

- Paradigma: resíduos como nova unidade geotécnica.
- Aplicação de conceitos e métodos da Mecânica dos Solos
- Dificuldades principais:
  - heterogeneidade
  - variação das características ao longo do tempo
  - pouca disponibilidade de dados históricos  
(importância de publicar)
  - ausência de modelos específicos  
(vêm sendo desenvolvidos)

# Composição gravimétrica dos RSU

- Característica de grande influência nas propriedades geomecânicas dos RSU.
- Varia com o local (hábitos e desenvolvimento econômico da população).
- Varia com o tempo (mudança dos hábitos da população ou flutuações na economia).

# Composição gravimétrica dos RSU

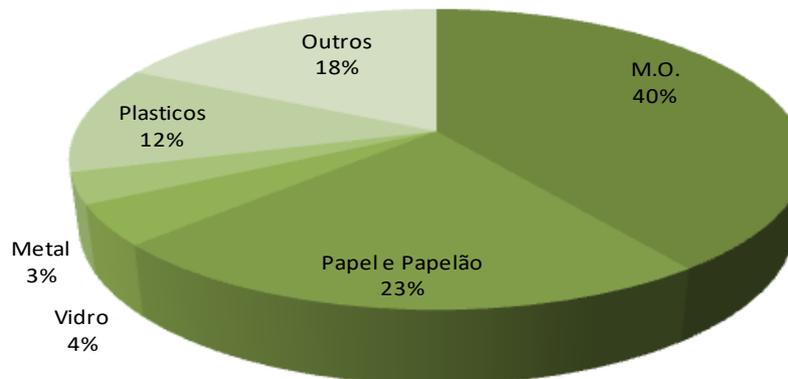
## Geralmente:

- materiais putrescíveis (resíduos alimentares, resíduos de jardinagem e varrição, e demais materiais que apodrecem rapidamente)
- papéis/papelões
- plásticos
- madeiras/couro/borrachas
- metais
- vidros
- outros (entulhos, espumas, solos, cinzas, tecidos, óleos, graxas, resíduos industriais não perigosos etc.)

# Composição gravimétrica dos RSU

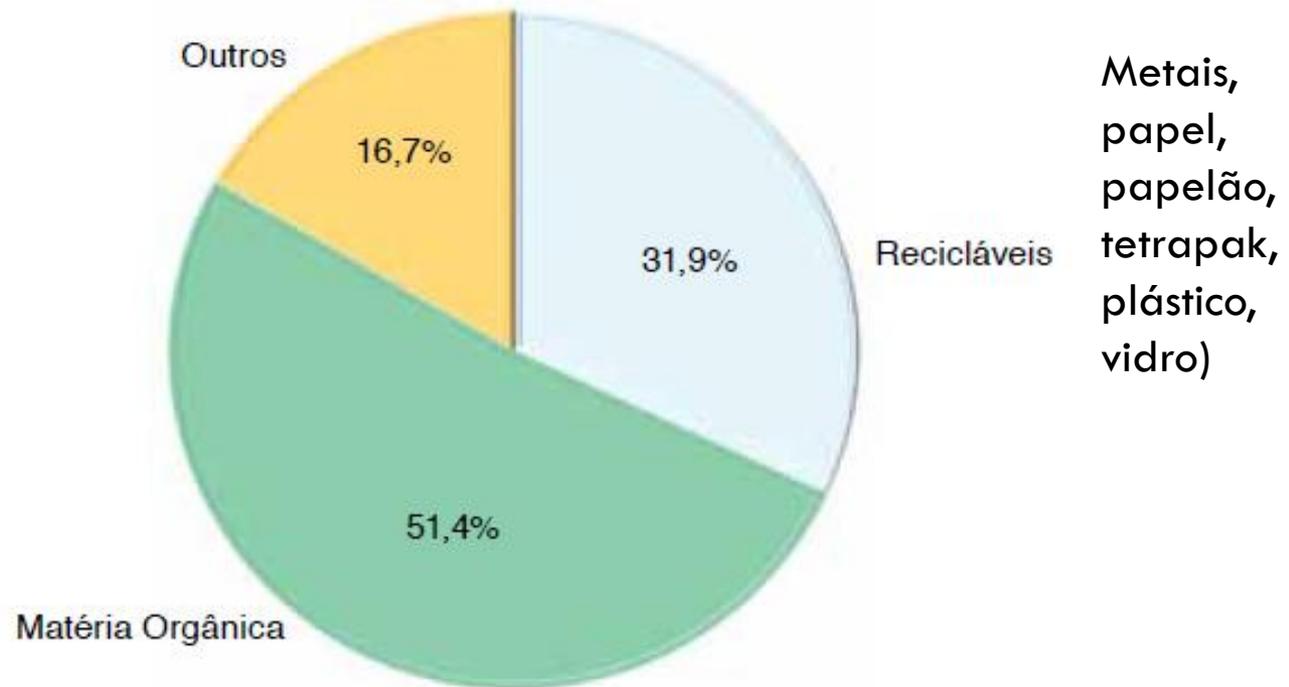
COMPOSIÇÃO DOS RSU EM DIVERSOS PAISES (%)							
Pais	M.O.	Papel e Papelão	Vidro	Metal	Plásticos	Outros	FONTE
Brasil	52	22	2	2	10	12	Revista VEJA, 01/2011
USA	35	30	5	9	13	8	EPA, 2009
Espanha	46	17	7	4	11	15	CIRIEC, 03/2010
Italia	43	20	7	3	7	20	Massarutto, 2009
Alemanha	29	26	7	4	9	25	ACRR, 2005
U K	40	20	6	3	11	20	Resource Futures, 06/2010
China	51	15	3	2	14	15	East Asia Infraestructure Department, 05/2005
Japão	15	50	1	2	20	12	2010 AIT/UNEP Reg Res Center for Asia and the Pacific
India	48	8	1	1	9	33	NSWAI - National Solid Waste Association of India
<b>MÉDIA MUNDIAL %</b>	<b>40</b>	<b>23</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>12</b>	<b>18</b>	

**MÉDIA MUNDIAL %**



Benvenuto,  
2014

# Composição gravimétrica dos RSU no Brasil



Fonte: Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Versão pós Audiências e Consulta Pública para Conselhos Nacionais (Fevereiro/2012)

# Composição gravimétrica dos RSU em áreas do Rio de Janeiro

Componente	(COMLURB 1999 apud Lamare Neto 2004)		(COMLURB 2005)	
	Leblon	Rocinha	AP* 2.1	AP 5.3
Materiais Putrescíveis	39,55	64,66	52,18	67,21
Papel	28,09	11,60	18,58	10,34
Plástico	18,60	19,29	16,10	14,07
Metal	2,31	2,10	1,78	1,31
Vidro/Matéria Inerte/Outros	11,45	2,35	11,36	7,07

\* Área de planejamento

# Variação na composição gravimétrica dos RSU da cidade de São Paulo ao longo do tempo (IPT, 1995)

Componentes	1927	1947	1965	1969	1972	1989	1990	1993
Materiais putrescíveis	82,5	76,0	76,0	52,2	47,6	55,0	47,4	64,4
Papel/papelão	13,4	16,7	16,8	29,2	25,9	17,0	29,6	14,4
Plástico	-	-	-	1,9	4,3	7,5	9,0	12,0
Madeira/couro/ borracha	1,5	2,7	3,1	3,8	4,3	-	3,0	4,5
Metal	1,7	2,2	2,2	7,8	4,2	3,3	5,3	3,2
Vidro	0,9	1,4	1,5	2,6	2,1	1,5	4,2	1,1
Outros	-	1,0	0,4	2,5	11,6	15,7	1,5	0,4

# Sowers (1973)

Componente	Características
Resíduos alimentares	Muito úmido, putrescível, degradação rápida, compressível.
Papel, trapos	Seco a úmido, degradável, inflamável, compressível.
Resíduos de jardinagem	Úmido, putrescível, degradável, inflamável.
Plástico	Seco, compressível, pouco degradável, inflamável.
Metais ocos	Seco, corrosivo, pode ser amassado.
Metais maciços	Seco, fracamente corrosivo, rígido.
Borracha	Seco, inflamável, compressível, não pode ser amassado, pouco degradável.
Vidro	Seco, pode ser amassado, compressível, pouco degradável.
Madeiras, espumas	Seco, pode ser amassado, compressível, degradável, inflamável.
Entulho de construção	Úmido, pode ser amassado, erodível, pouco degradável.
Cinzas, pó	Úmido, possui características de solo, compressível, pode ser ativo quimicamente e parcialmente solúvel.

# Classificação dos componentes dos RSU

Componente	Características
Estáveis inertes	Vidros, metais, entulhos de construção etc., cujas propriedades não variam com o tempo.
Altamente deformáveis	Apresentam grandes deformações sob carga constante ao longo do tempo: - Esmagáveis ou quebráveis - Compressíveis
Degradáveis	Como resultado da decomposição, a estrutura sólida inicial se transforma em compostos líquidos e gasosos; quimicamente reativos ou biodegradáveis.

# Classificação dos componentes dos RSU

Componente	Características
Orgânicos putrescíveis	Resíduos alimentares, de jardinagem e varrição e aqueles que apodrecem rapidamente.
Orgânicos não putrescíveis	Papéis, madeiras, tecidos, couro, plásticos, borrachas, tintas, óleos e graxas
Inorgânicos degradáveis	Metais
Inorgânicos não degradáveis	Vidros, cerâmicas, solos minerais, cinzas e entulhos de construção

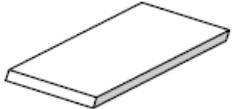
- O teor de materiais putrescíveis influi nas taxas de geração de lixviado e gás, no desenvolvimento de pressões neutras no interior do maciço sanitário, no teor de umidade, na resistência ao cisalhamento e na compressibilidade dos RSU.

# Classificação dos componentes dos RSU

## Comportamento mecânico e bioquímico

peças grandes, papel/papelão, plásticos macios, plásticos duros, metais, minerais, madeira e orgânicos

## Classificação morfológica

Dimensão	Características	Forma
0	Grãos (diâmetro < )	
1	fibras	
2	Folhas, objetos planos	
3	volumes	 

# Índices físicos

- Peso específico aparente
  - Teor de umidade
  - Peso específico dos grãos
  - Peso específico aparente seco, índice de vazios, porosidade, saturação
- Faltam normas**
- Amostra representativa**

# Peso específico dos RSU no Brasil

Resíduos soltos: 1,5 a 3,5 kN/m<sup>3</sup>

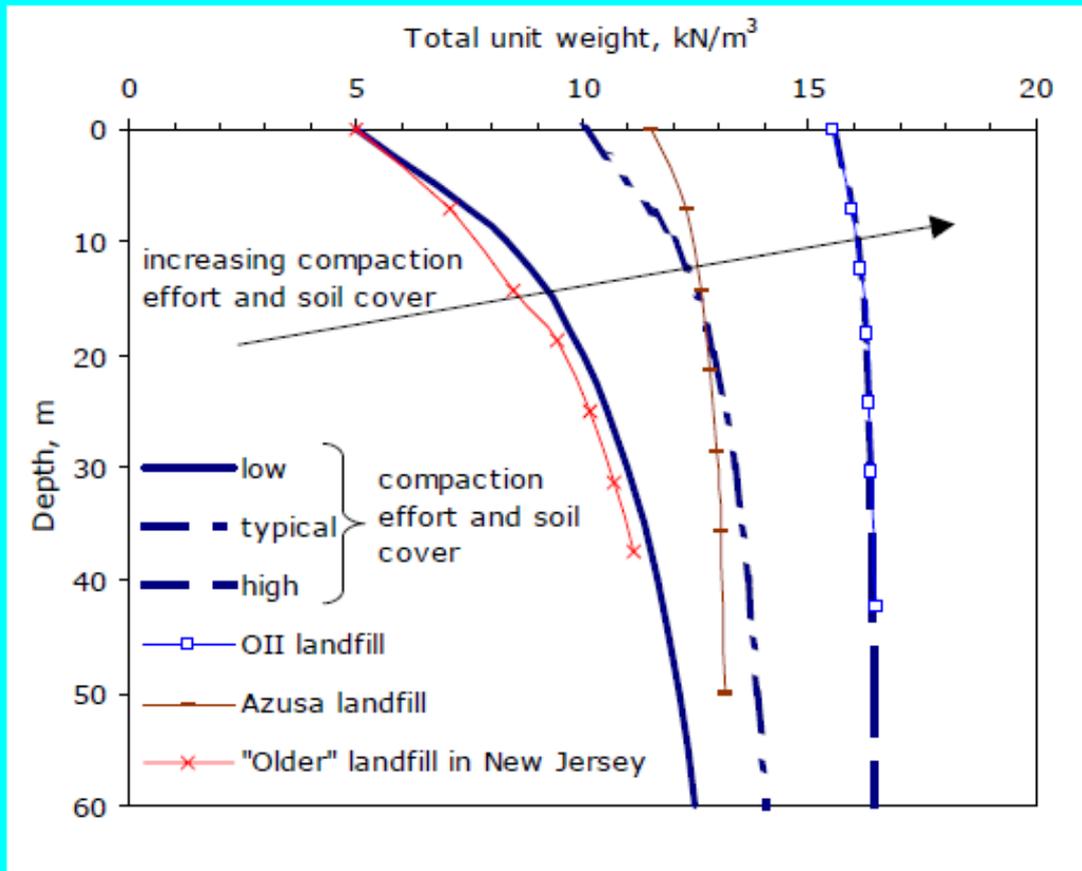
Resíduos compactados:

- novos (recém-lançados): 5 a 7 kN/m<sup>3</sup>
- após ocorrência de recalques: 9 a 13 kN/m<sup>3</sup>

Benvenuto e Cunha (1991), Santos e Presa (1995), Kaimoto e Cepollina (1996), Mahler e Iturri (1998), Abreu (2002)

## “Drained” MSW Unit Weight Profiles

Generic Characteristic MSW Unit Weight Profiles (Zekkos et al., 2005)



,4 kN/m<sup>3</sup>,  
n<sup>3</sup> em  
dade



Peso específico aparente pode ser determinado in situ (vala, percâmetro) ou estimado por controle de operação (topografia e quantidade disposta)

# Teor de umidade

- Muito difícil de obter: varia com a pluviometria, condições de drenagem interna e superficial do maciço, composição dos RSU, e profundidade, além de não haver ensaios normalizados.
- Na bibliografia internacional, valores de 15% até superiores a 130%.
- AS Bandeirantes: 45% a 110%, de 2,5 a 25 m de profundidade.

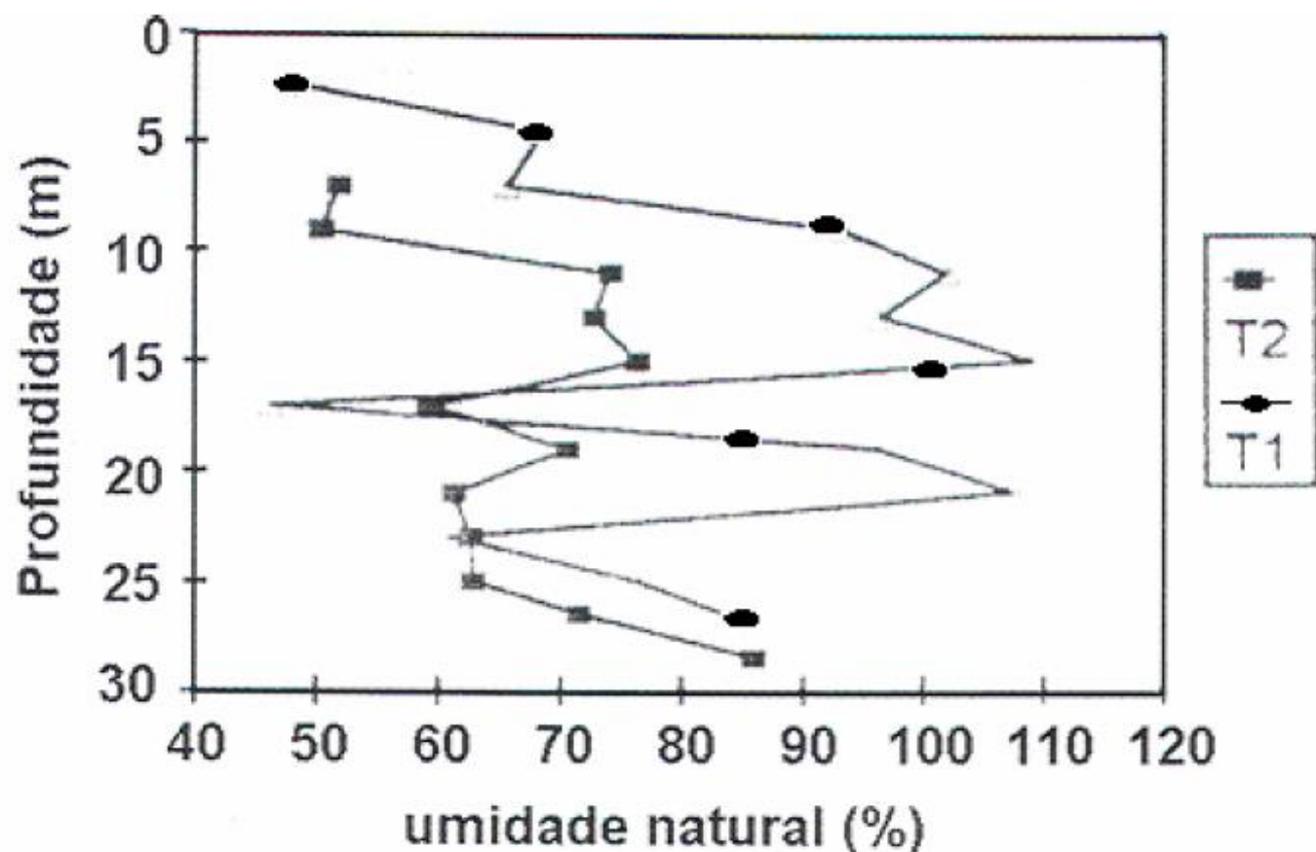
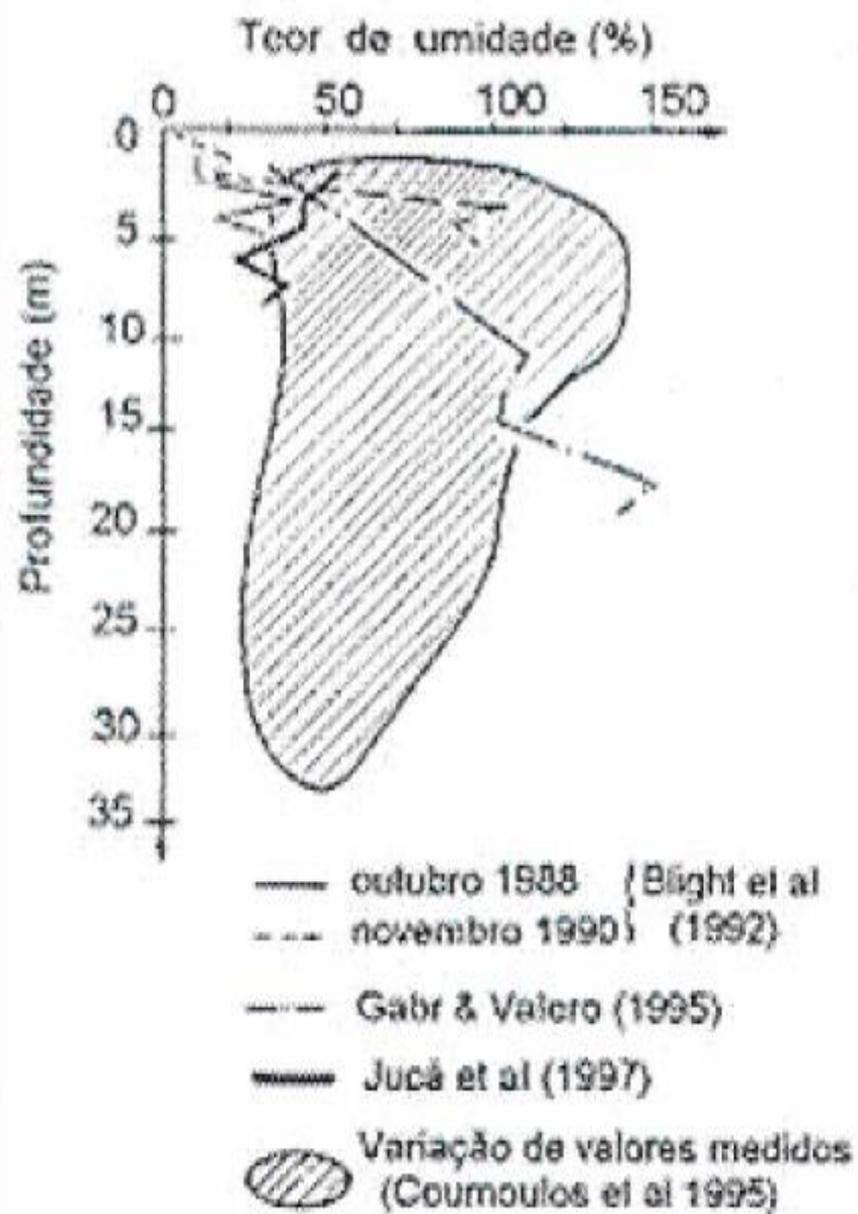


Figura 2.15 – Variação do Teor de Umidade dos RSU com a profundidade, no aterro sanitário dos Bandeirantes, SP (CARVALHO, 1999 *apud* DE LAMARE NETO, 2004).



# Teor de umidade

---

- Não existe ainda um consenso quanto à variação da umidade nos maciços de RSU com a profundidade.
- Fundamental na velocidade de degradação dos materiais putrescíveis e, conseqüentemente, nos recalques dos maciços de RSU.

# Distribuição granulométrica

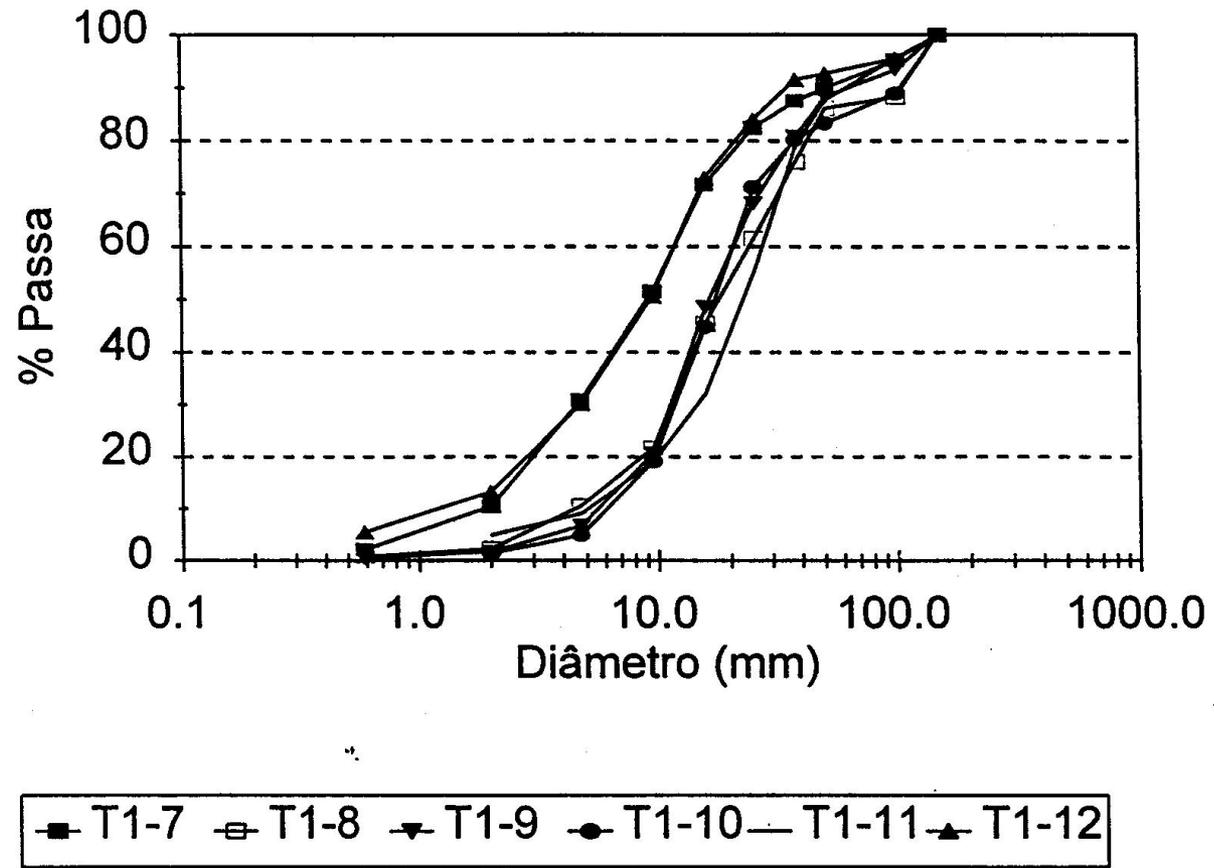


Figura 18 - Curvas "granulométricas" dos resíduos da perfuração T1, do sub-aterro AS-02 - Aterro Sanitário Bandeirantes.

