

ENSAIOS DE CAMPO e suas aplicações à Engenharia de Fundações



PROF. EDGAR ODEBRECHT
UDESC – JOINVILLE
GEOFORMA ENGENHARIA LTDA

Ensaaios de Campo



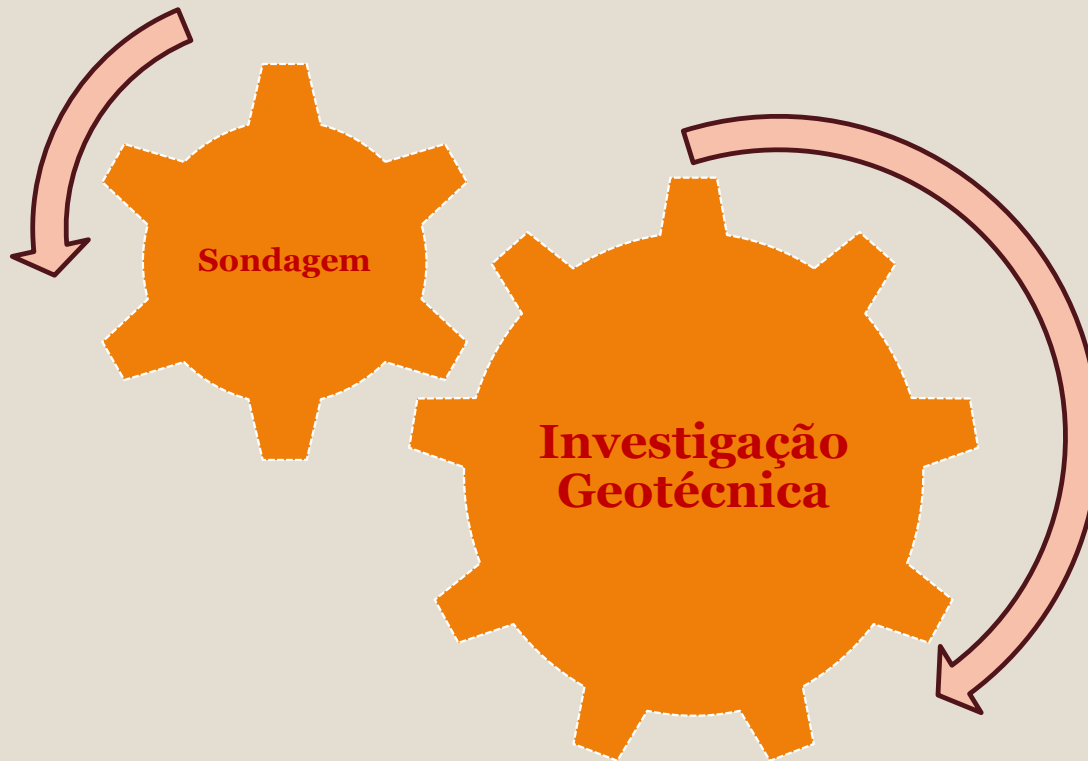
- Introdução
- Tipos de investigação geotécnica
- Aplicação para Fundações
 - Determinação de Parâmetros
 - ✦ Exemplo - Fundações de aterro sobre solos moles
 - ✦ Exemplo - Fundações diretas – sapatas
 - ✦ Exemplo - Fundações profundas – efeito Thebotarioff
- Referências Bibliográficas

Ensaaios de Campo

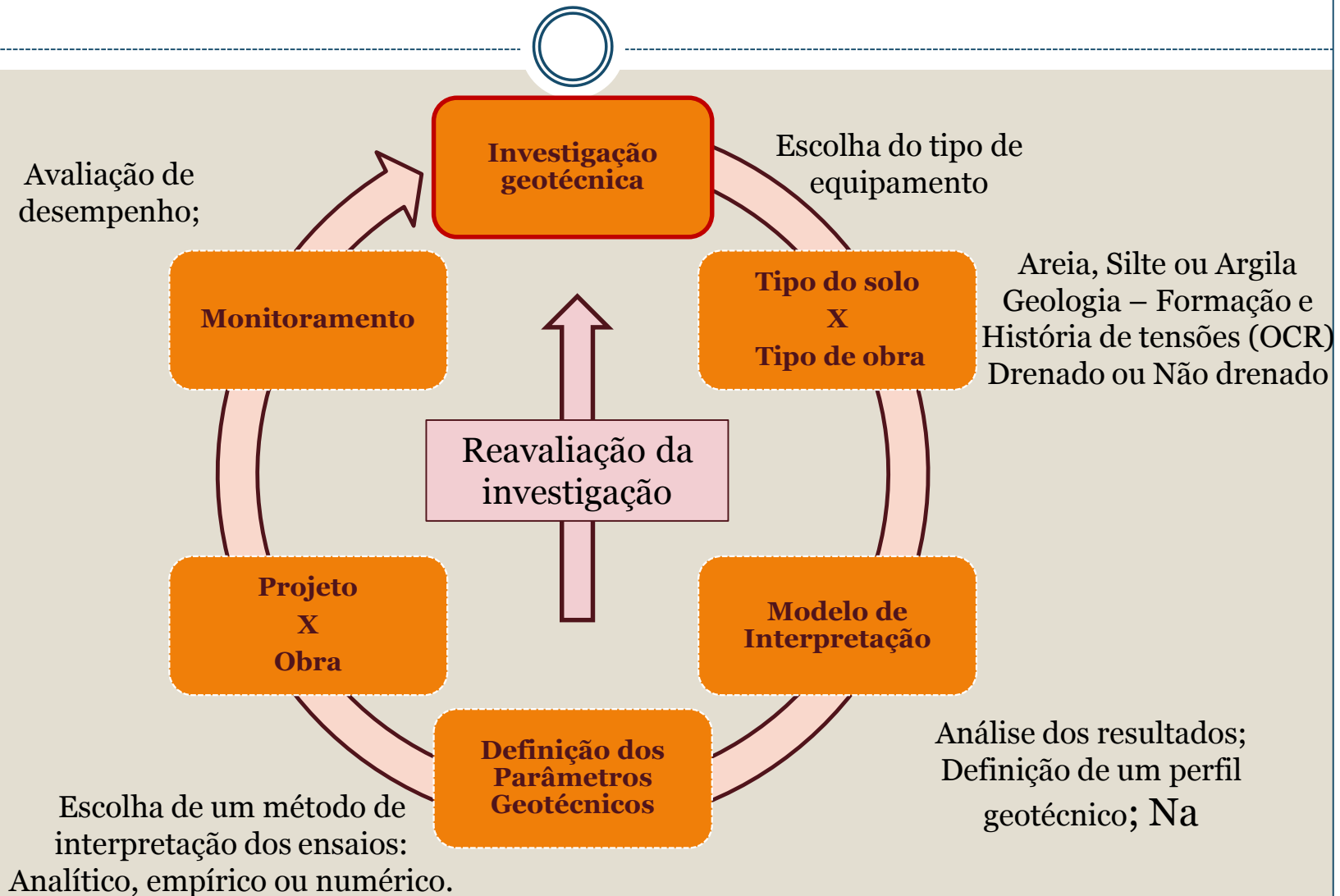


- Um projeto de fundações passa por:
 - Previsão ou obtenção das cargas;
 - **Adoção de um perfil ou modelo do subsolo;**
 - **Interpretação destes elementos a luz do conhecimento já estabelecido;**
- Deve-se observar nesta etapa:
 - Que o solo, sendo produto da natureza, apresenta **grande variabilidade** em **ocorrência e nas propriedades;**
- (Milititsky et al 2005 – Patologia das Fundações).

Ensaio de Campo



Ensaaios de Campo



Ensaaios de Campo

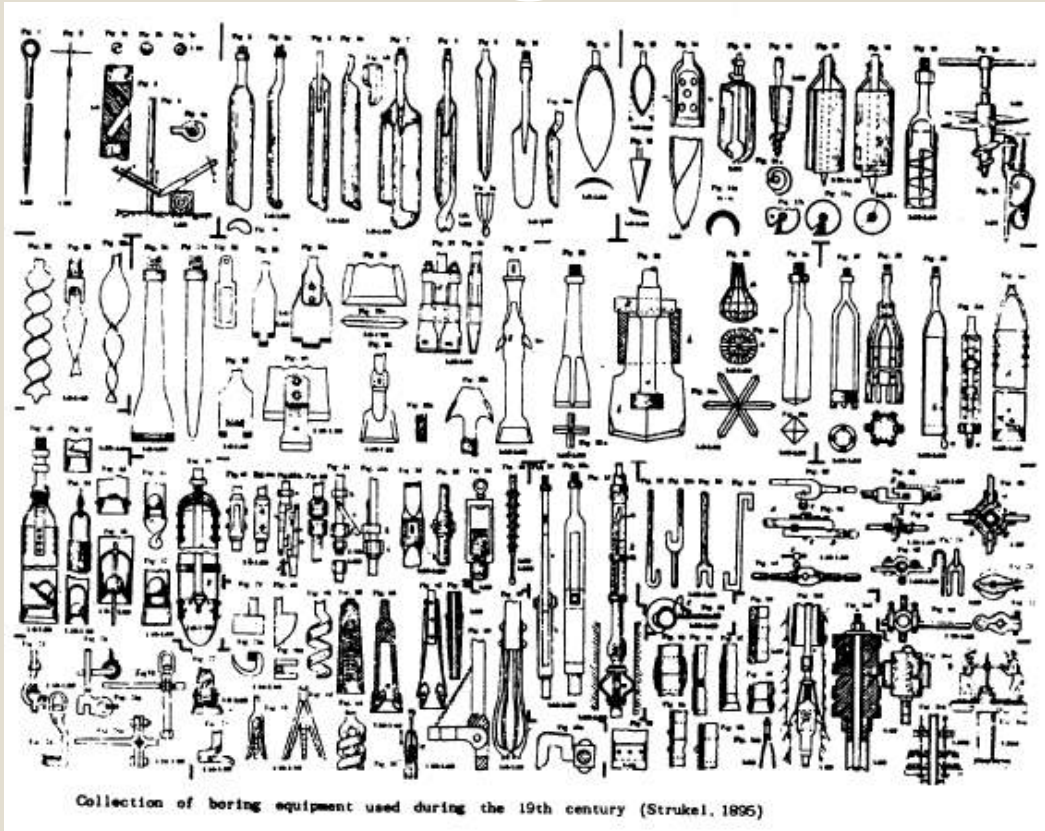


ENSAIOS DE CAMPO

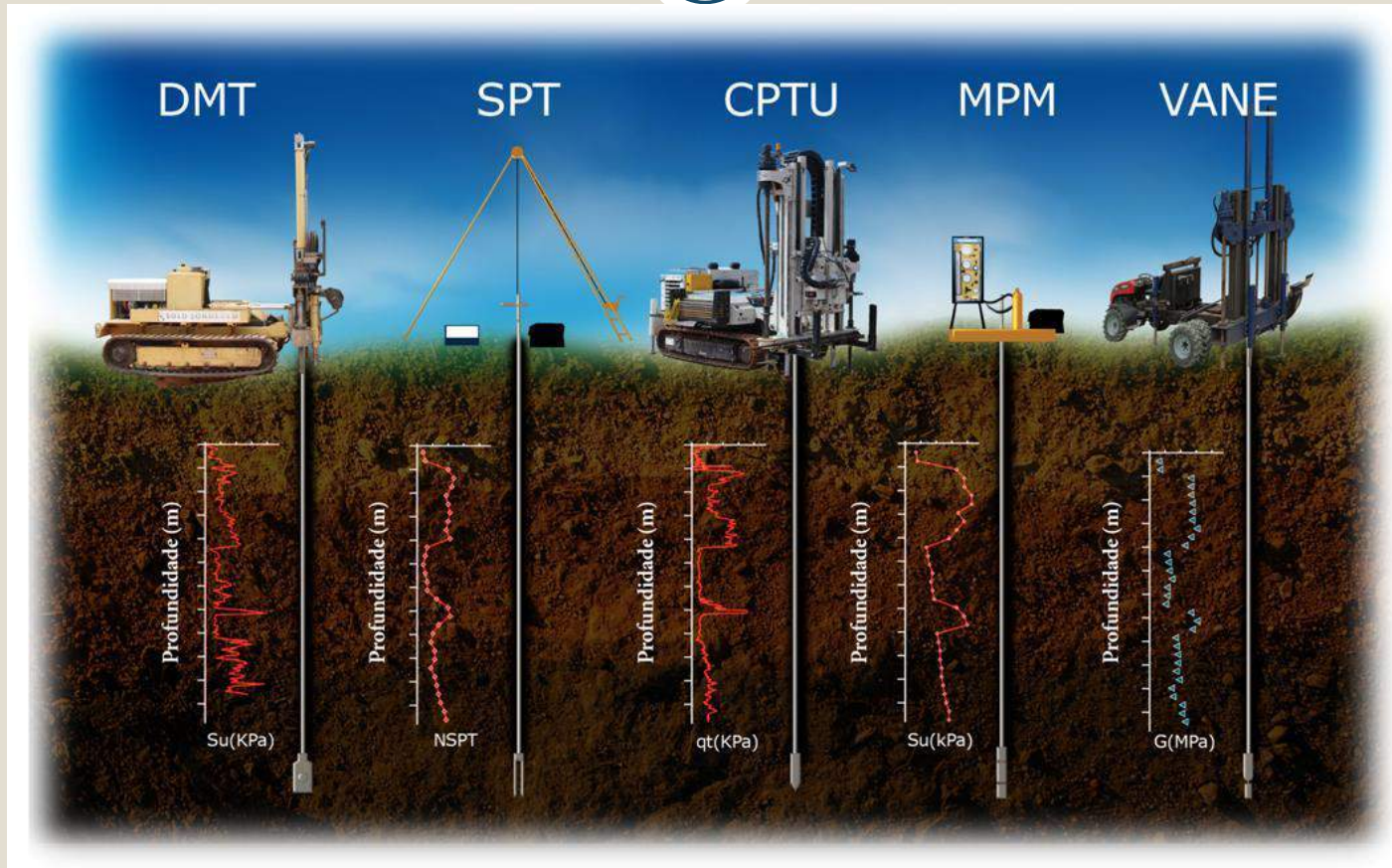


- Qual a estratigrafia?
- Qual a resistência do solo? (ângulo de atrito e coesão)
- Qual a posição do Na?
- Quanto vai deformar? (módulo de Elasticidade)
- Quanto tempo demora para estabilizar?
- Qual a permeabilidade do solo?
- Qual a capacidade de carga de uma estaca? (dimensionamento)

