

Exploração do Subsolo



Fernando A. M. Marinho
Revisões
Luiz G. de Mello
Maurício Abramento
Waldemar Hachich

O que vem antes da concepção de um programa de investigação de subsolo?

Modelo Geológico da Área

Definição do problema

Envolve solos, rochas
Tipos de ruptura
Deformações
Estabilidade
Água
Erosão
Sucção
Etc....

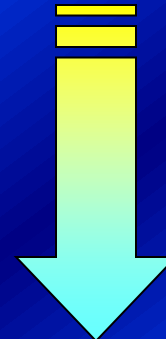
Como analisar o problema ?

Métodos de cálculo
Parametros representativos

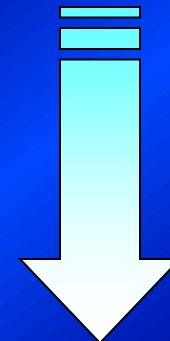
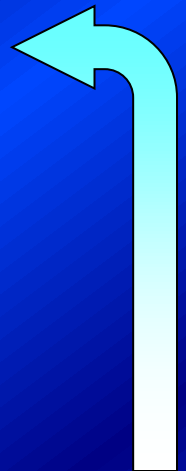
Quais os parametros necessários ?

Ensaio de campo
Ensaio de laboratório

Problema



Solução



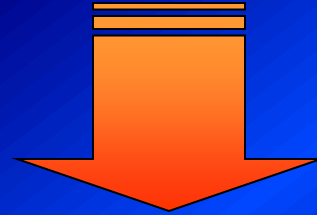
Investigação

Porque devemos investigar o subsolo ?

- Entendermos a formação do solos do local em estudo (formação dos solos e, eventualmente, rochas e todos os materiais oriundos de sua decomposição, incluindo colúvios e talus no caso de proximidade de encostas)
- Prevermos comportamentos possíveis a luz dos carregamentos / solicitações antevistas nos distintos cenários de operação da obra no futuro, assim como das etapas construtivas relevantes
- Definirmos os parâmetros necessários para desenvolvermos os cálculos associados ao detalhamento do projeto, incluindo cenários extremos
- Desenvolvermos o projeto executivo dos aspectos geotécnicos e de interação solo-estrutura da obra
- Quantificarmos os serviços antevistos e detalhados no projeto, levando à proposição do custo e o cronograma da obra
- Avaliar os riscos associados à(s) solução(ões) proposta(s) no projeto

Investigação

CAUSAS



- **Geomorfologia**
- **Estratigrafia**
- **Nível de água e sua variação sazonal; Perfil de sucção e sua variação sazonal**
- **Caracterização geotécnica / geomecânica dos materiais**
 - **Resistência ao cisalhamento dos materiais envolvidos**
 - **Parâmetros de deformabilidade dos materiais envolvidos**
 - **Parâmetros hidráulicos dos materiais envolvidos**

Você já pensou sobre o subsolo sobre o qual você vive ?

- Ele possui desde mais de 4.600 milhões a poucas dezenas de milhares de anos – em alguns casos, como em aterros hidráulicos e rejeitos de mineração, os solos estão sendo formados agora !!



- Ele esteve submetido a inúmeros diastrofismos (movimentos da crosta terrestre produzidos por processos tectônicos, incluindo a formação de bacias oceânicas, continentes, platôs e cadeias de montanhas).
- O subsolo foi intemperizado, erodido, transportado e sedimentado
-esta cadeia de ações pode ter-se repetido 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 decisões mais seguras antes de construirmos qualquer obra nele, reduzindo os riscos inerentes.

SISTEMÁTICAS DE INVESTIGAÇÃO

Ensaio 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 .

Ensaio 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.
- As características do solo ensaiado com frequência não são totalmente identificadas.
- Os modos de deformação e ruptura são geralmente diferentes daqueles das estruturas de engenharia.
- Grau de perturbação geralmente desconhecido

IMPORTANTE

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 – validade de associar ao ensaio SPT
- Registrar todas as mudanças observadas no perfil de solo
- Registrar o nível de água local
- Recolher amostras para determinação do teor de umidade

Outros aspectos importantes são:

- Obtenção de amostras indeformadas para eventuais ensaios complementares de laboratório
- Obtenção de amostras para identificação de eventual contaminação do solo, no caso de aplicação da geotecnia ambiental.

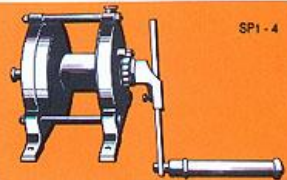
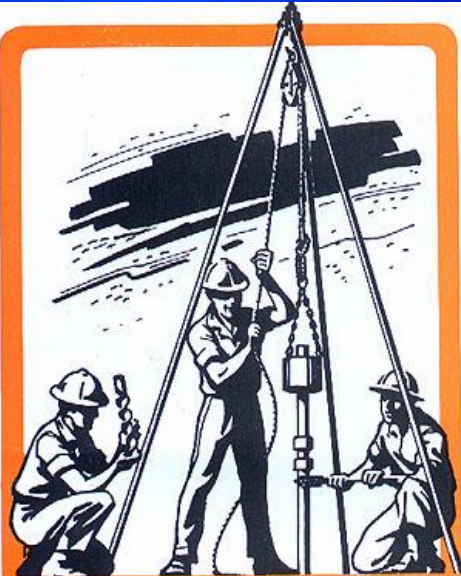
VALIDADE DE SE ASSOCIAR VARIOS ENSAIOS PRÓXIMOS CONCEITO DE ILHAS DE INVESTIGAÇÃO

Cuidado com a sequência de execução e a distância entre ensaios para não perturbar o subsolo para o ensaio posterior

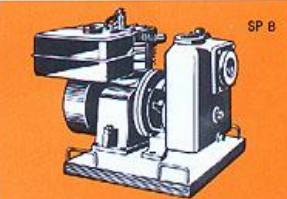
Ideal é começar com o CPTU e a Amostragem, e depois fazer SPT e Vane

Sondagem a Percussão

Sondagem a Percussão

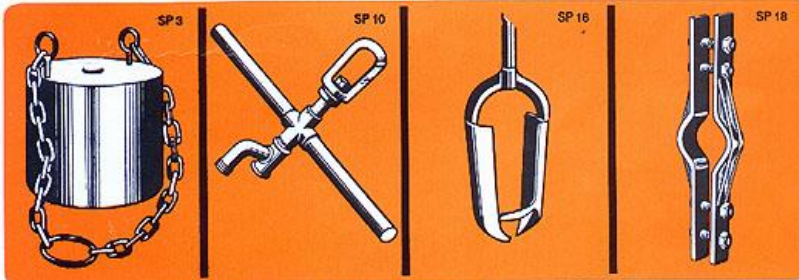


SP1-4



SP8

EQUIPAMENTO P/ SONDAGEM DE PERCUSSÃO



SP3

SP10

SP16

SP18



SP1-6

SP4

SP6



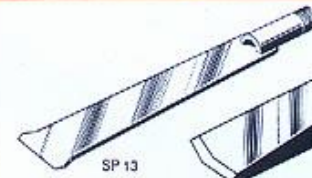
SP11



SP15



SP19



SP13



SP14



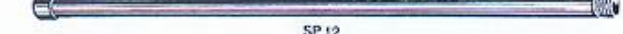
SP7



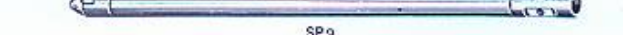
SP2



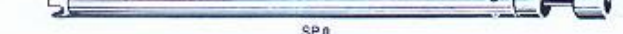
SP5



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	Tê 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		

Trados manuais



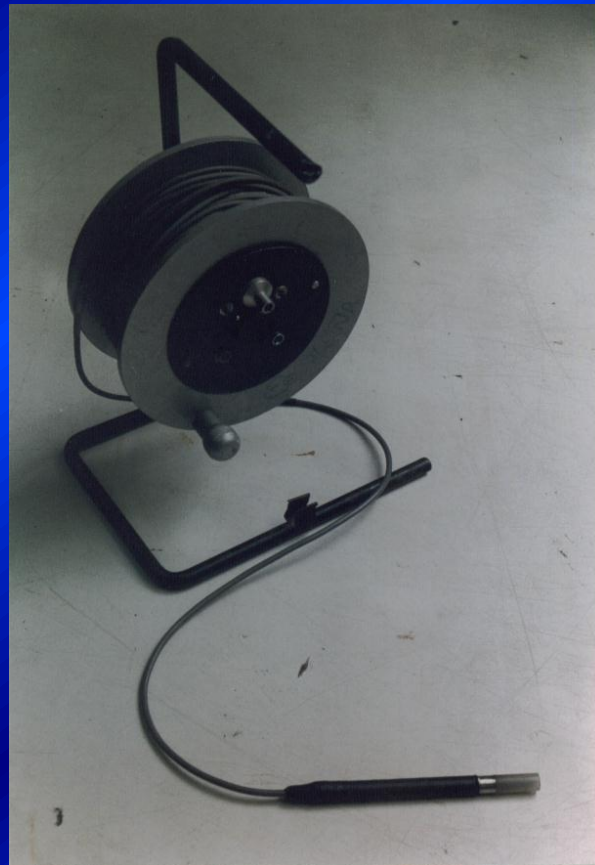
Lâminas e amostradores



Sondagem rotativa



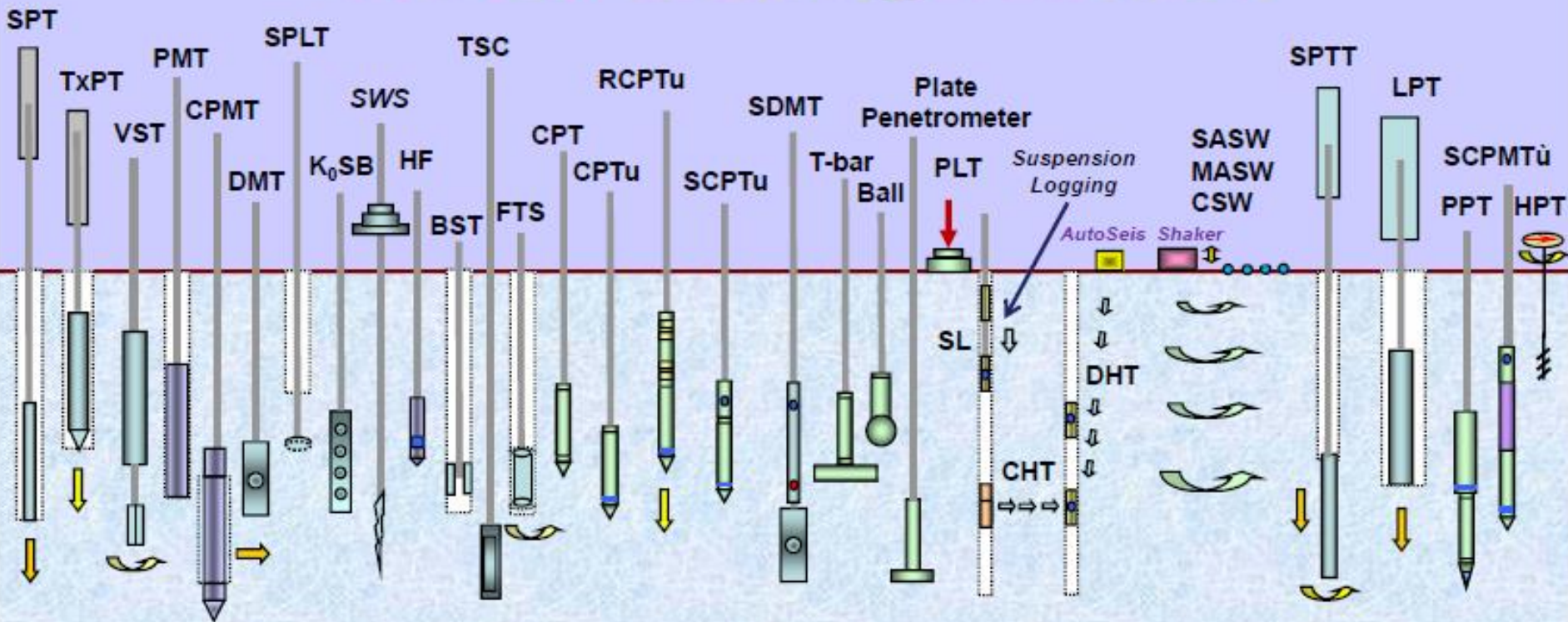
Indicador do nível d'água (INA)



Abertura de Poços de Investigação e coleta de amostras indeformadas



In-Situ Testing Methods

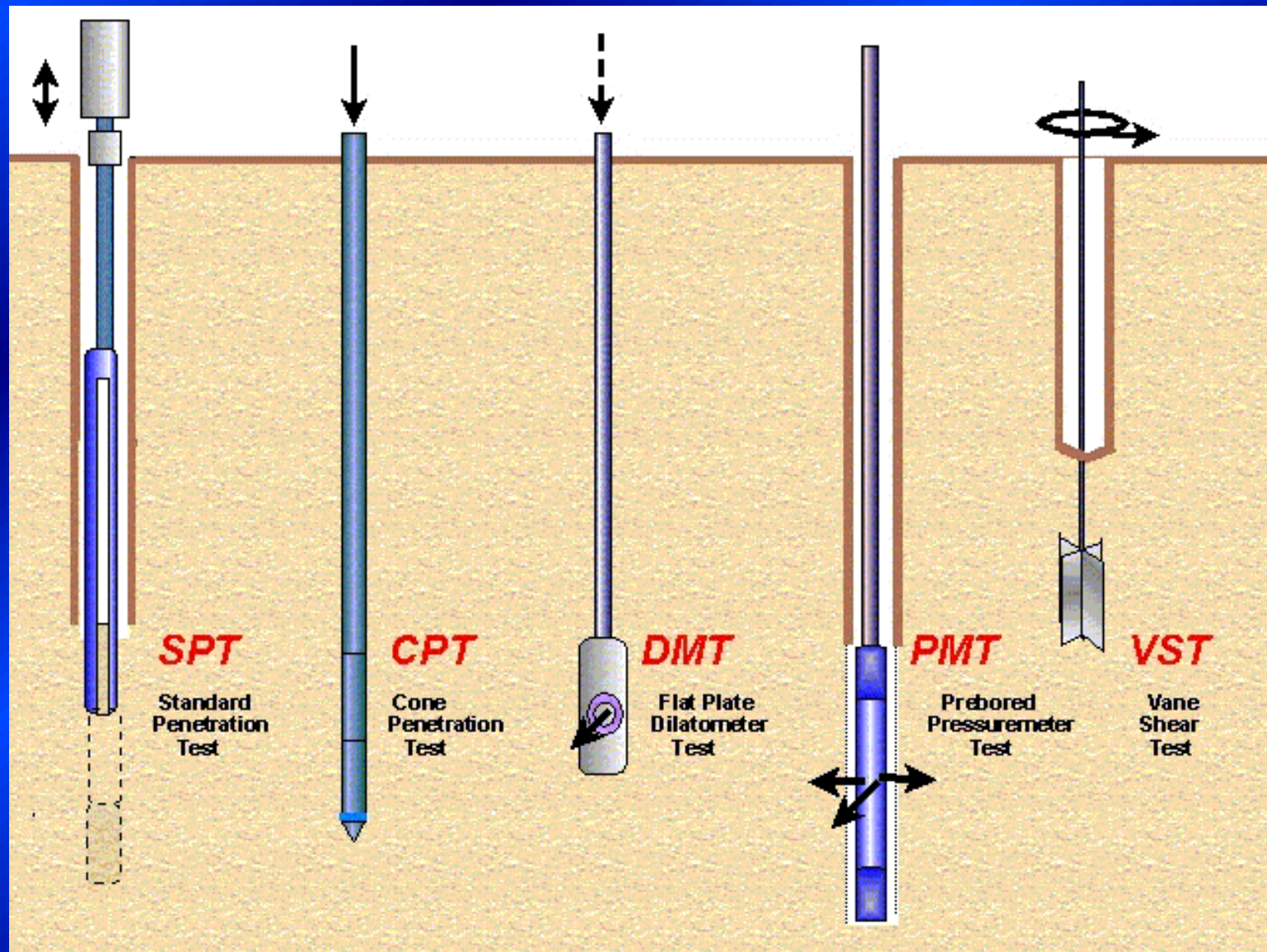


Standard Penetration Test
 Texas Penetration Test
 Vane Shear Test
 Pressuremeter Test
 Cone Pressuremeter
 Dilatometer Test
 Screw Plate Test
 K_0 Stepped Blade
 Swedish Weight Sounding
 Hydraulic Fracture
 Borehole Shear Test

Total Stress Cell
 Freestand Torsional Shear
 Cone Penetration Test
 Piezocone Penetration
 Resistivity Piezocone
 Seismic Cone
 Seismic Flat Dilatometer
 T-Bar Penetrometer
 Ball Penetrometer
 Plate Penetrometer
 Plate Load Test

