

Mestrado em Engenharia de Estruturas

Fundações de Estruturas

Notas acerca do comportamento mecânico dos solos

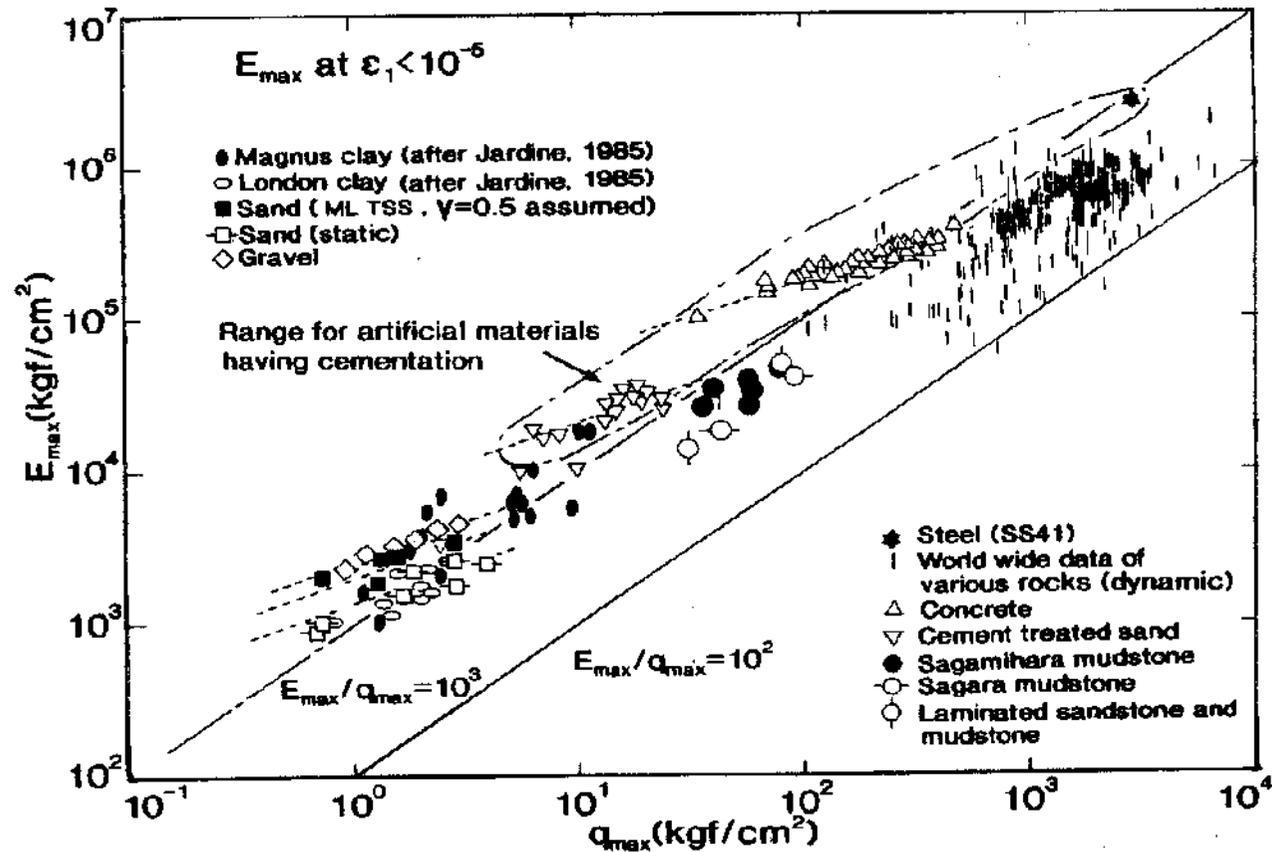
Jaime A. Santos (IST)

Algumas particularidades do comportamento dos geomateriais

<u>Aço e Betão</u> <u>(man-made)</u>		<u>Solos e Rochas</u> <u>(god-made)</u>
Artificial	vs	Natural
Produto Relativamente uniforme	vs	Pode ser extremamente não uniforme
Variabilidade pequena	vs	Variabilidade extremamente elevada
Propriedade estável	vs	Propriedade variável
Relativamente simples	vs	Geralmente muito complicado

Variabilidade das propriedades dos materiais

TATSUOKA · SHIBUYA—DEFORMATION CHARACTERISTICS OF SOILS AND ROCKS FROM FIELD AND LABORATORY TESTS

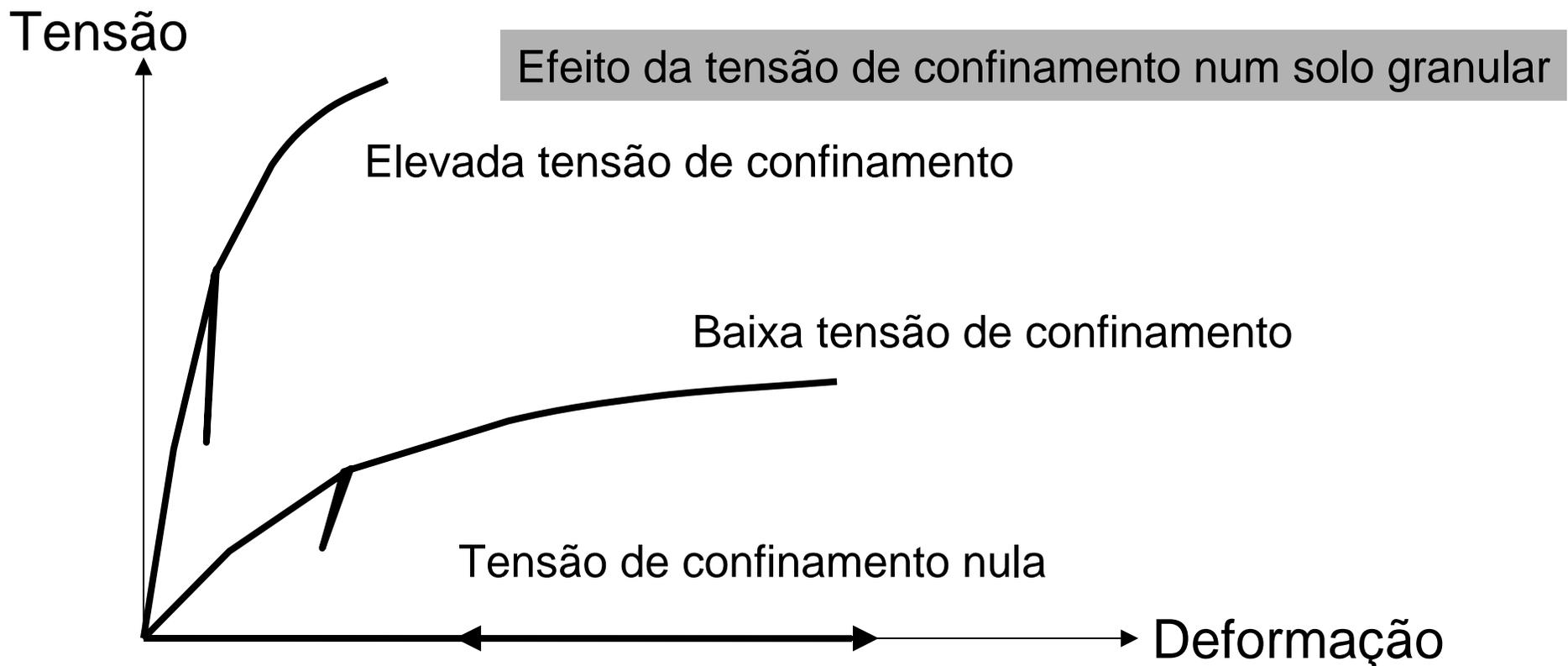


Relationships between E_{max} and q_{max} obtained from laboratory shear tests for a wide range of materials (Kim et al., 1991a)

Propriedade estável versus Propriedade variável

Propriedade variável (nos geomateriais) devido a variações:

- na compactidade; grau de saturação ...
- efeito da tensão de confinamento; história recente das tensões e deformações, consolidação, fluência ...



Comportamento tensão-deformação

Comparação entre: aço, solo e água

Materiais	Deformabilidade	Capacidade de memória	Efeito da história das tensões-deformações no comportamento presente
Aço: Dom. Elástico Pós-cedência	Muito reduzida Reduzida	Quase nenhuma Muito elevada	Quase nenhum Muito pequeno
Solo	Reduzida a muito elevada	Elevada a Quase nenhuma	Reduzido a Elevado Reduzido a quase nenhum
Água	Muito elevada	Quase nenhuma	Quase nenhum

Em certas situações, o solo pode
transformar-se num líquido

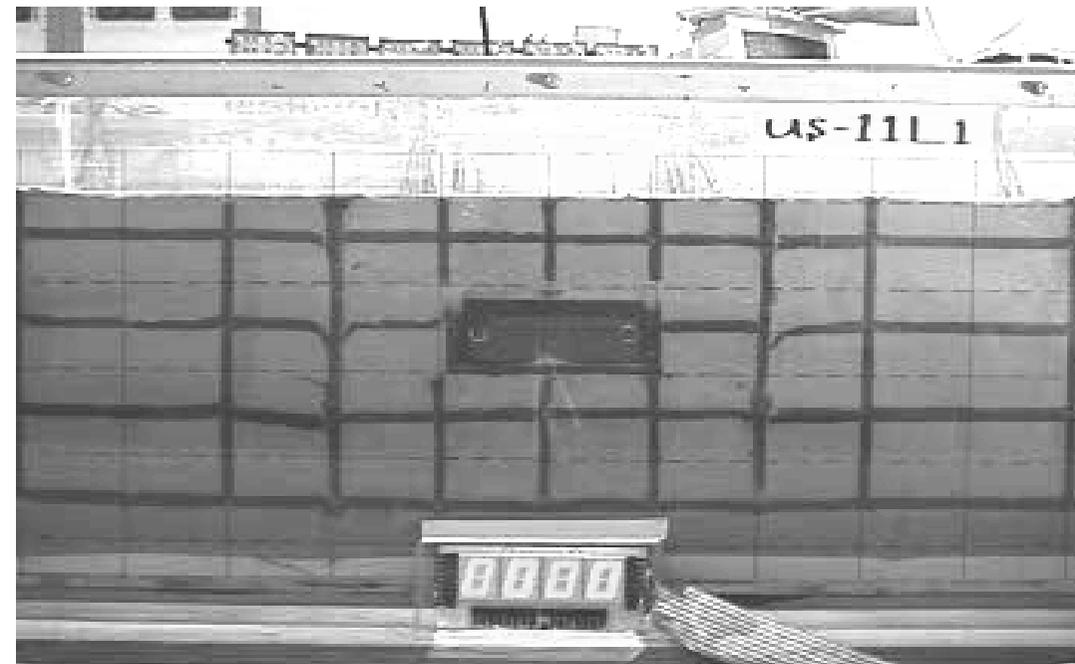
.....

Estudo na mesa sísmica para analisar a estabilidade de uma conduta num depósito arenoso susceptível à liquefacção

(Universidade de Tokyo – Acção imposta: 0,18 g, 10 Hz, 10 s)



Areia não compactada
estado solto, $D_r=20\%$



Areia compactada nas
zonas adjacentes, $D_r=70\%$

Noutras situações, o solo pode exibir elevadas características mecânicas

.....

Areia sob elevada tensão de confinamento:

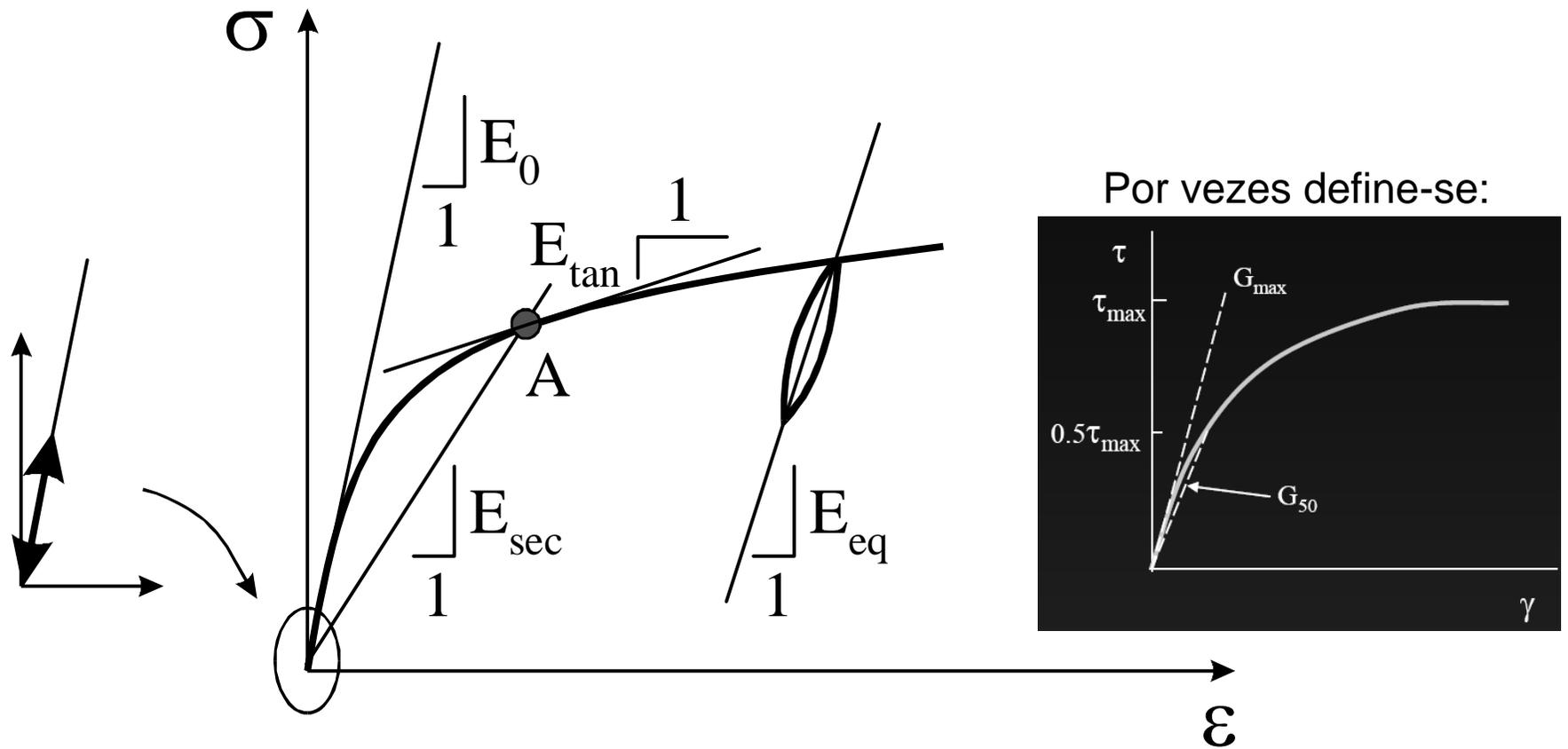
$$G_0 = 6900 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \sigma'_o{}^{0.5} \text{ (kPa)} \quad \text{Areia Ottawa}$$

Para $e = 0.5$, $\sigma'_o = 1000\text{kPa}$ tem-se:

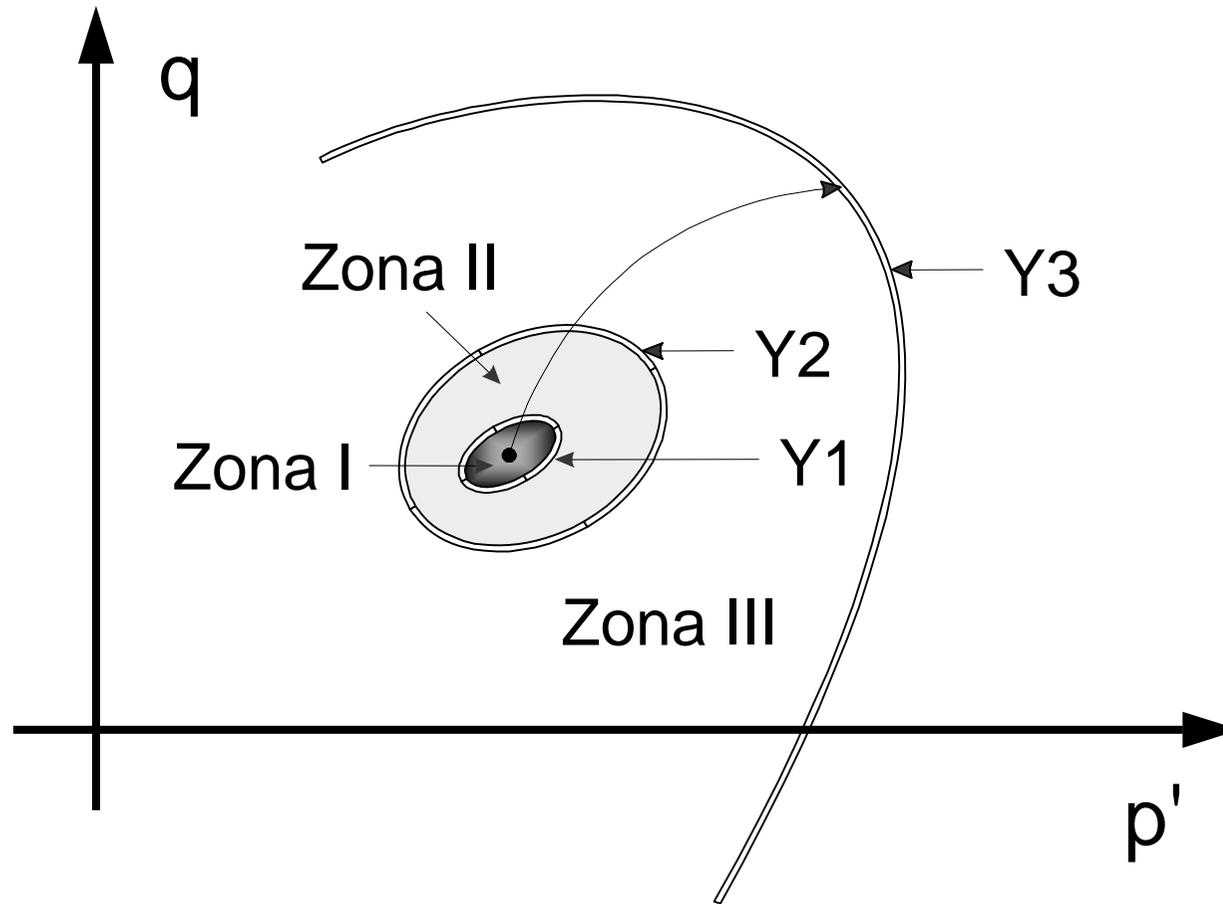
$$G_0 = 406 \text{ MPa}$$

$$E_0 = 2(1+\nu)G_0 = 893 \text{ MPa!} \quad (\nu=0.1)$$

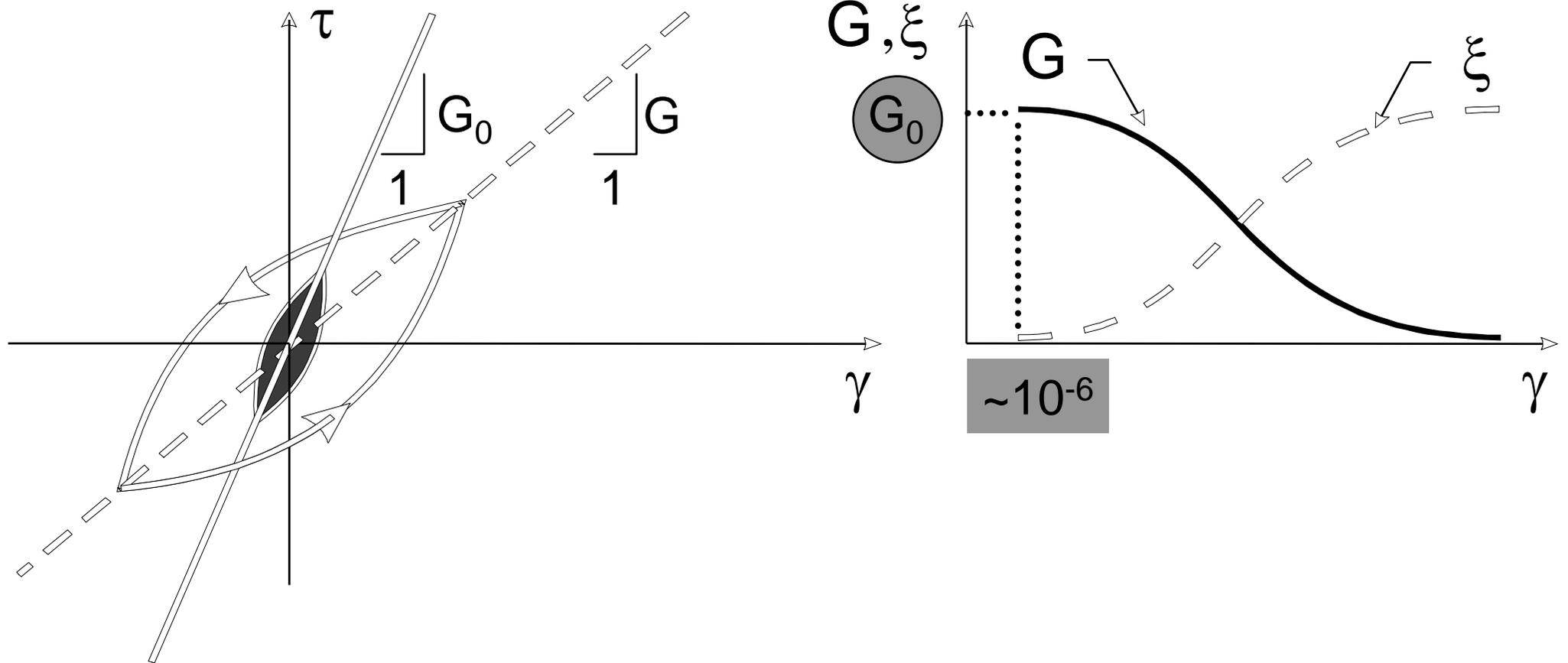
Comportamento não linear dos solos

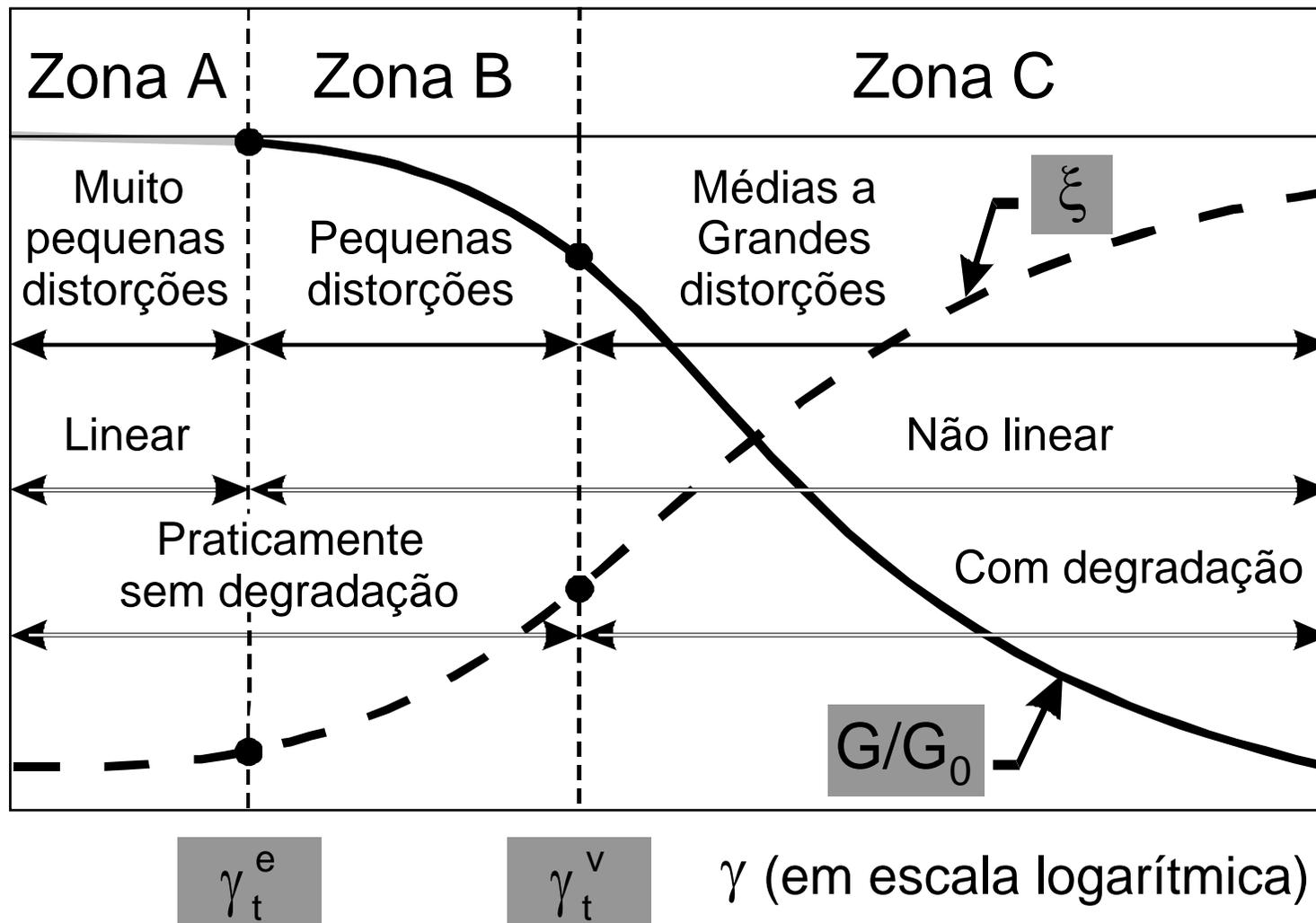


Jardine (1985; 1992)



Curvas G , ξ em função de γ

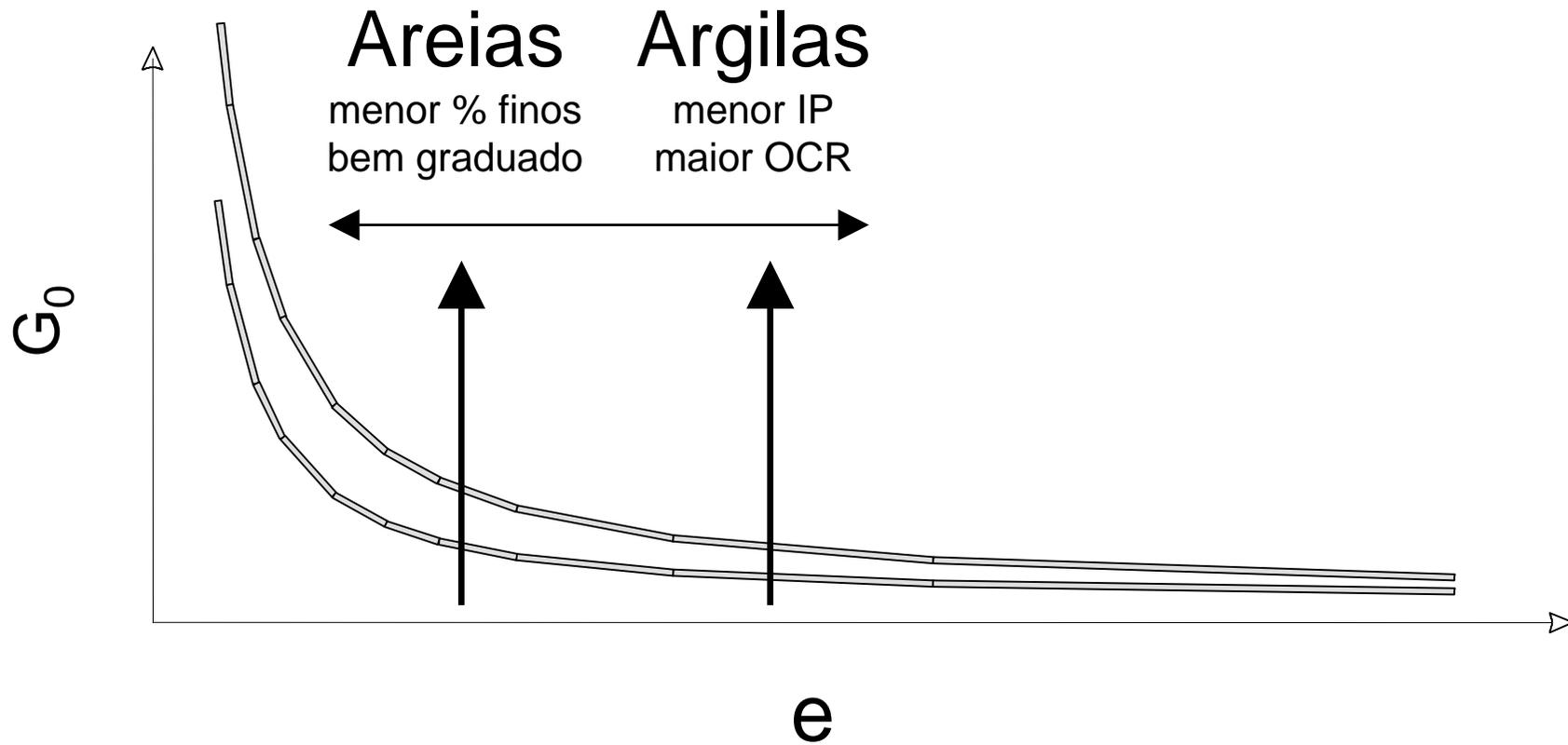




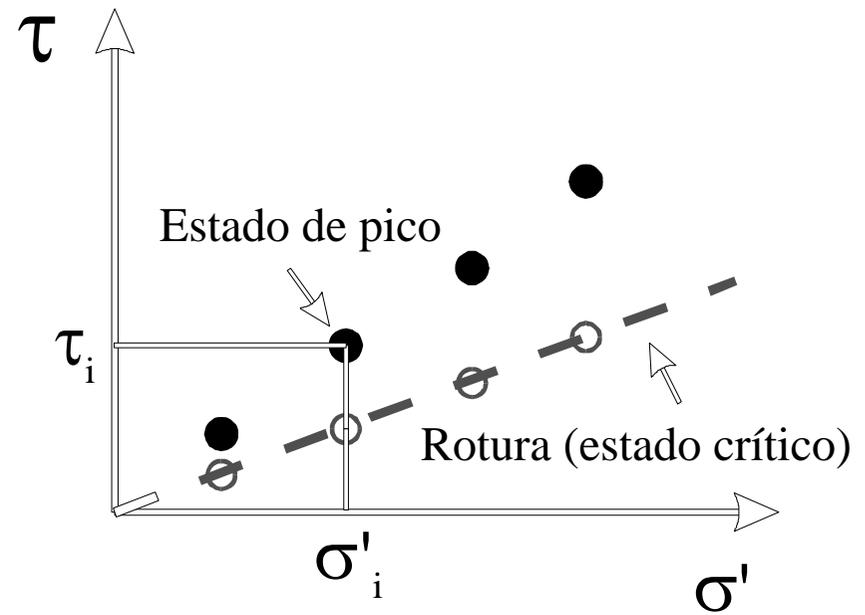
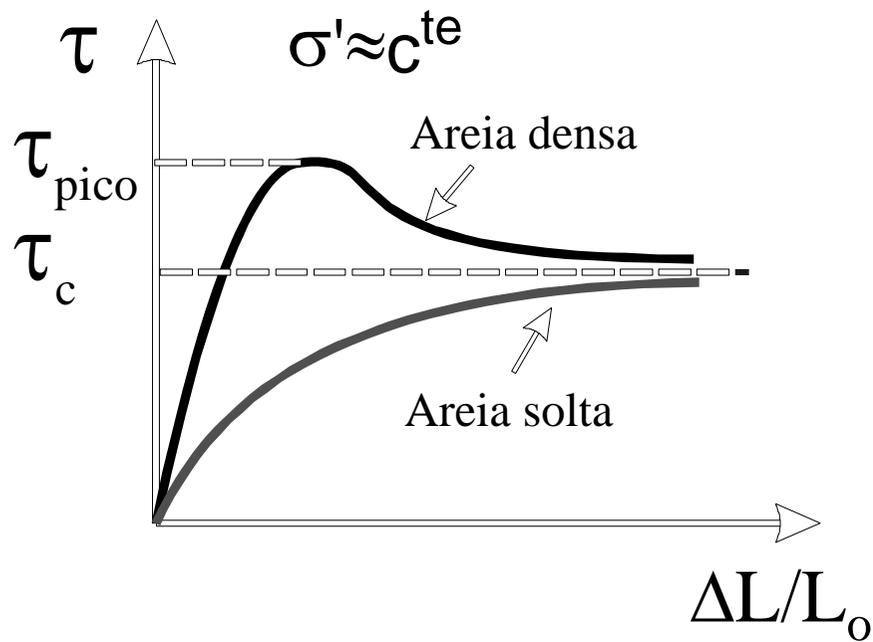
Principais factores que afectam o G_0

- Tensão efectiva média (na direcção da propagação da onda e na direcção da vibração da partícula)
- Índice de vazios
- Efeito do tempo (argilas)
- Grau de saturação (argilas e siltes)
- Cimentação

Módulo de distorção inicial: $G_0 = A F(e) p'^n$



Estado de pico, estado crítico e estado residual



Importância do G_0

Para prever as deformações do terreno (verificação da funcionalidade das estruturas) é importante caracterizar as propriedades elásticas dos materiais, porque:

- 1) as deformações induzidas no terreno são relativamente pequenas;
- 2) as deformações são portanto essencialmente “elásticas”, embora o comportamento tensão-deformação possa ser altamente não linear.