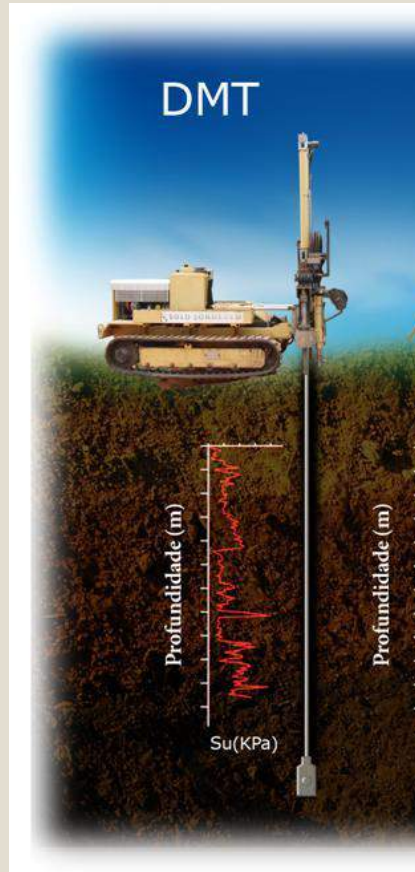
ENSAIOS DE CAMPO



ENSAIOS DE CAMPO



ENSAIOS DE CAMPO



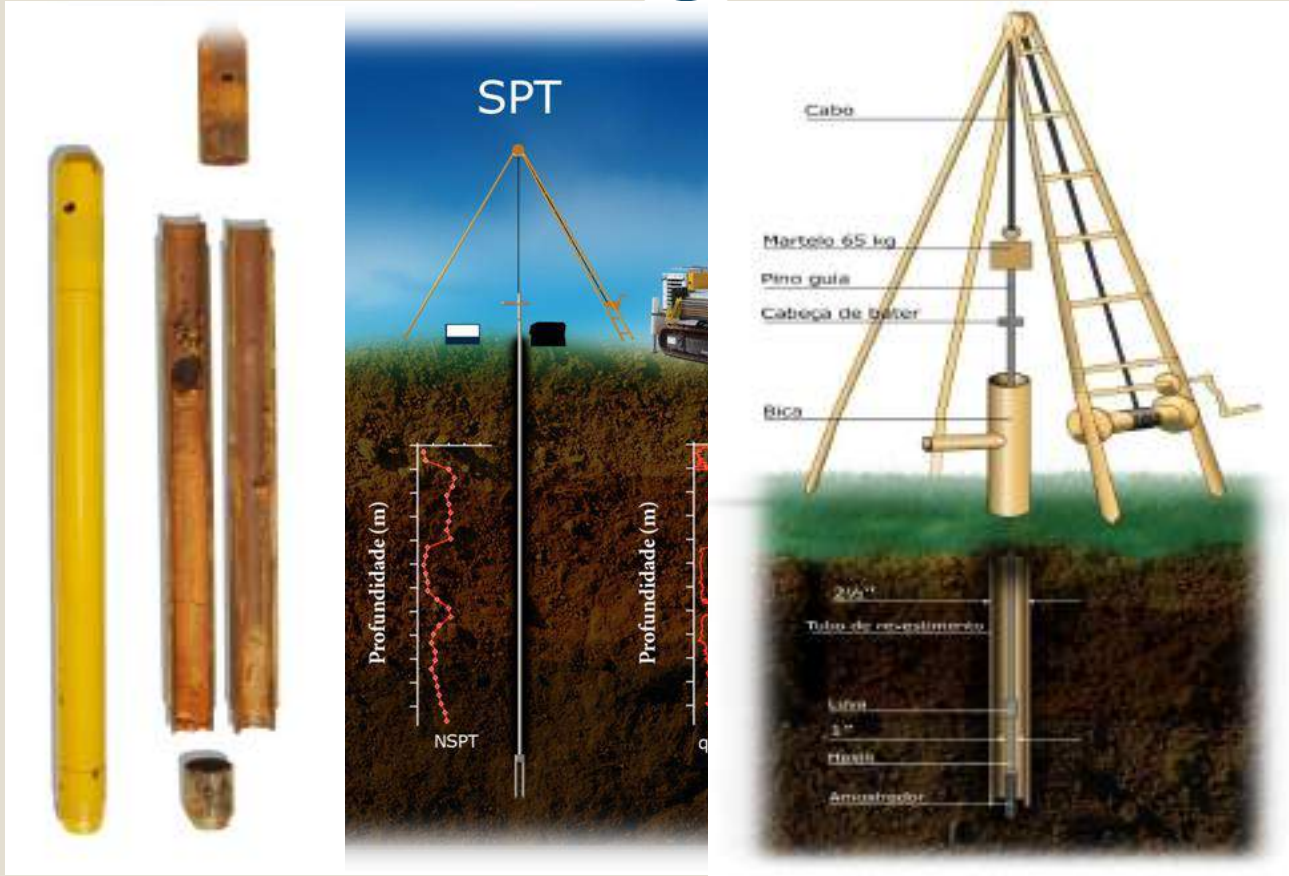
P_0 (kN/m²)
 P_1 (kN/m²)

Interpretação empírica

ENSAIOS DE CAMPO



N_{SPT}
Número



Introdução do conceito de energia na interpretação do N_{SPT} - (J) → Teoria de Cap.Carga

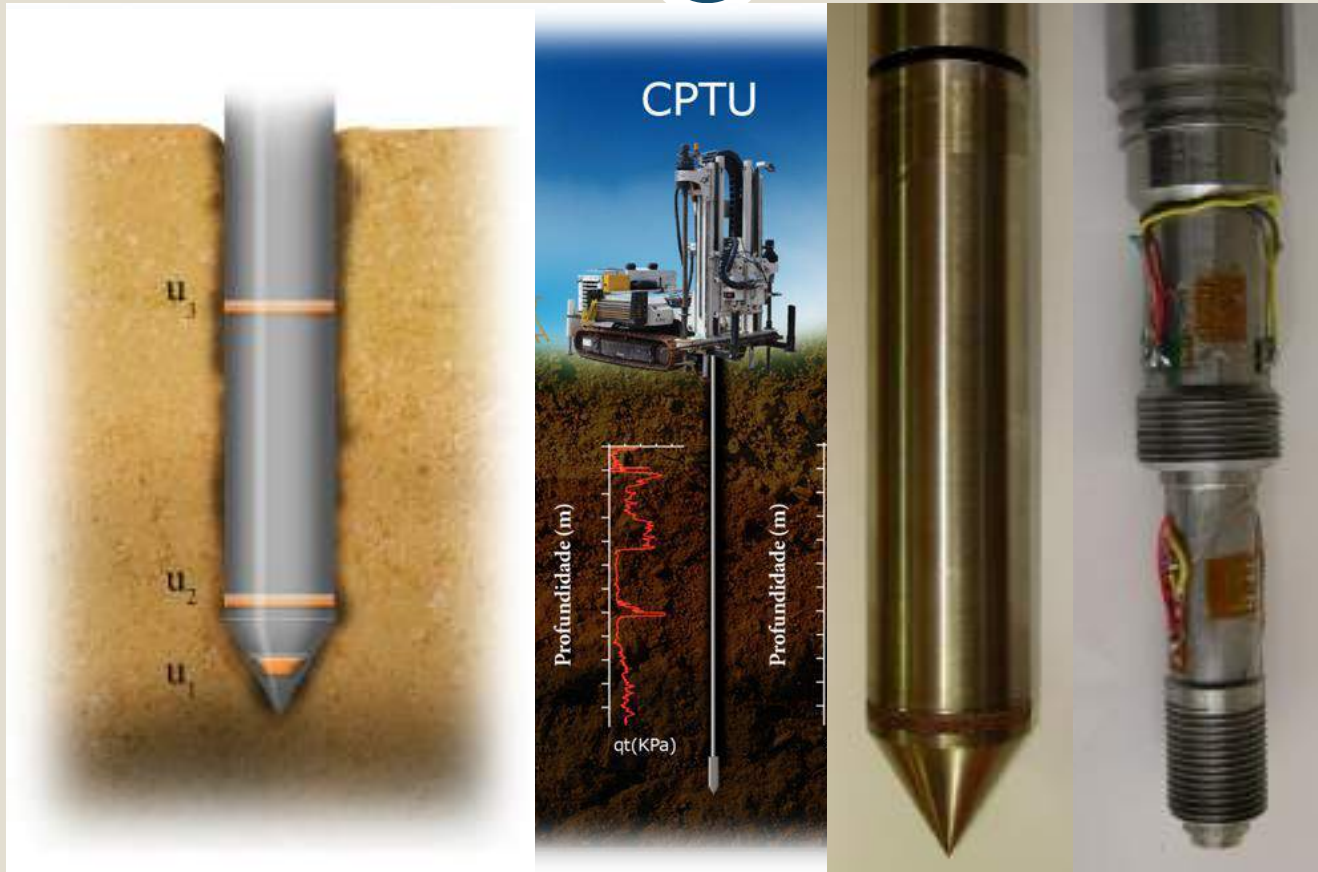
ENSAIOS DE CAMPO



- Martelo automático;
- Haste AW;
- Furo revestido ???
- Energia ?????

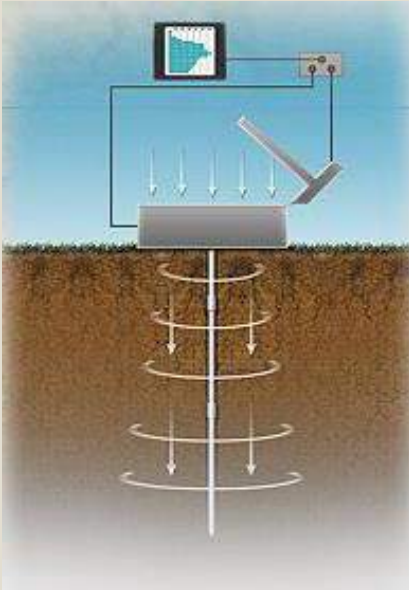


ENSAIOS DE CAMPO



q_t (kN/m²) - f_s (kN/m²) - u_2 (kN/m²) - G_o (kN/m²)

$q_{ult} = s_u \cdot N_c + \sigma_{vo} \cdot N_q$ Teoria de expansão de cavidade esférica - Modelos

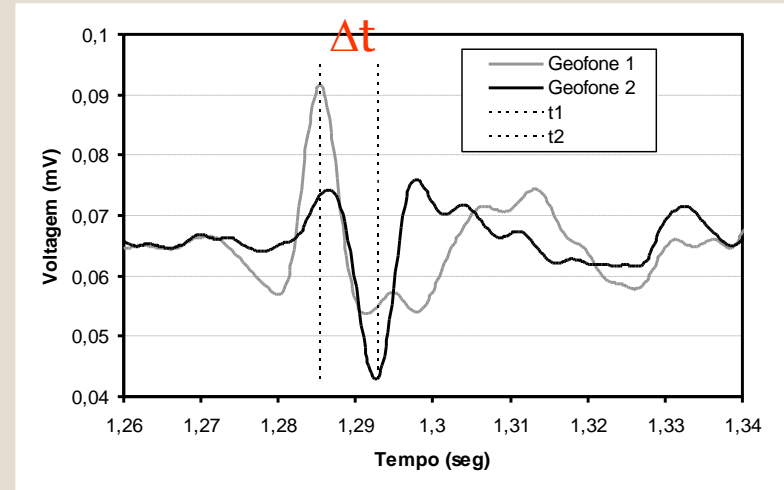
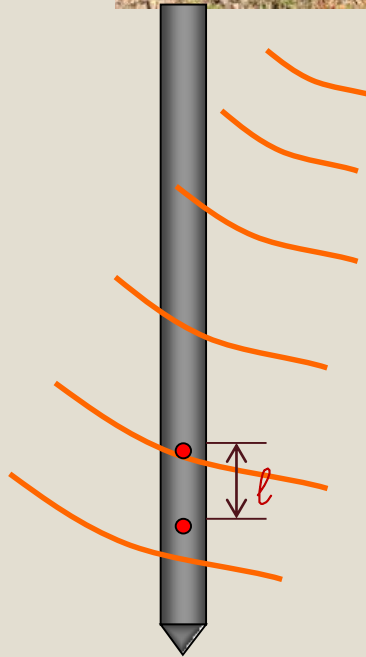


