Investigação do solo: para além das simples sondagens

José Maria de Camargo Barros, Prof. Dr.
Centro de Tecnologia de Obras de Infraestrutura (CT-Obras) - Diretor
Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT

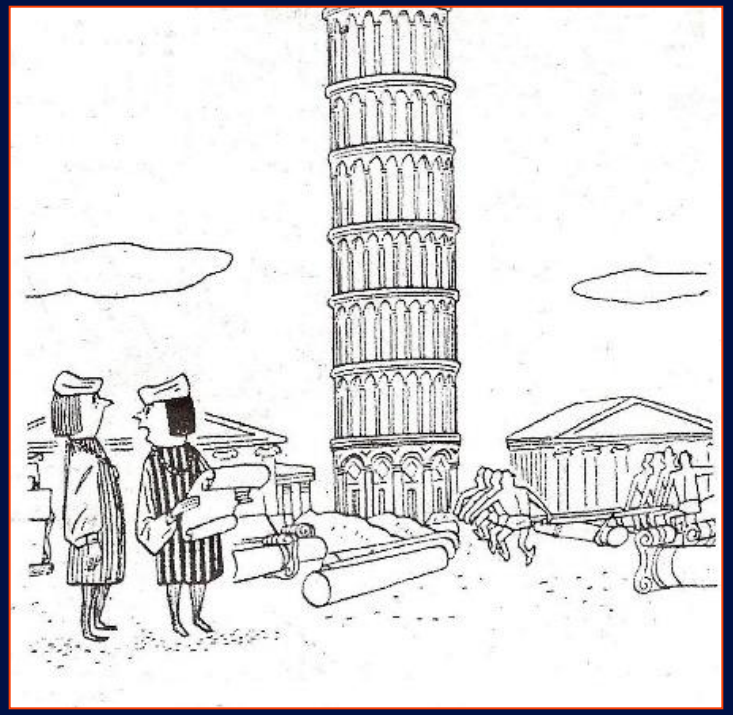
FUNDAÇÕES NUM EMPREENDIMENTO

Apesar de

- Representar 5 a 15% do custo total de uma obra.
- Consumir 15 a 30% do prazo total de uma obra.

No Brasil, investe-se na Investigação Geotécnica até 0,1 % do custo da obra.

Enquanto:
Estados Unidos: 0,2% a 0,5% e
Austrália: 0,25% a 1,0%



"I skimped a little on the foundation, but no one will ever know it"

PORQUE INVESTIGAR MELHOR O SOLO?

Seguros exigem coberturas adicionais para incluir etapa de Fundações, com cláusulas de exclusão, caso projeto e execução não observarem Normas da ABNT.

NBR 15.575 – Norma de Desempenho (6.2.1.) prevê:

Para edifícios ou conjuntos habitacionais...., os projetos ...devem ser desenvolvidos ..., avaliando-se convenientemente os riscos de..., ..., presença de solos expansíveis ou colapsíveis, presença de camadas profundas deformáveis... Devem ainda ser considerados riscos de explosões ..., solos contaminados, ...

Só o SPT é suficiente para atender esta norma?

SONDAGEM A PERCUSSÃO

SPT

NBR 6484/2001

Ensaio à percussão SPT

Evolução Histórica

1902 – amostrador - tubo cravado
1938 – Brasil: amostrador IPT
1948 - Terzaghi e Peck – uniformização do método
1957 – primeira norma ASTM
1977 – primeira norma ABNT
2001 – Norma atual da ABNT

O SPT no Brasil continua sendo feito como em 1948

Vantagens e Desvantagens

Simples;
Baixo custo;
Coleta amostras;
Determina NA;
Muita experiência.

Interpretação ;
Falta uniformidade;
Influência da energia
Formação precária da equipe;
Não avalia solos moles.

N_{SPT}: resultados meramente indicativos

Qualidade: poucas empresas

Fiscalização: inexistente

Ensaios, além das simples sondagens ...

VOCÊ ACEITARIA UM DIAGNÓSTICO SÓ COM SPT?

Avanços no ensaio SPT

Revisão da NBR 6484 inclui Sistema Mecanizado

Vantagens em relação ao manual

Efeito humano desaparece;
Maior produtividade;
Energia controlada;
Padronização de procedimento.

SPT: ensaio imprescindível para 1º reconhecimento, mas muitas vezes não é suficiente.

Ensaios, além das simples sondagens ...

Investigações de Campo

- Amostragem Integral
- Ensaio CPTu
- Ensaio DMT
- Pressiômetro PMT
- Vane Test
- Sísmicos
- Geo-ambientais

