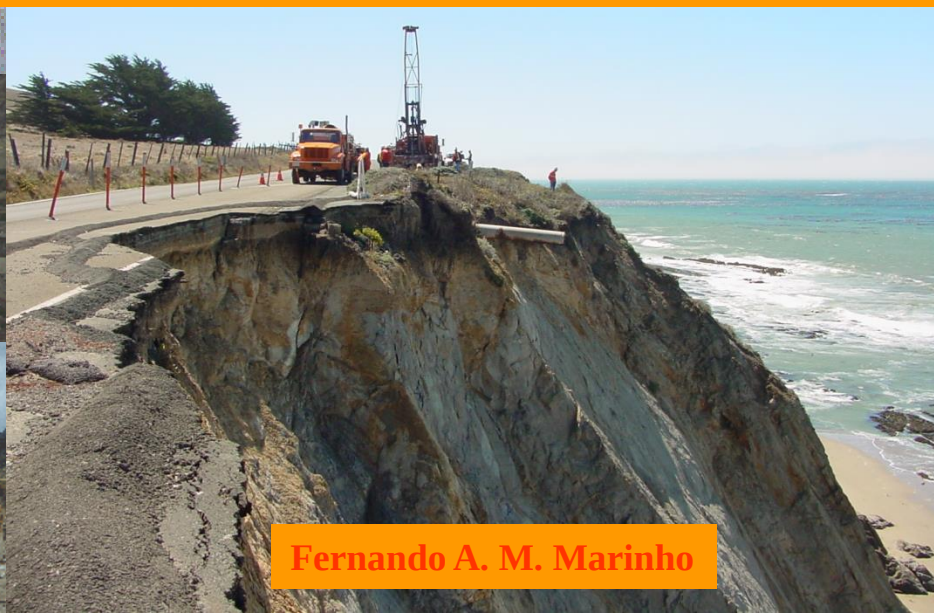




Prospecção do Subsolo



Fernando A. M. Marinho

O que vem antes da investigação?

Definição do problema

Envolve solo, rocha
Tipos de ruptura
Deformações
Água
Estabilidade
Erosão
Sucção
Etc....

Como analisar o problema ?

Métodos de cálculo

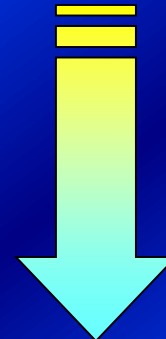
Quais os parâmetros necessários ?

Ensaio de campo
Ensaio de laboratório

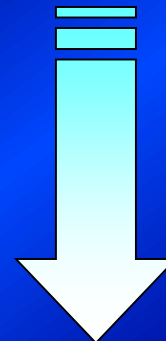


Correlações

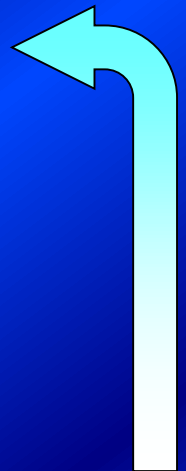
Problema



Solução



Investigação





Deus perguntou a Adão:

“comeste tu da árvore de que te ordenei que não comesses”

Adão respondeu:

“A mulher que me deste por companheira, ela me deu da árvore e comi.”

- Deus não pediu uma explicação
- Adão que sentiu a necessidade de explicar
- Assim, a explicação causal foi inventada pelo Homem.
- A explicação (em geral) é usada exclusivamente para passar a responsabilidade.
- Explicações (em geral) não têm outra função que não seja passar a responsabilidade.
- Naquele momento apenas Deus, pessoas e animais poderiam ser causas das coisas. Objetos, eventos e processos físicos não tinham este “poder”.

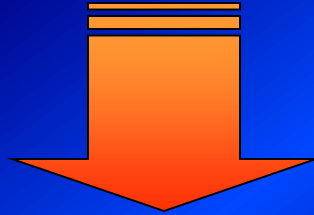


- Os eventos naturais entraram como explicações de causa muito tempo depois.
- Tempestades, terremotos, rupturas de taludes eram controlados por deuses enraivecidos.
- Assim estes eventos não podiam assumir responsabilidade causal pelas consequências.

Porque devemos investigar?

- Entendermos a formação e desenvolvimento dos perfis de solo para as diversas aplicações
- Para projetar com segurança e economia.
- Para quantificar a influência dos trabalhos de engenharia e outras ações em obras existentes ou a serem projetados.
- Possibilitar o desenvolvimento de projetos.
- Facilitar a solução de problemas em obras já executadas.
- Planejar as medidas de prevenção e remediação.
- Para analisar e definir as causas dos eventuais problemas
- Para poder estabelecer os riscos associados com os fatores externos.

Investigação



- Geomorfologia
- Estratigrafia
- Nível de água e sua variação sazonal
- Teor de umidade e peso específico
- Perfil de sucção e sua variação sazonal
- Caracterização geotécnica dos materiais
 - Resistência ao cisalhamento dos materiais envolvidos (SAT e ÑSAT)
 - Parâmetros hidráulicos dos materiais envolvidos (SAT e ÑSAT)
- Intensidade e probabilidade da ocorrência dos fatores de acionamento de problemas

Você já pensou sobre o subsolo sobre o qual você vive

- Ele possui mais de 4.600 milhões de anos



- Ele esteve submetido a inúmeros diastrofismo
- O subsolo foi intemperizado, erodido, transportado e sedimentado
-esta cadeia de ações se repetiram inúmeras vezes

Após ter sido submetido a ação das forças da natureza temos como resultado o subsolo de hoje.

Conhecendo o subsolo de forma adequada teremos condições de tomar medidas seguras antes de construirmos qualquer obra nele.

Ensaaios de Laboratório

Vantagens

- Condições de contorno bem definidas
- Condições de drenagem totalmente controladas
- Trajetórias de tensão bem definidas, impostas ou observadas (limitado)
- Deformação e velocidade de drenagem controlados.
- O solo e as características físicas identificadas.

Desvantagens

- Em solos argilosos existe perturbação da amostra.
- Em solos granulares geralmente não é possível uma amostragem não deformada.
- O volume ensaiado é geralmente pequeno em relação as características da obra .

Ensaaios de Campo

Vantagens

- Podem ser executados em muitos solos que não podem ser amostrados.
- Ensaio é realizado no ambiente natural.
- Um volume maior de solo é ensaiado em comparação com o laboratório
- Em alguns ensaios uma monitoração contínua do solo é possível.

Desvantagens

- Condições de contorno geralmente mal definidas.
- Condições de drenagem geralmente mal definidas. Medições de poro-pressões ajudam.
- Não uniformidade de tensões e deformações.
- Velocidades de deformação geralmente são maiores do que no laboratório e no campo.
- As características do solo ensaiado com frequência não são identificadas.
- Os modos de deformação e ruptura são geralmente diferentes daqueles das estruturas de engenharia.
- Grau de perturbação geralmente desconhecido

Em qualquer tipo de investigação de campo o engenheiro geotécnico não deve perder a oportunidade de:

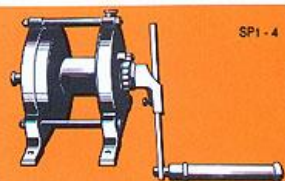
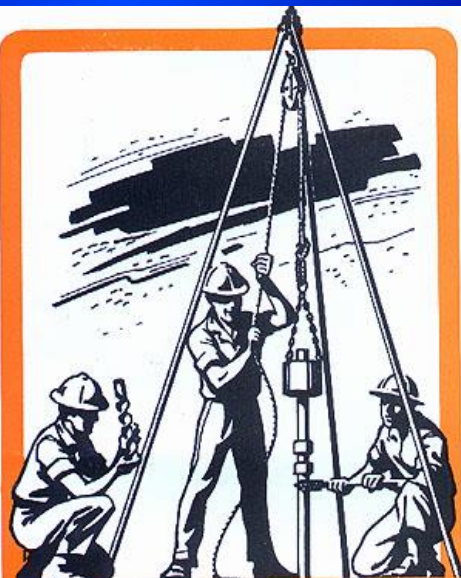
- Identificar tátil visualmente o solo obtido nos furos realizados
- Recolher amostras para determinação do teor de umidade
- Registrar as mudanças observadas no perfil de solo
- Registrar o nível de água local

Outros aspectos importantes são:

- Obtenção de amostras indeformadas para eventuais ensaios de laboratório
- Obtenção de amostras para identificação de eventual contaminação do solo.

Sondagem Prospectiva

Sondagem a Percussão

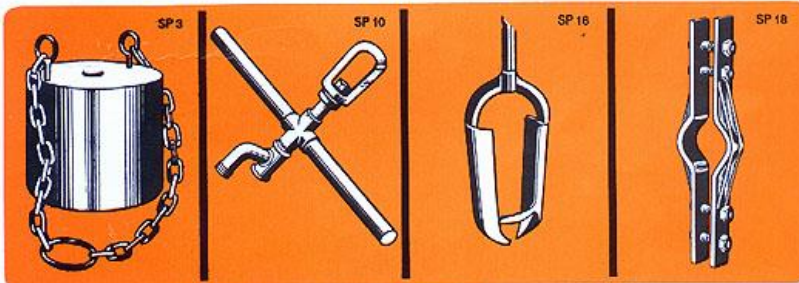


SP1-4



SP8

EQUIPAMENTO P/ SONDAGEM DE PERCUSSÃO

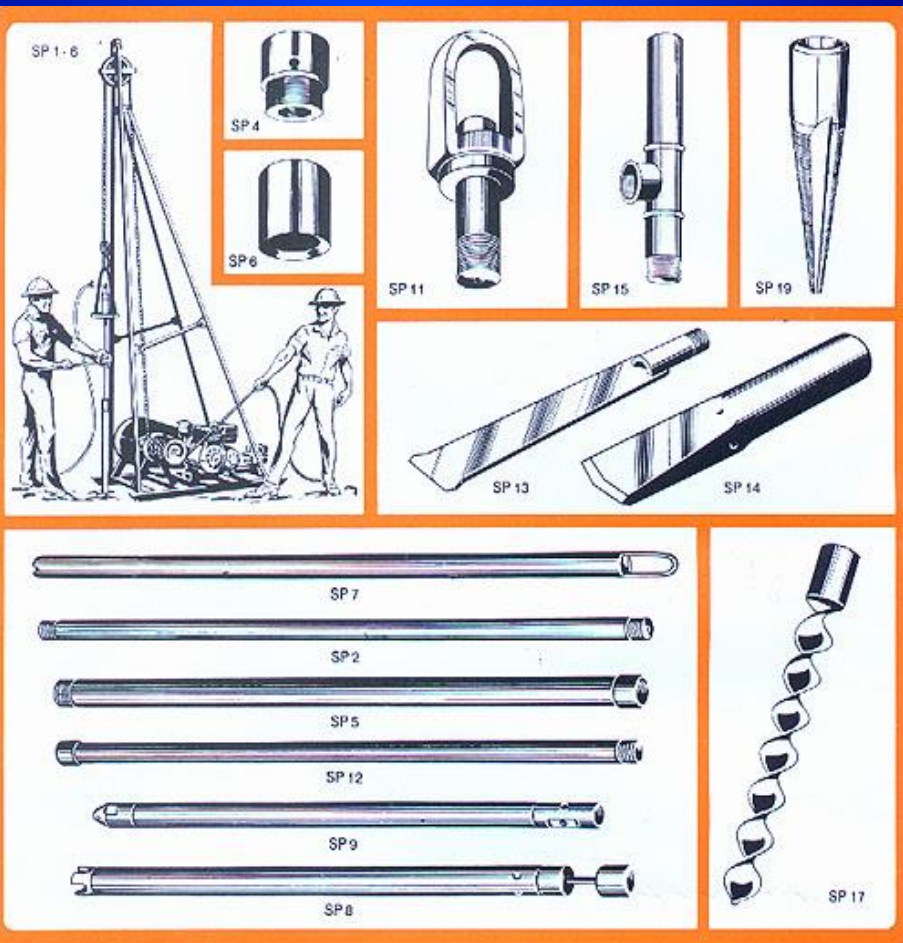


SP3

SP10

SP16

SP18



SP1-6

SP4

SP6

SP11

SP15

SP19

SP13

SP14

SP7

SP2

SP5

SP12

SP9

SP8

SP17

EQUIPAMENTO DA SONDA PERCUSSÃO

SP1	Tripé	SP6	Sapata Cortante	SP14	Lâmina de percussão
SP1-6	Torre motorizada	SP7	Balde interno	SP15	Tô de lavagem
SP1-4	Sarilho	SP8	Bomba de areia	SP16	Trado Concha
SP8	Bomba	SP9	Amostrador	SP17	Trado helicoidal
SP2	Haste Guia	SP10	Cruzeta de lavagem	SP18	Braçadeira
SP3	Peso batente	SP11	Girador	SP19	Macho Pescador
SP4	Cabeça batente	SP12	Haste		
SP5	Revestimento	SP13	Lâmina de lavagem		

SPT na Sondagem de simples reconhecimento



Amostrador padrão:

- massa padronizada de 65 kg
- solto em “queda livre” de uma altura de 75 cm
- golpes para cravar o amostrador em três trechos consecutivos de 15 cm
- a resistência à penetração (N-SPT) é o número de golpes aplicados na cravação dos 30 cm finais.
- Após a realização de cada ensaio, o amostrador é retirado e a amostra coletada, para classificação Tátil-visual.