$$G_o = \rho \cdot V_s^2$$

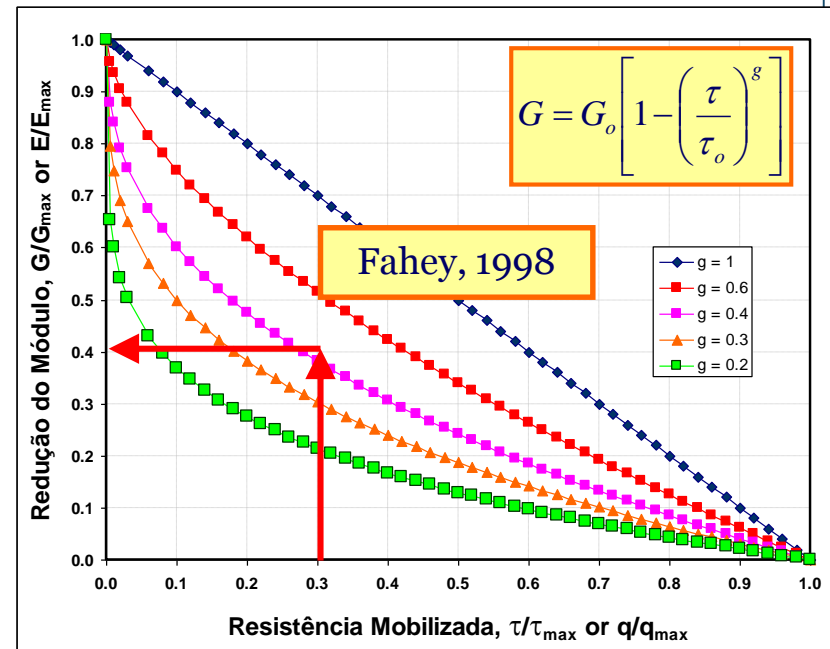
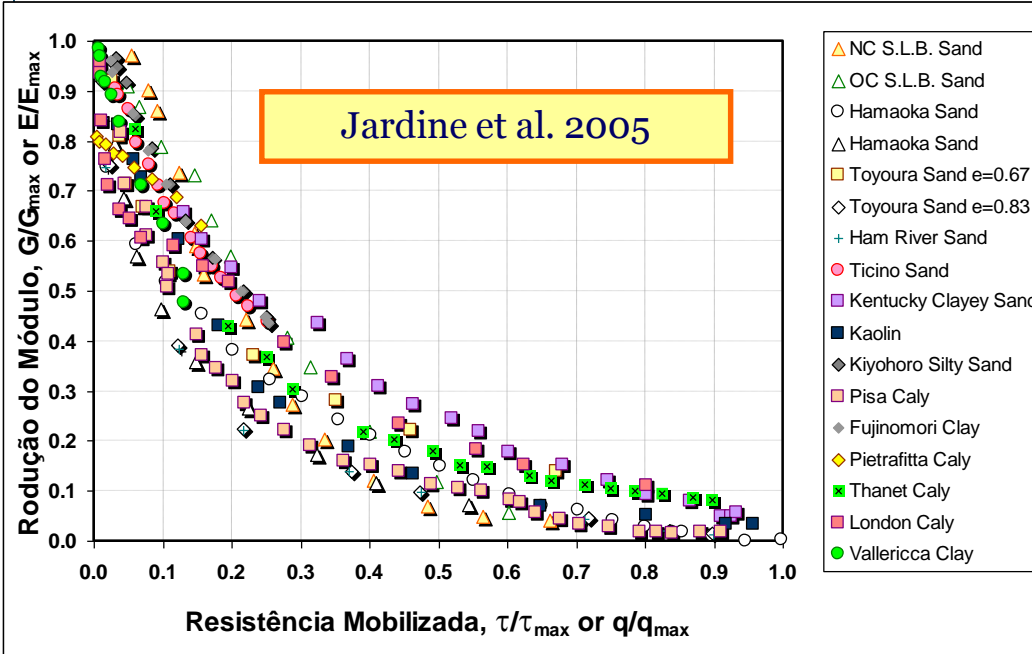
ρ = massa específica = γ/g

V_s = Velocidade cisalhante

$$V_s = \frac{l}{\Delta t}$$



ENSAIOS DE CAMPO



$g \approx 0,3 \pm 0,1$ para solos bem comportados (não cimentados, não estruturados, não sensíveis)

$$E_o = 2(1 + \nu) \cdot G_o \quad E = 2(1 + \nu)G$$

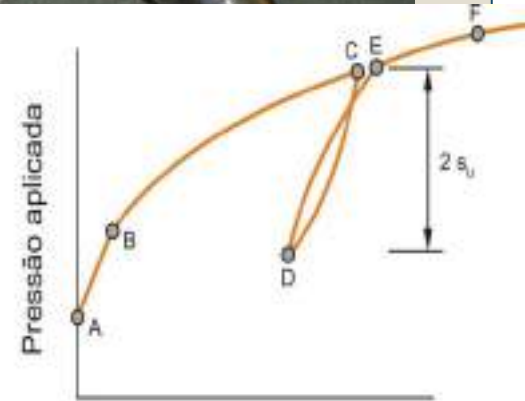
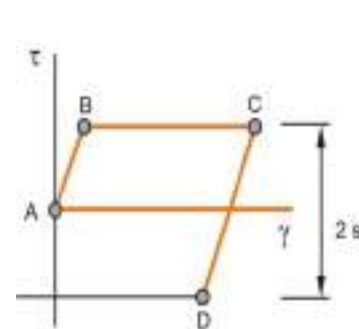
$$G = G_o 0,4 \quad \nu = 0,3$$

$$E = 2,6 \cdot G_o \cdot 0,4$$

$$E = G_o$$

**Robertson & Cabal,
2009**

ENSAIOS DE CAMPO

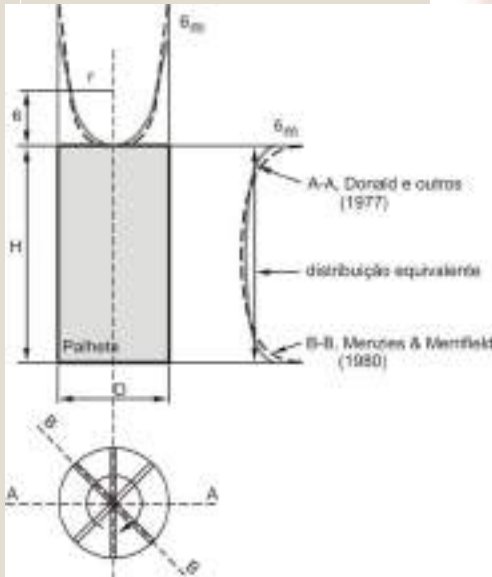


Teoria de expansão de cavidade cilíndrica – Modelos analíticos e numéricos

ENSAIOS DE CAMPO



s_u (kN/m²)



Solução analítica - Modelos matemáticos

ENSAIOS DE CAMPO



- **Fundações**

- **Ruptura** → Segurança adequada ao colapso do solo de fundação (ruptura – **estado limite último**)
- **Recalque** → Deformações aceitáveis sob as condições de trabalho (recalques – **estado limite de utilização**)



ENSAIOS DE CAMPO



- Métodos Diretos

- Medidas do SPT, CPT, DMT, Vane são utilizados diretamente na previsão do comportamento de fundações:
 - ✦ previsão de capacidade de carga (σ_{adm} ou Q_{adm}) e,
 - ✦ estimativa de recalques (ρ).

- Métodos Indiretos

- Medidas do SPT, CPT, DMT, Vane são utilizados para determinar propriedades de comportamento dos solos:
 - ✦ ângulo de atrito (ϕ'),
 - ✦ resistência ao cisalhamento não drenada (s_u);
 - ✦ Permeabilidade (k , c_v);
 - ✦ Módulo (E , M , σ'_{vm})

ENSAIOS DE CAMPO



- Métodos Diretos

- São utilizados na previsão do comportamento de fundações e fundamentados em **métodos estatísticos**, de simples aplicação, mas **devem ser validado através de experiência local**.

- Métodos Indiretos

- São utilizados na previsão do comportamento de fundações e fundamentados **métodos de equilíbrio limite e teoria da elasticidade** e, portanto deve-se ter em mente as **hipótese e simplificações de cada método**.

ENSAIOS DE CAMPO



- A **conjugação de diferentes métodos** e ensaios de **campo & laboratório**, usados de forma racional, conjugados com experiência prévia com o material constituem prática adequada e segura (Milititsky et al 2005 – Patologia das Fundações).

Ilha de Investigação

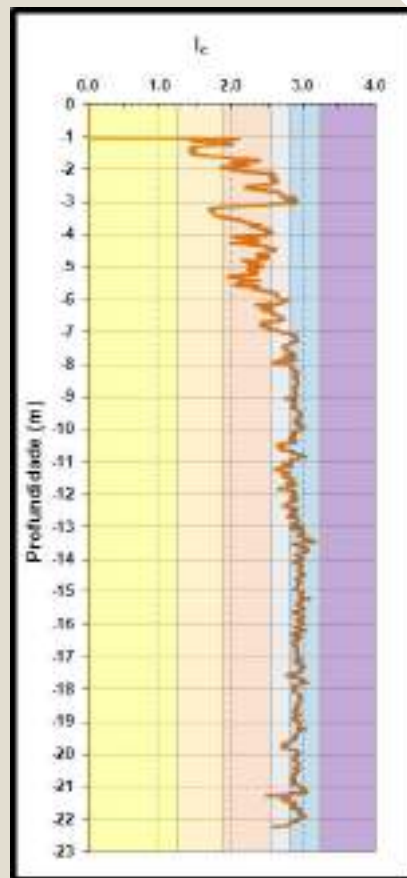
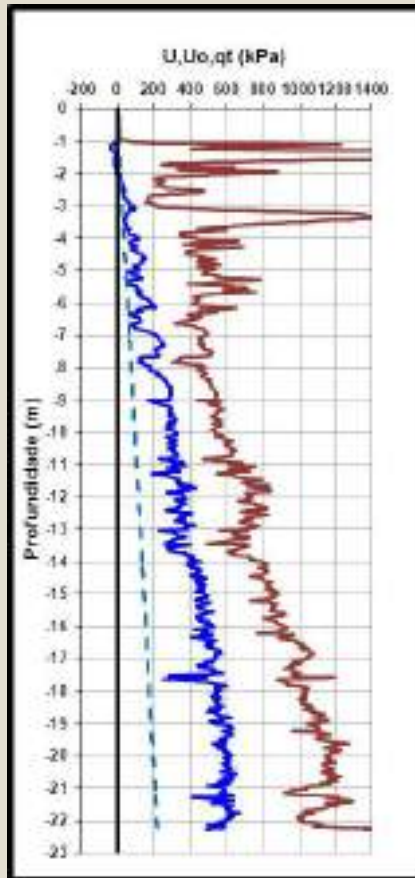
ENSAIOS DE CAMPO – Exemplo de aplicação





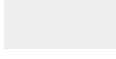



- **Fundação de Aterro Rodoviário sobre Solos Moles**
 - **Investigação**
 - ✦ **Estratigrafia**
 - ✦ **Parâmetros de resistência → análise de estabilidade (ruptura)**
 - ✦ **Parâmetros de deformação → análise de recalques**

Ensaio CPTU; DMT; Vane; Adensamento

ENSAIOS DE CAMPO – Exemplo de aplicação

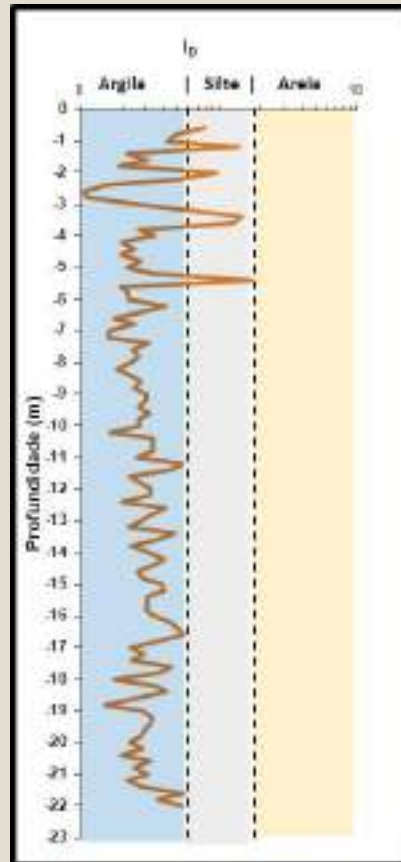
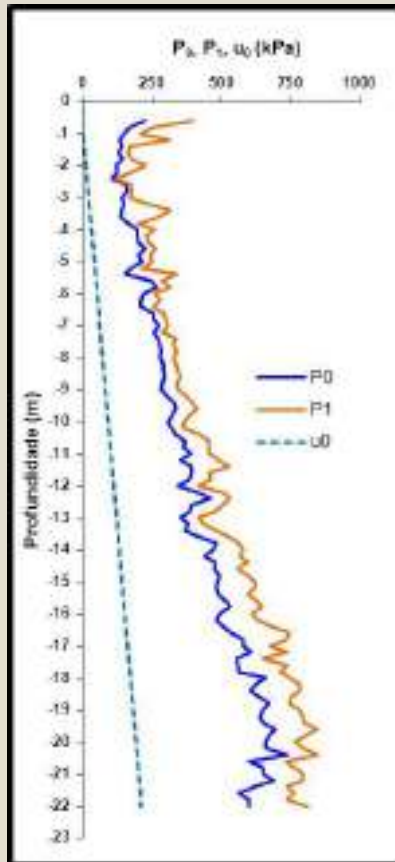


Estratigrafia

	Classificação	I_c
	Argila Orgânica	$I_c > 3,22$
	Argila	$2,82 < I_c < 3,22$
	Misturas de siltes	$2,54 < I_c < 2,82$
	Misturas de areia	$1,90 < I_c < 2,52$
	Areia	$1,25 < I_c < 1,90$
	Areia com pedregulho	$I_c < 1,25$

