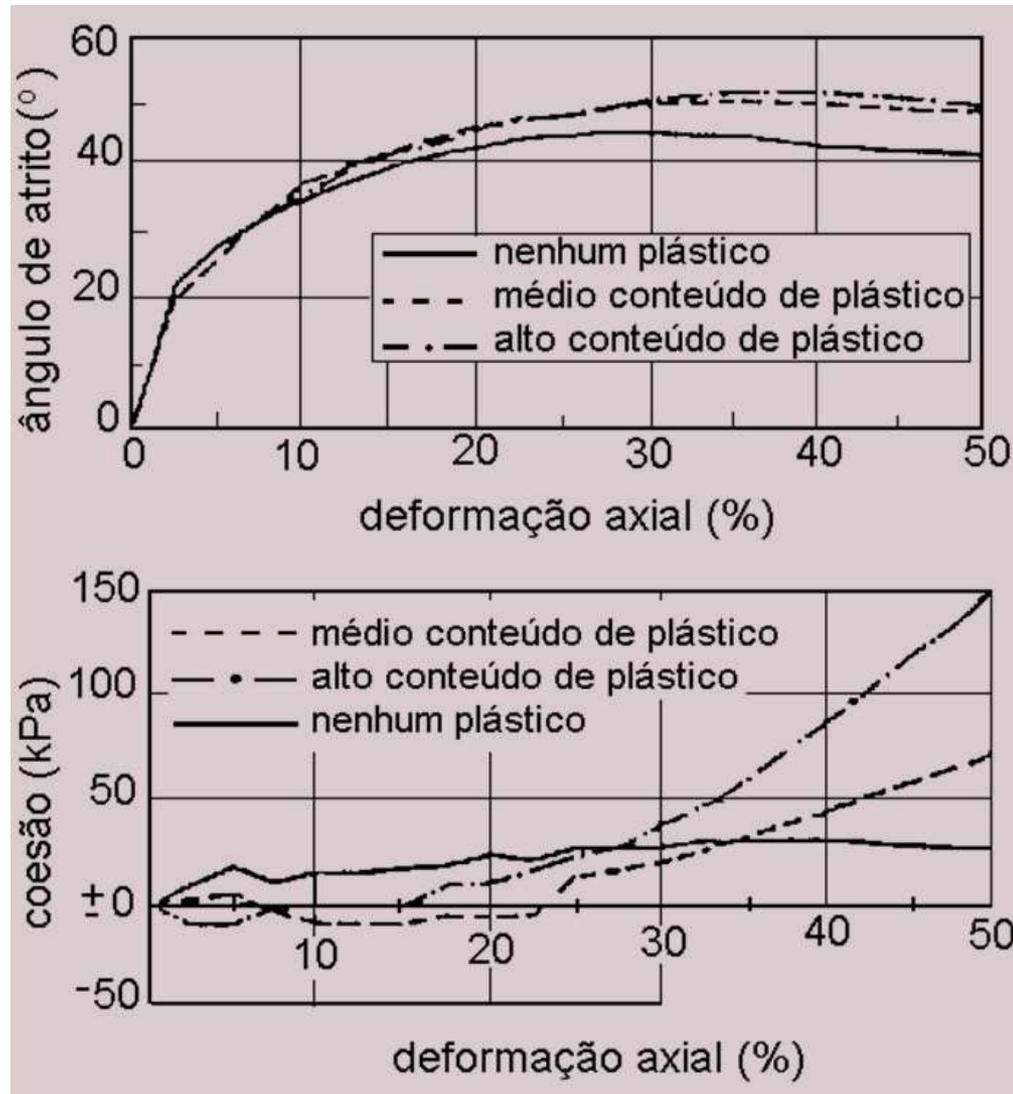
Comportamento Mecânico

Heterogeneidade do RSU

- Matriz composta = matriz básica + matriz de reforço
- **Matriz básica:** partículas de granulometria fina a média com comportamento de **ATRITO**;
- **Matriz de reforço:** componentes fibrosos do lixo com comportamento **COESIVO**;

Grandes deformações (> 20 %) ⇒ **SOLOS REFORÇADOS**

Mobilização do Intercepto de Coesão e Ângulo de Atrito com as Deformações Axiais (König & Jessberger, 1997).



