

- Quais são e como funcionam?
- Qual ensaio realizar?
- Como obter informações para projeto através de ensaios de campo?

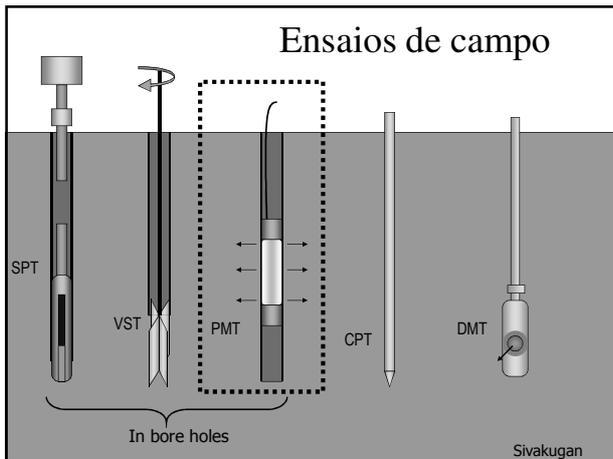
Ensaio de Laboratório	Ensaio de Campo
<p><u>Vantagens</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Condições de contorno bem definidas</li> <li>• Condições de drenagem totalmente controladas</li> <li>• Trajetórias de tensão bem definidas, impostas ou observadas (limitado)</li> <li>• Deformação e velocidade de drenagem controlados.</li> <li>• O solo e as características físicas identificadas.</li> </ul> <p><u>Desvantagens</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Em solos argilosos existe perturbação da amostra.</li> <li>• Em solos granulares geralmente não é possível uma amostragem não deformada.</li> <li>• O volume ensaiado é geralmente pequeno em relação as características da obra .</li> </ul> <p><small>Hight &amp; Burland (1987)</small></p>	<p><u>Vantagens</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Podem ser executados em muitos solos que não podem ser amostrados.</li> <li>• Ensaio é realizado no ambiente natural.</li> <li>• Um volume maior de solo é ensaiado em comparação com o laboratório</li> <li>• Em alguns ensaios uma monitoração contínua do solo é possível.</li> </ul> <p><u>Desvantagens</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Condições de contorno geralmente mal definidas.</li> <li>• Condições de drenagem geralmente mal definidas.</li> <li>• Medições de poro-pressões ajudadas.</li> <li>• Não uniformidade de tensões e deformações.</li> <li>• Velocidades de deformação geralmente são maiores do que no laboratório e no campo.</li> <li>• As características do solo ensaiado com frequência não são identificadas.</li> <li>• Os modos de deformação e ruptura são geralmente diferentes daqueles das estruturas de engenharia.</li> <li>• Grau de perturbação geralmente desconhecido</li> </ul>

### Como investigar?

- A melhor forma seria abrir e ver o solo, mas isso fica limitado a pequenas profundidade (trincheiras e poços)
- É possível coletar a amostra, podendo assim caracteriza-la e até mesmo ensaiá-la em laboratório
- Outra forma é realizar ensaios de campo

### O que se quer do solo?

- Perfil Geotécnico: espessura das camadas e identificação dos solos
- Propriedades índices: limites de Atterberg, umidade, índices físicos
- Nível d'água
- Resistência:  $c'$ ,  $\phi'$ , Su
- Compressibilidade: Cc, Cr, OC R
- Deformabilidade: E, v
- Outros



### Aplicabilidade dos ensaios *in situ* (Robertson, 1986)

GRUPO	EQUIPAMENTOS	PARÂMETROS												
		Solo	Perfil	$u$	$\phi'$	$s_w$	$D_r$	$m_v$	$c_v$	$k$	$G$	$\sigma_h$	OCR	$\sigma_c$
Penetrômetros	Dinâmico	C	A	-	C	C	B	-	-	C	-	C	C	-
	Mecânico	B	A	-	C	C	B	C	-	-	B	C	C	-
	Elétrico (CPT)	B	A	-	C	C	B	C	-	-	B	C	C	-
	Piezocone (CPTU) 8A	A	A	A	B	B	A	B	A	B	B	C	A	B
	Símico (SCPTU)	A	A	A	B	B	A	B	A	B	B	A	A	B
	Dilatômetro (DMT)	B	A	C	B	B	C	B	-	-	B	B	B	B
	Acústico	C	B	-	C	B	C	-	-	-	C	-	C	-
SPT	B	B	-	C	B	C	-	-	-	-	-	-	-	
Resistividade	B	B	-	B	C	A	C	-	-	C	-	-	-	
Pressiômetros	ppp	B	B	-	C	B	C	B	C	-	B	C	C	C
	SBP 10A	B	B	A	A	A	A	A	A	B	A	A	A	A
	PIP	A	B	B	C	B	C	C	A	B	A	C	C	C
	Cone PIP	C	B	B	C	B	C	C	A	B	A	C	C	C
Outros	Palheta 1A	B	C	-	-	A	-	-	-	-	-	-	-	-
	Placa helicoidal	C	C	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B	B
	Ensaio de placa	C	-	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B	B
	Permeabilidade	C	-	A	-	-	-	-	-	B	A	-	-	-
	Fratura hidráulica	-	-	B	-	-	-	-	-	C	C	-	B	-
Crosshole/downhole/símico de superfície	C	C	-	-	-	-	-	-	-	A	-	-	B	

Aplicabilidade: A=alta; B=moderada; C=baixa; -=inexistente

- ### História e tipos de pressiômetros
- Primeiro pressiômetro: Kögler – 1933 – Alemanha
  - Ménard – 1955 – França – mais conhecido
  - Auto perfurante:
    - Baguelin e outros (1972) na França (PAF, Probe autoforeur) e
    - Wroth e Hughes (1973) na Inglaterra (Cam Kometer)