Perfil – Tubarão - SC

ENSAIOS DE CAMPO – Exemplo de aplicação

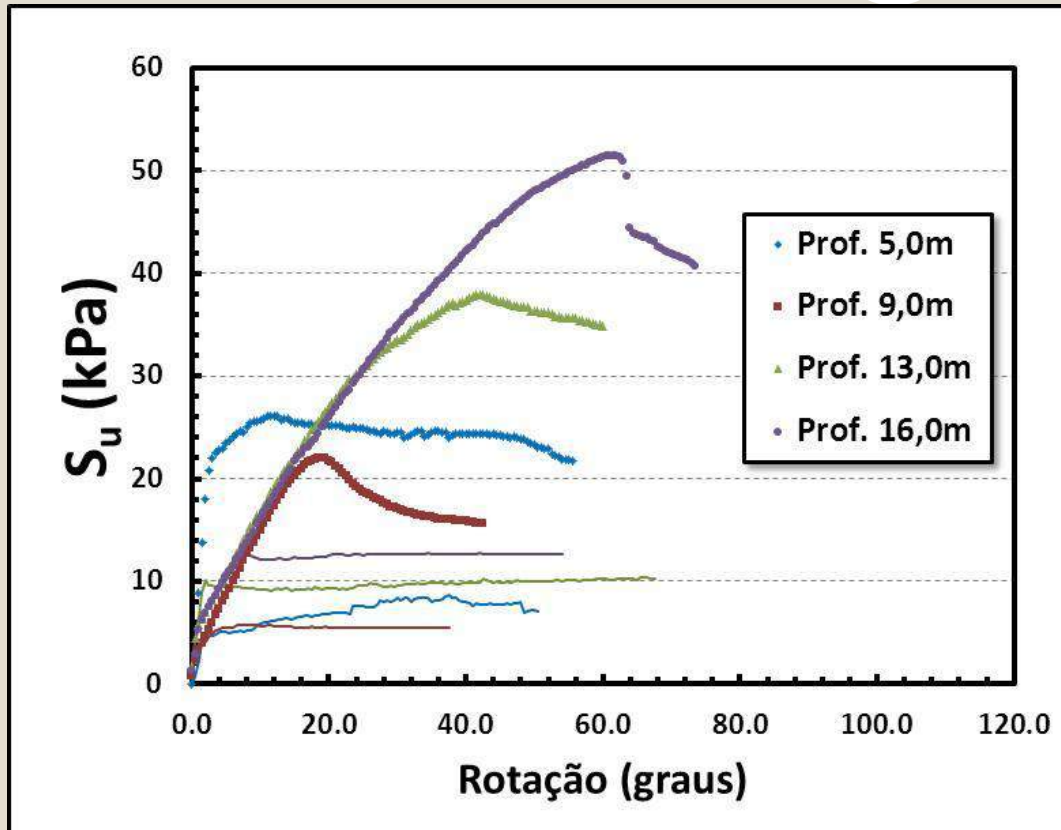


Estratigrafia

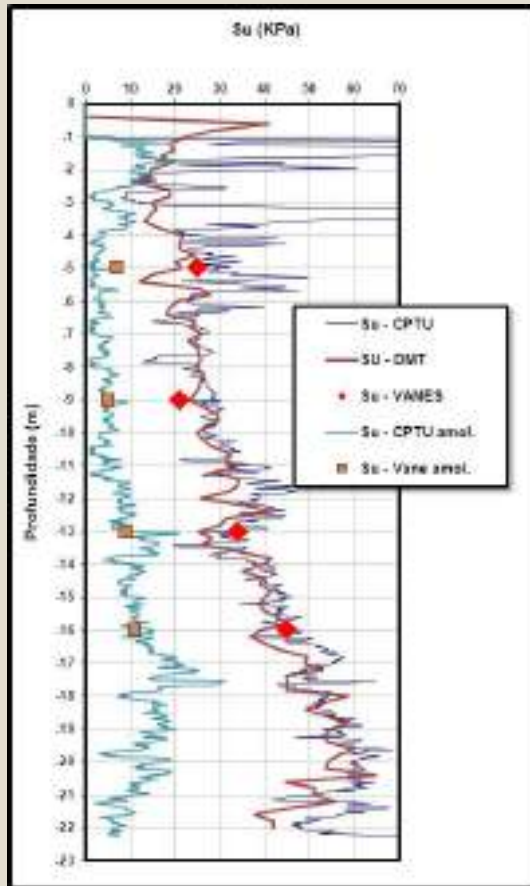


Perfil – Tubarão - SC

ENSAIOS DE CAMPO – Exemplo de aplicação



ENSAIOS DE CAMPO – Exemplo de aplicação

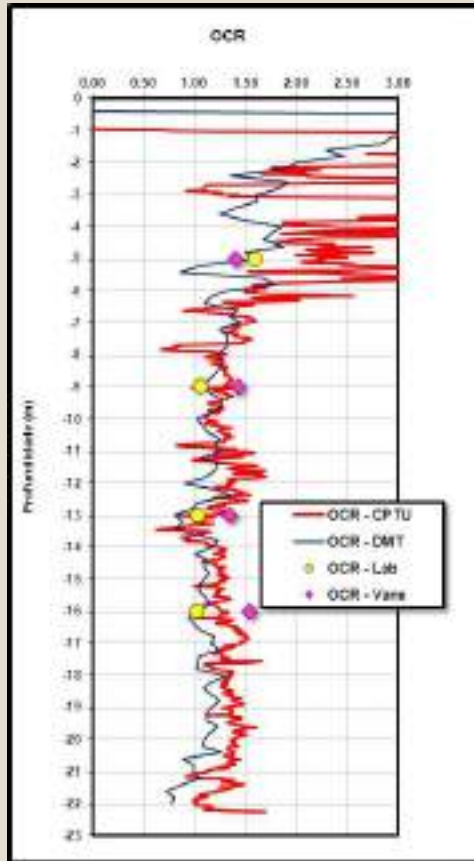


$$S_{U-CPTU} = \frac{(q_t - \sigma_{vo})}{N_{kt}}$$

$$S_{U-DMT} = 0,22 \cdot \sigma'_{vo} (0,5 \cdot k_D)^{1,25}$$

Análise de estabilidade → Ruptura

ENSAIOS DE CAMPO – Exemplo de aplicação



$$OCR_{CPTU} = \alpha \frac{(q_t - \sigma_{vo})}{\sigma'_{vo}}$$

$\alpha = 0,22$
(Schnaid &
Odebrecht 2012)

$$OCR_{DMT} = (\beta \cdot k_D)^{1,17}$$

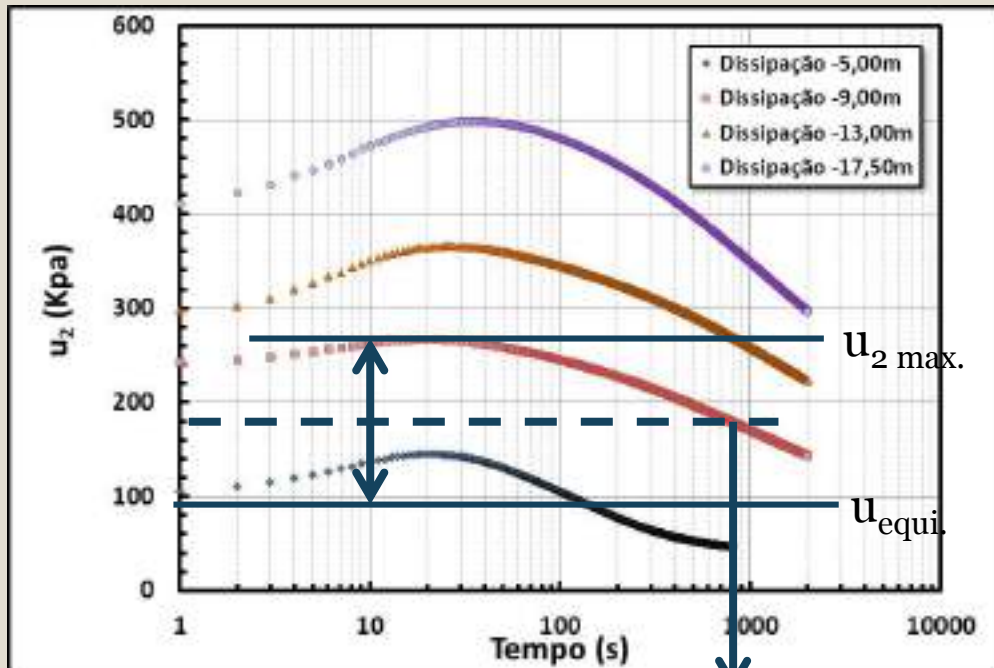
$\beta = 0,22$
(Lunne, Lacasse &
Rad, 1989)

$$OCR_{Vane} = \gamma \left(\frac{S_U}{\sigma'_{vo}} \right)$$

$\gamma = 3,8$
(Mayne & Mitchell
1988)

Estimativa de deformação → Recalques

ENSAIOS DE CAMPO – Exemplo de aplicação



$t_{50} = 800s$

$$c_h = \frac{T^* \cdot r^2 \cdot \sqrt{I_r}}{t_{50\%}}$$

$$c_h(NA) = \frac{RR}{CR} c_h(\text{piezocone})$$

$$c_v(NA) = \frac{h_v}{k_h} c_h(NA)$$

Estimativa do tempo de adensamento

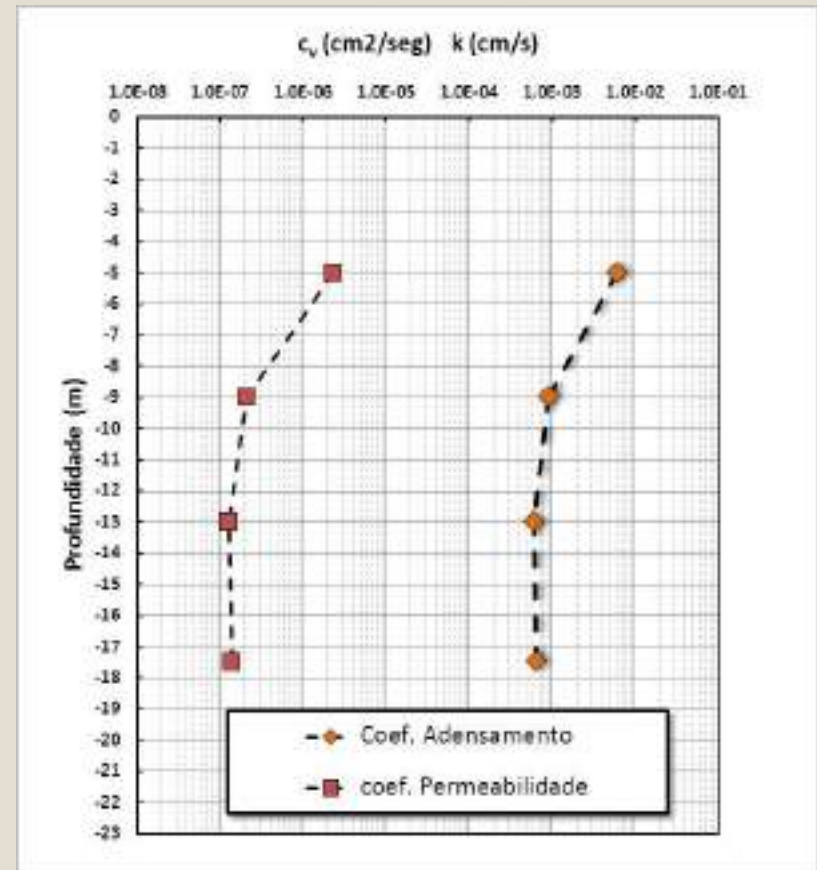
ENSAIOS DE CAMPO – Exemplo de aplicação

$$c_h = \frac{T^* \cdot r^2 \cdot \sqrt{I_r}}{t_{50}} = \frac{0,254 \cdot 1,57^2 \cdot \sqrt{100}}{800}$$

$$c_h(NA) = \frac{1}{5} c_h(\text{piezocone})$$

$$c_v(NA) = \frac{2}{1} c_h(NA)$$

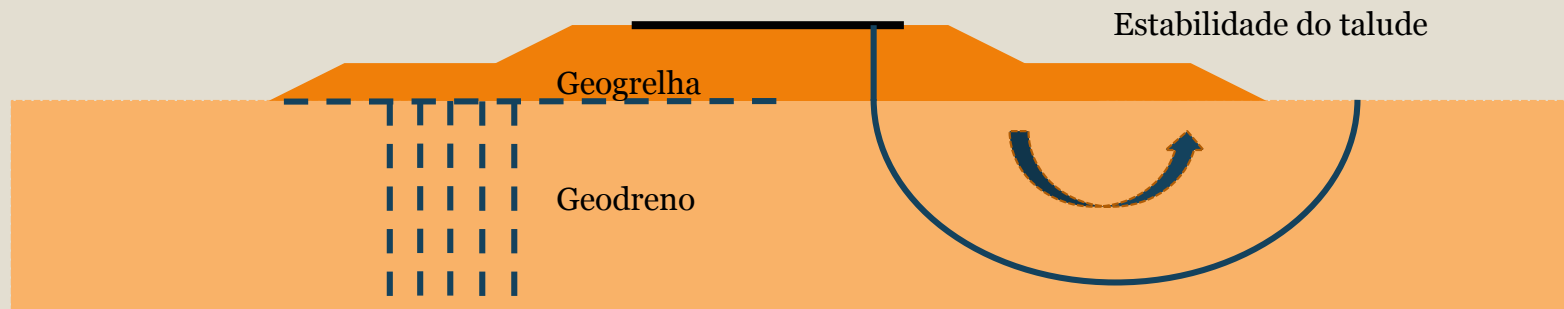
$$k(\text{cm/s}) = \left(\frac{1}{251 \cdot t_{50(\text{sec})}} \right)^{1,25}$$