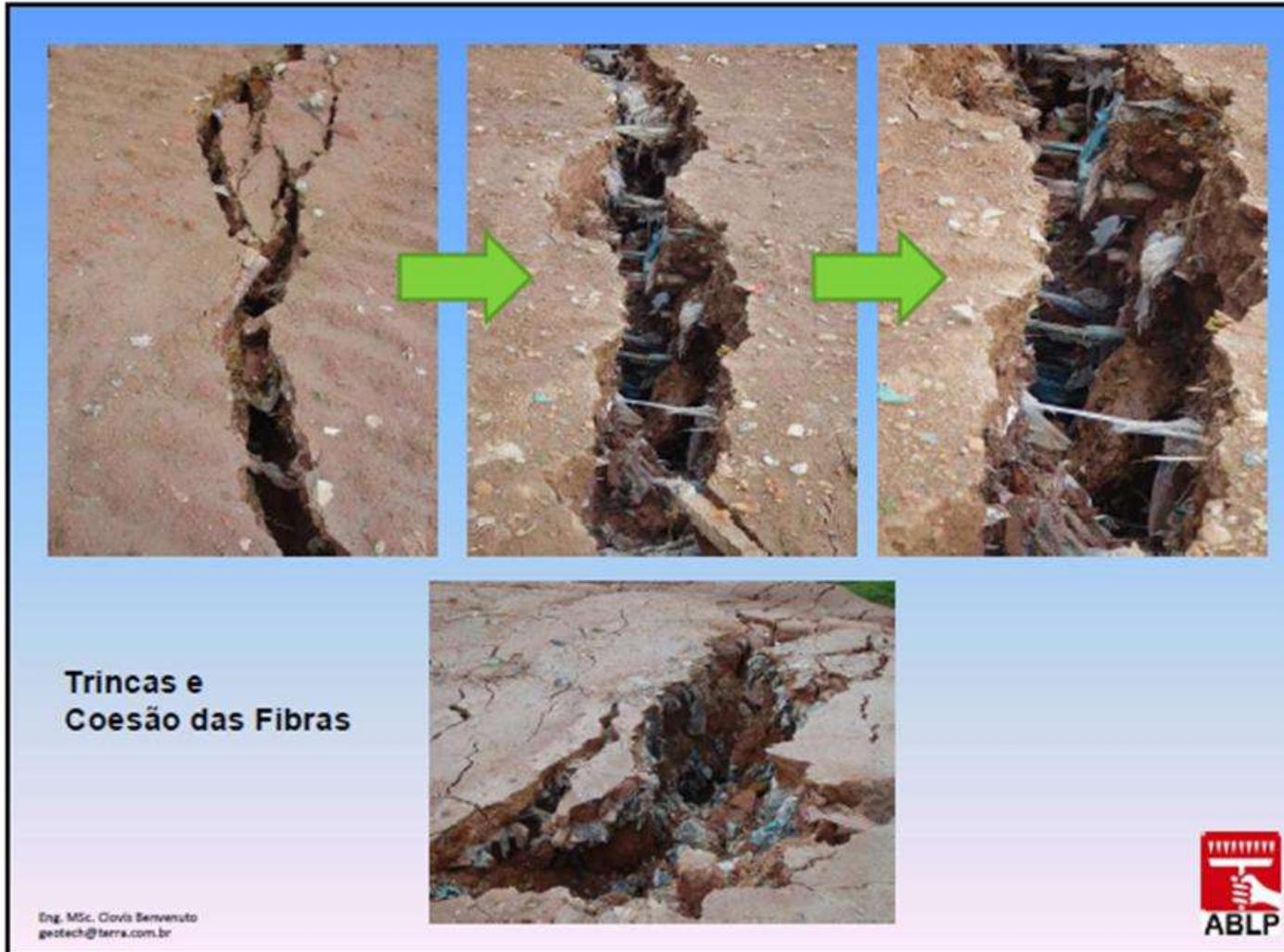
Ruptura de um aterro controlado



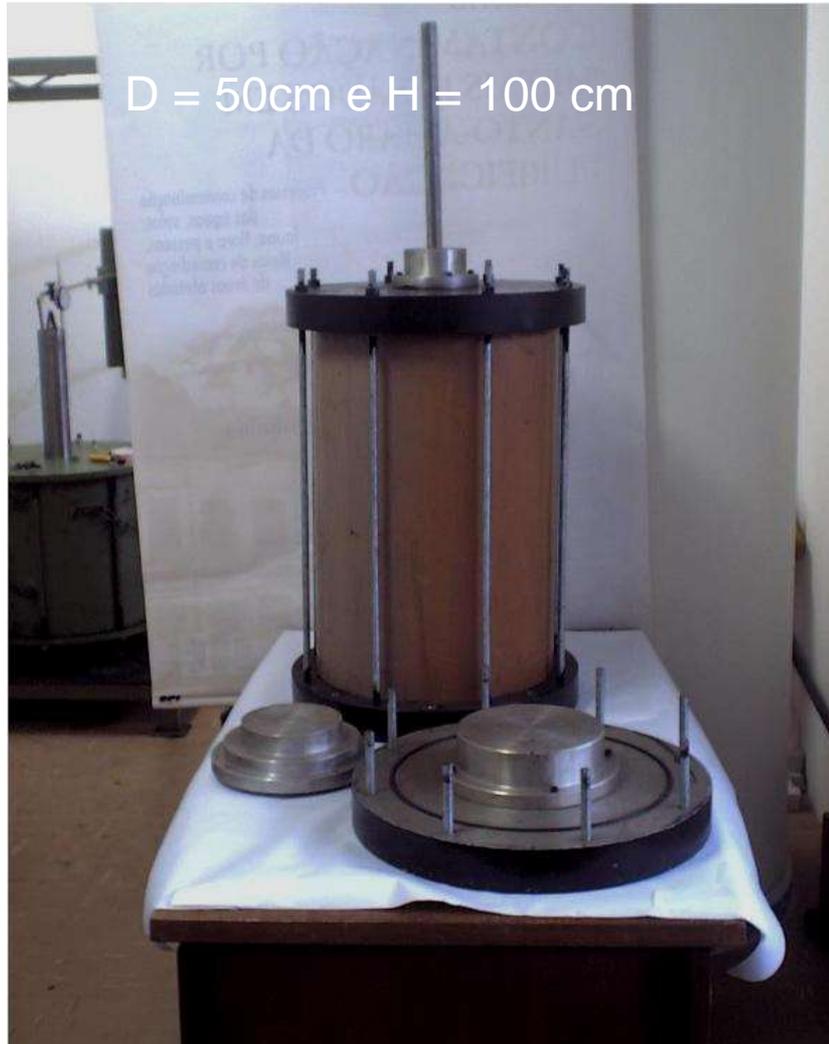
Abertura de trincheira



Papel das fibras. Foto do Eng. Msc. Clovis Benvenuto



Câmaras dos Ensaio Triaxiais



Compactação do RSU dentro do molde



(Nascimento, 2007)