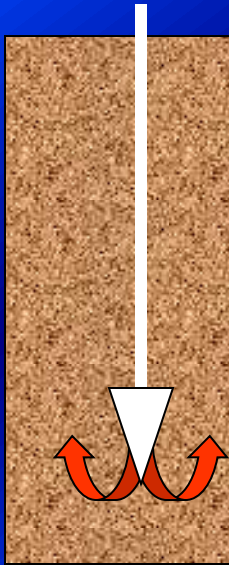
Suspension Logger
 Crosshole Geophysical Test
 Downhole Test
 Spectral Analysis of Surface Waves
 Modal Analysis (Rayleigh Waves)
 Continuous Surface Waves
 Standard Penetration Test with Torque
 Large Penetration Test
 PiezoProbe Test
 Seismic Piezocone Pressuremeter
 Helix Probe Test

ENSAIOS MAIS USUAIS

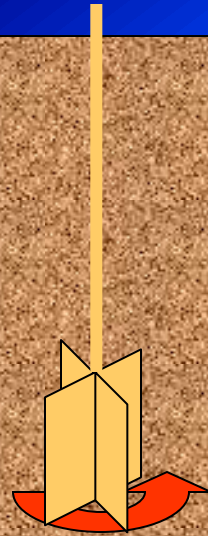


Tipos de Ensaio in Situ a Serem Abordados em Aula

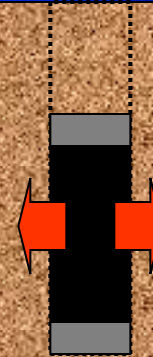
Deslocamento



Cisalhamento



Expansão de Cavidade



Cone Penetrométrico
Piezocone

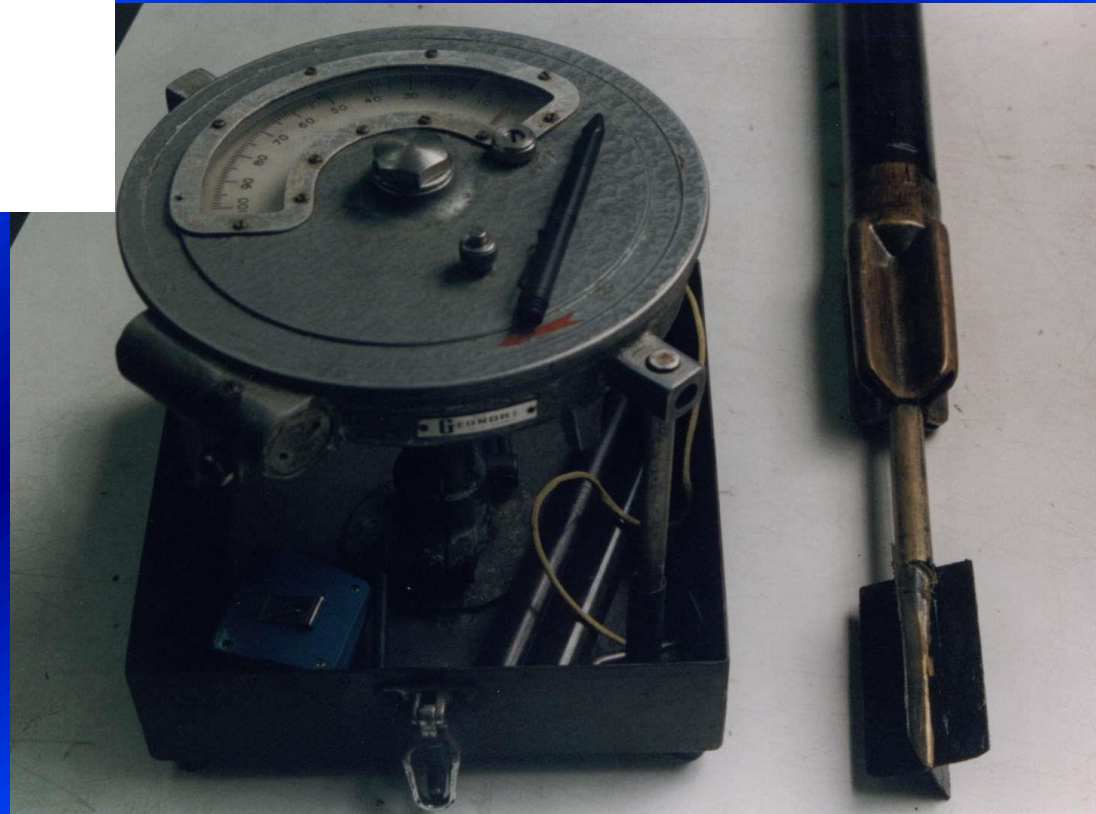
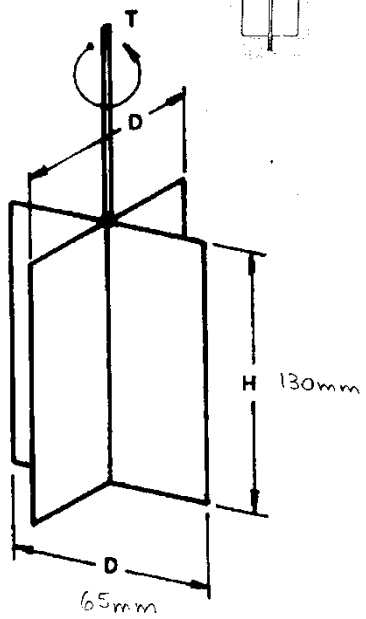
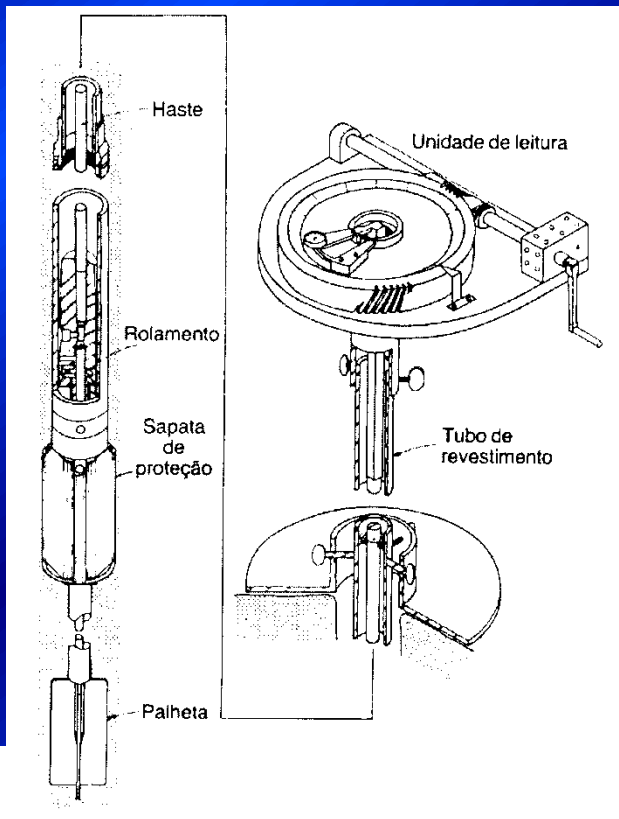
Vane Test / Palheta

Pressiômetro
Dilatômetro

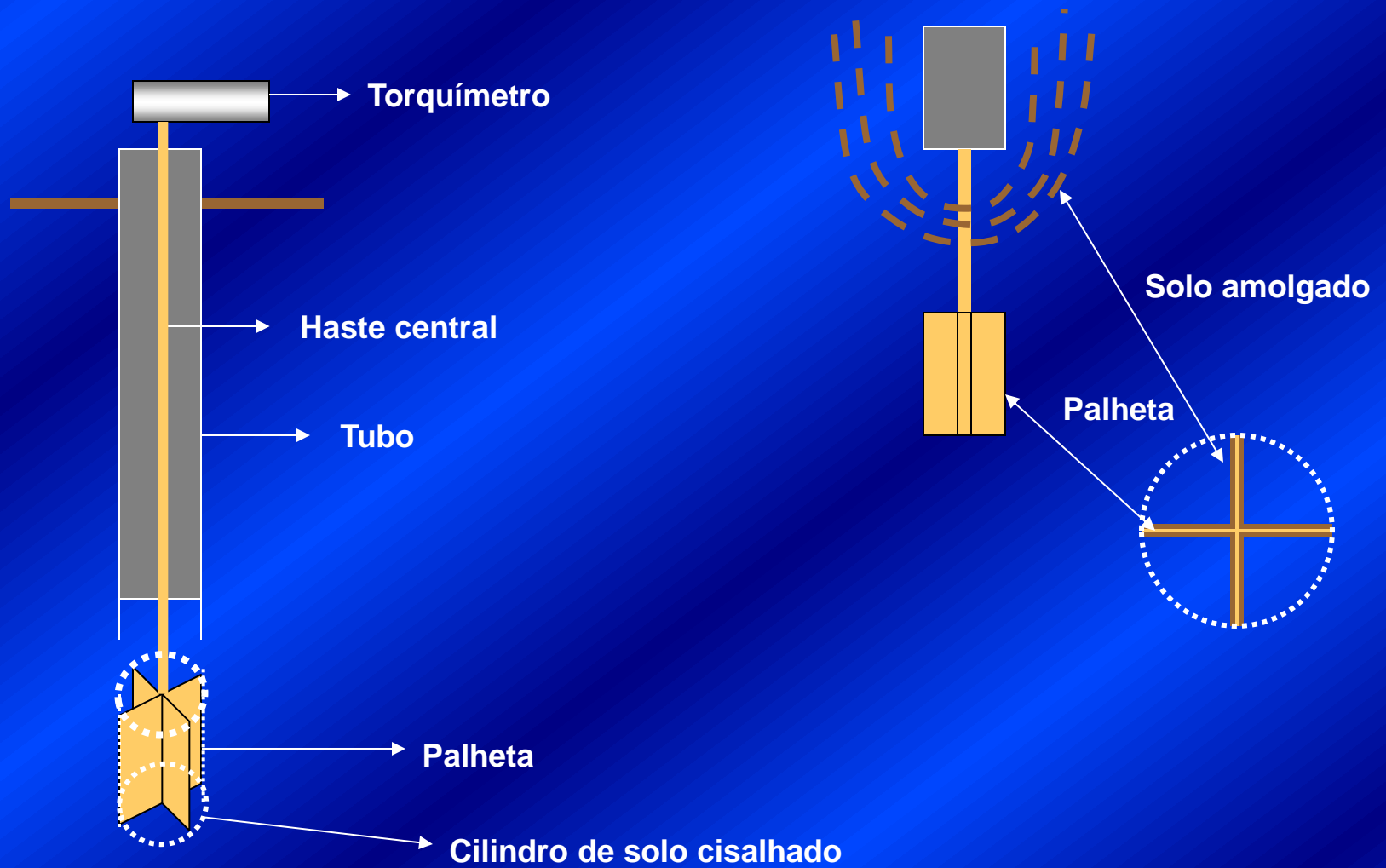
Ensaio de Palheta ou “Vane Test”

- Envolve a medição “in situ” do momento torsor requerido para causar a ruptura por cisalhamento de uma superfície cilíndrica por meio de uma palheta (foto).
- A informação obtida pode ser utilizada para se obter a resistência não drenada (s_u) de solo argiloso mole.
- Utilizado em solos argilosos moles.
- O método consiste em se introduzir em solo argiloso a palheta (seção transversal em cruz) com quatro lâminas, rotacionando-a em velocidade rápida (6°/min), para não ocorrer drenagem, registrando-se o torque e a rotação induzida.



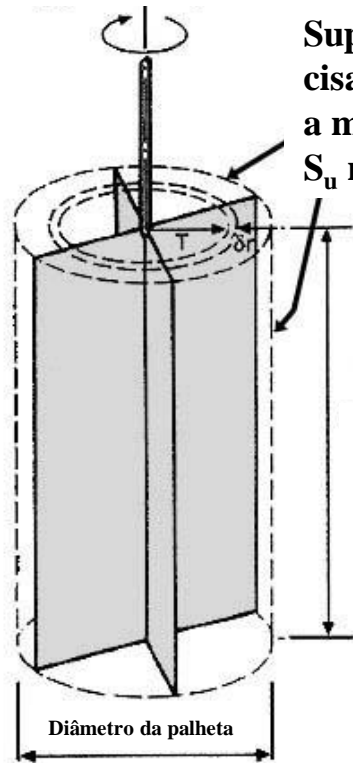


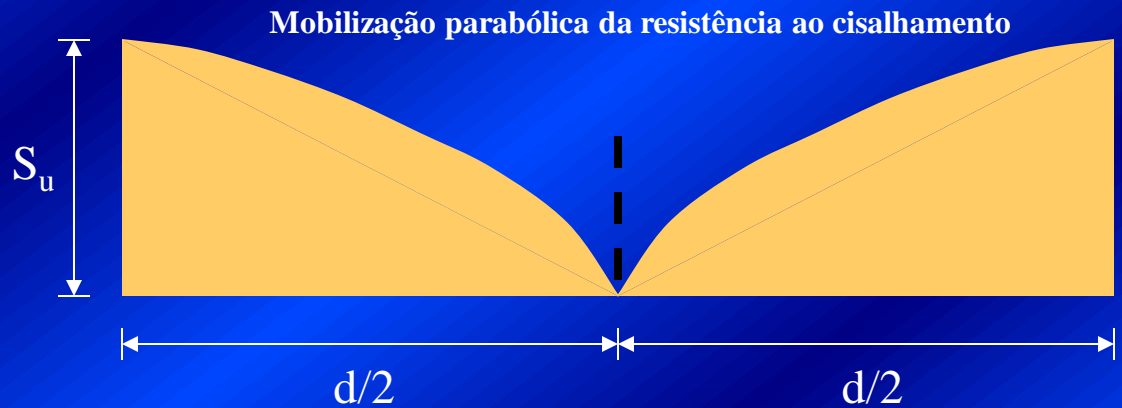
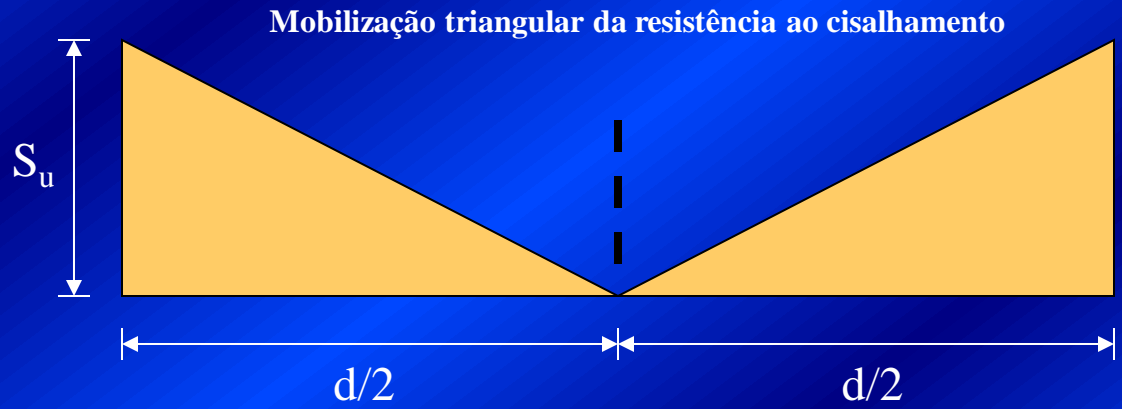
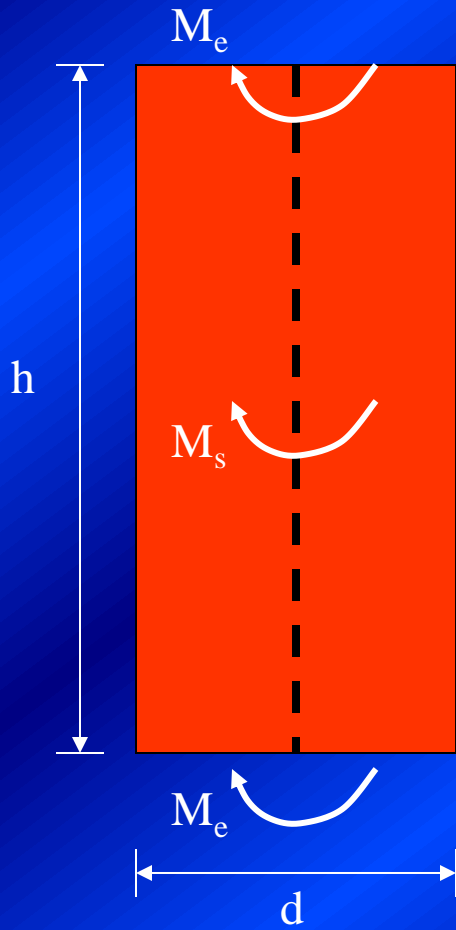
Ensaio de Palheta ou “Vane Test”



Ensaio de Palheta ou “Vane Test”

Torque aplicado, T





$$T = M_s + M_e + M_e$$

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

“VANE TEST”

A resistência não drenada é obtida pela expressão:

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

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

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

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

Para que a resistência calculada seja o s_u , é fundamental que a velocidade de rotação seja rápida para não permitir drenagem; isto acontece em argilas, mas cuidado em siltes argilosos