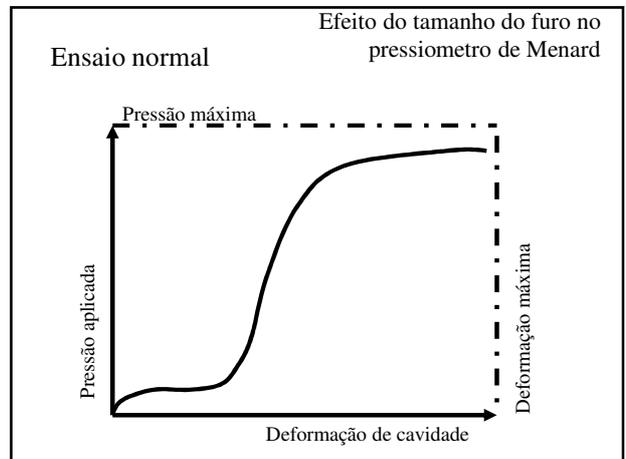
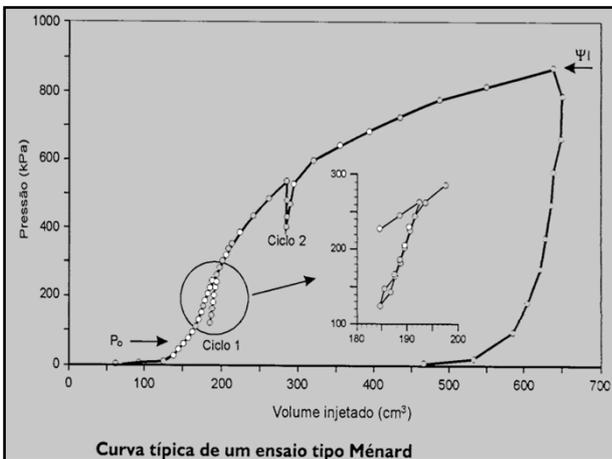
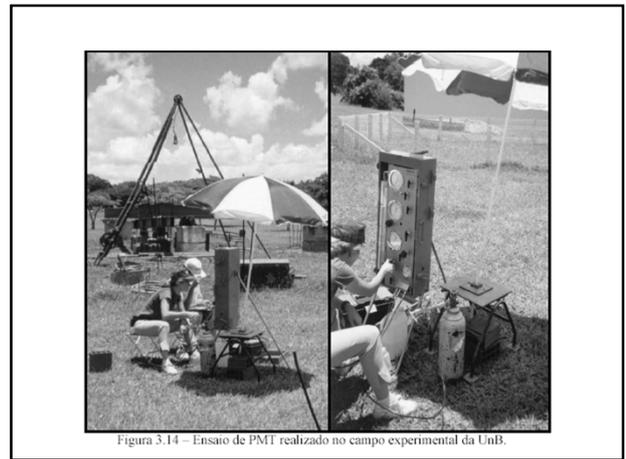
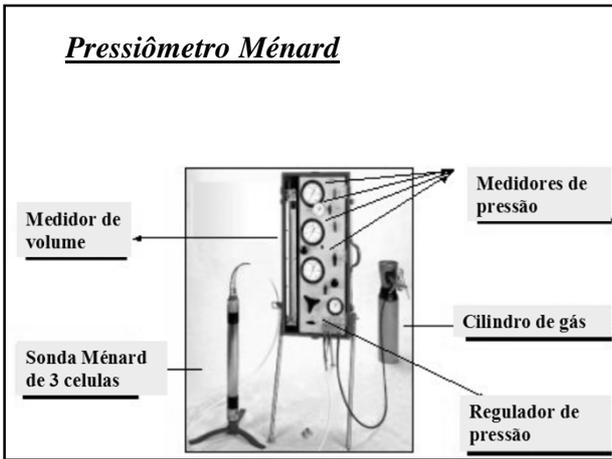
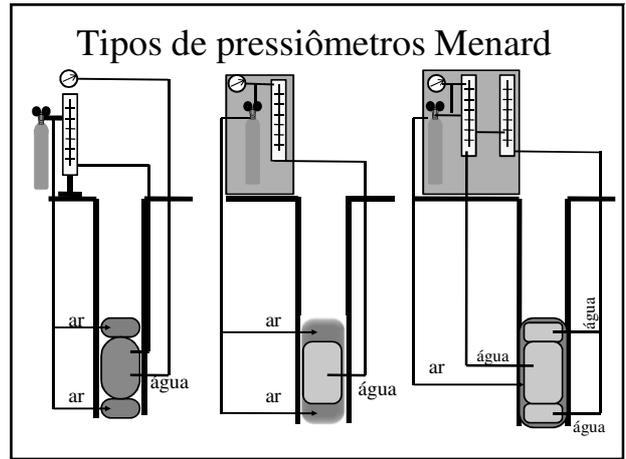
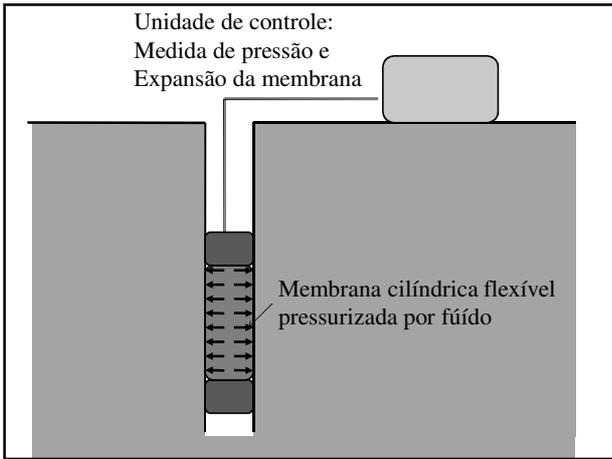
- ### Tipos de pressiômetros
- Instalados em pré-furo (PBP);
  - Autoperfurantes (SBP)
  - Inseridos no solo (PIP)

### Principais tipos de pressiômetros e suas características (Pinto e Abramento, 1996)

Pressiômetro	Método de Inserção	Aplicação de Pressão	Sistema de Medida de Deslocamento	Capacidade		Controle do Ensaio	Diâmetro D (mm)	Comprimento L (mm)
				Pressão máxima (MPa)	Deformação de cavidade máxima (%)			
Ménard	Instalado em pré-furo	Água	Medida de variação volumétrica	10	27	Pressão controlada	74	480 (6,3D)
PAF	Auto-perfurante, lâmina acionada por motor na extremidade	Água	Medida de variação volumétrica	2,5	15	Pressão controlada	90	210 (1,2D)
Camkometer	Auto-perfurante, lâmina acionada por rotativa	Gás (Nitrogênio)	Três sensores de deslocamento independentes	4	10	Pressão ou deformação controlada	82	517 (6,3D)

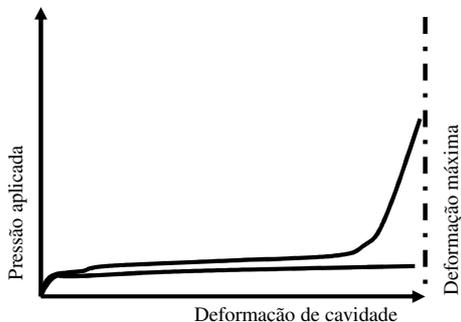
### Pressiômetros instalados em pré-furos (PBP)

## Pressiômetro Ménard



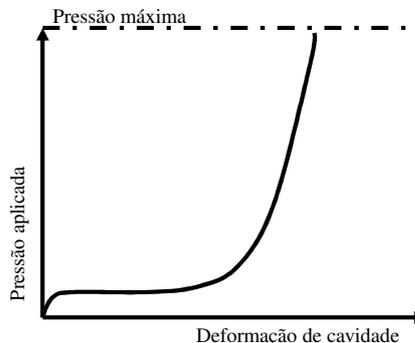
Efeito do tamanho do furo no pressiometro de Menard

i) Furo grande, expansão insuficiente



Efeito do tamanho do furo no pressiometro de Menard

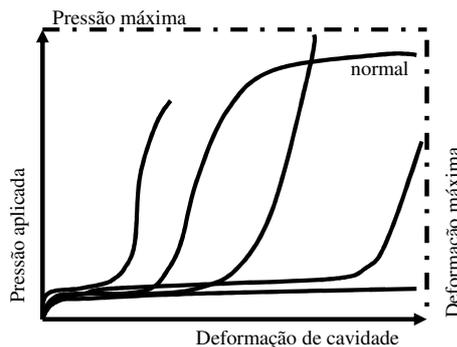
ii) Pressão insuficiente



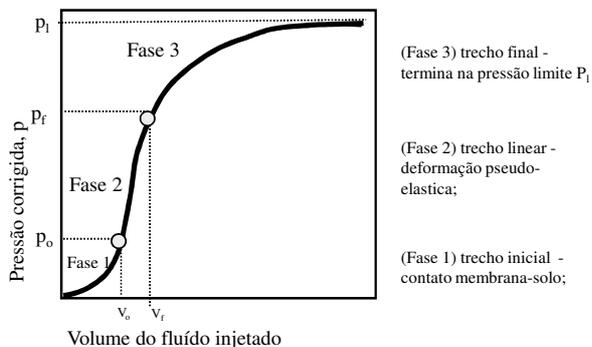
Efeito do tamanho do furo no pressiometro de Menard