# Propriedades geomecânicas

---

- Permeabilidade
- Resistência ao cisalhamento
- Compressibilidade

# Permeabilidade

- Projeto de sistemas de drenagem interna e de tratamento de chorume e gás
- $10^{-4}$  a  $10^{-8}$  m/s
- Valores nacionais inferiores aos da bibliografia internacional
- “livres drenantes”?
- Pressões de gás de até 170 kPa (Kaimoto & Cepollina, 1996)

Pesquisador	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	Coefficiente de permeabilidade (m/s)	Metodologia utilizada
Fungaroli et al. (1979)	1,1 a 4,0	$10^{-5}$ a $2 \times 10^{-4}$	Lisímetros
Koriatas et al. (1983)	8,6	$5,1 \times 10^{-5}$ a $3,15 \times 10^{-5}$	Ensaio de laboratório
Oweis & Khera (1986)	6,45	$10^{-5}$	Estimativa através de dados de campo
Oweis et al. (1990)	6,45 9,4 a 14 6,3 a 9,4	$10^{-5}$ $1,5 \times 10^{-4}$ $1,1 \times 10^{-5}$	Bombeamento Ensaio "in situ" Ensaio "in situ"
Landva & Clark (1990)	10,1 a 14,4	$10^{-5}$ a $4 \times 10^{-4}$	Ensaio "in situ"
Gabr & Valero (1995)	-	$10^{-7}$ a $10^{-5}$	Ensaio de laboratório
Blengino et al. (1996)	9,0 a 11,0	$3 \times 10^{-7}$ a $3 \times 10^{-6}$	Ensaio "in situ" a grande profundidade (30 a 10 m)
Manassero (1990)	8,0 a 10,0	$1,5 \times 10^{-5}$ a $2,6 \times 10^{-4}$	Ensaio de bombeamento
Beaven & Powrie (1995)	5,0 a 13,0	$10^{-7}$ a $10^{-4}$	Ensaio de laboratório
Brandl (1990)	11,0 a 16,0	$3 \times 10^{-7}$ a $5 \times 10^{-6}$	Ensaio "in situ"
Brandl (1994)	9,0 a 12,0	$10^{-6}$ a $5 \times 10^{-4}$	Ensaio de laboratório
Brandl (1994)	13,0 a 17,0 (muito compactado)	$3 \times 10^{-8}$ a $2 \times 10^{-6}$	Ensaio de laboratório
Cepollina et al. (1994)	~10	$10^{-7}$	Ensaio de bombeamento
Santos et al. (1998)	14,0 a 19,0	$10^{-7}$	Ensaio "in situ"
Carvalho (1999)	8,0 a 15,0	$5 \times 10^{-8}$ a $8 \times 10^{-6}$	
Mariano & Jucá (1998)	-	$1,9 \times 10^{-8}$ a $4,2 \times 10^{-6}$	Ensaio "in situ"

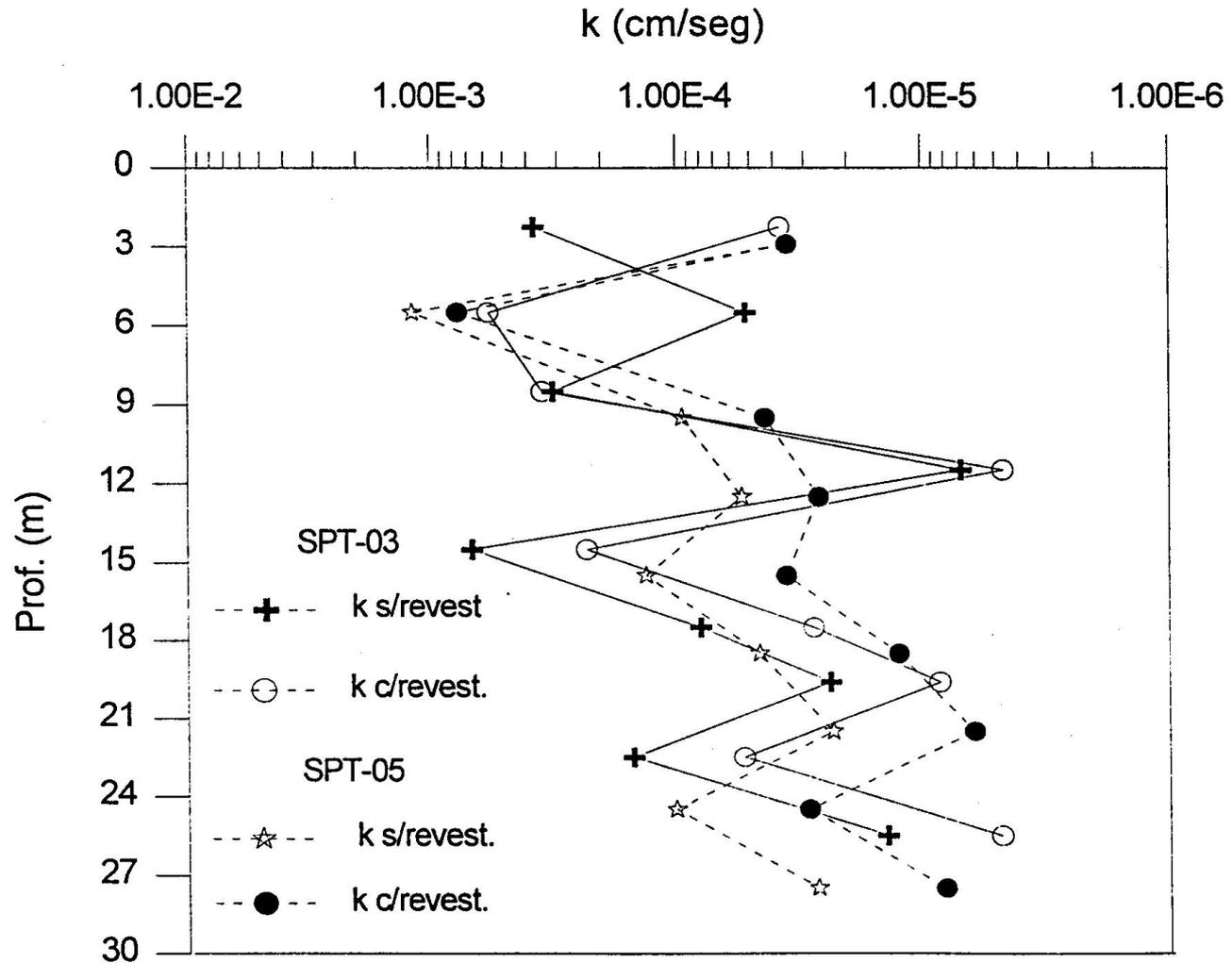
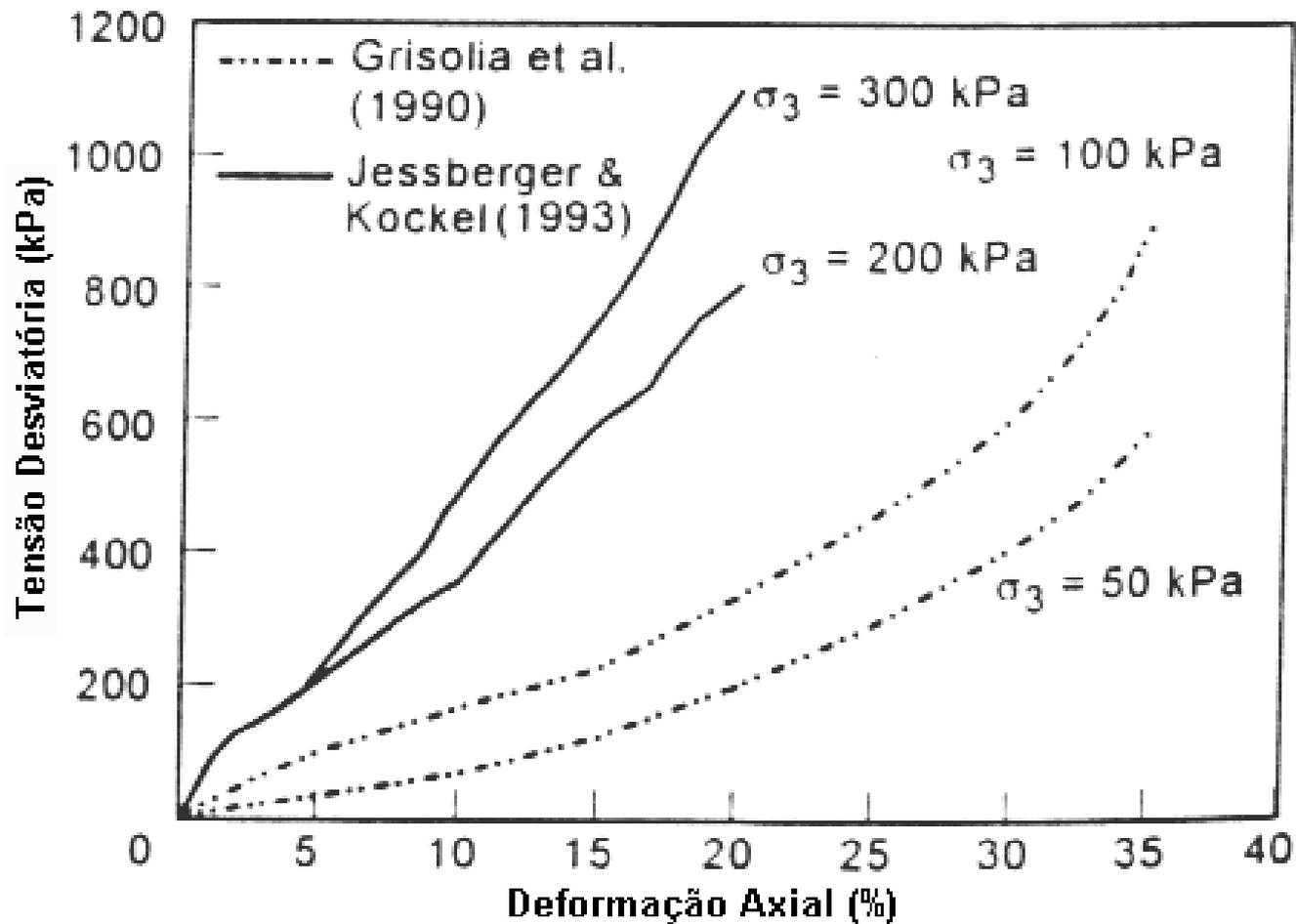


Figura 12 - Coeficiente de permeabilidade do RSU para sub-aterro AS-2 - Aterro Sanitário Bandeirantes

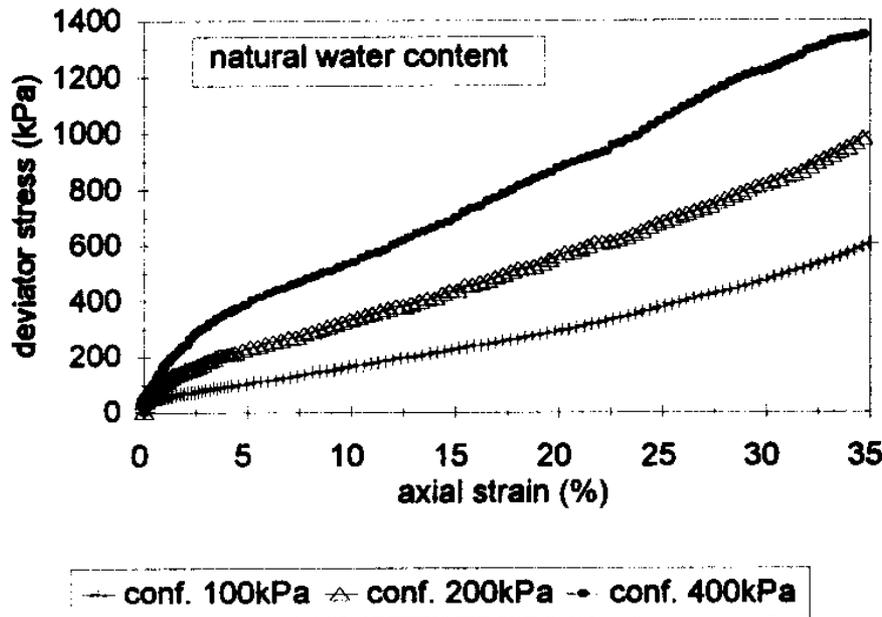
# Resistência ao cisalhamento

- Envoltória de Mohr-Coulomb: coesão e ângulo de atrito
- RSU são granulares; intercepto coesivo pode ser entendido como “efeito-fibra”
- Elevadas deformações sem atingir ruptura em ensaios: parâmetros especificados a um nível de deformação
- Parâmetros se alteram com o tempo

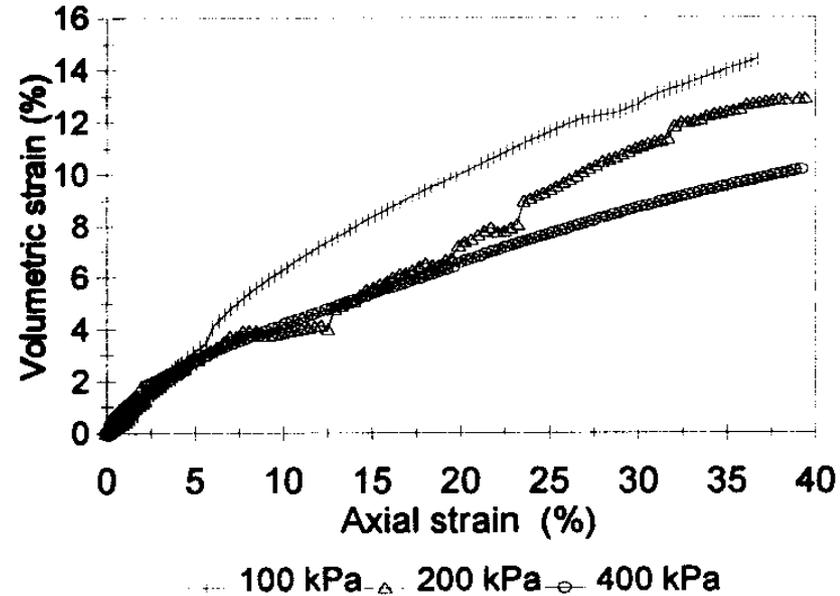
## Relação tensão-deformação dos RSU (Manassero et al., 1996)



# Comportamento tensão-deformação dos RSU



tensão desviadora em função da  
deformação axial



deformação volumétrica em função  
da deformação axial

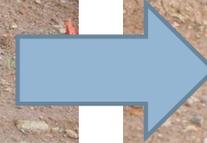
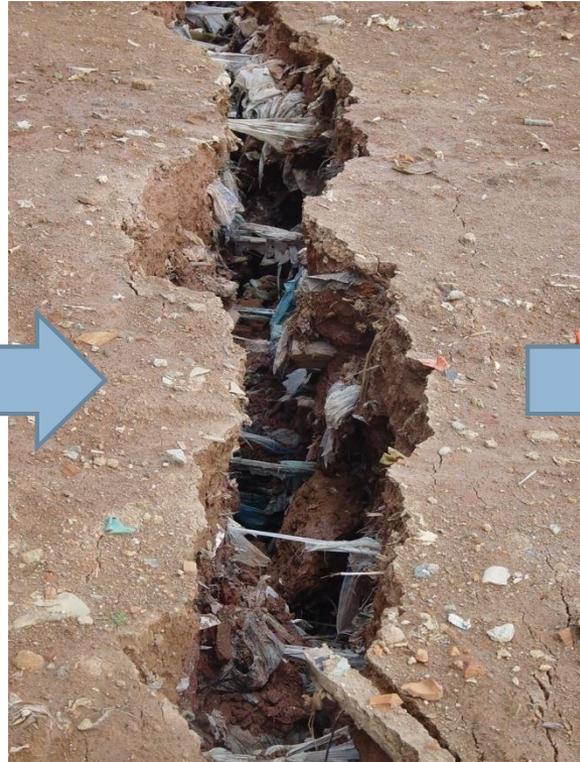
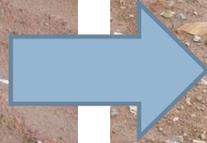
(Vilar et al. 2006)

# Comportamento tensão-deformação dos RSU



Carga vertical em função do deslocamento vertical em prova de carga realizada em lisímetro de grandes dimensões (modificado de Azevedo et al. 2006).

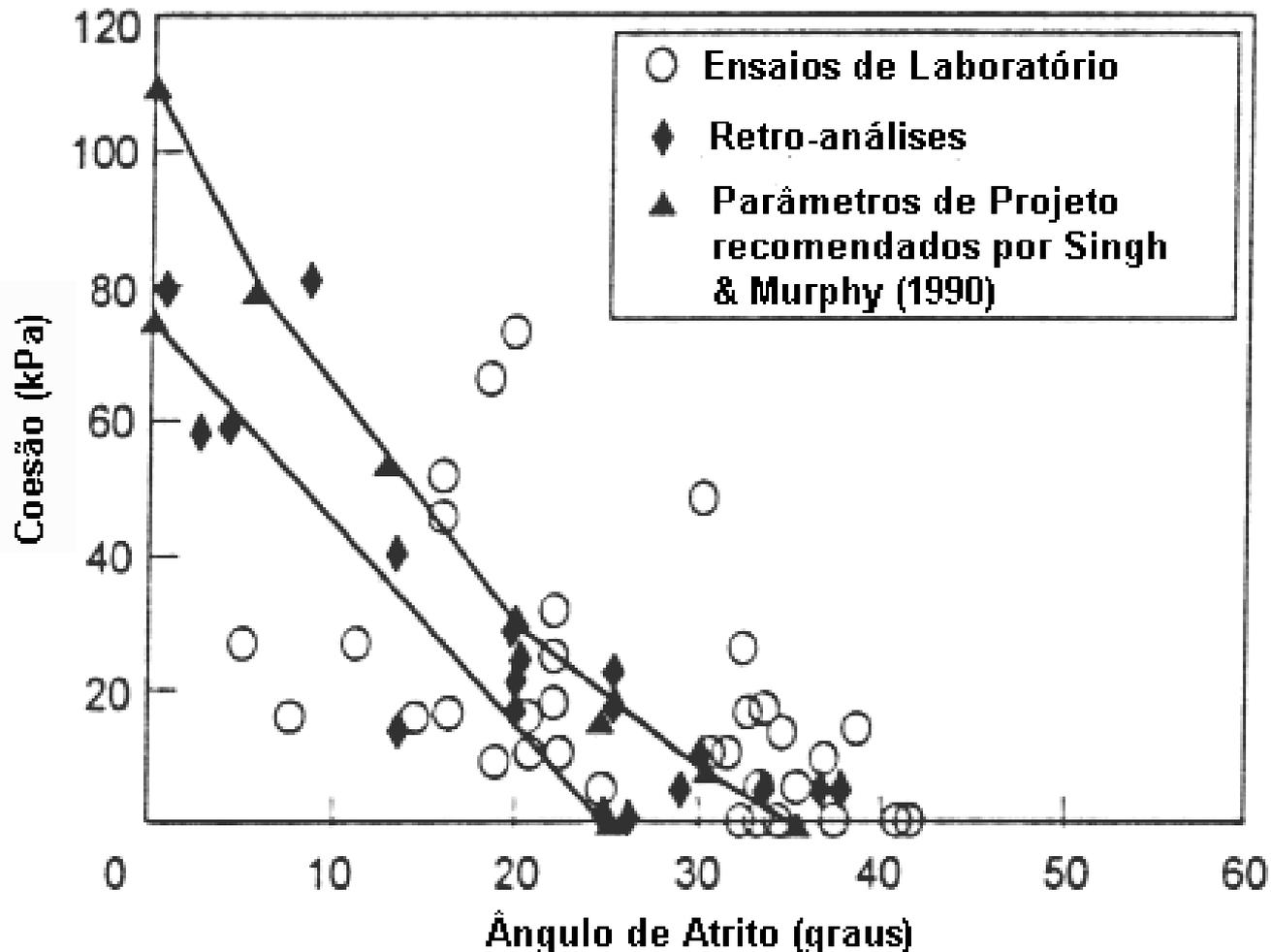
# Efeito “fibra”



# Estimativa dos parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito)

- ensaios de laboratório
- ensaios de campo
- retroanálises de rupturas

# Faixa de variação dos parâmetros de resistência dos RSU (Singh & Murphy apud Bouazza & Wojnarowicz, 1999)



Pesquisador	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito	Observações
Landva & Clark (1990)	19 a 22	24° a 39°	$\sigma \geq 480$ kPa
Jessberger (1995)	41 a 51	42° a 49°	Resíduos novos
Richardson & Reynolds (1991)	10	18° a 43°	$14 \text{ kPa} \leq \sigma \leq 38 \text{ kPa}$
Gabr & Valero (1995)	0 a 27,5	20,5° a 39°	Resíduos antigos
Grecco & Oggeri (1993)	16	21°	$\gamma = 5 \text{ kN/m}^3$
IPT (1991)	13,5	22°	Retroanálise de escorregamento
Carvalho (1999)	42 a 60	21° a 27°	Diâmetro grande

(Abreu, 2000)

# Parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos por retroanálises de rupturas

**Aterro sanitário Bandeirantes, 1991 (BENVENUTO & CUNHA, 1991):  $C=13,5$  kPa e  $\varphi= 22^\circ$**

**Aterro sanitário Bandeirantes, 1991 (KAIMOTO & CEPOLLINA, 1996)**

<b>Idade dos resíduos</b>	<b>Coesão (kPa)</b>	<b>Ângulo de atrito</b>
Resíduo antigo	13,5	22,0
Resíduo novo	19,0	28,0

**Aterro Sanitário Sítio São João, 2007 (ECOURBIS AMBIENTAL S/A, 2007)**

<b>Idade dos resíduos</b>	<b>Coesão (kPa)</b>	<b>Ângulo de atrito</b>
Resíduo antigo	13,5	22,0
Resíduo antigo com mais de 2 anos	16,0	22,0
Resíduo novo (menos do que 2 anos)	16,0	28,0