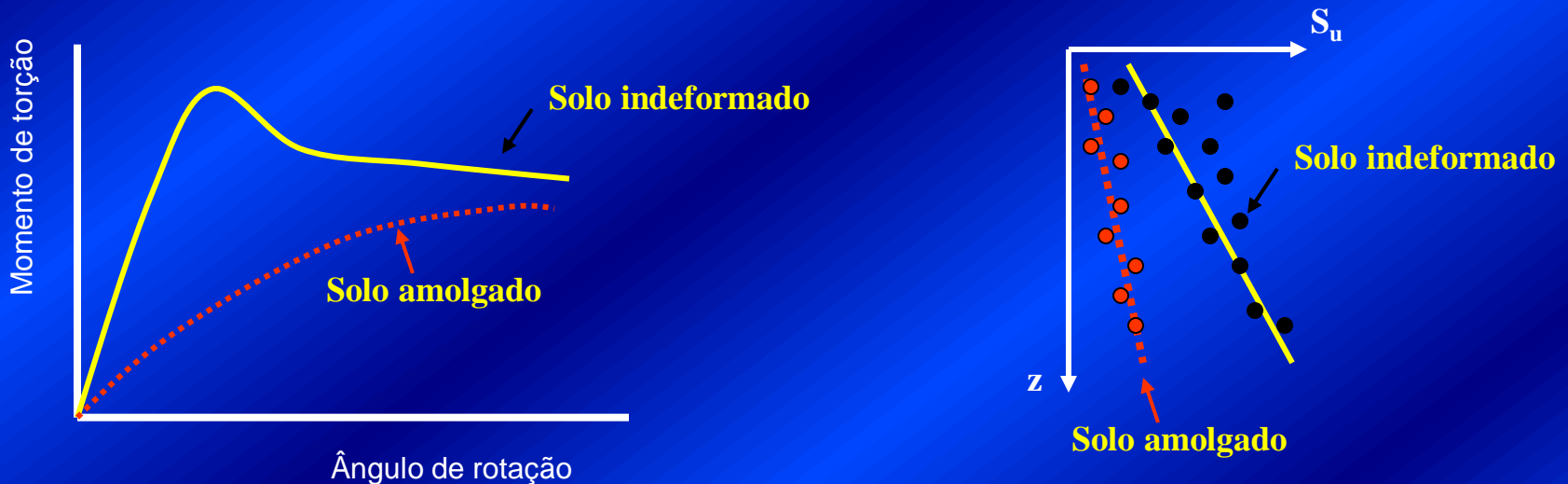
“VANE TEST”

Problemas na execução e interpretação:

- Amolgamento do solo
- Ruptura progressiva
- Anisotropia
- Correção dos valores interpretados, por exemplo Bjerrum

Resistência residual

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



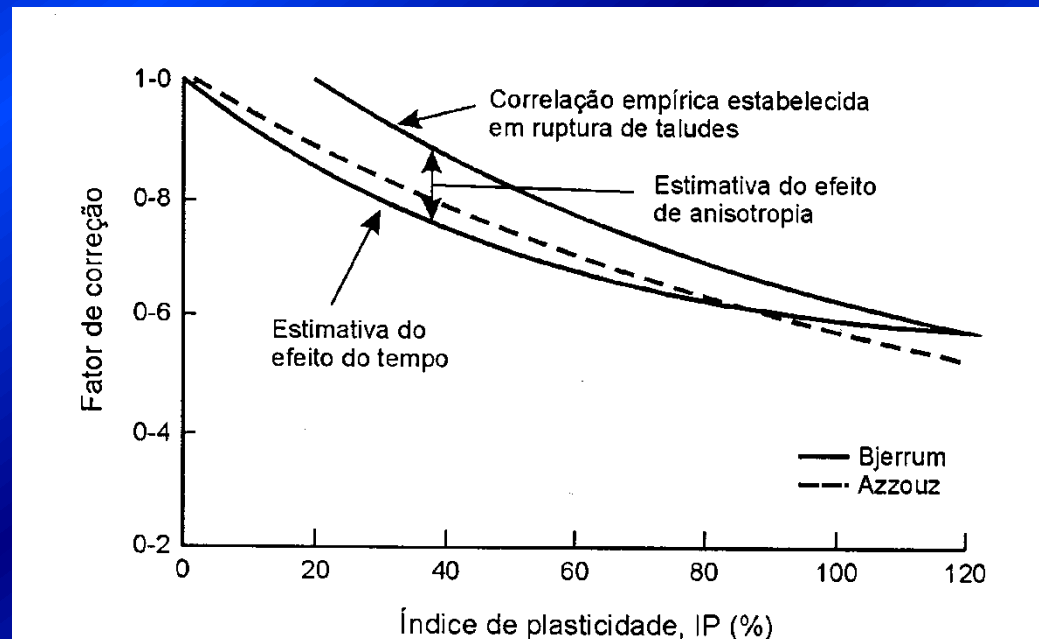
“VANE TEST”

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:

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

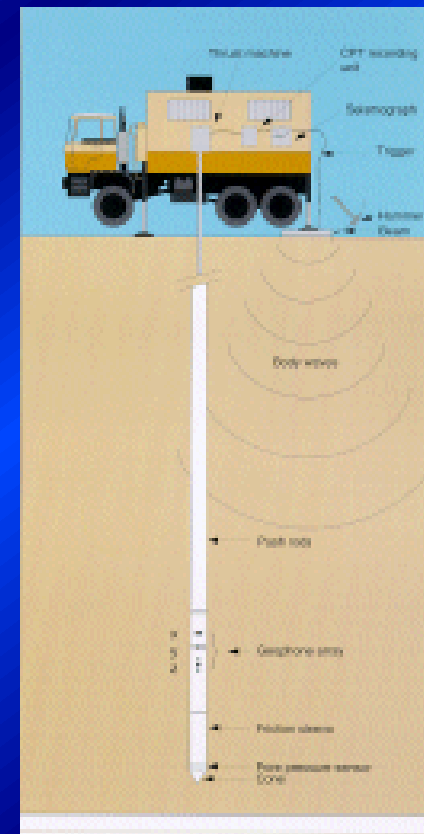


Fator de correção empírico da relação entre a resistência de ruptura retroanalísada e do ensaio de palheta (Torstensson, 1977).

Ensaio de Cone – Piezocone CPTU

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 gerada pela cravação é medida, e provas de dissipação desta sobrepressão realizadas em profundidades pré-determinadas.

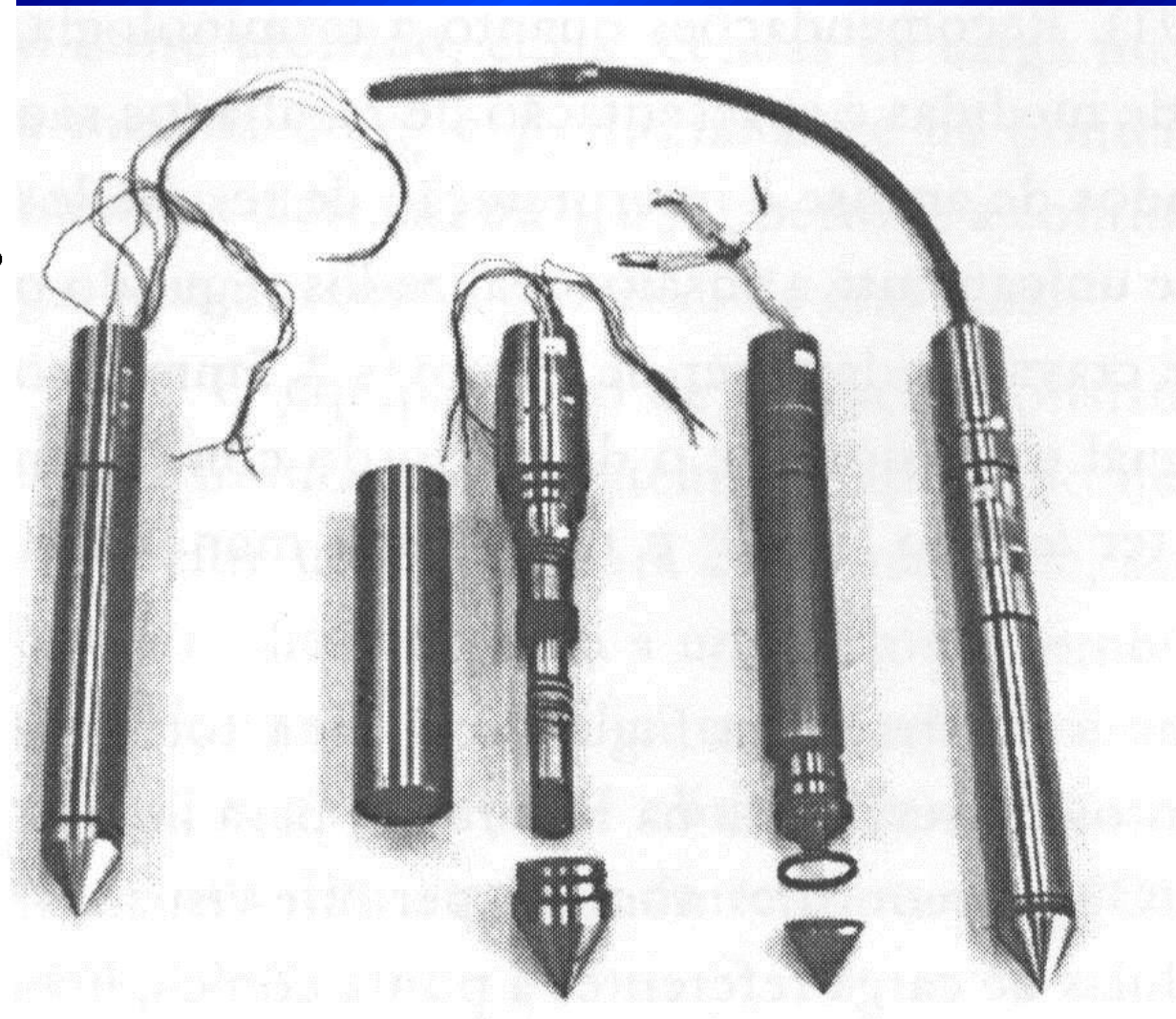
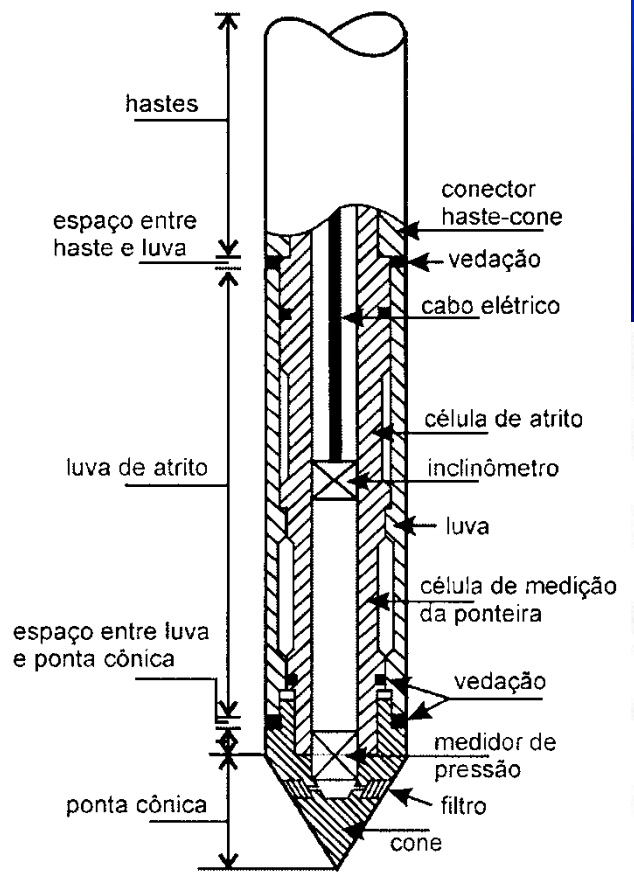


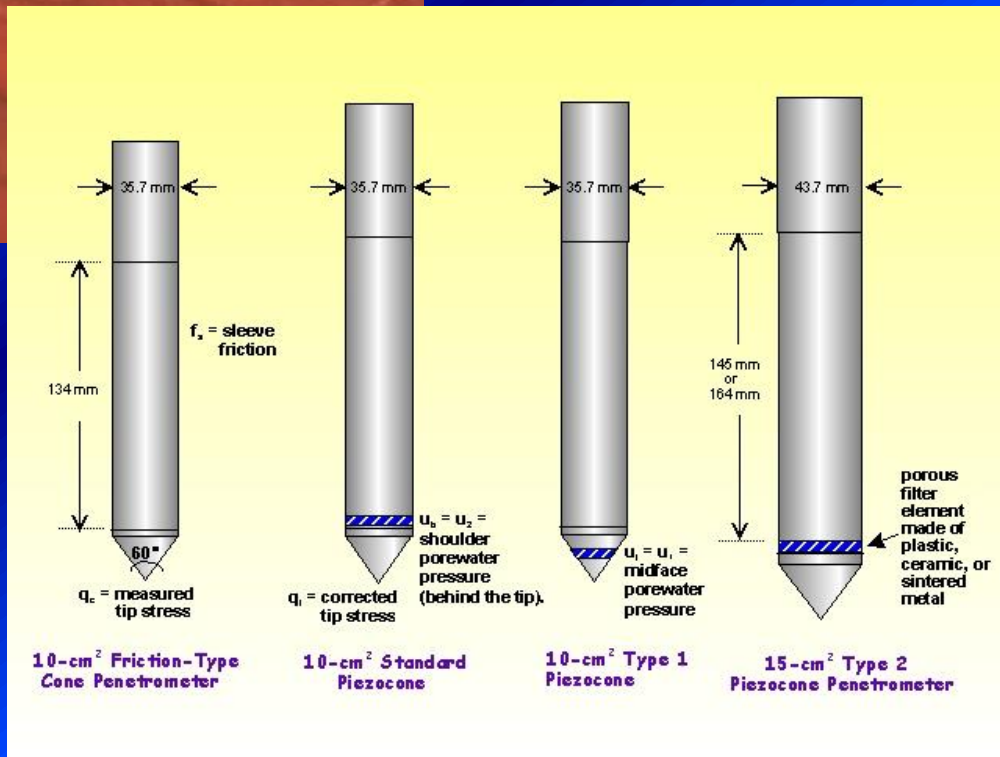
Ensaio de Piezocone

Aspectos importantes

- Relações entre atrito lateral (f_s), pressão neutra (u) e resistência de ponta (q_c) contribuem para a identificação indireta do tipo de solo do perfil.
- 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).







10-cm² Friction-Type Cone Penetrometer

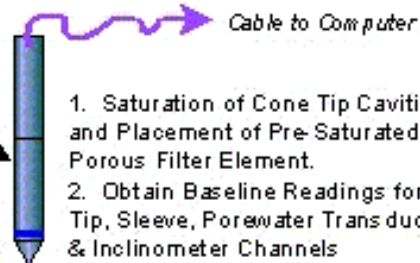
10-cm² Standard Piezocone

10-cm² Type 1 Piezocone

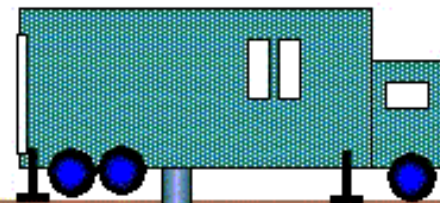
15-cm² Type 2 Piezocone Penetrometer



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

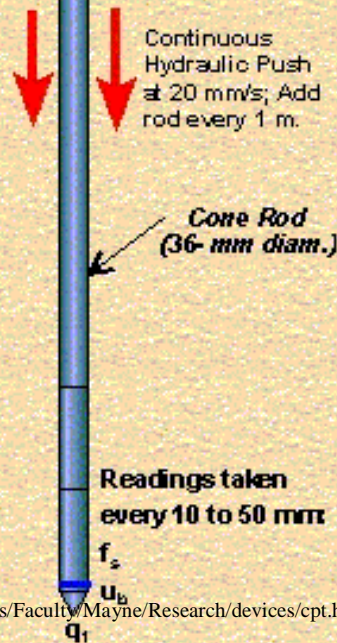
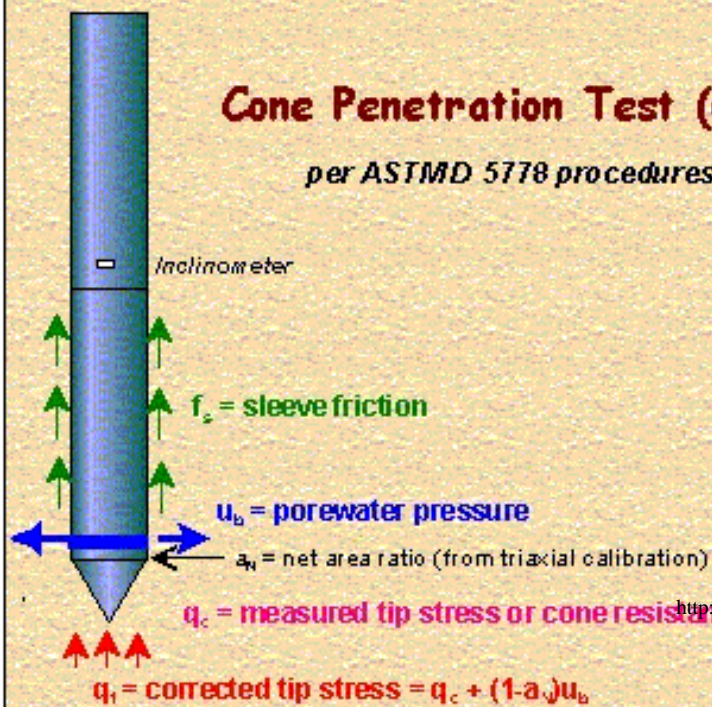