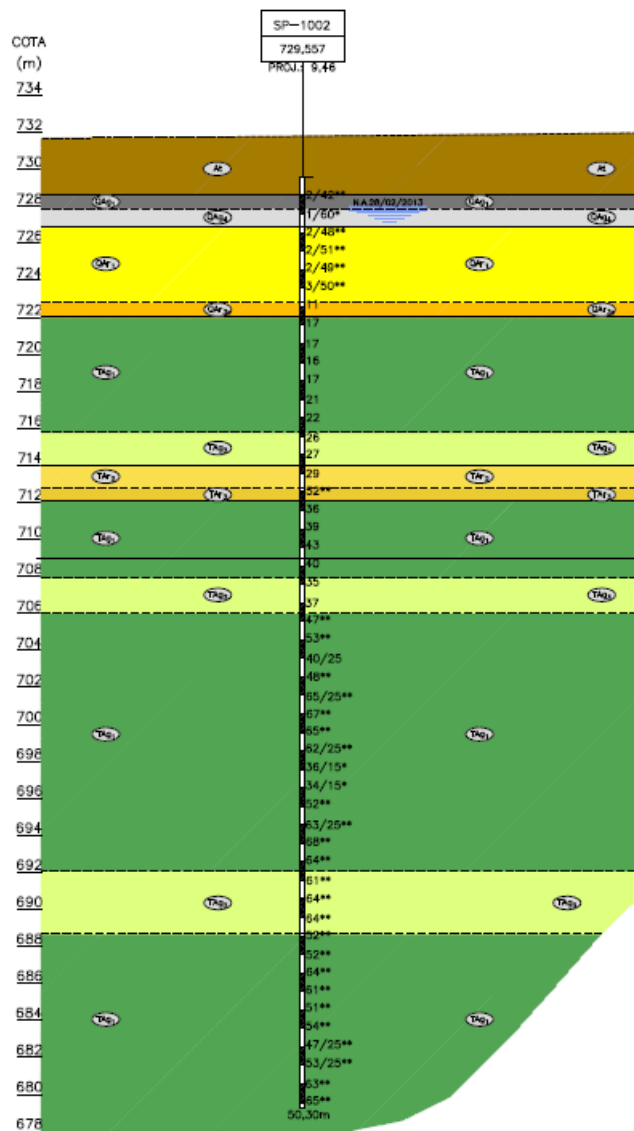


Trado Manual

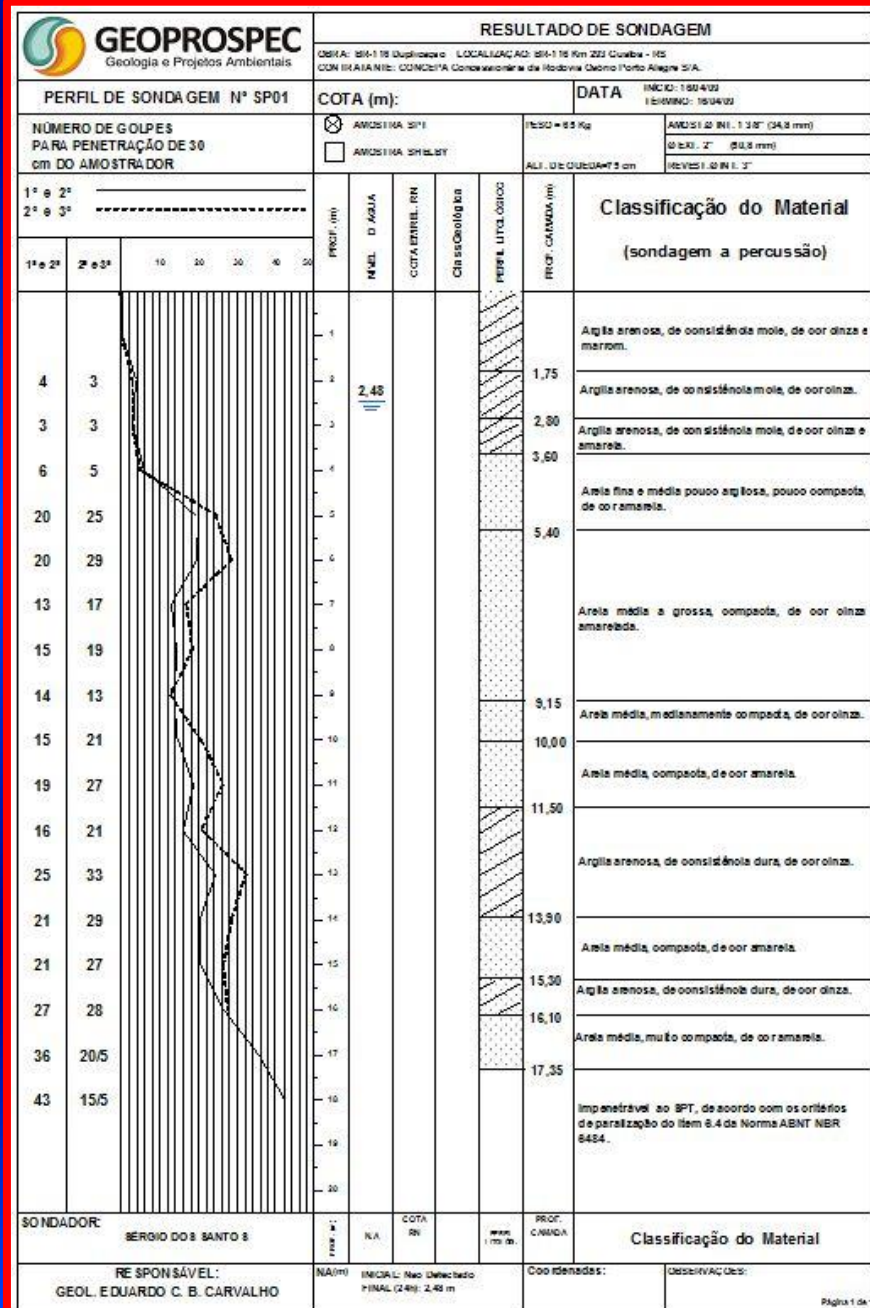


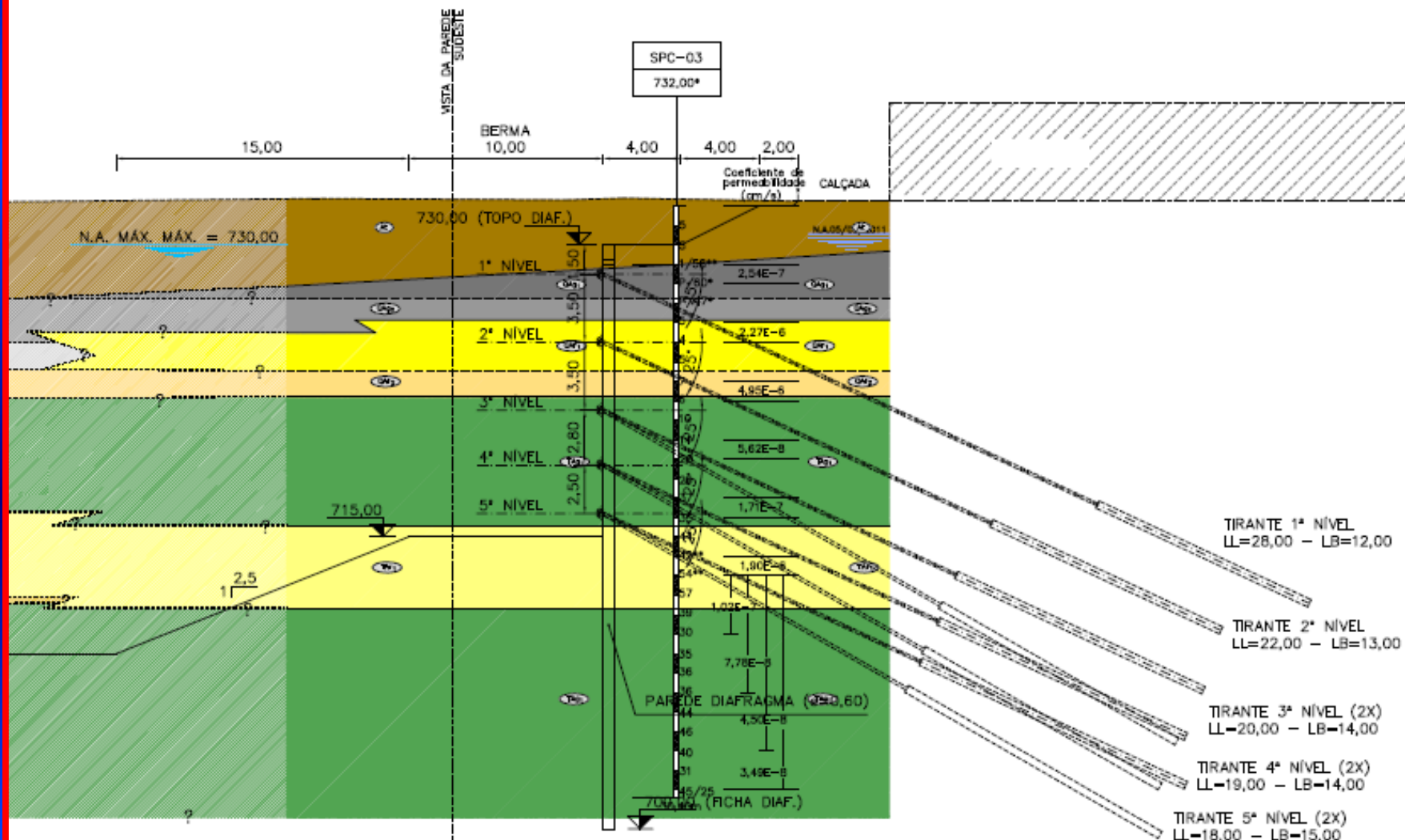
Abertura de Poços





CORTE
ESC. 1:250





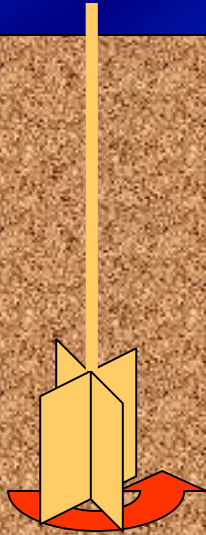
Tipos de Ensaios “in Situ” a Serem Abordados em Aula

Deslocamento



Cone

Cisalhamento



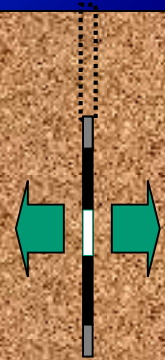
Vane Test / Palheta

Expansão de Cavidade



Pressiômetro

Área circular carregada



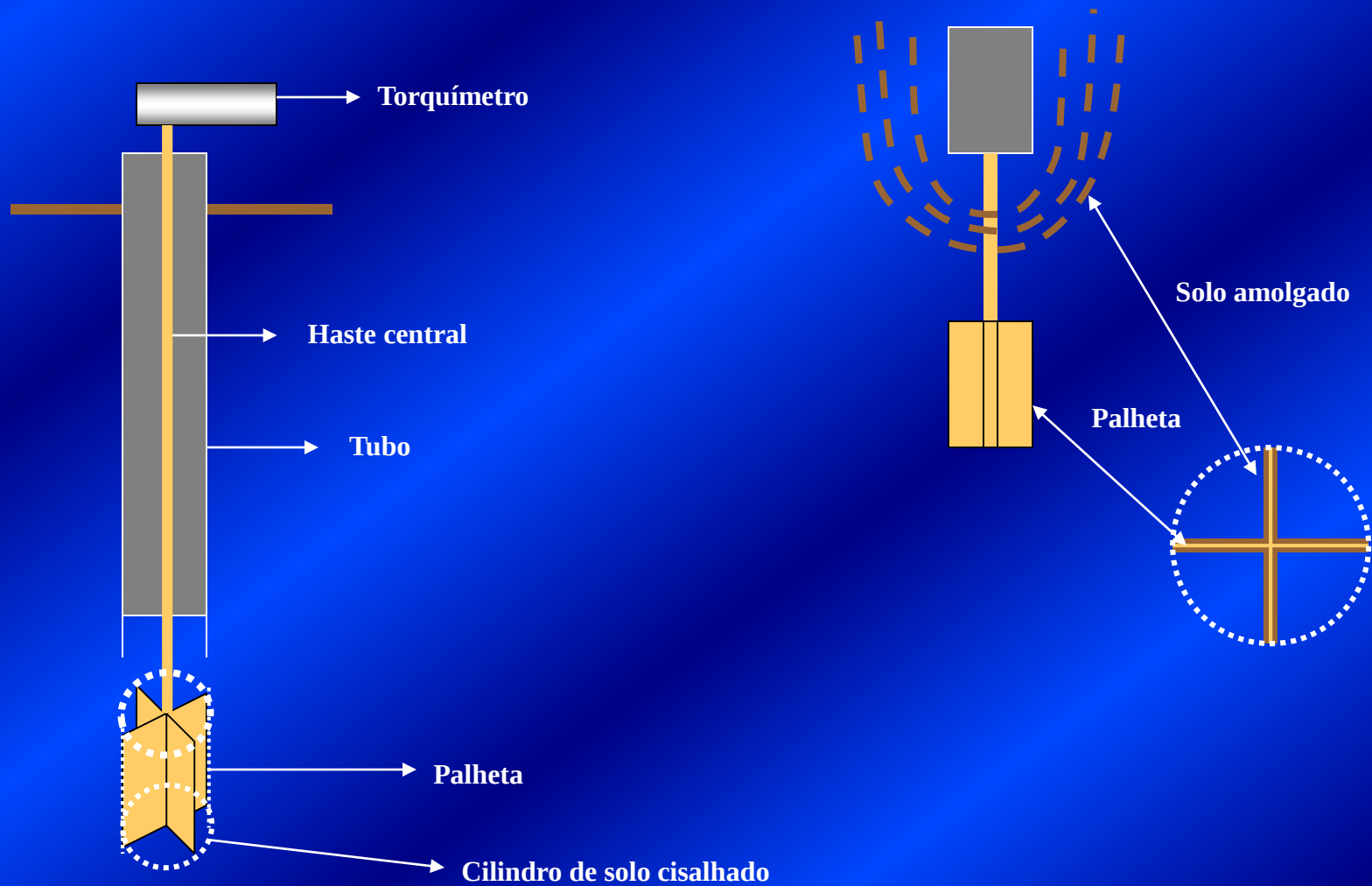
Dilatômetro

Ensaio de Palheta ou “Vane Test”

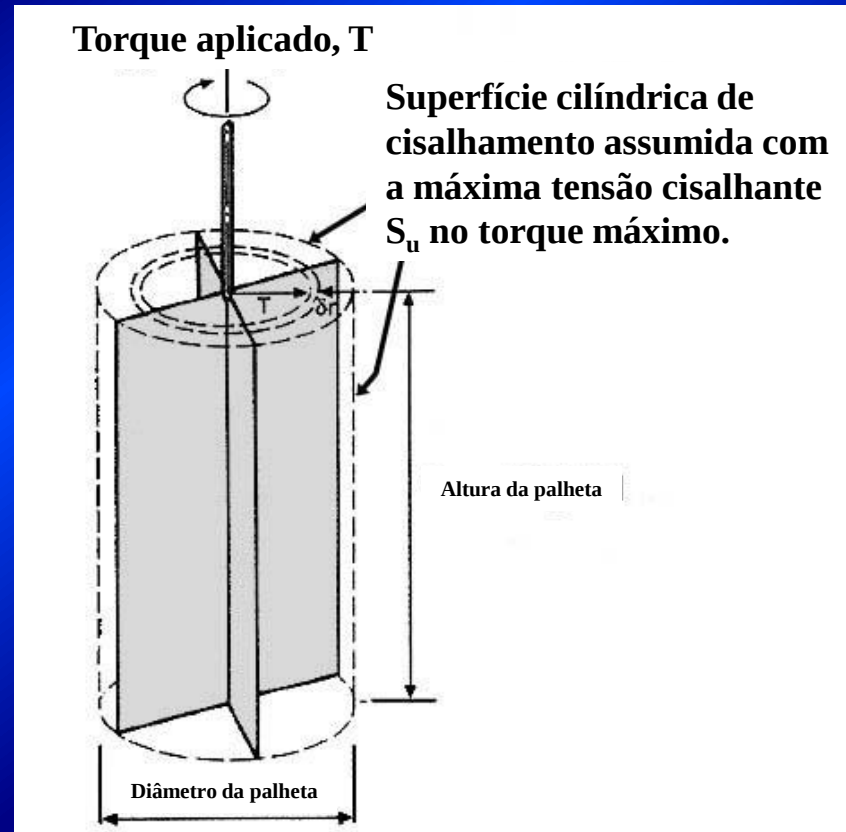
- Envolve a medição “in situ” da força torcional requerida para causar a ruptura por cisalhamento de uma superfície cilíndrica por meio de uma palheta em forma de hélice.
- A informação obtida pode ser utilizada para se obter a resistência não drenada do solo (S_u).
- Utilizado em solos moles.
- O método consiste em se introduzir em solo argiloso uma hélice com quatro lâminas rotacionando-se a mesma e registrando-se o torque e a rotação induzida.