Efeito do tamanho do furo no pressiometro de Menard



C curva resultante do pressiometro Menard



Interpretação e parâmetros dos resultados do pressiometro Menard

- Tensão limite  $p_l$ : Gráfico
- Tensão de creep  $p_f$ : Gráfico
- Tensão horizontal total:  $p_{oM} = (\sigma_v - u) K_o + u$
- Tensão limite líquida,  $p_l^* = p_l - p_o$
- Módulo Pressiométrico:
- $G_M = V_m (\Delta p / \Delta v) = E_M / [2 (1 + \nu)]$
- $E_M = V_m (\Delta p / \Delta v) [2 (1 + \nu)]$

## AUTO PERFURANTES

PAF – expande com injeção de água, não possui cilindro rígido, motor embutido na sonda

CamKometer

## Descrição do equipamento

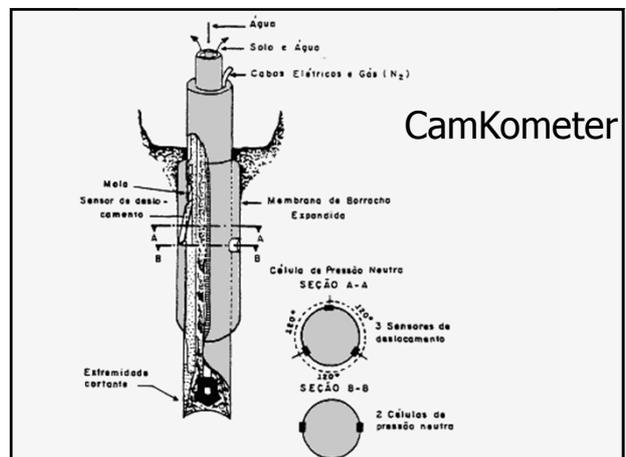
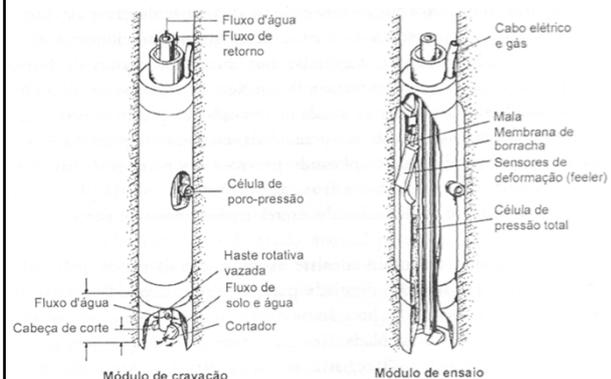
CamKometer  
↳ Cambridge

### Equipamento

- Caminhão escavação do furo e inserção do pressiômetro
- Pressiômetro propriamente dito



## Autoperfurante – descrição do equipamento





## Procedimento do ensaio

## Inserção

- Perfuração de avanço, revestimento
- Autoperfuração:
  - Aplicação de uma força vertical ( $>30\text{kN}$ );
  - Rotativa para mover a lamina
  - Pressão de água
- Problemas em solos não-saturados

## Caminhão



## Abertura do furo



## Descida da sonda

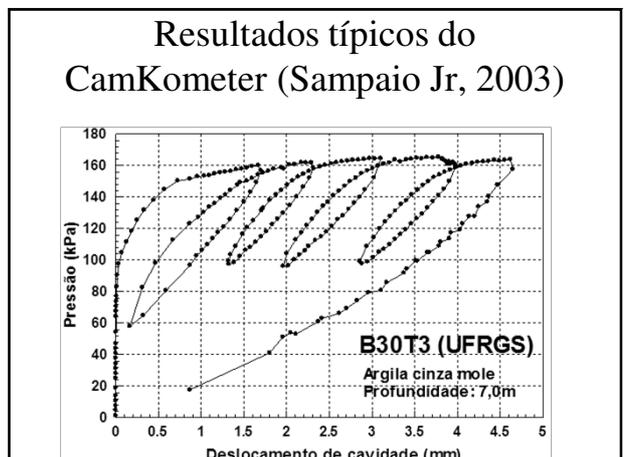
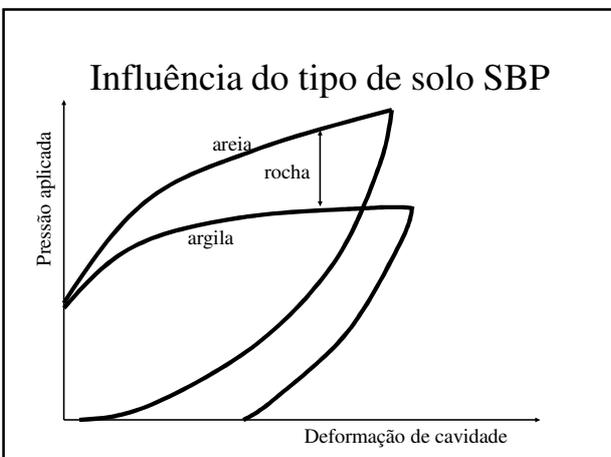
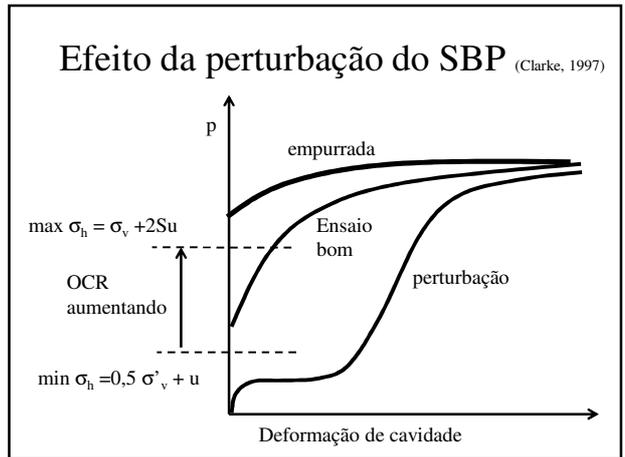