1. Saturation of Cone Tip Cavities and Placement of Pre-Saturated Porous Filter Element.
2. Obtain Baseline Readings for Tip, Sleeve, Porewater Transducer, & Inclinometer Channels



Cone Penetration Test (CPT)

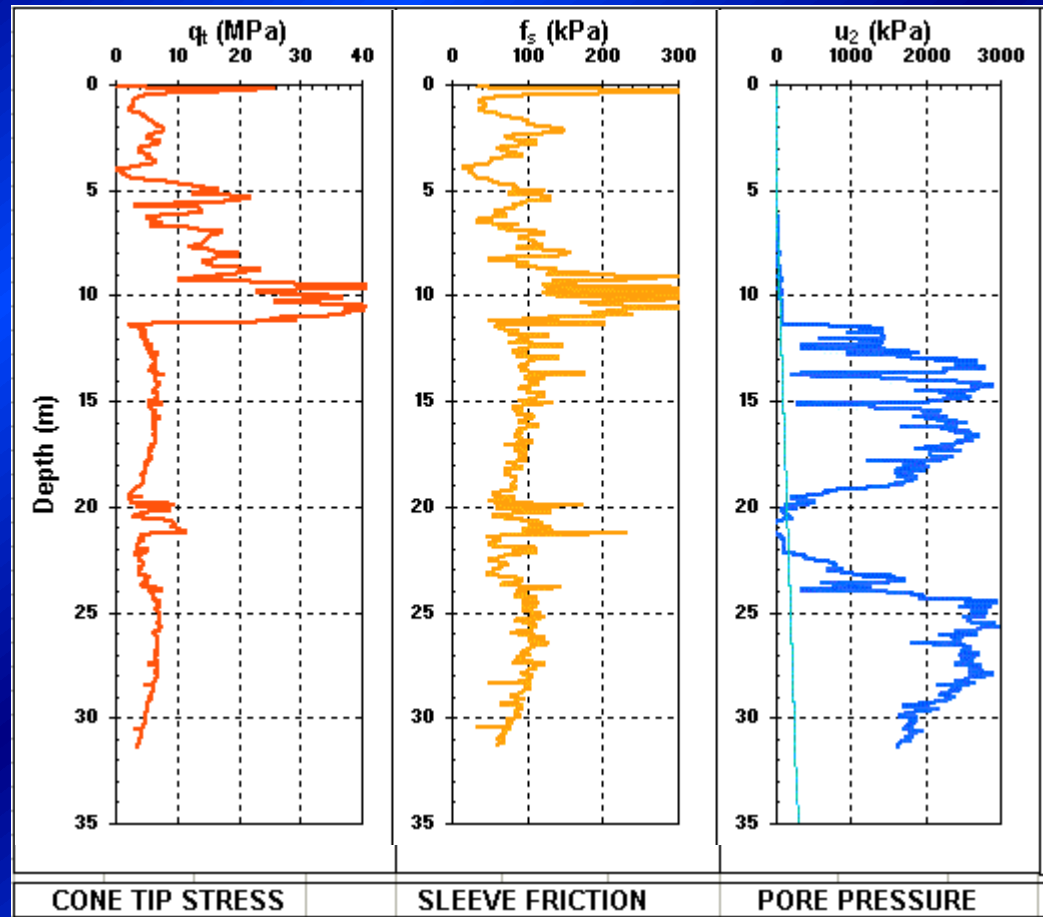
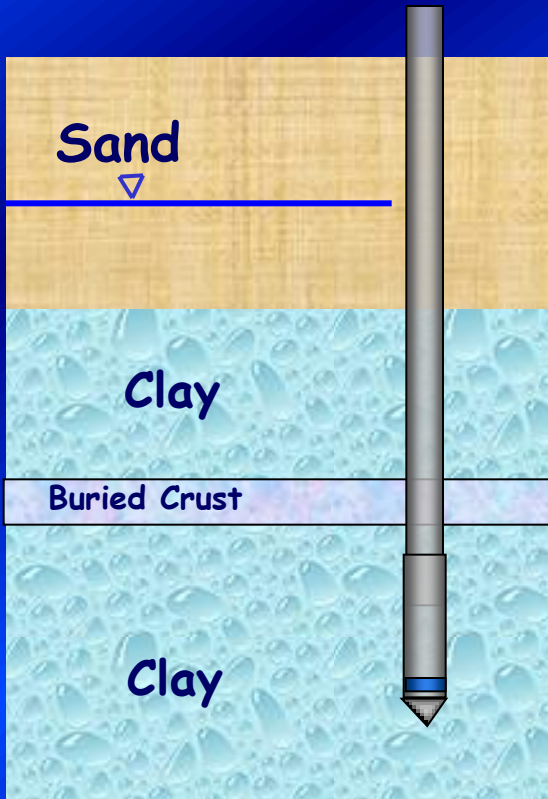
per ASTM D 5778 procedures



Cone Penetration Testing (CPT)

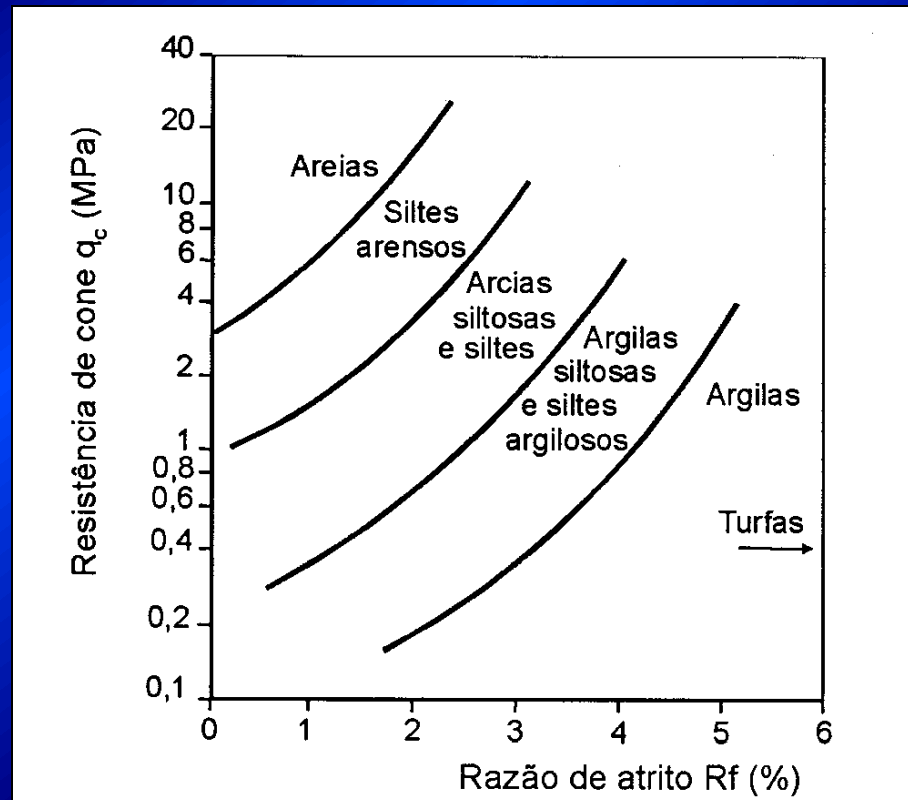
Real-Time readings in computer screen

Penetration at 2 cm/s

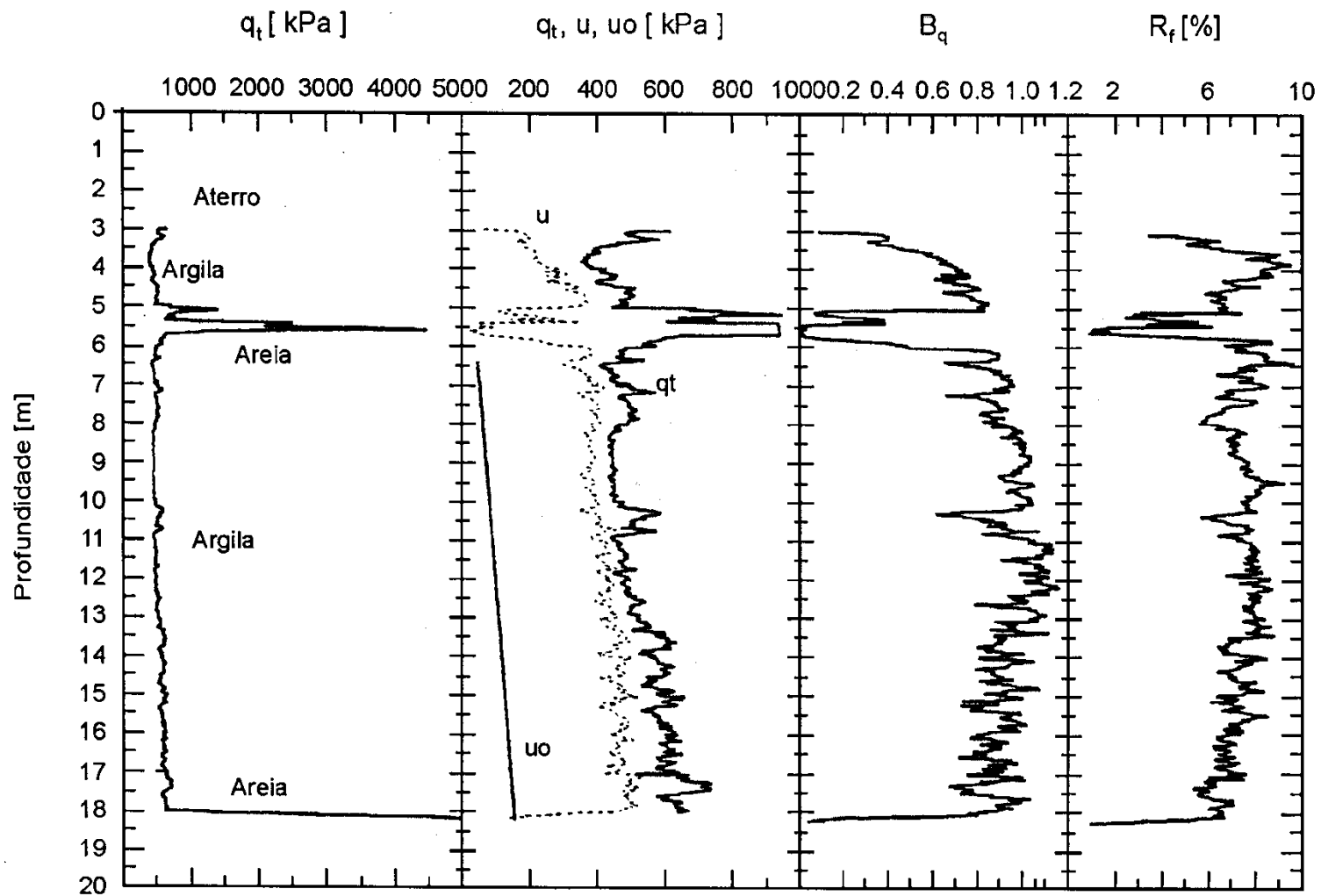


A razão de atrito (R_f) é utilizada para a classificação indireta dos tipos de solos

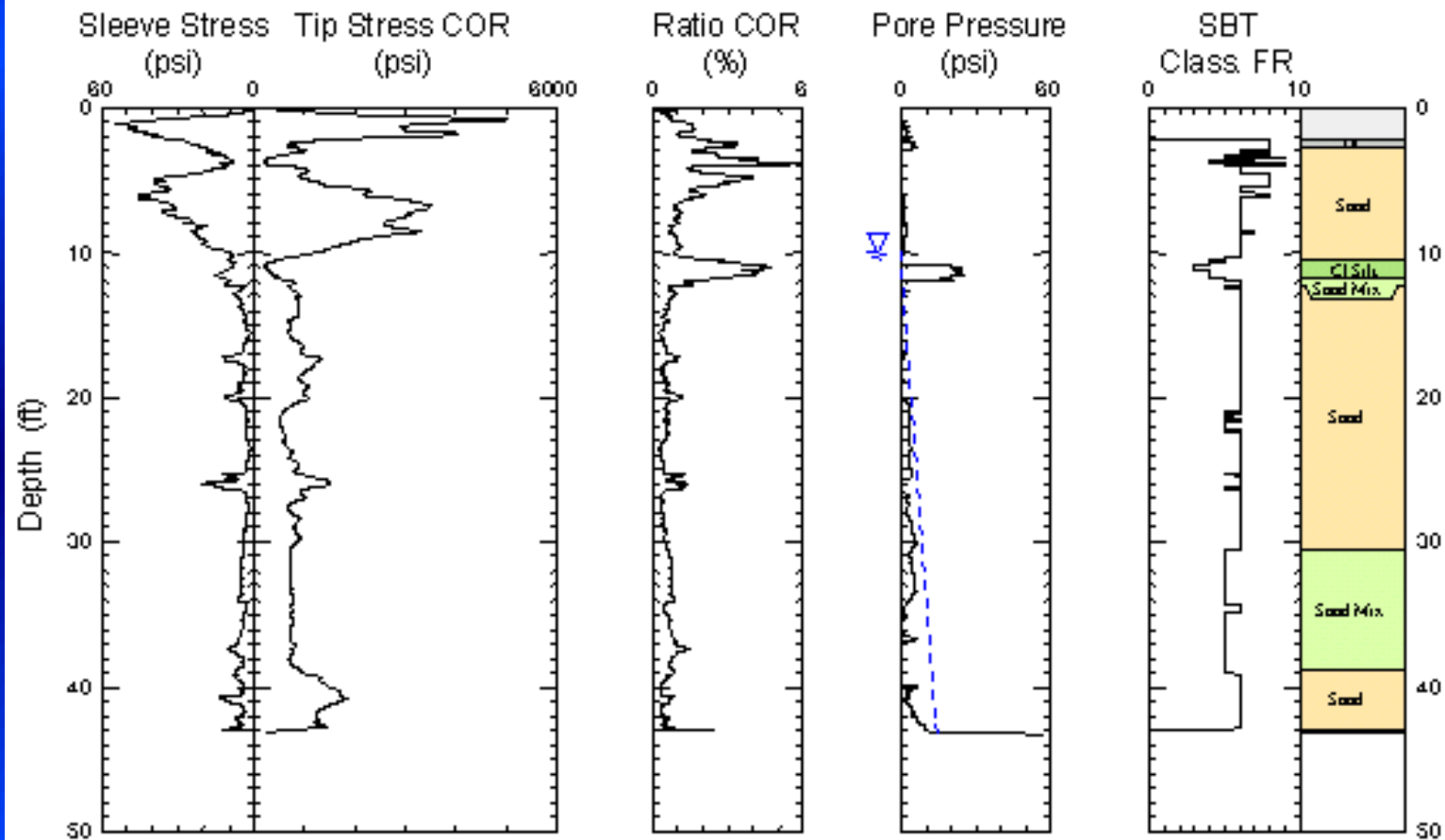
$$R_f = \frac{f_s}{q_c}$$



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



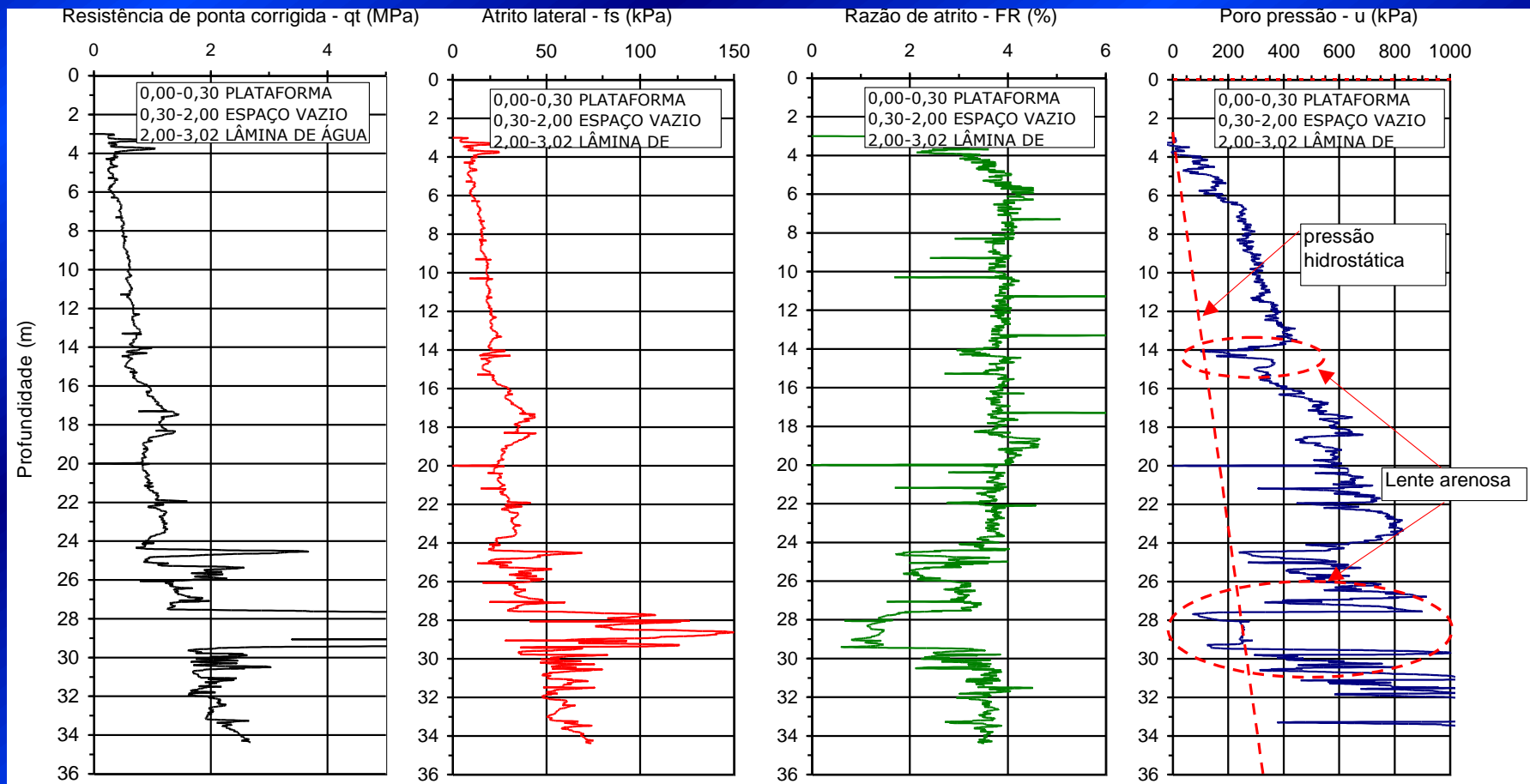
Resultado de um ensaio de piezocone na BR101 em Santa Catarina (Schnaid, 2000).