Importância do G_0

Exemplo da importância do G_0 :

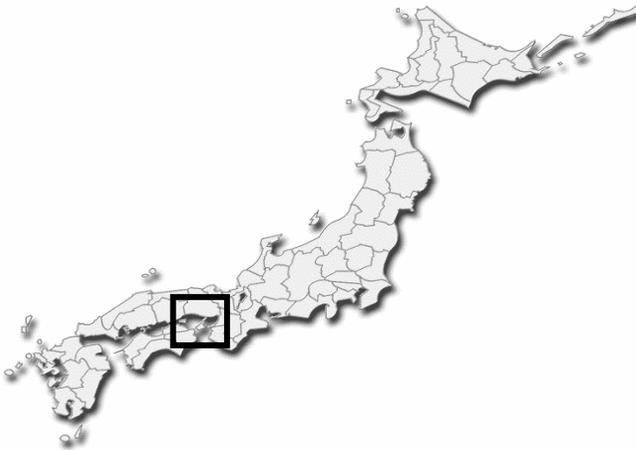
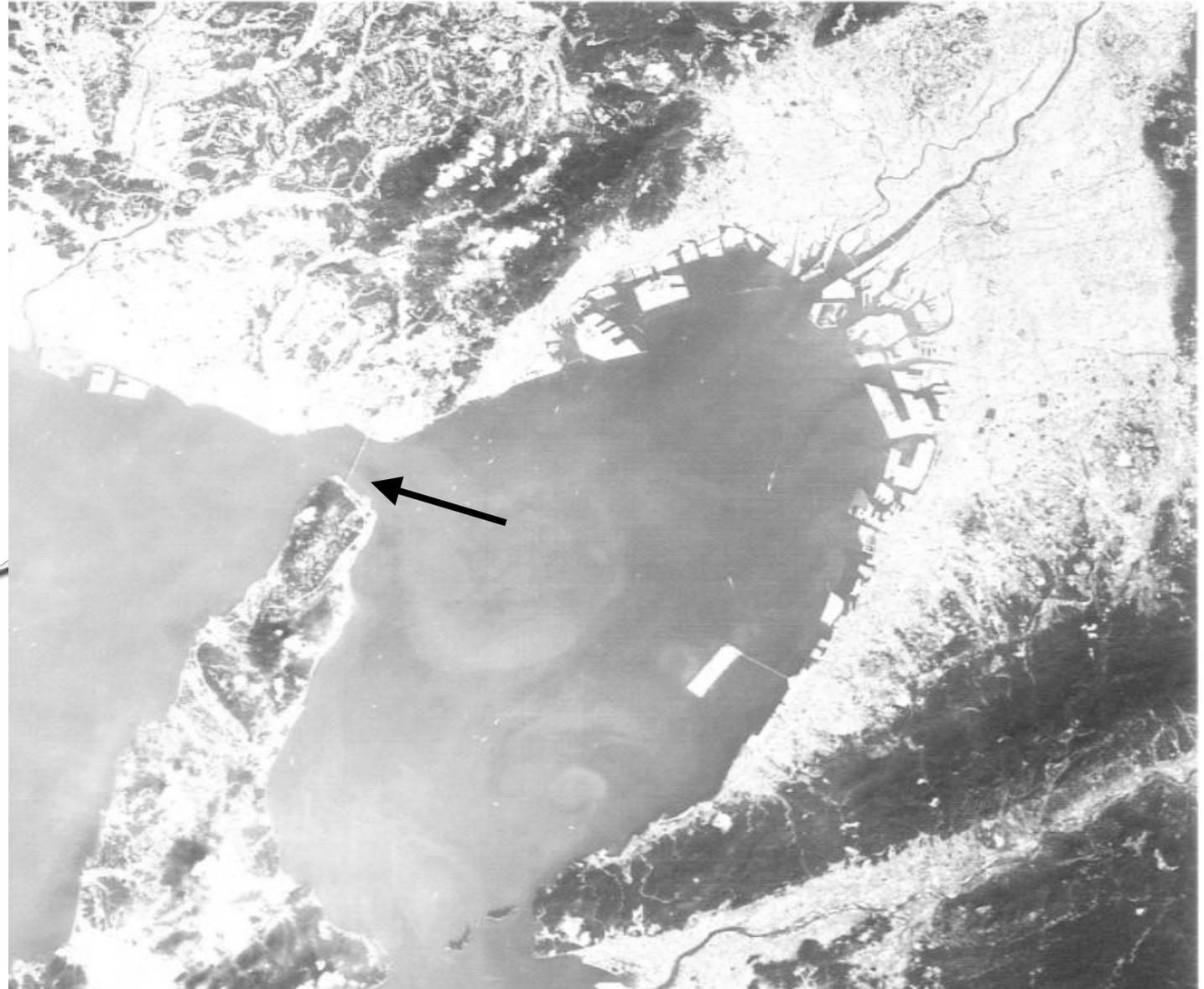
- Vibração de fundações
- Estimação da resposta sísmica local
- Interação solo-estrutura
- Avaliação do potencial de liquefacção
- Análise de vibrações (ex. metropolitano, comboios)
- Resposta sísmica do terreno e de estruturas geotécnicas
- Avaliação do resultado do melhoramento de terrenos

Assentamento das fundações da ponte Akashi Strait (Tatsuoka, 2001)

“A geotechnical engineering case history showing the importance of the stress-strain behaviour at very small strains”

Construção:

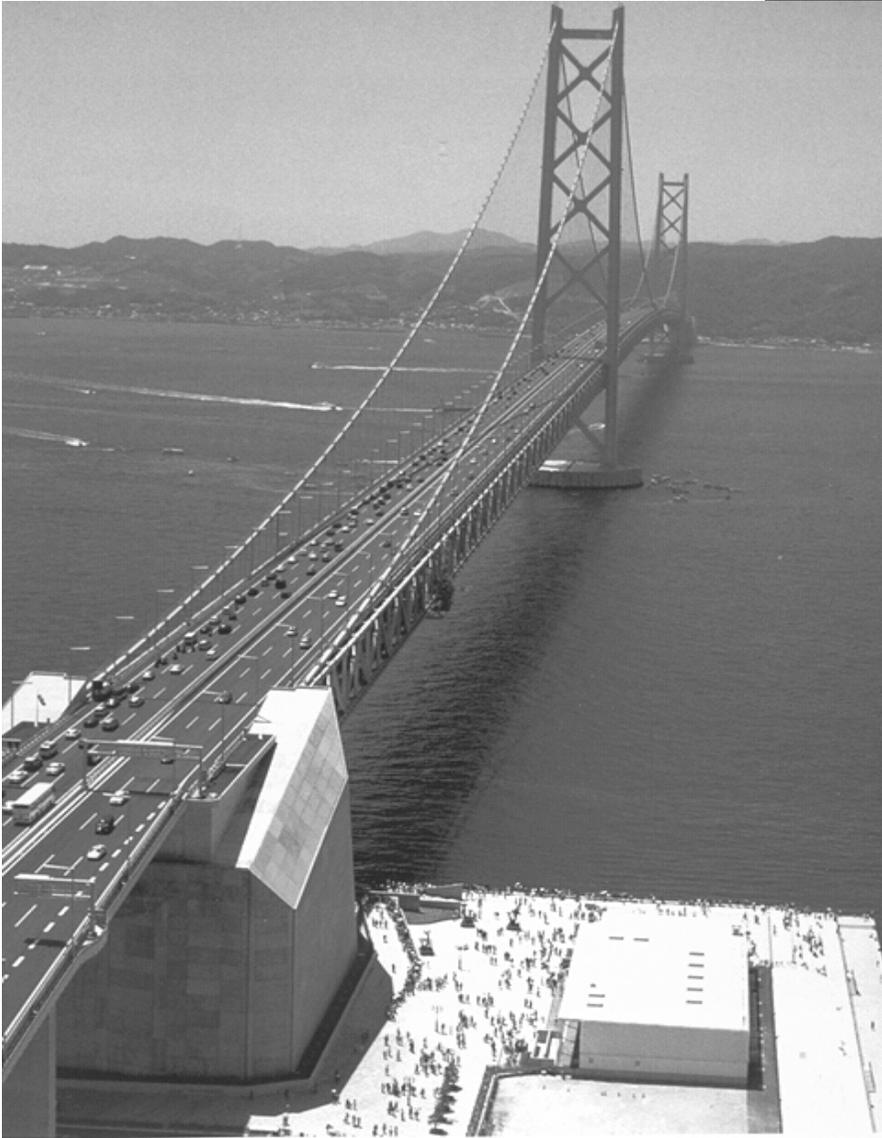
- início: 1986
- sismos de Kobe 1995 (Hyogoken-Nambu)
- concluída: 1998



Pier 2P

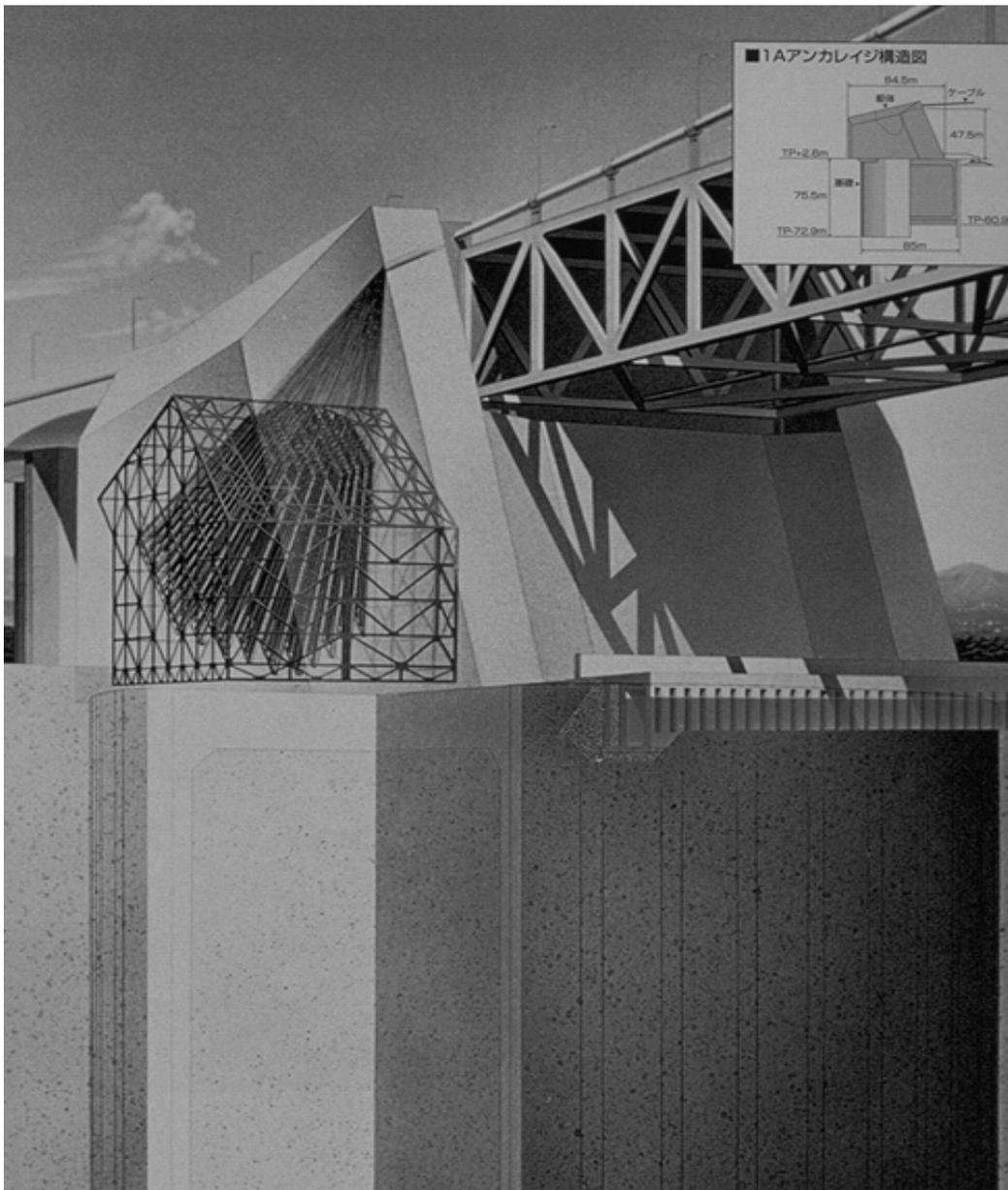


Pier 3P



Ponte Akashi Strait





- Pilares principais com 283 m apoiados em caixões de betão submersos com 80 m de diâmetro.
- Ambos os caixões têm de suportar 120.000 ton.

Evolução do assentamento do Pilar 2P

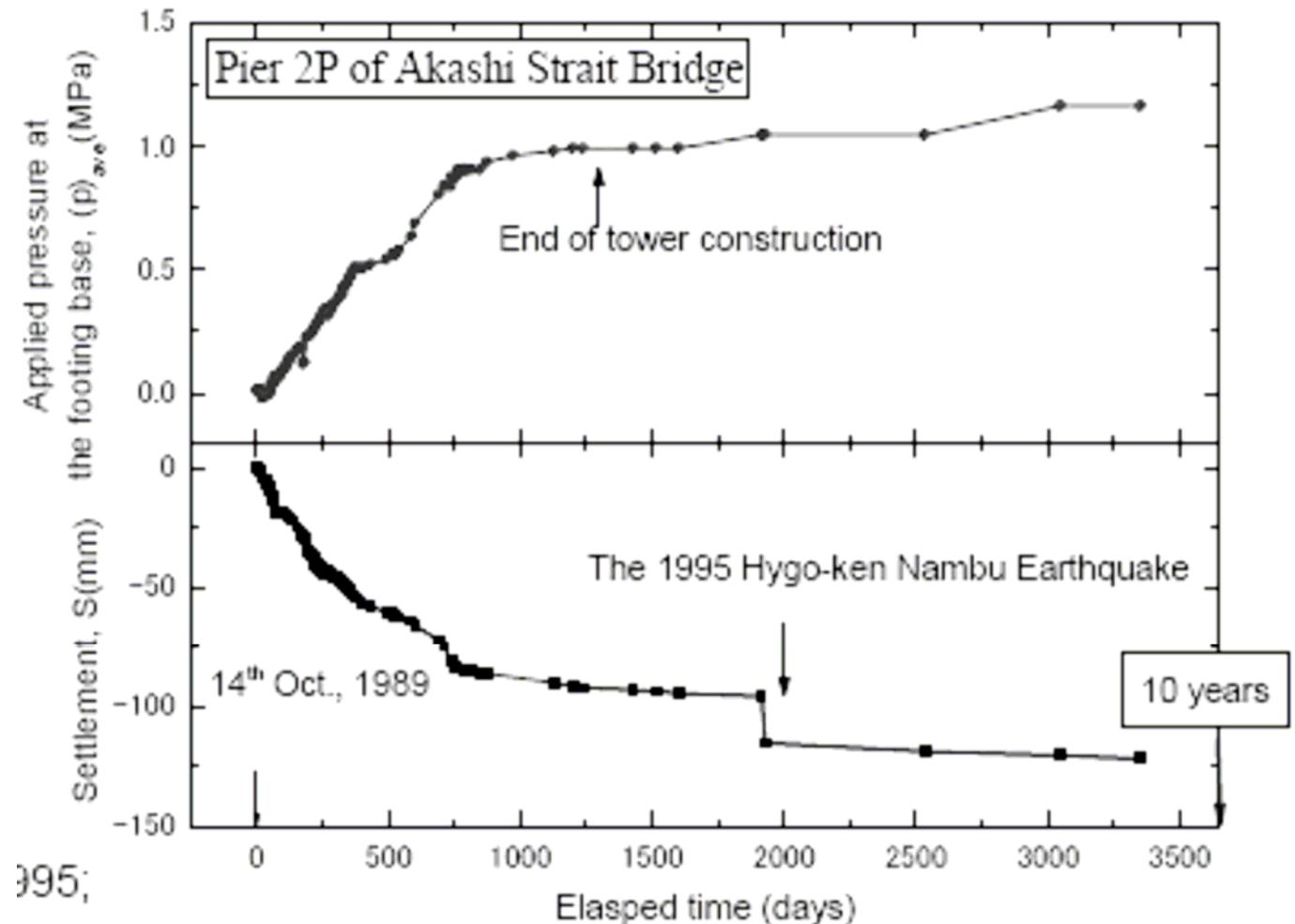
(sobre depósito de cascalho)

