



## III Conferência Internacional de Gestão de Resíduos da América Latina

# Geomecânica dos resíduos sólidos urbanos: uma introdução



**Miriam Gonçalves Miguel**

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

# Objetivo

---

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

Apresentar as dificuldades de obtenção desses parâmetros com base na literatura técnico-científica.

# Conteúdo

---

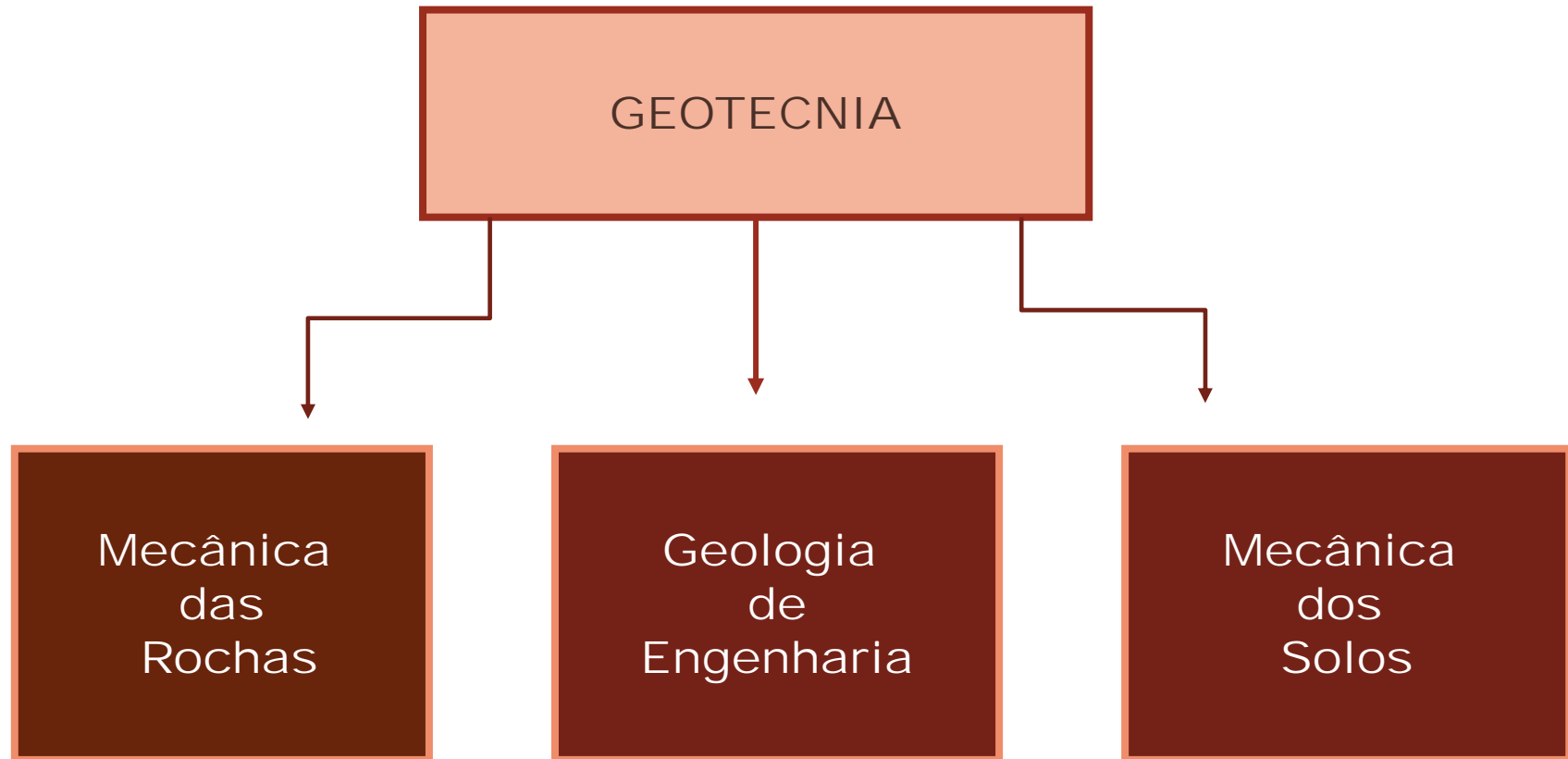
- a) Introdução à Geotecnia;
- b) Introdução à Geomecânica dos Resíduos Sólidos Urbanos;
- c) Compactação;
- d) Permeabilidade;
- e) Resistência ao Cisalhamento;
- f) Considerações Finais.