Ensaios de Laboratório

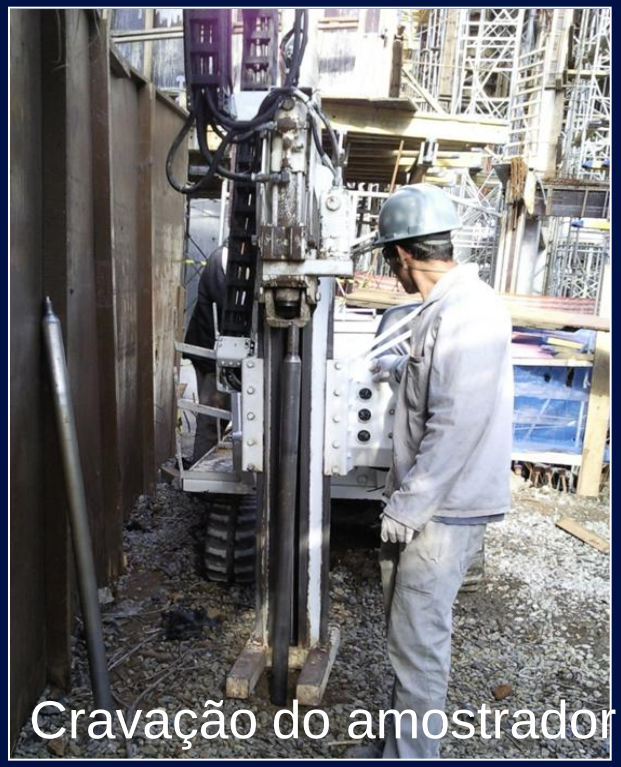
- Caracterização
- Permeabilidade
- Adensamento
- Expansibilidade
- Colapsividade
- Resistência / Cíclicos
- Coluna Ressonante

Desempenho

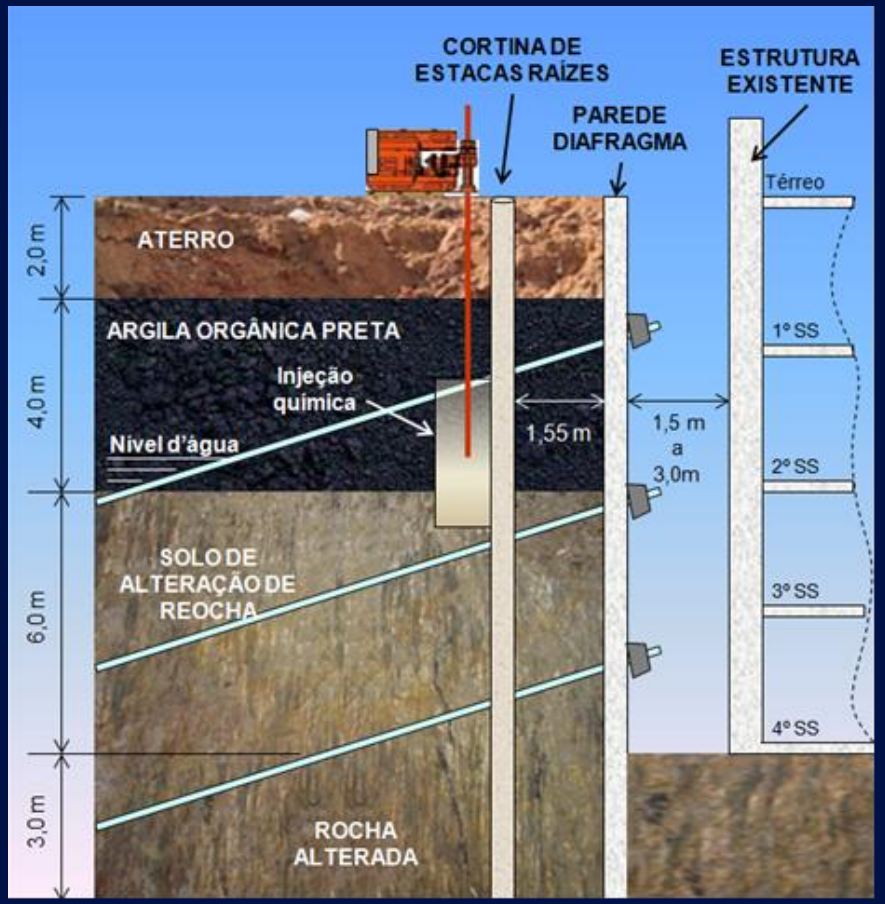
- Provas de Carga
- Medida de recalque
- Ensaios PDA
- Ensaios PIT
- Instrumentação