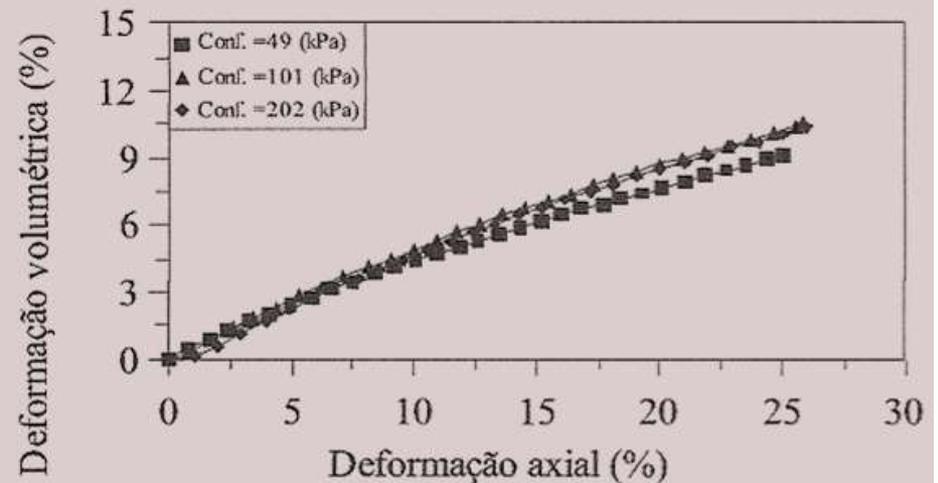
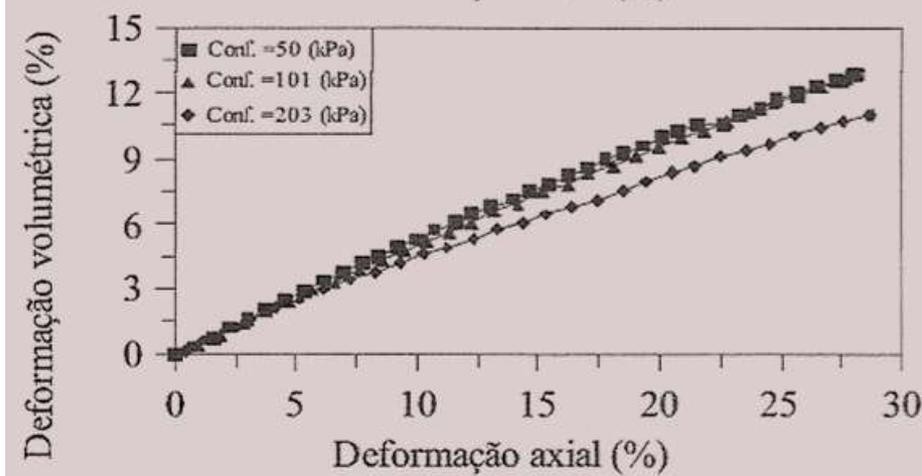
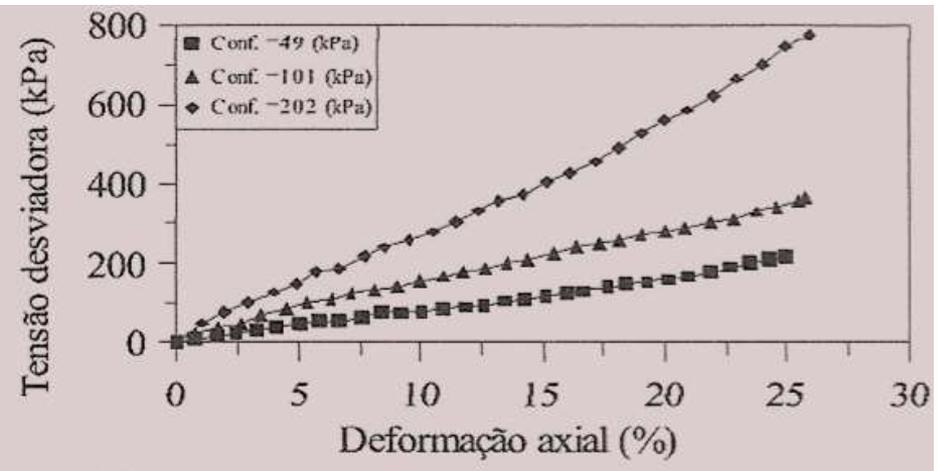
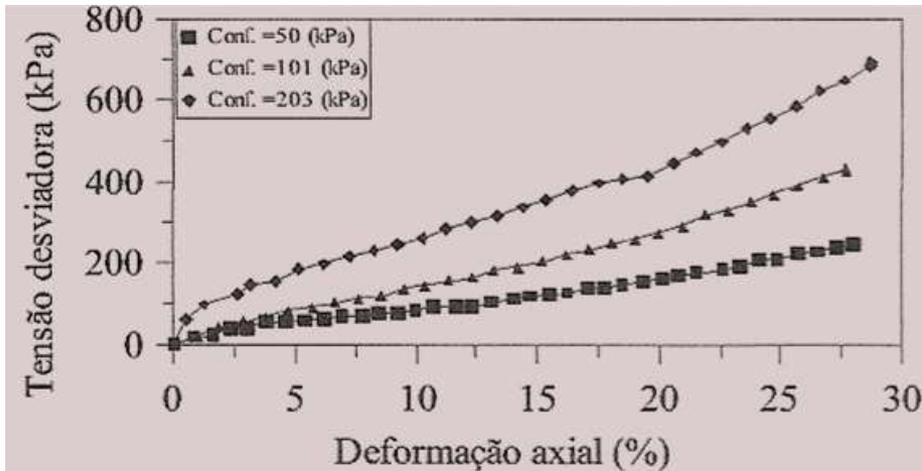
Aspecto do Corpo-de-Prova Logo após a Retirada do Molde de Compactação (a); Com a Membrana de Látex (b) (Nascimento, 2007).