## Inserção do pressiômetro

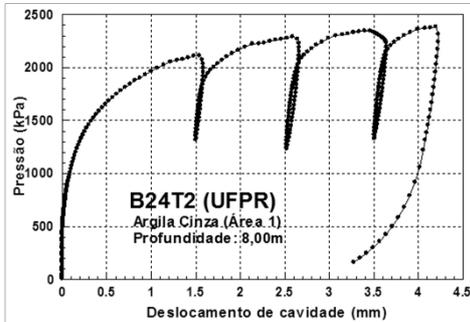




Resultados



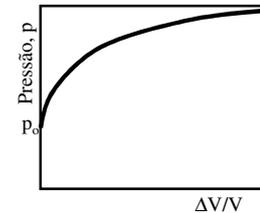
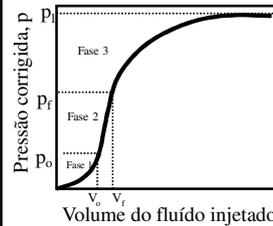
## Resultados típicos do CamKometer (Sampaio Jr, 2003)



## Comparação dos resultados

Menard

Autoperfurante



## Efeitos da inserção

(Clarke, 1997)

Característica	EFEITO
Pré-furo (PBP)	1-Diminuição da tensão <i>in situ</i>
	2-Amolecimento do solo adjacente
	3-Erosão de camadas frágeis
	4-Furo não-cilíndrico
Autoperfurante (SBP)	1-Super cravação causando diminuição da tensão <i>in situ</i>
	2- Sub cravação causando expansão do furo
	3 - Tensão entre o equipamento e o furo
Verticalidade	Expansão não-cilíndrica
Tipo de solo	Condições de drenagem desconhecida

## Influência das condições do solo

(Clarke, 1997)

Anisotropia	1-Expansão não-cilíndrica
Descontinuidade s	2-Meio não-contínuo
Variação do tipo de solo junto à membrana	3-Deslocamentos variáveis por todo o comprimento da membrana

## Influência do procedimento

(Clarke, 1997)

Tensão intermediária	Tensão vertical não é a tensão intermediária em solos muito sobreadensados
Comprimento da membrana	Confinamento nas bordas faz tender à expansão esférica
Equipamentos com medidas de volume	Expansão média
Equipamentos com medidas de deslocamento radial	Expansão na posição dos transdutores

## Aplicação do pressiómetro em solos Não-saturados

- Há influência da circulação de água durante a inserção da sonda?
- Estudo da EPUSP:
  - Pré-furo com Shelby de diâmetro menor que o do CamKometer
  - Ensaio normal com circulação de água

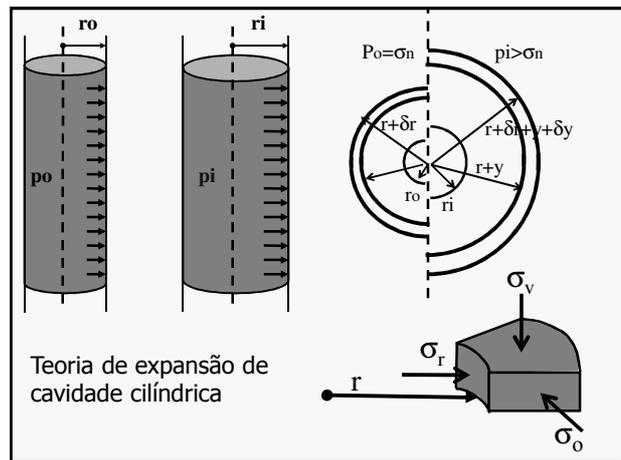
## Interpretação

## Interpretação do ensaio

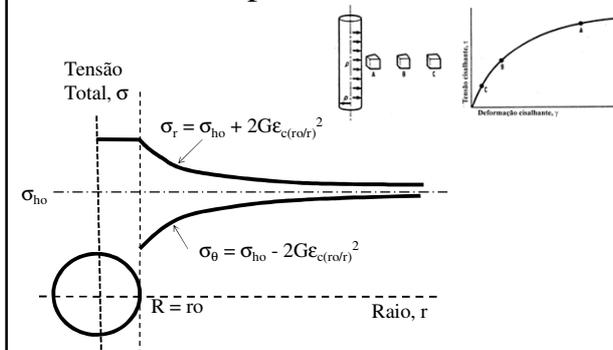
Lamé (1852)	Material elástico linear
Bishop et al. (1945)	Material coesivo
Ménard (1957)	Material coesivo-friccional
Vésic (1972)	
Gibson e Anderson (1961)	Material linear elástico-perfeitamente plástico, sem variação de volume
Windle e Wroth (1977)	
Jeffries (1988)	
Houlsby e Withers (1988)	Material não-linear elástico-perfeitamente plástico, sem variação de volume
Denby e Clough (1980)	
Ferreira e Robertson (1992)	
Prévost e Hoeg (1975)	Elastoplástico com endurecimento ou amolecimento, sem variação de volume
Ladanyi (1963)	Material linear elástico-perfeitamente plástico, com variação de volume
Vésic (1972)	
Hughes et al. (1977)	
Robertson e Hughes (1986)	
Houlsby et al. (1986)	
Palmer (1972)	Material coesivo, sem variação de volume
Manassero (1989)	Material coesivo, com variação de volume
Arnold (1981)	Curva pressiométrica hiperbólica

### Parâmetros Geotécnicos obtidos a partir do pressiômetro

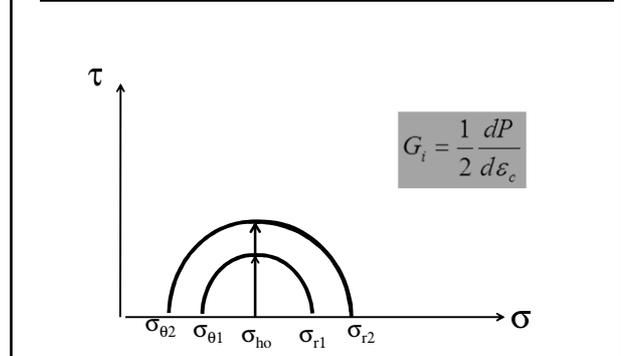
- 1 - Módulo de cisalhamento,  $G$ ;
- 2 - Resistência
  1. Resistência não drenada,  $s_u$ , para argilas;
  2. Ângulo de atrito,  $\phi'$ , para areias;
  3. Ângulo de dilatância,  $\psi$ , para areias;
- 3 - Tensão horizontal total *in situ*,  $\sigma_{ho}$ .