TODOS DISPONÍVEIS NO BRASIL

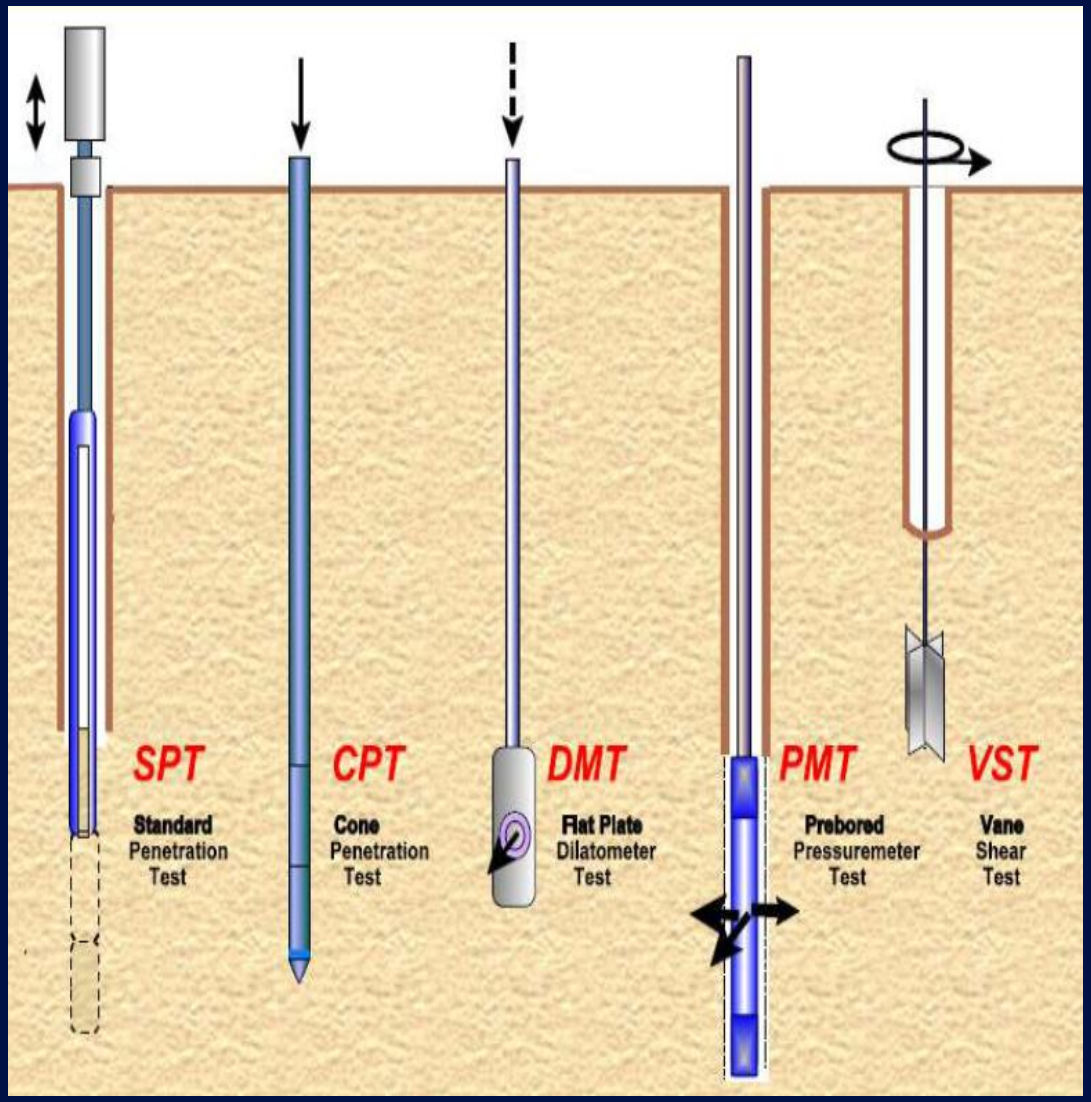
Amostragem Integral - LINER



Amostragem rápida determina o perfil contínuo. Utilizado numa obra para definir cotas exatas para injeção química impermeabilizante



Principais ensaios de campo para fundações



Todos ensaios previstos na norma NBR 6122/2010 da ABNT:

. SPT – sondagem de simples reconhecimento

. CPT – ensaio de cone (NBR 12069)