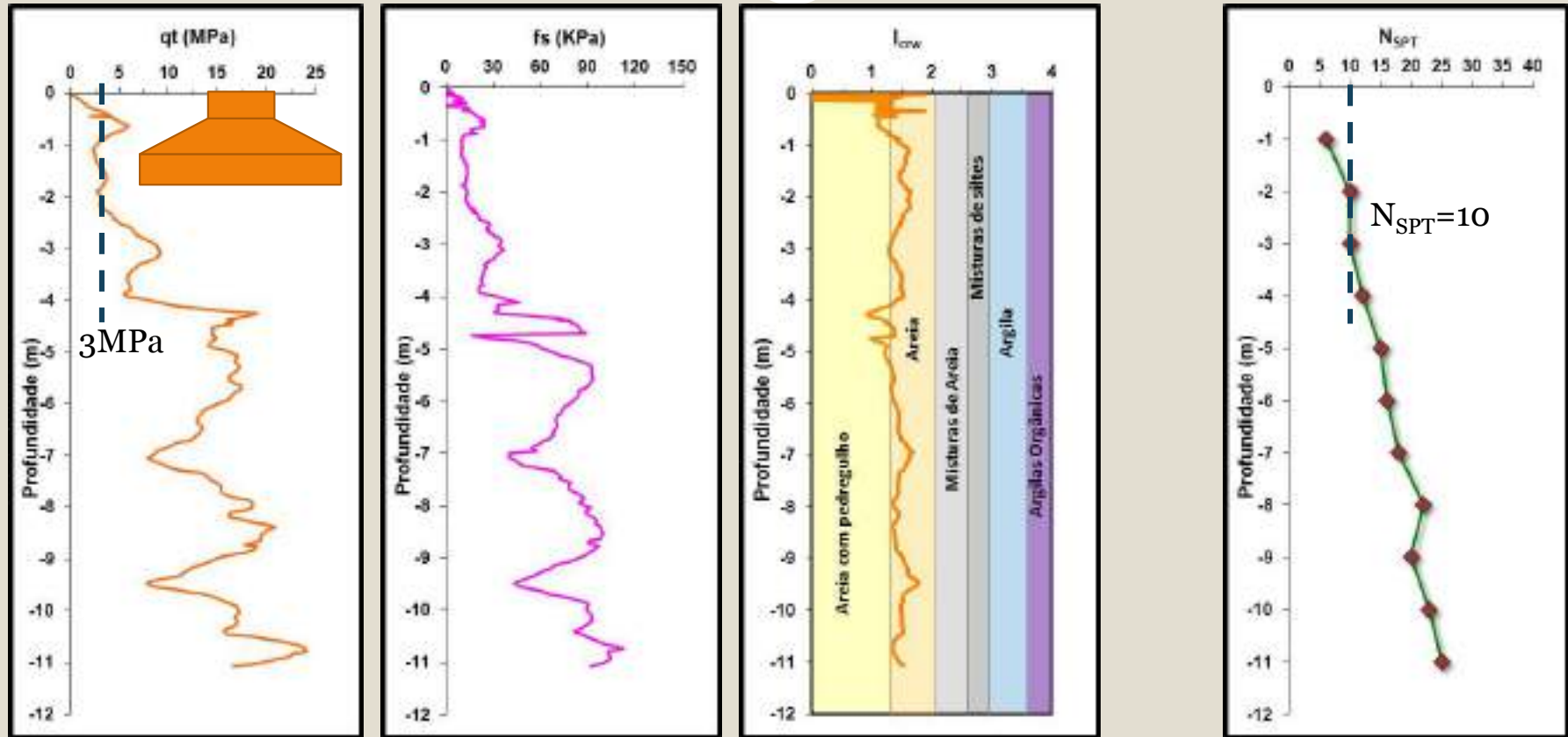
ENSAIOS DE CAMPO – Exemplo de aplicação



- Fundação de Aterro Rodoviário sobre Solos Moles
 - Investigação
 - ✦ Estratigrafia – **Bem definida com os ensaios**
 - ✦ Parâmetros de resistência → **Perfil de s_u com a profundidade**
 - ✦ Parâmetros de deformação → **OCR e c_h**



Exemplo de aplicação – Fundação Direta



Perfil – São Francisco do Sul - SC

Exemplo de aplicação – Fundação Direta

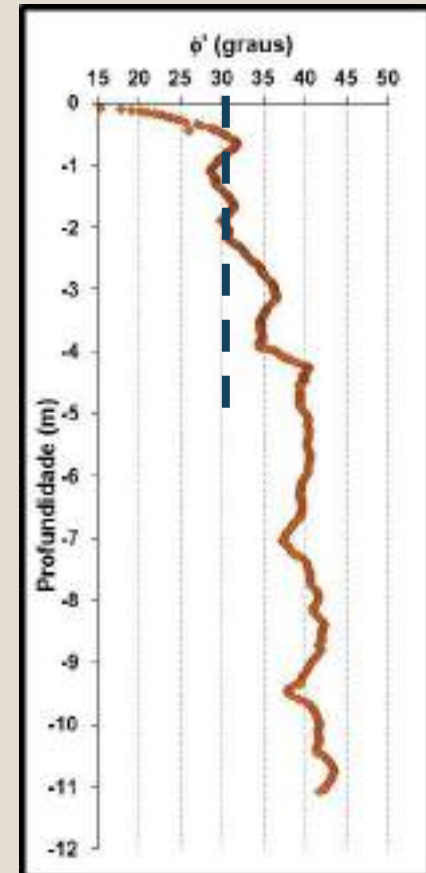
Estimativa de parâmetros



$$\phi' = 17,0 + 11 \cdot \log(q_{t1})$$

$$q_{t1} = \left(\frac{q_t}{\sigma_{atm}} \right) / \sqrt{\frac{\sigma'_{vo}}{\sigma_{atm}}}$$

Kulhawy & Mayne (1990)



Exemplo de aplicação – Fundação Direta

Estimativa de parâmetros



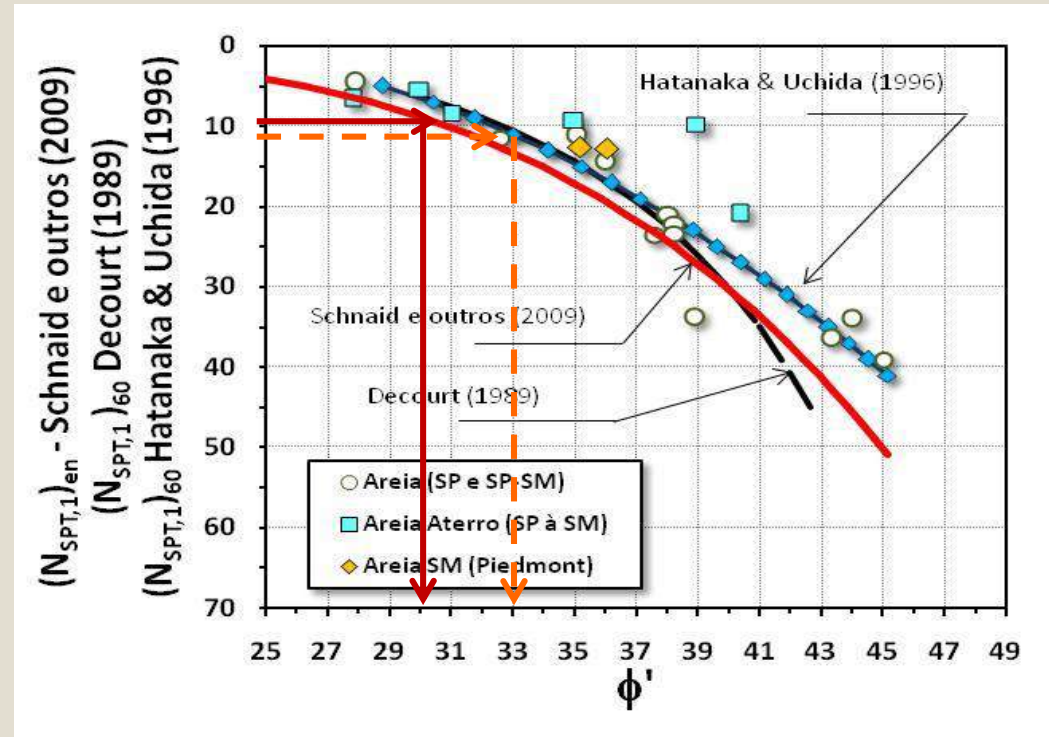
$$N_{(SPT,1)en} = 10$$

$$N_{60} = N_{SPT} \frac{Er}{0,60}$$

$$Er \cong 0,80 \quad (\text{Brasil})$$

$$N_{60} = N_{SPT} \bullet 1,33$$

$$N_{60} = 10 \cdot 1,33 = 13,3$$



Exemplo de aplicação – Fundação Direta

Método Indireto



$$\sigma_{rup} = cN_c S_c + qN_q S_q + \frac{1}{2} B \gamma N_\gamma S_\gamma$$

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2 (45 + \phi / 2)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot g(\phi)$$

$$N_\gamma = 1.5(N_q - 1) \tan(\phi)$$

Para: $B = 1,5\text{m}$; $\gamma_t = 17 \text{ kPa}$; $c = 0$; $S_q = 1,2$ e $S_\gamma = 0,8$

$$\sigma_{rup} = 724 \text{ kPa} \quad \rightarrow \quad \sigma_{adm} = 241 \text{ kPa}$$

Exemplo de aplicação – Fundação Direta

Método Direto



- Tensão admissível CPT – Teixeira & Godoy (1996)

$$\sigma_{adm} = \frac{q_c}{15} = \frac{3MPa}{15} = 0,2MPa$$

- Tensão admissível CPT – Mayne (2009)

$$\sigma_{adm} = (q_c - \sigma_{vo}) \cdot h_s \cdot \sqrt{\frac{s}{B}} = (3 - 0,034) \cdot 0,58 \cdot \sqrt{\frac{0,02}{1,5}} = 0,172MPa$$

- Tensão admissível SPT – Teixeira & Godoy (1996)

$$\sigma_{adm} = 0,02 \cdot N_{SPT} = 0,02 \cdot 10 = 0,2MPa$$

Exemplo de aplicação – Fundação Direta

Método Indireto

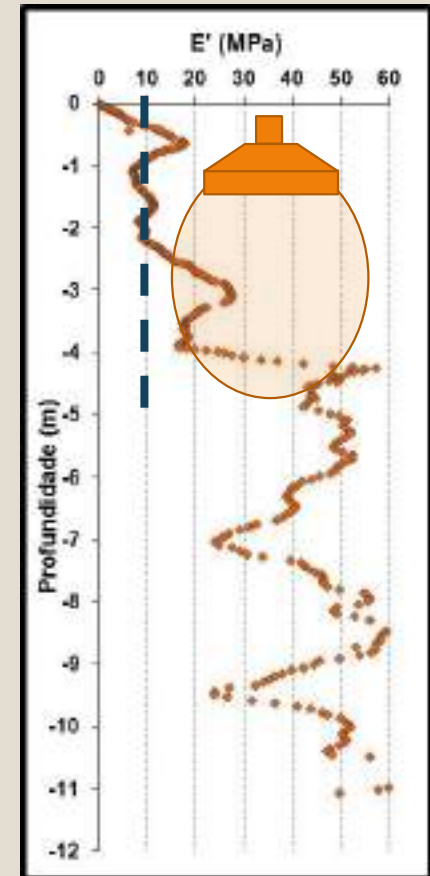
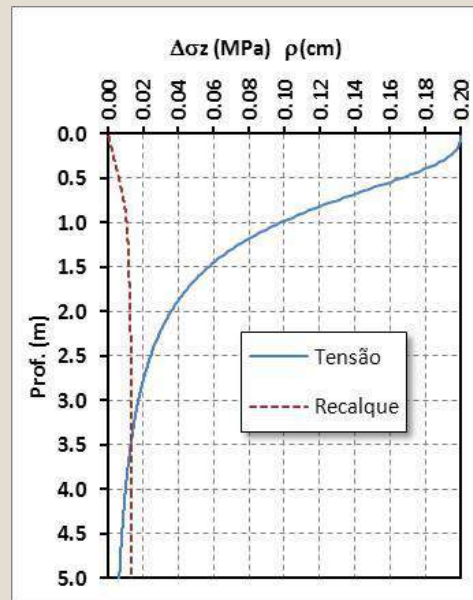


Estimativa de recalques

$$\rho = \frac{1 - \mu^2}{E'} \sigma \cdot B \cdot I = \frac{1 - 0,33^2}{10} 0,20 \cdot 1,5 \cdot 0,95 = 0,025m$$

$$\Delta\sigma_z = \Delta q \left\{ 1 - \left[\frac{1}{1 + (r/z)^2} \right]^{3/2} \right\}$$

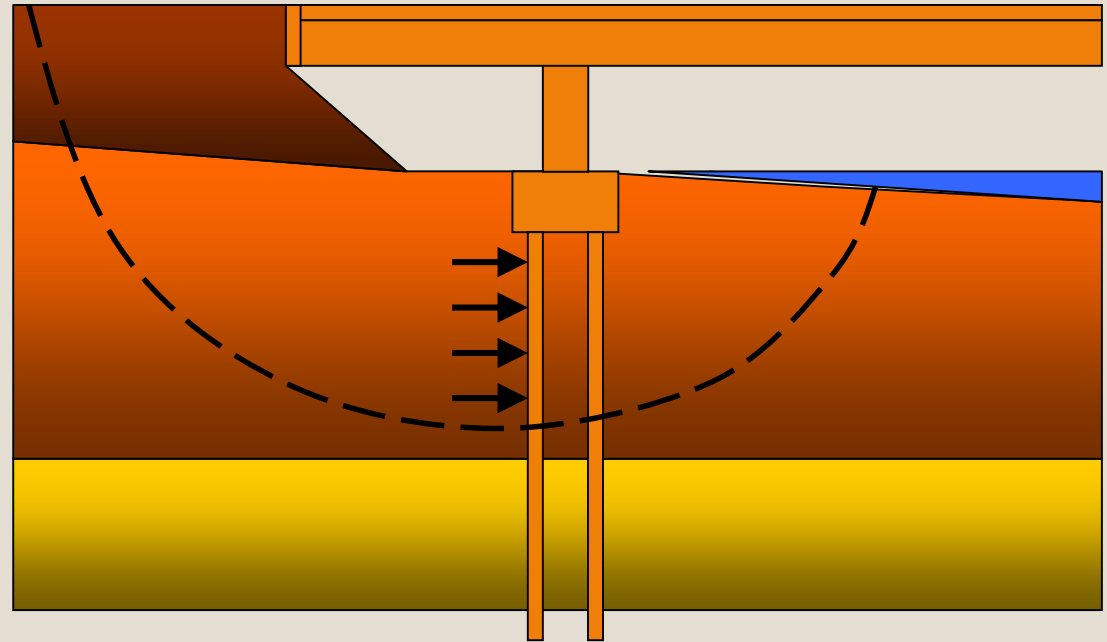
$$\rho = \sum \frac{\Delta\sigma_v}{M} \Delta z = 0,013m$$