## ***Ensaio de placa em aterro sanitário***



**Removendo cobertura**



**Regularizando a superfície**



**Assentando a placa**



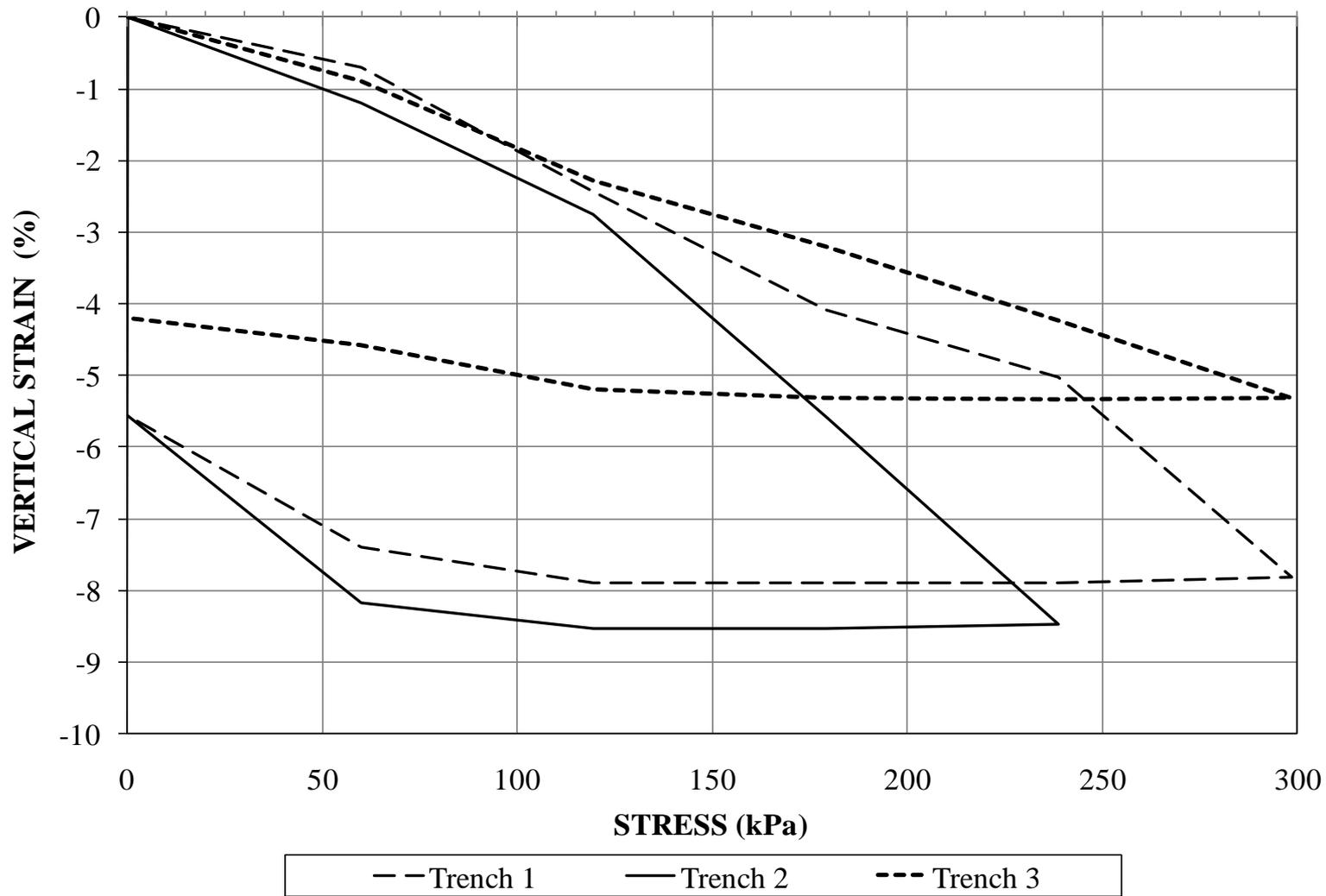
**Posicionado o pistão**



**Posicionando os extensômetros**

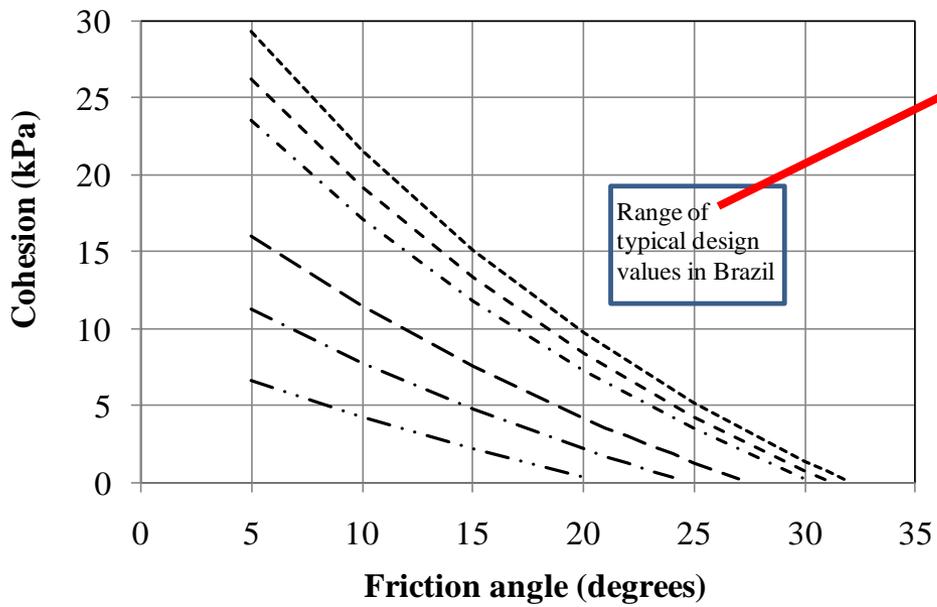


**Fazendo as medidas**

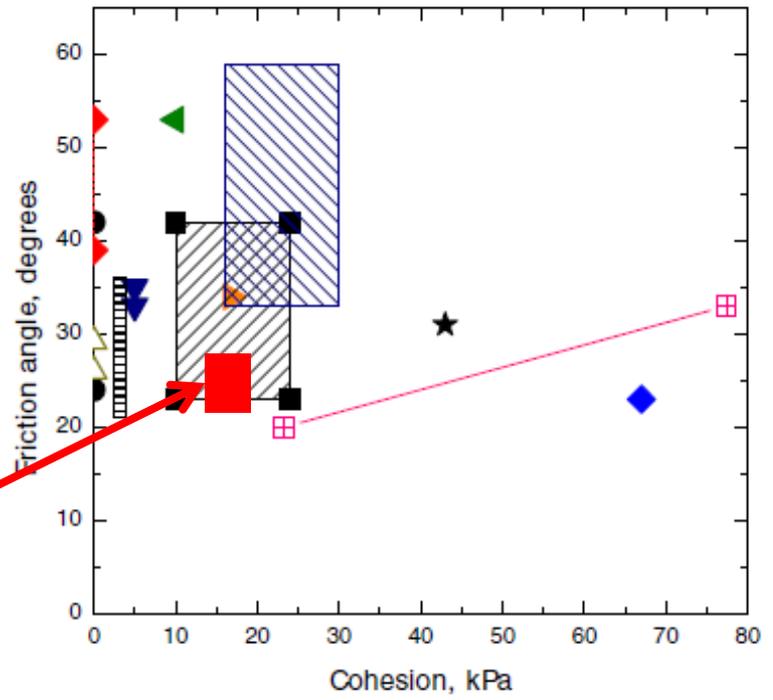


Boscov & Campi, 2011)

# TRENCH 1

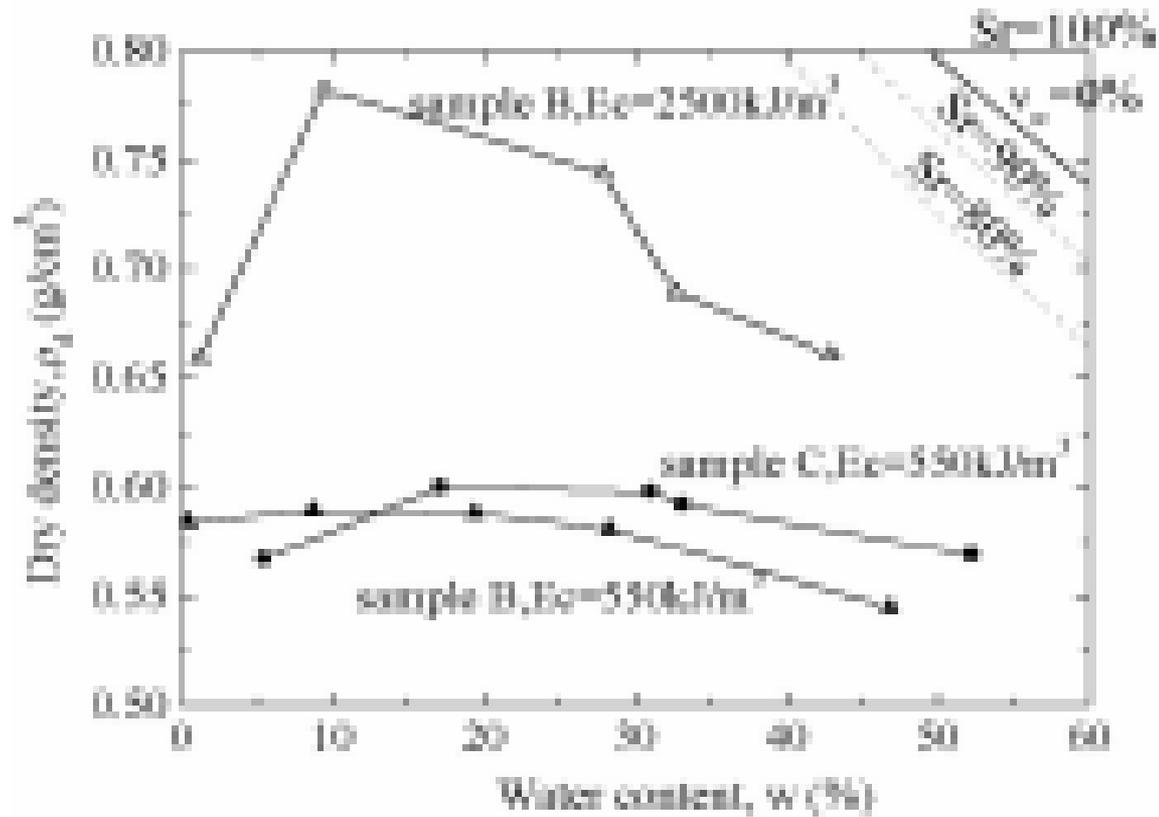


- · — strain=1.25%      - · - · strain=2.50%      - - - strain=3.75%
- · - · strain=5.00%      - - - strain=6.25%      - - - - strain=7.50%

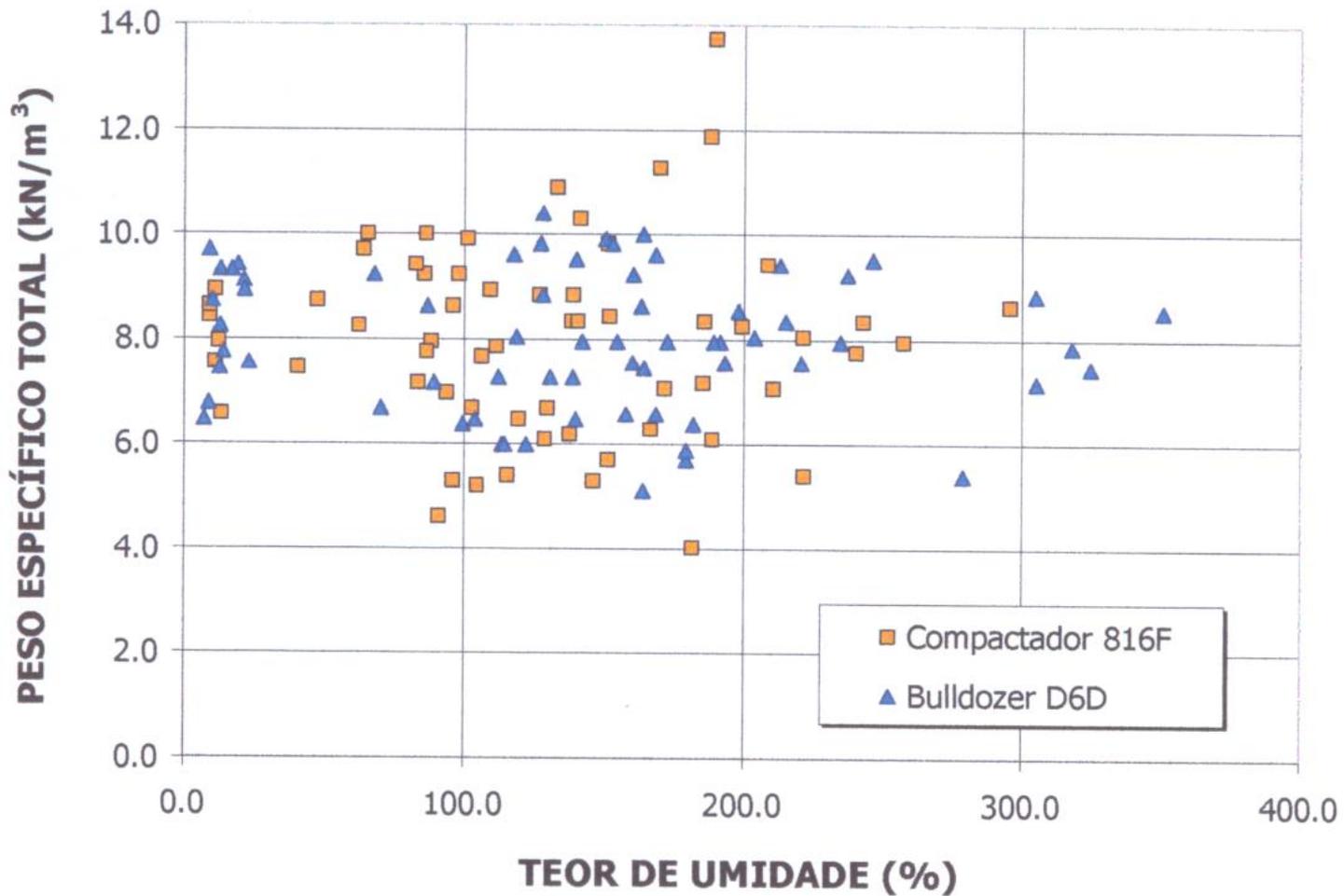


- Stoll (1971)
- Landva and Clark (1986, 1990)
- ◆ Siegel et al (1990)
- ▲ Withiam et al. (1995)
- ▲ Gabr and Valero (1995)
- ▼ Houston et al (1995)
- ◻ Vilar and Carvalho (2002)
- ★ Kavazanjian et al. (1999) direct shear
- ▨ Kavazanjian et al. (1999) simple shear
- △ Pelkey (1997)
- ◆ Caicedo et al (2002)
- ▨ Mahler and Delamare Netto (2003)

# Curvas de compactação de RSU

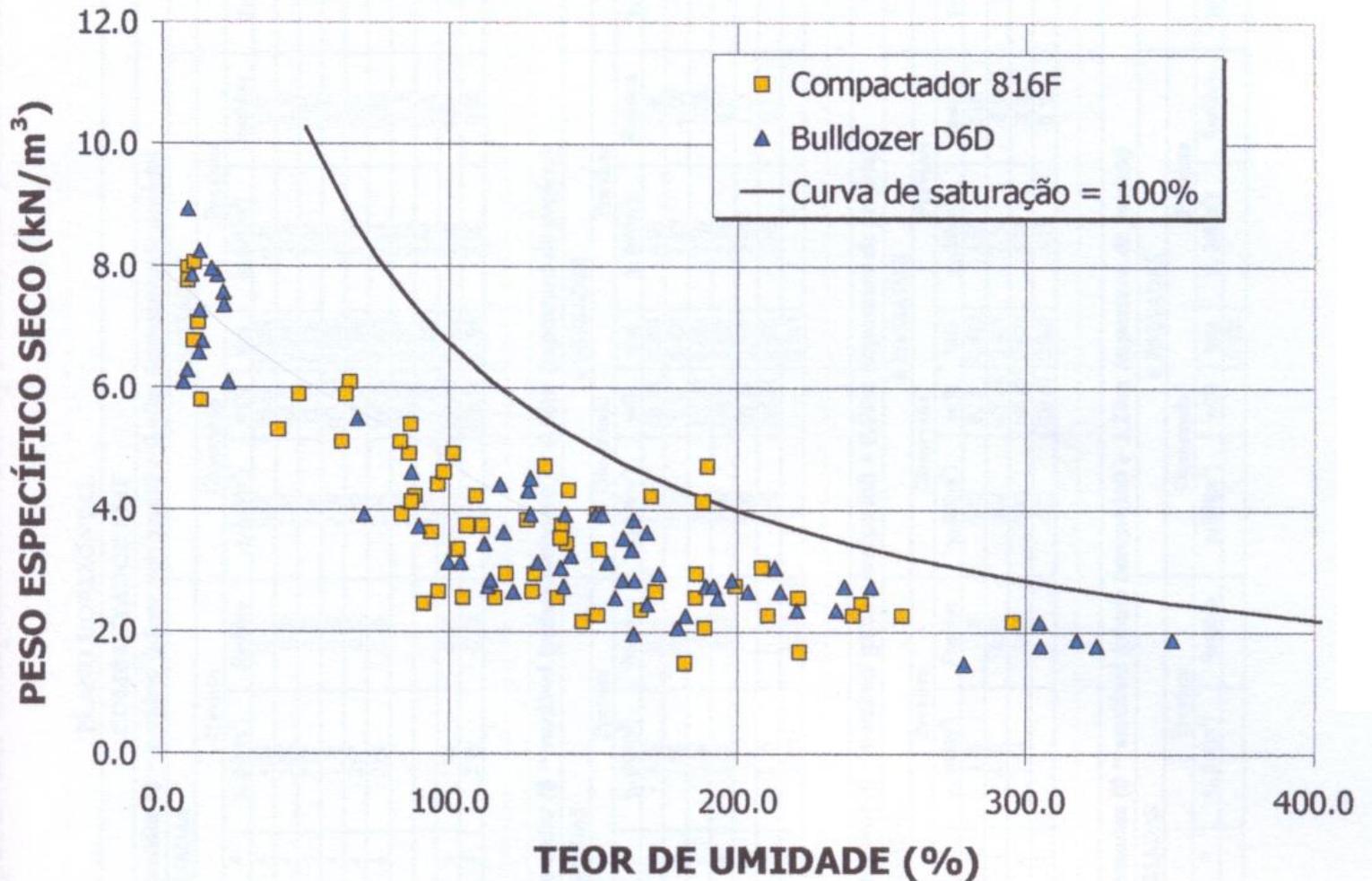


Itoh et al. (2005)



Peso específico total em função do teor de umidade

(Marques, 2001)



Peso específico seco em função do teor de umidade

(Marques, 2001)

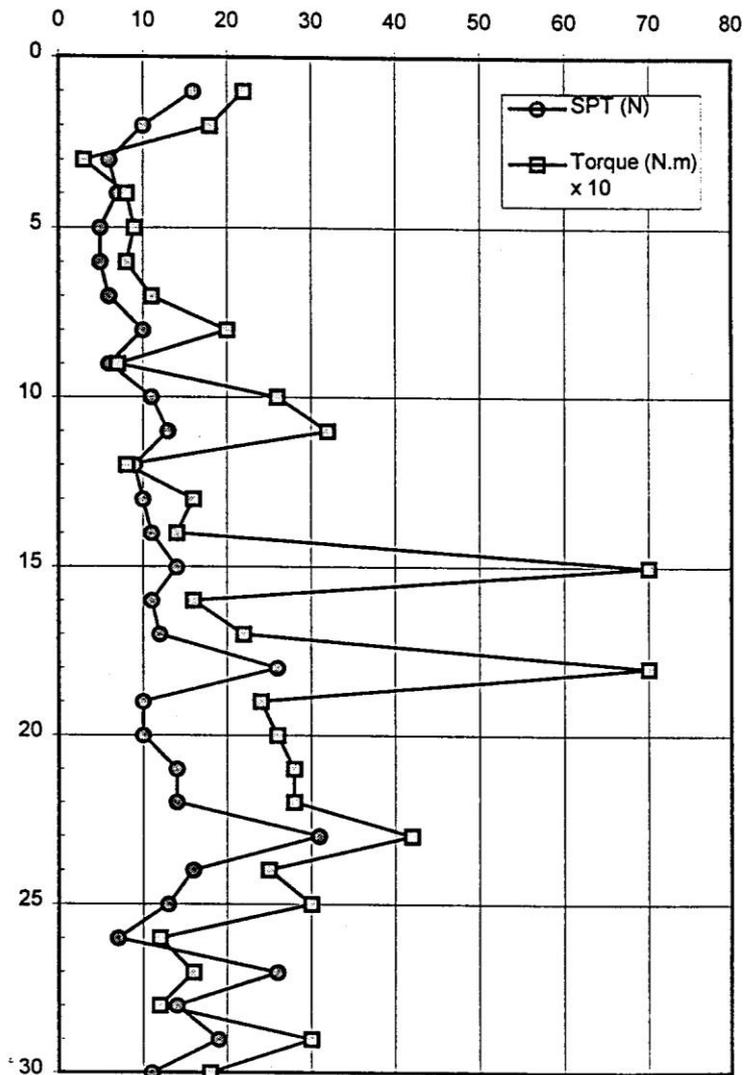
# Outras propriedades dos RSU

Característica	Faixa de variação	Pesquisador
Índice de vazios	1 (resíduo muito denso) a 15 (solto)	Santos & Presa, 1995
SPT	5 a 31	Vilar et al., 1996
CPT - resistência de ponta	1200 a 18000 kPa	Vilar et al., 1996
CPT - atrito lateral	60 a 1100 kPa	Vilar et al., 1996
Porosidades de gás	Até 170 kPa	Kaimoto & Cepollina, 1996
Temperatura	40 a 60°C	Manassero et al., 1996

# SPT

- Tendência a aumento da resistência à penetração com a profundidade
- Grande dispersão dos valores
- Relocação de sondagem devido a materiais mais resistentes (e.g. sistema de drenagem interna)
- Dificuldade de extração dos tubos de revestimento, com eventual perda de trechos de tubo
- Baixo rendimento da perfuração
- Trado espiral com dentes para melhorar a remoção de material (plásticos, trapos) e limpeza do furo

		Prof. (m)	N	Torque (N.m)
0,00		1	16	220
	silte	2	10	180
2,00		3	6	30
	NA(3,3)	4	7	80
	RSU	5	5	90
5,90		6	5	80
6,50	silte	7	6	110
		8	10	200
	RSU	9	6	70
9,32		10	11	260
10,37	silte	11	13	320
		12	9	80
		13	10	160
	RSU	14	11	140
		15	14	700
		16	11	160
17,85		17	12	220
18,10	silte	18	26	700
		19	10	240
		20	10	260
		21	14	280
		22	14	280
		23	31	420
	RSU	24	16	250
		25	13	300
		26	7	120
		27	26	160
		28	14	120
		29	19	300
30,00		30	11	180



■ RSU - Matéria orgânica, pedaços de madeira, plástico, metal, papel e borracha

□ Cobertura de solo: silte

Figura 02 - Perfil de sondagem SPT-T 01, sub-aterro AS-02 - Aterro Sanitário

Bandeirantes

# CPT

- Tendência a aumento das resistências de ponta e lateral com a profundidade
- O cone freqüentemente encontra objetos resistentes, os quais produzem picos na resistência medida
- Deflexões das hastes
- Reações superiores à capacidade do equipamento

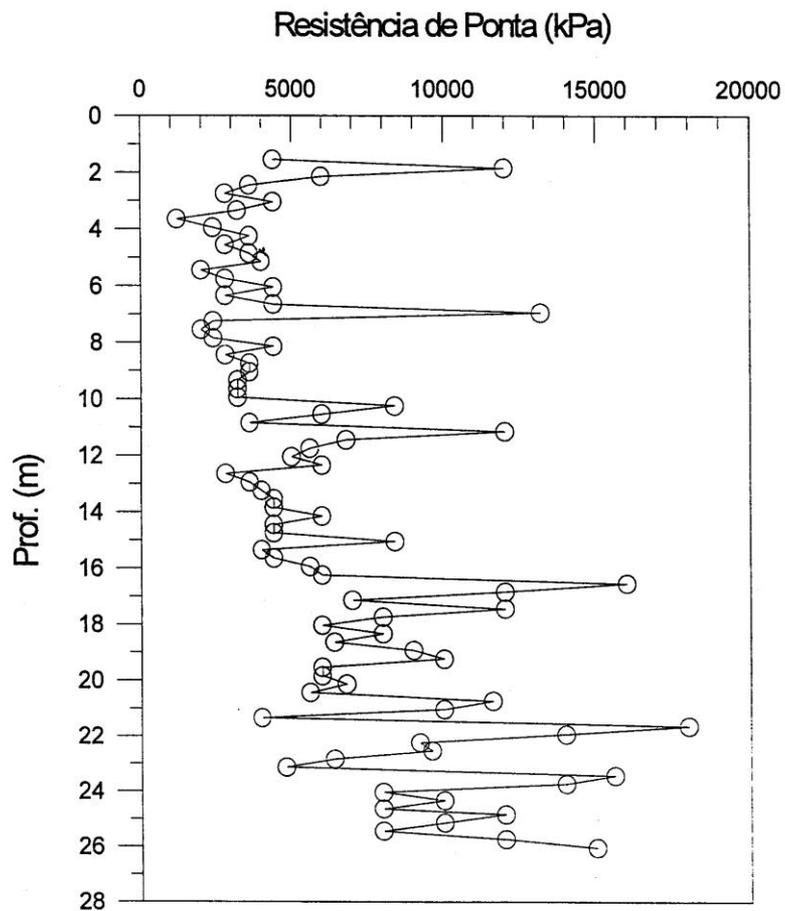


Figura 08 - Resistência de ponta do ensaio de CPT-01 (berma inferior), no sub-aterro AS-02, Aterro Sanitário Bandeirantes

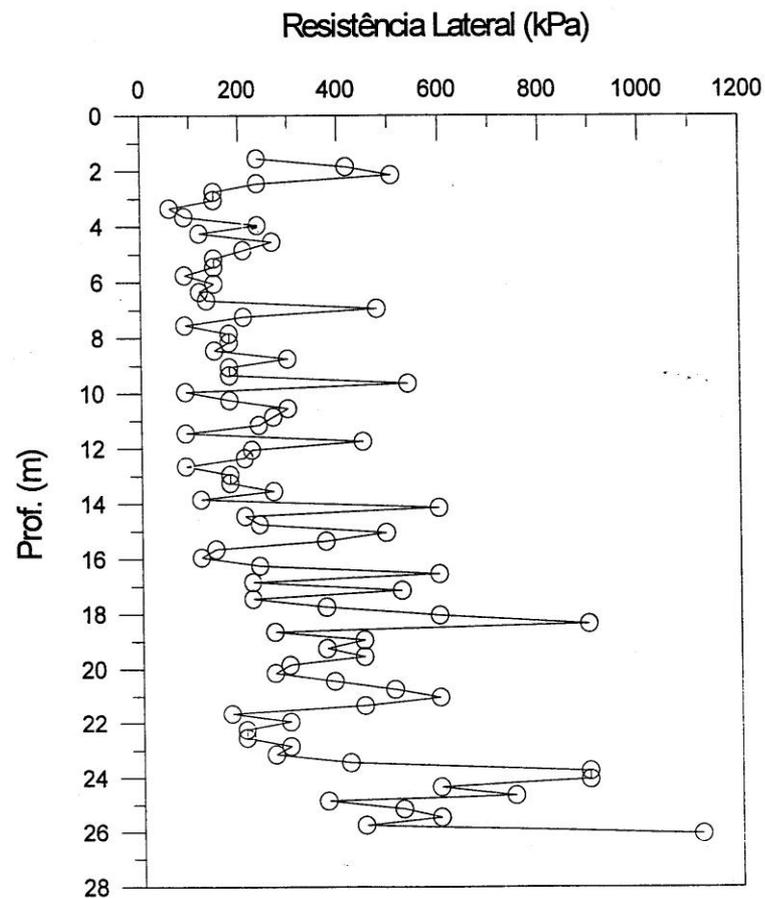


Figura 9 - Resistência lateral do ensaio de CPT-01 (berma inferior), no sub-aterro AS-02, Aterro Sanitário Bandeirantes

# Biodegradação de RSU

- Existem diversas formas de dividir os processos de biodegradação dos RSU ao longo do tempo, podendo-se encontrar na bibliografia diferentes nomes e números de fases, conforme o nível de detalhamento e o enfoque utilizado.