# Definição

---

*Geotecnia* é um “ramo da Engenharia que se ocupa da caracterização e do comportamento dos *materiais e terrenos da crosta terrestre* para fins de engenharia” (Santos, 2009)

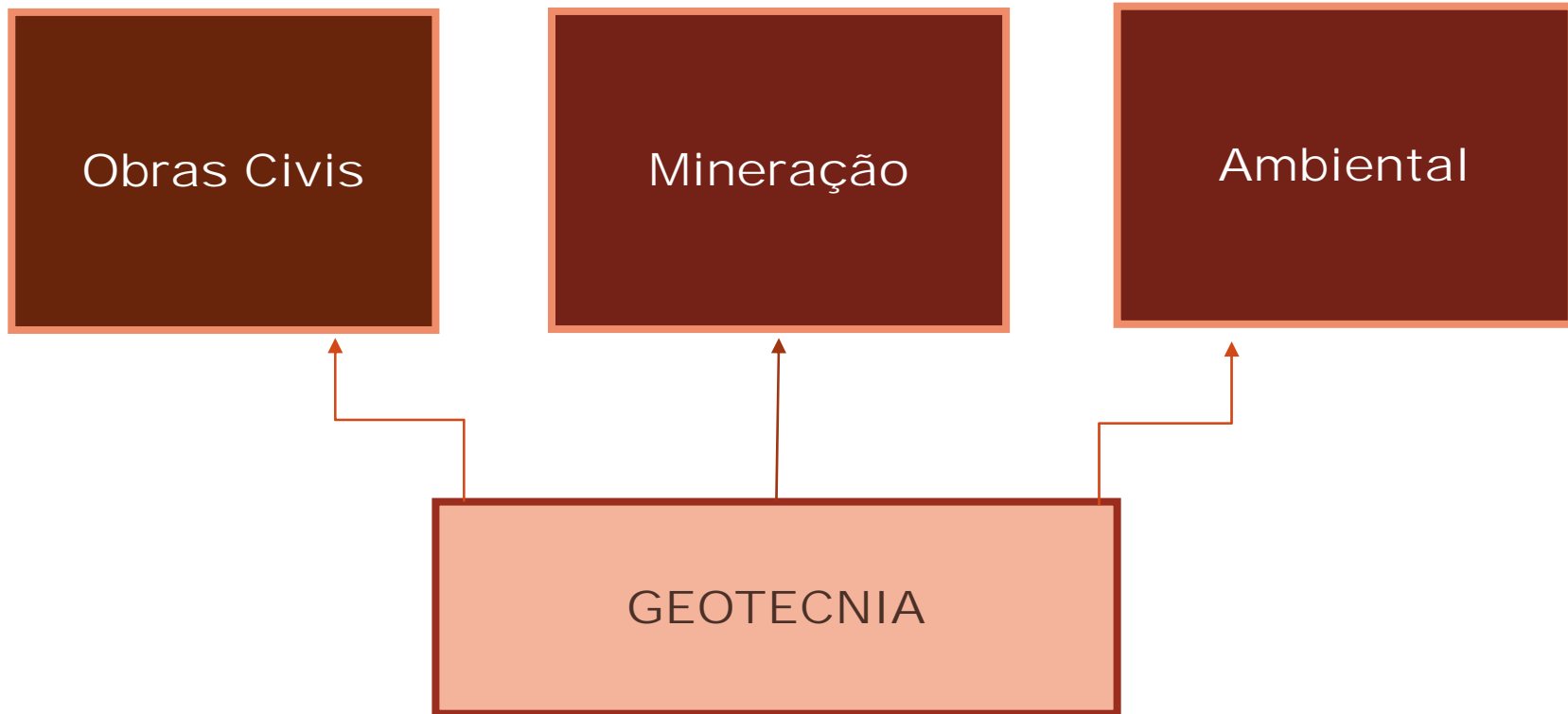
# Disciplinas da Geotecnia



(Modificado de Santos, 2009).

# Disciplinas da Geotecnia

---



(Modificado de Santos, 2009).

# Aplicações da Geotecnia Ambiental

---

**Projeto, operação e monitoramento de locais de disposição de resíduos;**

*Avaliação do impacto ambiental de obras civis;*

*Prevenção da contaminação do solo superficial, do subsolo e das águas subsuperficiais e subterrâneas;*

*Mapeamento geotécnico e geoambiental para planejamento de uso e ocupação do solo;*

*Recuperação de áreas degradadas e remediação de terrenos contaminados;*

*Investigação, instrumentação, monitoramento e amostragem de água e solo;*

**Reutilização de resíduos em obras geotécnicas, etc.**

(Boscov, 2008).

# 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

---

Dificuldade de obtenção das propriedades geomecânicas destes resíduos:

- Heterogeneidade;
- Difícil obtenção de amostras de RSU representativas;
- Alterações das propriedades com o tempo;

(Boskov, 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;