### Tensões de uma cavidade cilíndrica devido à expansão - elasticidade

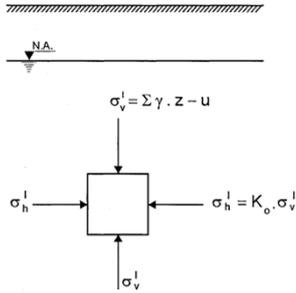


### Varição das tensões radial e circunferencial para a expansão de cavidade cilíndrica em meio elástico

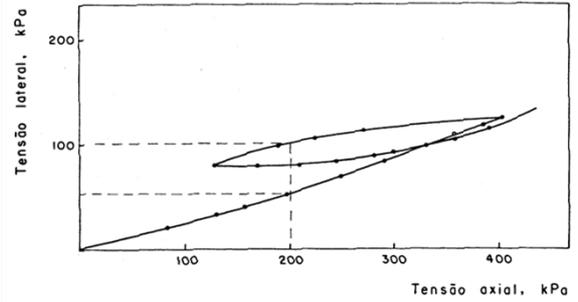


## Estado de tensão in situ

- Definição de  $K_0$

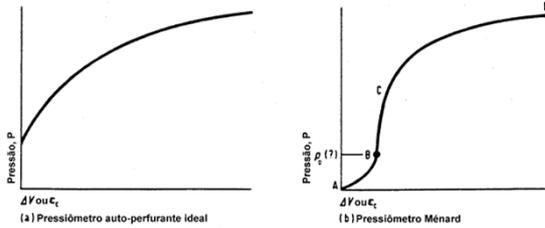


## Ko por meio de ensaio de Laboratório?



Pinto e Nader (1991)

## Curvas pressiométricas (Mair e Wood, 1987)



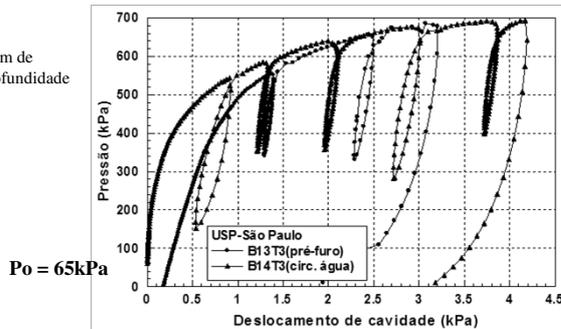
## Interpretação – tensão horizontal

- Usando o Método “lift off” o valor da tensão lateral  $P_0$  é obtida graficamente

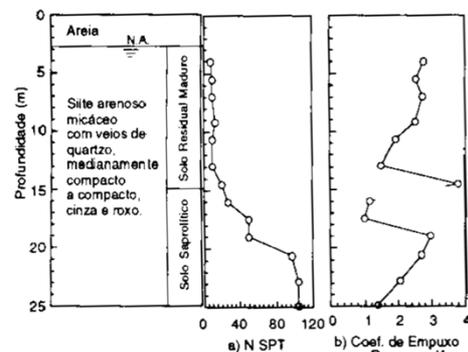


## Resultado – Campo Experimental EPUSP (Sampaio Jr, 2002)

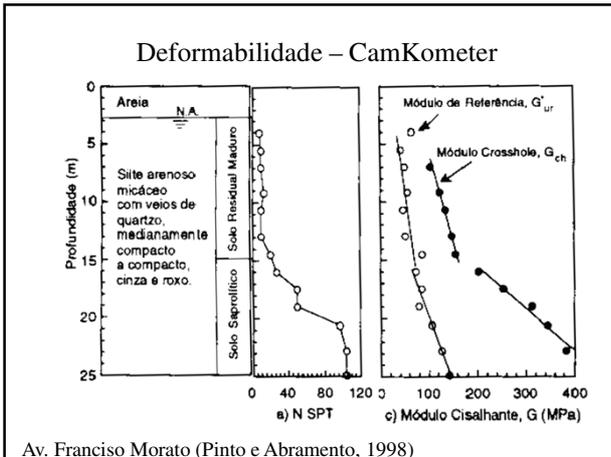
4,7m de profundidade



## Dados de $K_0$ pelo CamKometer



Av. Francisco Morato (Pinto e Abramento, 1998)



## Deformabilidade

### Ensaio de campo mais utilizados para determinação do módulo de cisalhamento (Barros, 1997).

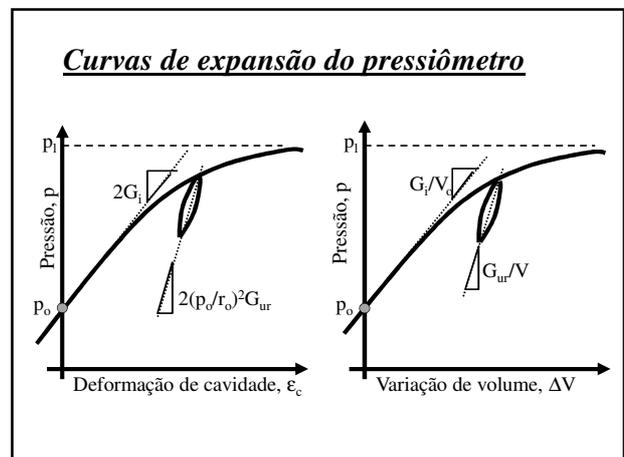
Ensaio	Princípio da Técnica	Faixa de deformação para a qual G pode ser medido (%)
<i>Crosshole</i>	determinação da veloc. de propagação da onda de cisalhamento $V_s$	$\sim 10^{-4}$
<i>Downhole</i>		
<i>Uphole</i>		
Piezocone sísmico		
Refração Sísmica	determinação da veloc. de propagação da onda Rayleigh $V_R$	$\sim 10^{-4}$
Vibração em Regime Estacionário		
Análise Espectral de Ondas Superficiais (SASW)		
Ensaio Pressiométrico	determinação da curva tensão-deformação ("laçada de histerese")	$\sim 10^{-1}$

$\sigma = \frac{\tau}{\gamma}$

- Da Teoria da elasticidade tem-se a definição do módulo cisalhante

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

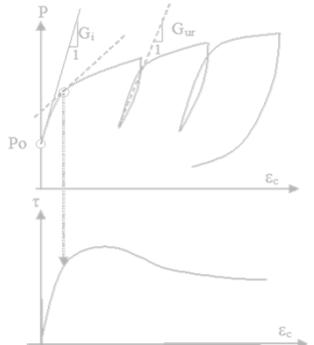
Da teoria da expansão de cavidade cilíndrica obtém-se:

$$G = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta P}{\Delta \epsilon_c} \right) \quad G = V \frac{\Delta P}{\Delta V}$$


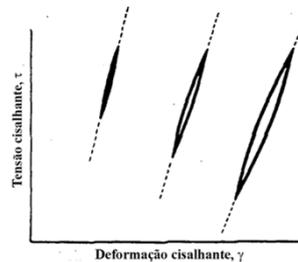
## Módulo cisalhante

- $G_i$  – Módulo cisalhante inicial
- $G_{ur}$  – Módulo cisalhante no ciclo de descarregamento-recarregamento

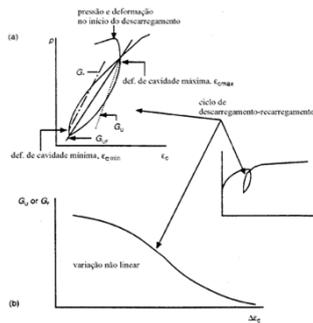
$$G = \frac{1}{2} \frac{dP}{d\epsilon_c}$$



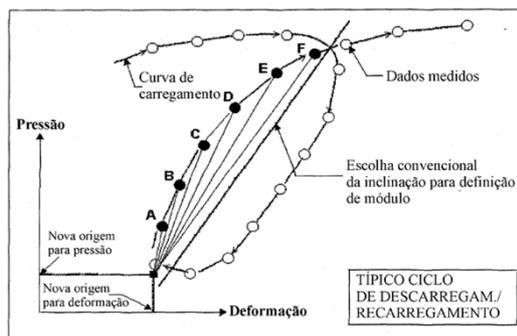
Dependência do módulo com a amplitude do ciclo (Mair e Wood, 1987).