. DMT – ensaio dilatométrico

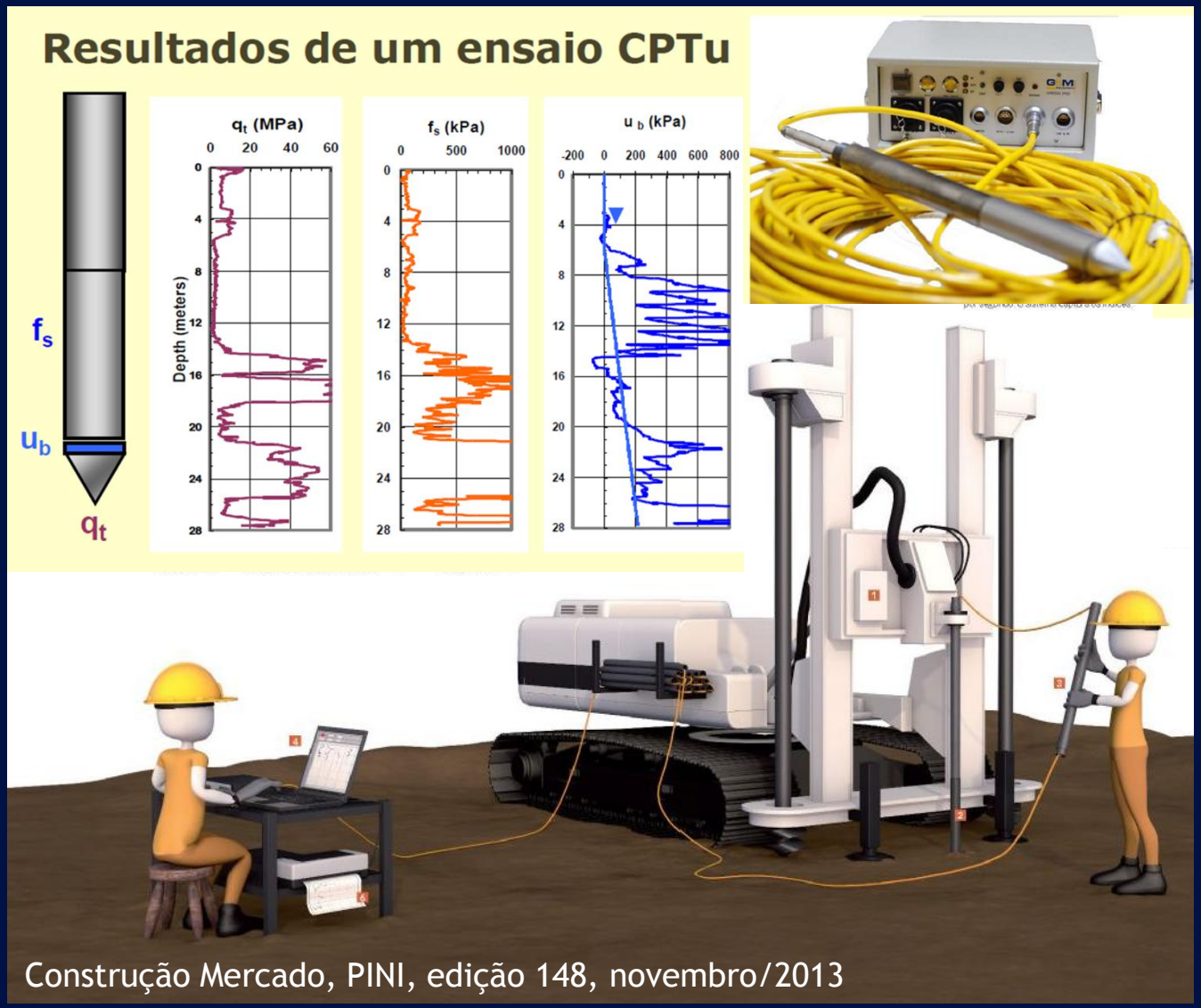
.PMT – ensaio pressiométrico

. VST – ensaio de palheta (vane test)

Ensaio de penetração de cone (CPTu)

Norma da ABNT – NBR 12.069/1991

Ensaio introduzido no Brasil pelas Estacs Franki em 1953



Construção Mercado, PINI, edição 148, novembro/2013

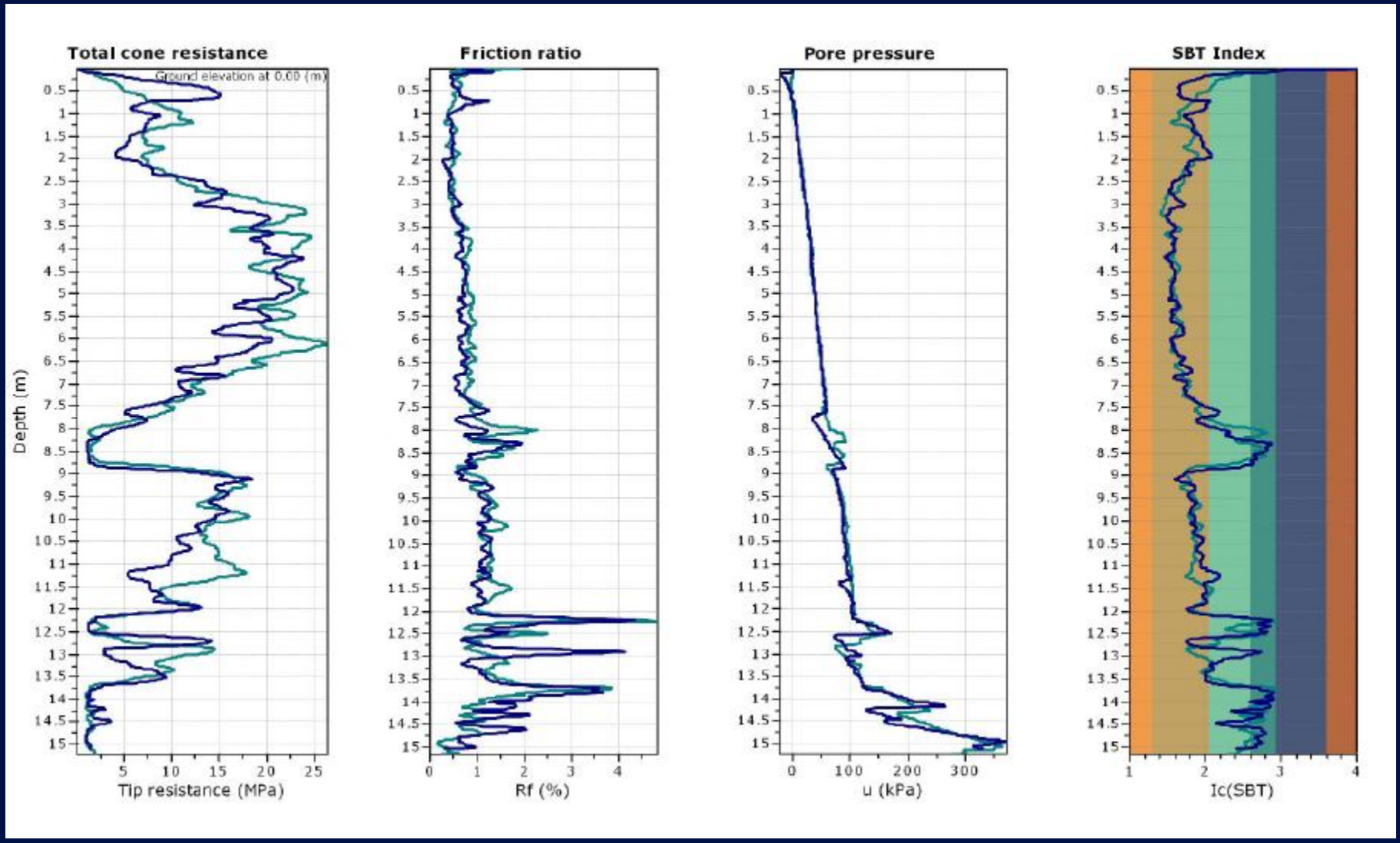
Medidas a cada cm:

q_t = resist. ponta
f_s = atrito lateral
u = pressão neutra

(100 informacões de cada parâmetro por metro)

Repetitividade de resultados do ensaio CPTu

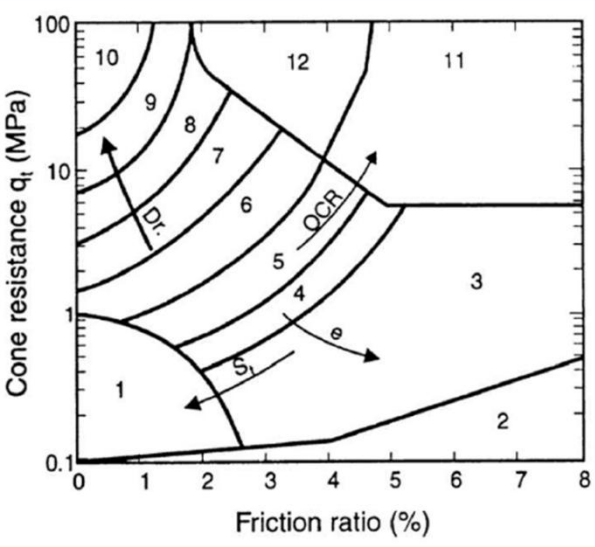
Diversos ensaios no mesmo local



Pena, Damasco. Notas de aula FESP, 2015.

Resultados do ensaio CPTU

Estratigrafia



Zone	Soil Behavior Type
1	Sensitive fine grained
2	Organic material
3	Clay
4	Silty Clay to clay
5	Clayey silt to silty clay
6	Sandy silt to clayey silt
7	Silty sand to sandy silt
8	Sand to silty sand
9	Sand
10	Gravelly sand to sand
11	Very stiff fine grained*
12	Sand to clayey sand*

Vantagens

- Ensaio contínuo, preciso e rápido
- Determina estratigrafia por correlações
- Representa melhor comportamento de estacas
- Correlações com muitos parâmetros geotécnicos
- Estimativa do coeficiente de adensamento (c_v)
- Independe do operador

Desvantagens

- Não coleta amostras
- Não atravessa camadas duras
- Pouco mais caro

Ensaio com Dilatômetro de Marchetti – DMT

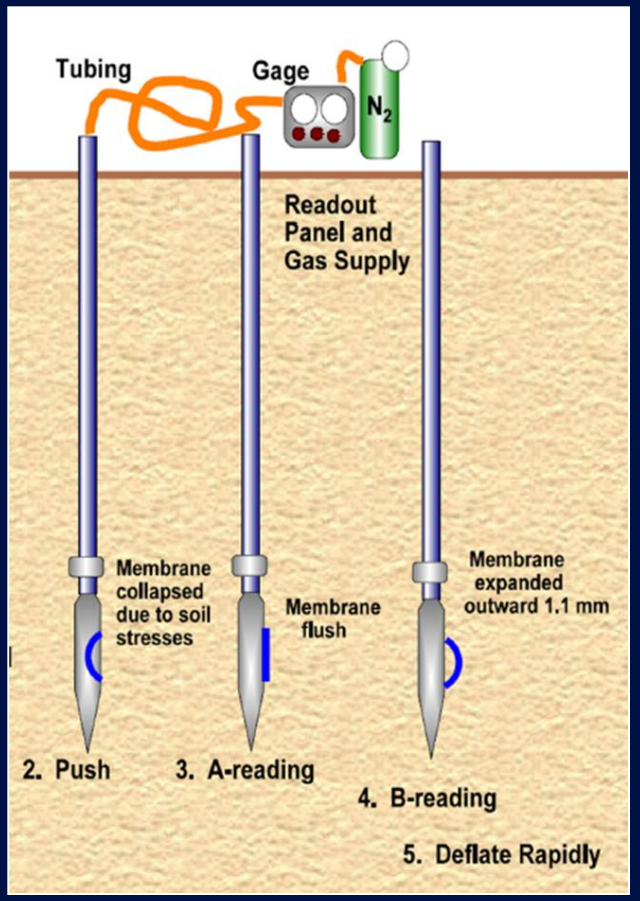
Não tem norma da ABNT, mas tem da ASTM e Eurocode

Desenvolvido pelo Prof. Silvano Marchetti (Itália) em 1975 – Hoje utilizado em 40 países

Ensaio

- Cravação da lâmina com membrana
- Medida da pressão em repouso (P_0)
- Expansão da membrana
- Medida da pressão (P_1)

Pena, Damasco. Notas de aula FESP, 2015.