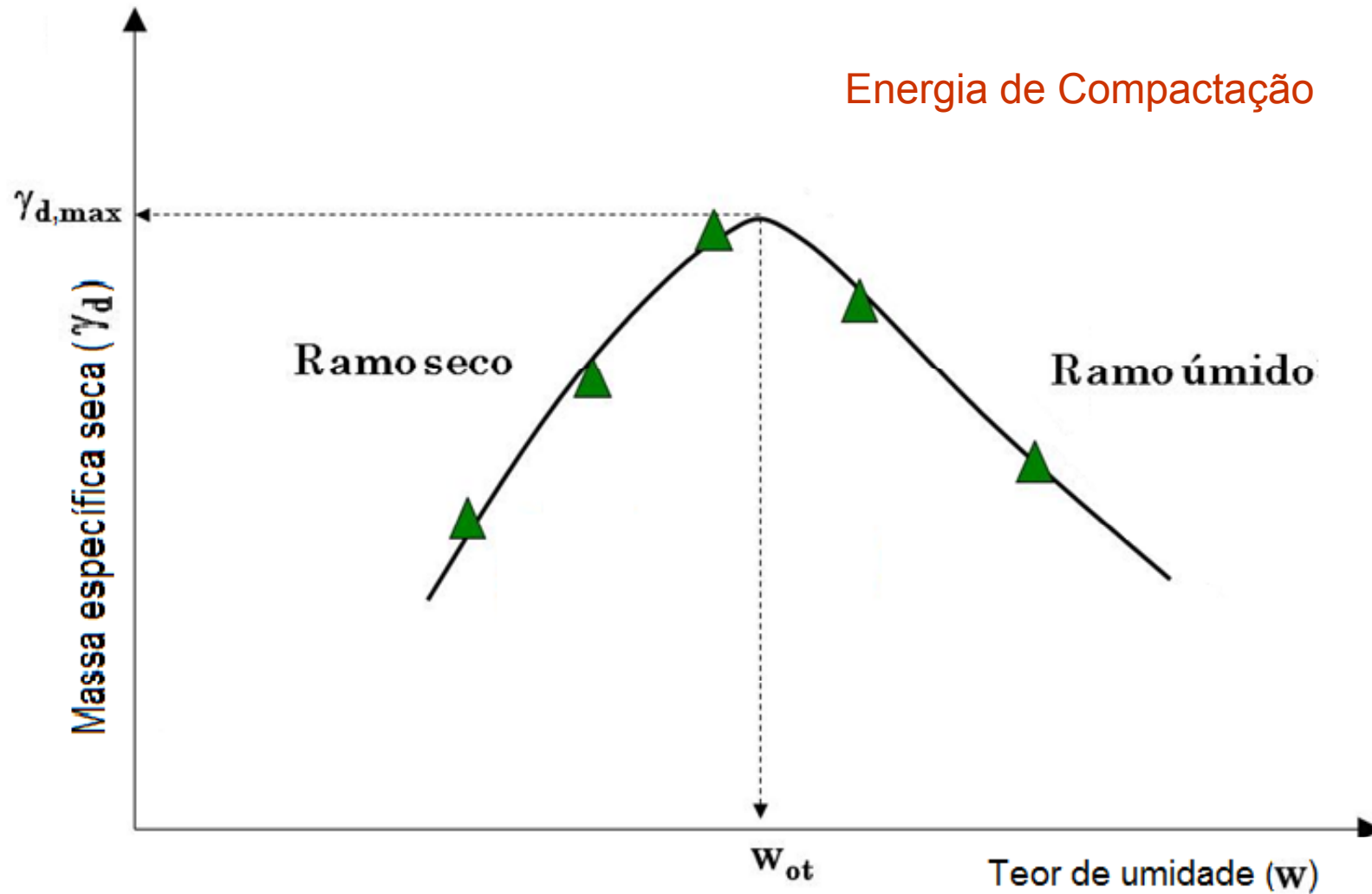
# Compactação dos RSU

---

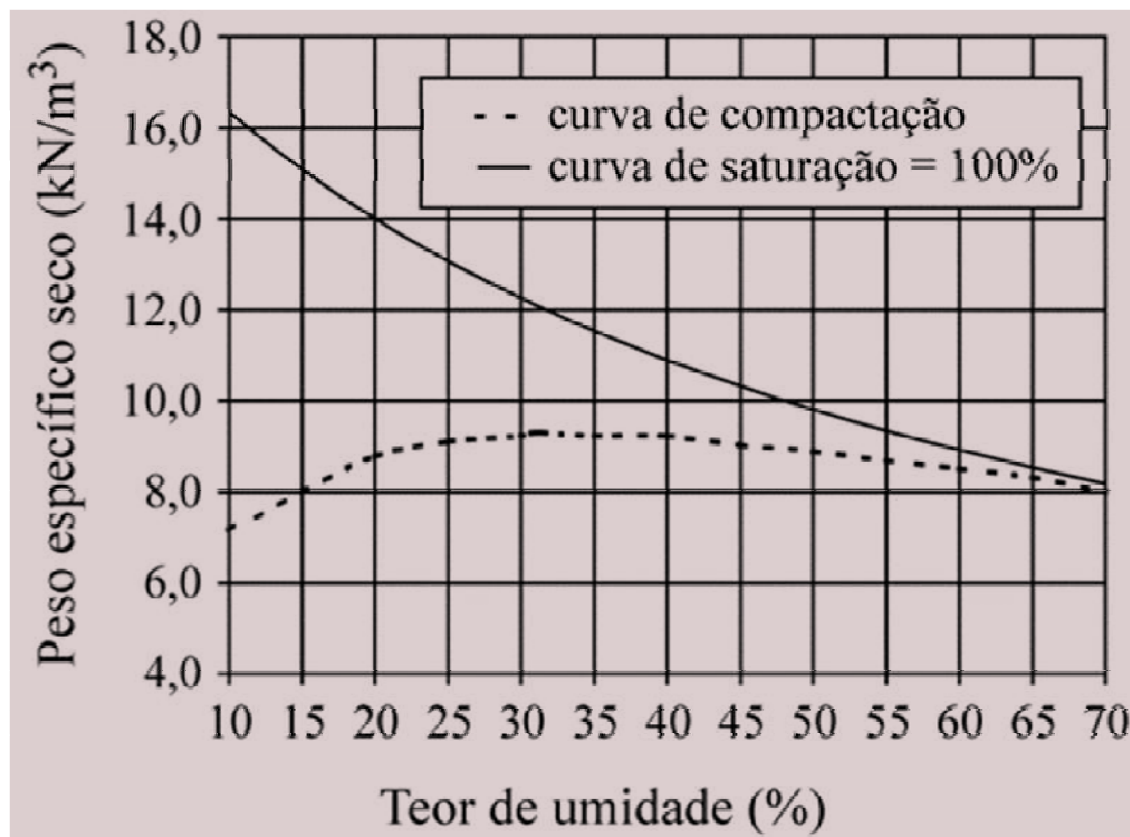
- Expulsão dos líquidos presentes nos resíduos durante a operação de compactação;
- Redução dos vazios e consequente diminuição da permeabilidade do maciço;
- Redução da quantidade de líquidos percolados;
- **Ampliação da vida útil do aterro sanitário.**