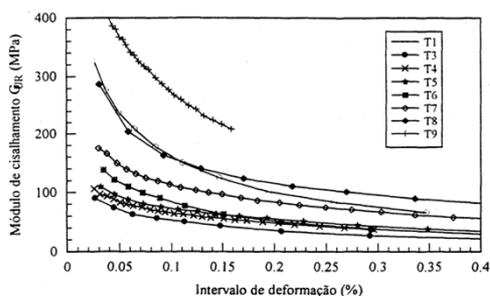
Seleção do módulo de cisalhamento de um ciclo de descarregamento-recarregamento, mostrando: a) módulo secante de descarregamento e de recarregamento, e b) perfil não linear (Clarke, 1997a).



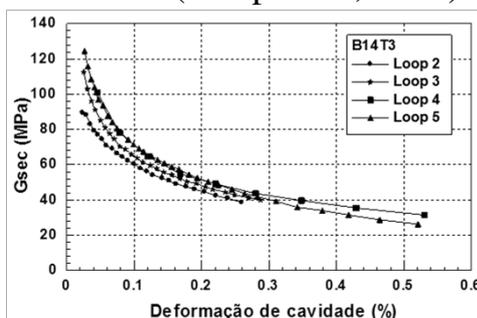
Obtenção da origem do recarregamento (Cambridge-InSitu, 2000).



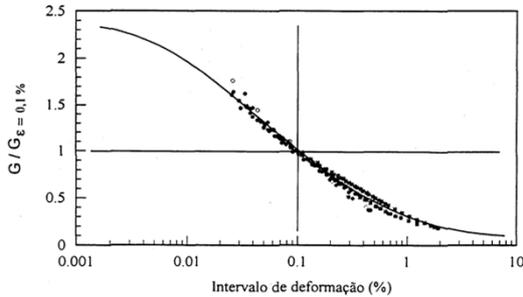
Módulos de cisalhamento, em função do intervalo de deformação (Pinto e Abramento, 1998).



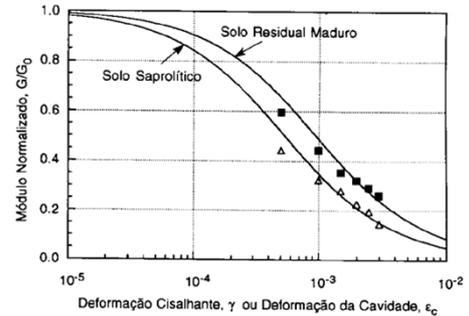
Resultado – Campo Experimental EPUSP (Sampaio Jr, 2002)



Módulos de cisalhamento normalizados em função do módulo para intervalo de deformação de 0,1% (Pinto e Abramento, 1998).

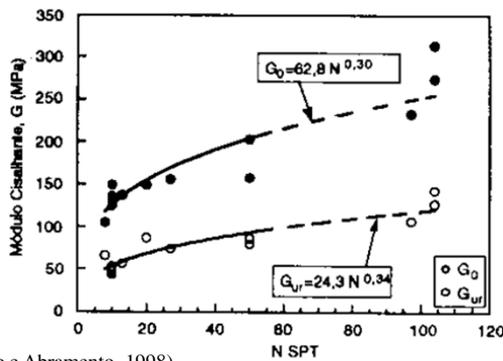


Curva de degradação da rigidez dos solos residuais



(Pinto e Abramento, 1998)

Variação de G com o SPT



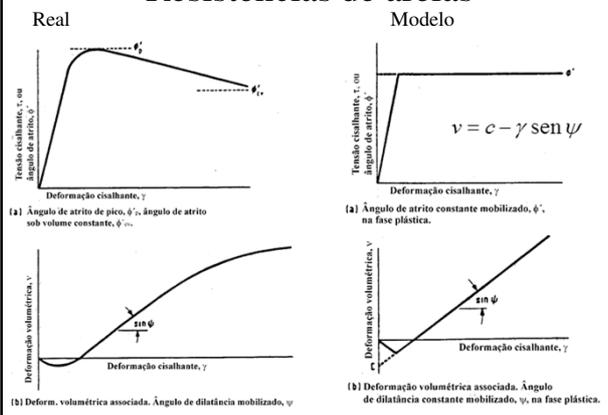
(Pinto e Abramento, 1998)

Resistência

- Análise drenada ou
- Não drenada?
- Argila ou areia? E o solo residual?
- Aplicação

Resistências de areias

Mair e Wood, 1987



- O ângulo de dilatação mobilizado,  $\psi$ , depende da diferença entre  $\phi'$  e  $\phi'_{cv}$ . Essa dependência pode ser expressa por uma relação tensão:dilatância (Rowe, 1962, apud Hughes et al., 1977):

$$\frac{1 + \text{sen } \phi'}{1 - \text{sen } \phi'} = \left( \frac{1 + \text{sen } \phi'_{cv}}{1 - \text{sen } \phi'_{cv}} \right) \left( \frac{1 + \text{sen } \psi}{1 - \text{sen } \psi} \right)$$

- A ruptura se inicia na parede da cavidade quando:

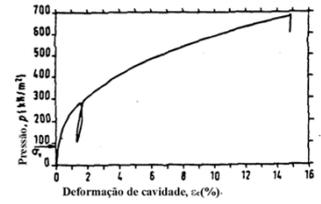
$$p - u_0 = \sigma'_{h0} (1 + \text{sen } \phi')$$

Para se obter os valores de ângulo de atrito interno,  $\phi'$ , e de dilatação,  $\psi$ , é preciso estimar o ângulo de atrito para volume constante,  $\phi'_{cv}$ :

$$\text{sen } \phi' = \frac{s}{1 + (s-1)\text{sen } \phi'_{cv}}$$

$$\text{sen } \psi = s + (s-1)\text{sen } \phi'_{cv}$$

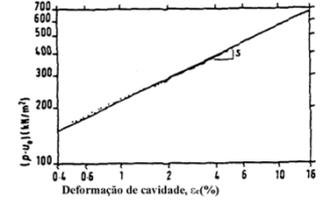
- Método de estimativa de ângulos de atrito e dilatação de areia em ensaios pressiométricos autoperfurantes.



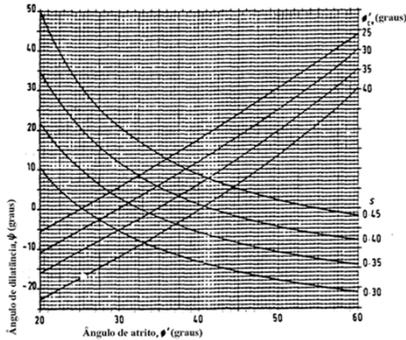
- (a) curva pressão:deformação de cavidade de um ensaio em areia e

- b) dados do mesmo ensaio no gráfico  $\ln(p-u_0)$  versus  $\ln \epsilon_c$

- (de Fahey e Randolph, 1984, e Mair e Wood, 1987).