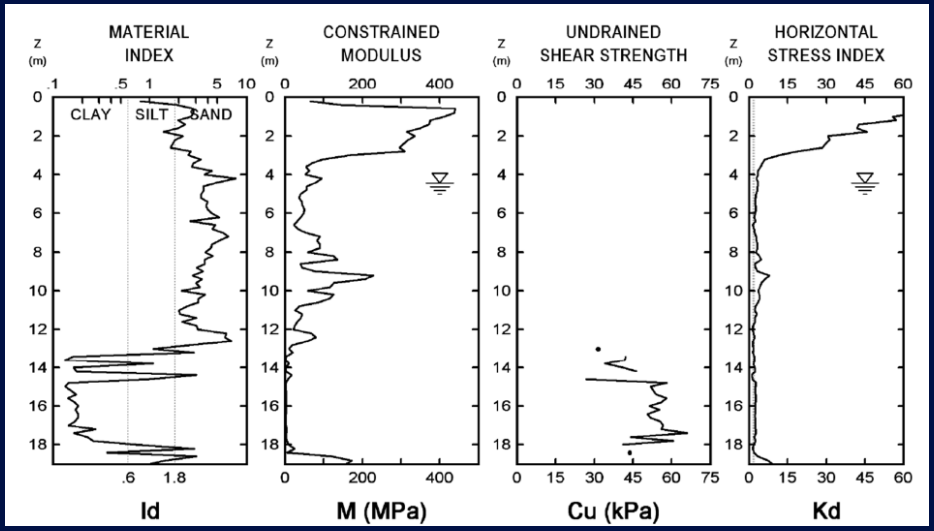


Determinação de Índices

- Índice do Material (I_d)
- Módulo Dilatométrico (E_d)
- Índice de Tensão Horizontal (K_d)

VALORES DO ÍNDICE DO MATERIAL "I_d"							
0,1	0,35	0,60	0,90	1,20	1,80	3,30	10
Argilas sensíveis e turfas	Argilas puras	Argilas siltosas	Siltes argilosos	Siltes puros	Siltes arenosos	Areias siltosas	Areias puras
ARGILAS			SILTES			AREIAS	
TIPO DE SOLO COM BASE NA OBSERVAÇÃO DO COMPORTAMENTO							

Pena, Damasco. Notas de aula FESP, 2015.



Pena, Damasco. Notas de aula FESP, 2015.

Aplicações para estimar:

- Recalque de edifícios, aterros, tanques
- Resistência das argilas saturadas (S_u)
- Ângulo de atrito efetivo das areias
- Estratigrafia (perfil do terreno)
- Controle de compactação de aterros
- Coeficiente de empuxo em repouso (K_0)

Lembrando o que diz a NBR 6122/2010

9 Desempenho das fundações

9.1 Requisitos

O desempenho das fundações é verificado através de pelo menos o monitoramento dos recalques medidos na estrutura, sendo obrigatório nos seguintes casos:

a) estruturas nas quais a carga variável é significativa em relação à carga total, tais como silos e reservatórios;

b) estruturas com mais de 60 m de altura do térreo até a laje de cobertura do último piso habitável;

c) relação altura/largura (menor dimensão) superior a quatro;

d) fundações ou estruturas não convencionais.

Pode também ser necessário o monitoramento de outras grandezas, tais como: deslocamentos horizontais, desaprumos, integridade ou tensões. O resultado das medições deve ser comparado com as previsões de projeto.

O projeto de fundações deve estabelecer o programa de monitoramento, incluindo: referência de nível (indeslocável) a ser utilizada, características dos aparelhos de medida, freqüência e período em que as leituras serão realizadas.

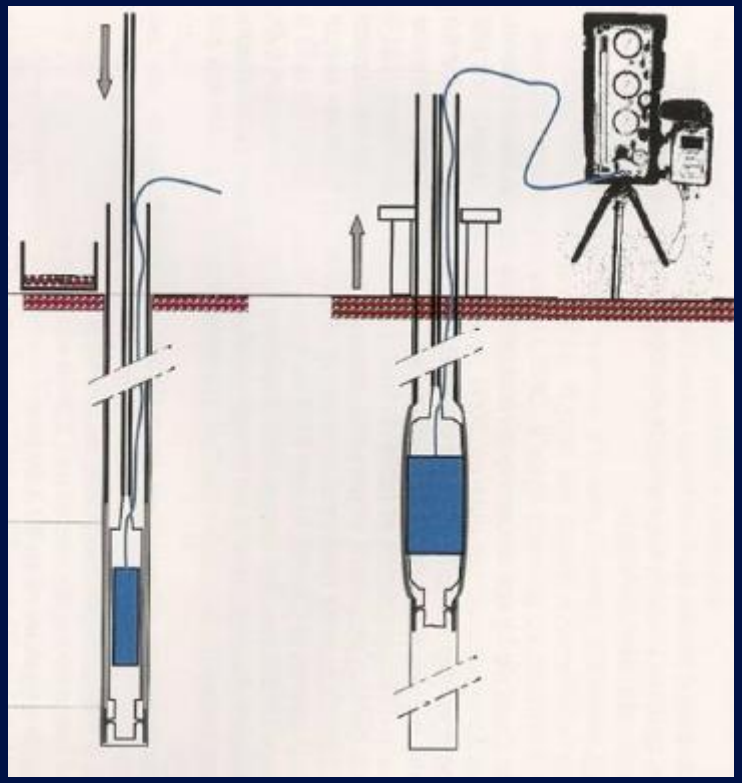
Ou seja, as medições de recalque são obrigatórias nos casos acima e as mesmas devem ser comparadas com as previsões de projeto.