Ensaio de Palheta ou “Vane Test”

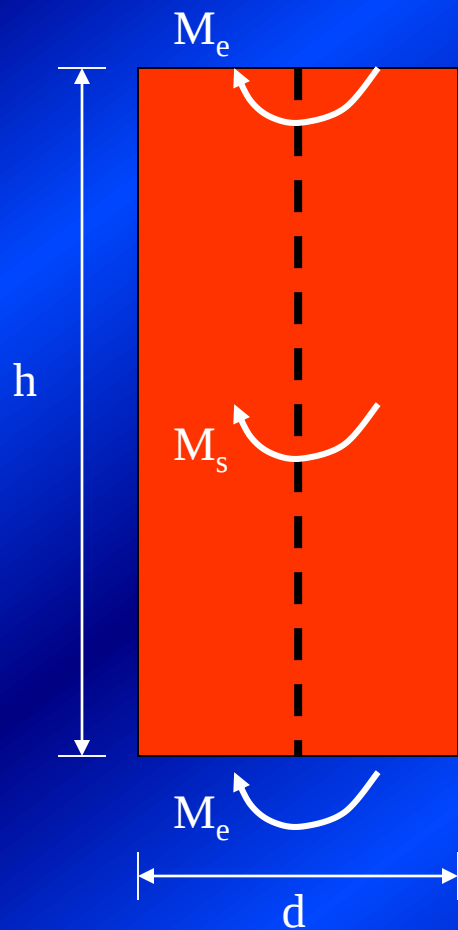


Ensaio de Palheta ou “Vane Test”



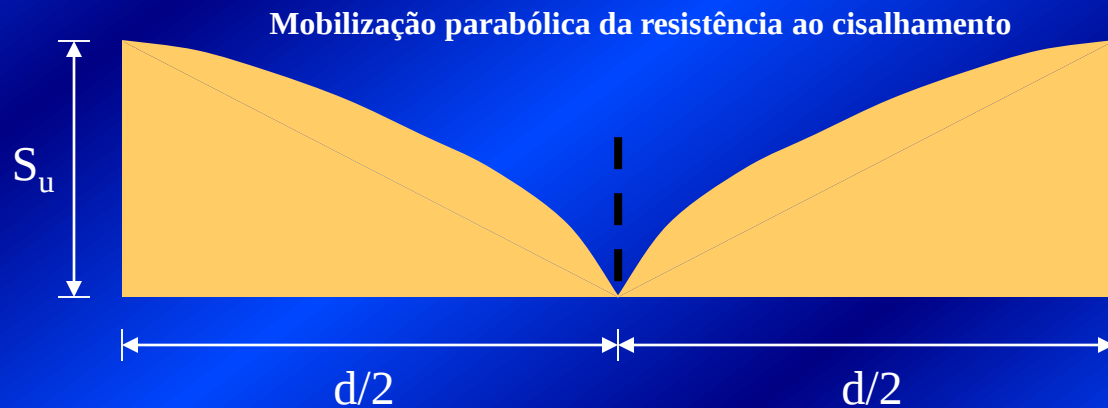
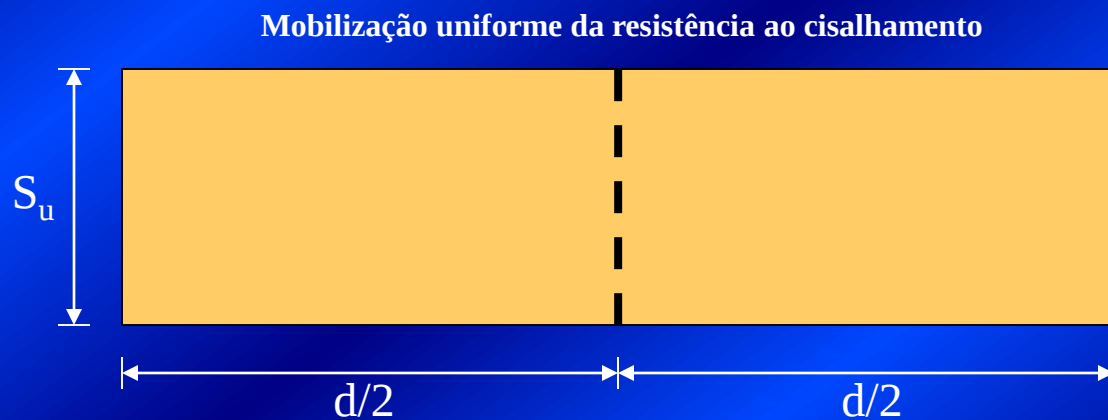
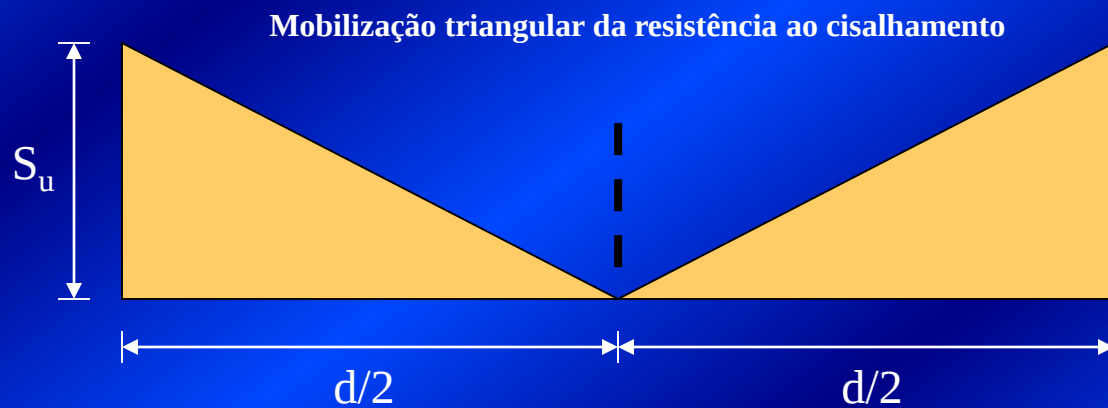
Ensaio de Palheta ou “Vane Test”





$$T = M_s + M_e + M_e$$

$$M_s = (\pi d h) S_u \left(\frac{d}{2} \right)$$



“VANE TEST”

A resistência não drenada é obtida pela expressão:

$$S_u = \frac{T}{\pi \left[\frac{d^2 h}{2} + \beta \frac{d^3}{4} \right]}$$

$$\beta = \frac{1}{2} \text{ para distribuição triangular}$$

$$\beta = \frac{2}{3} \text{ para distribuição uniforme}$$

$$\beta = \frac{3}{5} \text{ para distribuição parabólica}$$

“VANE TEST”

Problemas na execução e interpretação:

- Amolgamento do solo
- Ruptura progressiva
- Anisotropia

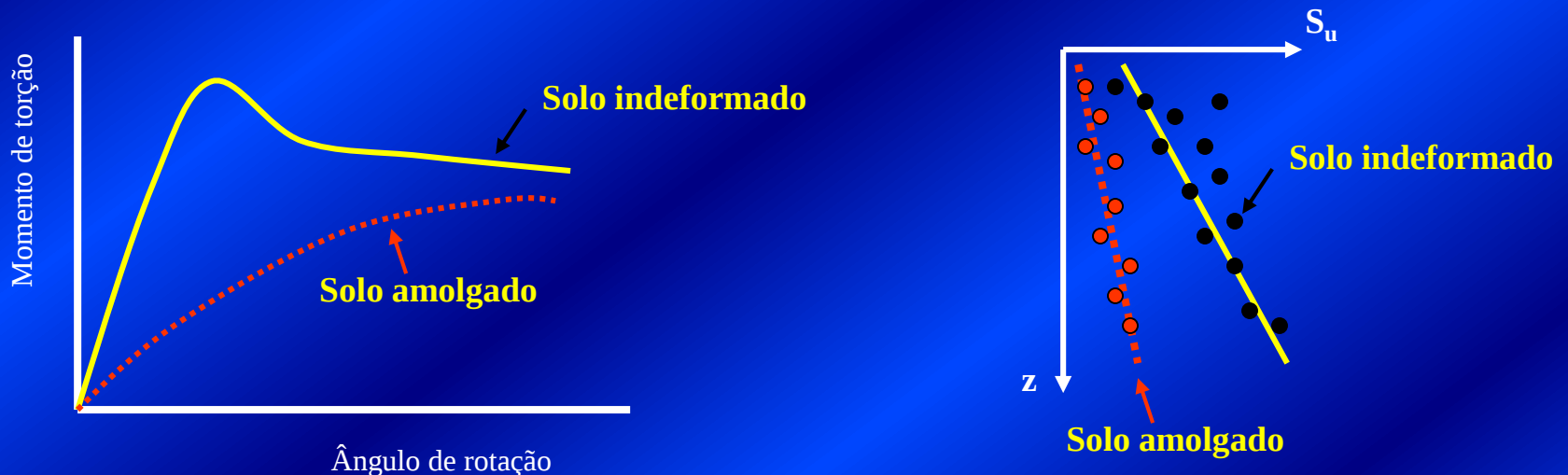
“VANE TEST”

Velocidade de ensaio

Uma maior velocidade de rotação implica em um maior valor de torque, e em consequência uma maior resistência não drenada (S_u).

Resistência residual

Para se obter a resistência não drenada residual gira-se a palheta um certo número de vezes (aprox. 25).



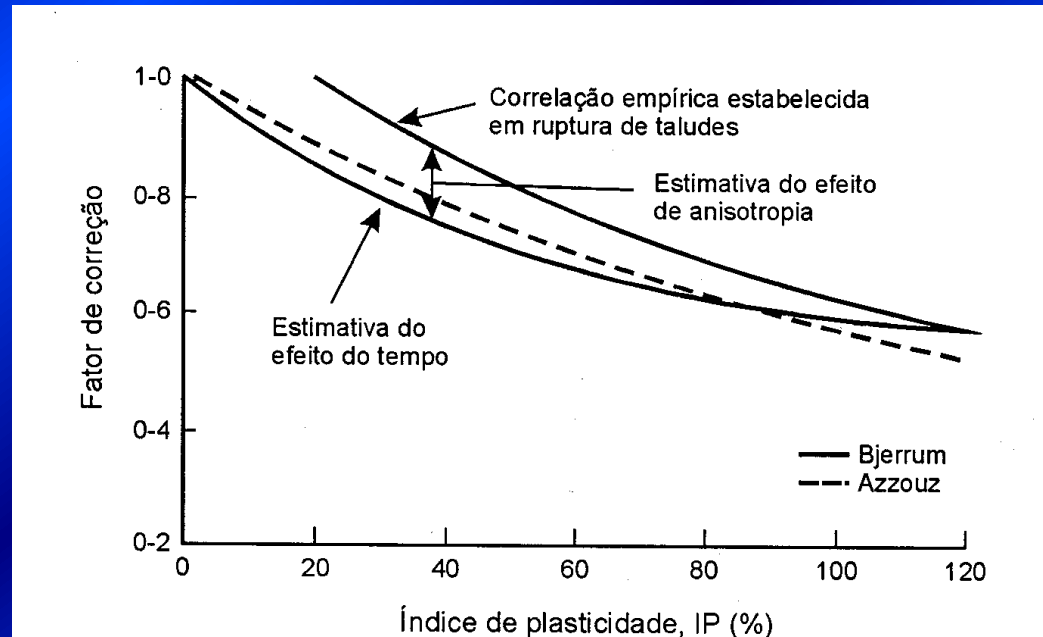
“VANE TEST”

Fator de correção

A combinação de fatores que influenciam os resultados sugerem a necessidade de correção da resistência medida.

Para cálculo de estabilidade de taludes Bjerrum (1973) sugeriu a expressão:

$$S_u(\text{corrigido}) = \mu S_u(\text{palheta})$$



Fator de correção empírico da relação entre a resistência de ruptura retroanalísada e do ensaio de palheta (Torstensson, 1977).

Torvane (Campo)



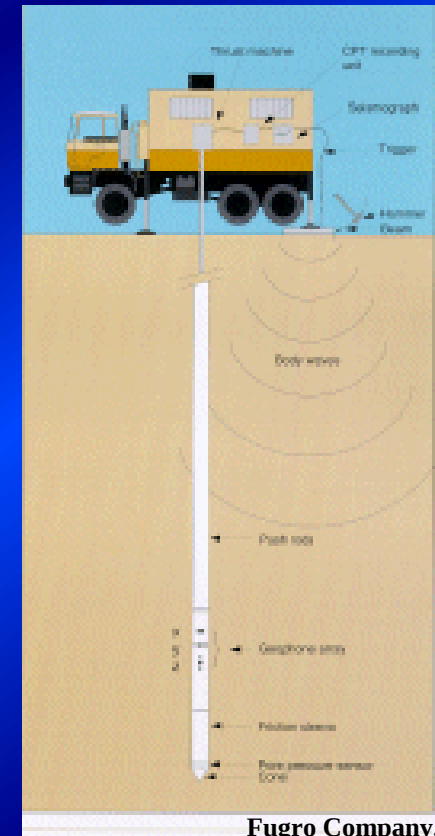
Mini Vane (Laboratório)



Ensaio de Cone

Dentre os equipamentos de ensaios “in situ” o ensaio penetrométrico (CPT) e o piezocone (CPTU) são os mais versáteis. Existe ainda o Cone Sísmico (SCPT) que permite a determinação do módulo cisalhante e do coeficiente de Poisson.

No ensaio um cone é cravado no terreno a uma velocidade constante e medições contínuas de resistência de ponta, atrito lateral são feitas. Se o CPTU for utilizado a pressão neutra também é medida.



Ensaio de Cone

CPTU



Ensaio de Cone

Aspectos importantes

- Relações entre atrito lateral(f_s), pressão neutra (u) e resistência de ponta (q_c) contribuem para a identificação do solo.
- Uma das importantes e amplamente utilizadas aplicações do cone é a definição da estratigrafia do perfil de solo.
- A penetração contínua associada a alta resolução permite que camadas finas sejam identificadas.
- Recomendada-se o seu uso em depósitos de solos compressíveis e de baixa resistência.
- O acompanhamento da dissipação da pressão neutra permite a estimativa do coeficiente de adensamento (C_v).

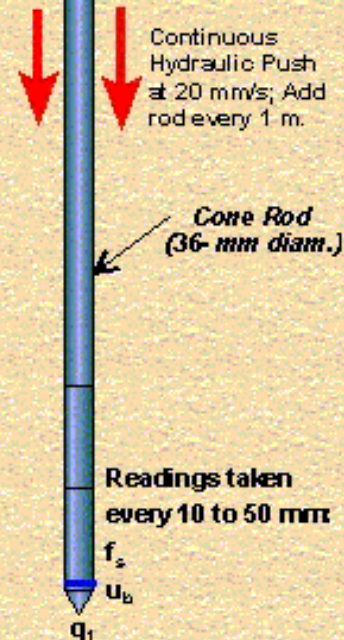
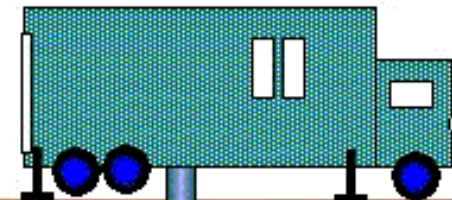
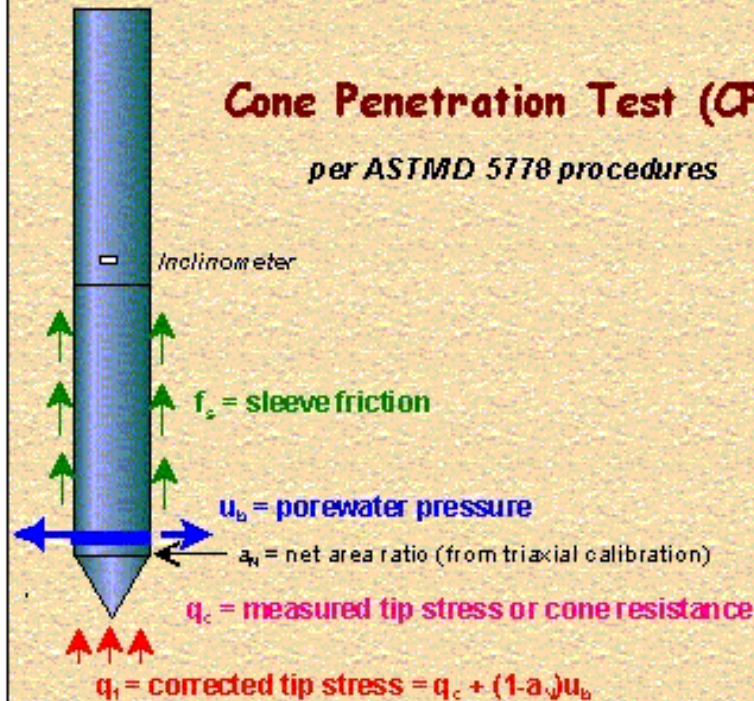


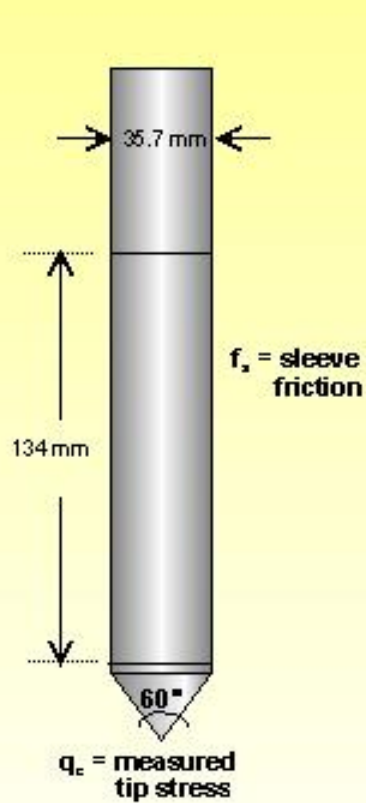
Electric Cone Penetrometer with 60° Apex:
 $d = 36 \text{ mm}$ (10 cm^2)
 or
 $d = 44 \text{ mm}$ (15 cm^2)

1. Saturation of Cone Tip Cavities and Placement of Pre-Saturated Porous Filter Element.
2. Obtain Baseline Readings for Tip, Sleeve, Porewater Transducer, & Inclinometer Channels