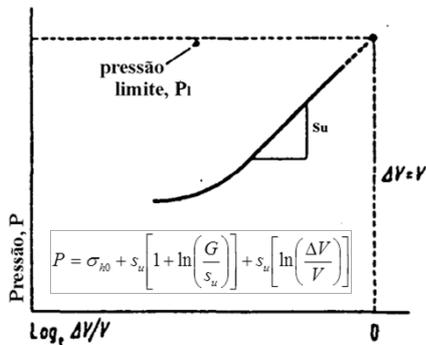


Curvas de ensaio pressiométrico em areia, relacionando vários parâmetros (Mair e Wood, 1987).



## Resistência não drenada das argilas

### Método de Gibson e Anderson (resistência não drenada)



### Resistência não drenada (Su)

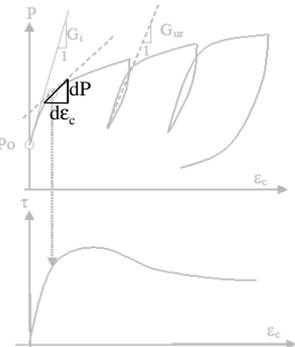
Método das sub-tangentes

$\tau$  – tensão cisalhante

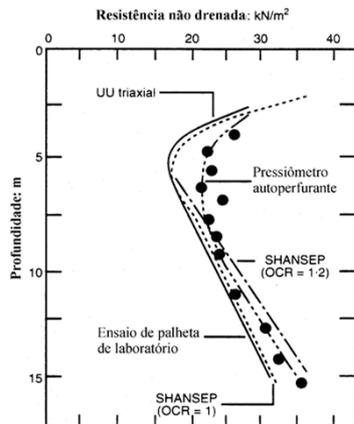
$\epsilon_c$  – deformação da cavidade

P – pressão aplicada na cavidade

$$\tau = \epsilon_c \frac{dP}{d\epsilon_c}$$

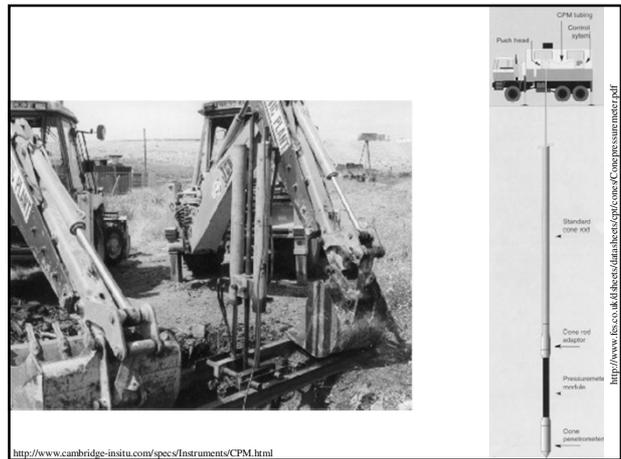
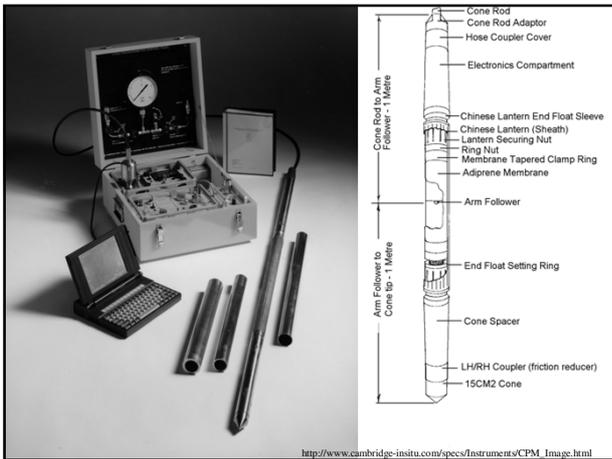


Comparação entre as resistências não drenadas de uma argila mole, obtidas pelo SBP e por outros ensaios (apud Clarke, 1997b).

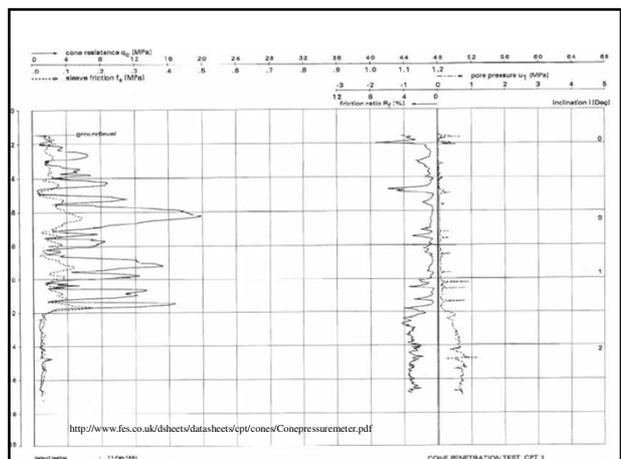
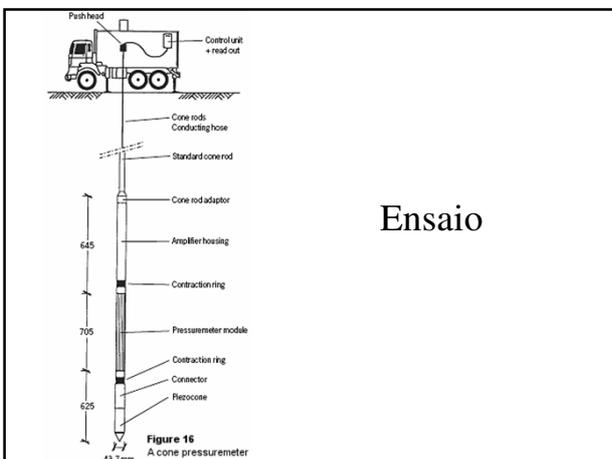