# Digestão aeróbia

- A fase inicial é aeróbia e geralmente curta, durando de poucas horas a 1 semana, pois o teor de oxigênio livre é baixo nos resíduos recentes. O oxigênio ( $O_2$ ) e o nitrogênio ( $N_2$ ) presentes nos resíduos recém-depositados são consumidos gerando gás carbônico ( $CO_2$ ), água e calor. A temperatura conseqüentemente se eleva, chegando a atingir valores próximos a  $60^\circ C$ . Nesta fase ocorre degradação de 5 a 10% da matéria possível de ser degradada.

# Digestão aeróbia

- A biodegradação aeróbia dos RSU ocorre rapidamente e cessa quando se esgota o ar presente no material depositado, enquanto a biodegradação anaeróbia pode durar por muitos anos, sendo a principal responsável pela geração de lixiviado e gases.

# Digestão anaeróbia

- A digestão anaeróbia é composta das fases ácida e metanogênica.
- A fase anaeróbia ácida pode ser subdividida, em termos de atividade microbiana, em hidrólise, acidogênese e acetogênese.
- Como as bactérias não são capazes de assimilar a matéria orgânica particulada, inicialmente ocorre hidrólise de materiais particulados complexos, os polímeros, em materiais dissolvidos mais simples, de moléculas menores, que podem atravessar as paredes celulares das bactérias. A hidrólise é provocada por enzimas produzidas por bactérias fermentativas.

# Digestão anaeróbia

- A seguir, os produtos solúveis gerados pela hidrólise são metabolizados no interior das células das bactérias fermentativas e transformados em compostos mais simples: ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio. Como o principal produto das bactérias fermentativas são os ácidos graxos voláteis, elas são denominadas acidogênicas.

# Digestão anaeróbia

- De todos os produtos metabolizados pelas bactérias acidogênicas, apenas o hidrogênio e o acetato podem ser utilizados diretamente pelas bactérias metanogênicas. As bactérias acetogênicas são responsáveis pela oxidação dos produtos gerados na fase acidogênica em substrato apropriado para as bactérias metanogênicas. Os produtos gerados pelas bactérias acetogênicas são o hidrogênio, o dióxido de carbono e o ácido acético. A grande quantidade de hidrogênio resultante da geração de ácido acético diminui o pH no meio aquoso.

# Digestão anaeróbia

- A etapa final é a metanogênica. As bactérias metanogênicas utilizam somente um limitado número de substratos, compreendendo ácido acético, hidrogênio, dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono. Os compostos orgânicos são finalmente degradados em metano e dióxido de carbono

# Etapas

Hidrólise de polímeros por bactérias fermentativas



Produtos solúveis são metabolizados no interior das células das bactérias fermentativas e transformados em ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio



Oxidação desses compostos por bactérias acetogênicas gerando hidrogênio, dióxido de carbono e ácido acético



Bactérias metanogênicas utilizam hidrogênio, ácido acético e dióxido de carbono (ácido fórmico, metanol, metilaminas e CO) transformando-os em dióxido de carbono e metano

# Biodegradação

Fase	Duração	Produtos	Matéria orgânica consumida
Aeróbia	Horas a semanas	CO <sub>2</sub> , calor e água Temperatura elevada	5 a 10%
Anaeróbia ácida (hidrólise, acidogênese e acetogênese)	1 a 6 meses	CO <sub>2</sub> e ácidos orgânicos	15 a 20%
Anaeróbia metanogênica acelerada	3 meses a 3 anos	CH <sub>4</sub> Diminui produção de ácidos	70 a 80%
Anaeróbia metanogênica desacelerada	4 a 40 anos	CO <sub>2</sub> e CH <sub>4</sub>	

# Geração de biogás

- A estimativa de geração de gases em aterros sanitários é importante para o aproveitamento energético e para a comercialização dos créditos de carbono
- A mistura de gases resultante da fermentação anaeróbia da matéria orgânica é geralmente denominada biogás.
- O biogás é composto essencialmente de metano e gás carbônico, e seu poder calorífico está diretamente relacionado à quantidade de metano na mistura.

# Modelos teóricos de produção de gás

□  $\alpha = 0,8 P_0 k e^{-kt}$  (Hoeks 1983)

$\alpha$  = produção específica de gás

$P_0$  = concentração de matéria orgânica no instante  $t_0$  (kg / t de resíduo)

$k$  = coeficiente de degradação ( $\text{ano}^{-1}$ )

$t$  = tempo

0,8 = fator de produção de gás a partir da matéria orgânica ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )

# Compressão dos RSU

Autor	Recalque relativo à espessura inicial
Sowers (1973)	Da ordem de 30%
Wall e Zeiss (1995)	Entre 25% e 50%
Van Meerten et al. (1995)	Entre 10% e 25%
Coumoulos e Koryalos (1997)	Entre 20% e 25%
Abreu (2000)	Entre 10% a 30%

# Mecanismos de recalque

**Solicitação Mecânica** (distorção, dobra, esmagamento, quebra e rearranjo), **Dissipação de Pressões Neutras**, Alterações Físico-Químicas (corrosão, oxidação e combustão), Biodegradação, Ravinamento Interno, “Creep”

# Compressão dos RSU

- Solicitações mecânicas  
(compressão imediata e primária)
  - Biodegradação
  - “Creep”
- } compressão secundária

# Importância

- Estimativa a vida útil do aterro sanitário;
- Reaproveitamento das áreas após o encerramento da disposição;
- Monitoramento geotécnico do maciço;
- Projeto e implantação dos sistemas de drenagem superficial e de drenagem de efluentes; e
- Desempenho do sistema de cobertura

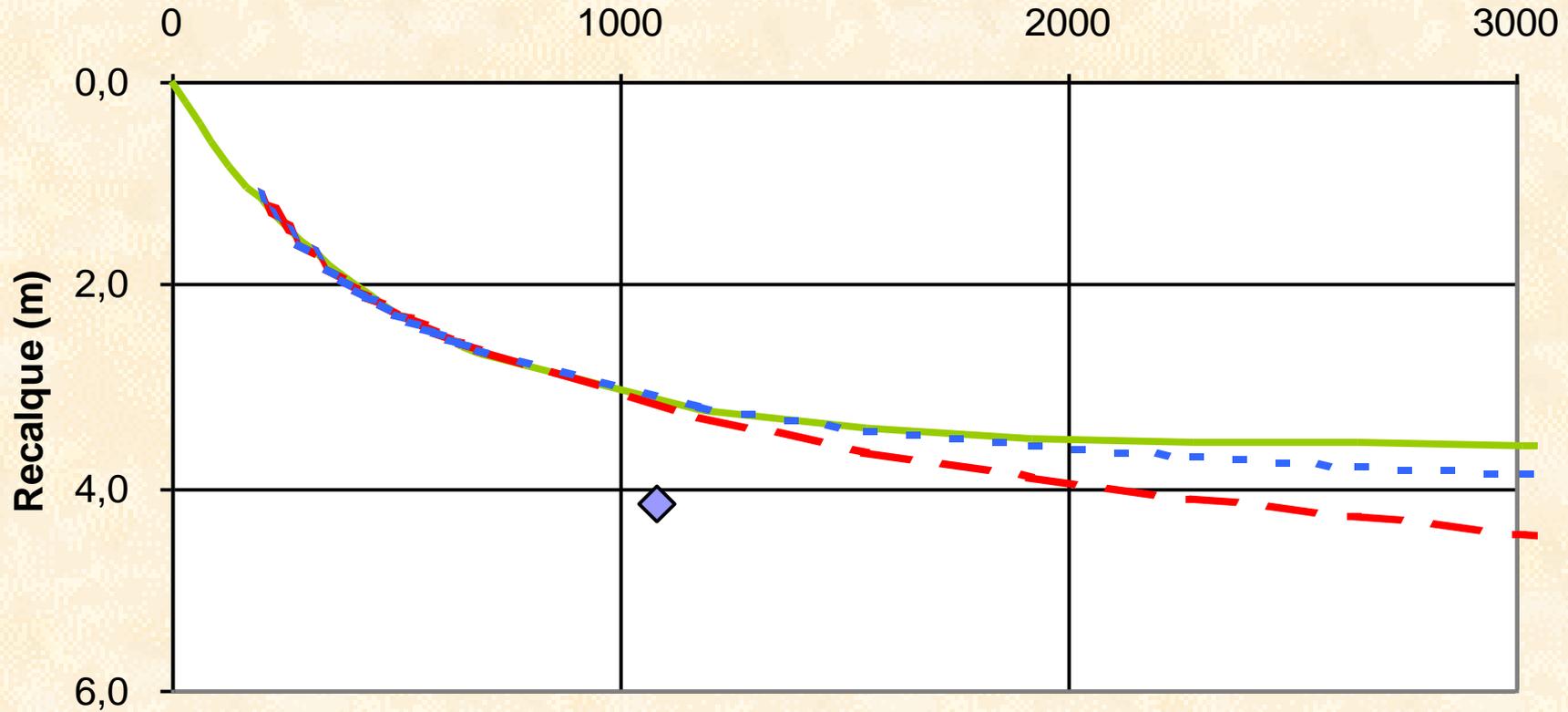
# Modelos de previsão de recalques

- Modelos baseados na teoria de adensamento de Terzaghi e na compressão secundária de solos (modelos “clássicos”)
- Ajuste de equações matemáticas (modelos hiperbólico, exponencial etc.)
- Modelos reológicos
- Modelos de biodegradação

# MS-502 - Sub-Aterro AS-5

## Previsão de Recalques

Dias decorridos do fechamento da célula



— Mod. Meruelo    - - - Mod. Clássico    - - - Mod. Hiperbólico    ◆ Recalque Medido

# Modelo “clássico” (Sowers, 1973)

- Compressão Primária

$$\frac{\Delta h_p}{H_0} = \frac{C_c}{1 + e_0} \cdot \log\left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma}{\sigma'_0}\right)$$

$$\frac{\Delta h_p}{H_0} = C'_c \cdot \log\left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma}{\sigma'_0}\right)$$

$\Delta h_p$  ... recalque correspondente à fase de compressão primária

$C_c$  ... índice de compressão primária

$\sigma'_0$  ... tensão efetiva vertical inicial

$\Delta\sigma$  ... acréscimo da tensão vertical

$C'_c$  ... coeficiente de compressão primária

**Considera-se que a compressão primária ocorra nos primeiros 30 dias.**

- Compressão Secundária

$$\frac{\Delta h_s}{H_0} = \frac{C_\alpha}{1 + e_0} \cdot \log\left(\frac{t_f}{t_i}\right)$$

$$\frac{\Delta h_s}{H_0} = C'_\alpha \cdot \log\left(\frac{t_f}{t_i}\right)$$

$\Delta h_s$  ... recalque correspondente à compressão secundária

$C_\alpha$  ... índice de compressão secundária

$t_f$  ... instante no qual se deseja conhecer o recalque

$t_i$  ... instante no qual se inicia a compressão secundária

$C'_\alpha$  ... coeficiente de compressão secundária

# Modelo de Meruelo (Palma, 1994)

$$\Delta h = \alpha \cdot H \cdot COD \cdot \left[ 1 - \frac{1}{k_h \cdot T_c} \cdot \left( e^{-k_h \cdot (t - T_c)} - e^{-k_h \cdot t} \right) \right]$$

$\alpha$  ... coeficiente de perda de massa transformada em recalques

COD ... porcentagem de material putrescível

$T_c$  ... tempo de construção do aterro sanitário

$k_h$  ... coeficiente de hidrólise

H ... espessura do aterro sanitário

# Modelo hiperbólico

- Revisão do modelo apresentado por Tan et al. (1991)

$$\Delta h_{tm-t} = \frac{t}{\frac{1}{v_{rp0}} + \frac{t}{\Delta h_{\infty}}} \quad \frac{t}{\Delta h_{tm-t}} = \frac{1}{v_{rp0}} + \frac{t}{\Delta h_{\infty}}$$

$t$  ... diferença entre o tempo de interesse e o início da medição

$\Delta h_{tm-t}$  ... diferença entre o recalque no tempo de interesse e o recalque no início da medição

$v_{rp0}$  ... velocidade de recalque inicial (no início da medição)

$\Delta h_{\infty}$  ... recalque final



AS-1

AS-2



**AS-3**

**AS-4**

**AS-5**

# COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO

## COMO SURGE A QUESTÃO

- EXPLOSÃO DEMOGRÁFICA E GERAÇÃO DE RESÍDUOS NO MUNDO.
- ABNT NBR 8419/1992 > MENOR ÁREA E MENOR VOLUME.
- VERTICALIZAÇÃO DAS DISPOSIÇÕES DE RESÍDUOS = EMPILHAMENTO.
- NECESSIDADE - ECONOMIA E SEGURANÇA ESTRUTURAL/AMBIENTAL

## COMPROMISSO:

ESTABILIDADE GEOTÉCNICA / GEOMECÂNICA DOS MACIÇOS

## PECULIARIDADES

- Variabilidade dos RSU (antes, durante e depois).
- Fluídos e “Sólidos” > decomposição física, química e biológica, sob influência das condições climáticas.

## 10 marcos superficiais do aterro AS-2:

- tempo de alteamento da coluna do aterro: 486 a 3325 dias
- tempo de leitura: 1733 a 2867 dias
- espessura de RSU na data de instalação: 9,3 a 63,6 m

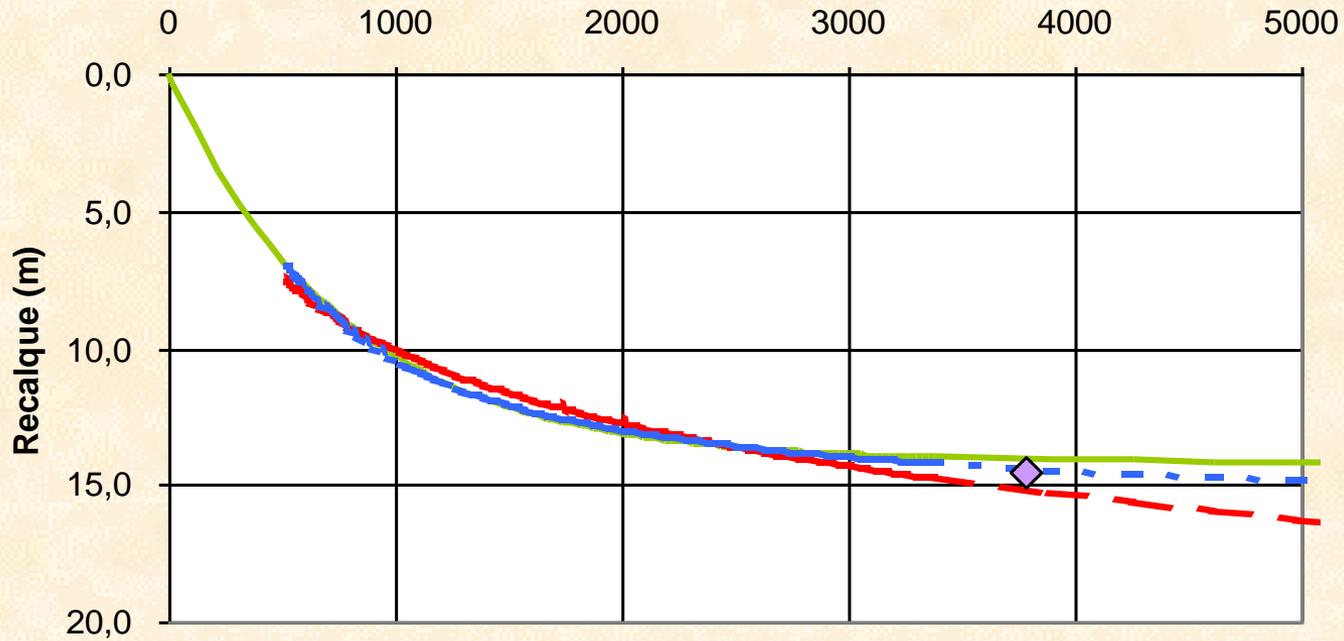
## 10 marcos superficiais do aterro AS-5:

- tempo de alteamento da coluna do aterro: 10 a 118 dias
- tempo de leitura de 489 dias
- espessura de RSU na data de instalação: 4,1 a 26,1 m

# MS-21 - Sub-Aterro AS-2

## Previsão de Recalques

Dias decorridos do fechamento da célula

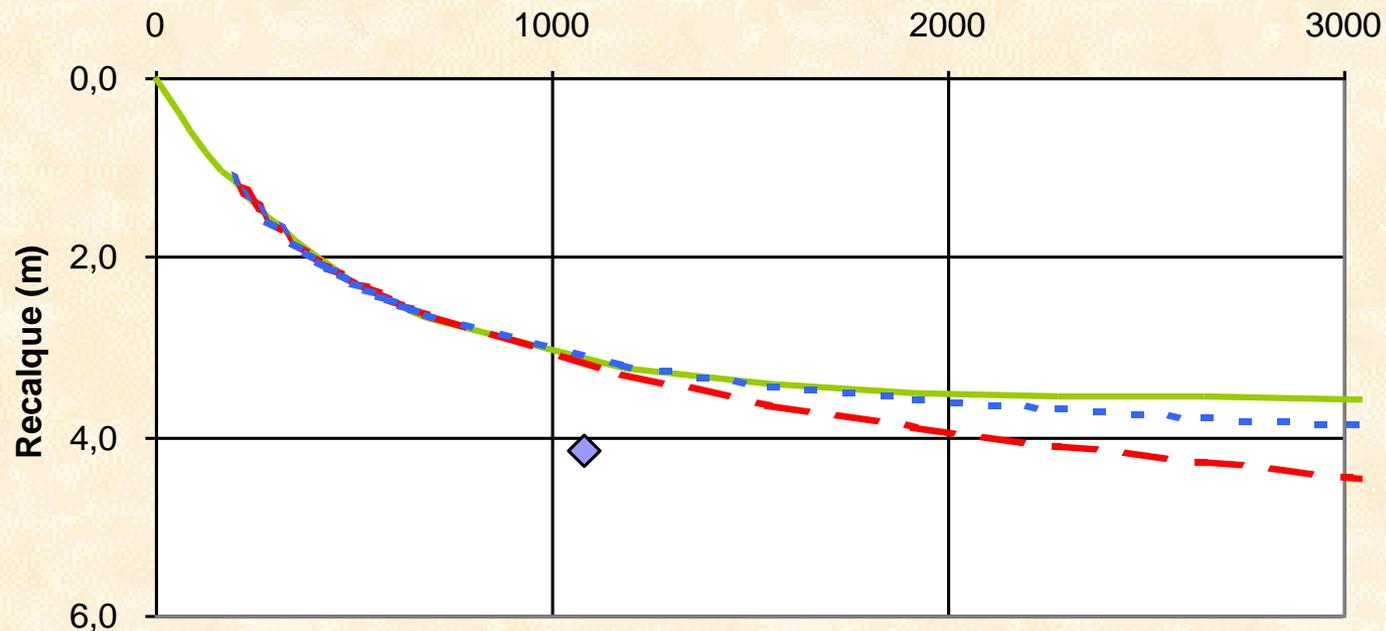


— Mod. Meruelo    - - - Mod. Clássico    - - - Mod. Hiperbólico    ◆ Recalque Medido

# MS-502 - Sub-Aterro AS-5

## Previsão de Recalques

Dias decorridos do fechamento da célula



— Mod. Meruelo    - - - Mod. Clássico    - - - Mod. Hiperbólico    ◆ Recalque Medido

# Necessidade de modelagem dos resíduos e aterros para simular a ruptura em projetos e situações existentes

- Geometria da disposição – Projeto ou “as built” do aterro sanitário.
- Peso específico dos resíduos (tipologia, tempo, umidade, condições de disposição, variações, médias, etc.).
- Definição dos parâmetros de resistência – Critério de Mohr Coulomb ( $c$  e  $\varphi$ ) – plasticidade, reologia, fatores...
- Distribuição das pressões internas de gases e percolados.
- Modelo matemático representativo do comportamento.
- Determinação das condições de **CRITICIDADE** ou de **ESTADO**.
- Definição de projeto de instrumentação geotécnica e monitoramento no tempo, para verificar e garantir a segurança, **aferindo ou calibrando** o modelo/realidade.

# COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO

## ENGENHARIA

NECESSIDADE DE ESTABELECEER CRITÉRIOS DE PROJETO PARA PODER “PROJETAR” OU “OUSAR” COM SEGURANÇA.

FATORES DETERMINANTES: SEGURANÇA E ECONOMIA

## METODOLOGIA DA ENGENHARIA GEOTÉCNICA

RESÍDUOS SÓLIDOS ~ MATERIAL GRANULAR – “PARTÍCULAS”

RESÍDUOS SÓLIDOS ~ FASES: “SÓLIDOS”/VAZIOS/FLUÍDOS

RESÍDUOS SÓLIDOS ~ DISPOSTOS NO SOLO - GEOTECNIA

DECADA DE 90 – INÍCIO DE ESGOTAMENTO DE ESPAÇO P/ LIXO

• **TUDO FLUI. A MUDANÇA É A LEI DA VIDA E DO UNIVERSO. HERÁCLITO DE ÉFESO (500 aC).**

• **ENGENHARIA - ATO DE DECISÃO PERANTE INCERTEZAS, de Mello (1973)**

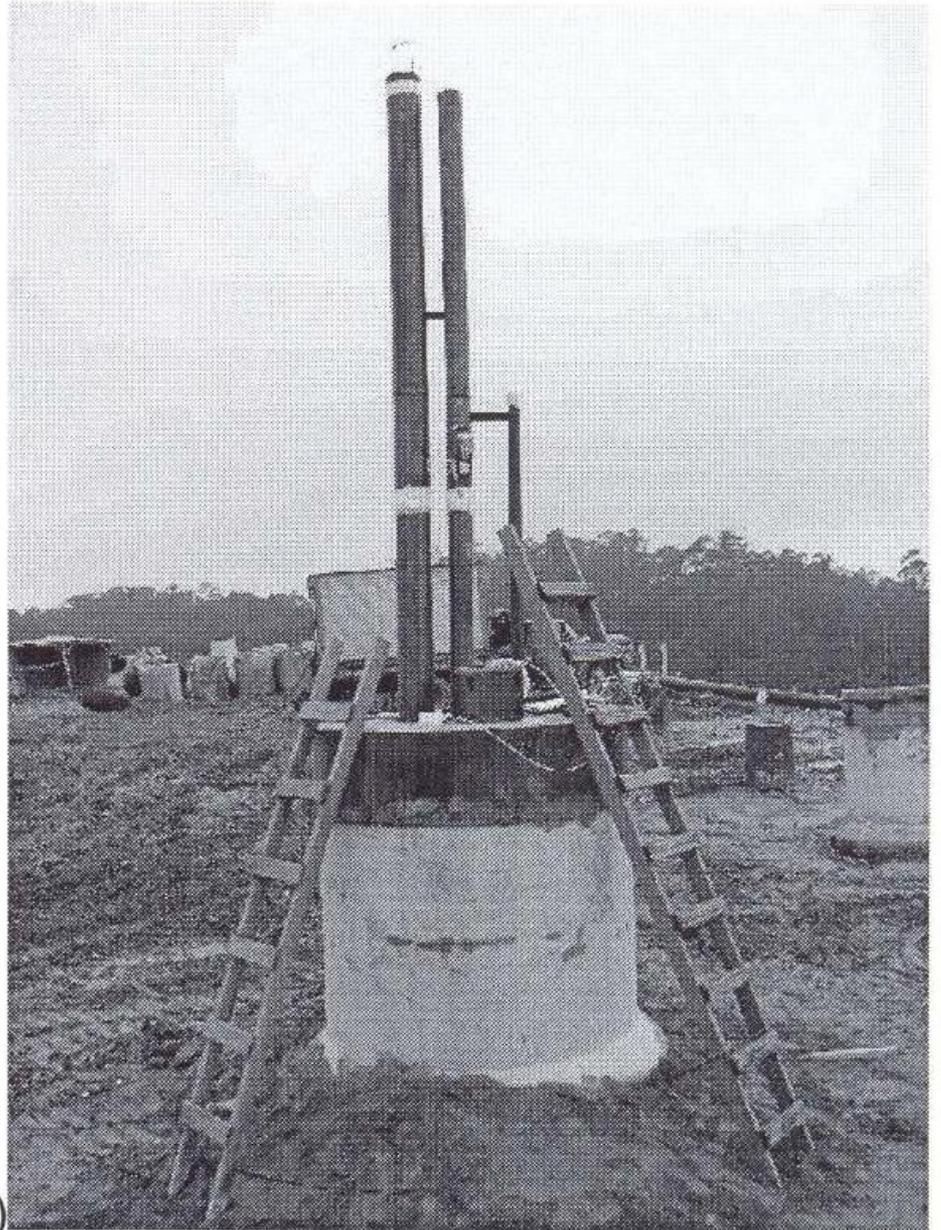
• **OU, NO EQUACIONAMENTO O QUE PODE SER DESPREZADO – QUAL É A ESCALA?**

# COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO

O ATERRO SANITÁRIO É **OBRA CIVIL** QUE SE CONSTRÓE E SÓ TERMINA QUANDO SE EXAURE O ESPAÇO, OU SEJA: TEM SEU USO E UTILIDADE DURANTE A CONSTRUÇÃO.