Ensaio Pressiométrico (PMT)

Normas da ASTM e Eurocode

Ensaio desenvolvido na França pelo Eng. Louis Menard em 1955

Rotineiro na França, introduzido no Brasil em 1974 pelo IPT



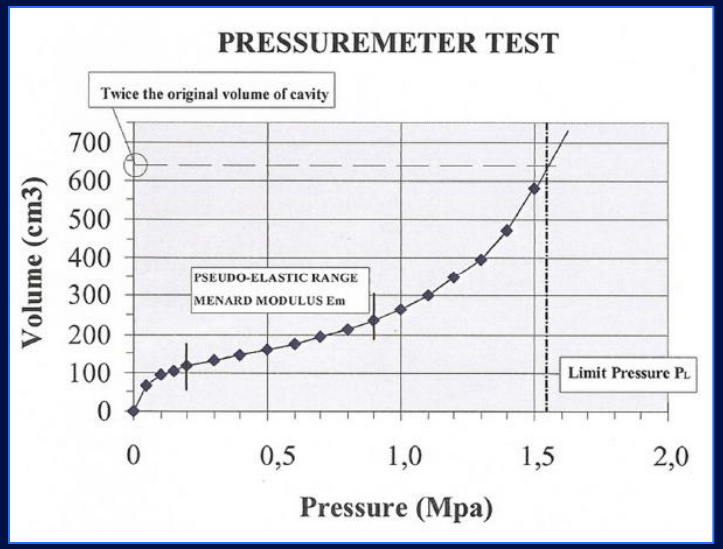
Instalação da sonda de 44mm no nível de ensaio

Realização de série de ensaios com expansão do cilindro

ENSAIO

- Baseado na teoria da expansão de cavidade cilíndrica.
- Introdução de uma sonda com membrana para expansão radial.
- Deformação medida pela variação do volume de água injetada

Resultados do Ensaio PMT



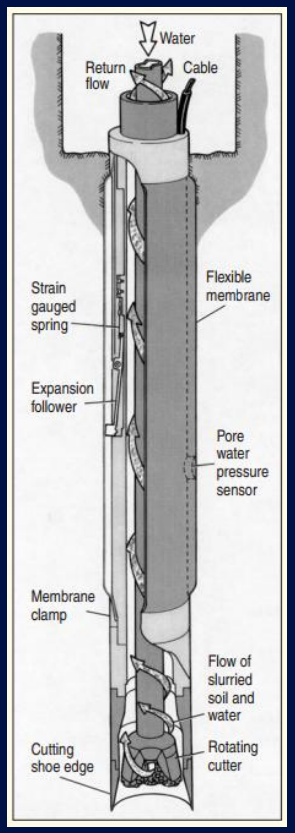
Características do ensaio PMT:

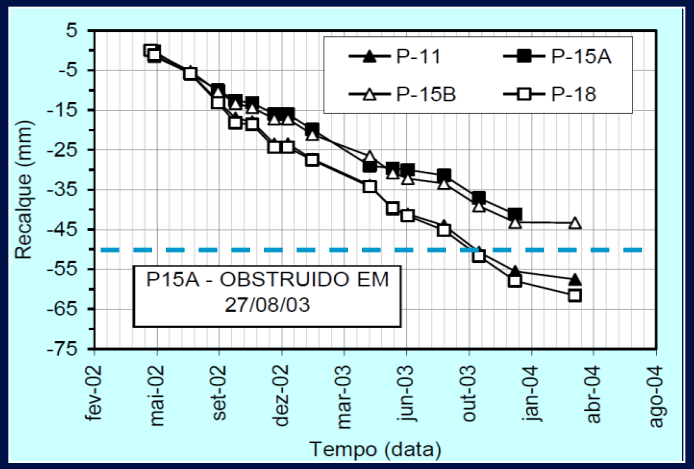
- Aplicável em qualquer solo, até residual
- Curva permite estimar uma série de parâmetros geotécnicos