Maximum Depth: 43.22 (ft)

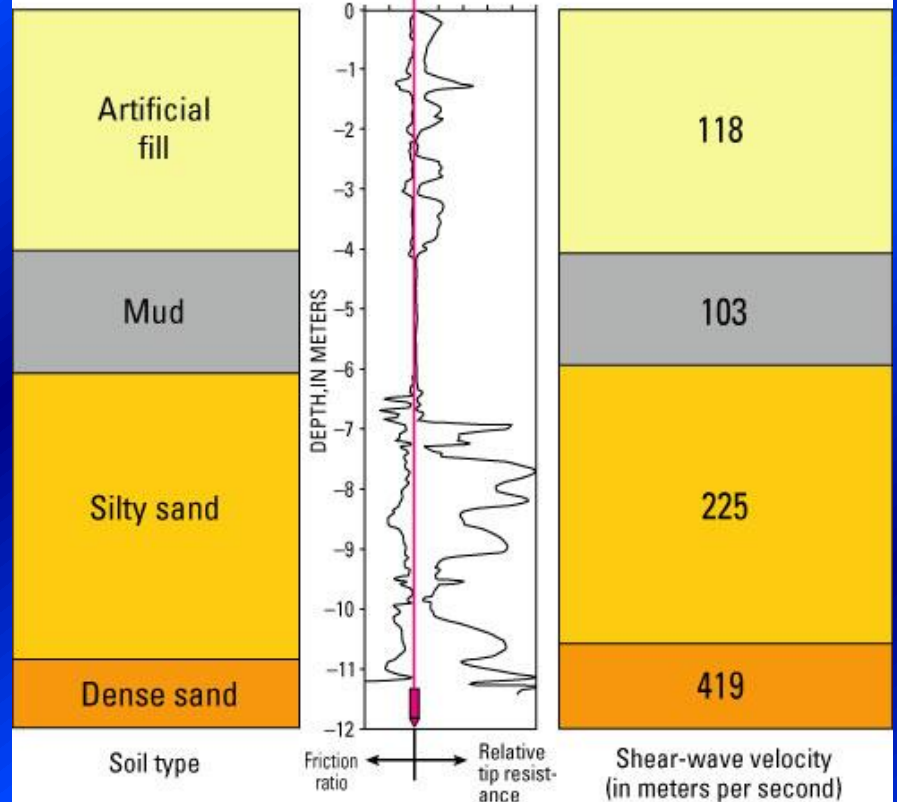
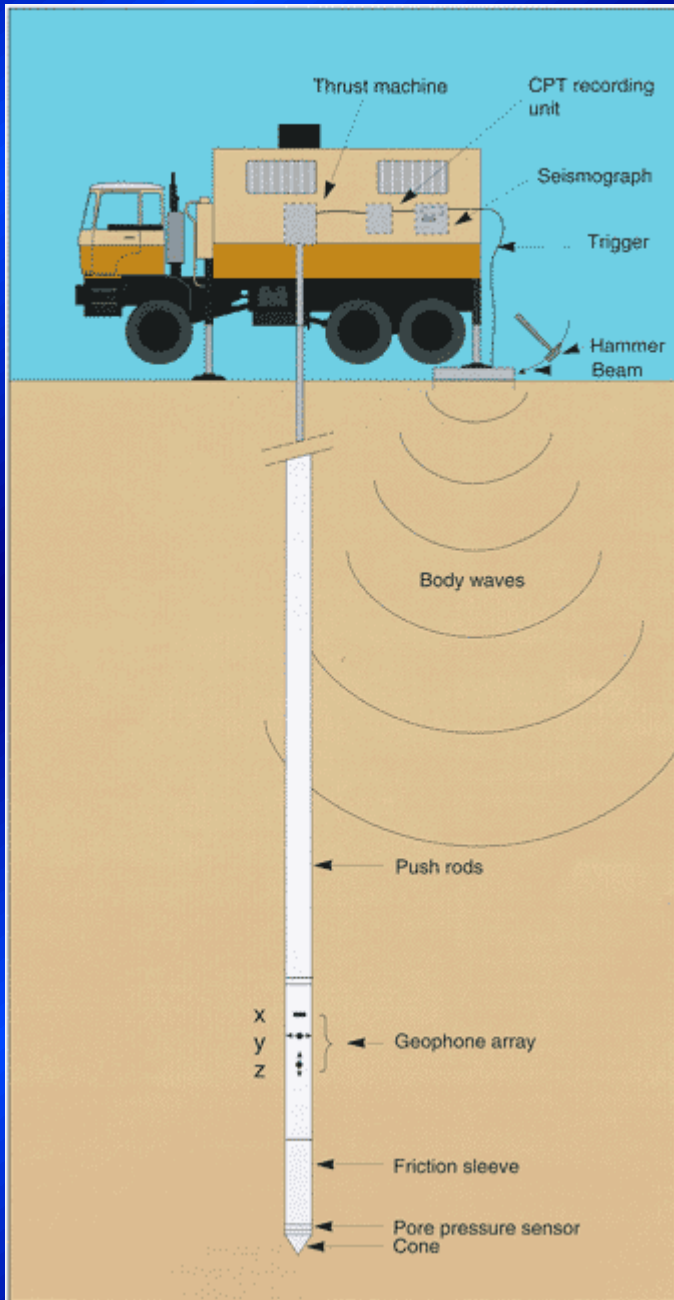
Class FR: Friction Ratio Classification (Ref: Robertson 1990)

▽ Estimated Phreatic Surface



Resultado de um ensaio de piezocone em Guarujá (arquivo pessoal).

SCPT_u



Ensaio de Piezocone

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

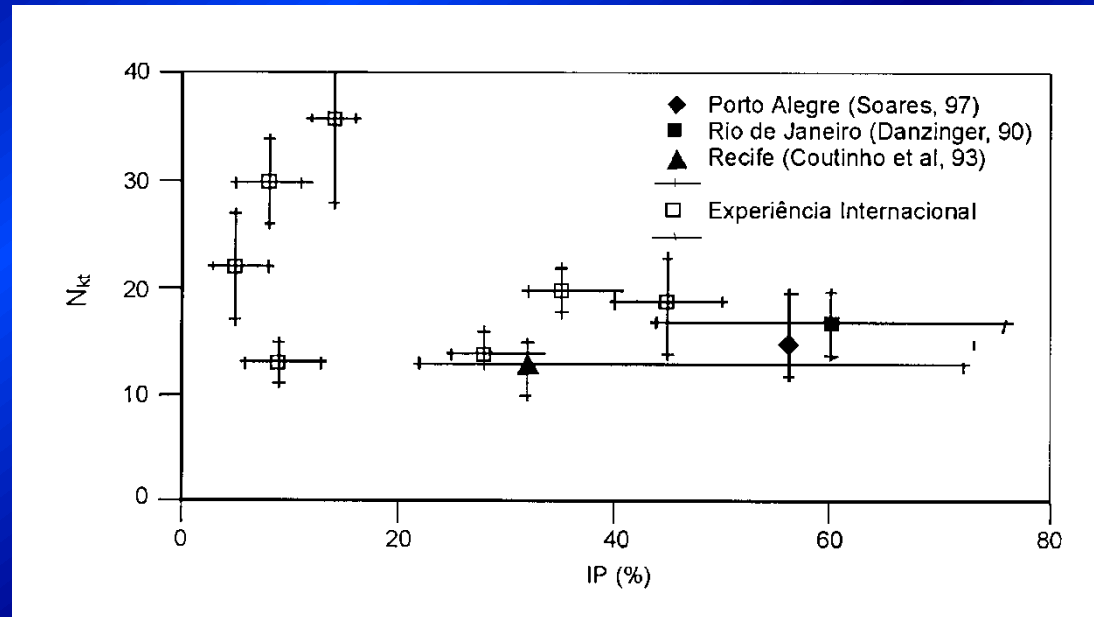
Resistência ao cisalhamento não drenada

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

q_c – resistência de ponta do cone

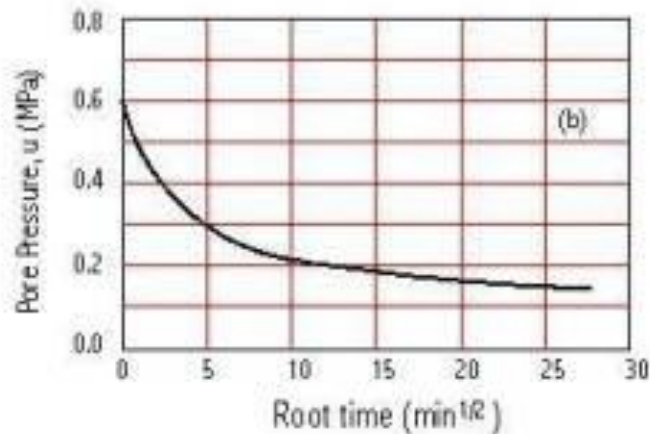
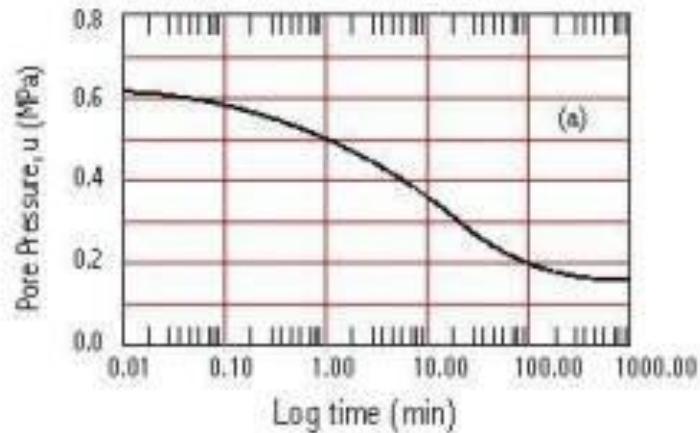
σ_{vo} – tensão vertical "in situ"

N_k – fator de capacidade de carga

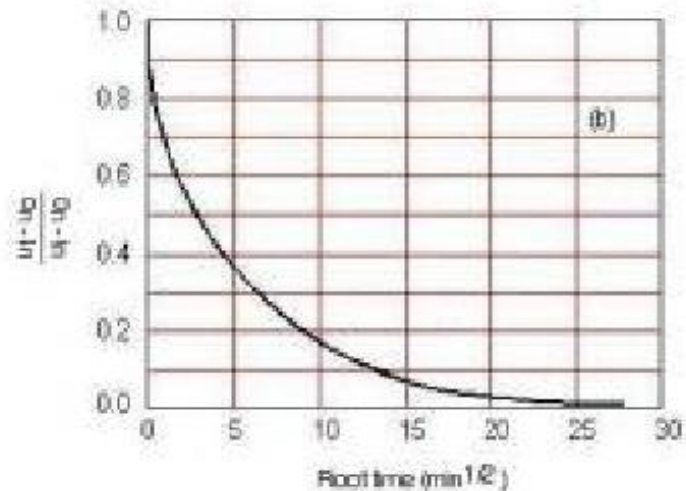
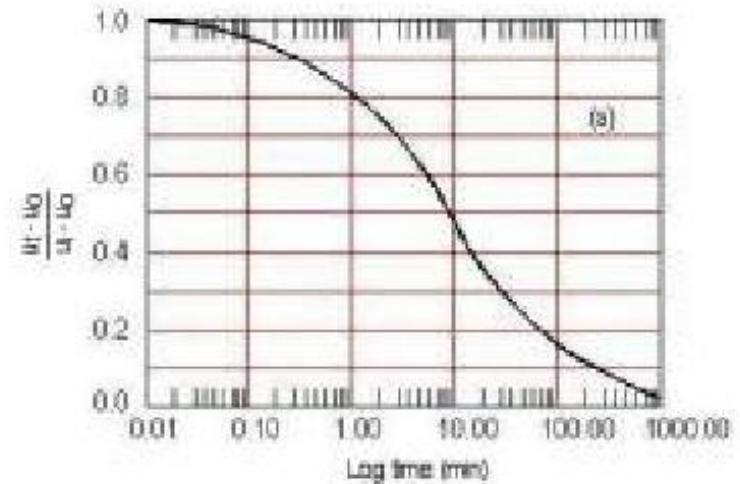


Para melhor determinar o valor de N_k é recomendável fazer ensaios Vane próximos – conceito de ilhas de investigação

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 de Dissipação

Coeficiente de Adensamento Horizontal (c_h)

$$c_h = \frac{R^2 \cdot T^* \cdot \sqrt{I_r}}{t}$$

onde:

R : raio médio do piezocone, igual a 17,85mm;

T^* : fator tempo adimensional para uma dada percentagem de dissipação;

I_r : índice de rigidez do solo ensaiado = G/su ;

t : tempo de dissipação necessário para uma dada percentagem de dissipação.

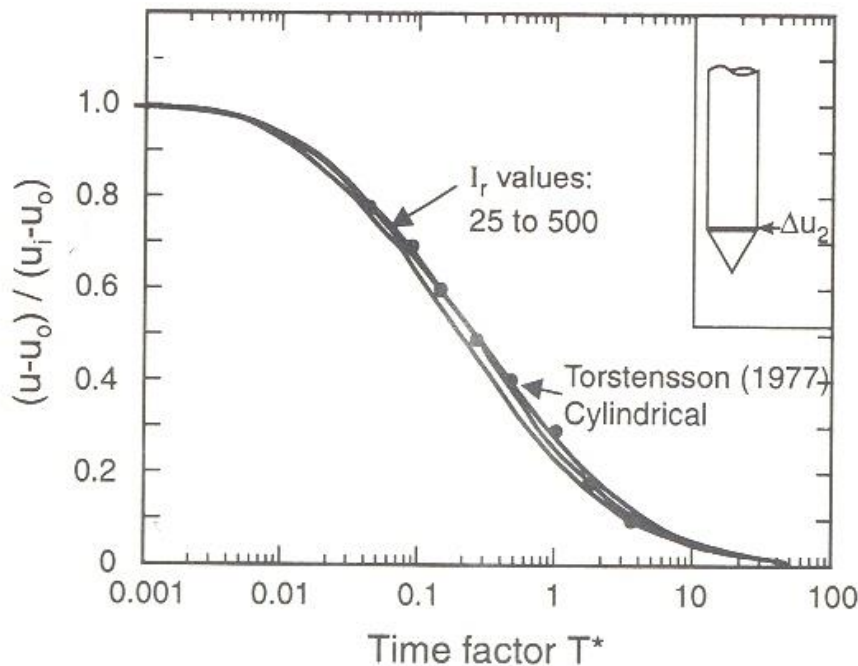


Figure 5.38 Theoretical solution of normalized pore pressure dissipation vs T^* (after Teh and Houlsby, 1991).

Soluções teóricas para definição de T^* , em função da percentagem de dissipação (Apud Lunne et al, 1997).