Aspecto dos Corpos-de-Prova após a Aplicação da Tensão Desviadora (Nascimento, 2007)



Curvas Tensão versus Deformação e Deformação volumétrica versus Deformação axial obtidas para amostras a) Novo10 e b) 4 anos10. (Nascimento et. al, 2007).



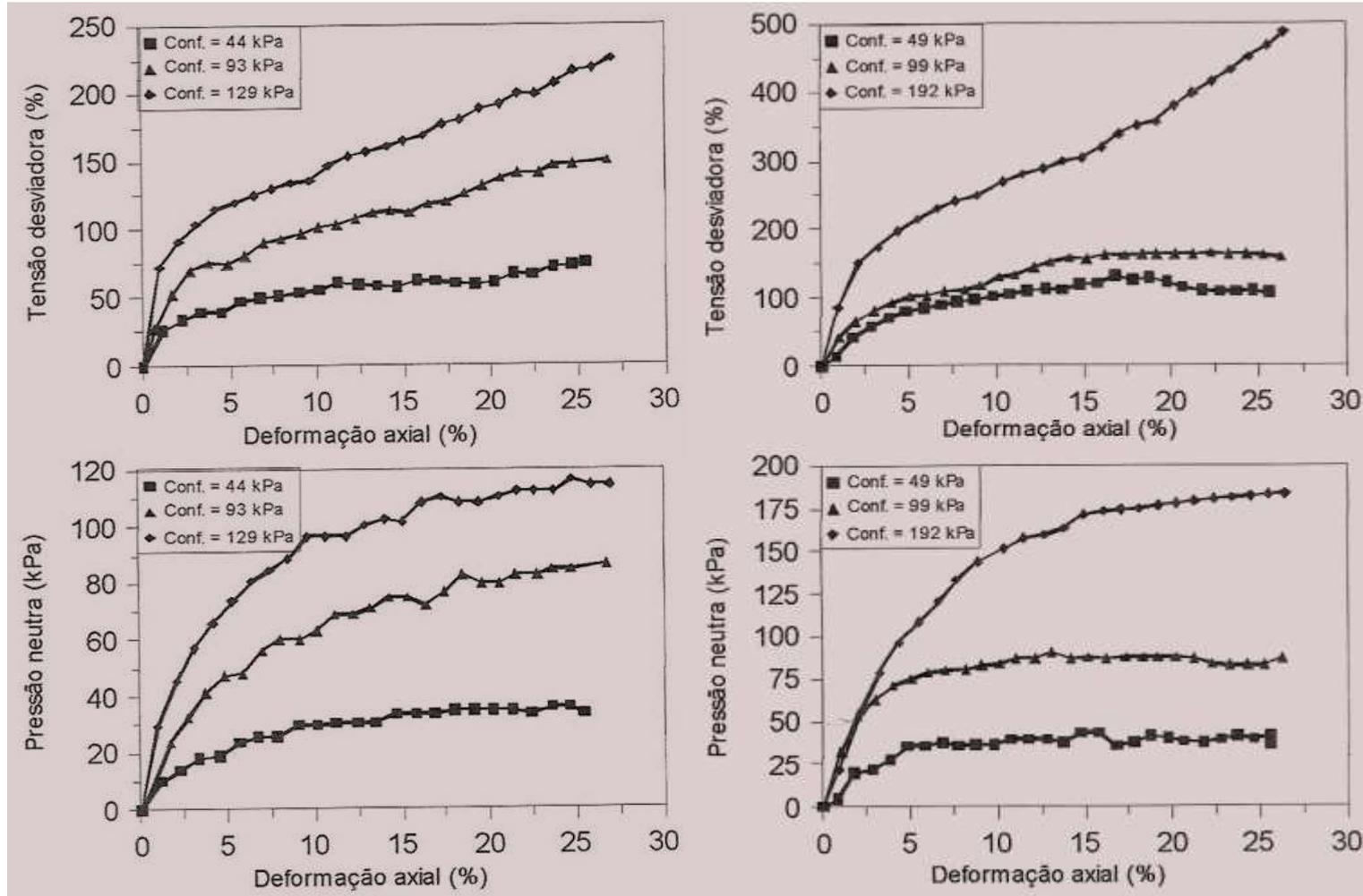
a) Amostra Novo10

b) Amostra 4 anos 10

Parâmetros de Resistência Ensaios CD (Nascimento et al., 2007)

| Amostra | Deformação axial (%) | Intercepto coesivo efetivo (kPa) | Ângulo de atrito interno efetivo (°) |
|----------|----------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| Novo 10 | 5 | 6,8 | 14,8 |
| | 10 | 11,4 | 20,2 |
| | 15 | 17,6 | 24,2 |
| | 20 | 25,8 | 27,1 |
| 4anos 10 | 5 | 6,0 | 14,3 |
| | 10 | 8,9 | 21,6 |
| | 15 | 8,2 | 27,7 |
| | 20 | 4,6 | 34,9 |

Curvas Tensão *versus* Deformação e Pressão Neutra *versus* Deformação Axial Obtidas de Ensaio CU para a)RSU Novo e b) RSU com 4 anos de aterrado (Nascimento et. al, 2008).



Parâmetros de Resistência Ensaios CD e CU (Nascimento et al., 2008)

| Amostra | Deformação axial (%) | Intercepto coesivo efetivo (kPa) | Ângulo de atrito interno efetivo (°) |
|------------------------------|----------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| Novo 10 Ensaio CD | 20 | 25,8 | 27,1 |
| Novo 10 Ensaio CU | 20 | 0,0 | 57,7 |