# Curva de compactação de solos



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

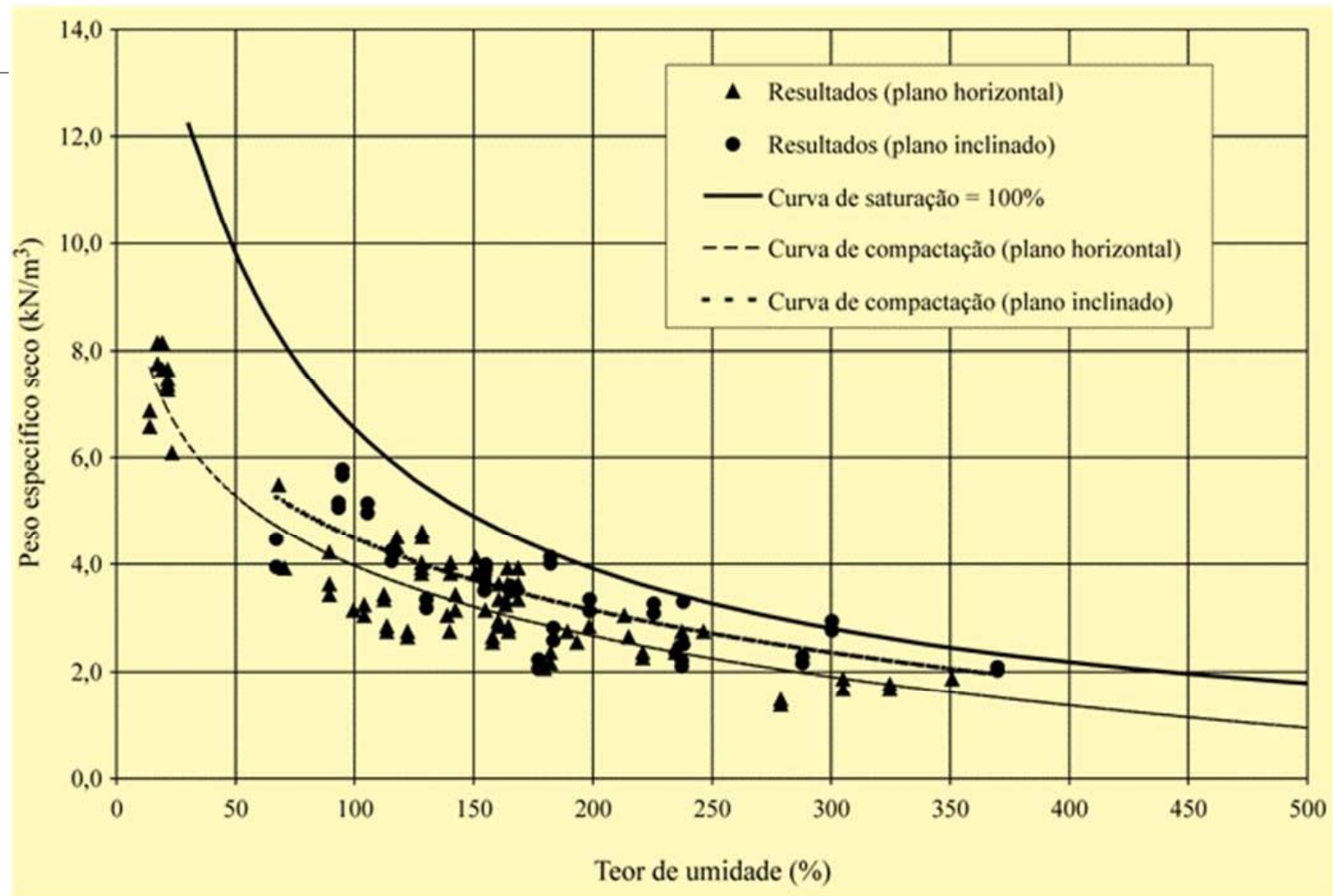


Resíduos domiciliares com idade entre 15 e 30 anos

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

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

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





# 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)

# Permeâmetros para solos



D = 9,7 cm; H = 12,0 cm

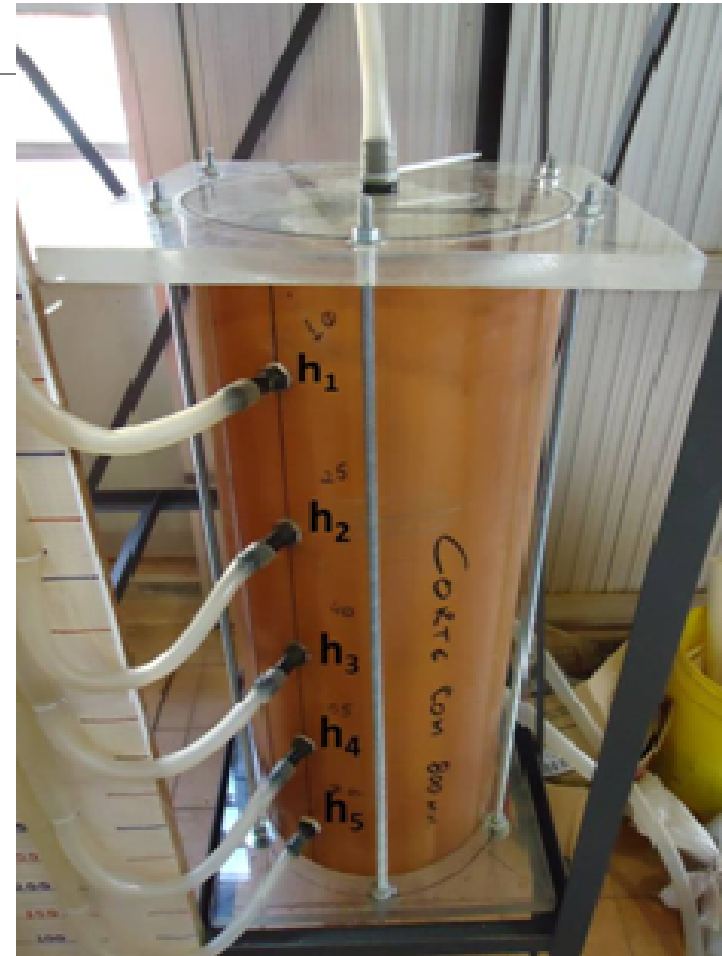


D = 6,35 cm; H = 7,62 cm

# Permeâmetros para o RSU



Compactação do RSU