# ENSAIO DE CAMPO DE MEDIDA DE VAZÃO E PRESSÃO DE BIOGÁS (IPT,2007)

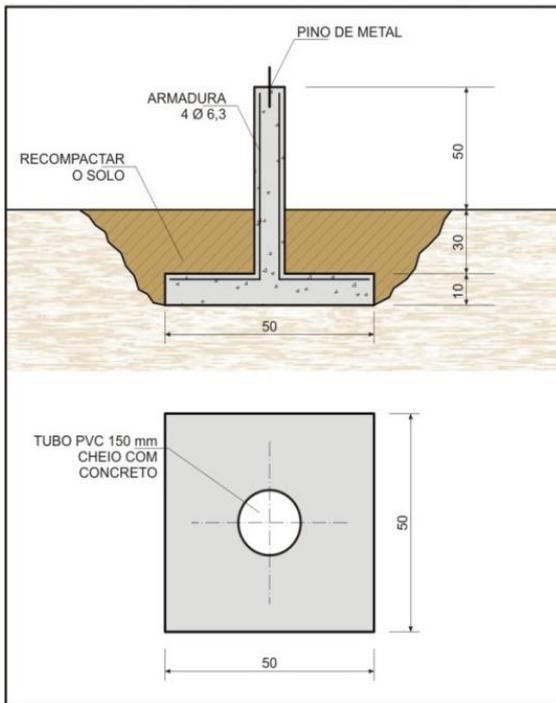


)

b)

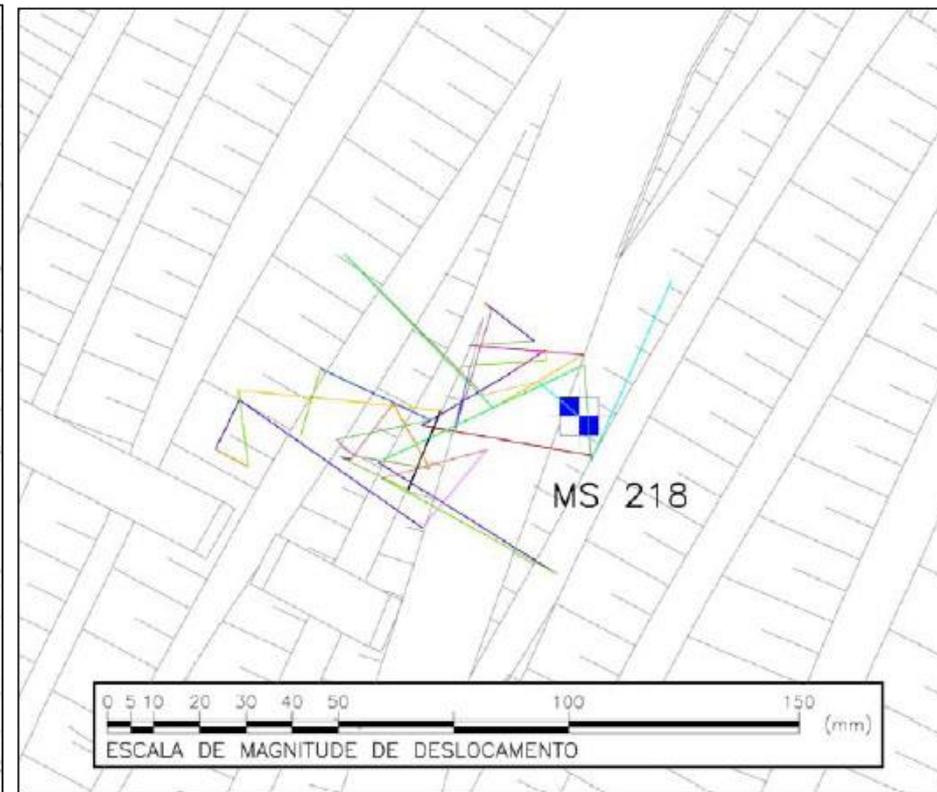
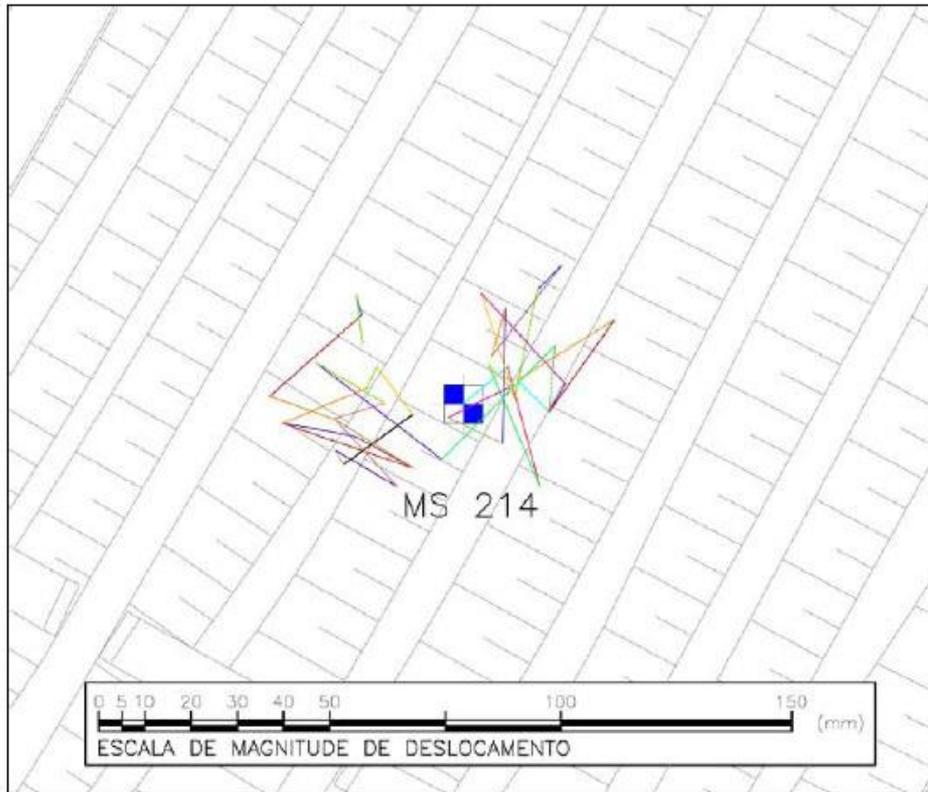
# INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA

## MARCO SUPERFICIAL



# COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO

## Trajétória de Deslocamento



## Piezômetros com Elevada Pressão de Gás



**O PROBLEMA NÃO É DO PIEZÔMETRO,  
MAS SIM DO ATERRO!**

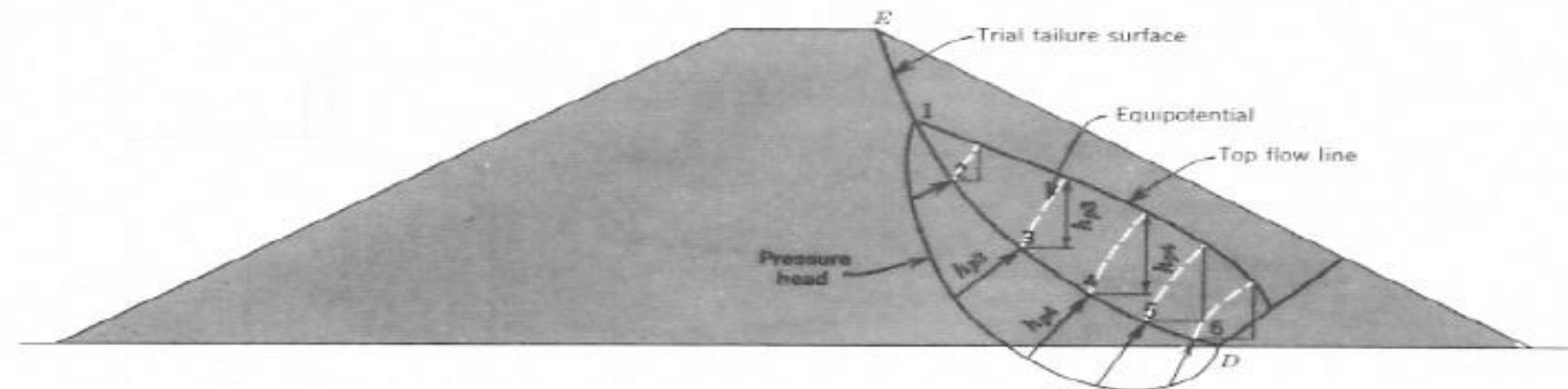
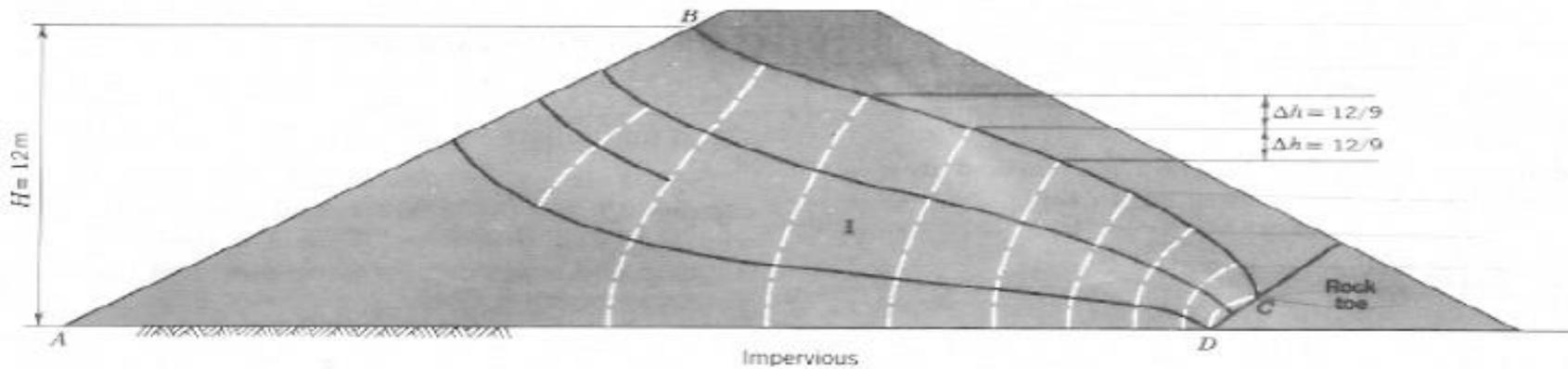
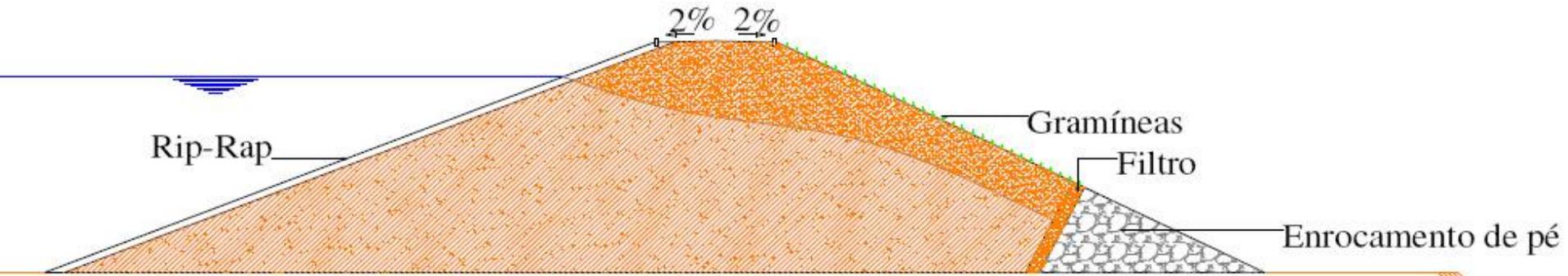
# COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO



## CONTROLE DE TRINCAS E FISSURAS

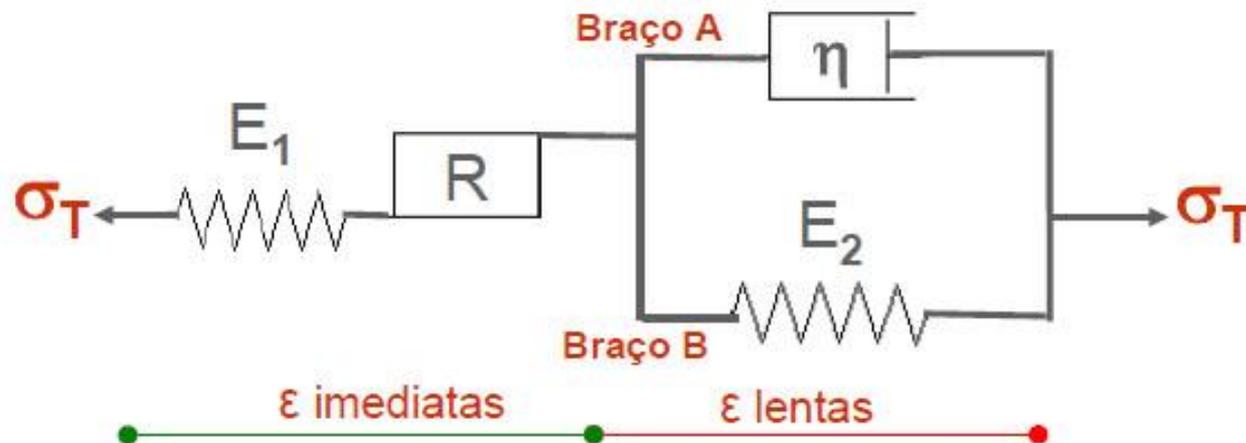


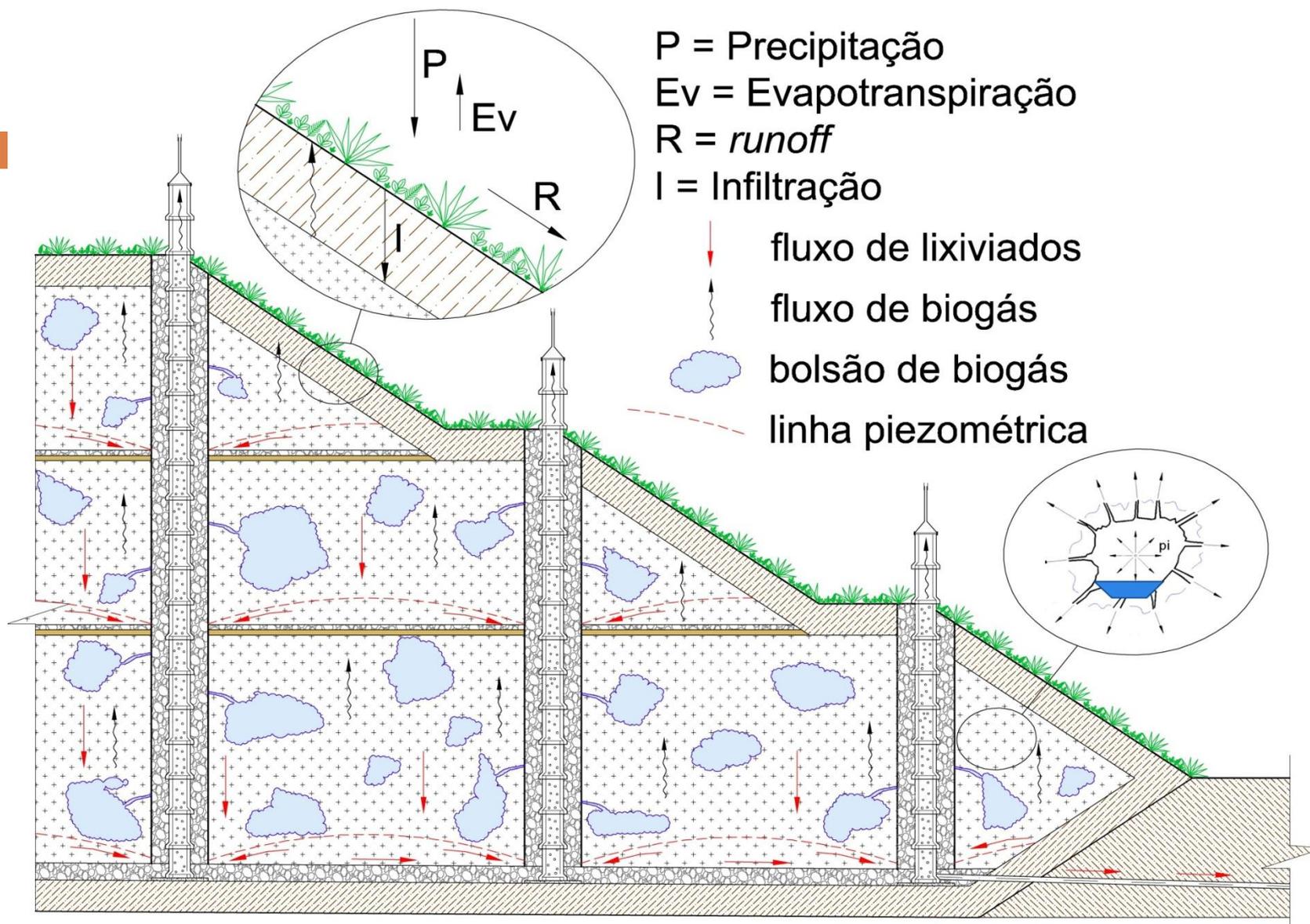
# ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE BARRAGENS DE TERRA

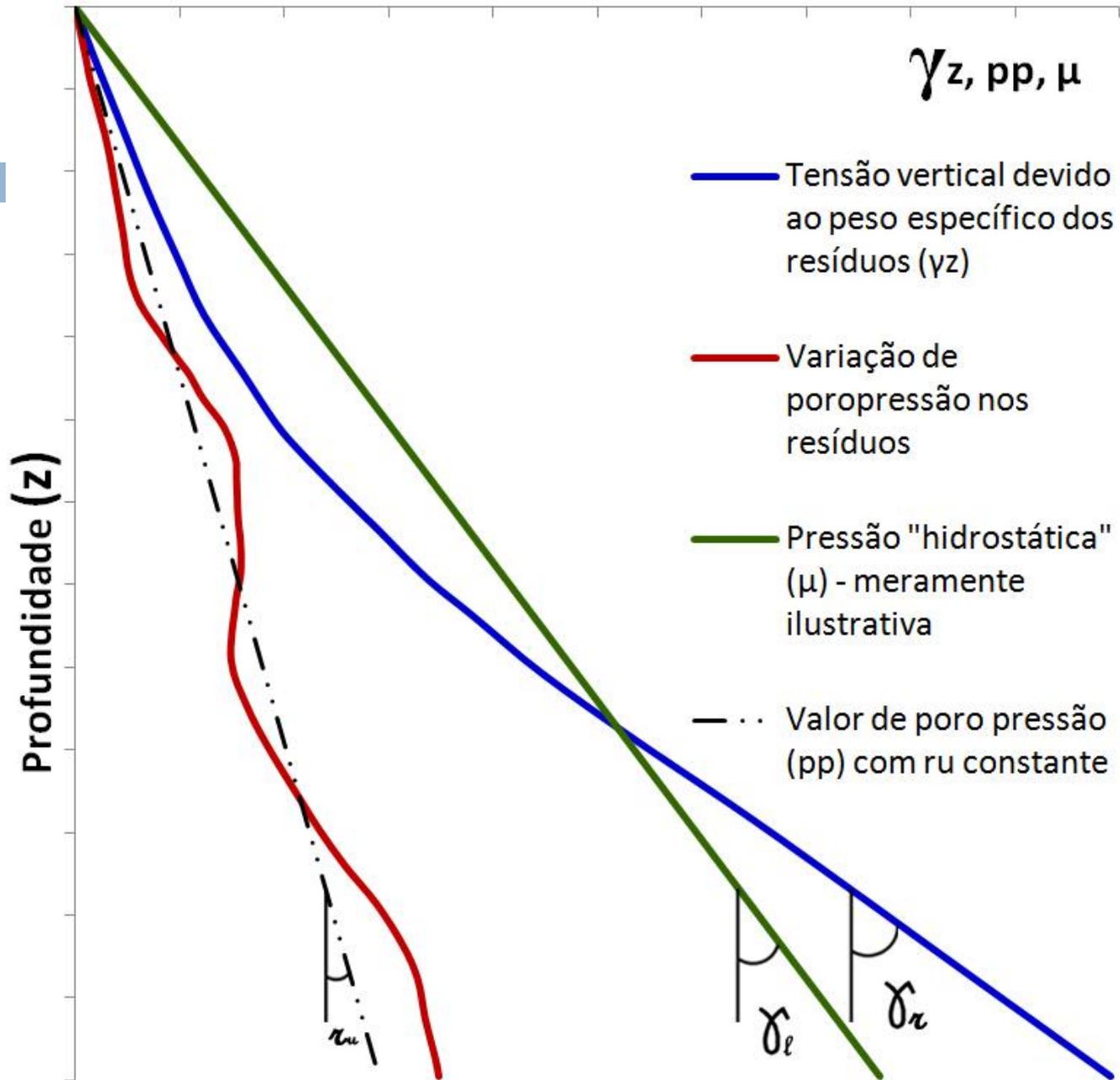


# COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO

PROPOSIÇÃO DE MODELO REOLÓGICO DE  
COMPORTAMENTO DE RESÍDUOS E  
ATERROS SANITÁRIOS, SEGUNDO CRITÉRIOS DE  
PROJETO E OPERAÇÃO ATUAIS NO BRASIL  
BENVENUTO – ABLP 15/10/2008  
REVISTA DA ABLP – LIMPEZA PÚBLICA N° 74 - 2010







# COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO

## GRANULOMETRIA DOS RSU

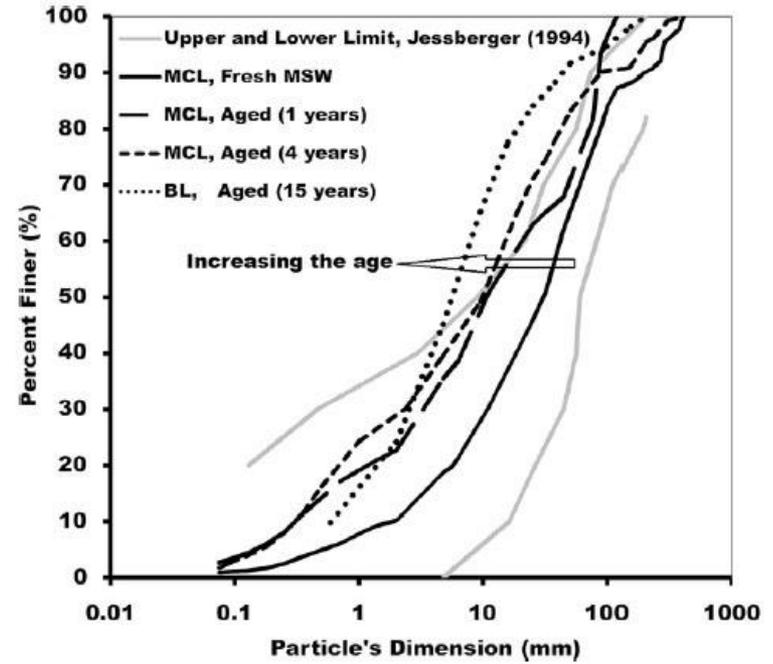
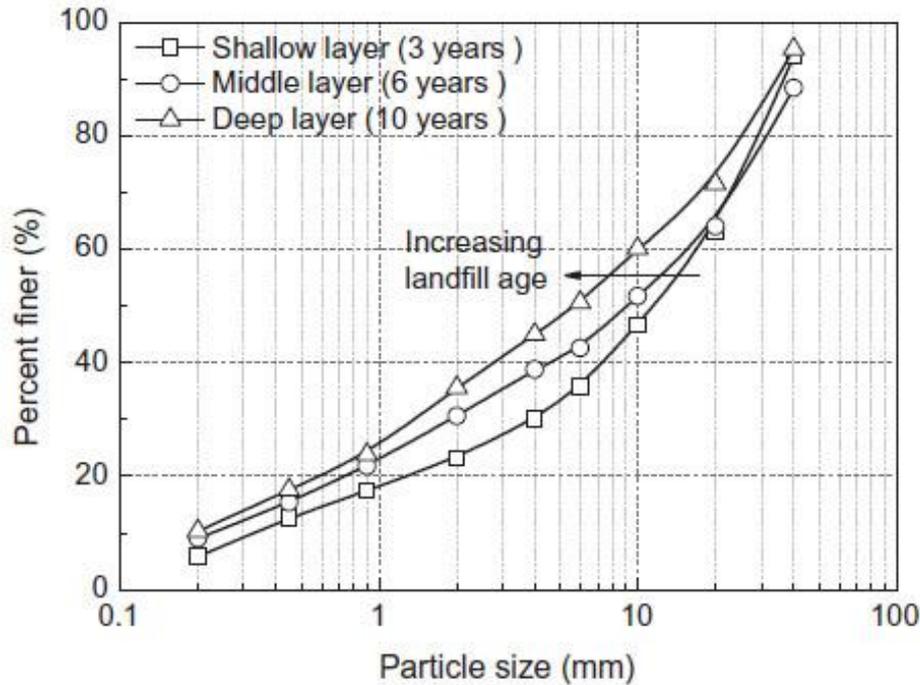
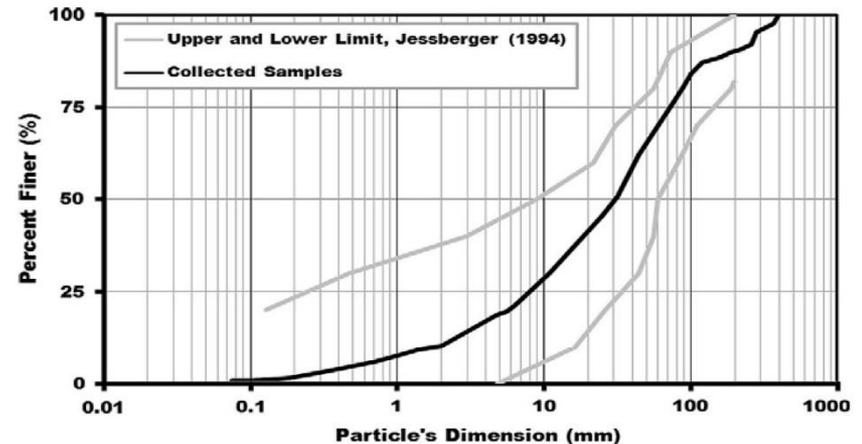


Fig. 4. Particles size distribution of waste samples.