| 4anos10 Ensaio CD | 20 | 4,6 | 34,9 |
| 4anos10 Ensaio CU | 20 | 0,0 | 66,0 |

Parâmetros geotécnicos do Aterro Sanitário Bandeirantes (Carvalho, 1999)

| | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| Teor de Umidade | 45 a 110 % |
| Coeficiente de Permeabilidade | 10^{-6} a 10^{-8} m/s |
| Peso Específico dos Resíduos | 15 kN/m ³ |
| Peso Específico dos Sólidos | 22,4 a 25,1 kN/m ³ |
| Coesão Efetiva | 42 a 60 kPa |
| Ângulo de Atrito Efetivo | 21 a 27 ° |
| Recalques (período de 7 anos) | 12% da altura do aterro |

Parâmetros de resistência reavaliados para o Aterro Sanitário Bandeirantes (Kaimoto & Cepolina, 1996)

| Condição | Coesão (kPa) | Ângulo de Atrito (°) |
|--|--------------|----------------------|
| Lixos Antigos | 13,5 | 22,0 |
| Lixos com deposição superior a 2 anos, submetidos a drenagem interna mais intensa | 16,0 | 22,0 |
| Lixos recentes, com deposição inferior a 2 anos, submetidos a intensa drenagem interna | 16,0 | 28,0 |

Superação das deficiências

Melhoria da estimativa dos parâmetros geomecânicos do RSU

- Realização de ensaios de laboratório com equipamentos de grandes dimensões;
- Melhorias nas técnicas aplicadas de ensaios;
- Realização de ensaios de campo;
- Construção de aterros experimentais;

Busca de modelos de comportamento mais adequados.