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

## Coeficiente de Permeabilidade de RSU (Rocha & Azevedo, 2008).

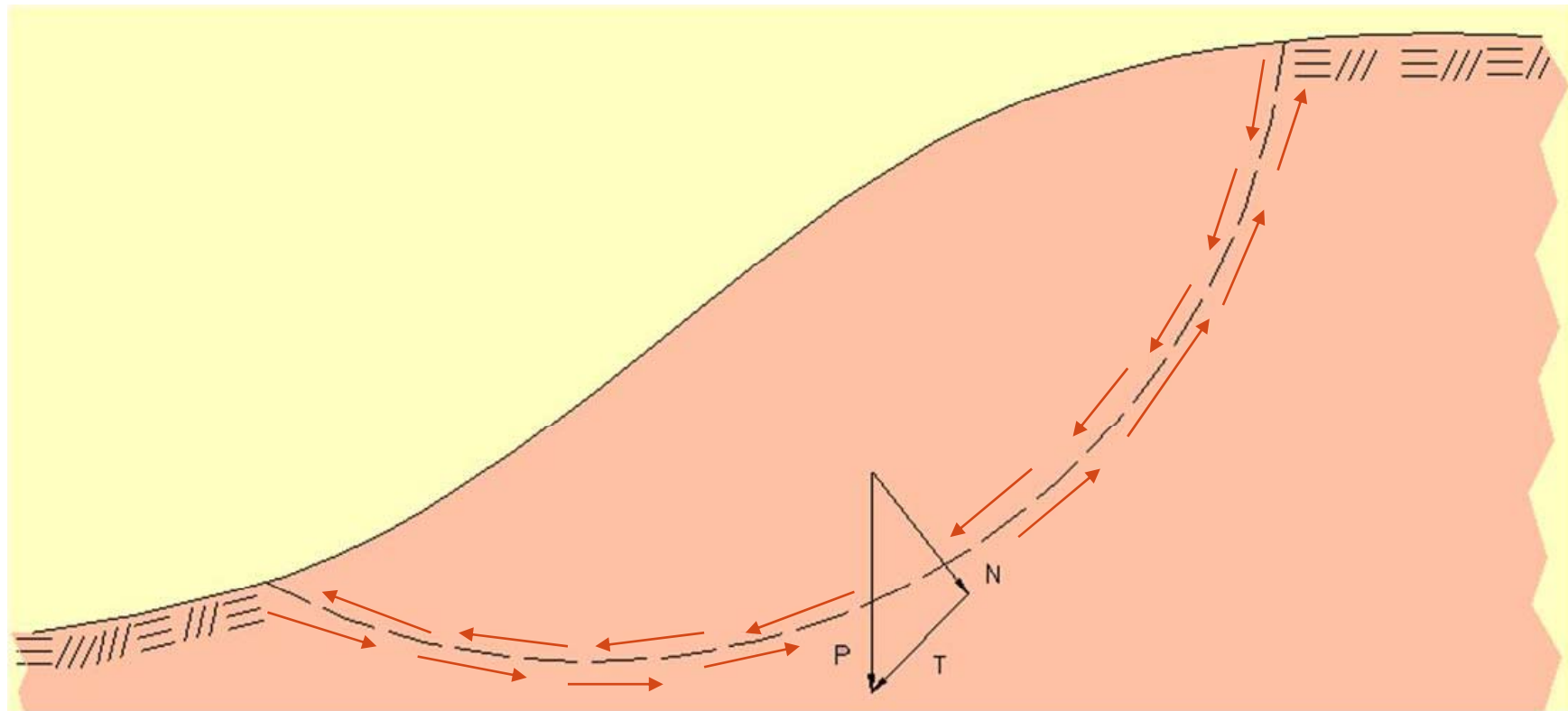
RSU Novo			
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	3,47	7,0	10,0
$w_i$ (%)	42,57	65,02	65,48
$k$ (cm/s)	$3,64 \times 10^{-2}$	$3,34 \times 10^{-3}$	$9,74 \times 10^{-4}$
RSU Velho			
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	3,50	7,00	10,00
$w_i$ (%)	27,24	31,45	51,94
$k$ (cm/s)	$3,74 \times 10^{-2}$	$6,07 \times 10^{-3}$	$1,63 \times 10^{-3}$