Fig. 2. Particle size distribution of landfilled MSW from a landfill in Beijing, China

**RSU**

**“PEDREGULHO ARENOSO COM POUCOS FINOS” !?**



# COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO

## RESISTÊNCIA DOS RSU – ENSAIOS % DE M.O.

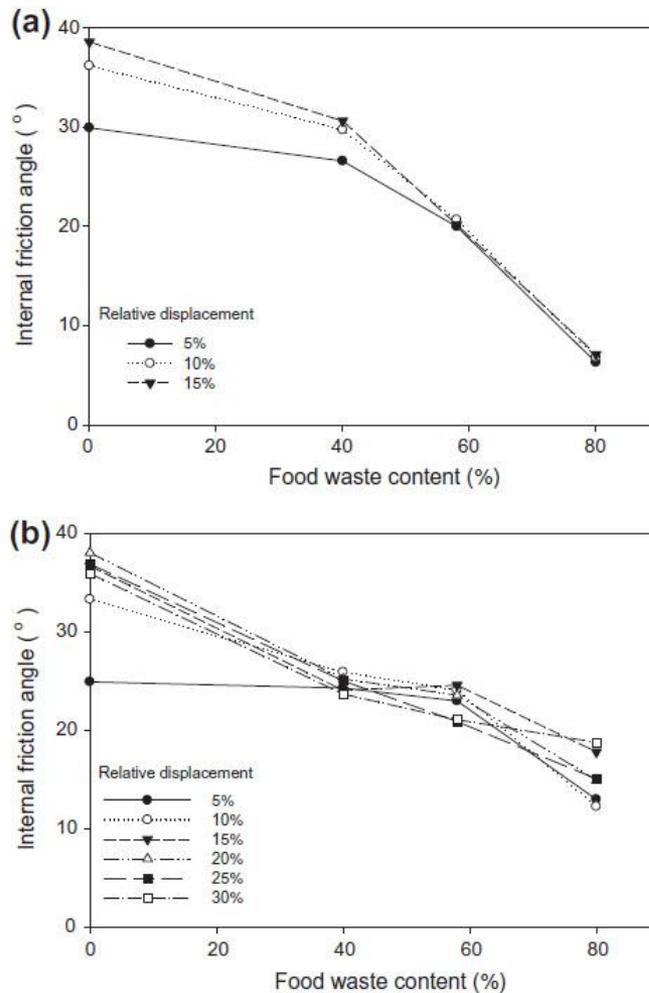


Fig. 5. Impact of food waste contents in synthetic fresh MSW on friction angles at different displacement levels; (a) SSDSTs and (b) LSDSTs.

# COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO

## RESISTÊNCIA DOS RSU – COMPARAÇÃO COESÃOXÂNGULO DE ATRITO

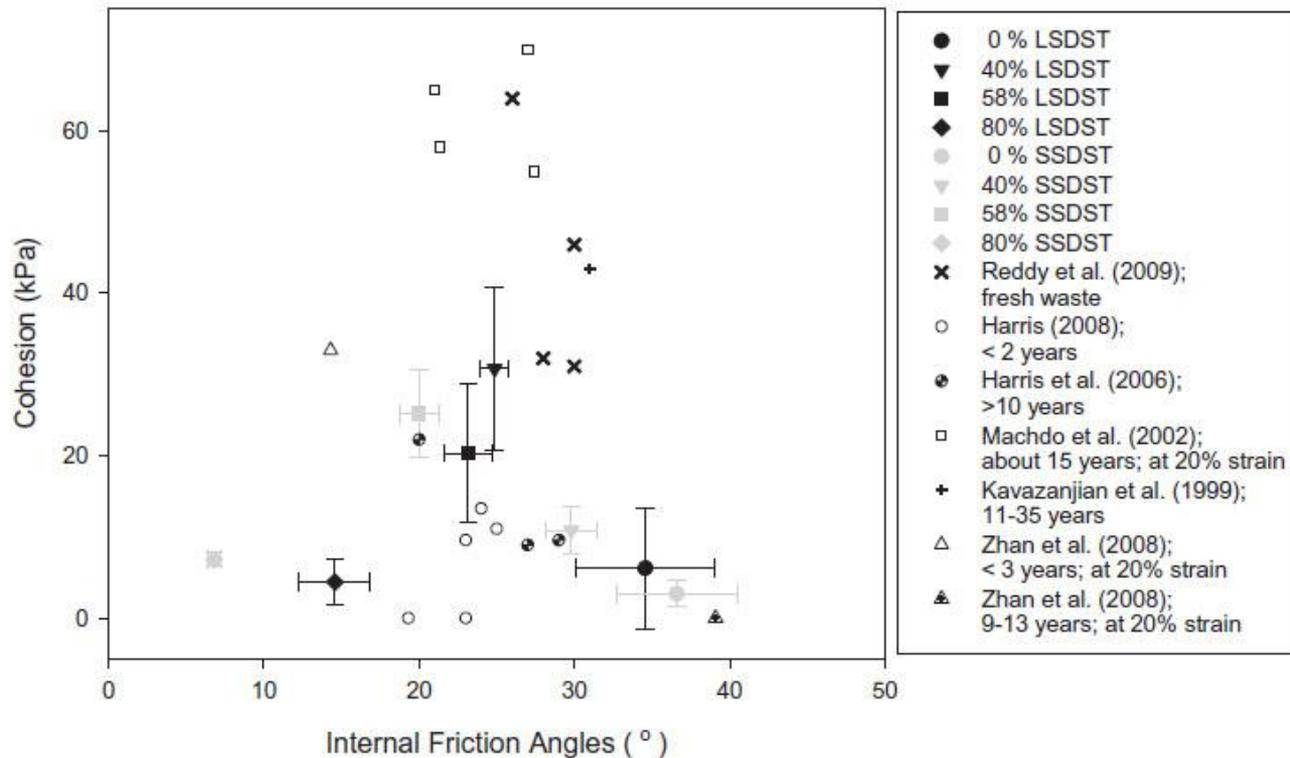


Fig. 6. Comparison of values of internal friction angle and cohesion values in this study to those of in previous studies; each error bar indicates positive or negative standard deviation.

# COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO

## RESISTÊNCIA DOS RSU - CORRELAÇÕES

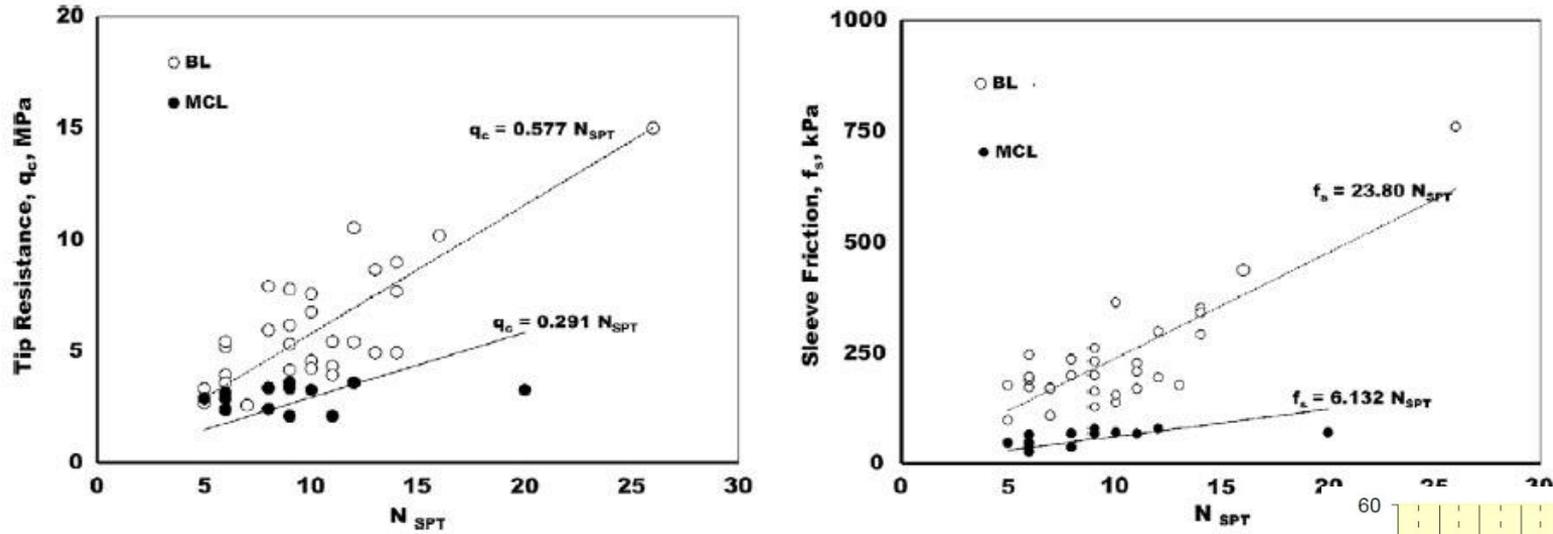
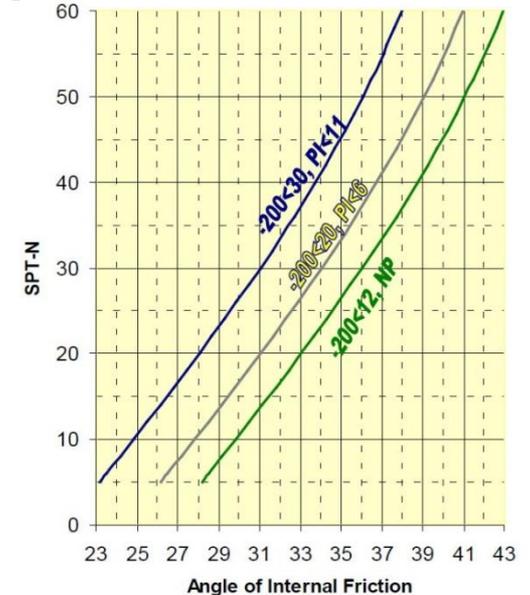


Fig. 17. Relationship between  $N_{SPT}$  values and (a)  $q_c$  and (b)  $f_s$ .

TERZAGHI, K. e PECK, R.B.; *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Jonh Wiley, New York, 1967.



# COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO

## FATORES INFLUENTES NA RESISTENCIA AO CISALHAMENTO DOS RSU

- 1- Teor de material **orgânico** putrescível;
- 2- Teor de materiais que exibem comportamento de **fibras** (reforço);
- 3- Ambiente de decomposição da matéria orgânica (**aeróbio, anaeróbio ou semi-aeróbio**);
- 4- Tempo de disposição associado à **decomposição** da matéria org.;
- 5- **Umidade** dos resíduos e suas variações ao longo do tempo;
- 6- Condições **climáticas** dos locais de disposição;
- 7- Forma de disposição em função do **projeto e operação** do aterro (compactação, coberturas, drenagens);
- 8- Variações da composição **gravimétrica** dos resíduos;
- 9- Constituintes **preponderantes**, diferentes dos normalmente encontrados;
- 10- Nível de **deformação** para as rupturas (critério de ruptura);
- 11- **Velocidade** de carregamento ou solicitações **dinâmicas**;
- 12- Dimensões dos equipamentos de **ensaios**, dimensões das partículas e resíduos sintetizados.

# PROGRAMAÇÃO

- Panorama geral da gestão de resíduos
- Aspectos gerais de projeto/operação de aterros sanitários
- Licenciamento de aterros sanitários
- Comportamento geomecânico dos resíduos
- **Rupturas**
- Novidades e desafios

# RUPTURAS



# Aterro Sanitário Sítio São João – SP

2007 - Antes e Depois da ruptura



Antes → 30/Jul/2007

Depois → 13/Ago/2007



# RUPTURAS

- **Aterro Sanitário em processo de ruptura 13-08-2007**  
**RUPTURA SECA RETROGRESSIVA**



# RUPTURAS

## **Aterro Sanitário na RMSP**

25/Abr/2011 – Ruptura do talude frontal



**Aterro Sanitário Itaquaquecetuba– SP**  
25/Abr/2011 – Ruptura do talude frontal



# RUPTURAS



# RUPTURAS



□ RUPTURA SECA

# RUPTURAS

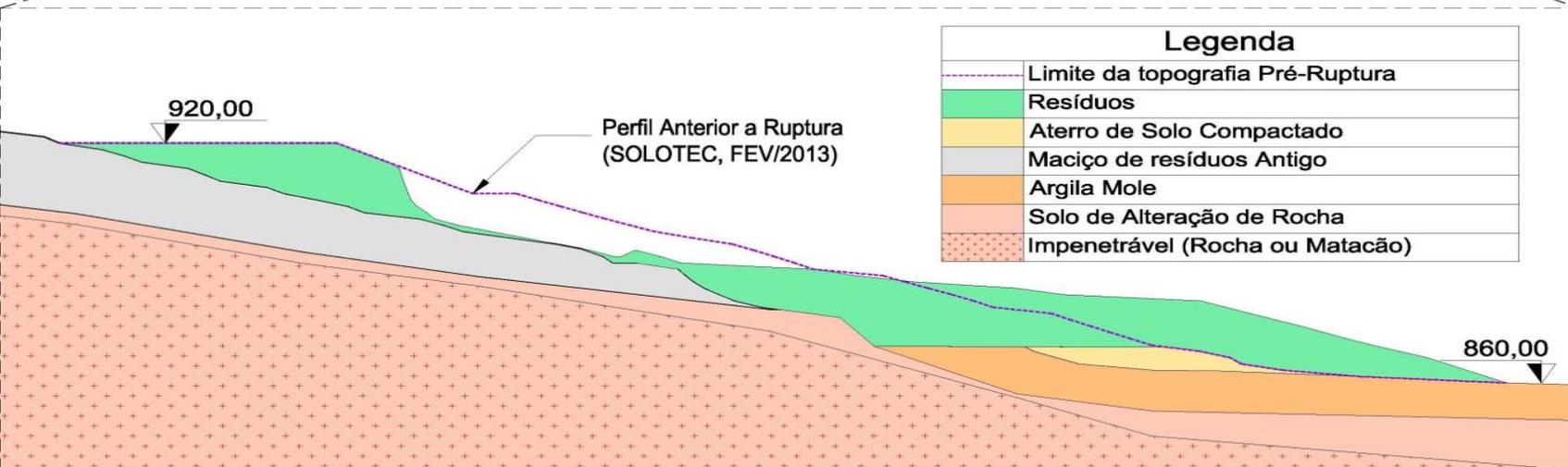
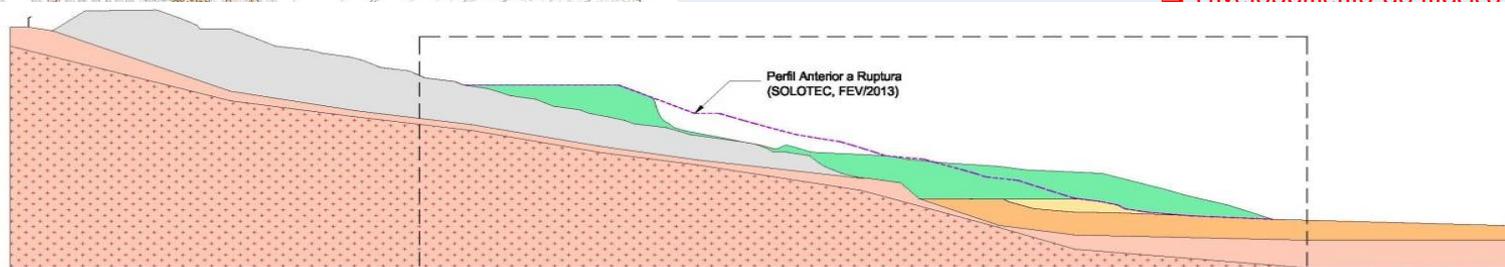
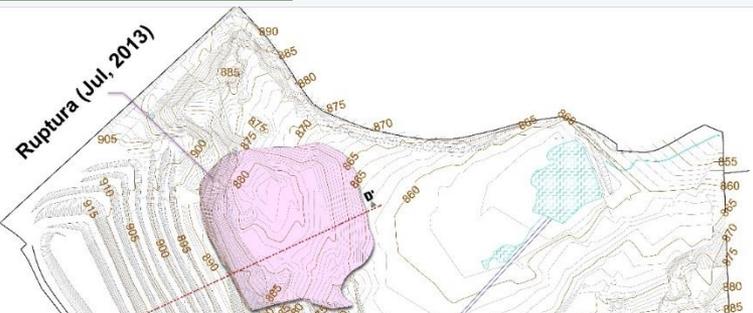


# RETROANÁLISE DE RUPTURA NÃO CIRCULAR EM ATERRO SANITÁRIO ESTUDO DE CASO – JULHO DE 2013

**Estudo de Caso (Ruptura de Julho de 2013)**

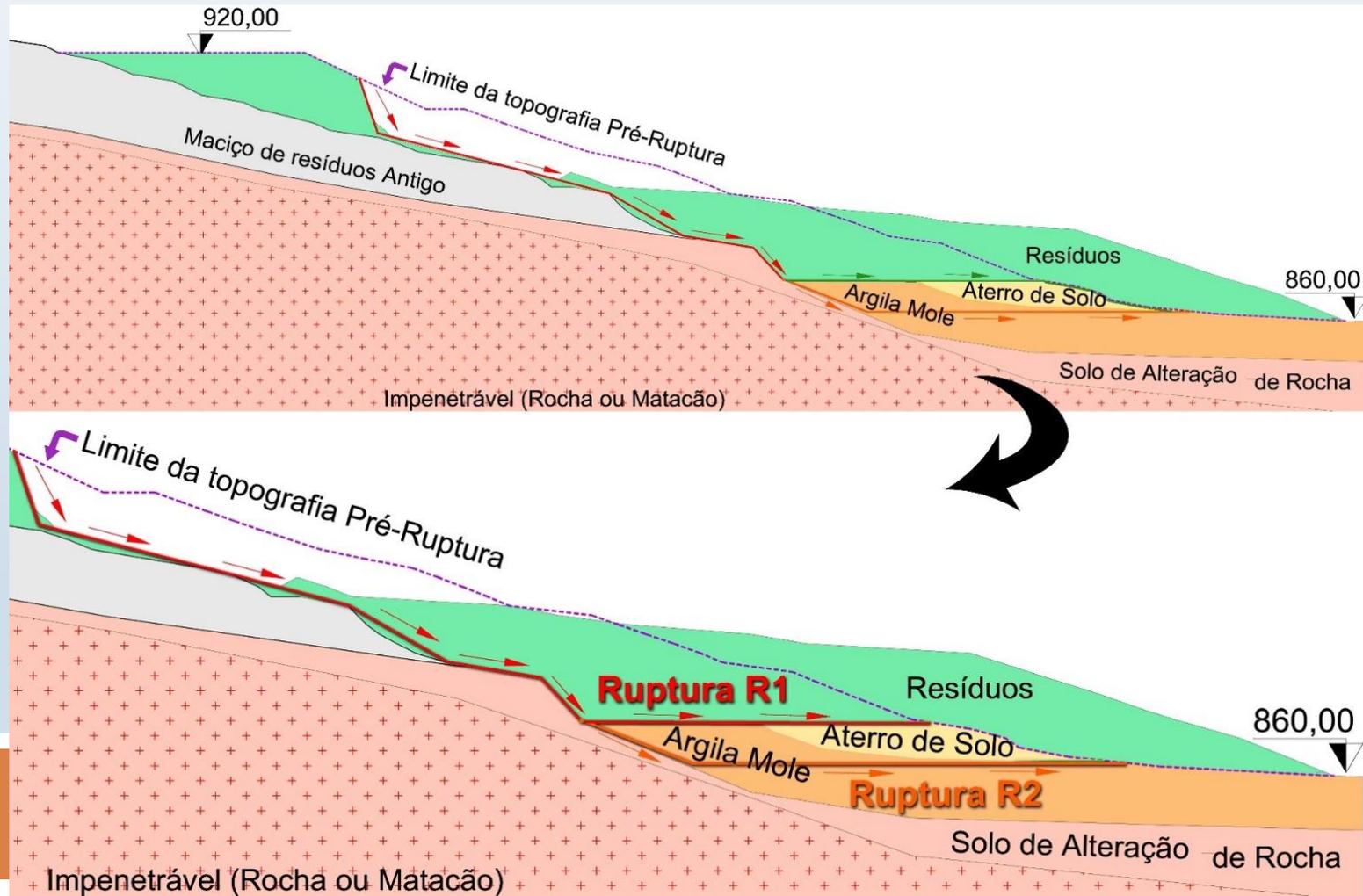
Condicionantes geotécnicas :

Envolvimento do maciço de resíduos “antigo”



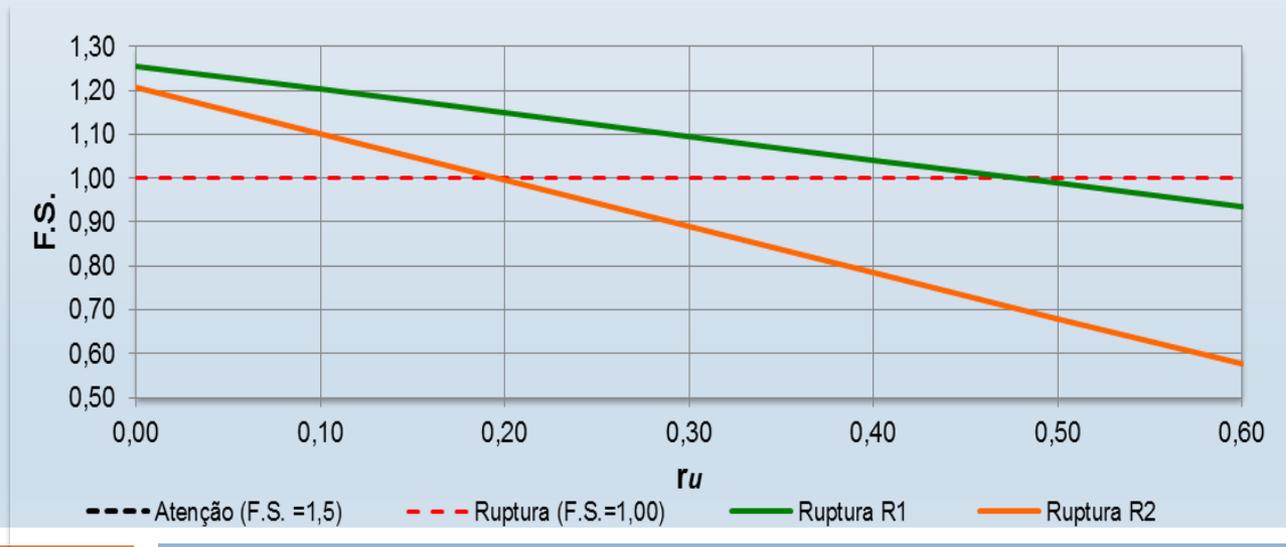
## POSSÍVEIS SUPERFÍCIES DE RUPTURAS (ESTUDO DE CASO)

- Na Ruptura 01, adotou-se a superfície de ruptura ocorrendo inicialmente nos resíduos até atingir a interface da camada de solo de proteção da geomembrana, e nas regiões a jusante, ocorrendo sob o aterro de solo compactado e a argila mole.
- Na Ruptura 02, adotou-se a superfície de ruptura ocorrendo inicialmente nos resíduos até atingir a interface da camada de solo de proteção da geomembrana, e nas regiões a jusante, ocorrendo no interior da camada de argila mole.