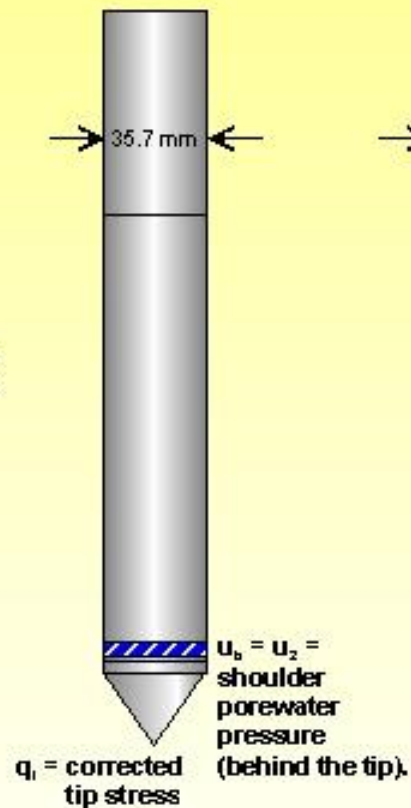
Cone Penetration Test (CPT)

per ASTM D 5778 procedures

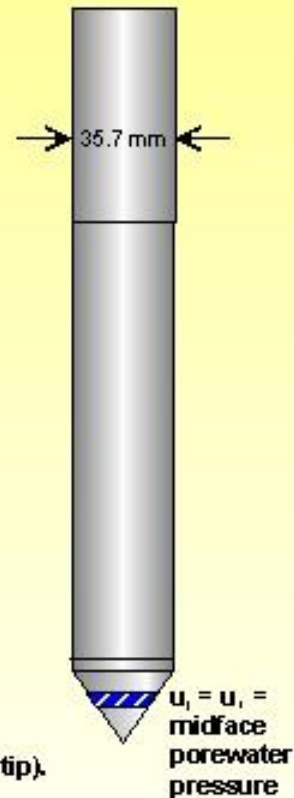




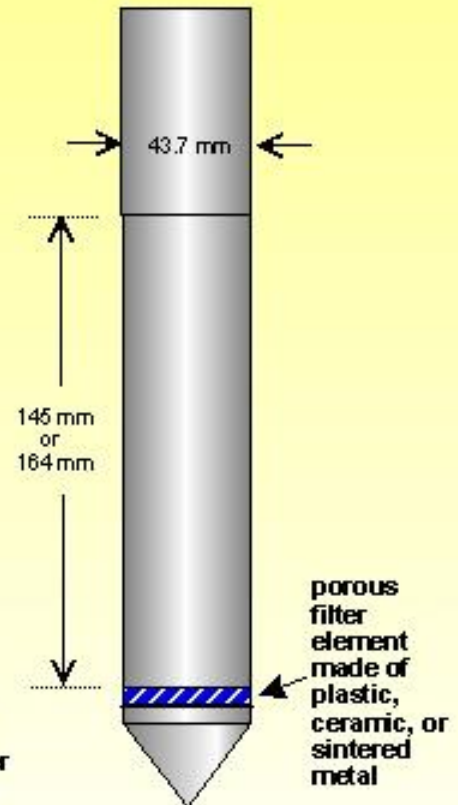
**10-cm² Friction-Type
Cone Penetrometer**



**10-cm² Standard
Piezocone**



**10-cm² Type 1
Piezocone**



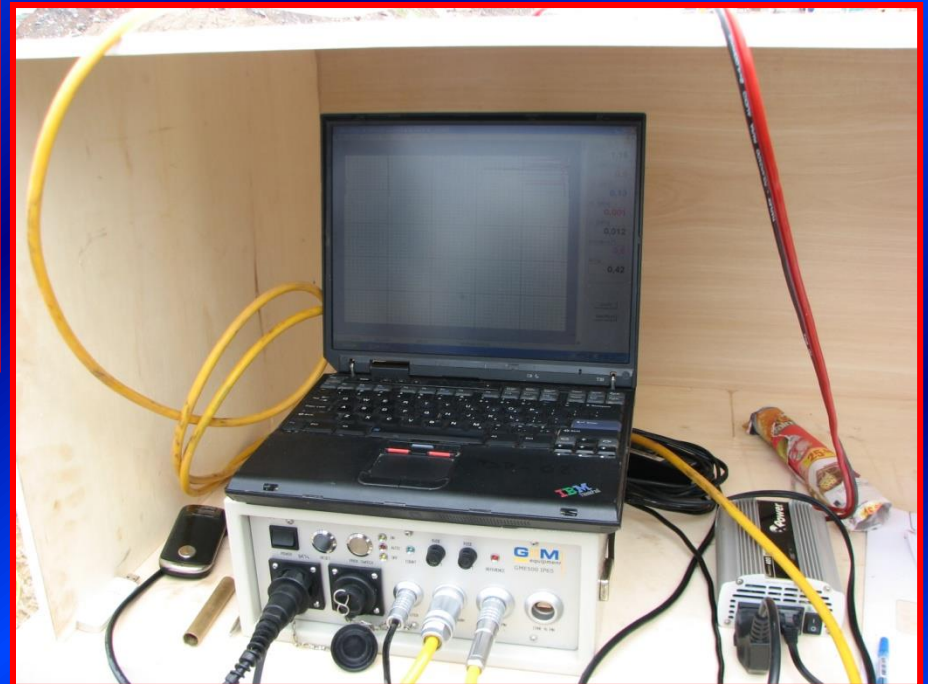
**15-cm² Type 2
Piezocone Penetrometer**



Ensaio de Vane Ensaio de Palheta



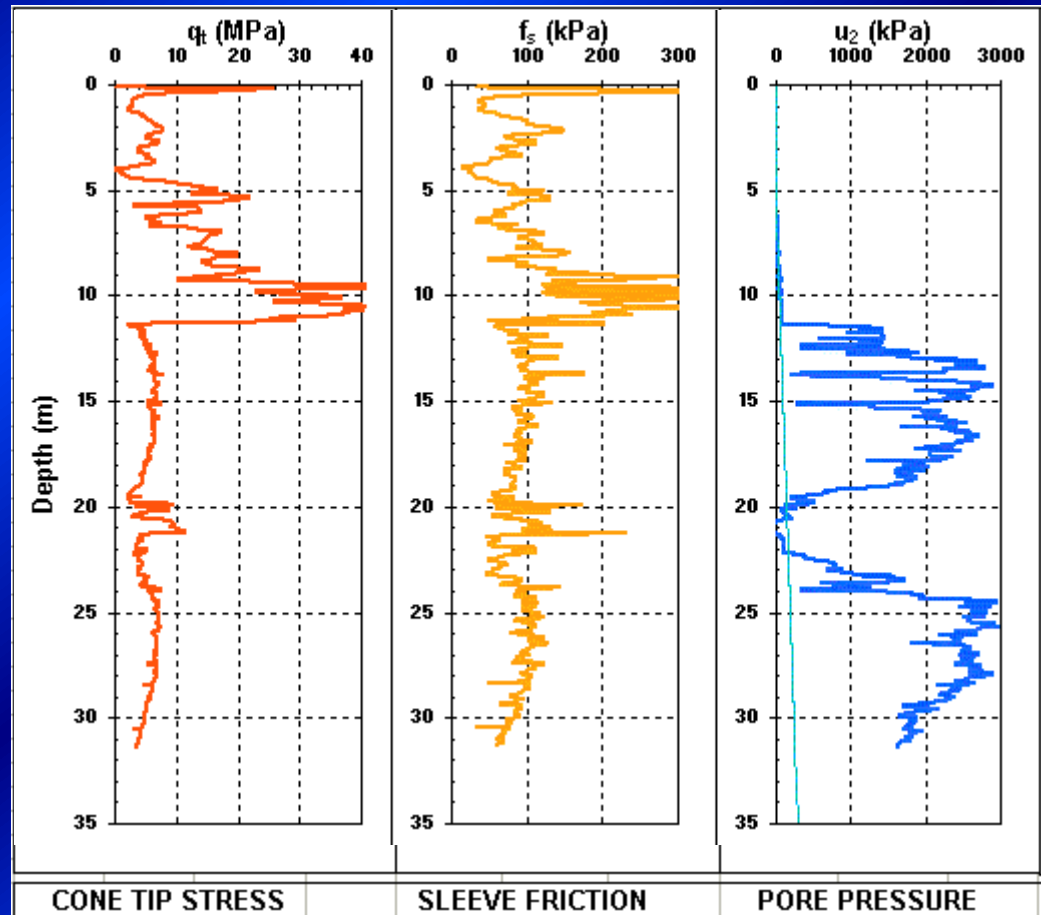
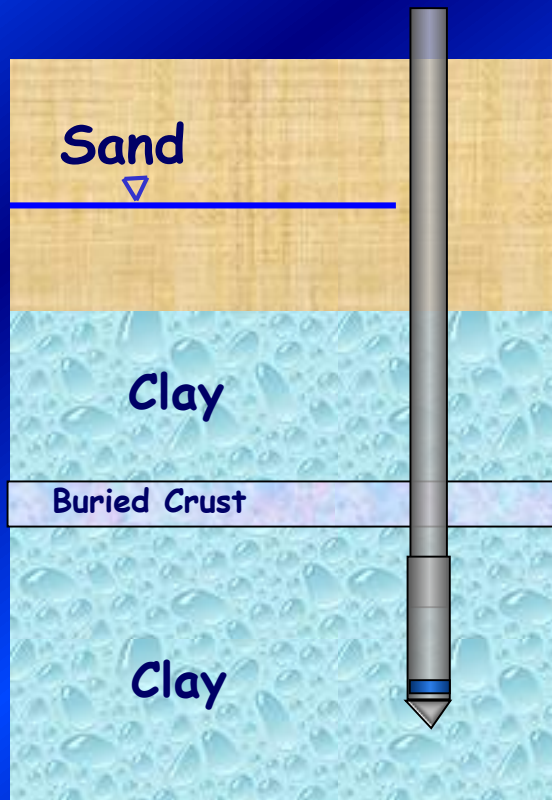
Ensaio em Cubatão



Cone Penetration Testing (CPT)