# Resistência ao Cisalhamento

---

# Resistência ao Cisalhamento dos Solos

---





# Resistência ao cisalhamento do solos

---

## ATRITO

Contato grão a grão;

Dependente das tensões normais aplicadas nos planos de cisalhamento.

## COESÃO

Cimentação entre partículas por sílica, carbonatos, óxidos de ferro  $\Rightarrow$  agentes cimentantes;

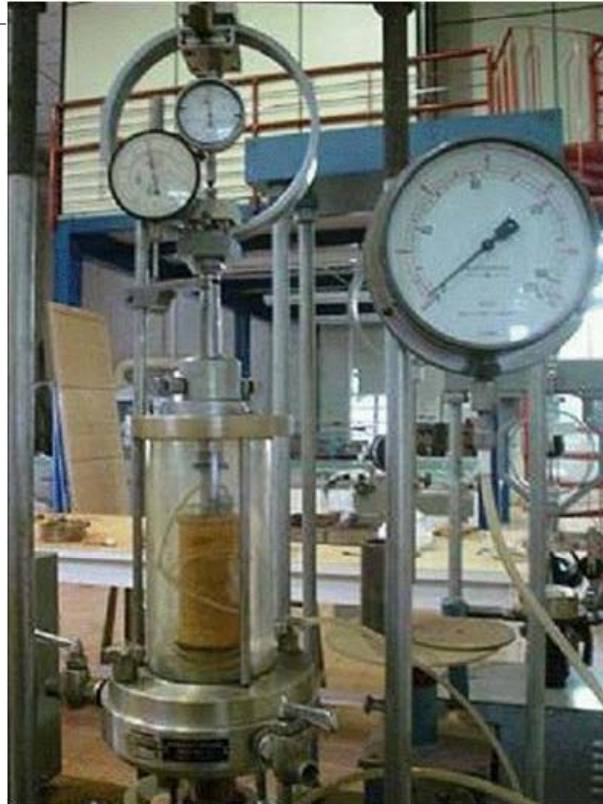
Forças Interpartículas;

Efeito da capilaridade na água intersticial.