(Boscov, 2008)

Muito obrigada pela atenção de todos!



Prof^a Dr^a Miriam Gonçalves Miguel

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

Universidade Estadual de Campinas

mgmiguel@fec.unicamp.br

Referências

BENATTI, J. C. B., MORTATTI, B.C., MARTINS, B. C., NOBRE, L. B., MIGUEL, M. G. (2012) Parameters of Permeability and Compressibility of MSW from Southeastern Brazil. In: The International World Solid Waste Congress, 2012, Florença/Itália, The ISWA World Solid Waste Congress 2012. ATIA/ISWA, CR-ROM.

BOSCOV, M. E. G. (2008) Geotecnia Ambiental. São Paulo: Oficina de Textos.

CARVALHO, M. de F. (1999) Comportamento Mecânico de Resíduos Sólidos Urbanos. Tese de Doutorado. EESC/USP.

GABR, M. A.; VALERO, S. N. (1995) Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste. *Geotechnical Testing Journal*, V.18, n.2, June, p 241-255.

GREGORIO, I. (2013) Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Resíduos Sólidos Urbanos de uma Célula Experimental. Relatório de Iniciação Científica. Unicamp., 19p.

KAIMOTO, L.S.A.; CEPOLINA, M. (1996) Considerações sobre Alguns Condicionantes e Critérios Geotécnicos de Projeto e Execução de Aterros Sanitários. In: Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental. Porto Alegre, pp.51-54.

KÖNIG, D. & JESSBERGER, H.L. (1997). Waste Mechanics. In: ISSMFE Technical Committee TC5 on Environmental Geotechnics pg. 35-76.

Referências

MANASSERO, M.; VAN IMPE, W.F.; BOUAZZA, A. (1996). Waste Disposal and Containment. In: Proc. of the Second International Congress on Environmental Geotechnics, Preprint of special lectures, Osaka, Japan A.A.Balkema, v.3, p. 1425 - 1474.

MARQUES, A.C.M, VILAR, O.M., KAIMOTO, L. S. A. (2002) Compactação de Resíduos Sólidos Urbanos. Revista Solos & Rochas, São Paulo, 25, (1): 37-50, Janeiro-Abril.

MARQUES, A.C.M. (2001) Compactação e Compressibilidade de Resíduos Sólidos Urbanos. Tese de Doutorado. EESC/USP.

NASCIMENTO, J. C. F do (2007). Comportamento Mecânico de Resíduos Sólidos Urbanos. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos/USP. 2007. 160p.

NASCIMENTO, J. C. F do, VILAR, O. M., CARVALHO, M. F. de, MACHADO, S. L. (2007). Comportamento Mecânico de Resíduos Sólidos Urbanos. VI Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, Recife/PE, 2007. CD-Rom.

NASCIMENTO, J. C. F do, VILAR, O. M., MACHADO, S. L., CARVALHO, M. F. de (2007). Resistência Não-Drenada de Resíduos Sólidos do Aterro Metropolitano Centro de Salvador/BA. XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Búzios/RJ.,2008, CD-Rom.

Referências

PINTO, C. S. (2002). Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas. 2a Edição. Oficina de Textos. 355p.

ROCHA, E.F. da & AZEVEDO, R. F. de (2008) Determinação da Condutividade Hidráulica e Capacidade de Campo de Resíduos Sólidos Urbanos. XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Búzios/RJ.,2008, CD-Rom.

SANTOS, A. R. (2009). Geologia de Engenharia: Conceitos, Método e Prática, São Paulo : O Nome da Rosa: ABGE.

SOWERS, G. F. (1973) Settlement of Waste Disposal Fills. In: 8º Internacional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscou, pp. 207-210.

VILELA, V.B. (2013) Determinação de Parâmetros de Compressibilidade de Resíduos Sólidos Urbanos em Laboratório por meio de Ensaio Edométrico, Simulando Recalques de uma Célula Experimental. Relatório de Iniciação Científica. Unicamp. 18p.