Assentamento:

- durante a const.
- por fluência
- sismo

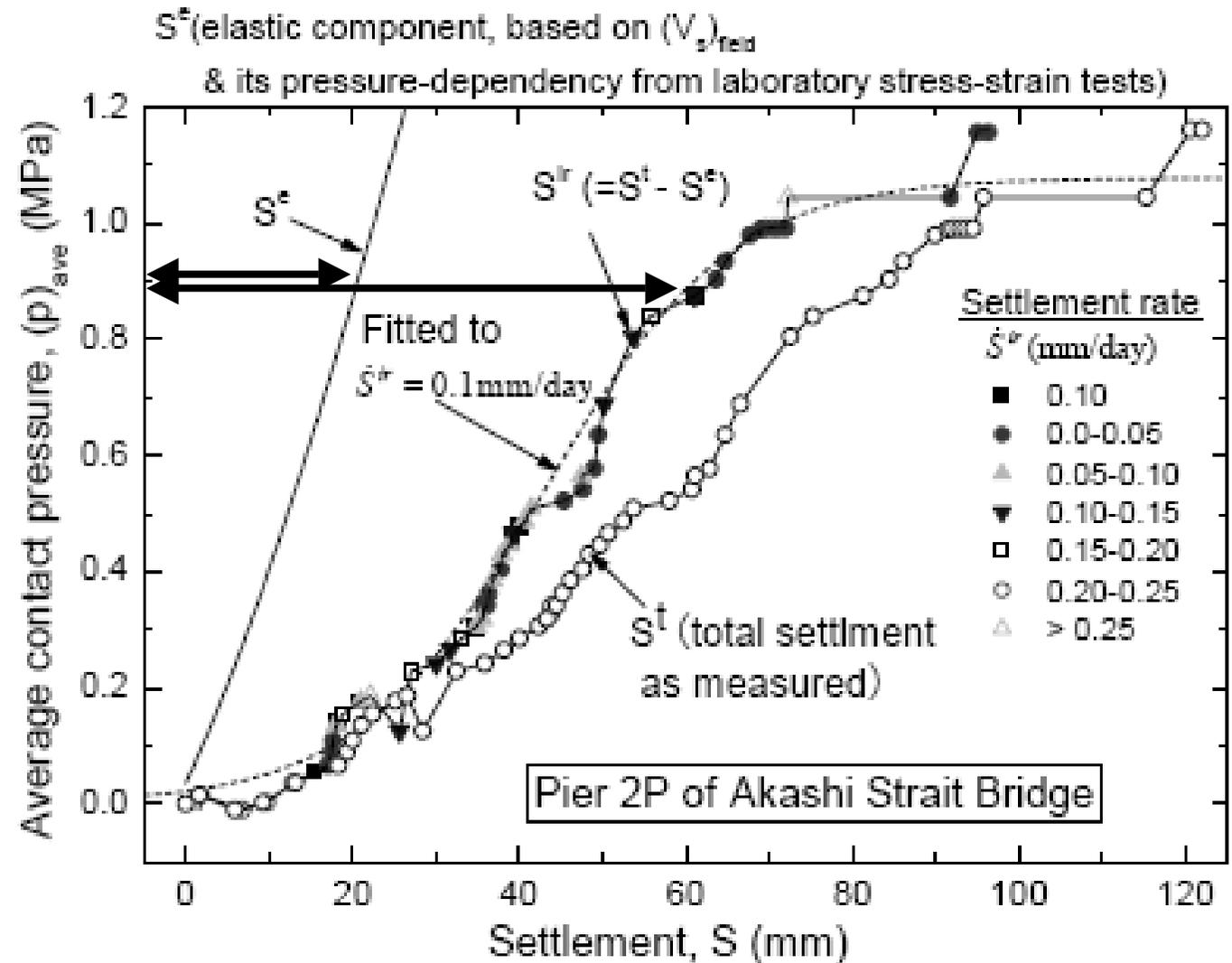
Projecto:

assentamento durante a const. largamente sobrestimado

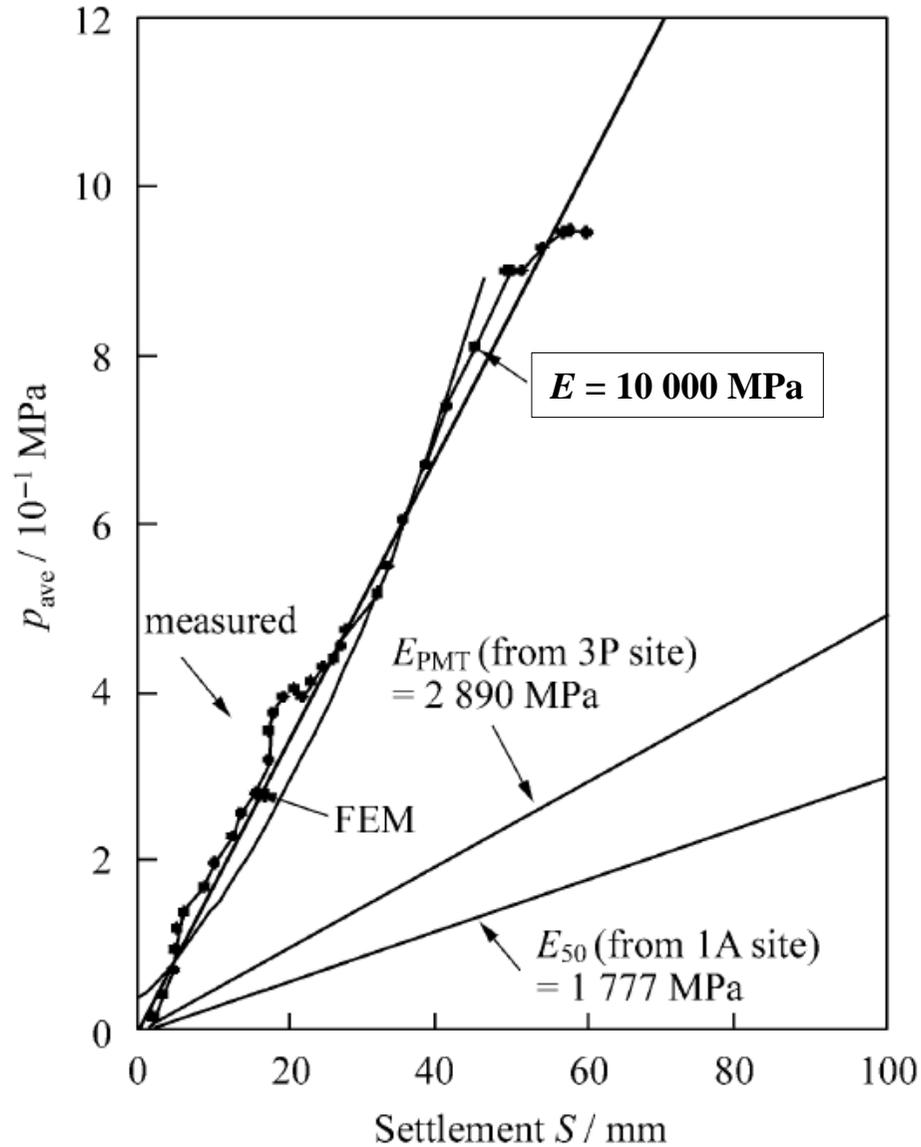


Evolução do assentamento do Pilar 2P

Assentamento:
- a componente elástica é significativa

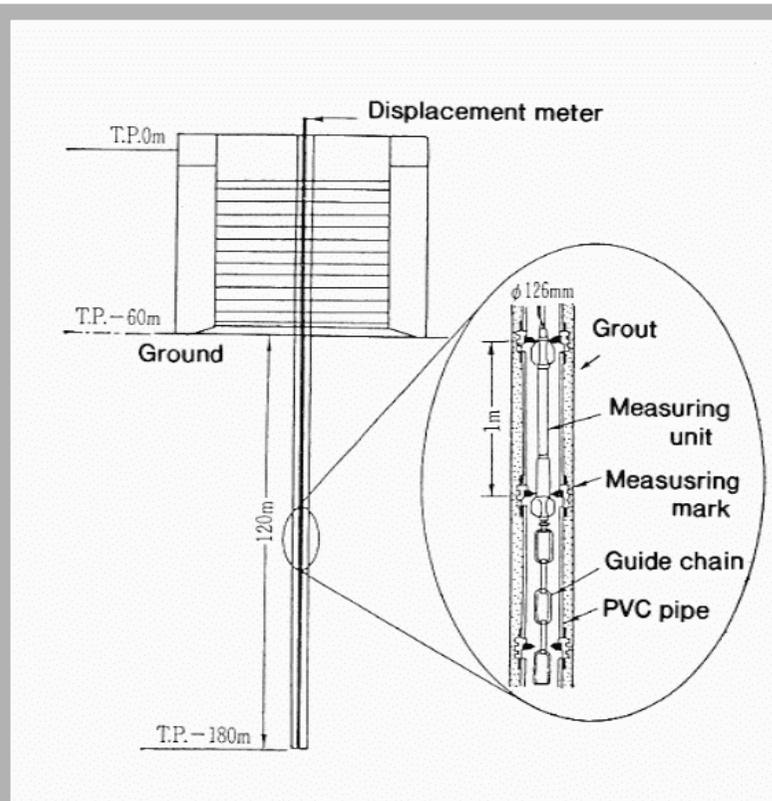


Evolução do assentamento do Pilar 3P



PMT - pressiómetro

E_{50} - medidos em ensaios não drenados

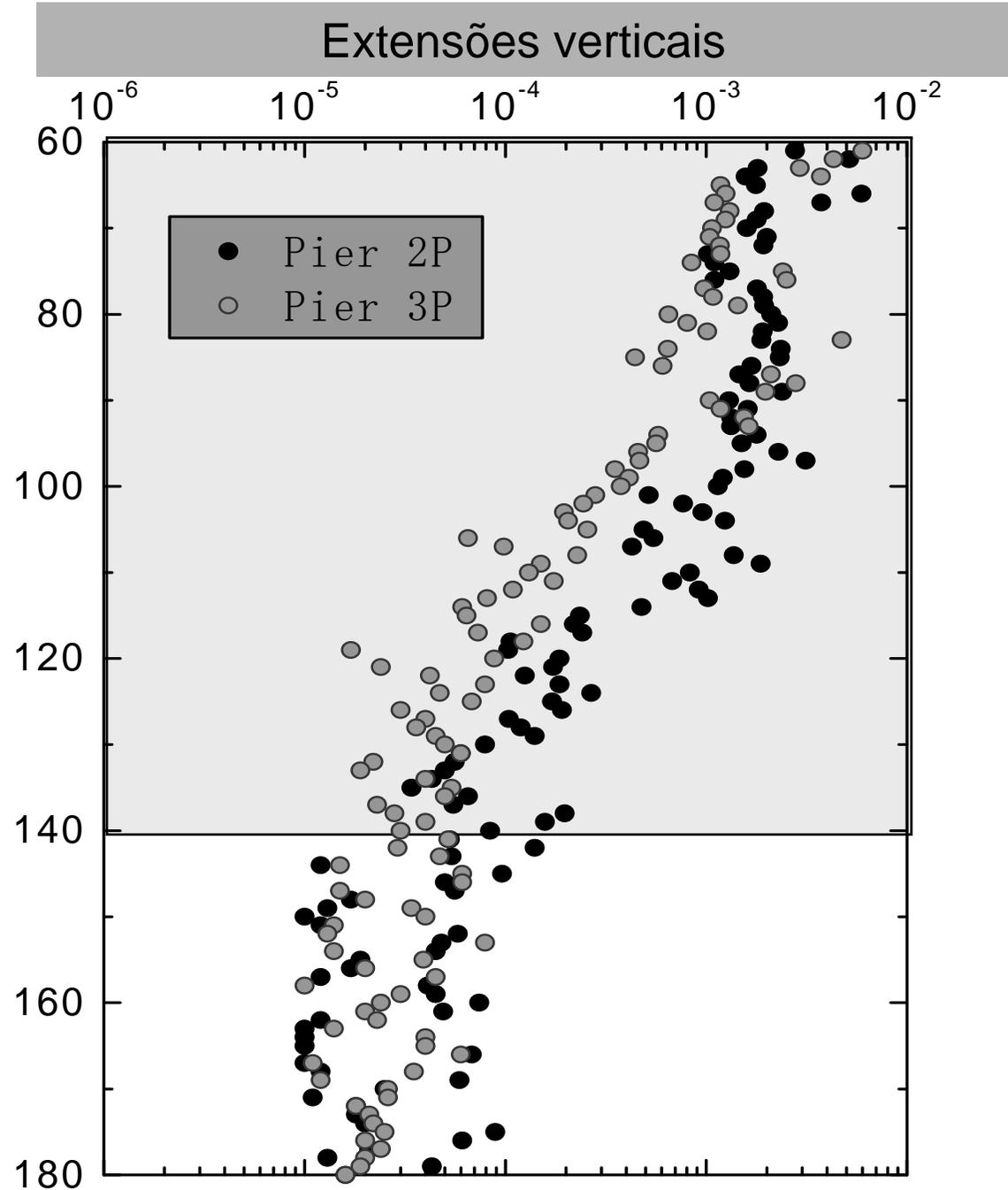


Sistema de medição das extensões verticais no cascalho e na rocha branda sedimentar segundo o eixo da fundação

Pier 2P: $B=80\text{m}$, $\sigma=530\text{kPa}$

Pier 3P: $B=78\text{m}$, $\sigma=480\text{kPa}$

Profundidade (m)



Importância das propriedades elásticas:

Para prever as deformações do terreno associadas às cargas de serviço é importante conhecer as propriedades elásticas porque:

1. as deformações do terreno são relativamente pequenas;
2. a rigidez na gama das pequenas deformações pode relacionar-se com as propriedades elásticas;
3. as propriedades elásticas podem ser medidas através de ensaios de campo e de laboratório.

Como medir o G_0 ?