Os valores de T^* são obtidos a partir de gráficos

Ensaio de Dissipação

Coeficiente de Adensamento Horizontal (c_h)

$$c_h = \frac{R^2 T^* \sqrt{I_r}}{t}$$

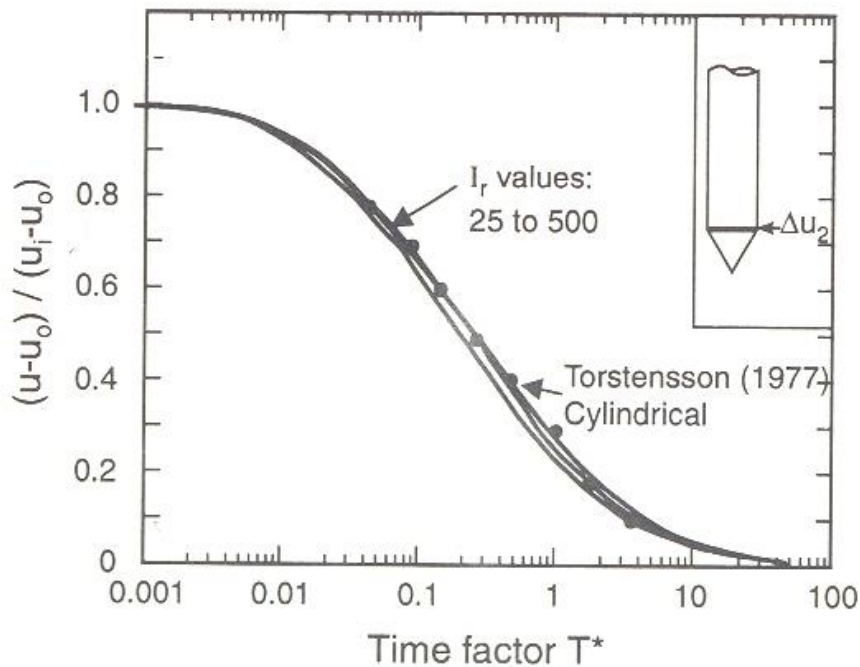


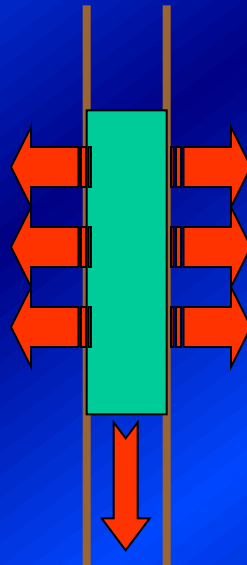
Figure 5.38 Theoretical solution of normalized pore pressure dissipation vs T (after Teh and Houlsby, 1991).

Valores de T^* para outras posições da pedra porosa para registro de u

1 - u (%)	Posição do filtro				
	Vértice do cone	Face do cone	Base do cone	5 raios acima da base	10 raios acima da base
20	0,001	0,014	0,038	0,294	0,378
30	0,006	0,032	0,078	0,503	0,662
40	0,027	0,063	0,142	0,756	0,995
50	0,069	0,118	0,245	1,110	1,460
60	0,154	0,226	0,439	1,650	2,140
70	0,345	0,463	0,804	2,430	3,240
80	0,829	1,040	1,600	4,100	5,240

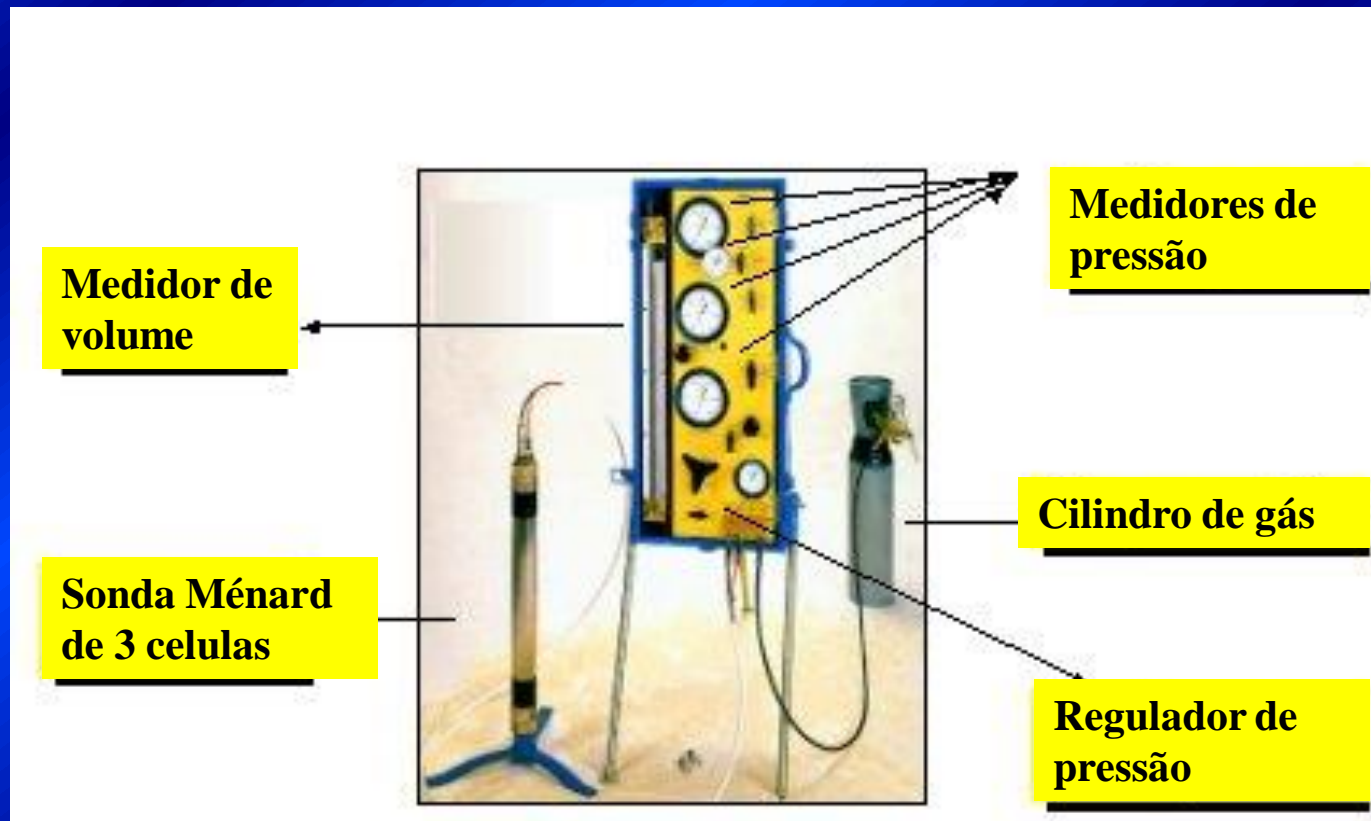
Ensaio Pressiométrico

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



Ensaio Pressiométrico

- Pressiômetro em perfurações (Ménard).



Ensaio Pressiométrico

- Pressiômetro autoperfurante.



Ensaio Pressiométrico

- Pressiômetro cravado.

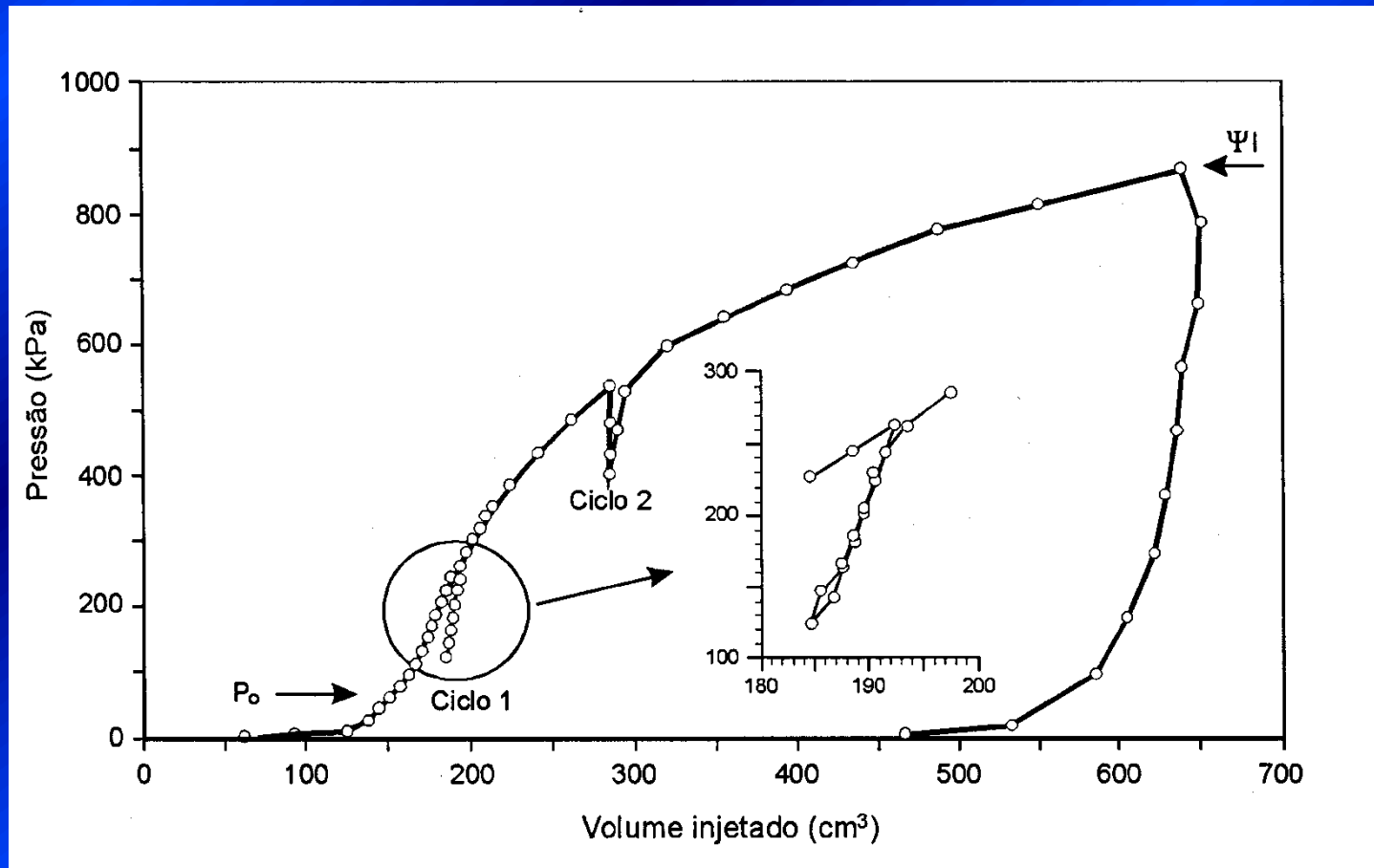


Ensaio Pressiométrico

- 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

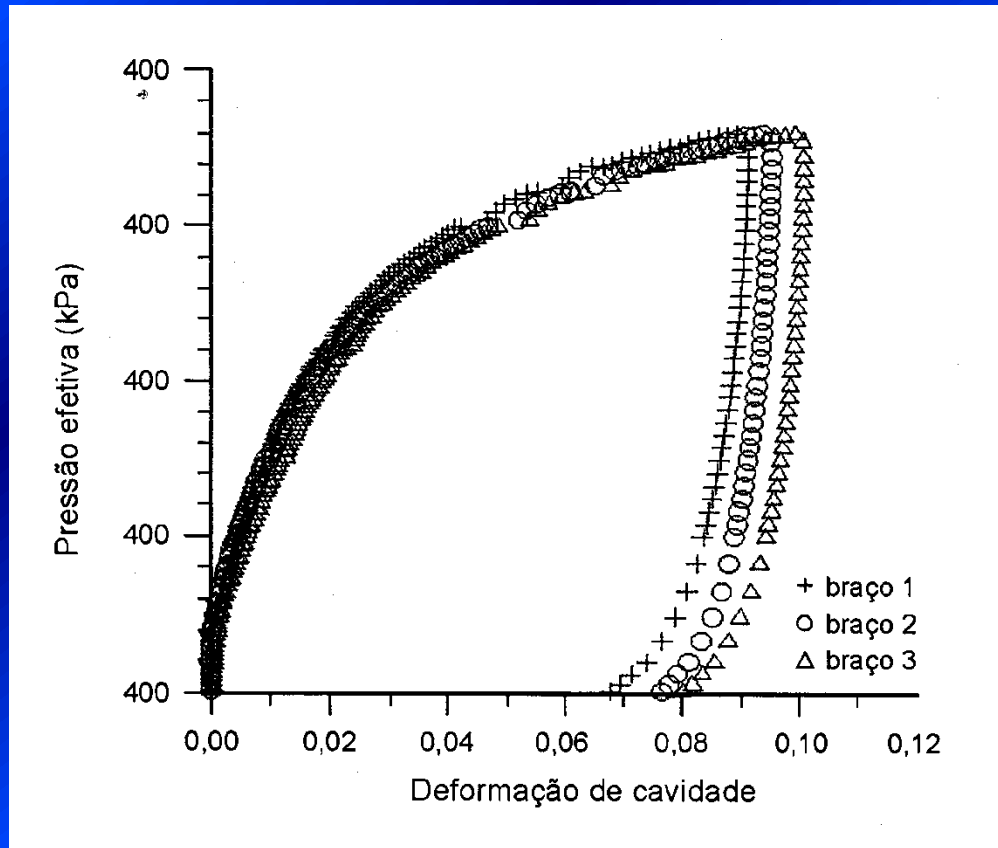
Curva Típica de um ensaio Ménard



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



CAMKOMETER

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

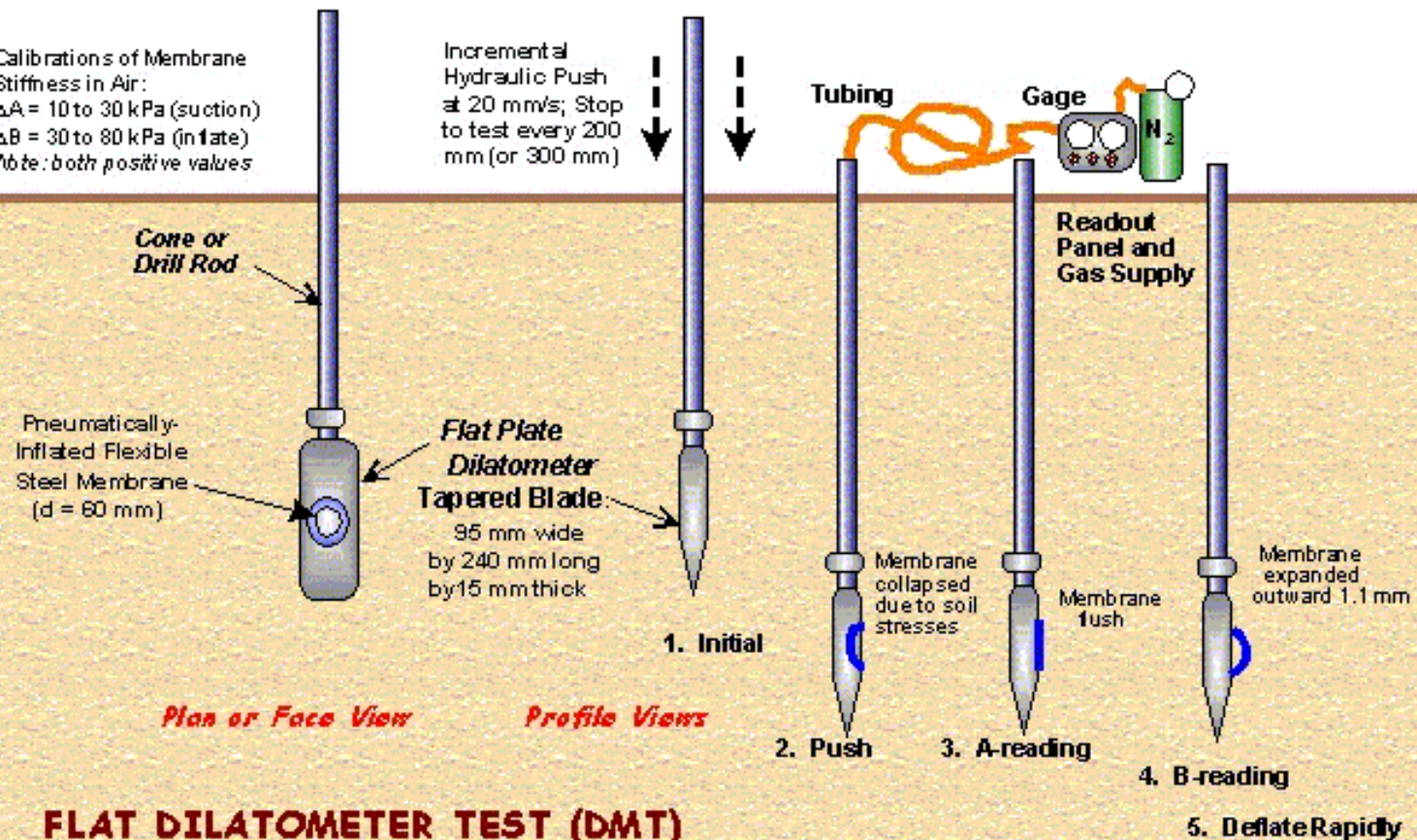
- Parâmetros (autoperfurante)
 - **Módulo de deformabilidade**
 - **Estado de tensão no repouso**
 - **Resistência ao cisalhamento não drenada**
 - **Ângulo de atrito**

Ensaio Dilatométrico - DMT

- Concebido por Marchetti (1975)
- Patenteado em 1977 na Itália
- Normalizado nos EUA e Europa
- Estimativa semi-empírica: K_0 , E , OCR , s_u , ϕ'
- Estimativa do tipo de solo
- Brasil: em expansão