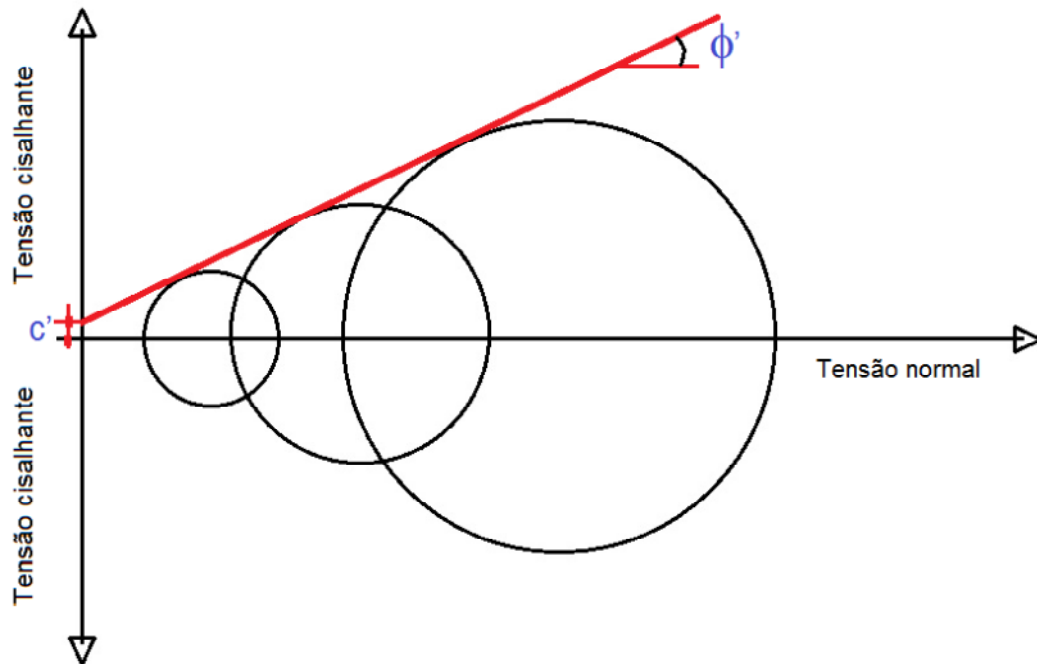
# Ensaio triaxial em solos



$D = 5\text{cm}$  ou  $3,2\text{cm}$   
 $H \sim 2,5 \times D$



# Critério de ruptura de Mohr-Coulomb



Círculos 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

$\sigma'$   $\Rightarrow$  tensão efetiva normal

$\phi'$   $\Rightarrow$  ângulo de atrito efetivo

# Comportamento Mecânico do RSU

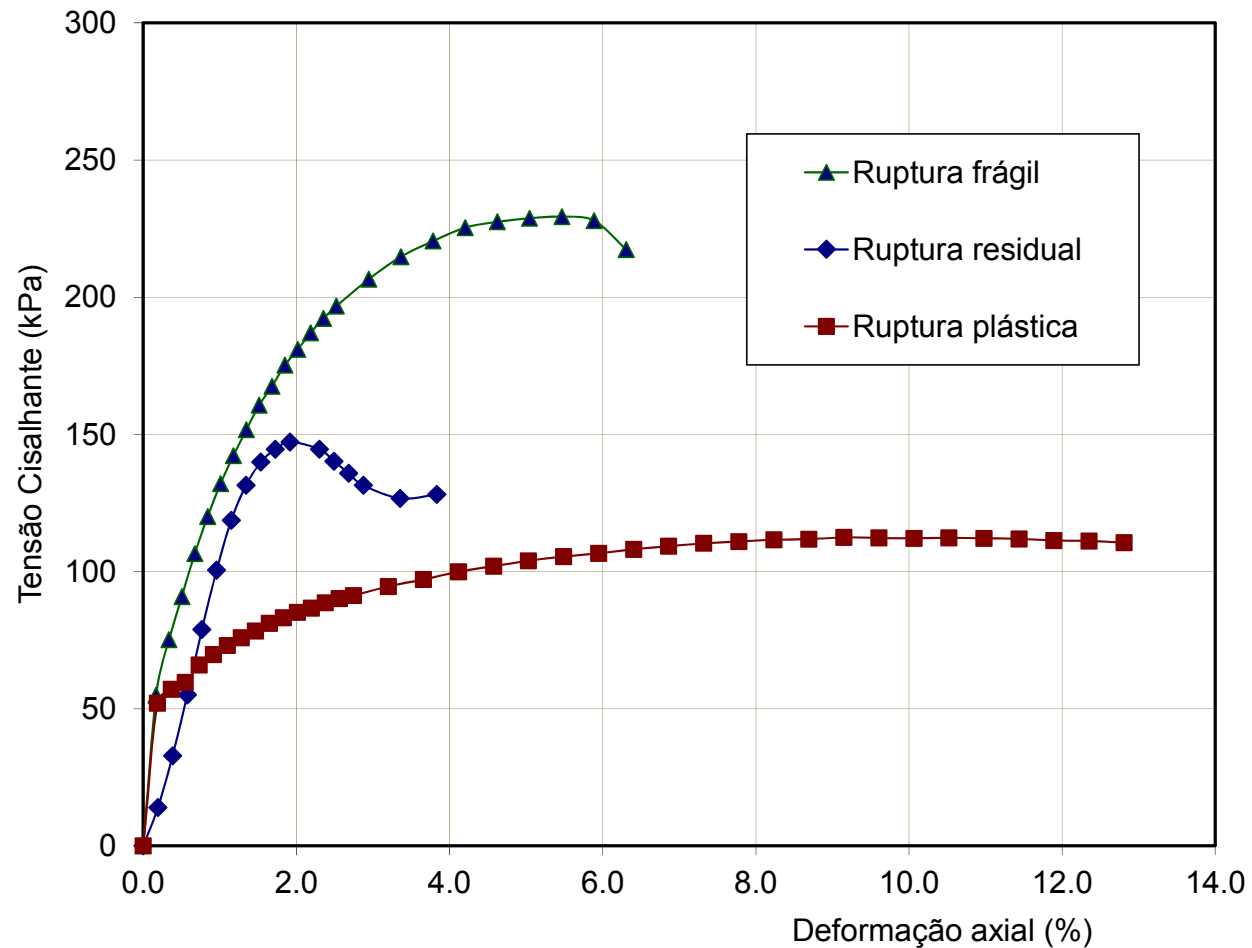
---

**Matriz composta = matriz básica + matriz de reforço**

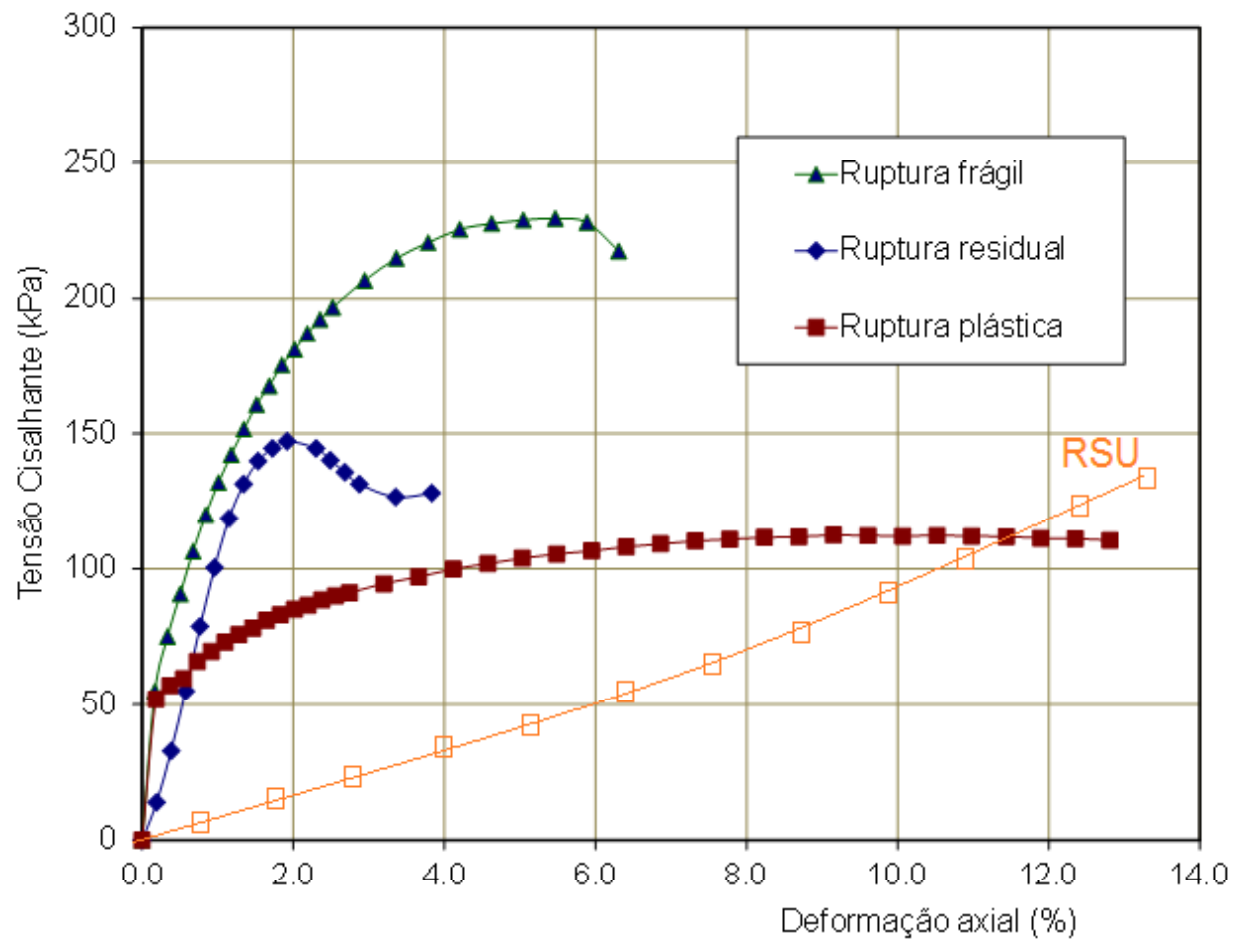
- **Matriz básica:** partículas de granulometria fina a média com comportamento de **ATRITO**;
- **Matriz de reforço:** componentes fibrosos do lixo com comportamento **COESIVO**;

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

# Curvas tensão *versus* deformação



# Curvas tensão *versus* deformação



## 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).**



$D = 20\text{cm}$  e  $H = 40\text{cm}$



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



## Parâmetros de Resistência obtidos em ensaios triaxiais drenados (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

# Considerações finais

---

Melhoria na estimativa dos parâmetros geomecânicos do RSU

- Necessidade de ampliação de pesquisas nesta área;
- Melhorias das técnicas de ensaios de laboratório e de campo;
- Implantação de aterros experimentais;

Obtenção de modelos mais próximos do comportamento dos RSU.

---

# Muito obrigada pela atenção de todos!



**Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Miriam Gonçalves Miguel**  
**Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo**  
**Universidade Estadual de Campinas**

[mgmiguel@fec.unicamp.br](mailto:mgmiguel@fec.unicamp.br)

# Referências

---

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

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

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.

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.

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.