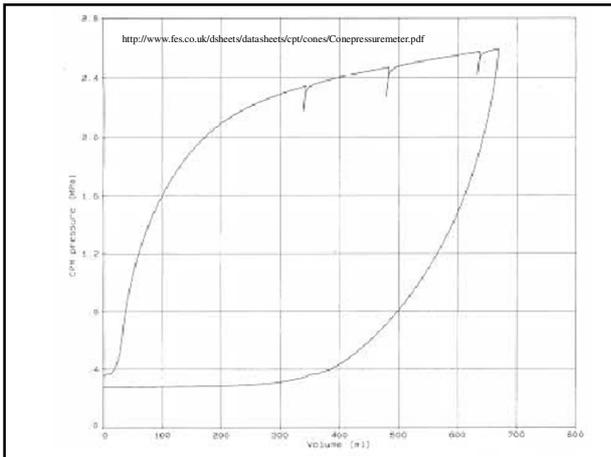
## Pressiômetros inseridos

### PIP



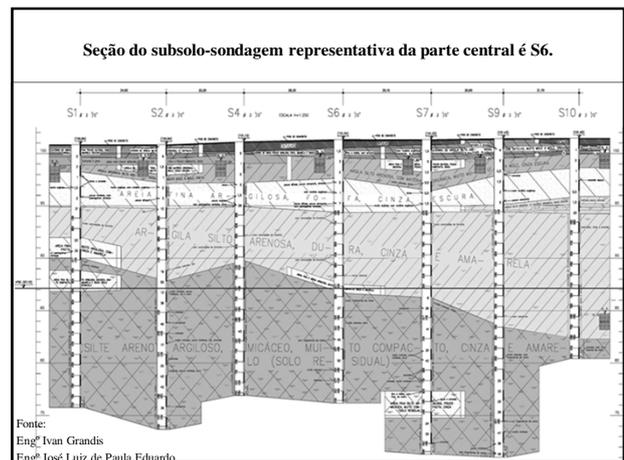
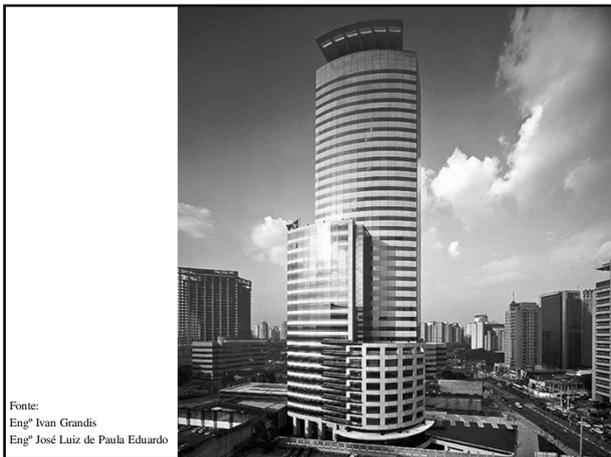
## Ensaio





## Aplicação prática de pressiômetros

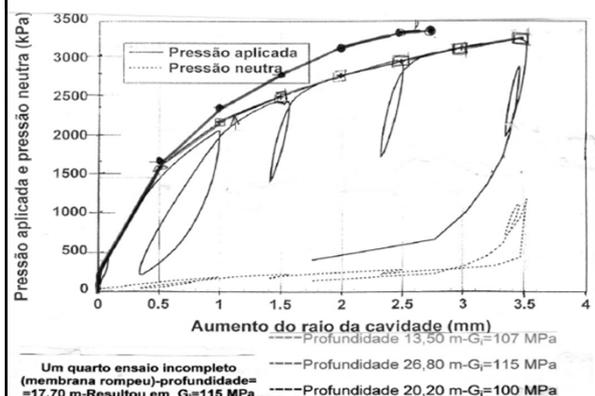
- França – aplicação em fundações – principalmente Menard
- Realidade Nacional – pouca experiência
- Alguns casos com CamKometer – EPUSP:
  - Fundações do E-tower;
  - Parâmetros para projeto do metro



## Concretagem da sapata central.



## Curvas dos ensaios do camkometer.



## Resultados obtidos nos ensaios.

Os resultados de  $G_i$  foram os seguintes:

Furo SRA: prof.=20,2 m (cota 81,0) e prof.26,8 m (cota 74,4)  
respectivamente  $G_i = 100$  MPa;  $G_i = 115$  MPa.

Furo SRB: prof.=17,7 m (cota 81,5); prof.=13,5 m (cota 81,4)  
respectivamente  $G_i = 115$  MPa;  $G_i = 107$  MPa.

Cota geral da escavação: ~86,0 a 87,0.

Fonte:  
Engº Ivan Grandis  
Engº José Luiz de Paula Eduardo

## Roteiro de cálculo de recalques.

Teoria da elasticidade:  $G = E / 2 * (1 + \mu)$ .

Admitindo-se um valor de  $G = 107$  MPa e  $\mu = 0,25$ ...  $E = 268$  MPa.

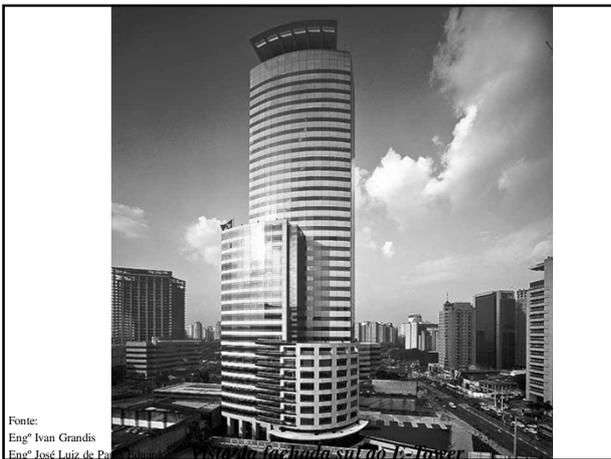
Com o valor de  $E$  considerado constante com a profundidade foram estimados recalques aplicando-se as várias fórmulas disponíveis pela teoria da elasticidade.

Exemplo: sapata central

Recalque máximo de 5,2 cm (placa flexível) e 4,8 cm (placa rígida).

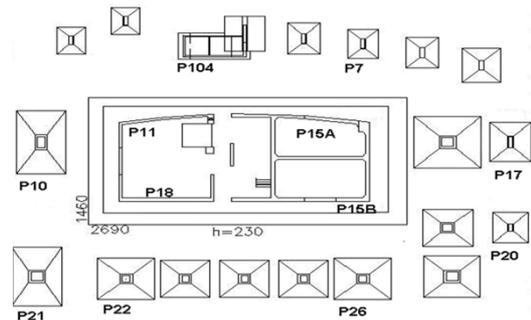
Foi fornecido o valor de 5,0 cm para o engº estrutural calcular a sapata.

Fonte:  
Engº Ivan Grandis  
Engº José Luiz de Paula Eduardo

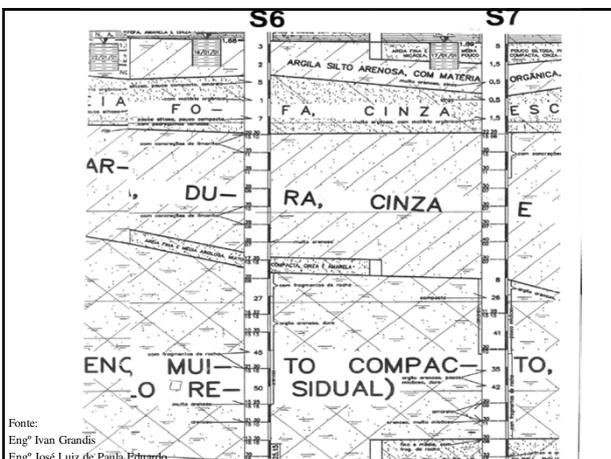


Fonte:  
Engº Ivan Grandis  
Engº José Luiz de Paula Eduardo

## Medições de recalque: localização dos pinos.



Fonte:  
Engº Ivan Grandis  
Engº José Luiz de Paula Eduardo



Fonte:  
Engº Ivan Grandis  
Engº José Luiz de Paula Eduardo

## Vista geral da escavação pronta; escavação da sapata central.



Fonte:  
Engº Ivan Grandis  
Engº José Luiz de Paula Eduardo

**Concretagem da sapata central.**



Fonte:  
Engº Ivan Grandis  
Engº José Luiz de Paula Eduardo

**Sapata central concretada; sapatas laterais sendo escavadas.**



**pinos da sapata central(carga total=26.890 tf).**

P-11=4345tf    P-15A+P-15B=6140tf    P-18=690 tf