Calibrations of Membrane Stiffness in Air:
 $\Delta A = 10$ to 30 kPa (suction)
 $\Delta B = 30$ to 80 kPa (inflate)
Note: both positive values

Incremental Hydraulic Push
 at 20 mm/s; Stop
 to test every 200 mm (or 300 mm)



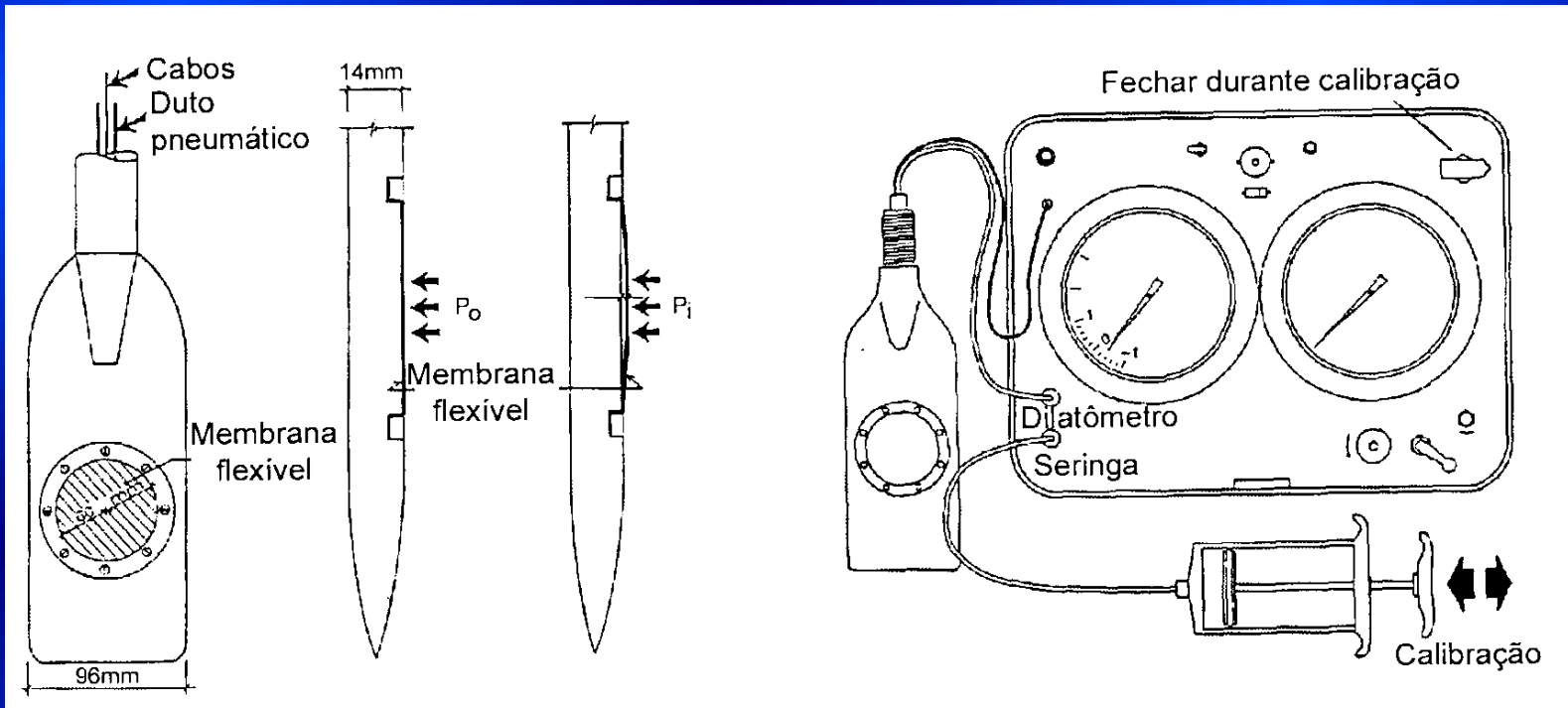
FLAT DILATOMETER TEST (DMT)

p_0 = Lift-off pressure (corrected "A" reading)
 p_1 = Expansion pressure (corrected "B" reading)



DMT - Características

- Lâmina dilatométrica
- Unidade de controle de pressões
- Cabo elétrico-pneumático
- Penetração estática da lâmina (2 a 4 cm/s)
- Penetração interrompida a cada 20 cm para injeção de gás e medidas de pressões



- Medem-se três pressões:

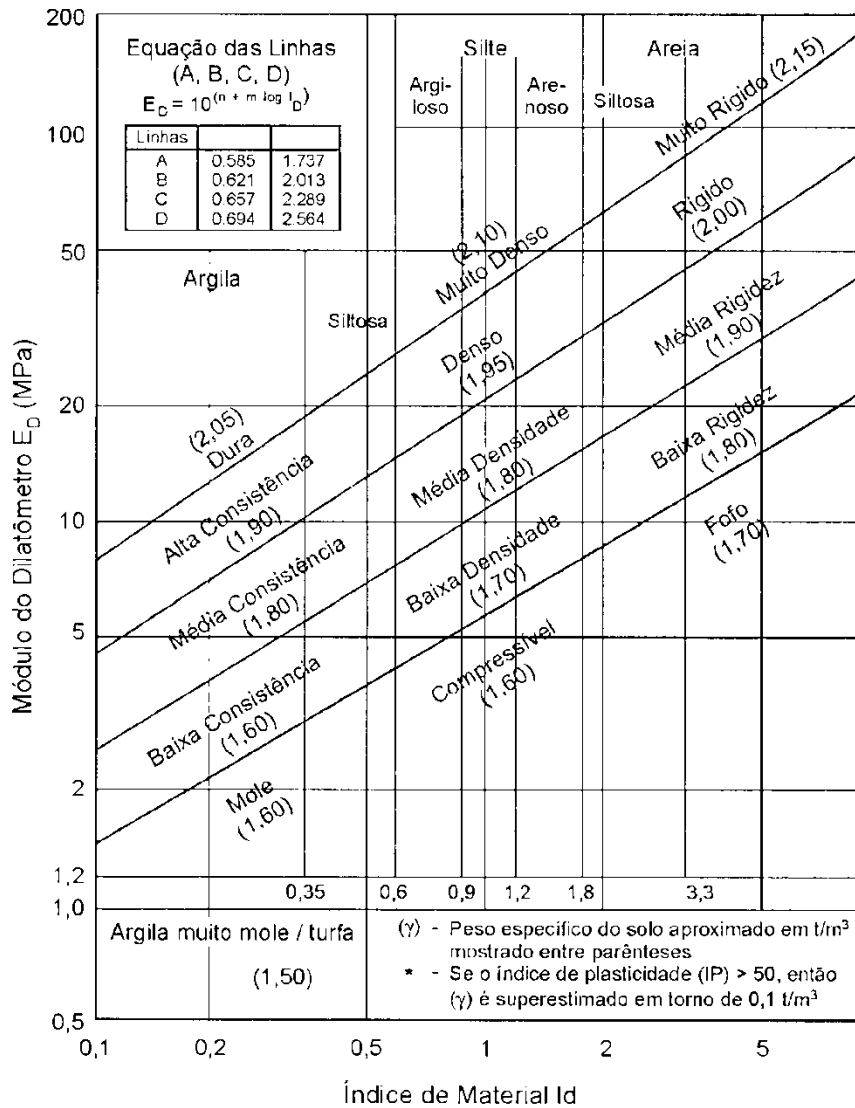
- P₀: pressão p/ desloc. horizontal de 0,5 mm
- P₁: pressão p/ desloc. de 1,1 mm
- P₂: pressão residual p/ desloc. de 0,5 mm (retorno)

DMT - Correlações

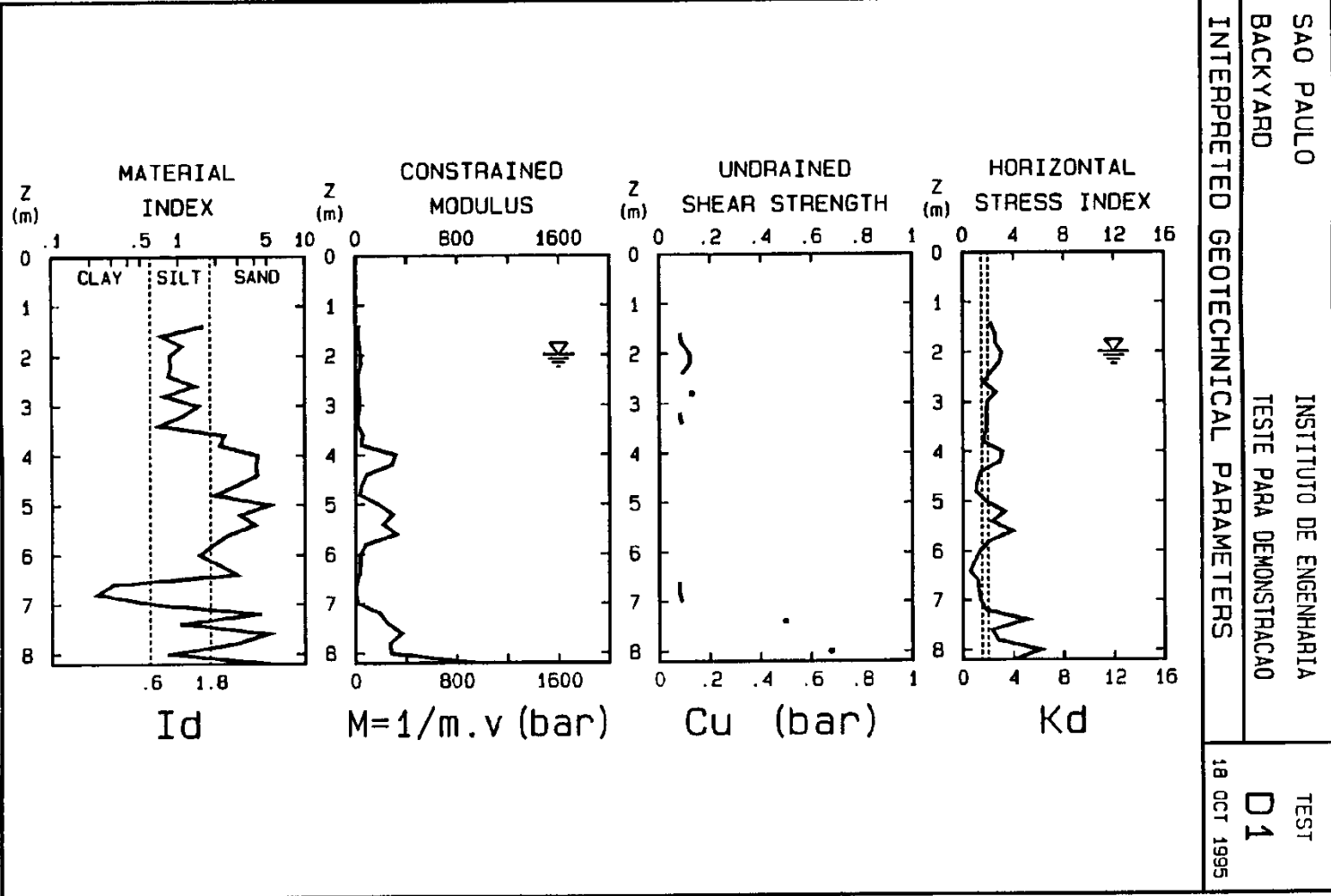
- $P_0 \Rightarrow$ Tensão horizontal in situ (K_0)
- $P_1 - P_0 \Rightarrow$ Módulo de Elasticidade (E)
- $P_2 \Rightarrow$ sobrepressão neutra na cravação

DMT – Índices Dilatométricos

- Módulo dilatométrico $E_d = 34,7 (P1-Po)$
- Índice de material: $I_d = (P1-Po) / (Po-u_o)$
- Índice da tensão horiz.: $K_d = (Po-u_o) / \sigma'_v$



Classificação dos solos (Ed e Id)



SAO PAULO
 BACKYARD
 INTERPRETED GEOTECHNICAL PARAMETERS

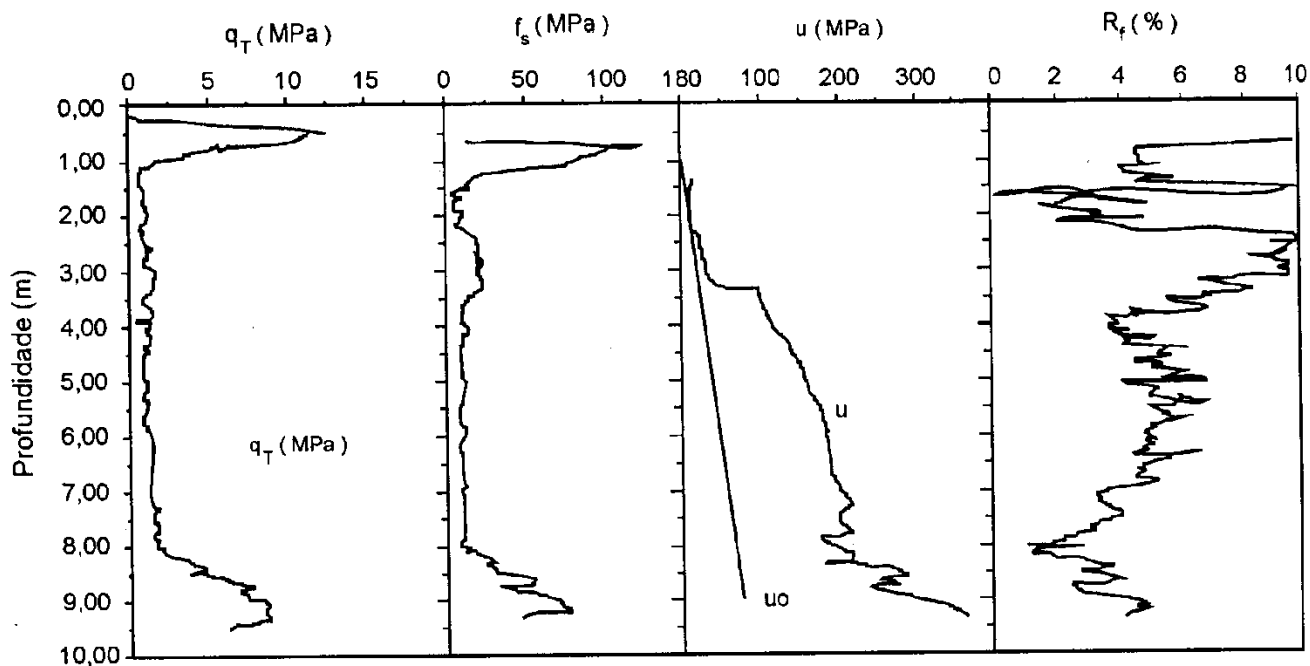
INSTITUTO DE ENGENHARIA
 TESTE PARA DEMONSTRACAO

TEST
D1
 18 OCT 1995

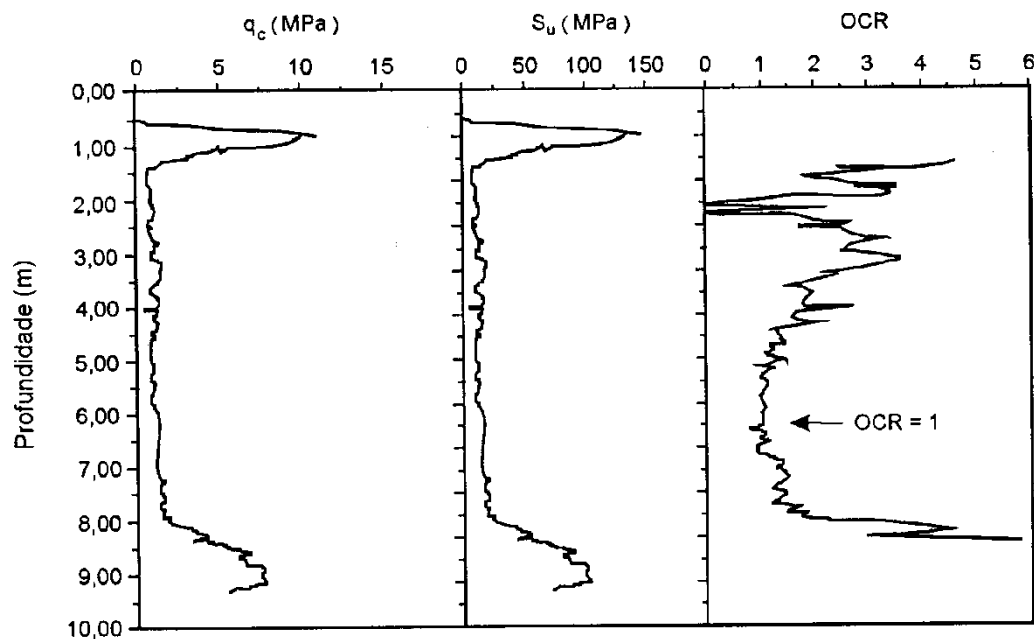
Resultados

Cone CPTU

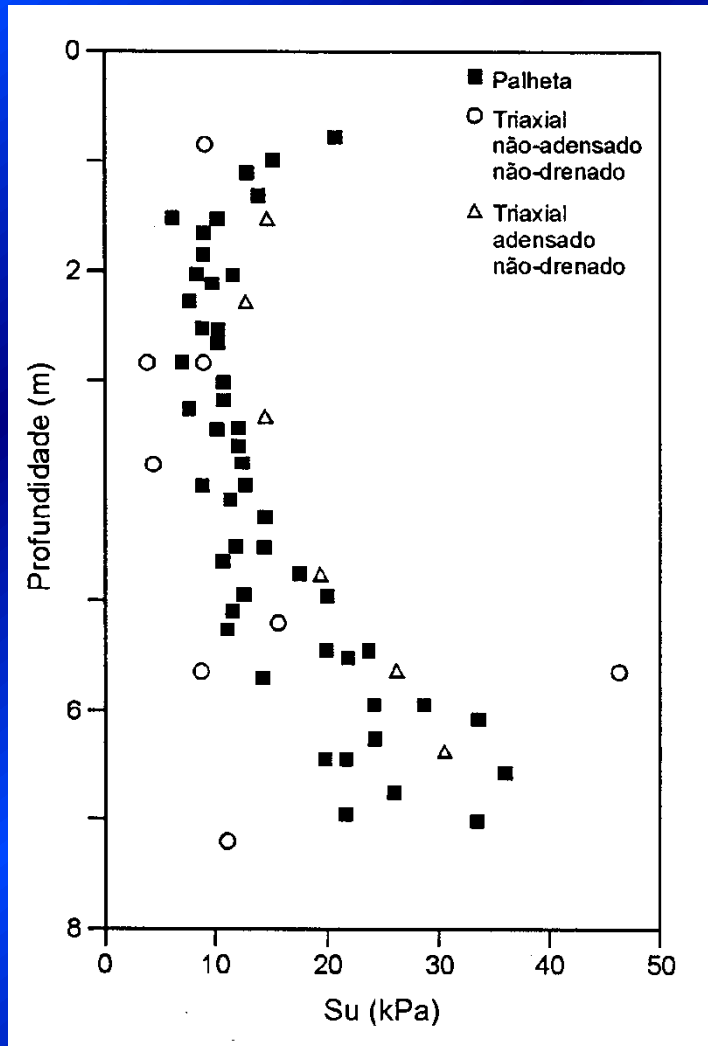
Ensaio CPTU na
área de ampliação
do Aeroporto
Internacional
Salgado Filho
(Schnaid, 2000).