- ❑ A Retroanálise de estabilidade da ruptura realizada e orientada mediante os preceitos geotécnicos, embasada pela literatura geológica-geotécnica e dados geotécnicos dos solos de fundação da área em questão, **denotou que a superfície de ruptura R2, evidencia a situação mais crítica, ou seja, de maior probabilidade de acontecimento.**
- ❑ Em geral, em aterros deste tipo, salvo os condicionantes geotécnicos, se projetados e operados dentro das condições de projeto apresentam no interior do maciço de resíduos,  $r_u$  da ordem de 0,20.
- ❑ Na Superfície crítica adotada R2, nota-se que o valor de  $r_u = 0,20$  representa a situação de ruptura, F.S. = 1,00. Sendo assim, reafirma-se que a interface da camada de solo saturado de proteção da geomembrana e resíduos, a argila mole na fundação do aterro associada ao nível d'água raso a jusante do aterro, foram os principais condicionantes geotécnicos da ruptura.
- ❑ Associados a isto, **a provável ineficácia dos sistemas de drenagem de lixiviados de base e de camada** e o sistema de drenagem de biogás, possivelmente colaboraram para o fato ocorrido, nas condições geotécnicas existentes, já que o fator deflagrador da ruptura, o fator  $r_u$  situava-se muito provavelmente dentro do intervalo de valores típicos de aterros em geral.



# PROGRAMAÇÃO

- Panorama geral da gestão de resíduos
- Aspectos gerais de projeto/operação de aterros sanitários
- Licenciamento de aterros sanitários
- Comportamento geomecânico dos resíduos
- Rupturas
- **Novidades e desafios**

# Desaterro Sanitário ou Mineração de Aterros de Resíduos

- O conceito não é novo e seu mais antigo registro é de 1953, em Israel, para obter fertilizante (!?) para plantações (pomar!?), sendo o único registro até a década de 90.
- A idéia é parte de um conceito mais amplo apresentado por Cossu (2013) de Mineração Urbana (“Urban mining”)

# Desaterro Sanitário

- Segundo Cossu (2013) pode-se definir:

$$E = \Delta R + \Delta L + \sum d_i + I$$

Onde:

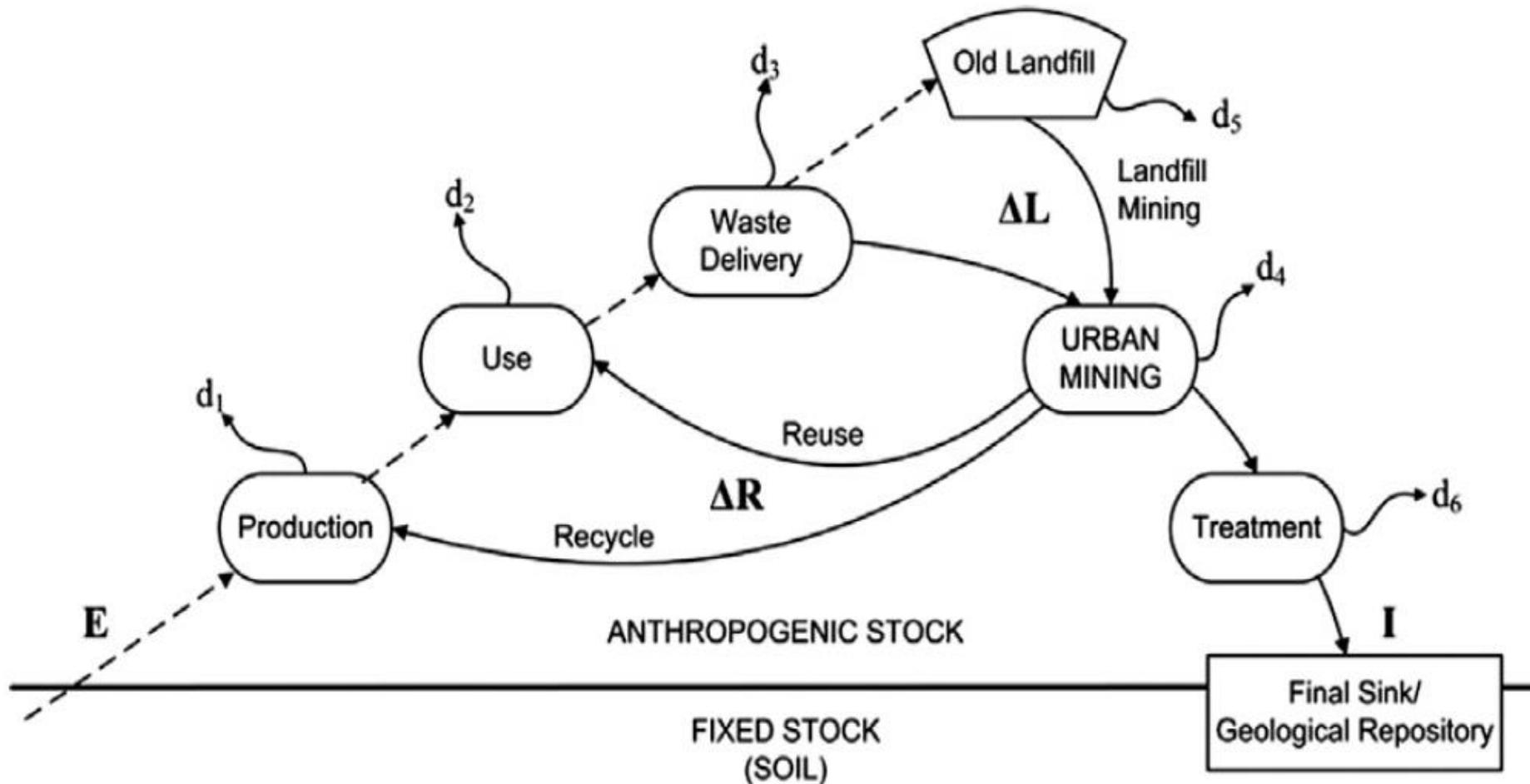
*E = matéria prima extraída;  $\Delta R$  = material reciclado e reutilizado;  $\Delta L$  = material de desaterro sanitário;  $d_i$  = emissão difusa de massa;  $I$  = material imobilizado*

Rearranjando-se os termos, para visualização minimização e controle de emissões:

$$\sum d_i = E - \Delta R - \Delta L - I$$

# Desaterro Sanitário

- Ou graficamente em termos de fluxograma



# Desaterro Sanitário

*“Landfill mining and reclamation – LFMR”*

## Princípios:

- 1- RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DE ATERROS NÃO IMPERMEABILIZADOS – LIXÕES E ATERROS CONTROLADOS.
- 2- GANHO DE ESPAÇO PARA OUTRAS FINALIDADES.
- 3- ELIMINAÇÃO DE FONTES DE CONTAMINAÇÃO.
- 4- USO DE SOLOS E FINOS COMO MATERIAL DE COBERTURA DE NOVOS ATERROS PROTEGIDOS.
- 5- REDUÇÃO DE CUSTOS DE MANUTENÇÃO, MONITORAMENTO E ENCERRAMENTO.
- 6- OBTENÇÃO DE RECICLÁVEIS E RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA.

# Desaterro Sanitário

- Caso retratado na Florida, USA. Waste management - 2013
- Perdido Landfill, 1981 -1990 –sem impermeabilização
- Benzeno e cloreto de vinila na remediação das águas
- 6,8 hectares recuperados – 2009 a 2011.
- 371.000 m<sup>3</sup> de resíduos minerados – fase 1
- 230.600 m<sup>3</sup> de espaço líquido foi recuperado para coberturas finais e operacionais, do atual aterro
- Estudos de avaliação de viabilidade de projeto – piloto
- Custo: US\$ 3,09 mi – \$8,33/m<sup>3</sup>.
- Espaço recuperado: US\$ 9 mi – \$40/m<sup>3</sup>
- Empolamento: 53%

# Desaterro Sanitário



# Desaterro Sanitário

CONSIDERANDO:

- NECESSIDADE DE RECUPERAÇÃO DE RECICLÁVEIS.
- DESTINO INCERTO DE RECICLÁVEIS, DEVIDO A MERCADO INCIPIENTE DE RECICLADOS OU DE INDUSTRIA VIÁVEL INEXISTENTE.
- DIFICULDADES DE DISPONIBILIDADE DE ALTOS RECURSOS FINANCEIROS PARA DESTINAR OS RS.

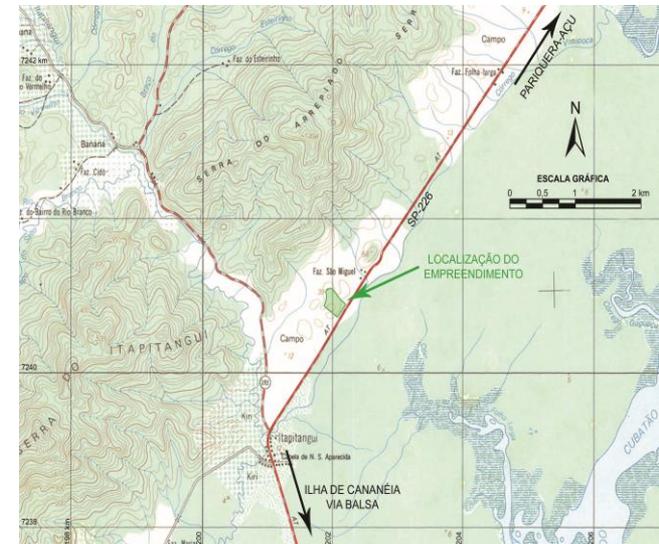
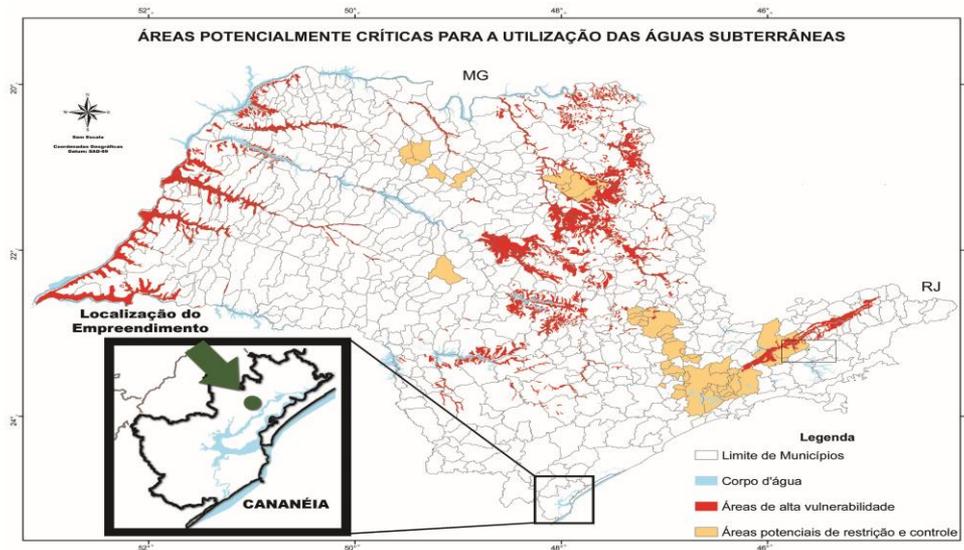
> POSTERGAR TRATAMENTOS PARA O FUTURO:

## **Aterros dedicados**

Aterros onde os resíduos são aterrados depois de separados adequadamente, com registro da informação, para recuperação futura. Investir na recuperação futura.

Exemplo – RCC e inertes em geral.

# Aterros para pequenas comunidades

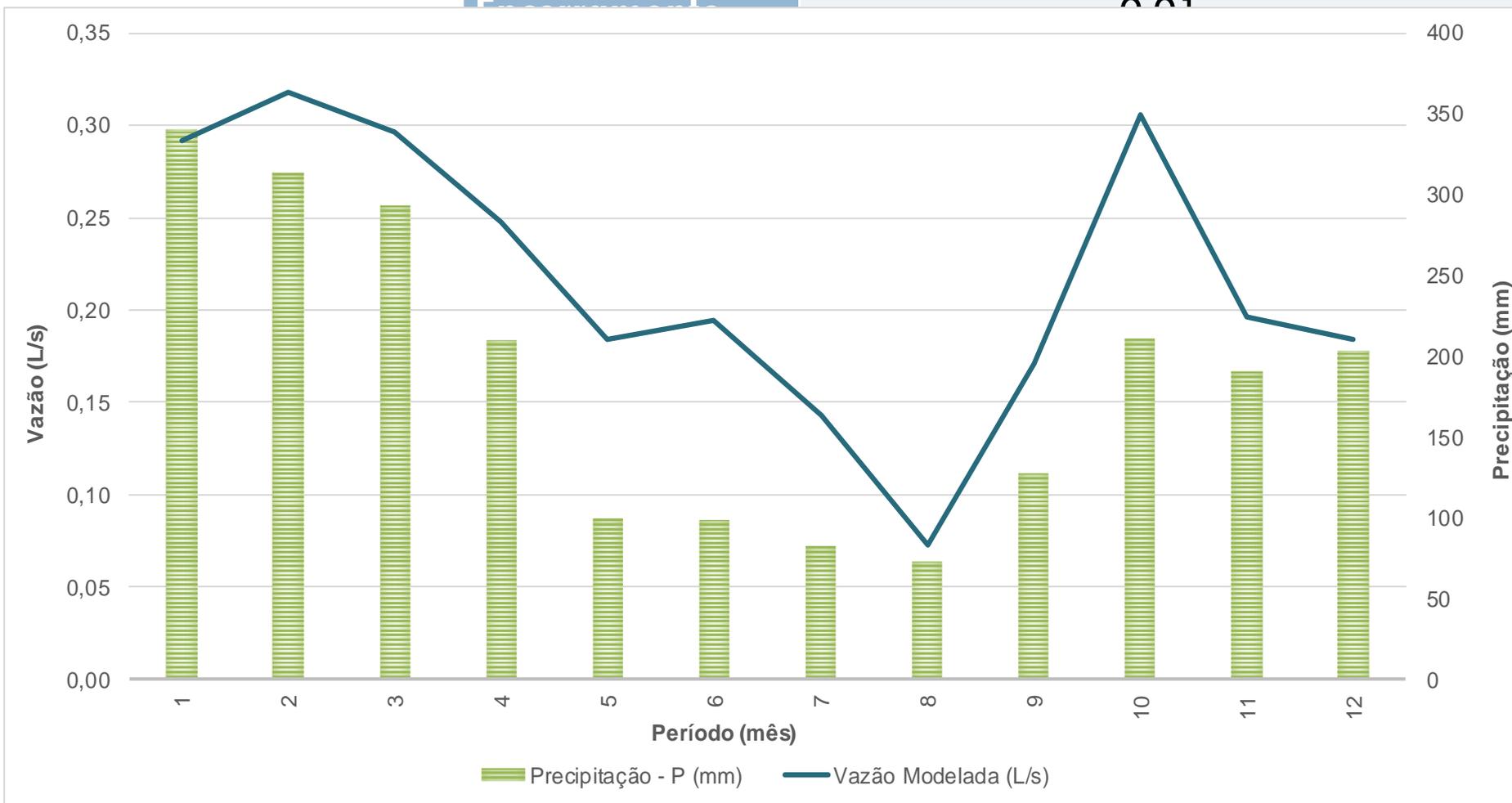


# Projeto do Aterro Sanitário de Pequeno Porte

População	12.226 hab. (CENSO 2010)
Taxa de recepção de resíduos	10,0 t/dia
Perímetro de resíduos	23.057 m <sup>2</sup>
Volume espacial	171.600 m <sup>3</sup>
Volume de resíduos (51% do vol. Espacial*)	87.299 m <sup>3</sup> (0,7 t/m <sup>3</sup> )
Vida útil	~ 24 anos
Etapas	7 Etapas (4 camadas)
Escavação de solos	77.527 m <sup>3</sup>
Utilização de solos	103.493 m <sup>3</sup>
Balanço de solos	- 25.966 m <sup>3</sup> (Déficit)
Custo total**	R\$ 3.349.571
Custo por tonelada**	R\$ 58,32

# □ Geração de Lixiviados: Modelagem HELP Model (USEPA, 1996)

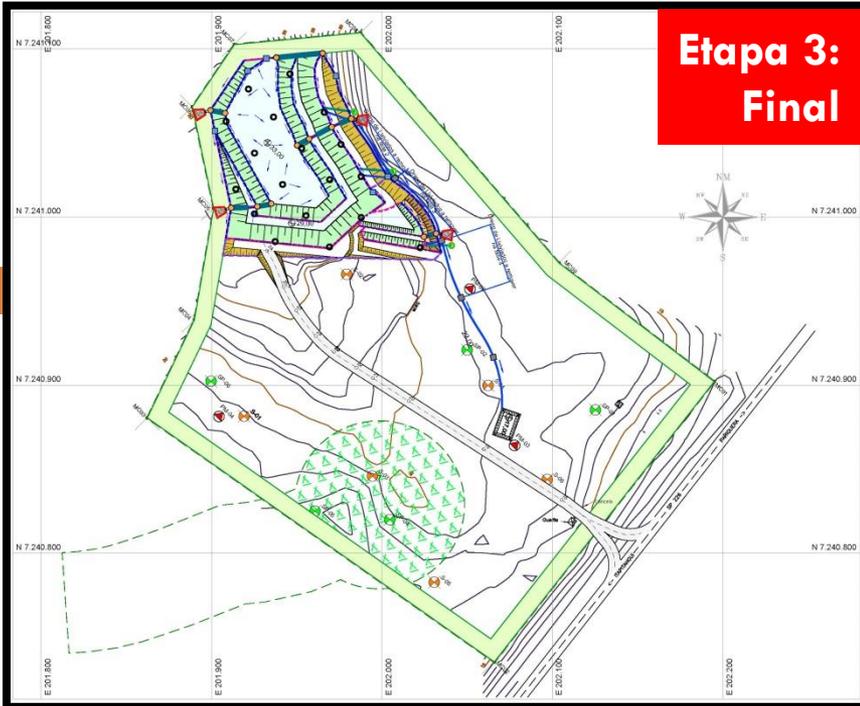
Fases	Geração máxima de lixiviados (m <sup>3</sup> /dia)
Operação	27,48
Encerramento	0,01