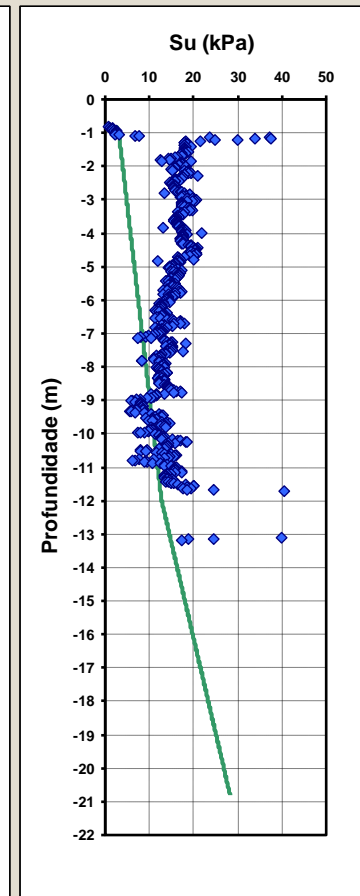
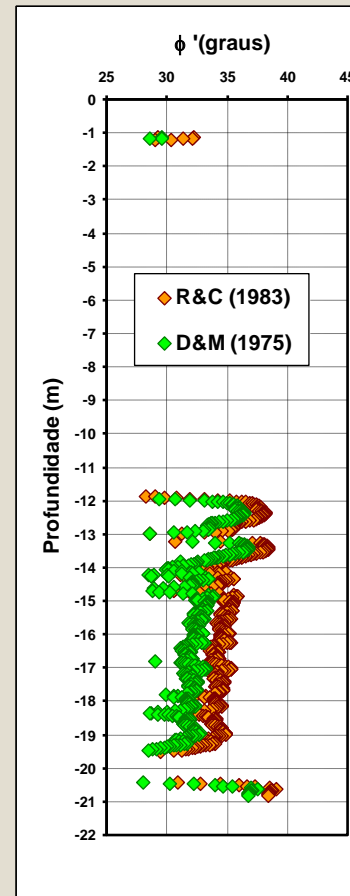
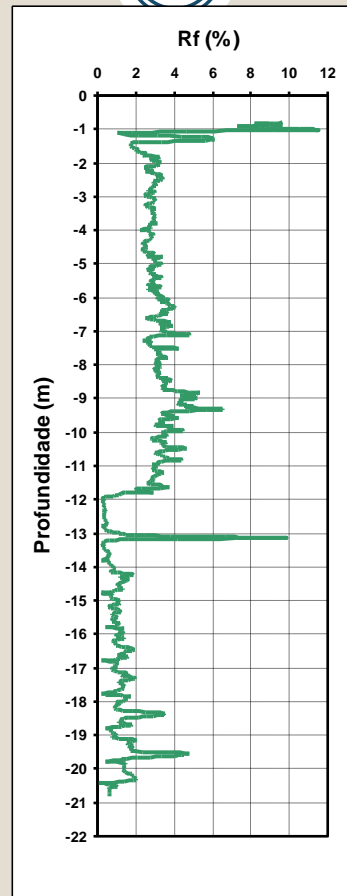
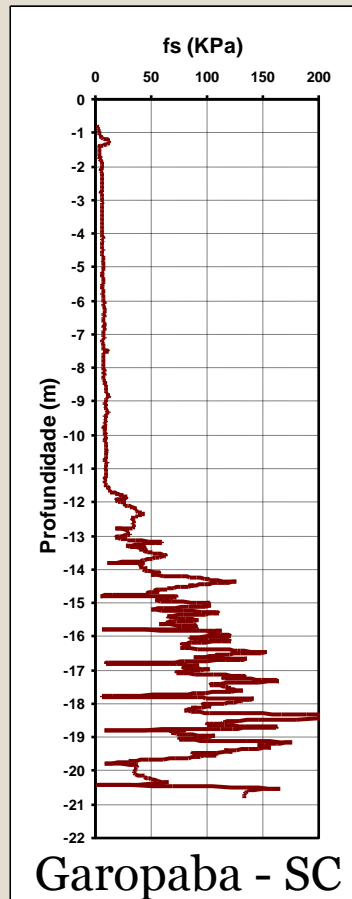
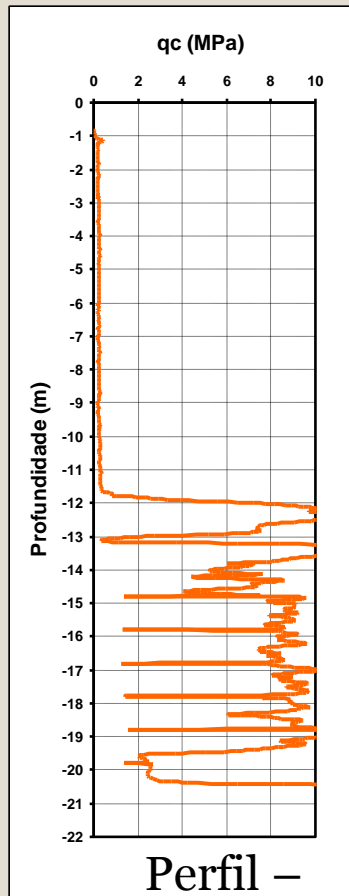
ENSAIOS DE CAMPO – Exemplo de aplicação



Perfil – Garopaba - SC



ENSAIOS DE CAMPO – Exemplo de aplicação



Fundação Profunda



- Métodos Indiretos

- Determinação de ϕ' ou s_u como apresentado;
- Cálculo com base na teoria da Mecânica dos Solos;

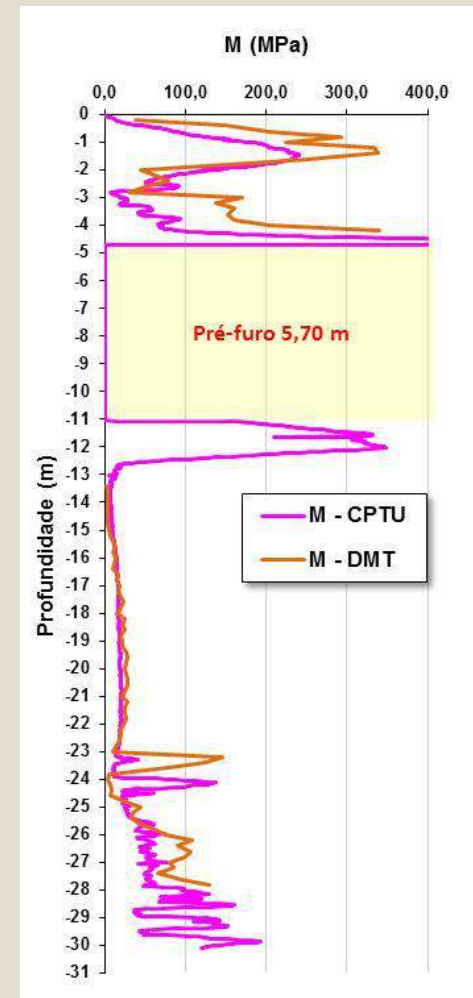
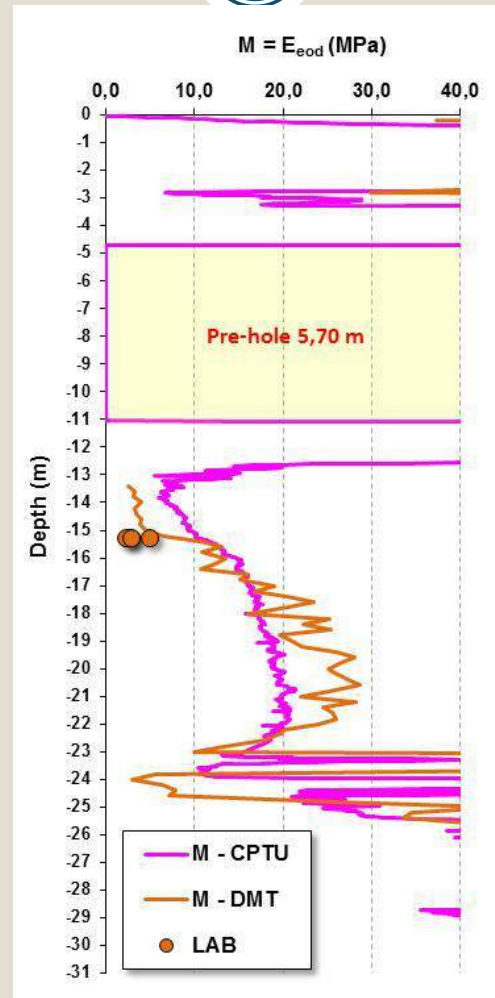
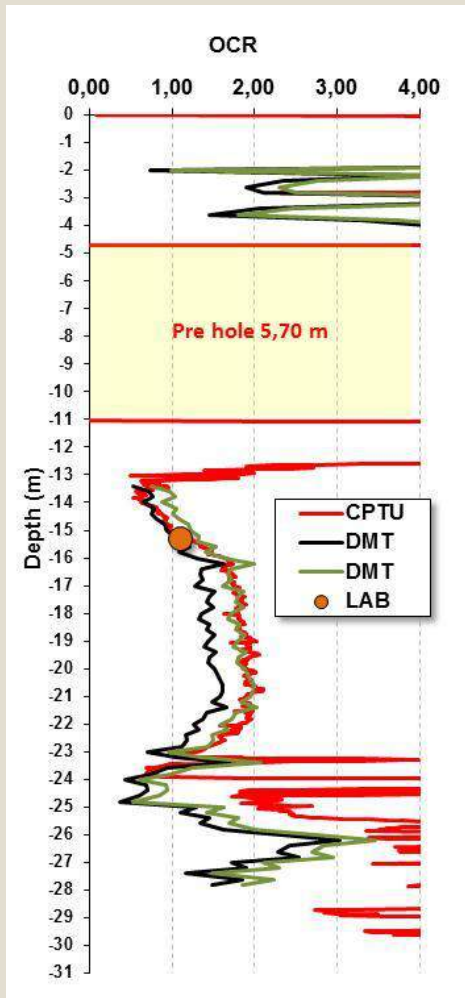


- Métodos Diretos

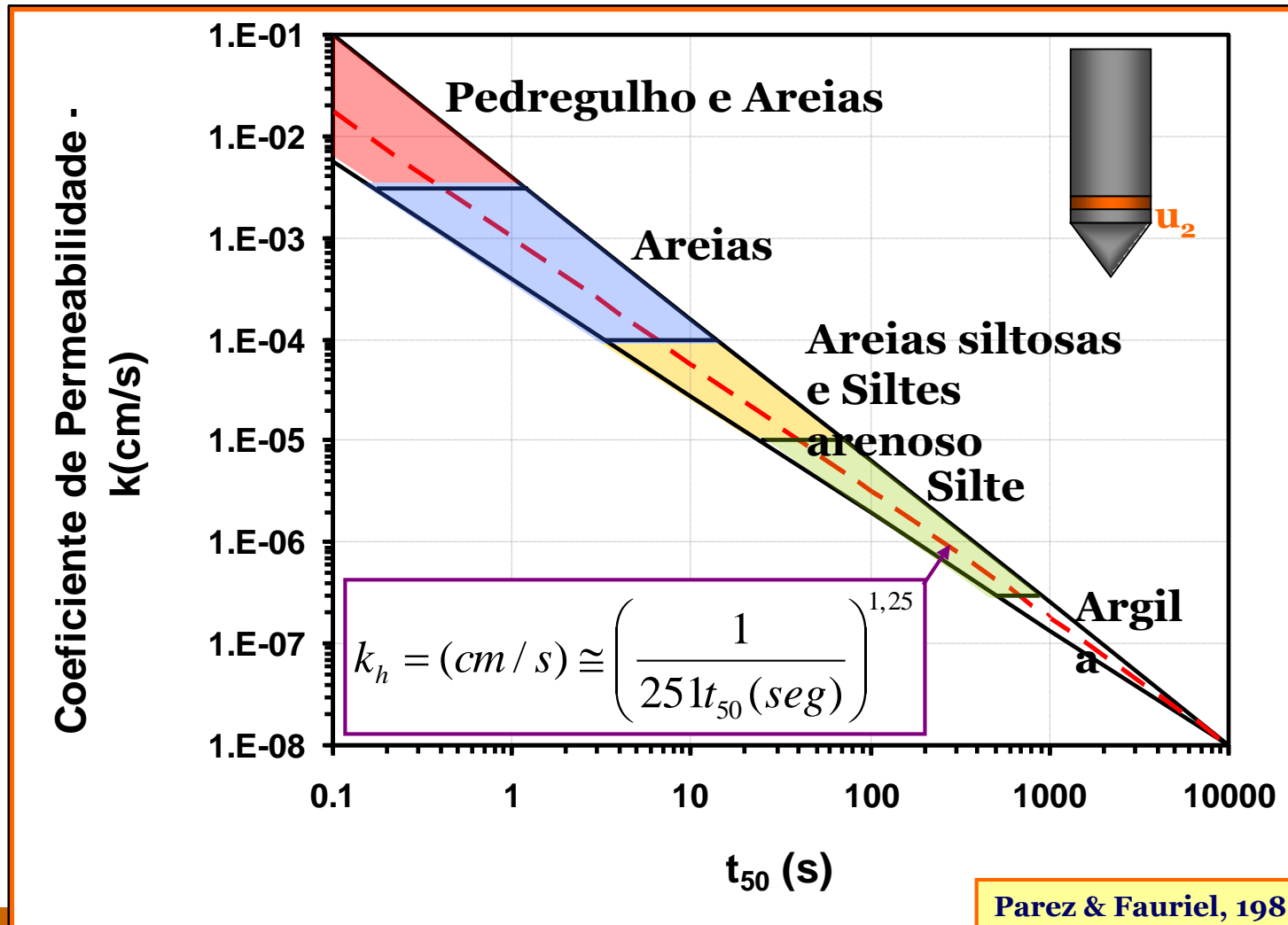
- Método de Decourt & Quaresma (1978)
- Método de Aoki & Veloso (1975)
- Método da UFRGS (Lobo et al., 2009)
 - ✦ Energia = Trabalho = $F \cdot d$
 - ✦ Força $\Rightarrow f(\text{capacidade de carga})$