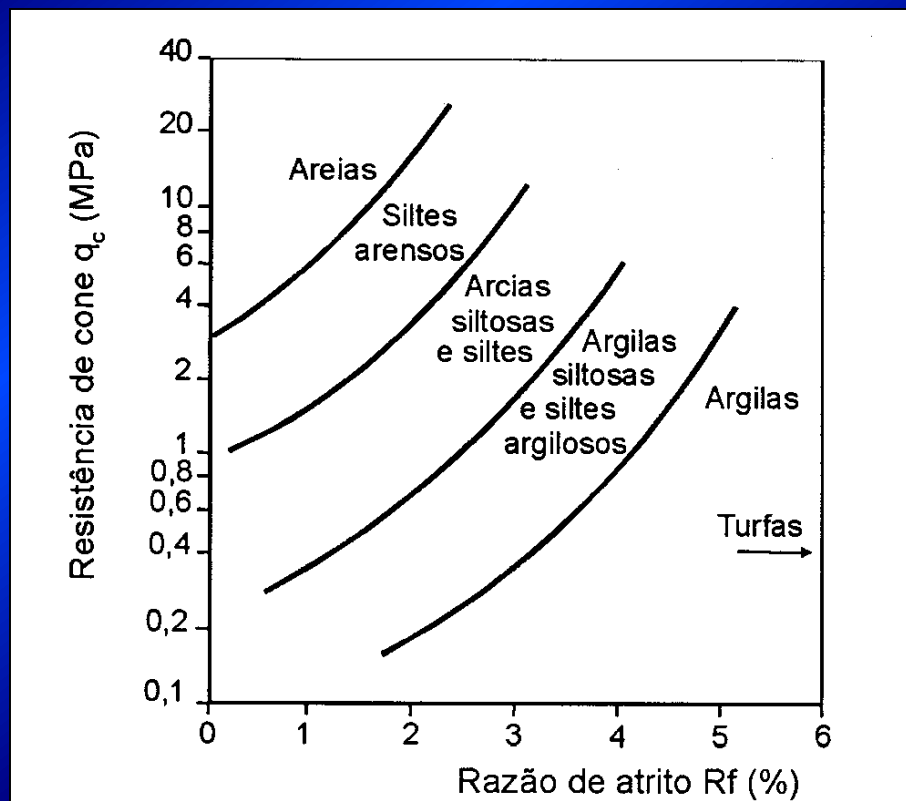
Real-Time readings in computer screen

Penetration at 2 cm/s

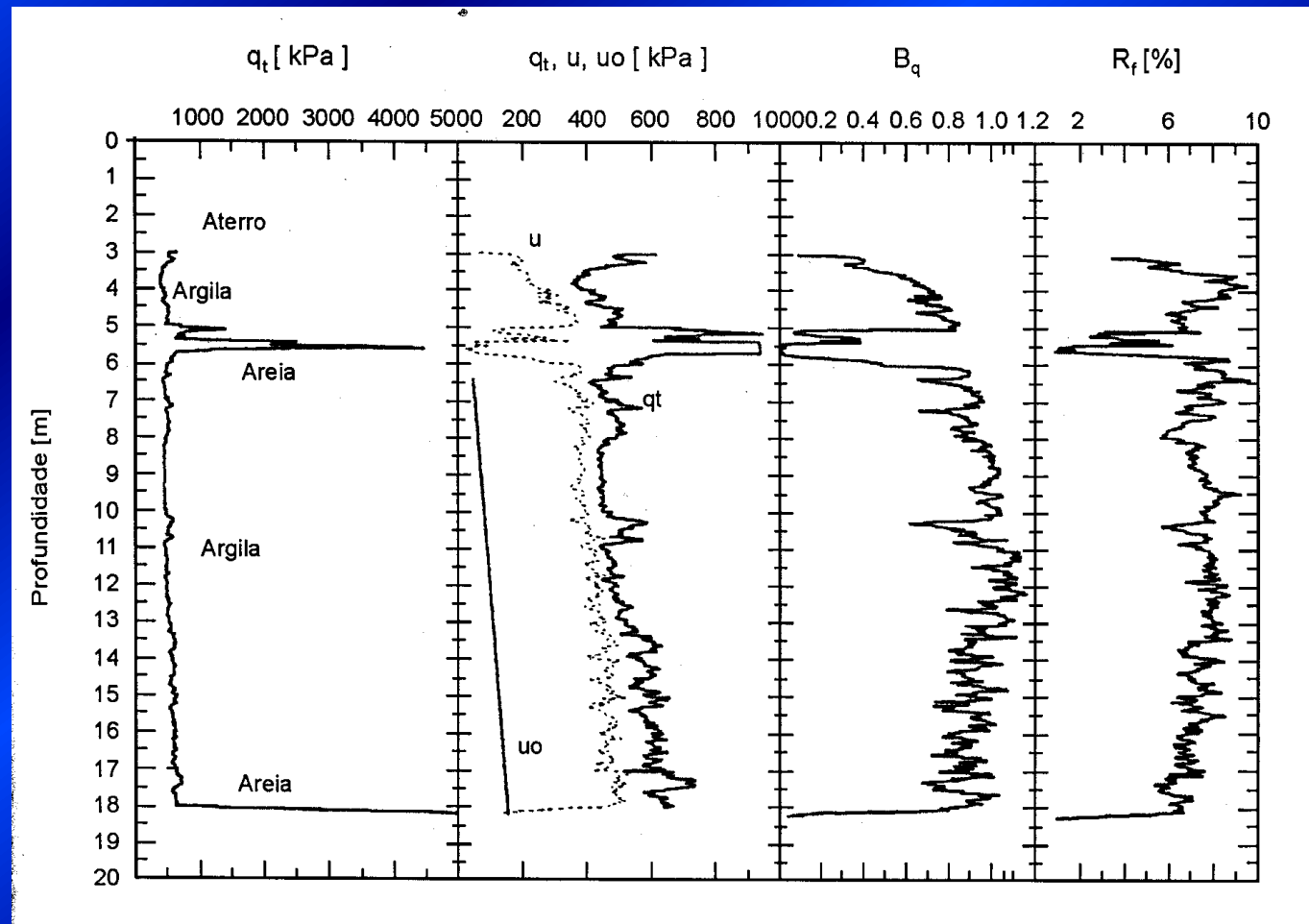


A razão de atrito (R_f) é utilizada para a classificação dos solos

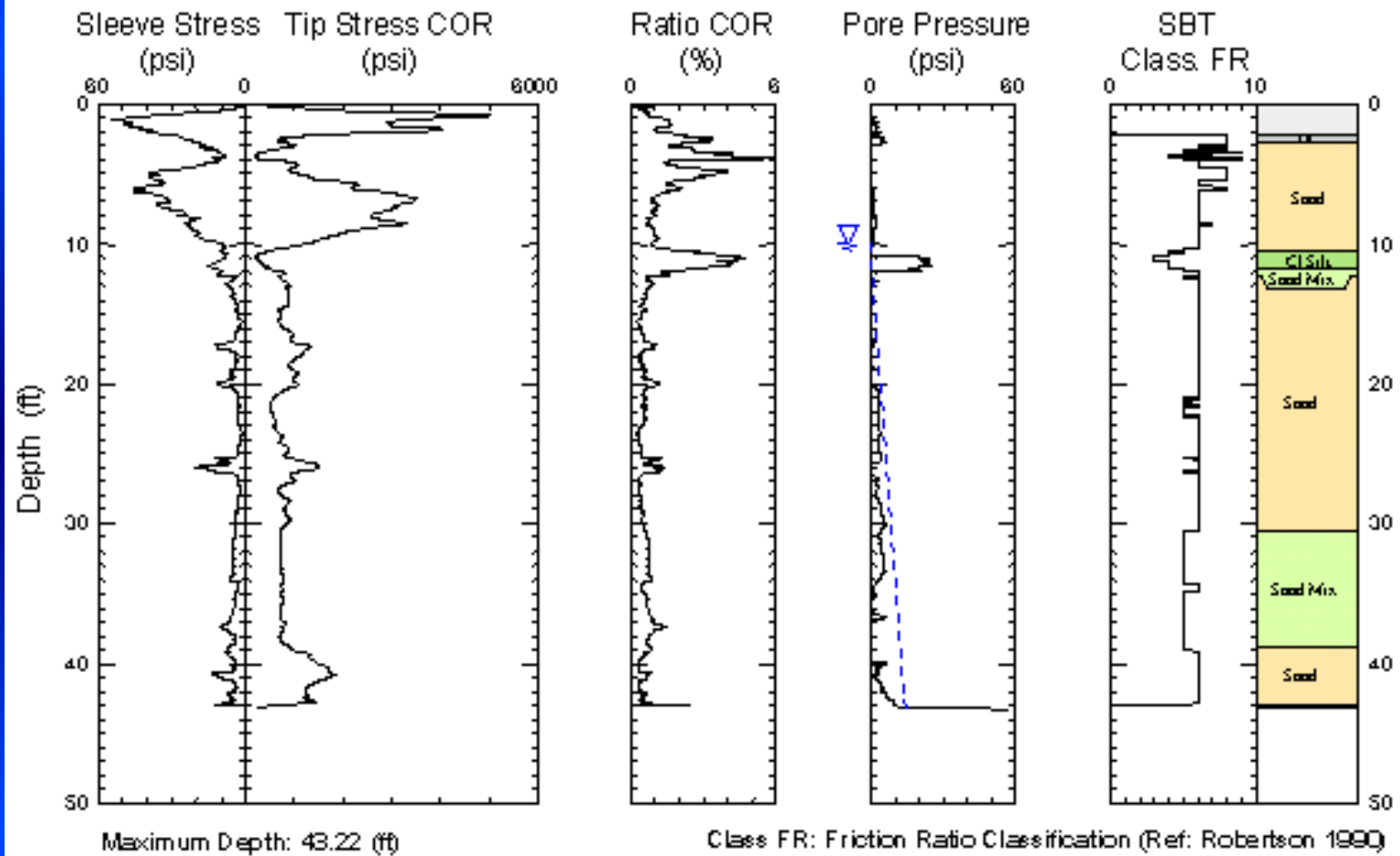
$$R_f = \frac{f_s}{q_c}$$

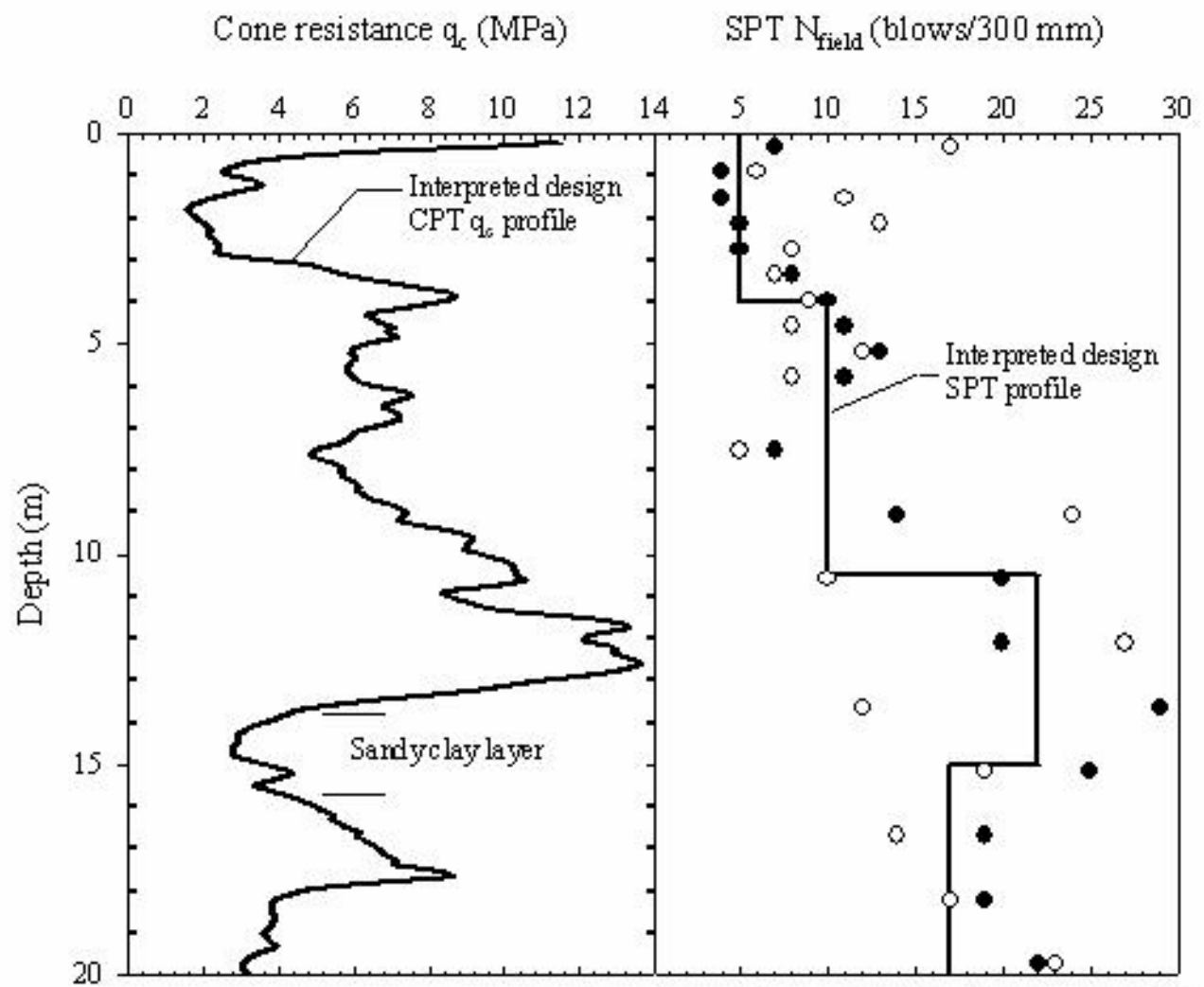


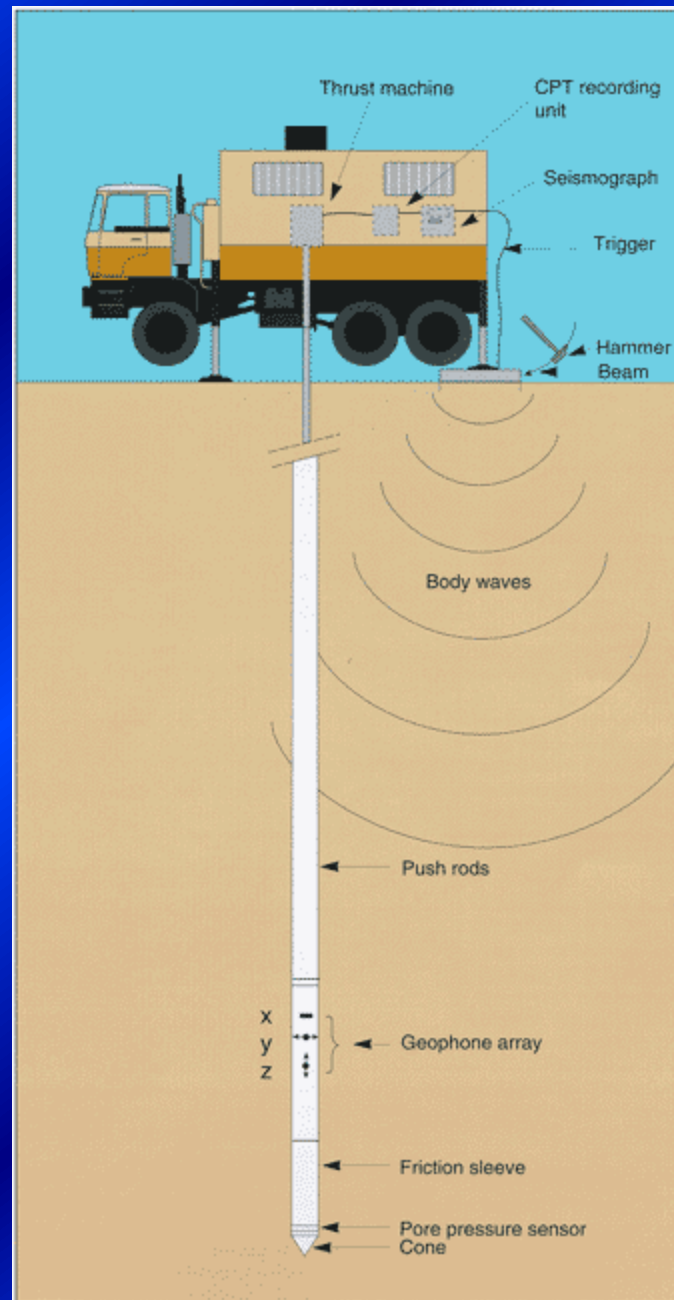
Ábaco para classificação do tipo de solo sedimentar (Robertson & Campanella, 1983).

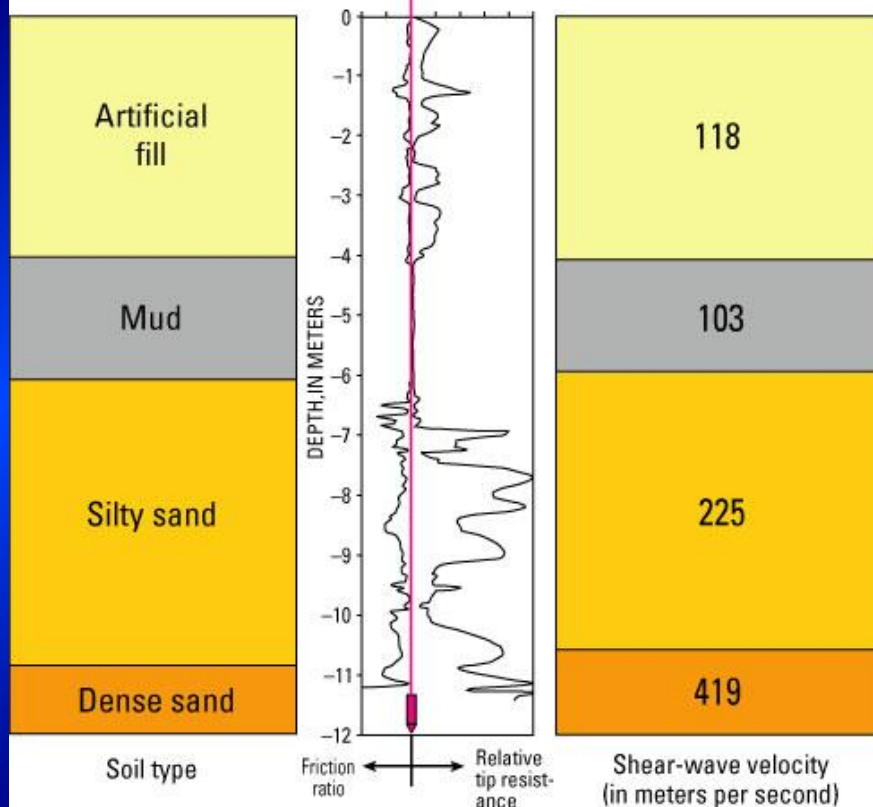


Resultado de um ensaio de piezocone na BR101 em Santa Catarina (Schnaid, 2000).









Ensaio de Cone

Métodos de Interpretação

- O estado de tensões e deformações induzidas nos ensaios de cone são muito complexos.
- Algumas simplificações ou métodos semi-empíricos são necessários para possibilitar a análise dos resultados.

Dentre as abordagens utilizadas temos:

- **Método de equilíbrio limite**
- **Método de expansão de cavidade**
- **Método de penetração contínua**
- **Métodos Numéricos**
- **Método de trajetória de deformações**
- **Métodos empíricos**

Ensaio de Cone

Resistência ao cisalhamento não drenada

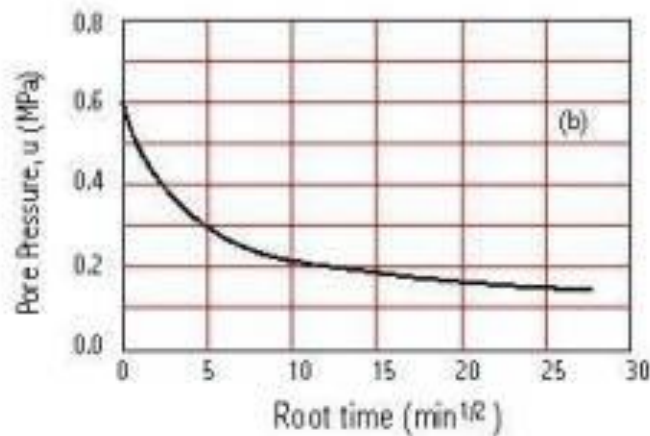
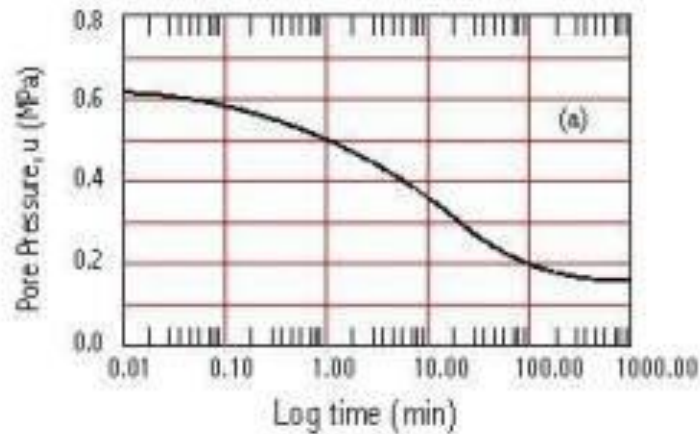
$$S_u = \frac{(q_c - \sigma_{vo})}{N_k}$$

q_c – resistência de ponta do cone

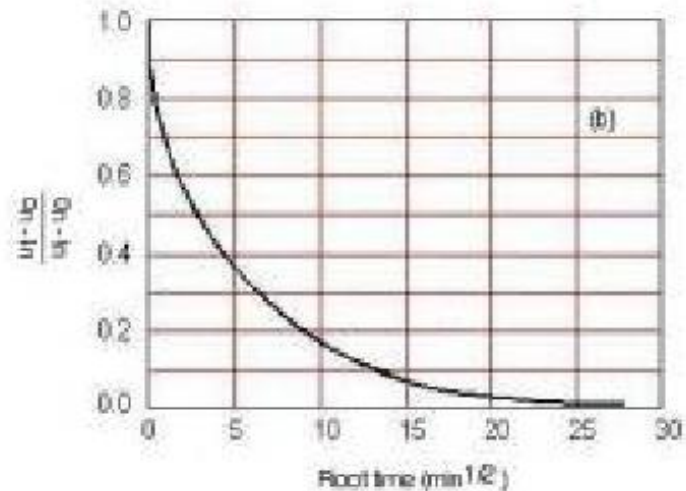
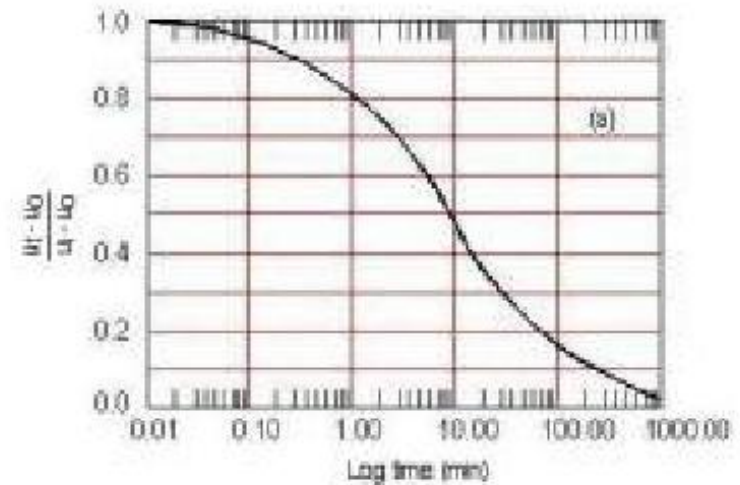
σ_{vo} – tensão vertical "in situ"

N_k – fator de capacidade de carga

Ensaio de Dissipação



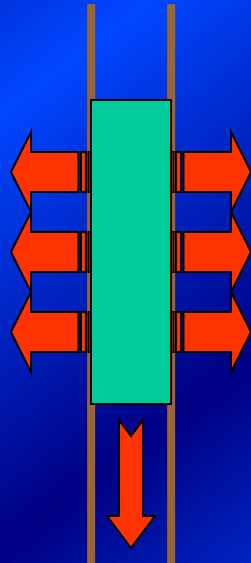
Exemplo da redução da poro pressão da água nas escalas (a) log e (b) raiz quadrada do tempo.