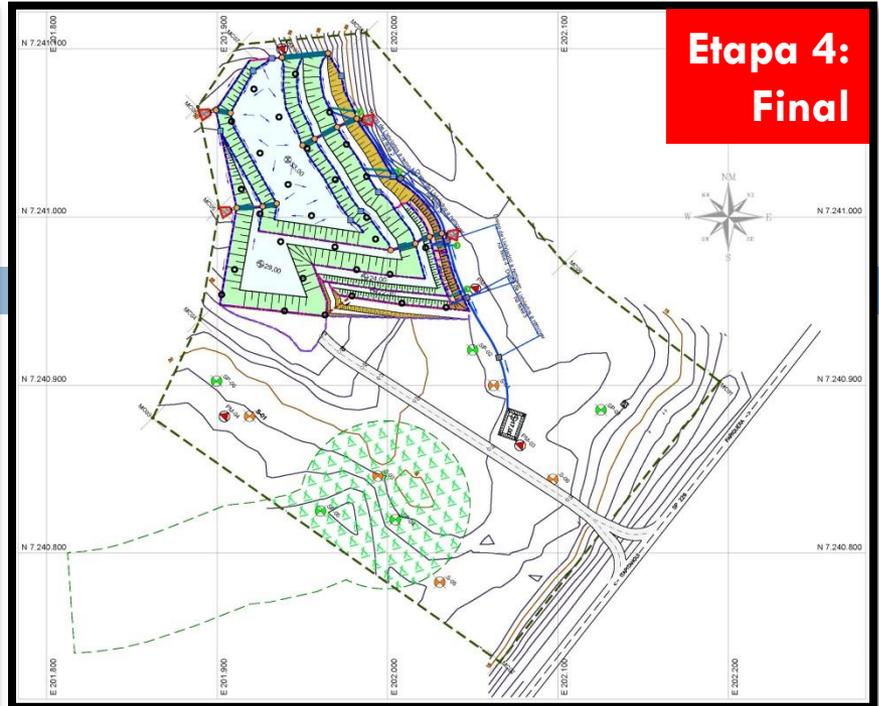
# Topografia



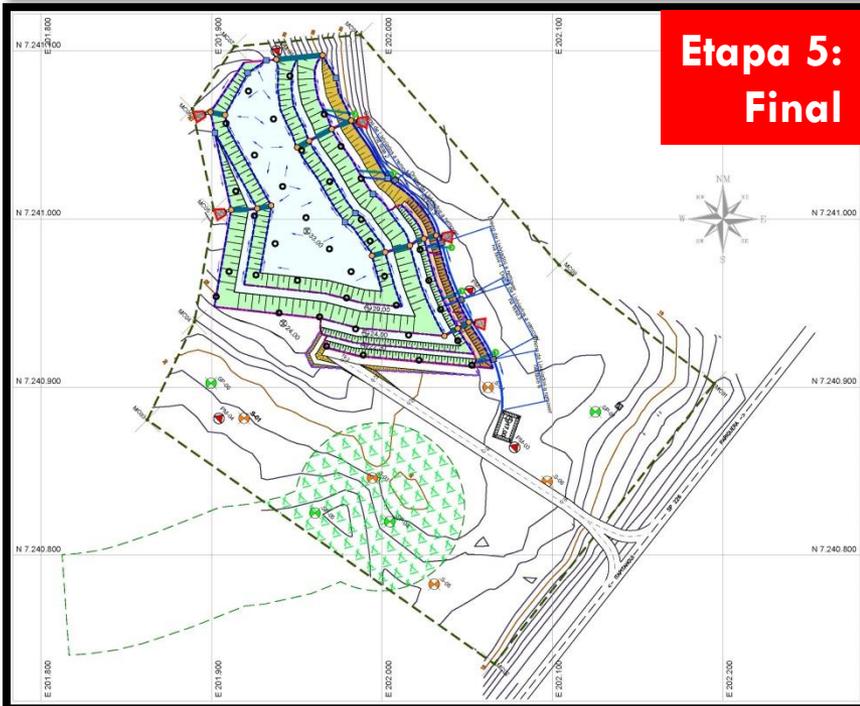




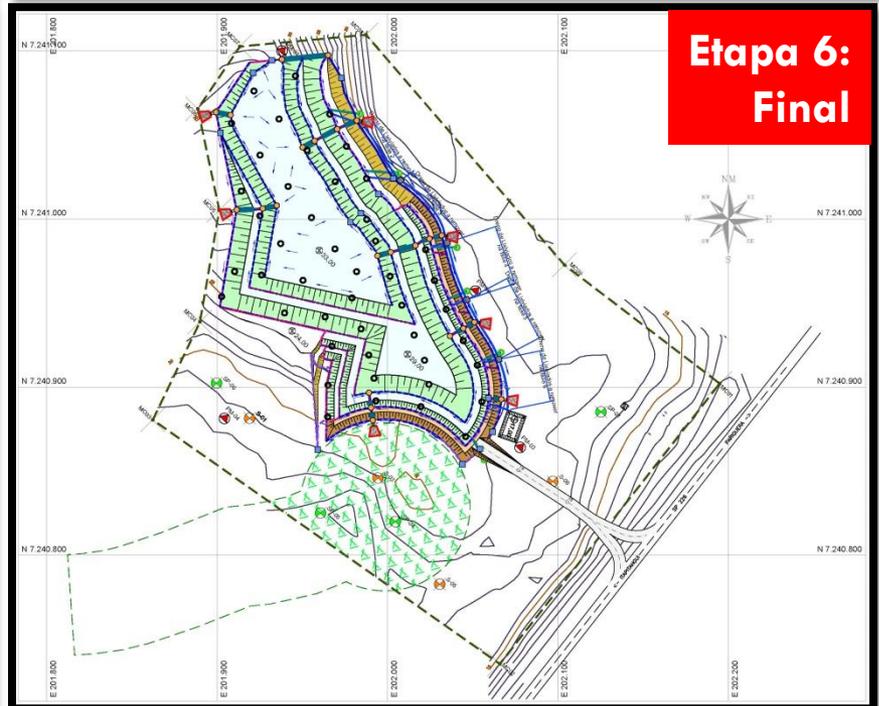
**Etapa 3:  
Final**



**Etapa 4:  
Final**



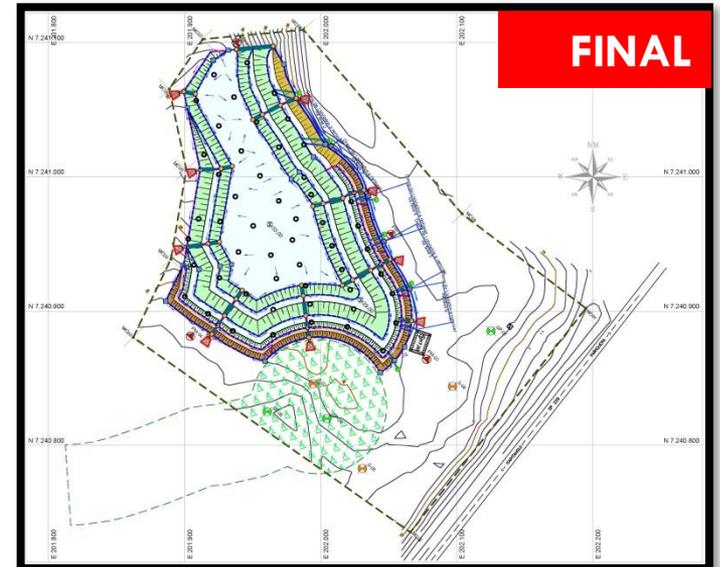
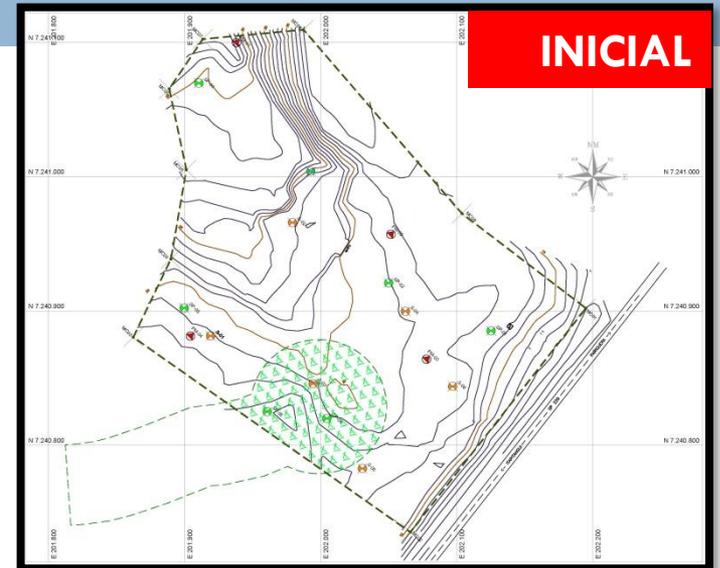
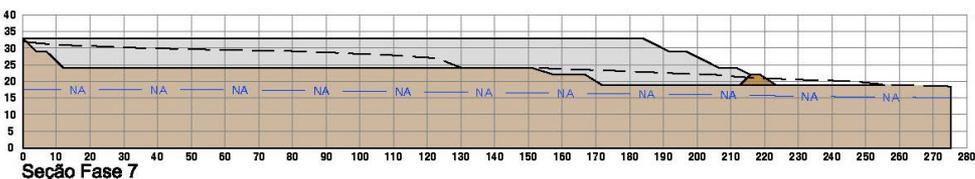
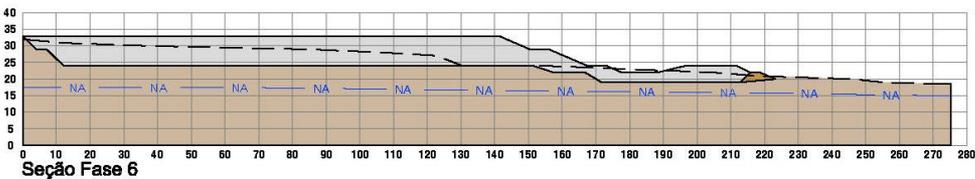
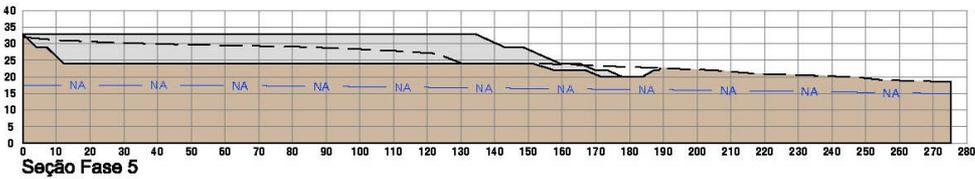
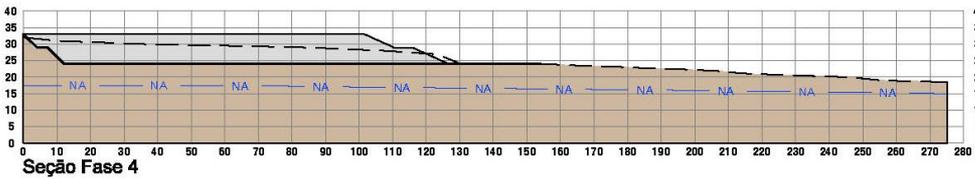
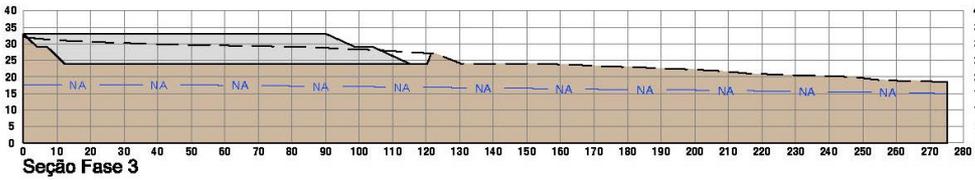
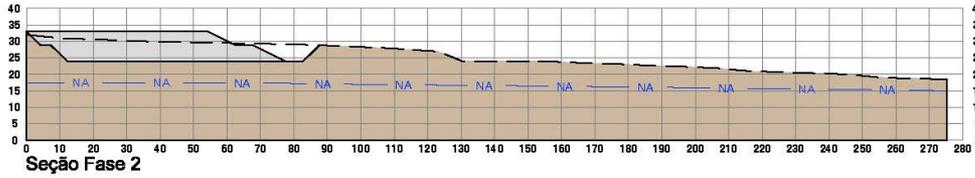
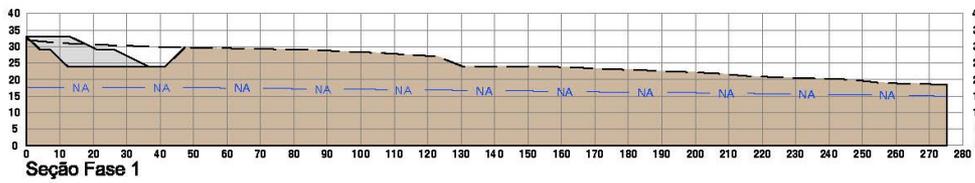
**Etapa 5:  
Final**



**Etapa 6:  
Final**



# Seções de Terraplenagem



# Codisposição de lodos de ETE



# Codisposição de lodos de ETE

- ❑ Codisposição de lodo de ETE em aterro sanitário em troca do tratamento de lixiviado de aterro pela ETE
- ❑ Material saturado, de consistência mole e difícil de espalhar
- ❑ Aumento das pressões neutras no maciço sanitário, formação de superfícies potenciais de ruptura e dificuldades operacionais
- ❑ Critérios mínimos para codisposição em aterro
- ❑ Projeto geotécnico

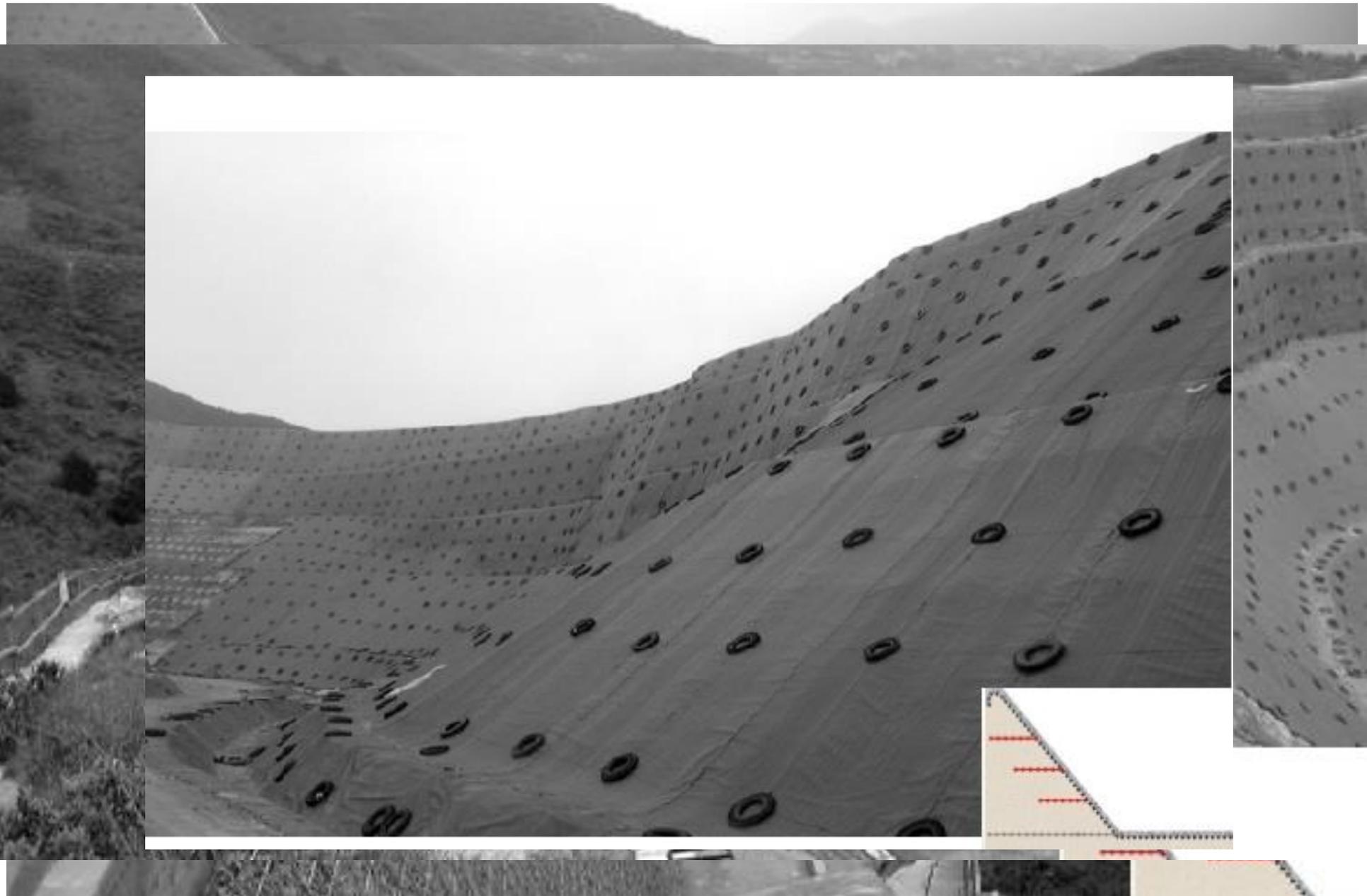


# Projetos audaciosos com contribuição da Geotecnia

## Aterro Sanitário em Hong Kong, China (Cowland, 2007)

- Em 1993: AS em vale em forma de bacia, com garganta estreita separando de planície aluvionar a jusante (vale cheio  $\approx$  140 m de altura), 40 milhões t de RSU
- Em 2004: escavação de solo local, construção de muro de solo reforçado de 8m de altura, capacidade adicional de 2 a 3 milhões t de RSU
- Em 2006: aterro de solo e muro reforçados de 30 m de altura e 300 m de comprimento (2 a 3 milhões t de RSU) + escavação de solo (0,25 milhões t de RSU)

- Material granular: areia siltosa local para o muro, pedregulho e areia britados de rocha ígnea subjacente para o aterro
- Revestimento interno de GM para conter chorume
- Muro vertical e aterro com taludes de  $70^\circ$  e com bermas
- Geogrelhas no muro: uniaxiais de 120 kN/m na parte inferior e 80 kN/m no restante, com espaçamento vertical de 400 mm
- Geogrelhas no aterro: uniaxiais de 90 kN/m no terço inferior, 60 kN/m no terço intermediário e 45 N/m no terço superior; biaxiais secundárias entre as uniaxiais para manter alinhamento das faces; geotêxtil para segurar o solo
- Face externa de blocos de concreto de 400 mm de altura
- Proteção contra fogo: camada de 100 mm de espessura de espessura e tela de aço
- Controle de qualidade das geogrelhas, ensaios de cisalhamento de grande dimensões com geogrelhas e solo, controle de compactação por densímetro nuclear



(Cowland 2007)

# Aterro Sanitário Cherry Island, Wilmington, DE, EUA, 2010 (Melo & Espinoza, 2012)

- Área recuperada do rio: material dragado sobre solos aluvionares moles (30 m de espessura,  $s_u \sim 10 \text{ kPa}$ )
- 17 milhões de  $\text{m}^3$  adicionais para disposição de RSU
- Alternativas estudadas:

Maciço de RSU com talude 8H:1V: sem espaço disponível

Muro de solo reforçado: 7,5 m de altura: volume insuficiente

Muro de solo reforçado com 21 m de altura: aumentar  $s_u$  para 160 kPa com *deep soil mixing* (US\$ 150 milhões)

Muro de solo reforçado com drenos verticais pré-fabricados e construção lenta: para utilização de parâmetros drenados, carregamento muito lento para garantir dissipação de sobrepressões neutras

# Modelo híbrido drenado-não drenado

- Estacas virtuais de areia em torno dos drenos verticais

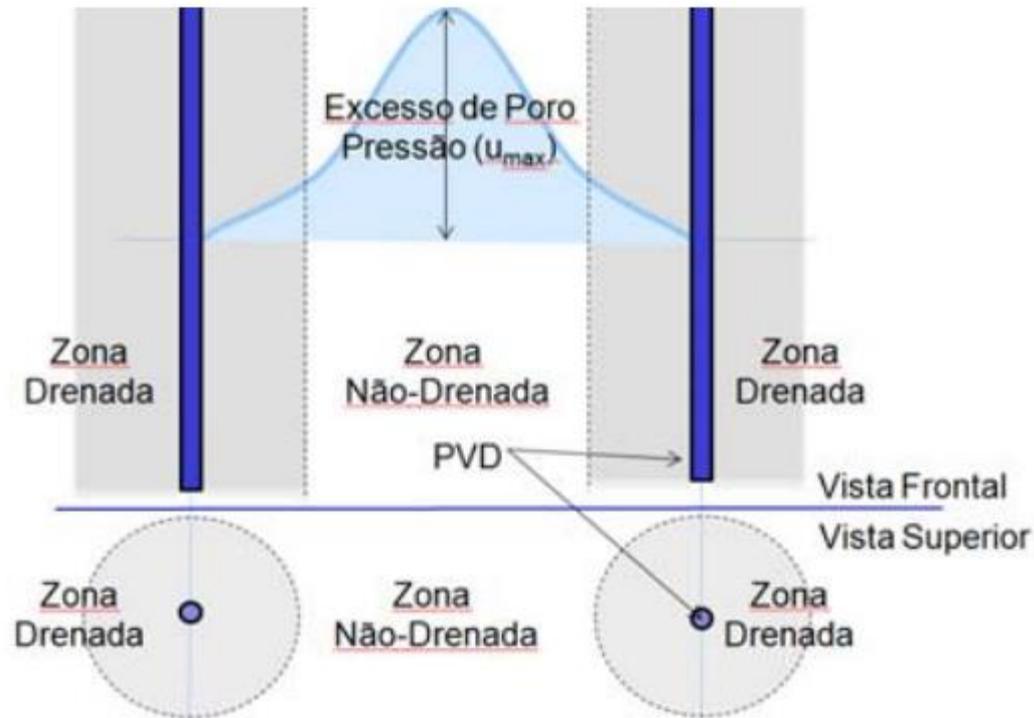
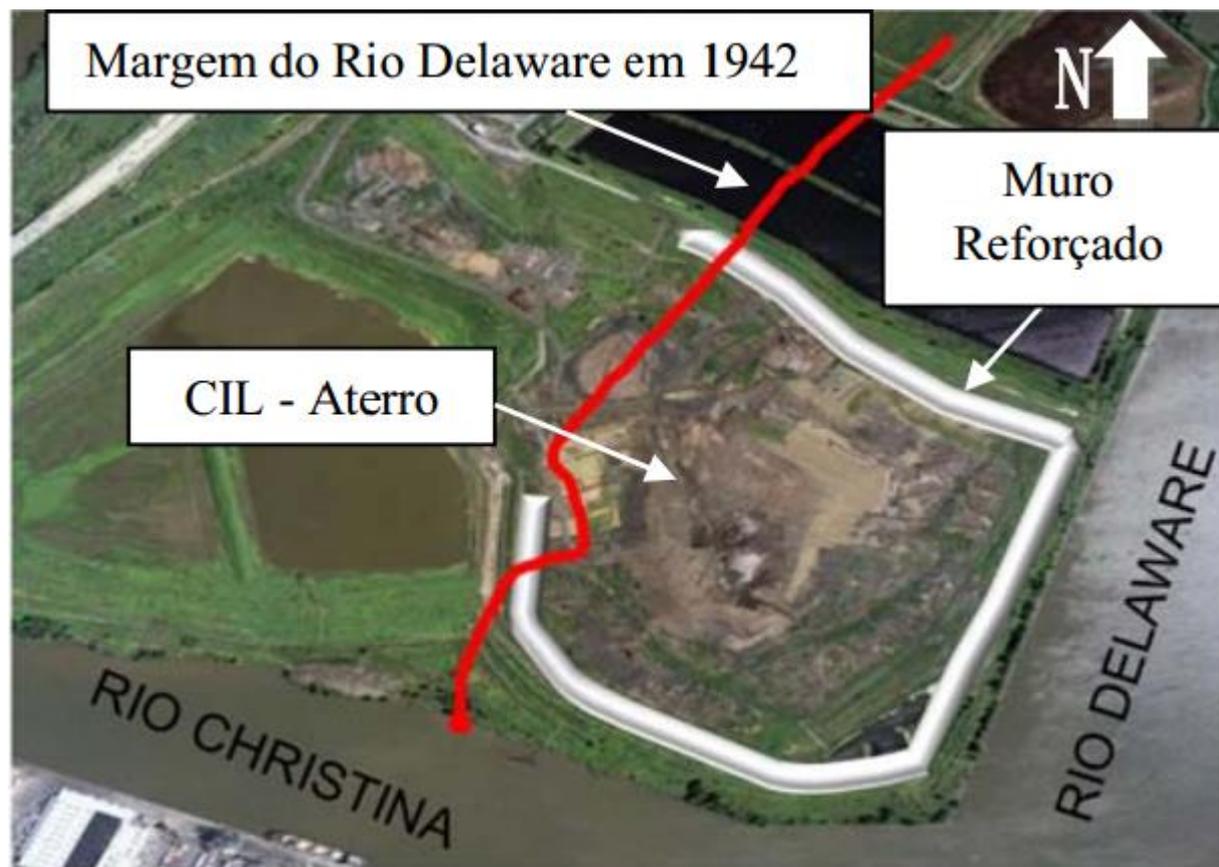


Figura 2 – Modelo de Distribuição de Poro Pressão

# Solução final

Muro de solo reforçado com 21 m de altura, 2.400 m de extensão, 1,5 milhões m<sup>3</sup> de solo importado, recalque de 4,5 m



- Análises de estabilidade por métodos convencionais de equilíbrio limite
- Resistência ao cisalhamento: material próximo aos PVDs,  $\phi' = 34^\circ$  (ensaios triaxiais adensados drenados); material mais distante,  $s_v/\sigma' = 0,29$  (ensaios de cone e palheta)
- Camadas de 3 m de altura no ritmo de 1m/semana com intervalo de 90 dias
- $C_v = 0,0022 \text{ cm}^2/\text{s}$ , 1.800.000m de PVDs com espaçamento de 1,5 m: dissipação de 90% do excesso de poro pressão de cada etapa
- 200.000  $\text{m}^2$  de geotêxtil de alta resistência (1.170 kN/m) foram instalados na base do muro

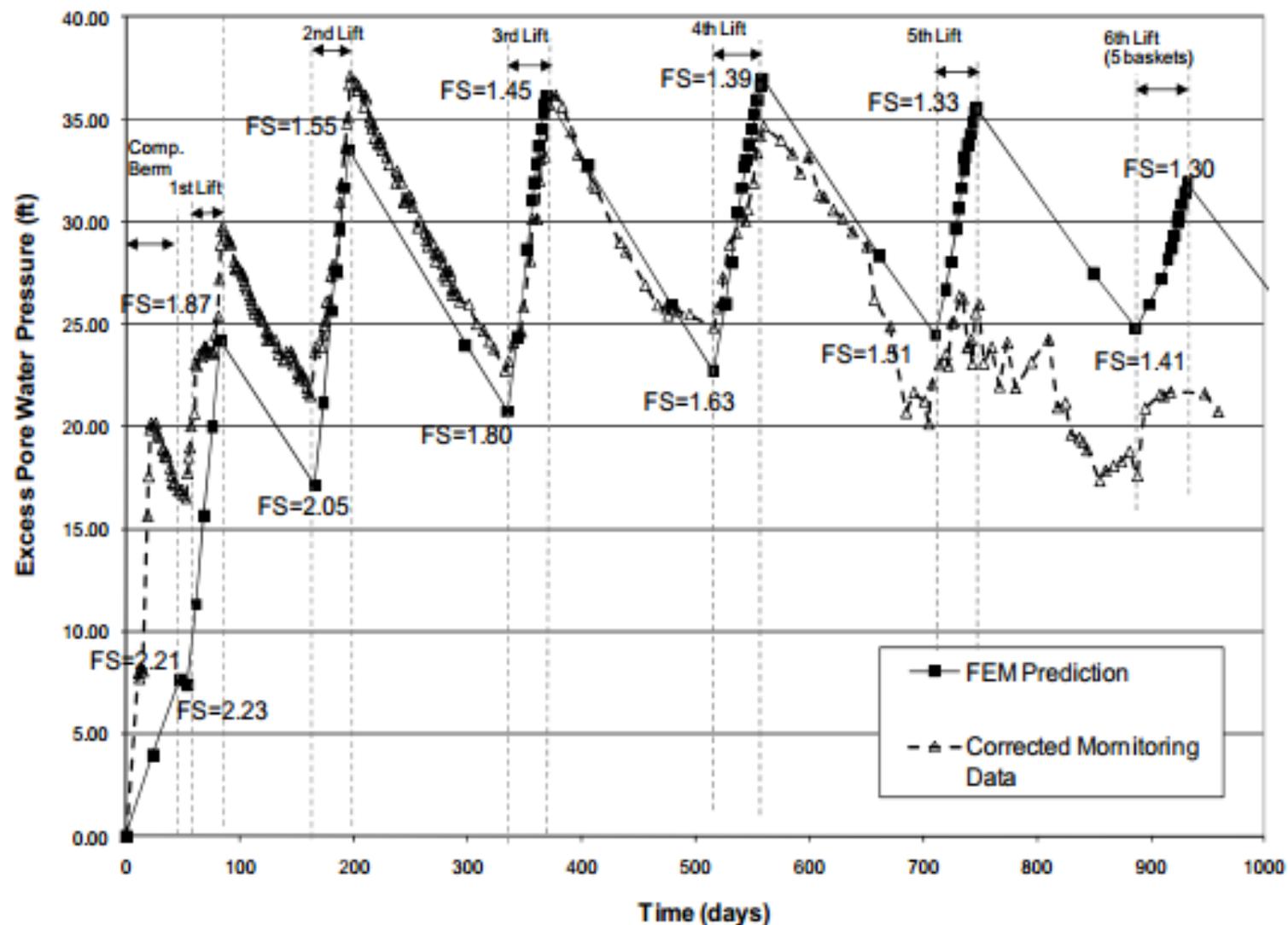


Figura 4 – Comparação entre Poro Pressões medidas em campo e preditas por FEM



Figura 6 – Vista do muro reforçado finalizado