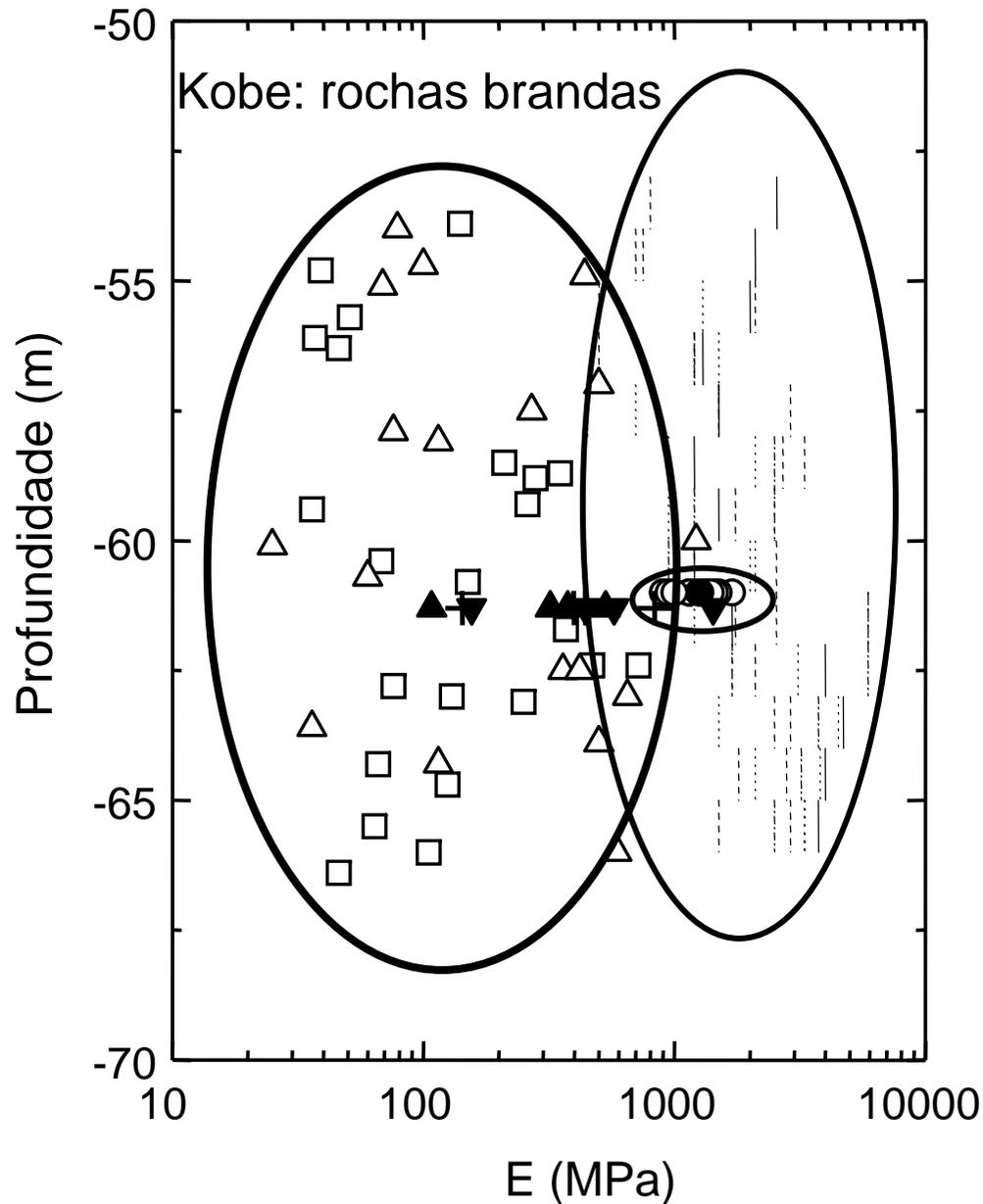
1. Técnicas que baseiam-se na teoria da propagação das ondas (velocidades)

$$G_0 = \rho V_S^2 ; M_0 = \rho V_P^2$$

2. Técnicas que baseiam-se na teoria da elasticidade (tensões-deformações):

$$G_0 = \tau / \gamma ; E_0 = \sigma / \varepsilon \quad (\gamma, \varepsilon = \Delta L / L \approx 10^{-6})$$

Variabilidade muito elevada entre os valores obtidos nos diferentes ensaios



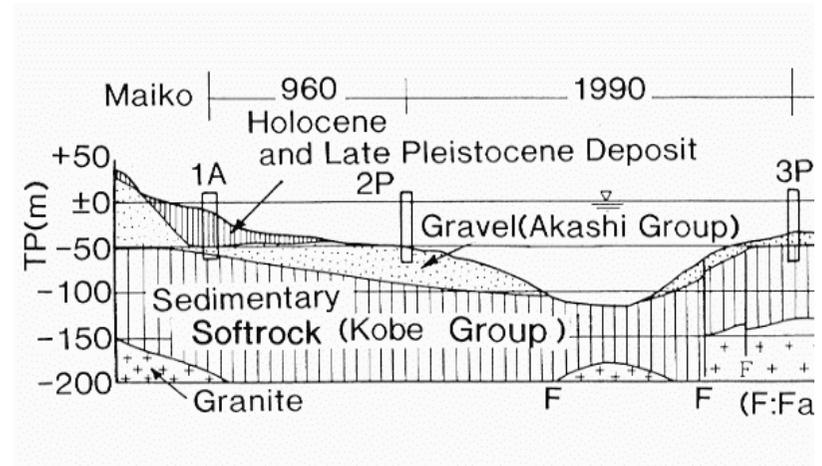
E_0 Valor médio TC-CD
(medição interna - LDTs)

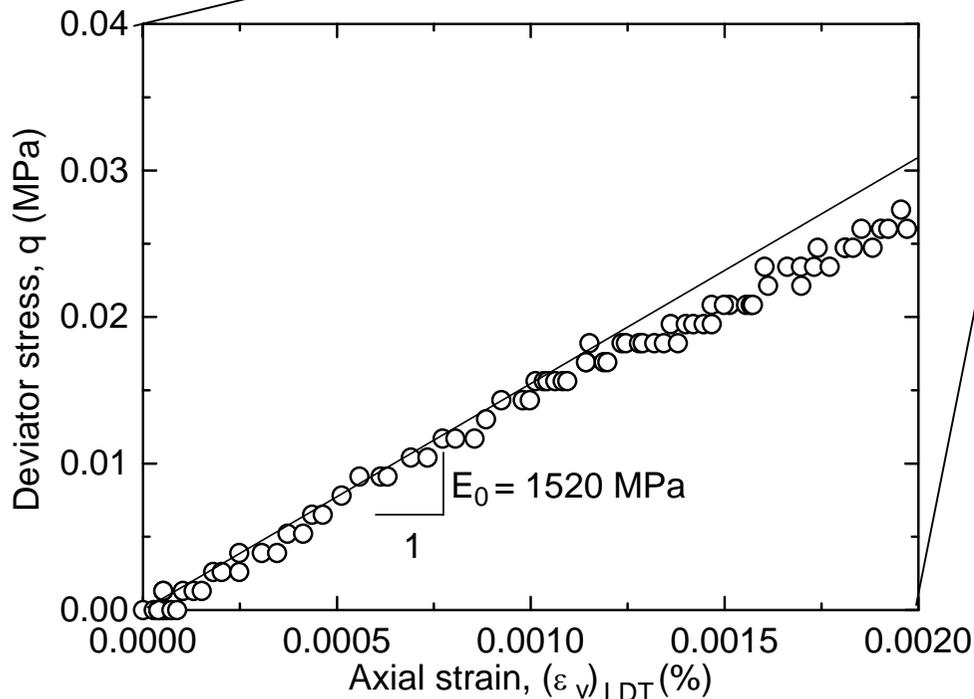
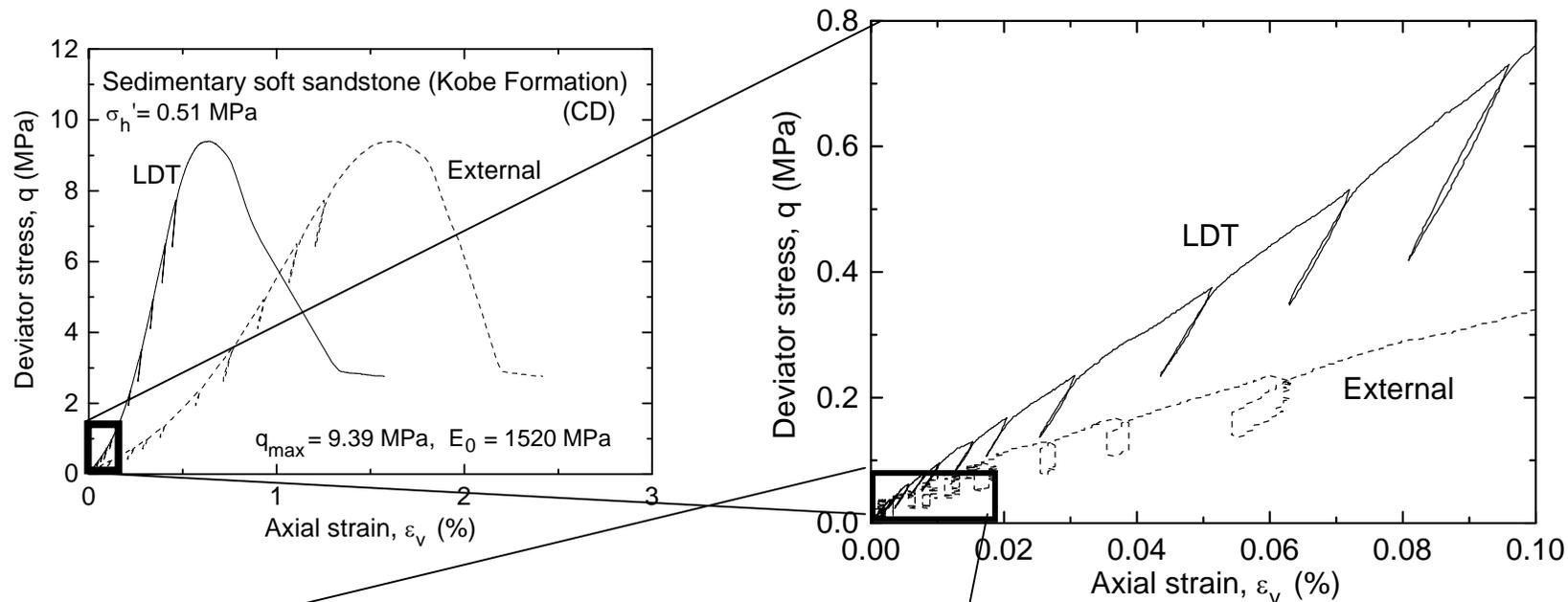
E_{50} (compressão simples,
medição externa)

E_{BHLT} : carregamento primário

E_{PLT} : módulo tangente no
carregamento primário

E_f (a partir de V_s)





Triaxiais de compressão em amostras indeformadas reconsolidadas para as tensões *in situ*

Rigidez *in situ* significativamente subestimada devido a diversos factores: perturbação das amostras; efeito "bedding"; técnicas de reconsolidação, precisão dos equipamentos, etc..

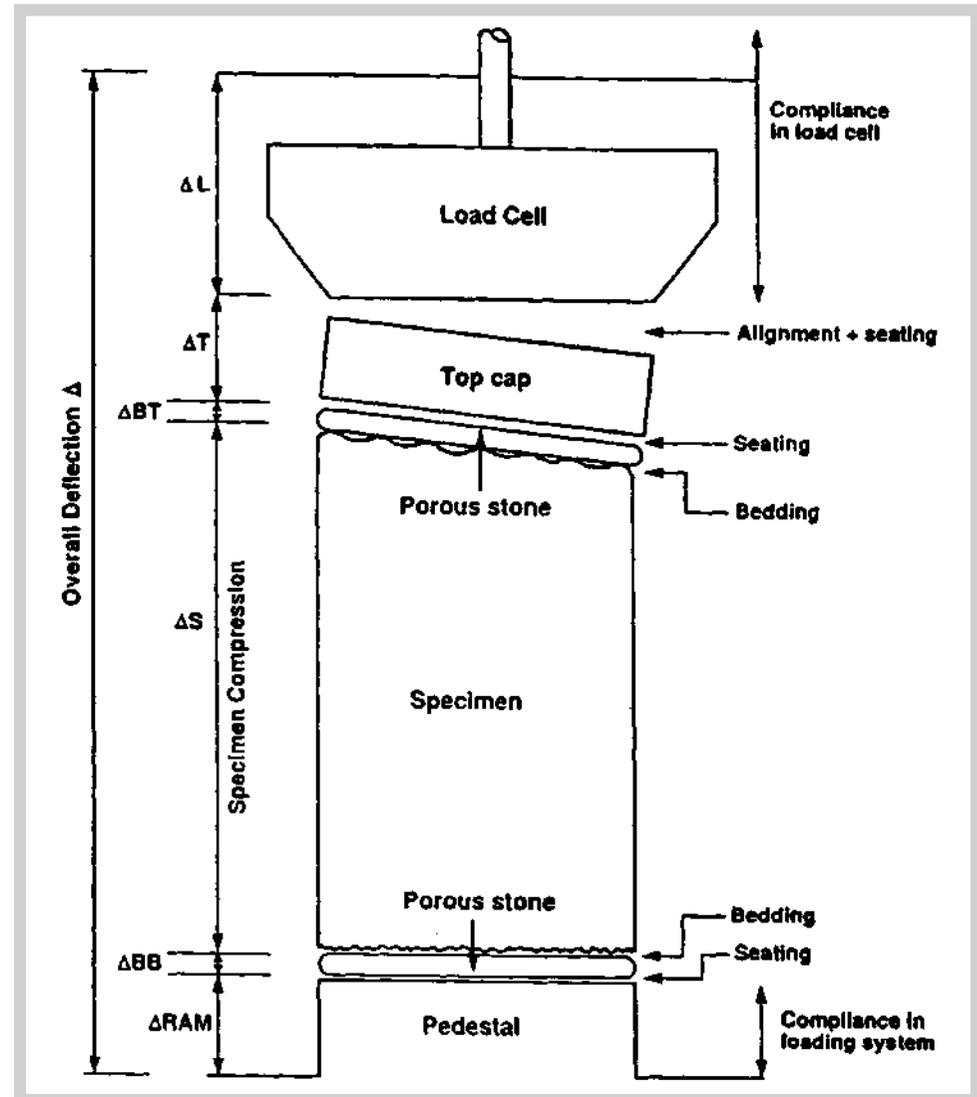
Rigidez *in situ* significativamente submestimada implica projecto excessivamente conservativo!

A ligação entre resultados de ensaios de campo e de ensaios em laboratório não estava convenientemente estabelecido.

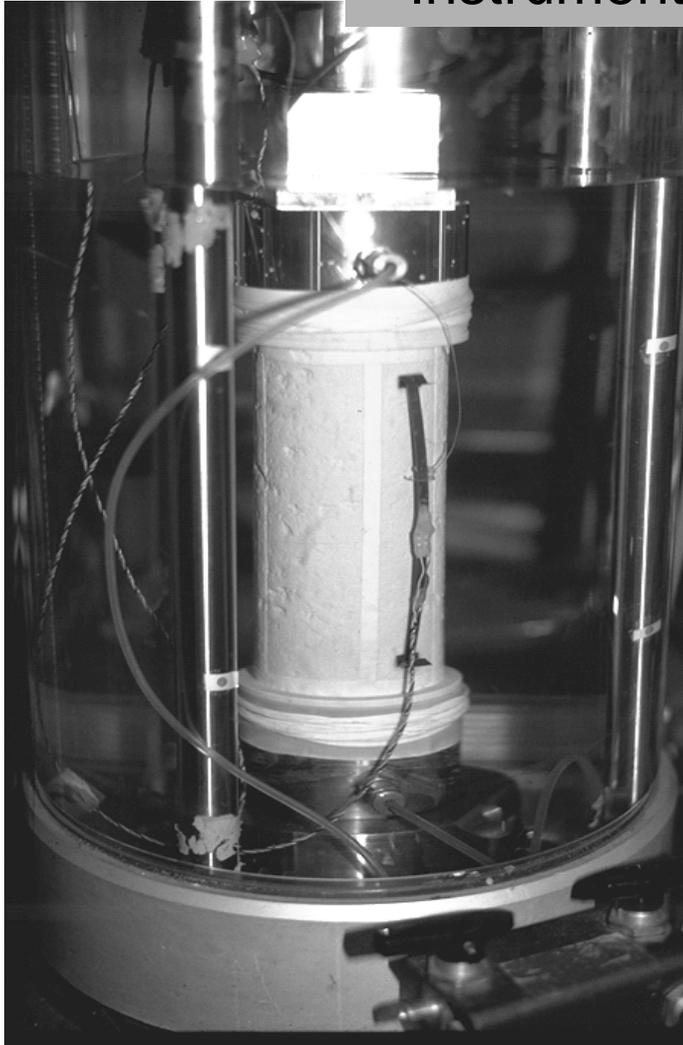
Erros de medição no triaxial clássico (medição externa)

Erros devidos a:

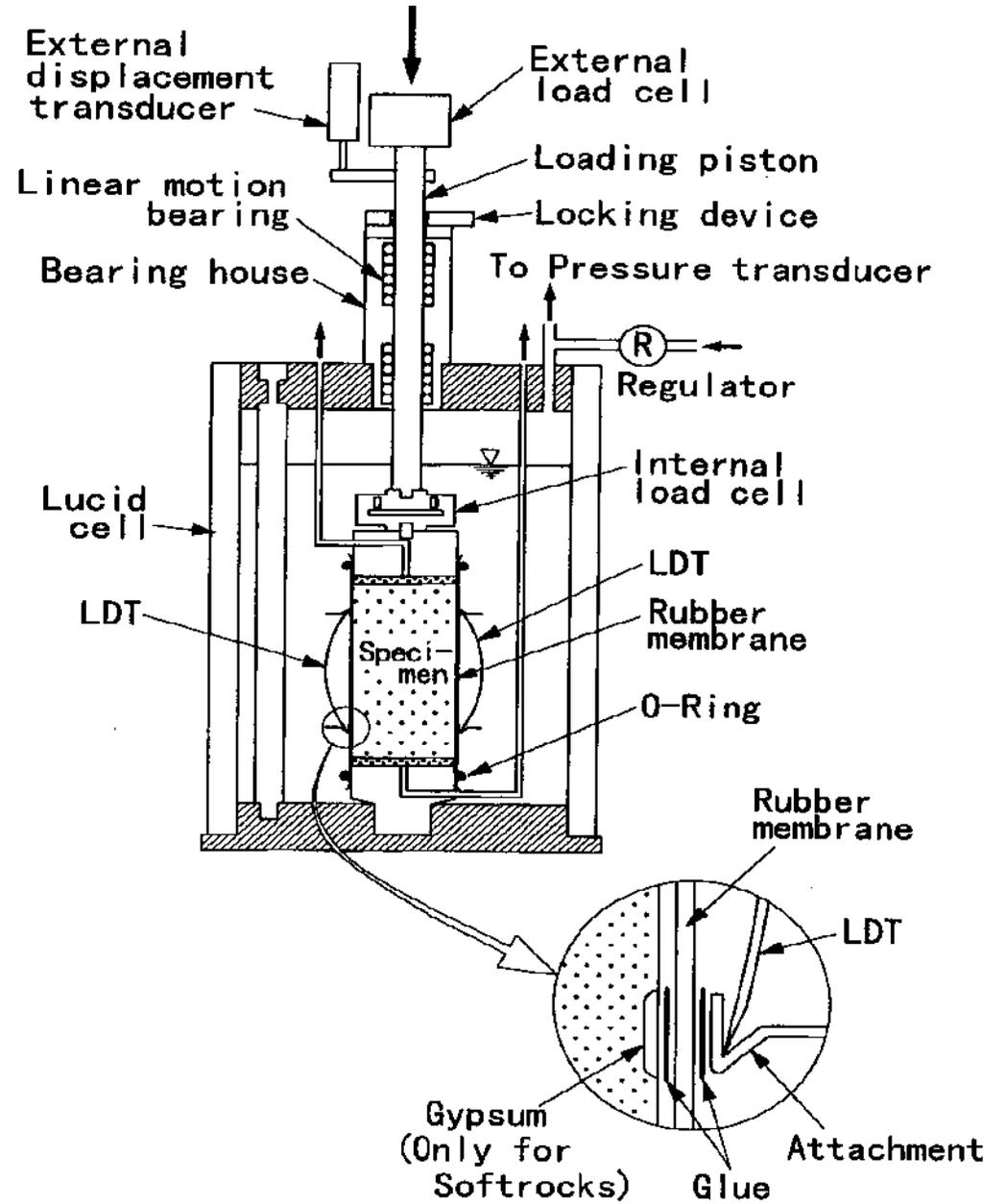
- Faces não perfeitamente planas
- Faces não perfeitamente paralelas
- Atrito nas faces



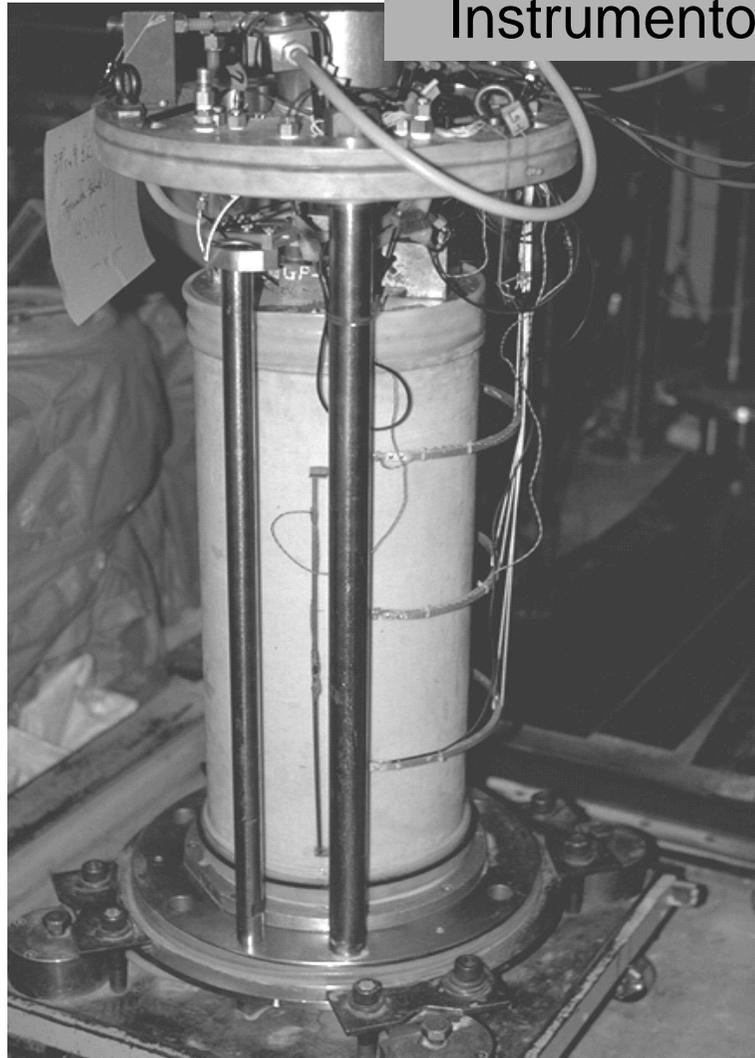
Instrumentos de elevada precisão



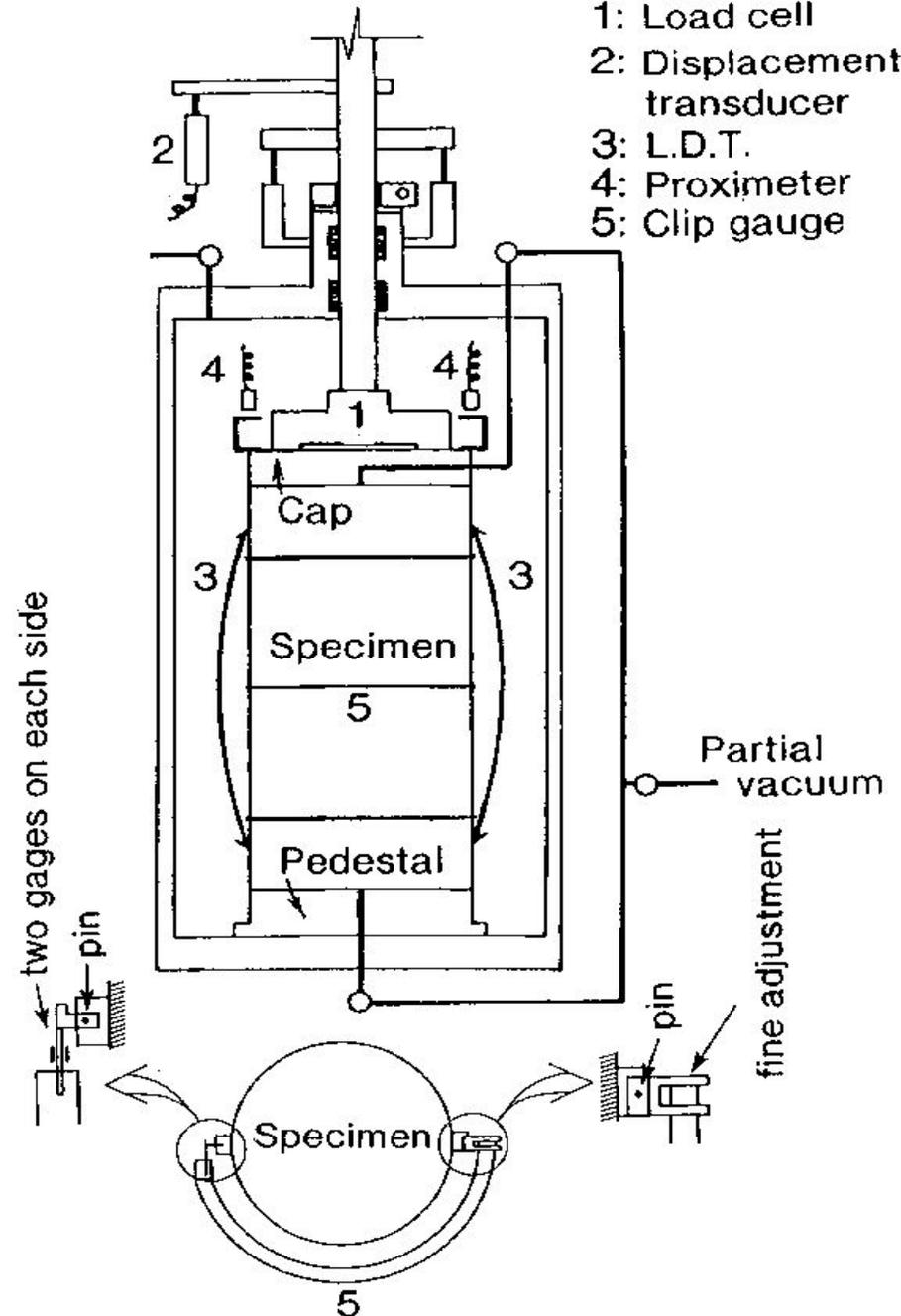
Sistema Triaxial utilizado na Universidade de Tokyo.



Instrumentos de elevada precisão

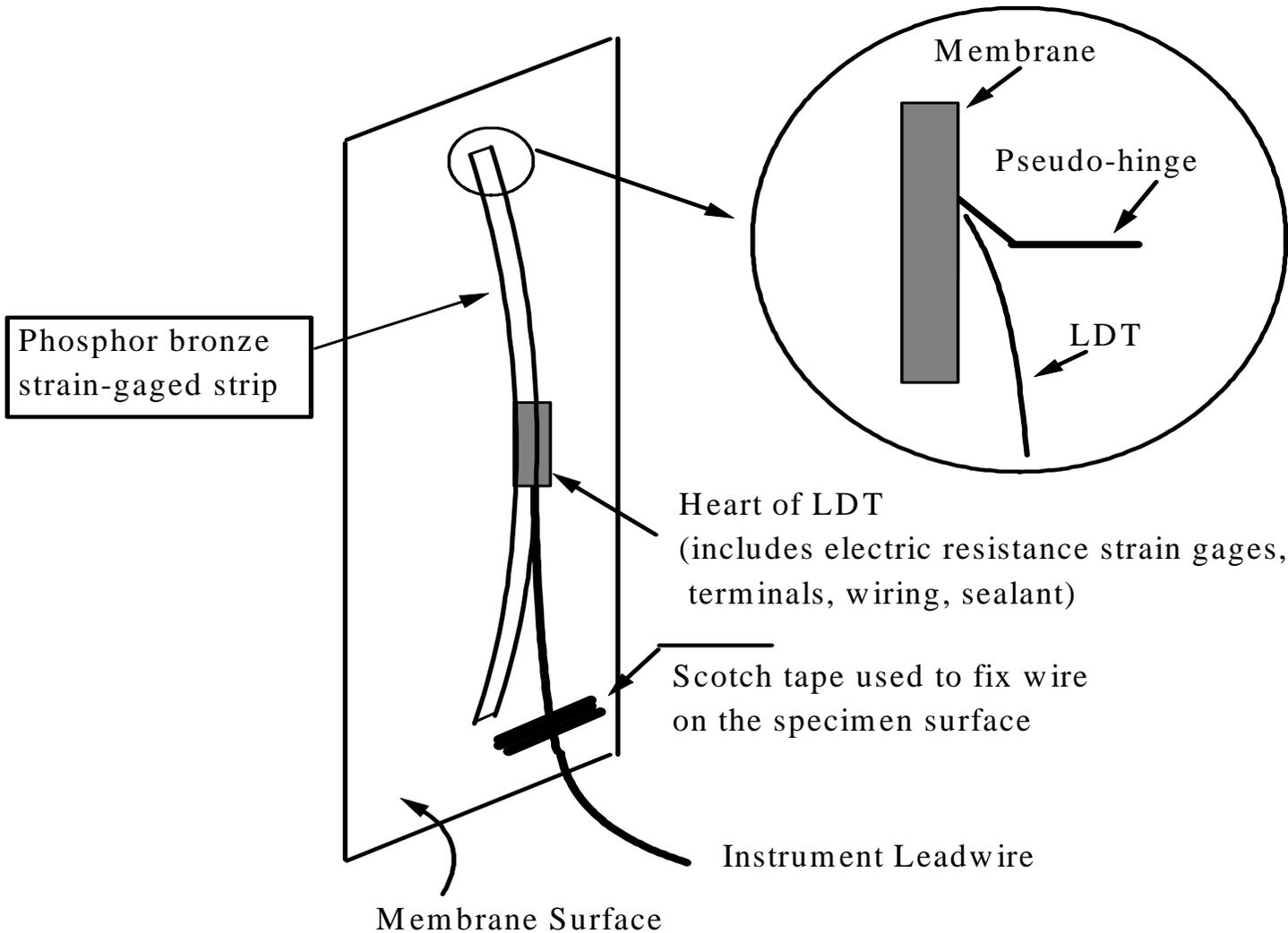


- 1: Load cell
- 2: Displacement transducer
- 3: L.D.T.
- 4: Proximeter
- 5: Clip gauge

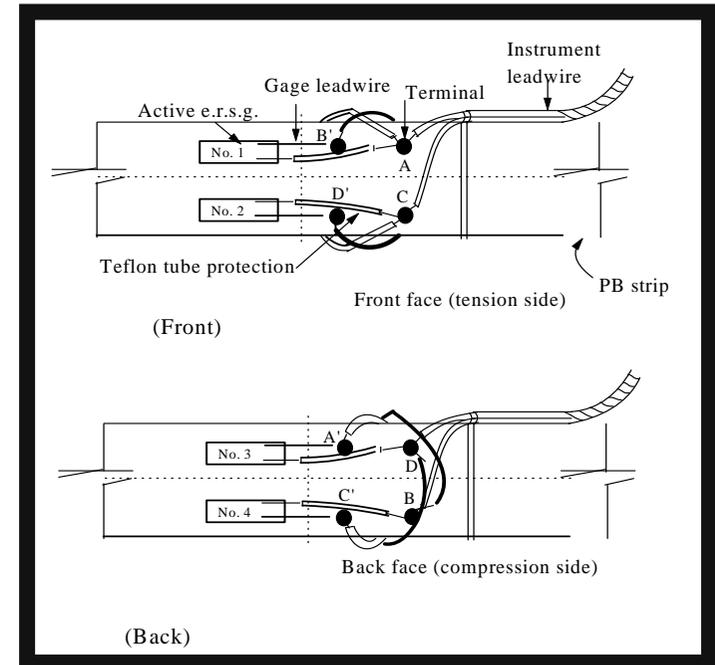


Sistema triaxial para provetes
de 30 cm de diâmetro
University de Tokyo

Instrumentos de elevada precisão

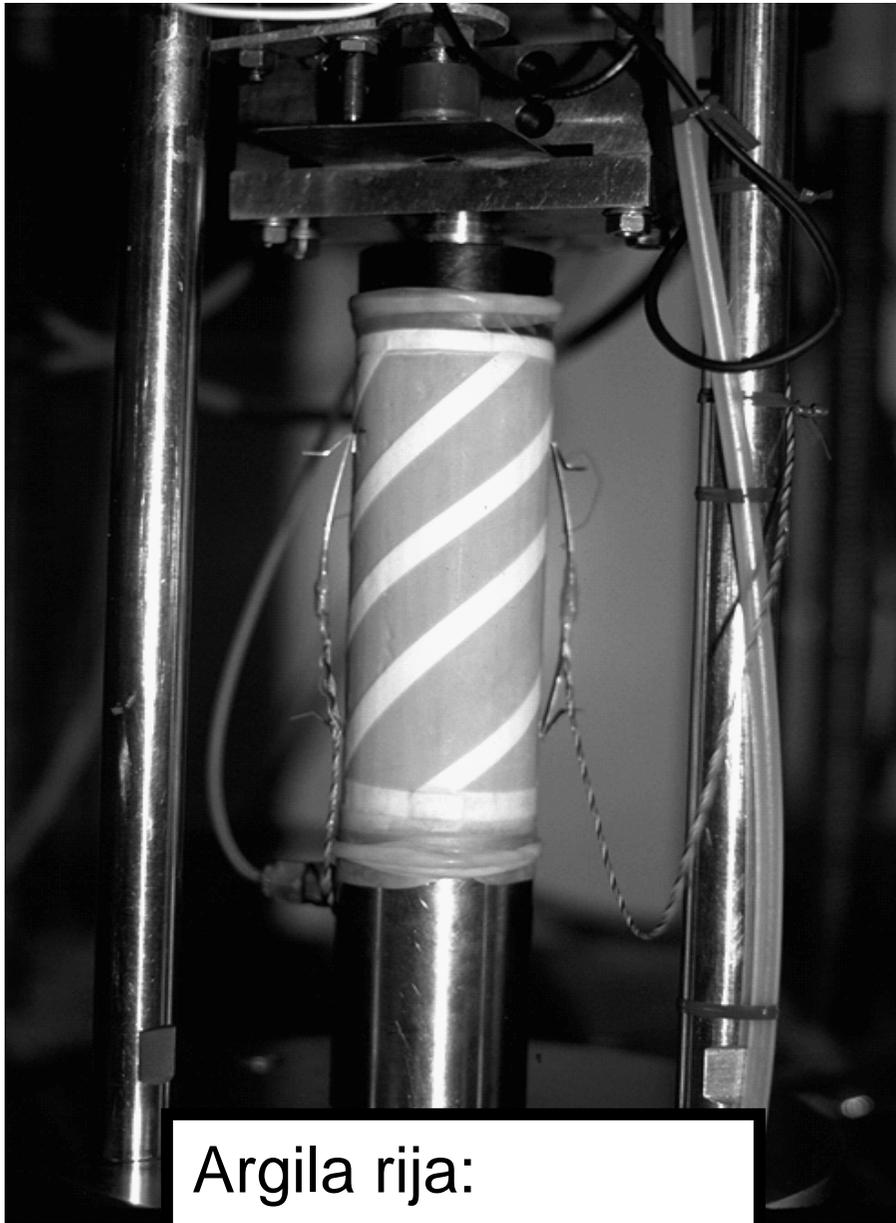


Sistema desenvolvido no
Institute of Industrial Science,
University of Tokyo, 1986