Exemplo da redução da poro pressão normalizada nas escalas (a) log e (b) raiz quadrada do tempo.

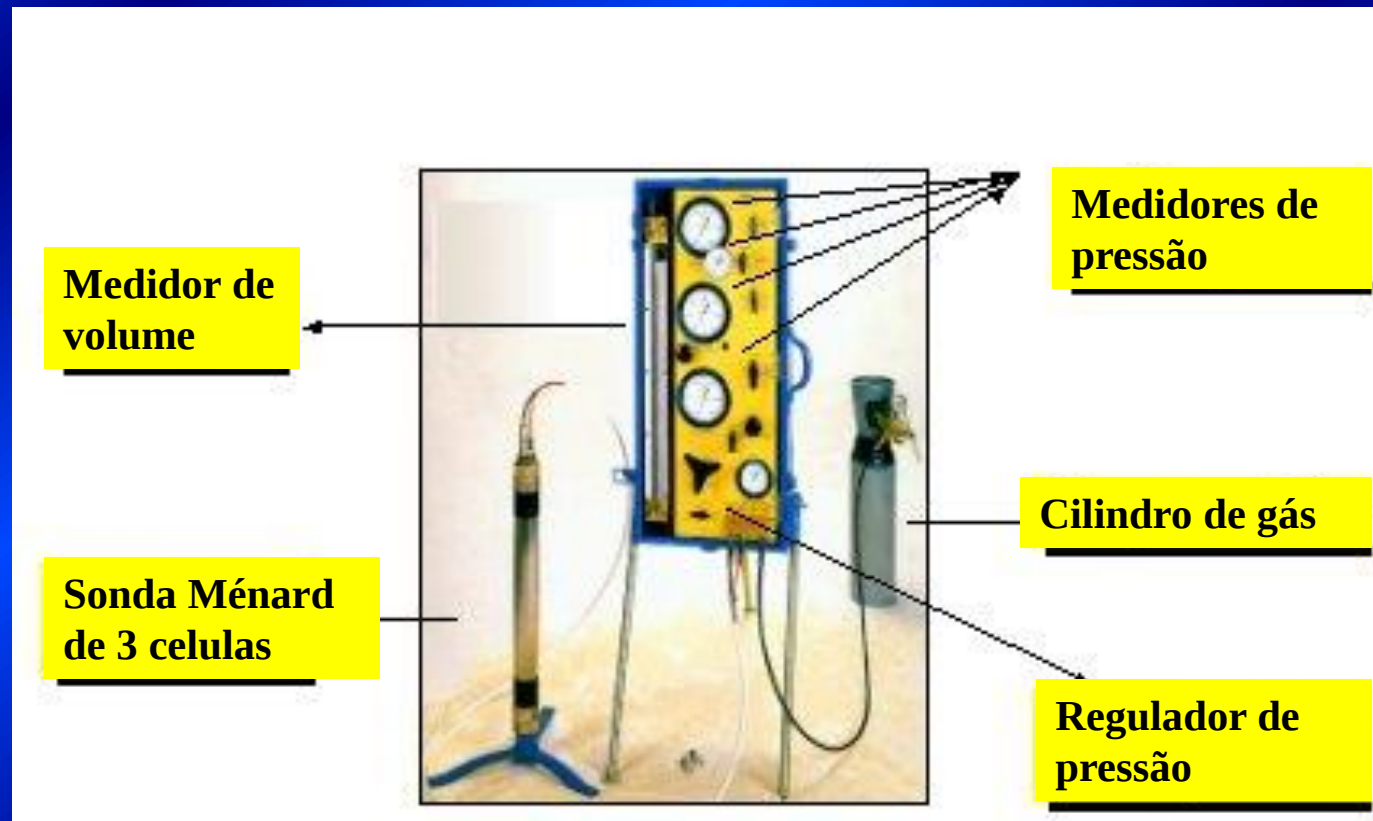
Ensaio Pressiométrico

- Pressiômetros em perfurações.
- Pressiômetros autoperfurantes.
- Pressiômetros cravados.



Ensaio Pressiométrico

- Pressiômetro em perfurações (Ménard).



Ensaio Pressiométrico

- Pressiômetro autoperfurante.



Ensaio Pressiométrico

- Pressiômetro cravado.

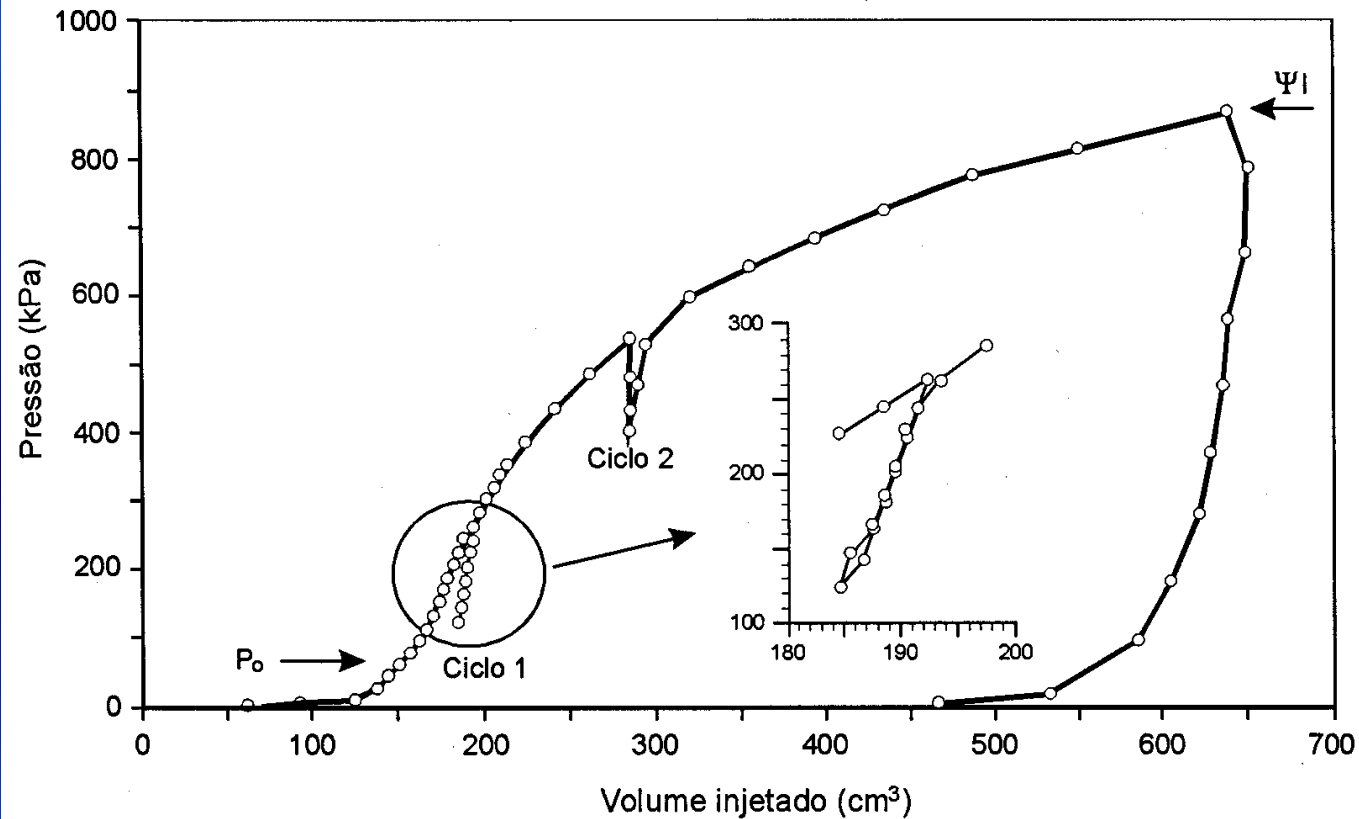


Ensaio Pressiométrico

- Medida contínua do comportamento tensão deformação.
- Interpretação racional.
 - Expansão de cavidade

A teoria considera que não haja perturbação durante a inserção do pressiômetro. Mantendo assim o estado de tensão inicial do solo

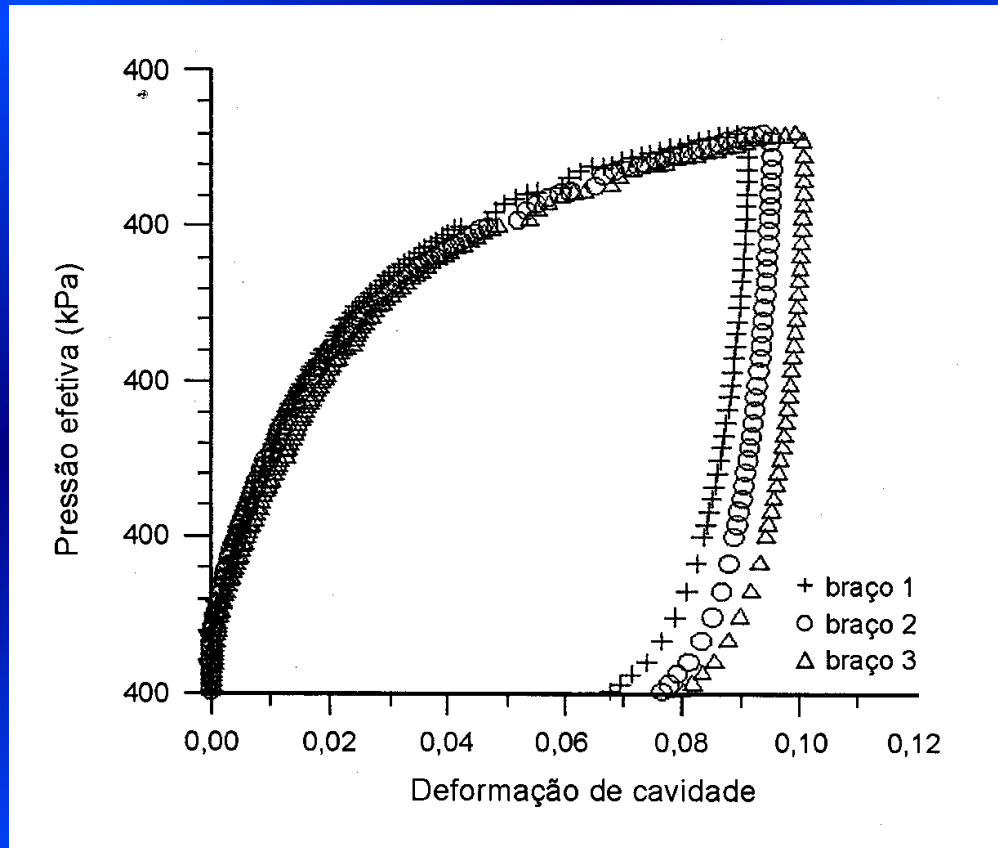
Curva Típica de um ensaio Ménard



Curva típica de um ensaio tipo Ménard (Schnaid, 2000).

- Parâmetros (Ménard)
 - **Módulo de deformabilidade**
 - **Estado de tensão no repouso**

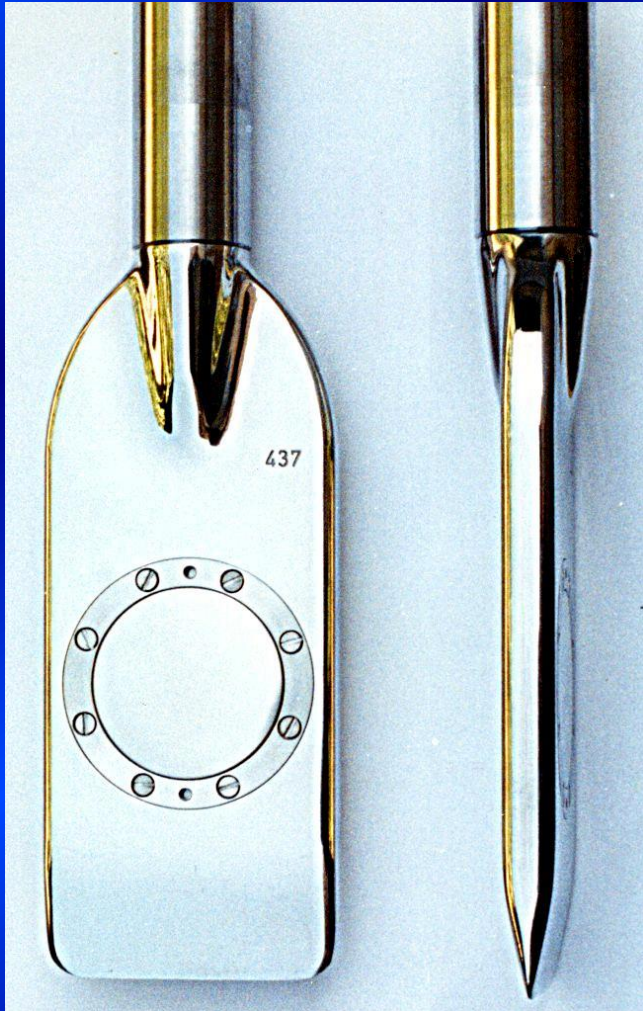
Curva Típica de um ensaio pressiométrico autoperfurante