ENSAIOS DE CAMPO

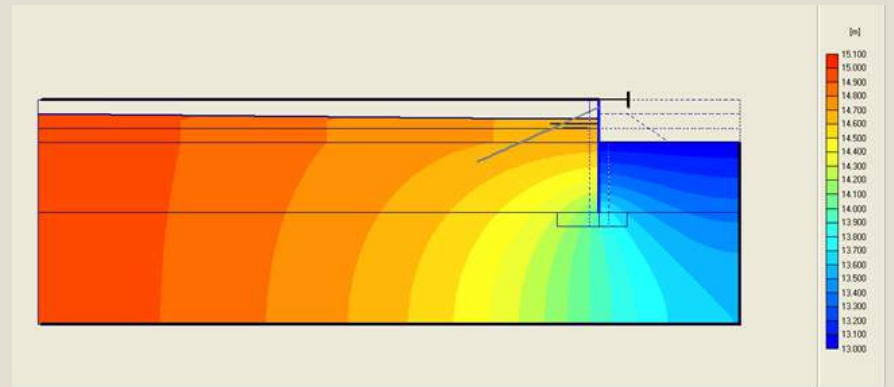
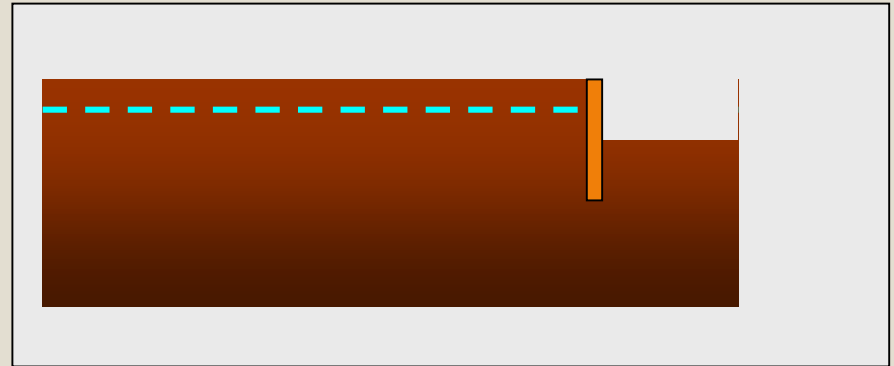
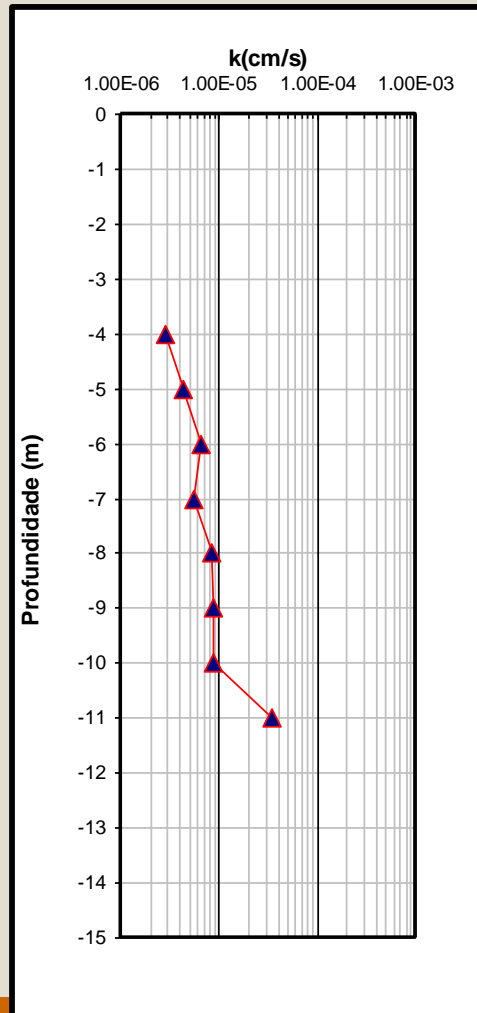
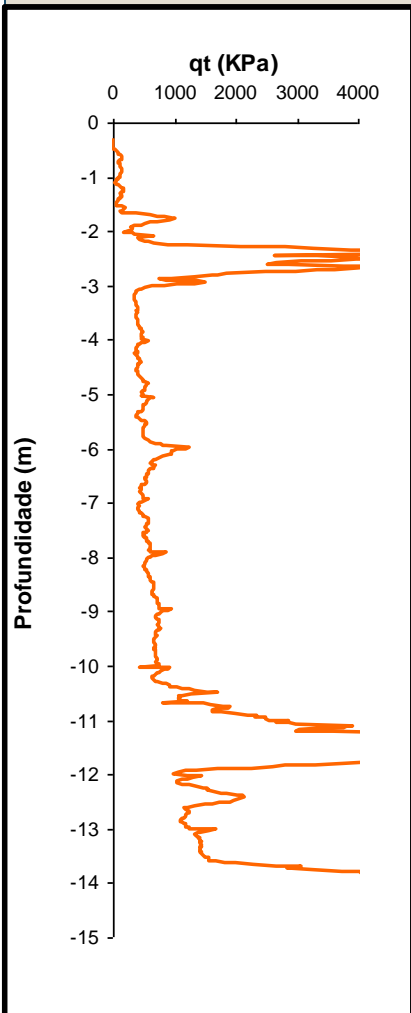


Permeabilidade



Parez & Fauriel, 1988;
Leroueil & Jamiolkowski,
1991

Exemplo de aplicação

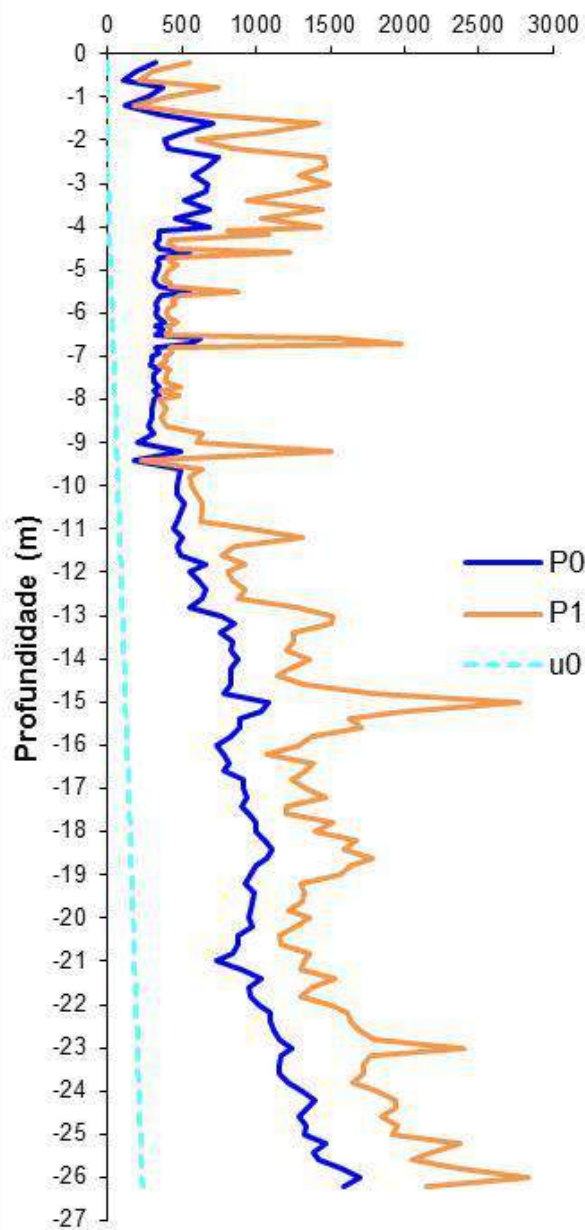


Estratigrafia

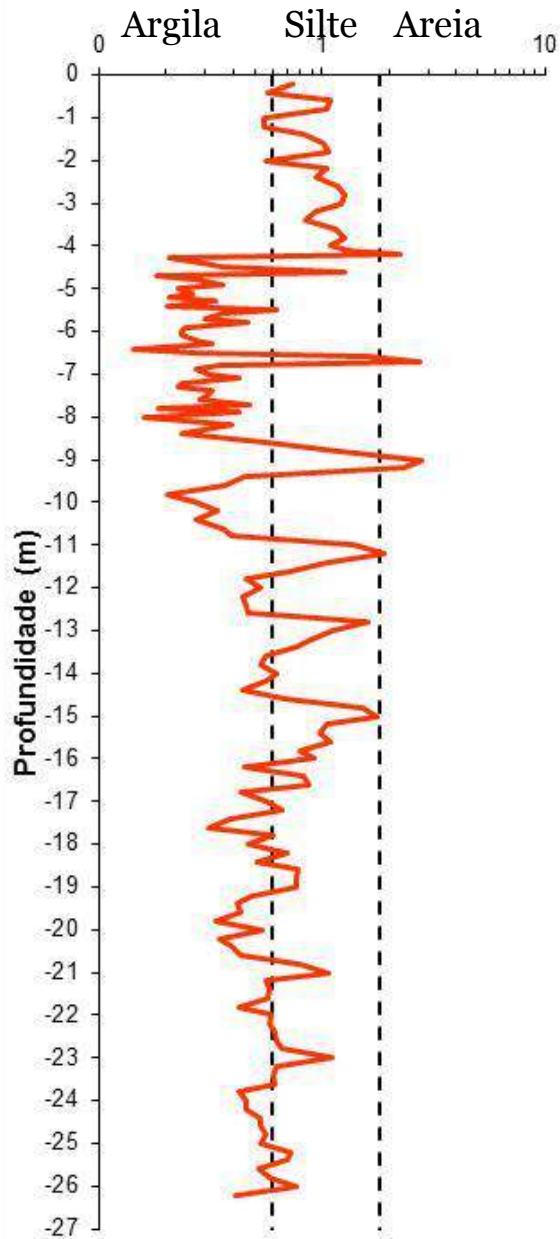


- A importância da **estratigrafia** na definição do perfil Geotécnico e avaliação dos Parâmetros e premissas de projetos.

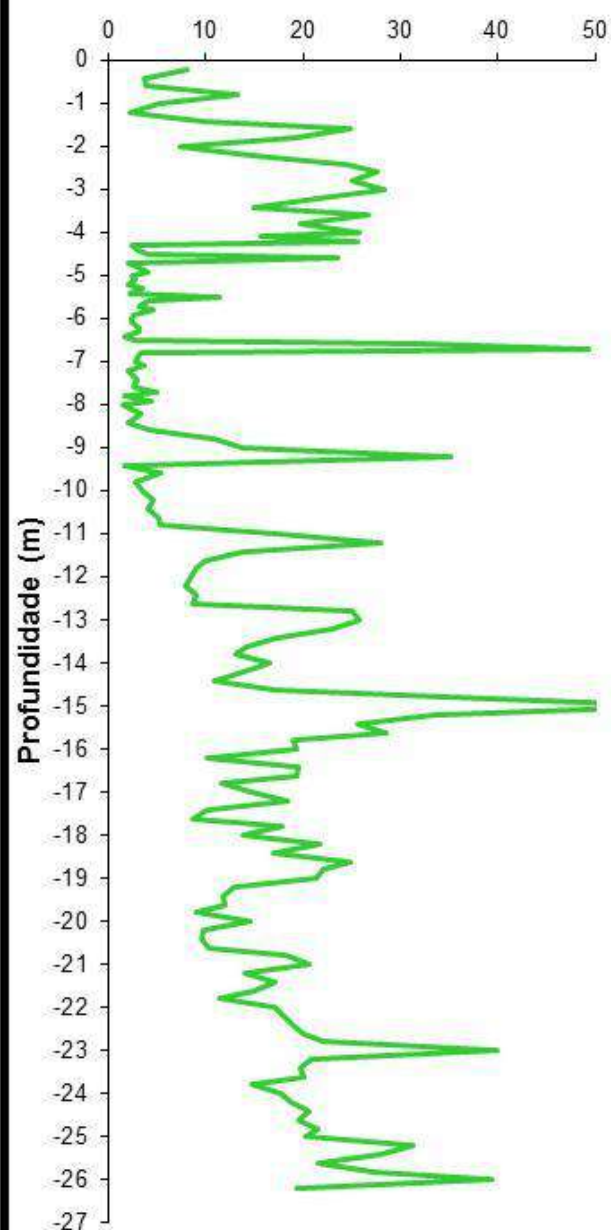
P_0, P_1, u_0 (kPa)