Medições internas recorrendo a sensores
LDT; Local deformation transducer (Goto et al., 1991)

Instrumentos de elevada precisão



Argila rija:

H=12 cm ; D=5 cm

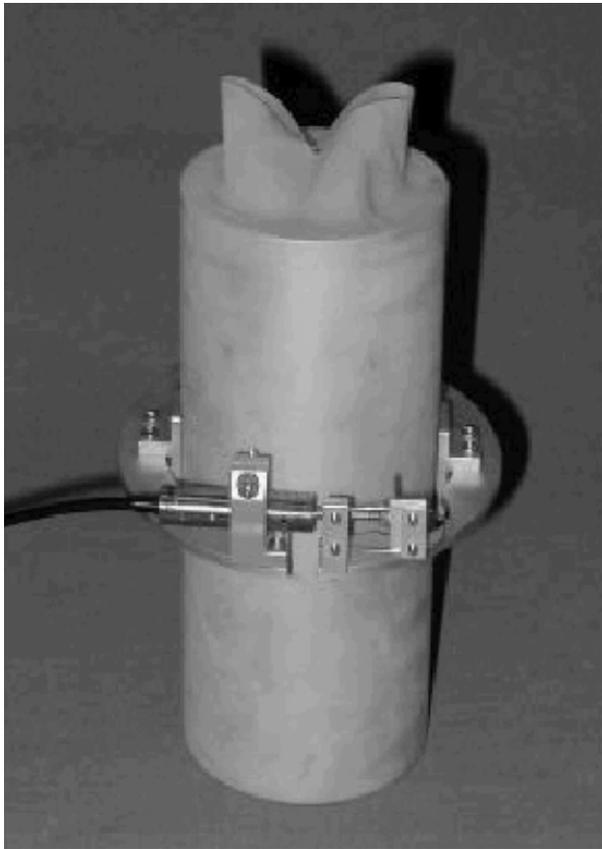


Areia+cimento:

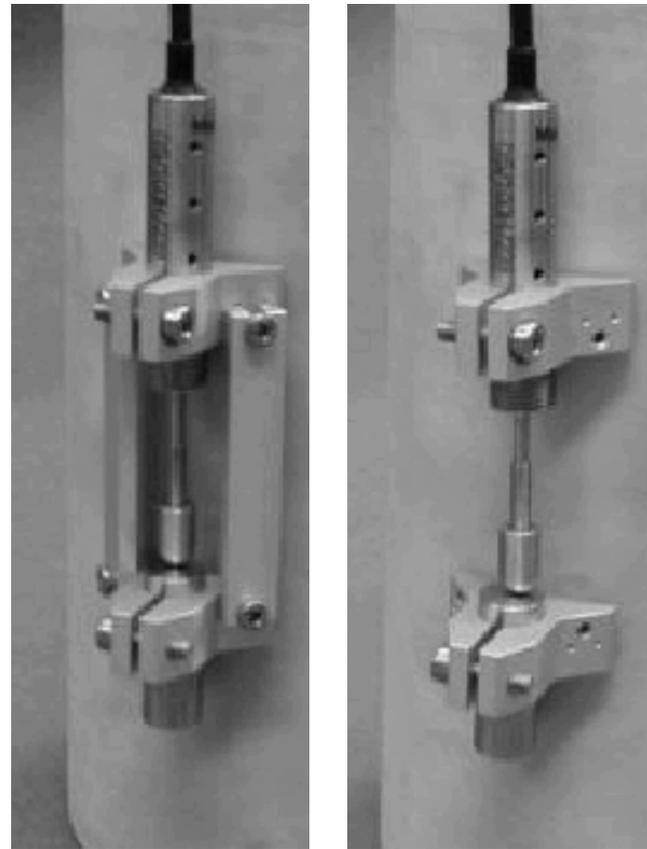
H=60 cm ; D=30 cm

Instrumentos de elevada precisão

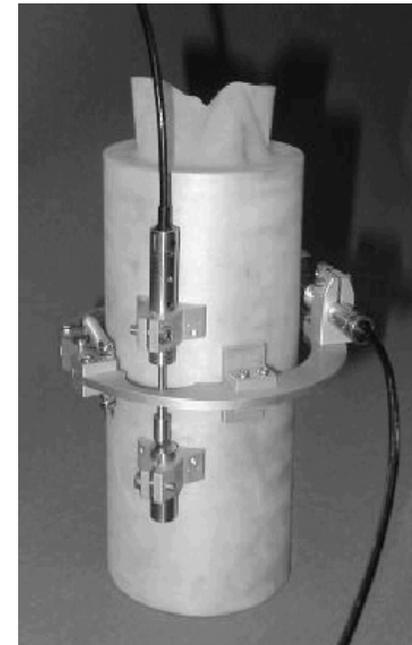
Transdutores LVDT submersíveis



LVDT radial



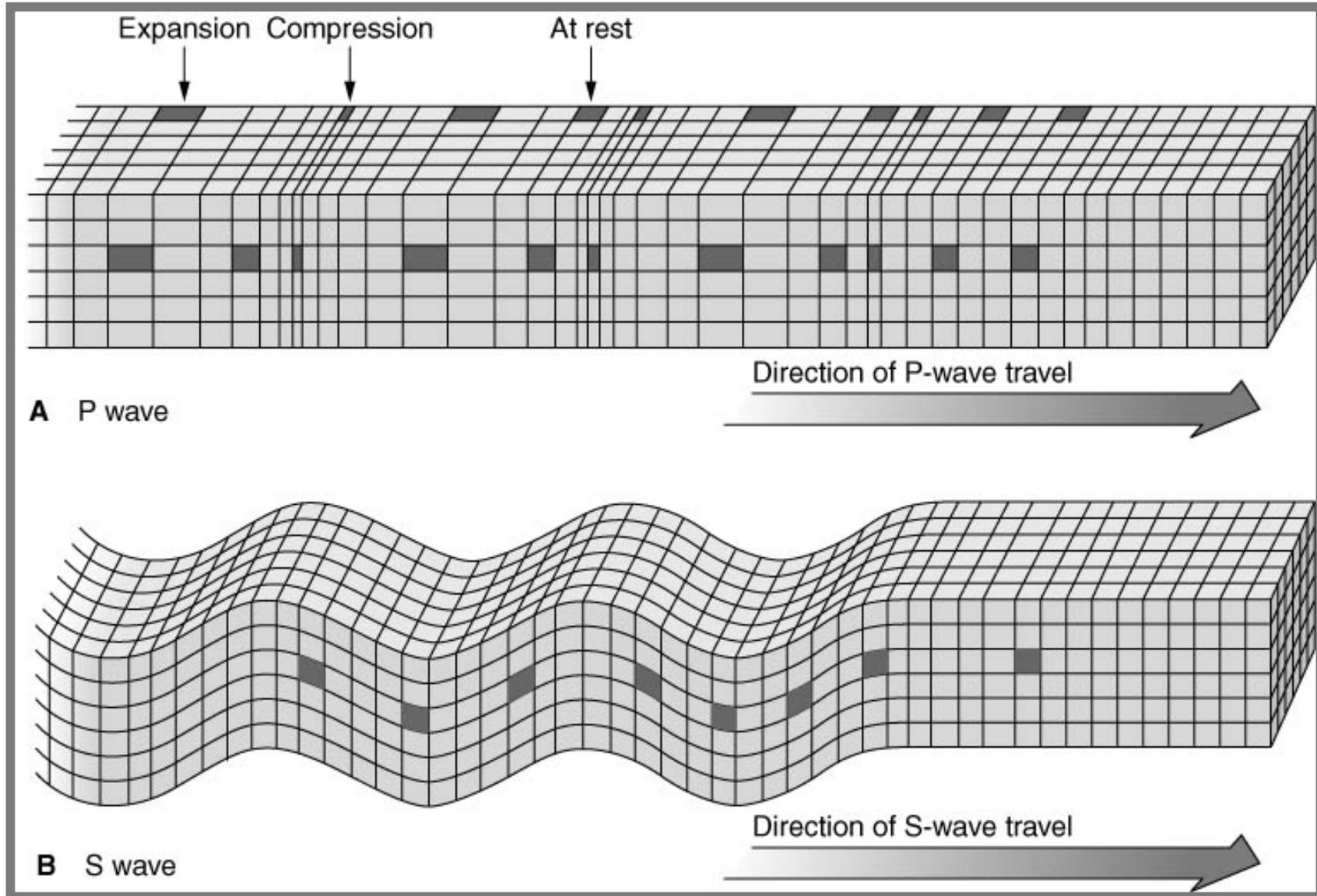
LVDT axial



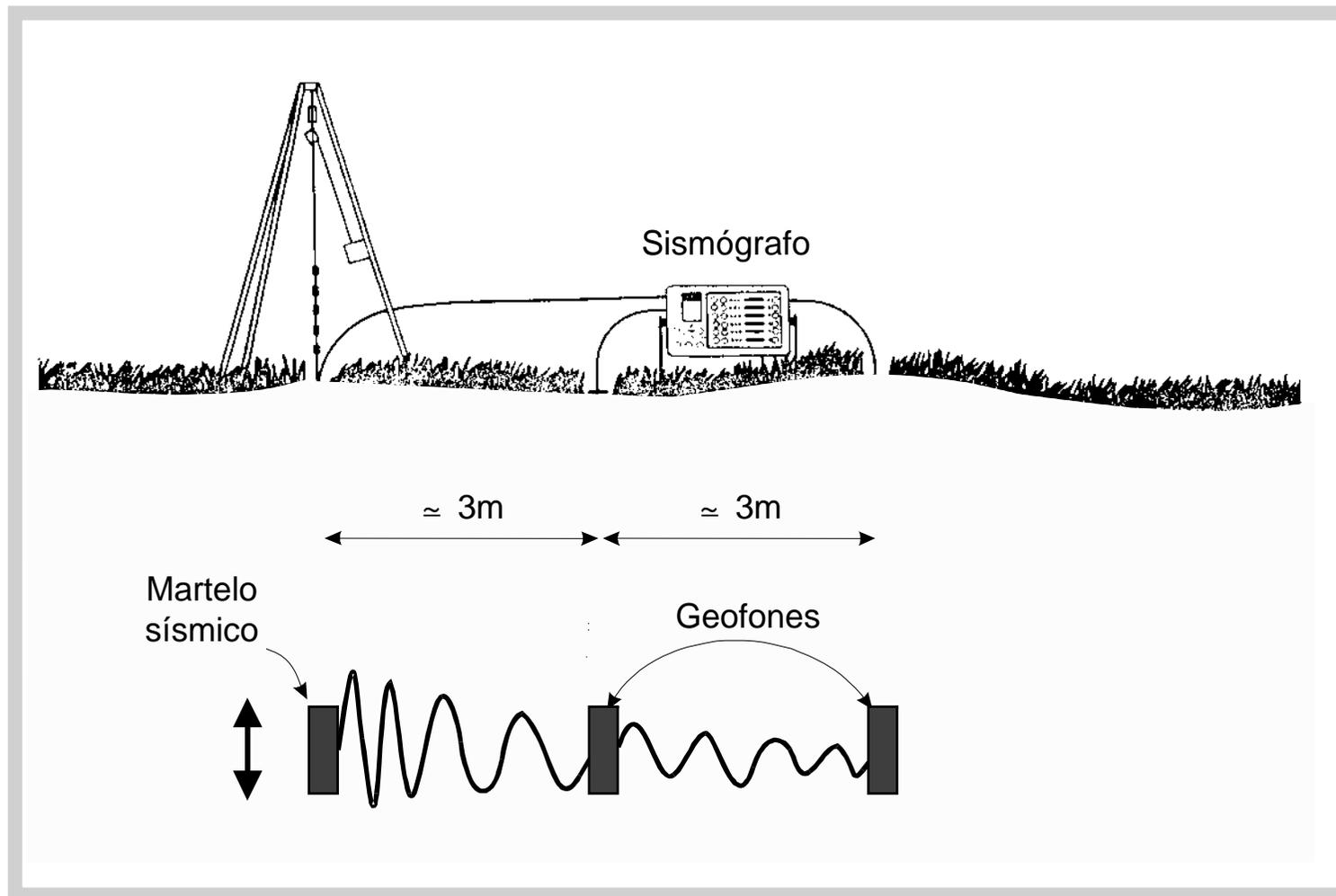
Ensaio de campo (mais utilizados) para avaliação do módulo de distorção dos solos

Ensaio	Princípio da técnica do ensaio	Nível de distorção
Sísmico entre furos de sondagem "Crosshole seismic testing"	determinação da velocidade de propagação das ondas de corte	~ 10 ⁻⁶
Sísmico ao longo de furos de sondagem, com fonte à superfície "Downhole seismic testing"		
Sísmico ao longo de furos de sondagem, com fonte no interior do furo "Uphole"		
Piezocone sísmico		
"Refracção e reflexão sísmica"		
Vibração em regime permanente	determinação da velocidade de propagação das ondas de superfície	~ 10 ⁻⁶
Análise espectral de ondas de superfície		
Ensaio pressiométrico (auto-perfurador)	curva tensão-deformação	> 10 ⁻³

Ondas de volume



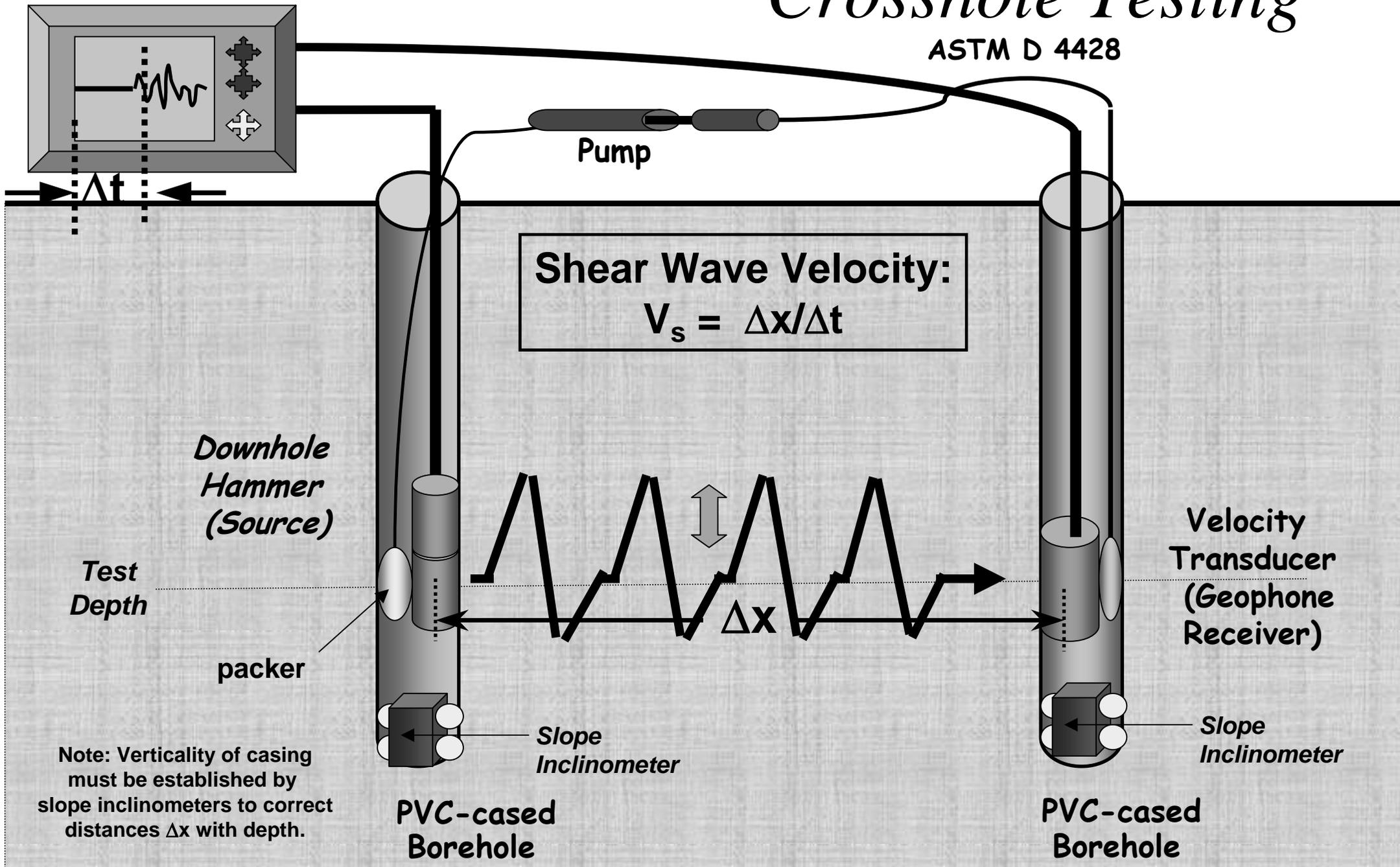
Ensaio sísmico entre furos de sondagem (cross-hole)



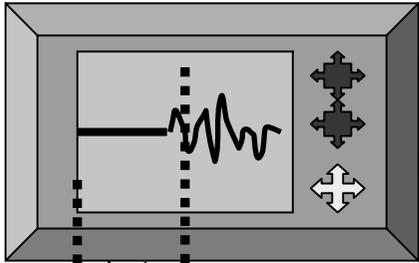
Author: Paul W. Mayne

Crosshole Testing

ASTM D 4428



Oscilloscope



Pump

Shear Wave Velocity:

$$V_s = \Delta x / \Delta t$$

Downhole Hammer (Source)

Test Depth

packer

Note: Verticality of casing must be established by slope inclinometers to correct distances Δx with depth.