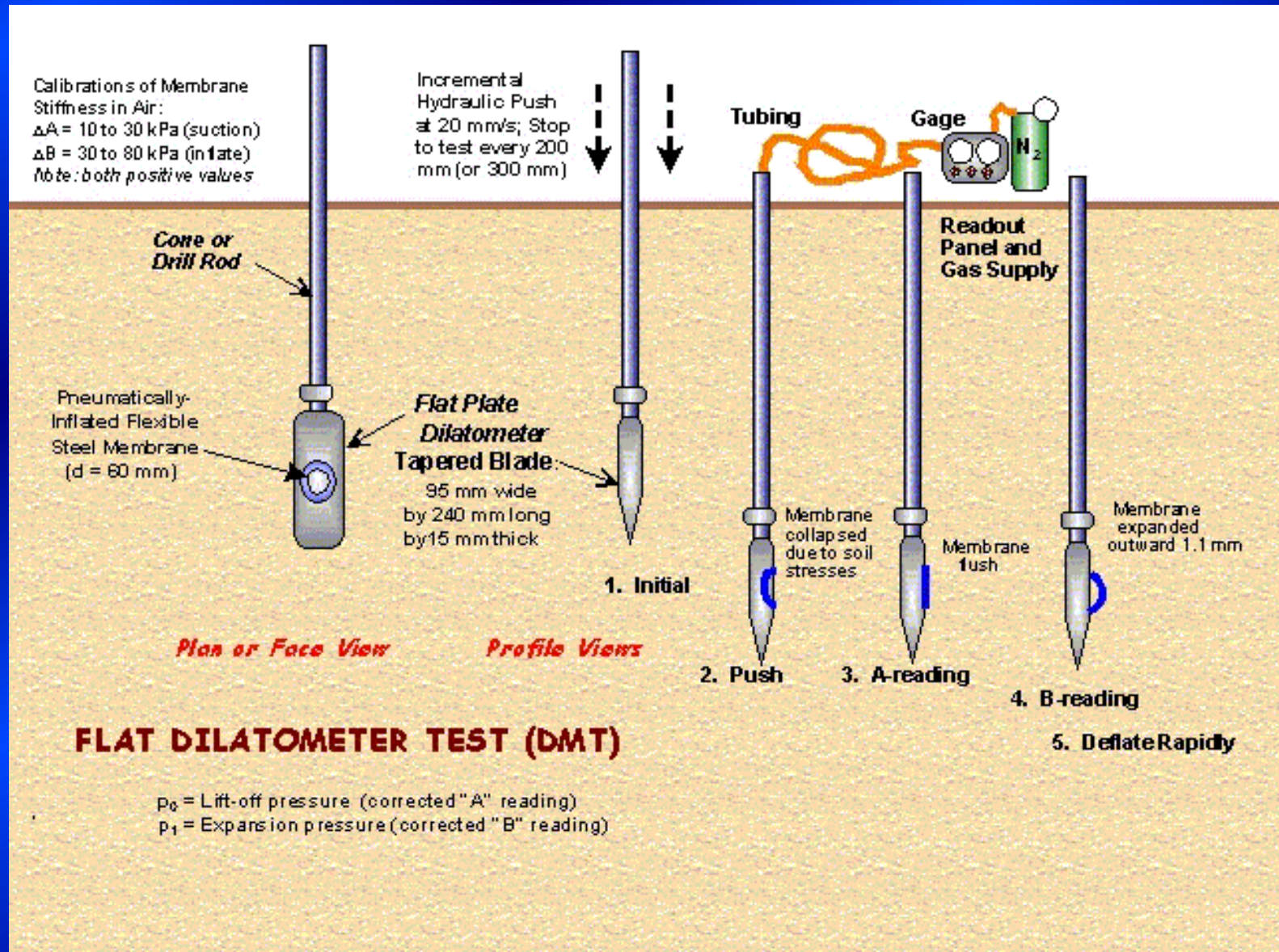
Curva típica de um ensaio pressiométrico autoperfurante (Abramento & Sousa Pinto, 1998).

- Parâmetros (autoperfurante)
 - **Módulo de deformabilidade**
 - **Estado de tensão no repouso**
 - **Resistência ao cisalhamento não drenada**
 - **Ângulo de atrito**

Ensaio Dilatométrico



DMT



Índices “intermediários” do DMT

Índice do material

$$I_d = \frac{P_1 - P_o}{P_o - u_o}$$

Módulo dilatométrico

$$E_d = 34.7(P_1 - P) \text{ em kgf/cm}^2$$

Índice de tensão horizontal

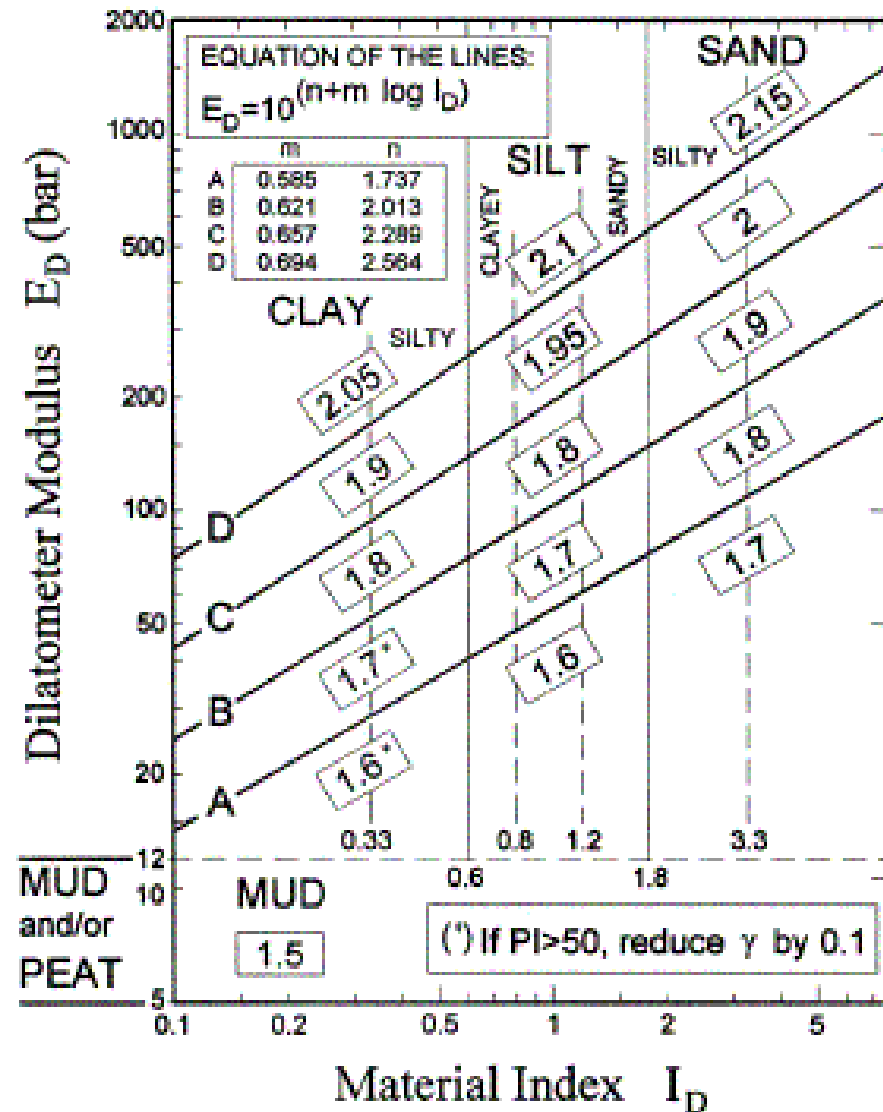
$$K_d = \frac{P_1 - u_o}{\sigma'_{vo}}$$

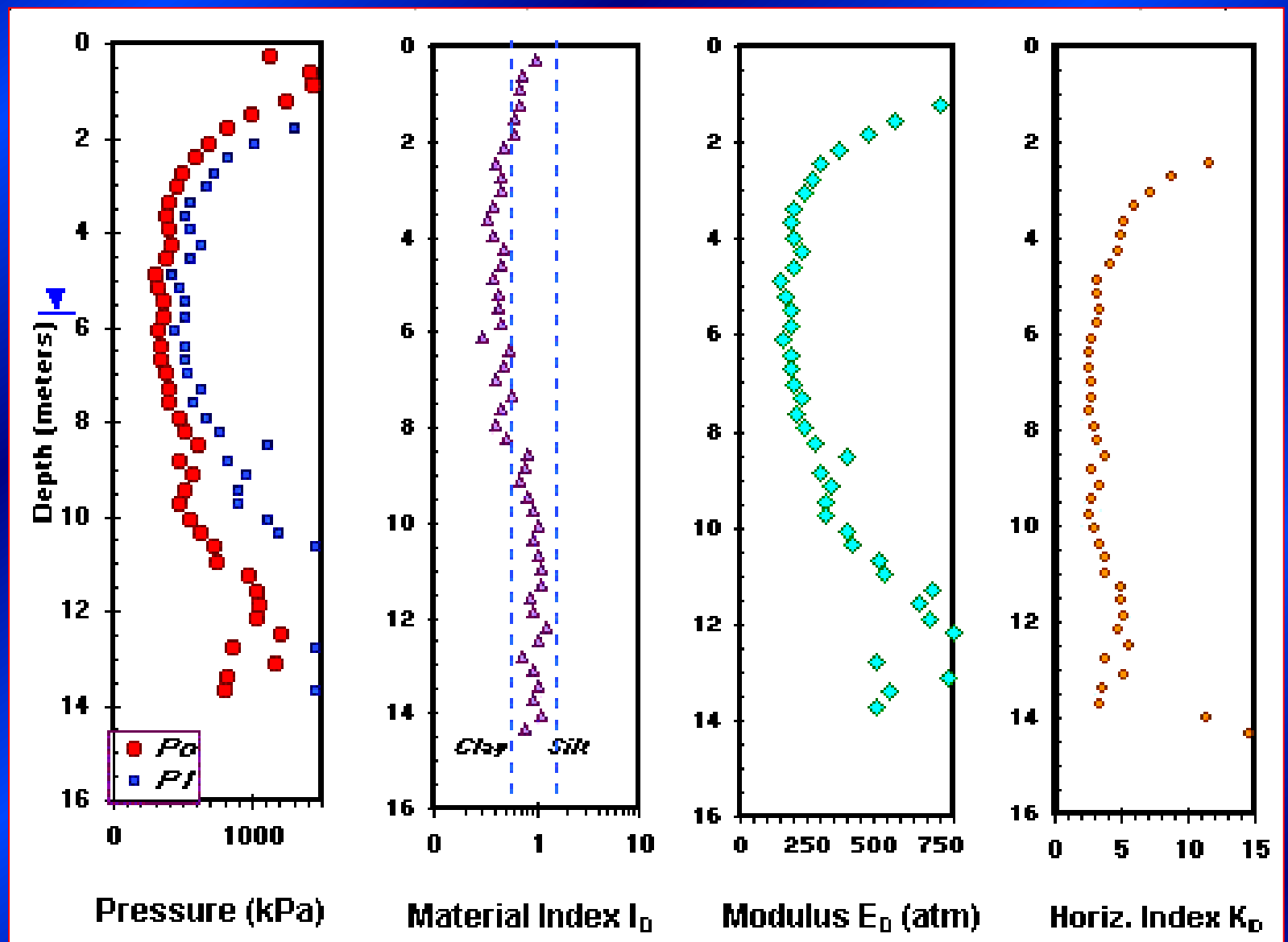


SYMB	DESCRIPTION	BASIC REDUCTION FORMULAE	
p_0	Corrected First Reading	$p_0 = 1.05 (A - Z_m + \Delta A) - 0.05 (B - Z_m - \Delta B)$	Z_m = Gage reading when vented to atm. However, if ΔA & ΔB are measured with the same gage used for current readings A & B , set $Z_m = 0$ (Z_m is compensated)
p_1	Corrected Second Reading	$p_1 = B - Z_m - \Delta B$	
I_D	Material Index	$I_D = (p_1 - p_0) / (p_0 - u_0)$	u_0 = pre-insertion pore pressure
K_D	Horizontal Stress Index	$K_D = (p_0 - u_0) / \sigma'_{v0}$	σ'_{v0} = pre-insertion overburden stress
E_D	Dilatometer Modulus	$E_D = 34.7 (p_1 - p_0)$	E_D is NOT a Young's modulus E . E_D should be used only AFTER combining it with K_D (Stress History). First obtain $M_{DMT} = R_M E_D$, then e.g. $E \approx 0.8 M_{DMT}$
K_0	Coeff. Earth Pressure in Situ	$K_{0, DMT} = (K_D / 1.5)^{0.47} - 0.6$	for $I_D < 1.2$
OCR	Overconsolidation Ratio	$OCR_{DMT} = (0.5 K_D)^{1.56}$	for $I_D < 1.2$
c_u	Undrained Shear Strength	$C_{u, DMT} = 0.22 \sigma'_{v0} (0.5 K_D)^{1.25}$	for $I_D < 1.2$
ϕ	Friction Angle	$\phi_{safe, DMT} = 28 + 14.6 \log K_d - 2.1 \log^2 K_d$	for $I_D > 1.8$
c_h	Coefficient of Consolidation	$C_{h, DMTA} \approx 7 \text{ cm}^2 / T_{flex}$	T_{flex} from A-log t DMTA-decay curve
k_h	Coefficient of Permeability	$k_h = C_h \gamma_w / M_h \quad (M_h \approx K_0 M_{DMT})$	
γ	Unit Weight and Description	(see chart)	
M	Vertical Drained Constrained Modulus	$M_{DMT} = R_M E_D$ If $(I_D \leq 0.6)$ $R_M = 0.14 + 2.36 \log K_d$ If $(I_D \geq 3)$ $R_M = 0.5 + 2 \log K_d$ If $(0.6 < I_D < 3)$ $R_M = R_{M,0} + (2.5 - R_{M,0}) \log K_d$ where $R_{M,0} = 0.14 + 0.15(I_D - 0.6)$ If $K_d > 10$ $R_M = 0.32 + 2.18 \log K_d$ If $R_M < 0.85$ set $R_M = 0.85$	
U_0	Equilibrium Pore Pressure	$U_0 = p_2 \approx C - Z_m + \Delta A$	In freely draining soils

DMT

SOIL DESCRIPTION and estimated γ/γ_w



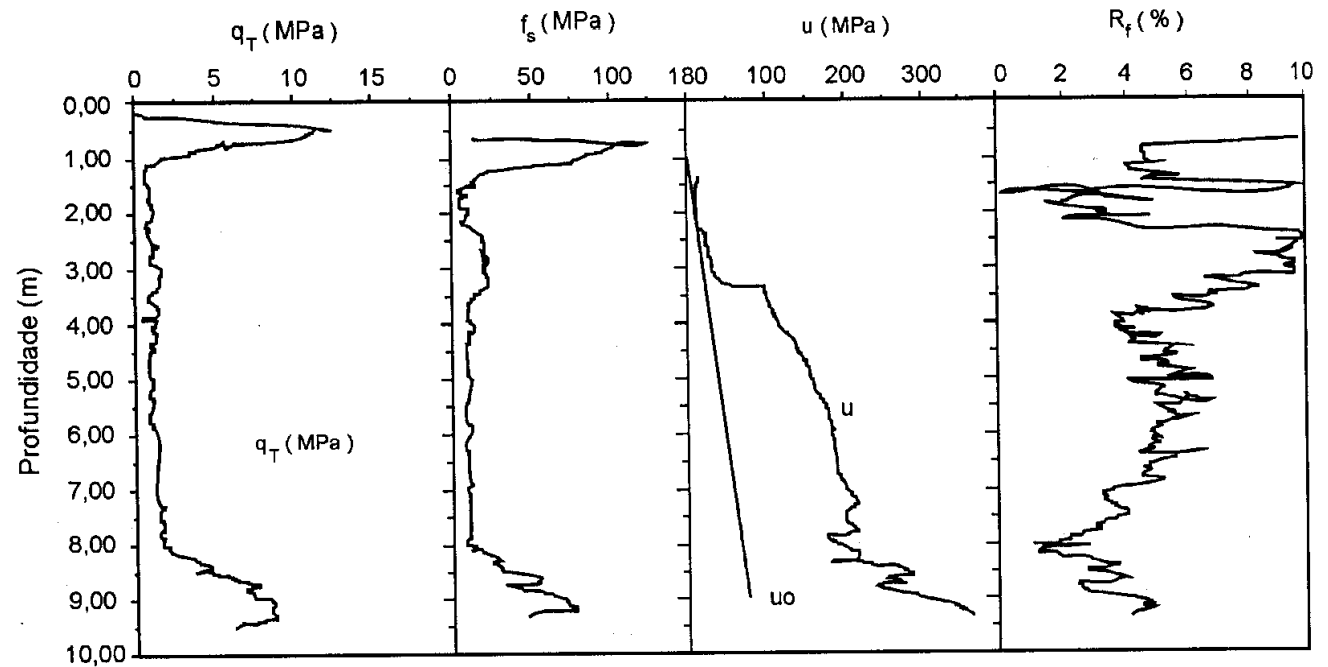


Resultados de DMT (Piedmont).