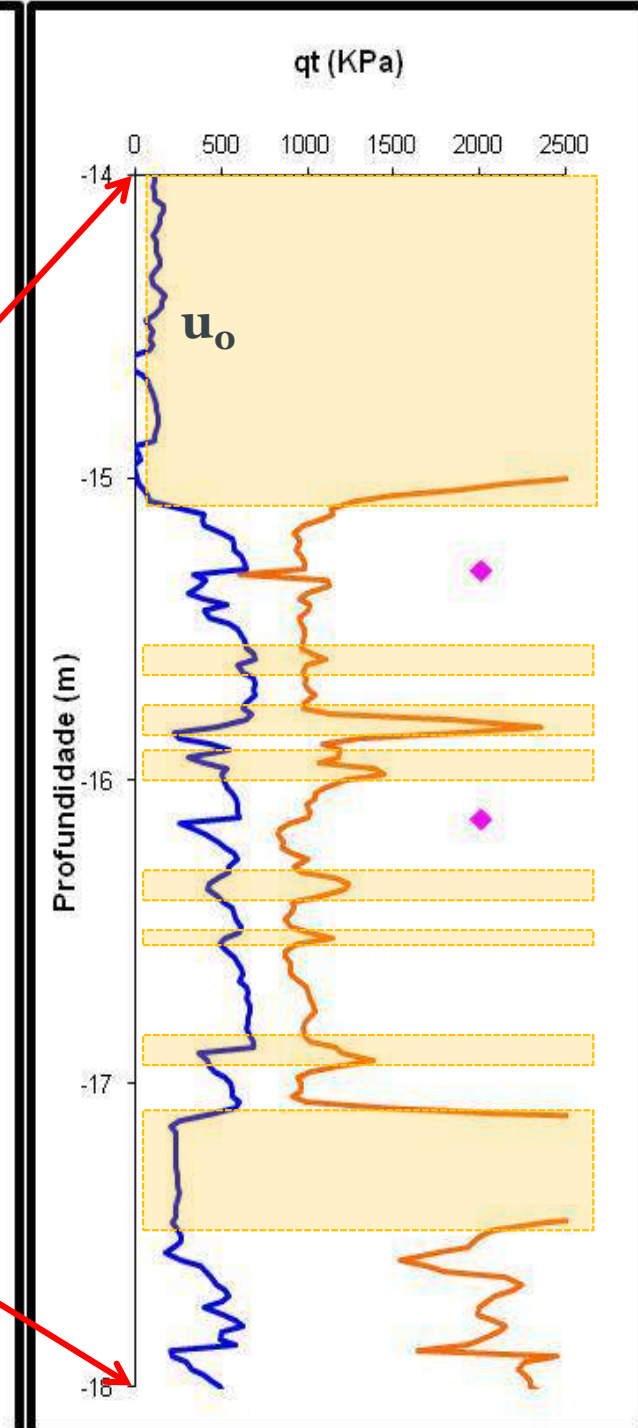
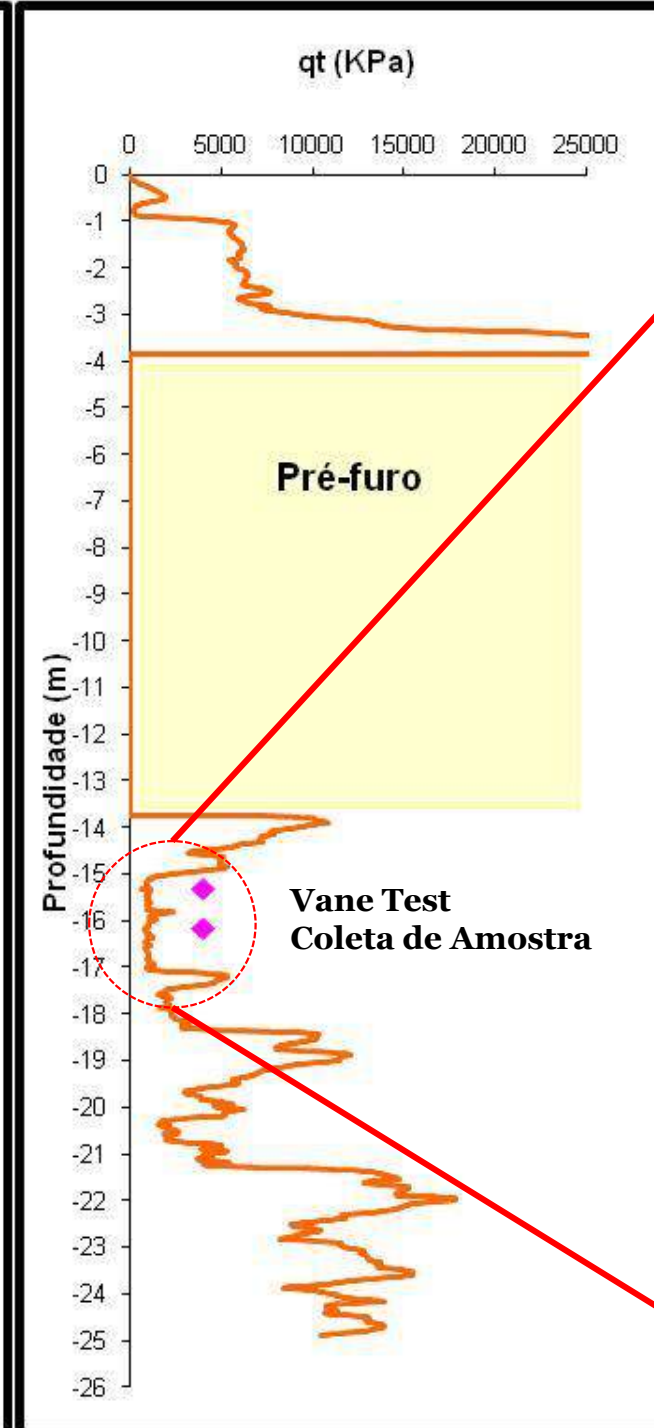
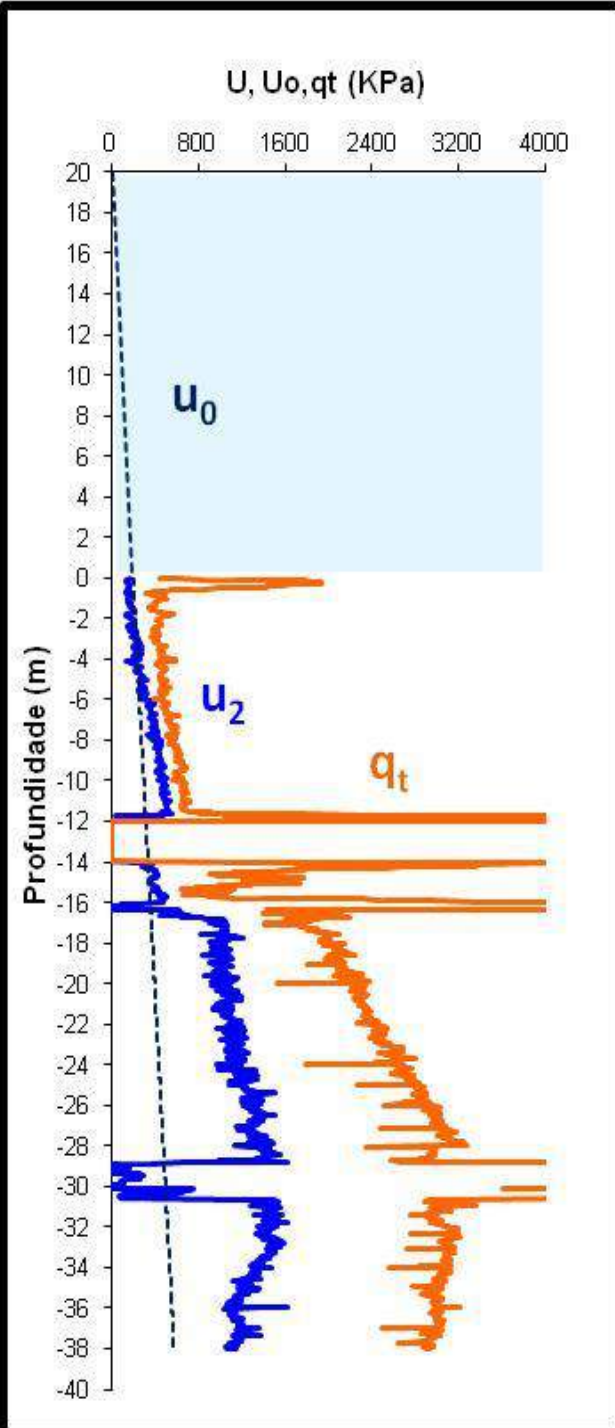


I_D

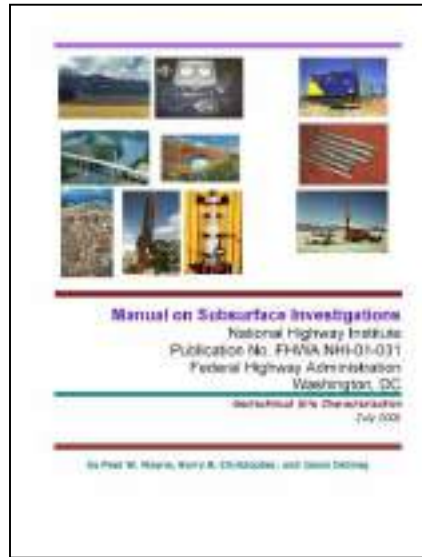
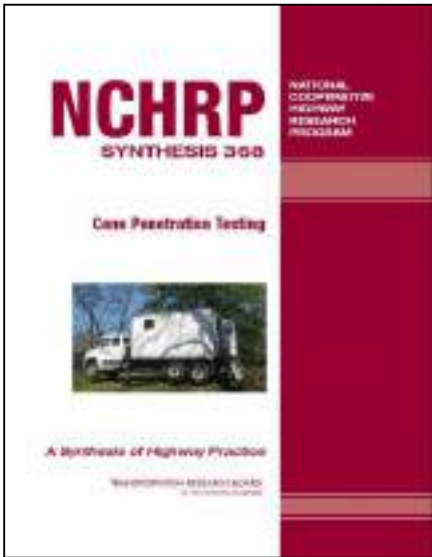


E_D (MPa)





Referências Bibliografias



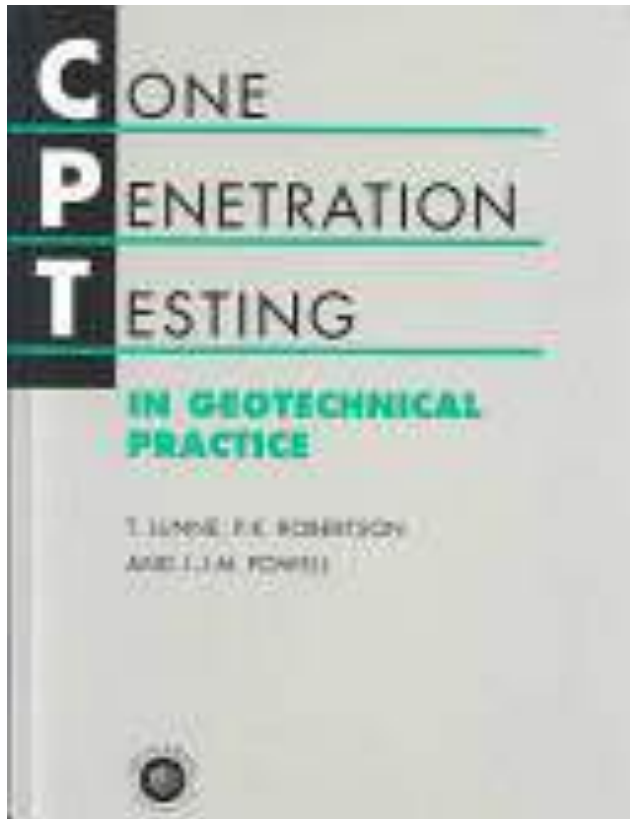
<http://groystems.ce.gatech.edu/faculty/mayne/>

<http://groystems.ce.gatech.edu/faculty/mayne/>

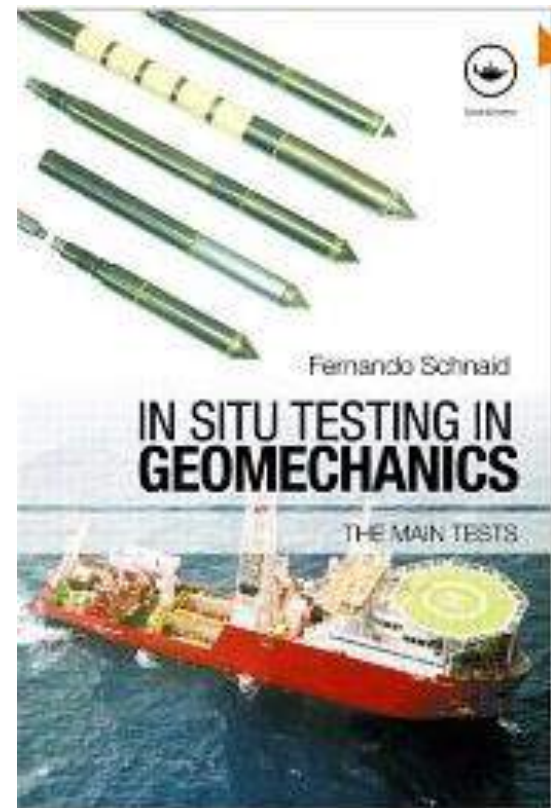
www.civil.ubc.ca/people/faculty/j.howie

www.Greggdrilling.com

Referências Bibliografias



Lunne, Robertson e Powell (1997)



Fernando Schnaid, 2008

Referências Bibliografias



**Muito
Obrigado**