PVC-cased Borehole

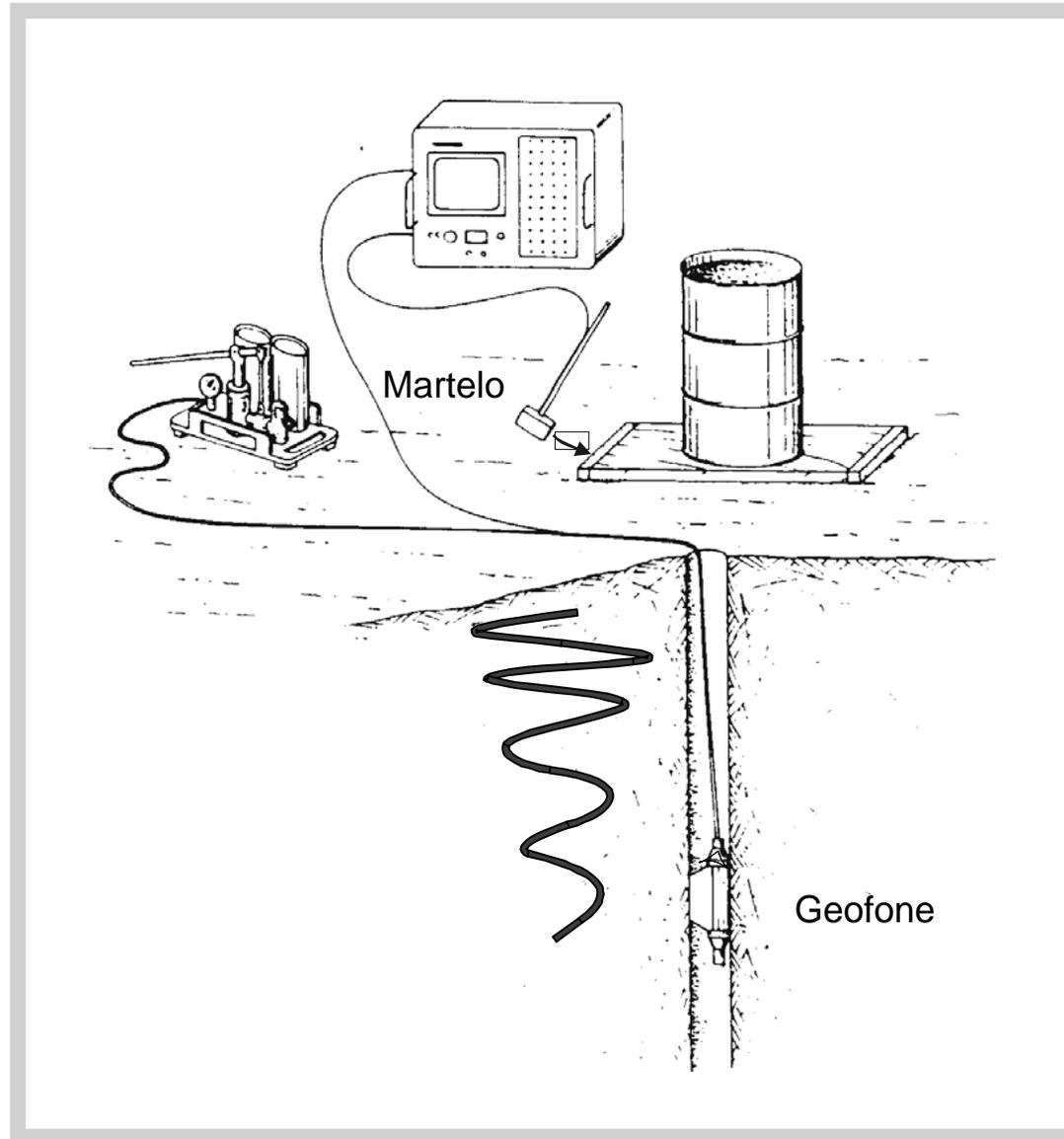
Slope Inclinometer

Velocity Transducer (Geophone Receiver)

Slope Inclinometer

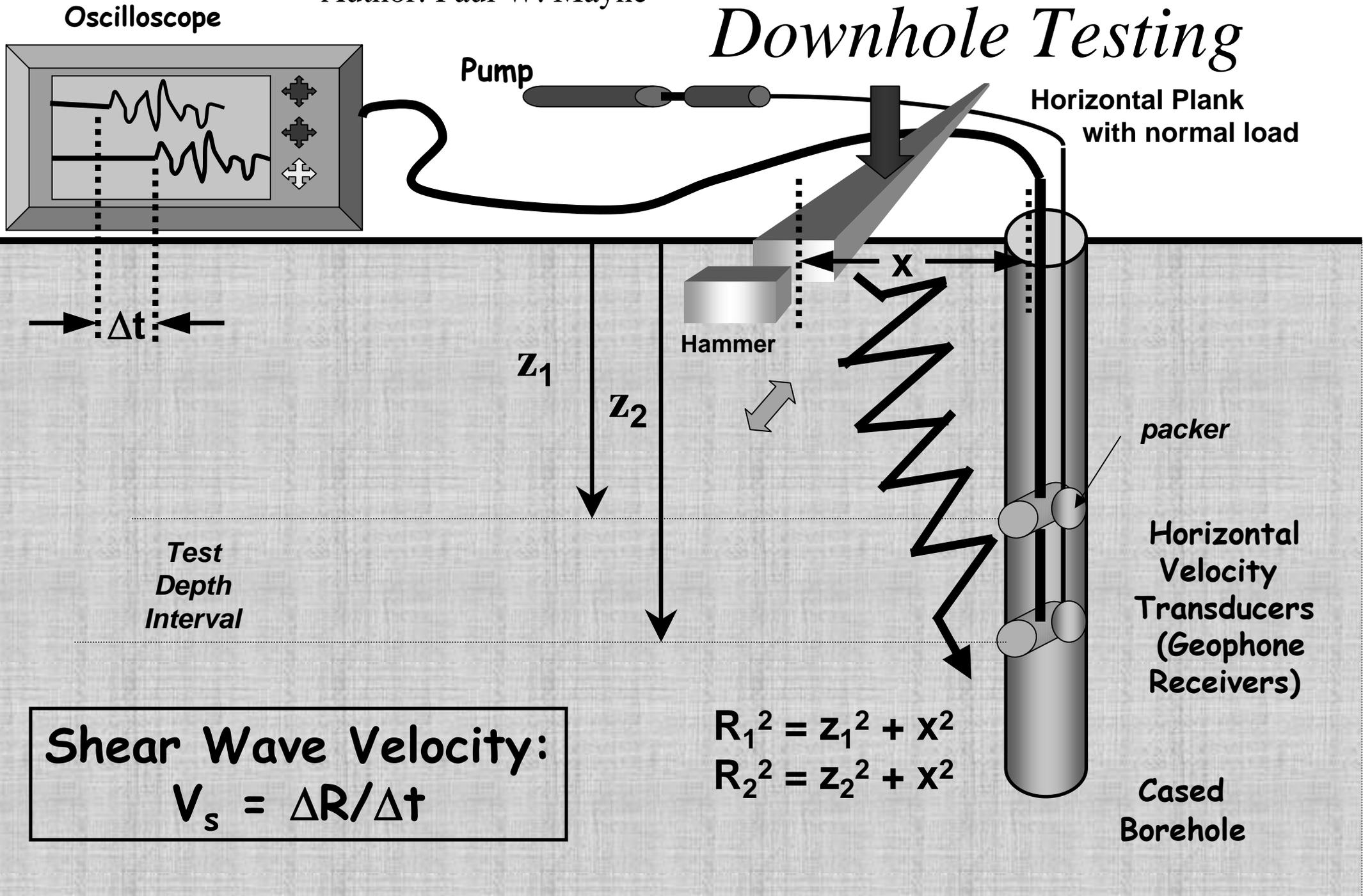
PVC-cased Borehole

Ensaio sísmico ao longo do furo de sondagem (down-hole)



Author: Paul W. Mayne

Downhole Testing



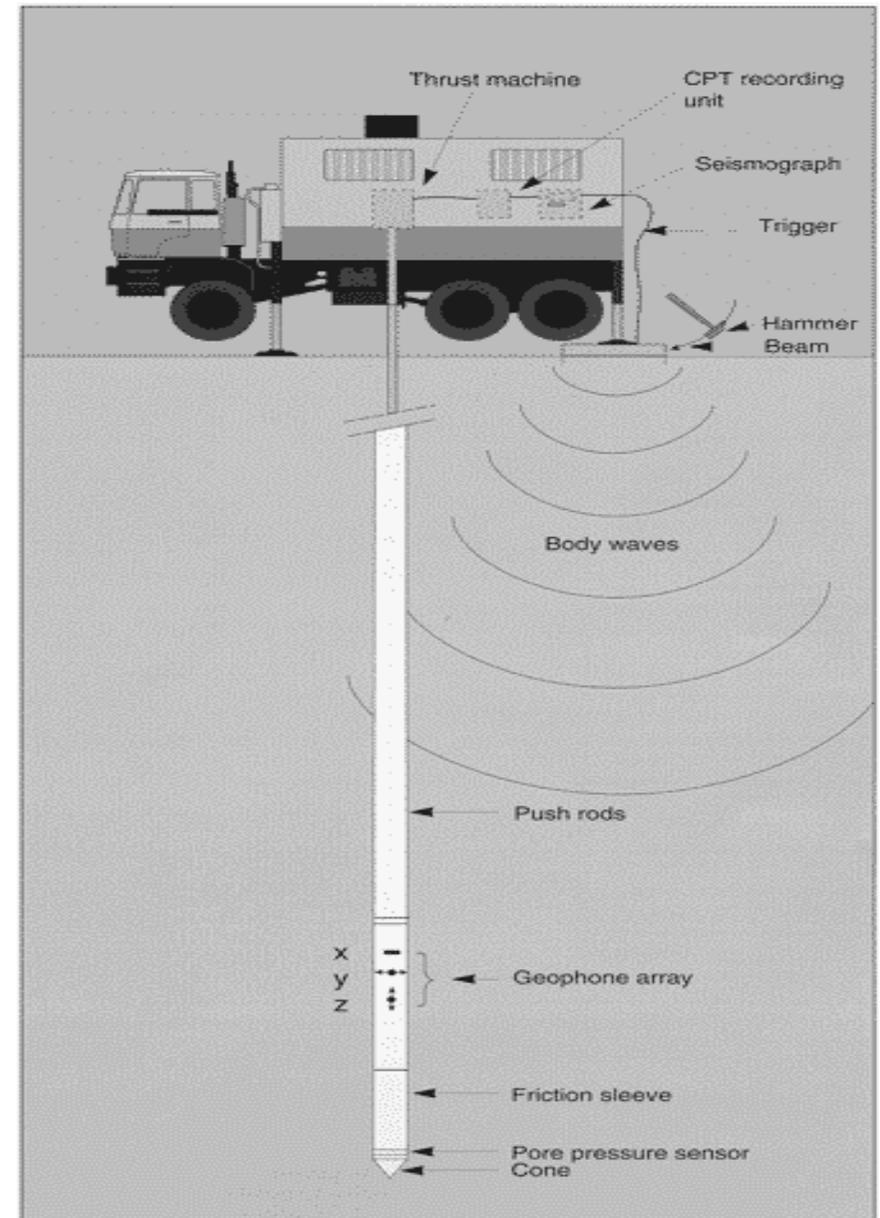
Seismic Cone Penetration Test (SCPT)

The Seismic Cone Penetration Test combines:

- the seismic downhole technique with the standard Cone Penetration test (CPT).
- A seismic receiver is added to the cone, then the similar procedure as the one followed with the seismic downhole test is used.
- The shear wave velocity calculation, therefore, is similar to that of the downhole.

The **advantages** of SCPT are:

- its speed, the fact that it provides static soil properties (such as point bearing and sleeve frictional resistance),
- as well as ground proofing and stratigraphy of the site.

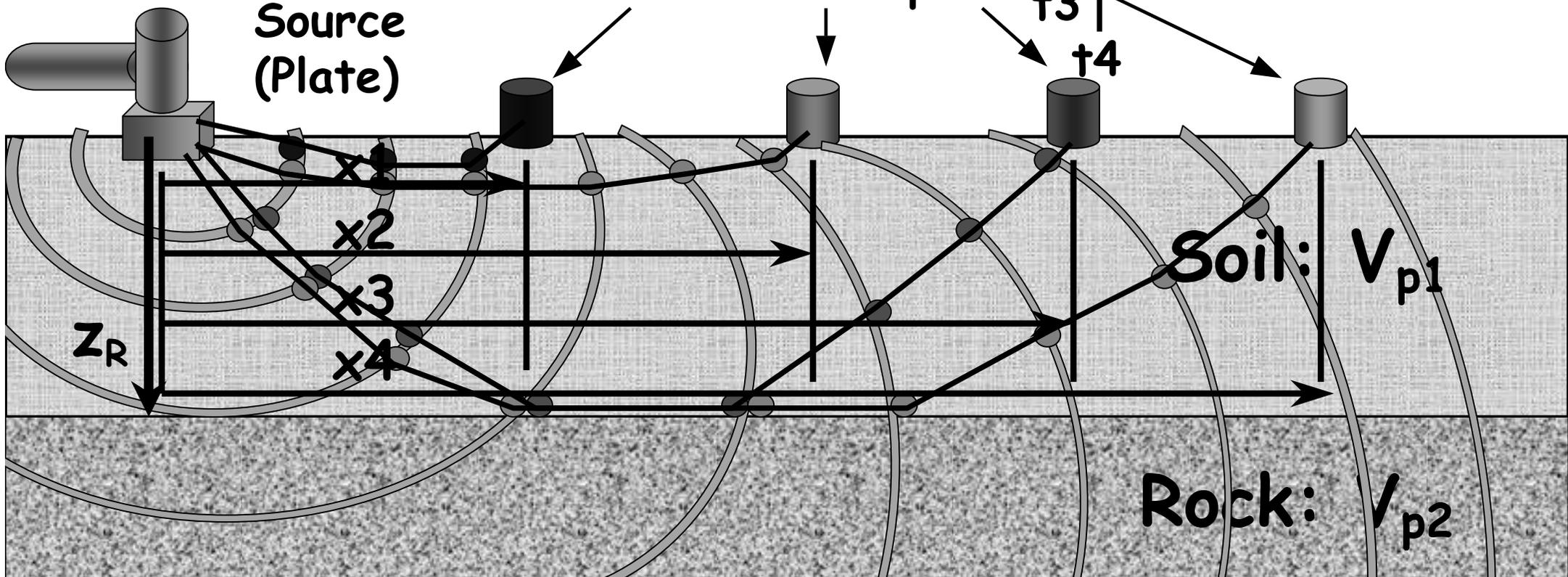


Seismic Refraction

ASTM D 5777

Note: $V_{p1} < V_{p2}$

Determine depth
to rock layer, z_R



Seismic Refraction