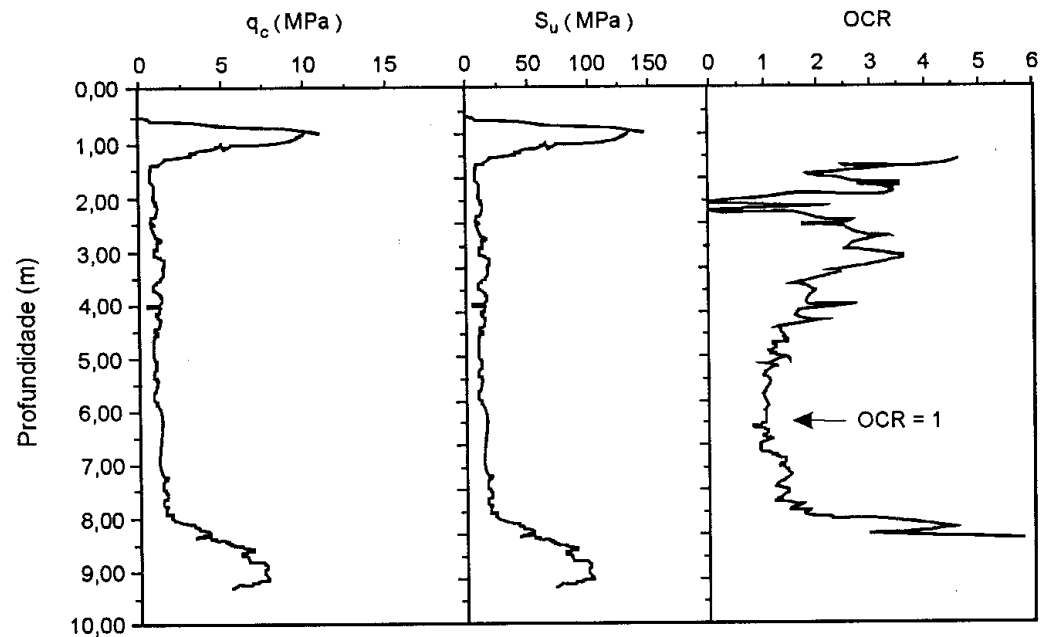
Outros Resultados

Cone CPTU

*Ensaio CPTU na área de
ampliação do Aeroporto
Internacional Salgado
Filho (Schnaid, 2000).*

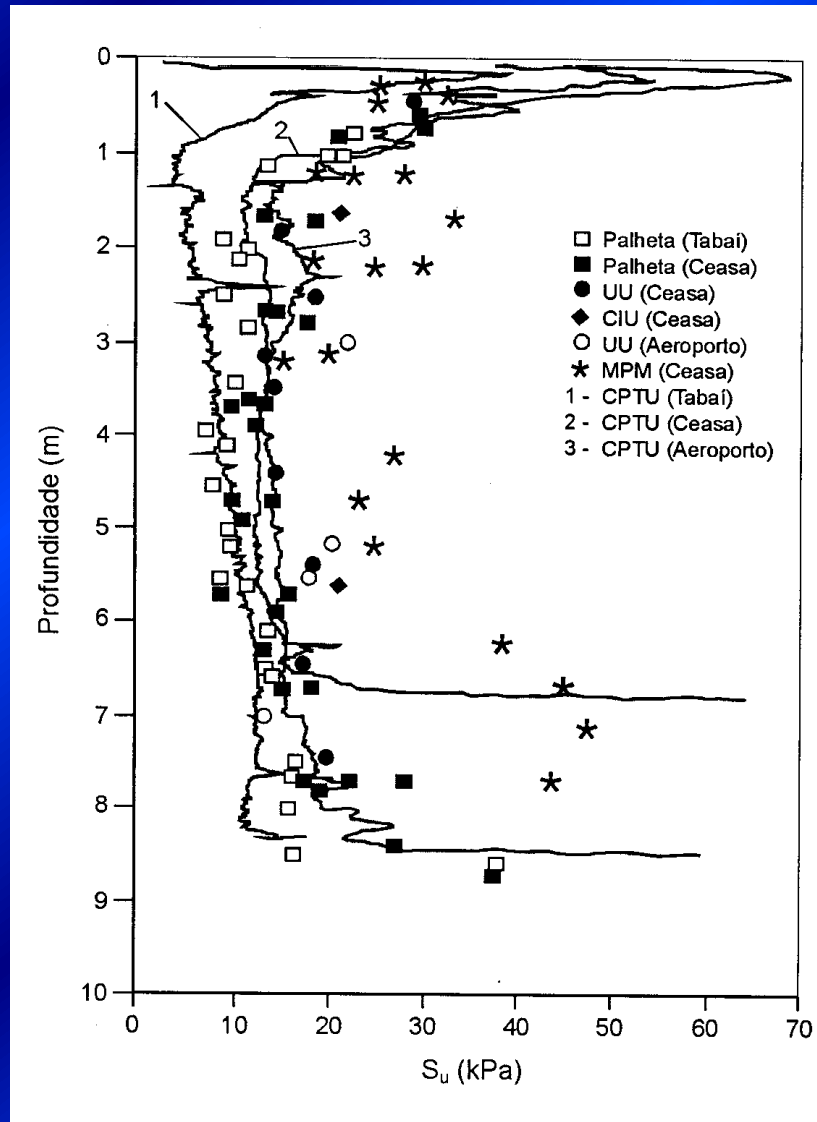


*Valores estimados de S_u e
OCR do depósito de
argilas moles do
Aeroporto Internacional
Salgado Filho (Schnaid,
2000).*

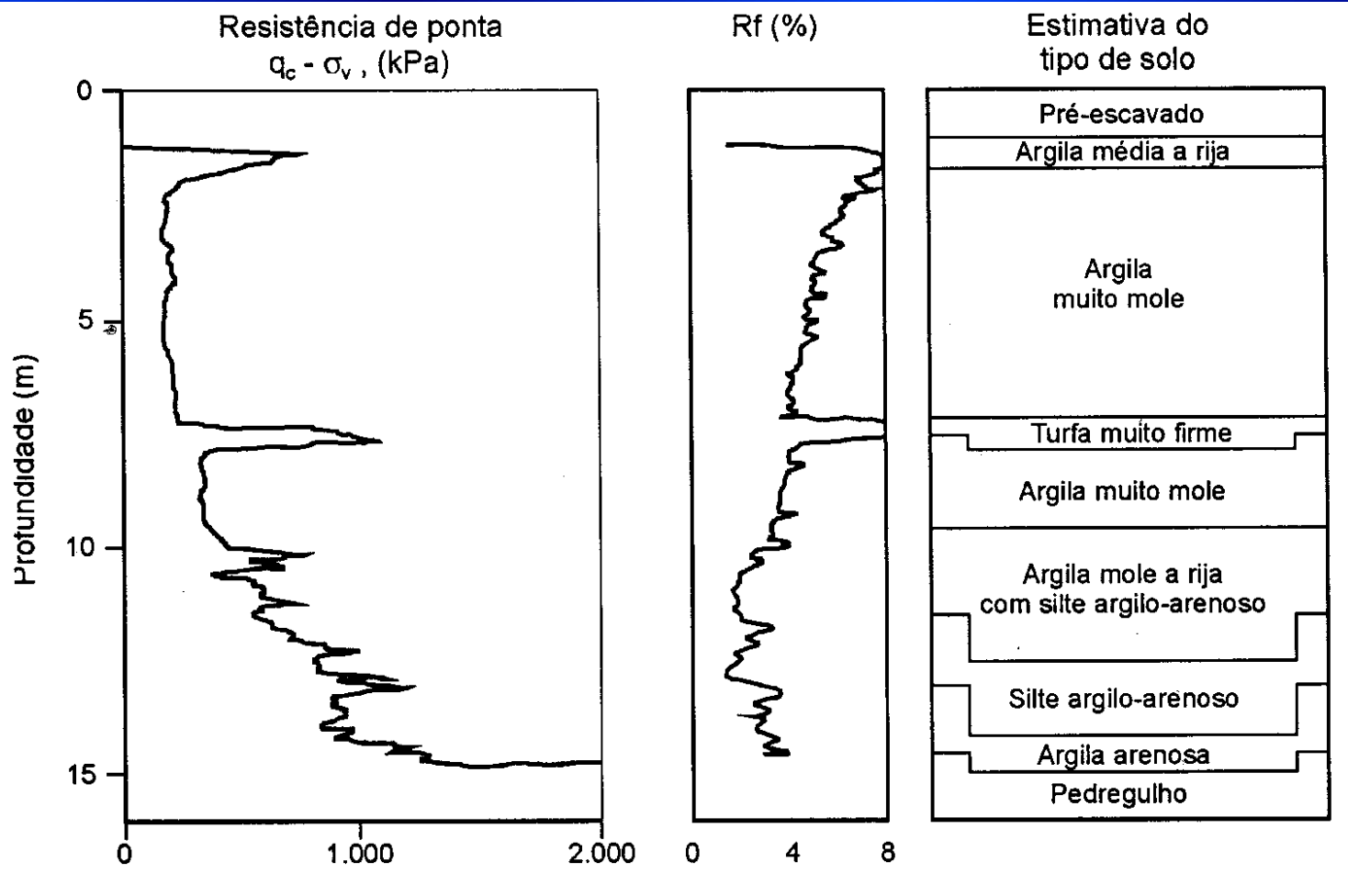


Diversos Ensaio

Variação de S_u com a profundidade (Schnaid, 2000).



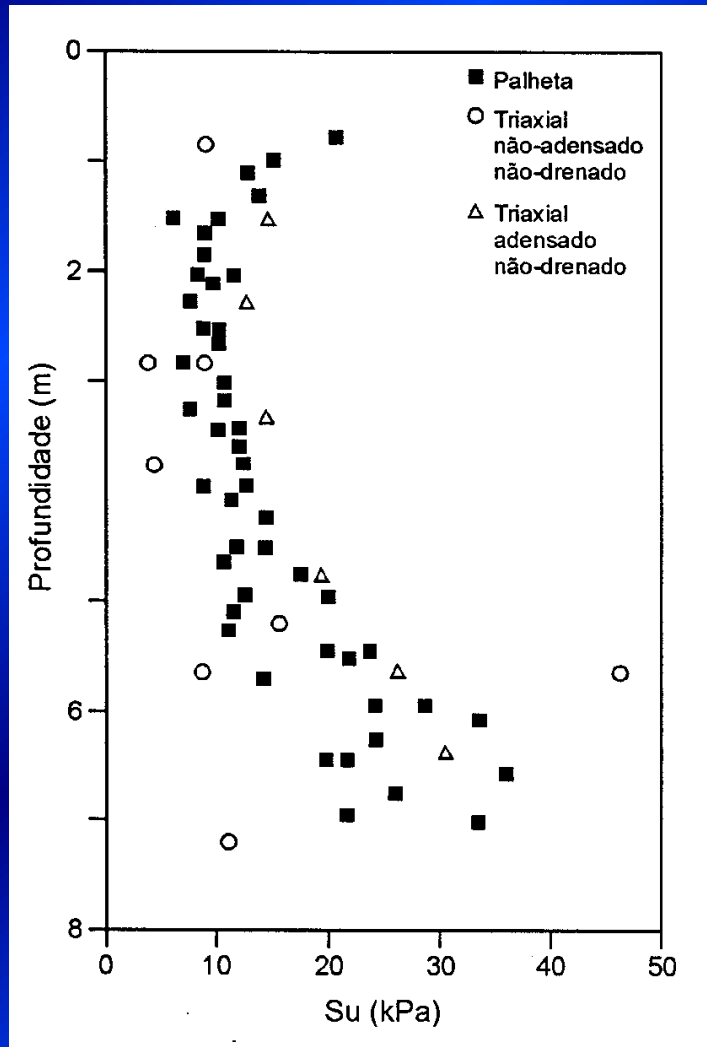
Cone CPTU



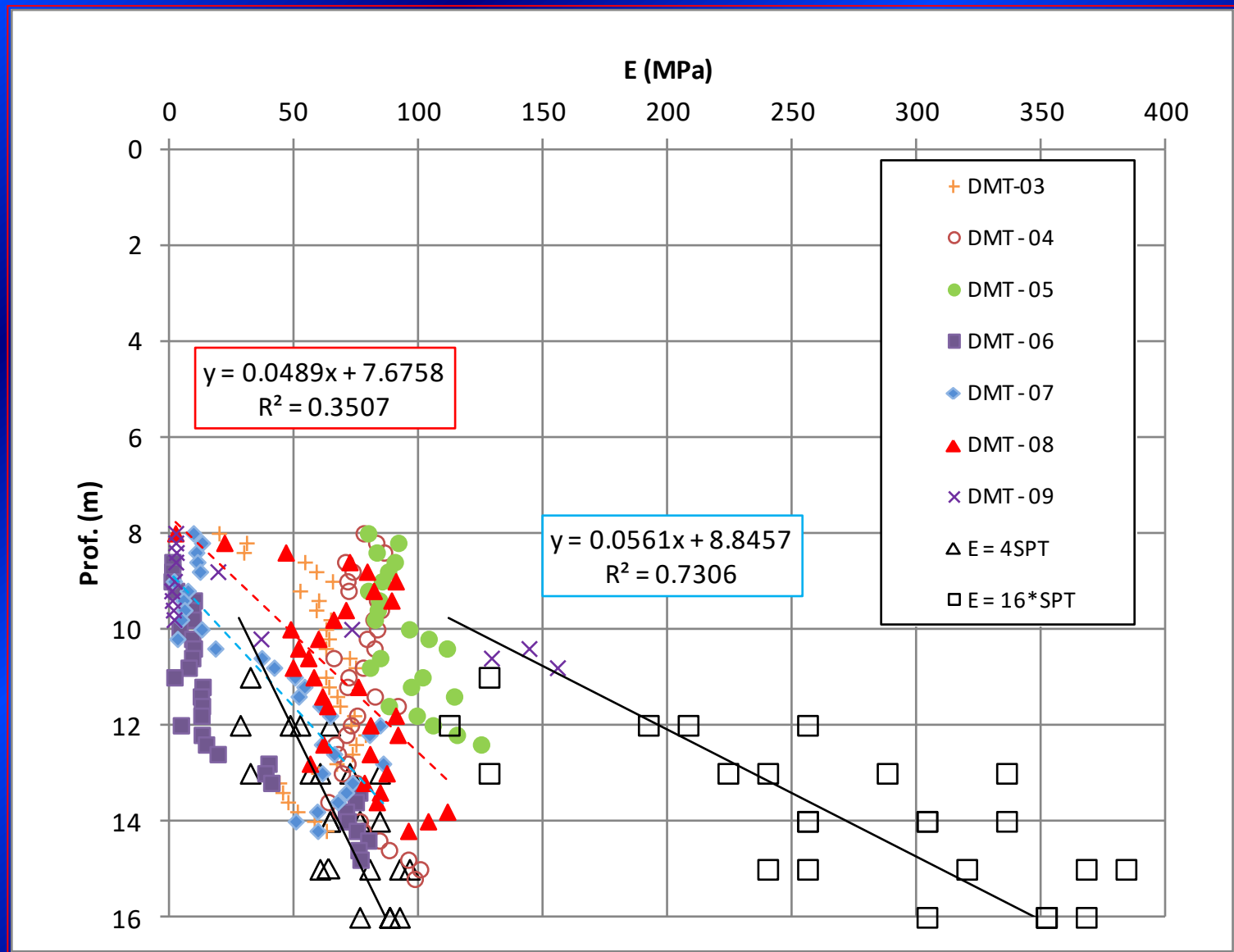
Perfil típico do terreno natural (Schnaid, 2000).

Comparação entre ensaios Palheta e Triaxiais

*Perfil de resistência não
drenada (Schnaid, 2000).*



DMT e correlações do SPT





Considerações Finais

- O conhecimento das condições do subsolo é fundamental para projetos de qualquer obra.
- O custo envolvido com a investigação no Brasil é da ordem de 0,2 a 0,5% do custo total da obra.
- A programação das investigações é tão importante quanto a própria campanha de ensaios.
- O fator de segurança e custos de uma obra estão associados e dependem do detalhamento e interpretação das investigações.