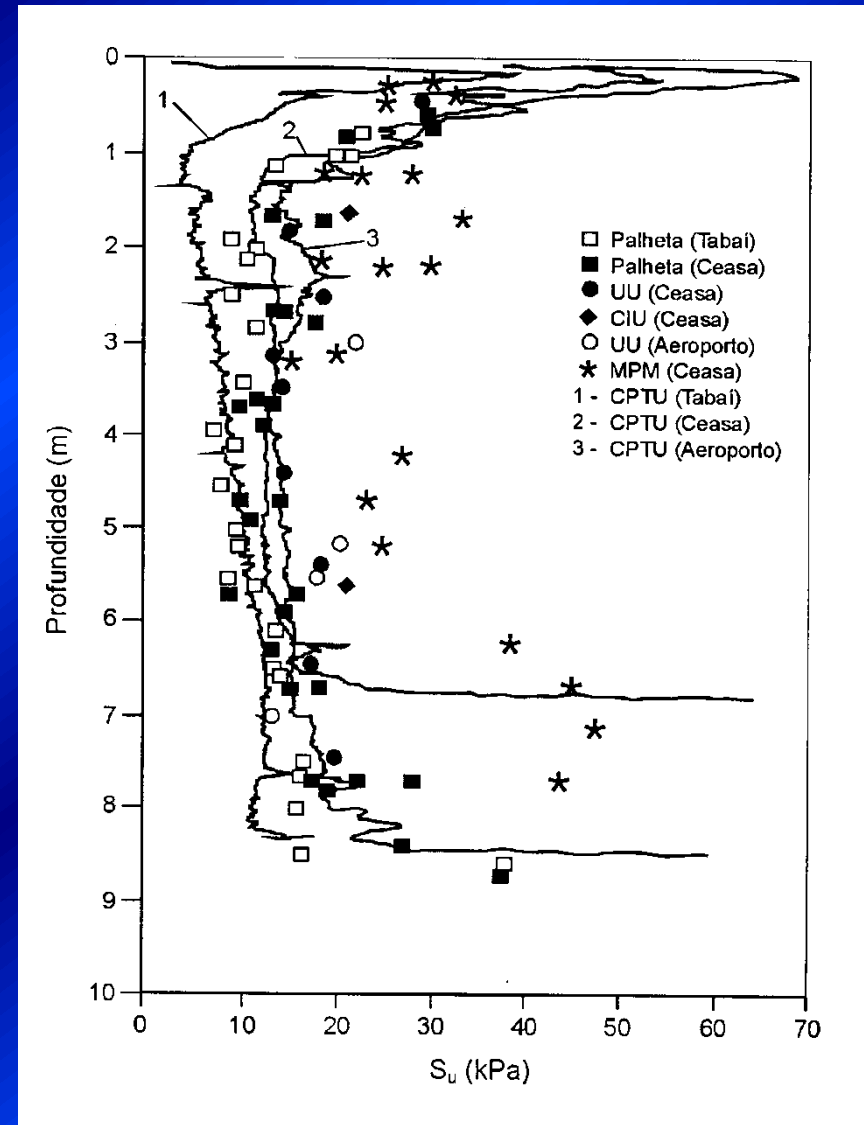
Valores estimados
de S_u e OCR
do depósito de argilas
moles do
Aeroporto
Internacional
Salgado Filho
(Schnaid, 2000).



Comparação entre ensaios Palheta e Triaxiais



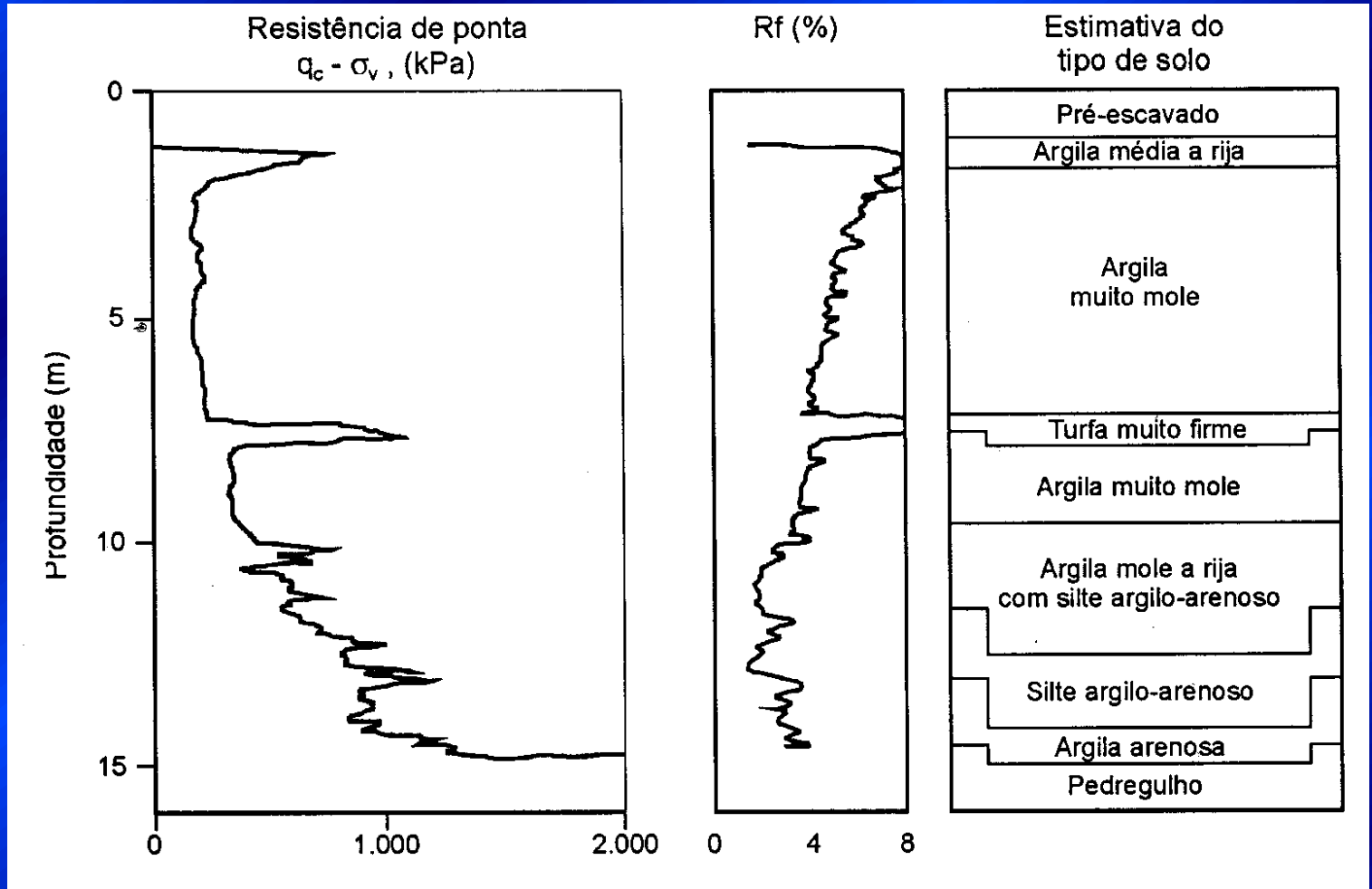
Perfil de resistência não drenada (Schnaid, 2000).



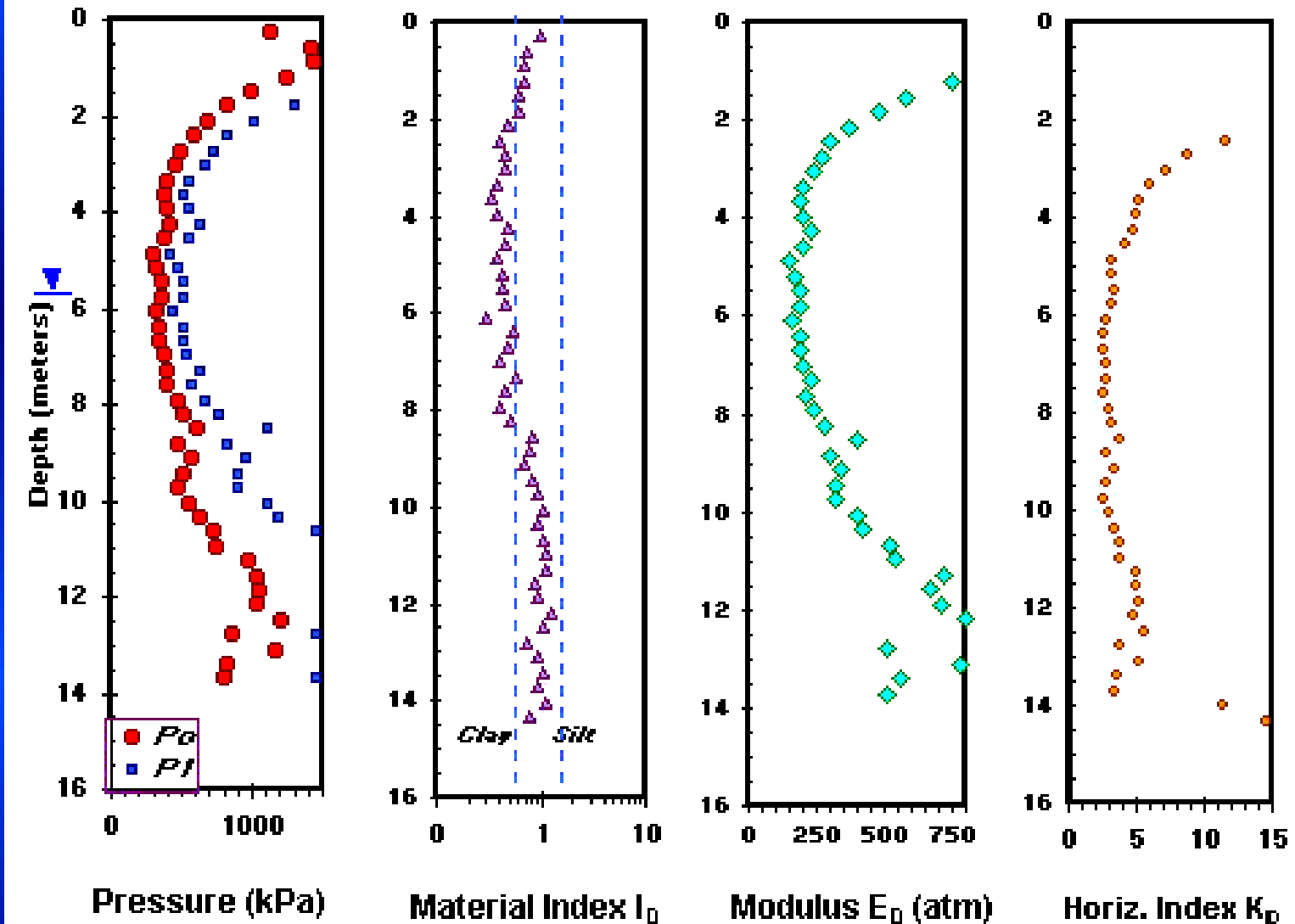
Varição de S_u com a profundidade (Schnaid, 2000).

Cone CPTU

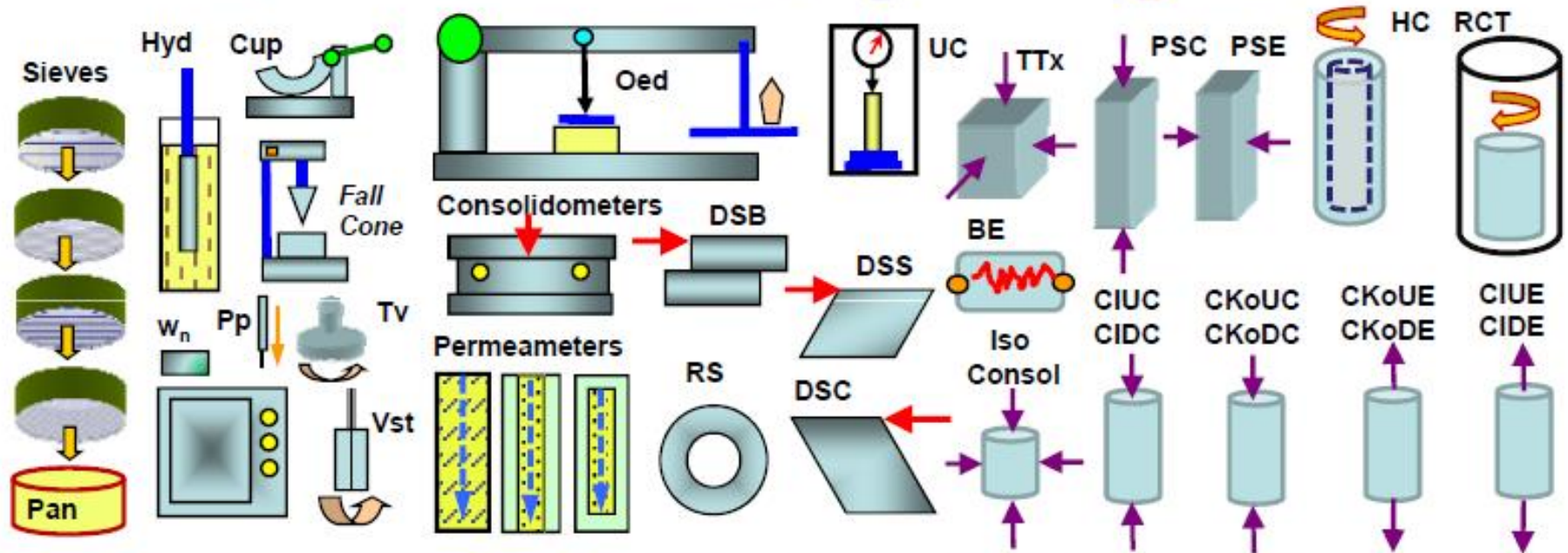
Perfil típico do terreno natural (Schnaid, 2000).



Índices do ensaio dilatométrico



Mechanical Laboratory Testing Methods



Grain size analyses
 Hydrometer
 Water content by oven
 Liquid limit cup
 Plastic limit thread
 Fall cone device
 Pocket penetrometer
 Torvane
 Unconfined compression
 Miniature vane
 Digital image analysis

Mechanical oedometer
 Consolidometer
 Constant rate of shear (CRS)
 Falling-head permeameter
 Constant-head permeameter
 Flow permeameter
 Direct shear box
 Ring shear
 Unconsolidated undrained Tx
 Simple shear
 Directional shear cell

Triaxial apparatus (iso-consols,
 CIUC, CKoUC, CAUC, CIUE, CAUE,
 CKoUE, stress path, CIDC, CKoDC,
 CIDE, CKoDE, constant P')
 Plane strain apparatus (PSC, PSE)
 True triaxial (cuboidal)
 Hollow cylinder
 Torsional Shear
 Resonant Column Test device
 Non-resonant column
 Bender elements

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.