ENSAIO PRESSIOMÉTRICO		REFERÊNCIA SONDAGEM PERCUSSÃO			PARÂMETROS OBTIDOS POR INTERPRETAÇÕES/CORRELAÇÕES					
NÚMERO	PROF (m)	FURO	MATERIAL	N_{SPT}	u_0 (kPa)	σ'v (kPa)	K_0	α	E (MPa)	G (MPa)
PMT-1	12,0	SP-C-05	Argila siltosa (sedimento terciário)	33	80	110	0,6	1,0	36,7	13,8
	16,0		Argila siltosa (sedimento terciário)	> 40	120	150	0,6	1,0	124,6	46,8
	20,0		Areia argilosa (sedimento terciário)	> 40	160	186	0,5	0,5	177,0	66,5
	23,0		Areia argilosa (sedimento terciário)	> 40	190	213	0,5	0,5	351,8	132,3
	26,0		Argila arenosa (sedimento terciário)	> 40	220	240	0,5	1,0	143,8	54,1
	28,0		Areia argilosa (sedimento terciário)	> 40	240	258	0,5	0,5	139,6	52,5
PMT-2	8,5	SP-203	Areia argilosa (aluvião)	15	65	60	0,6	0,5	54,2	20,4
	14,5		Areia argilosa (sedimento terciário)	18	125	120	0,5	0,5	128,0	48,1
	18,5		Argila siltosa (sedimento terciário)	> 40	165	155	0,5	1,0	131,5	49,4
	19,5		Argila siltosa (sedimento terciário)	> 40	175	165	0,5	1,0	128,1	48,2
	24,5		Argila siltosa (sedimento terciário)	> 40	225	210	0,5	1,0	204,8	77,0
	28,5		Argila siltosa (sedimento terciário)	> 40	265	246	0,5	1,0	355,4	133,6
PMT-3	11,0	SP-1007	Argila siltosa (sedimento terciário)	25	75	120	0,5	0,7	43,2	16,2
	24,0		Areia argilosa (sedimento terciário)	22	205	120	0,9	0,3	158,1	59,4
	31,0		Argila arenosa (sedimento terciário)	> 40	275	180	0,8	1,0	166,0	62,4

Pena, Damasco. Notas de aula FESP, 2015.

Pressiômetro Auto-cravável *Camkometer* (SBPM)



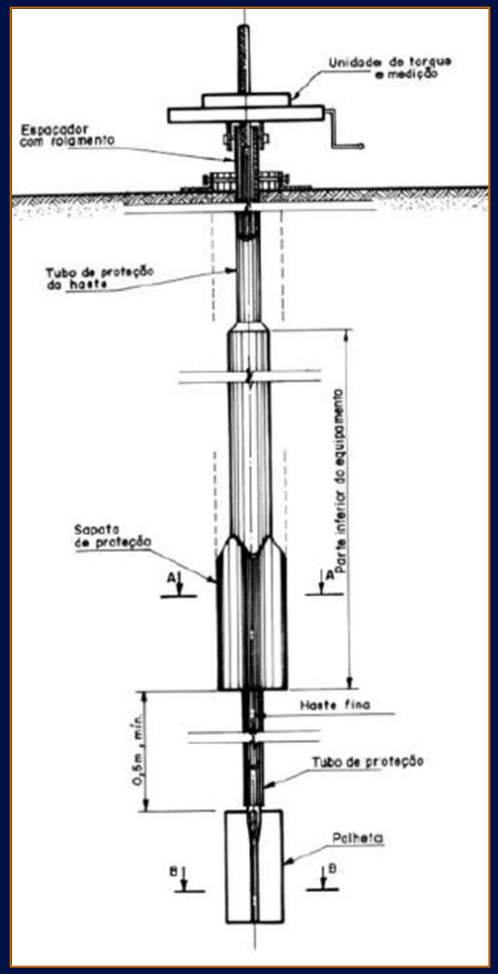


Pela 1ª vez no Brasil, foram realizados ensaios com pressiômetro Camkometer da USP na fundação do edifício e-Tower em junho/2001.

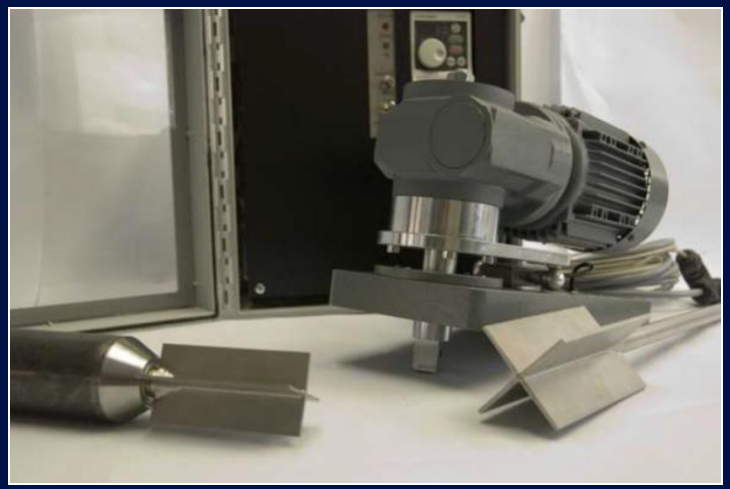
Ensaio de Palheta (Vane Test - VST)

Norma da ABNT – MB 3122/1982

Desenvolvido na Suécia por Olsson em 1919 – no Brasil, desde 1949

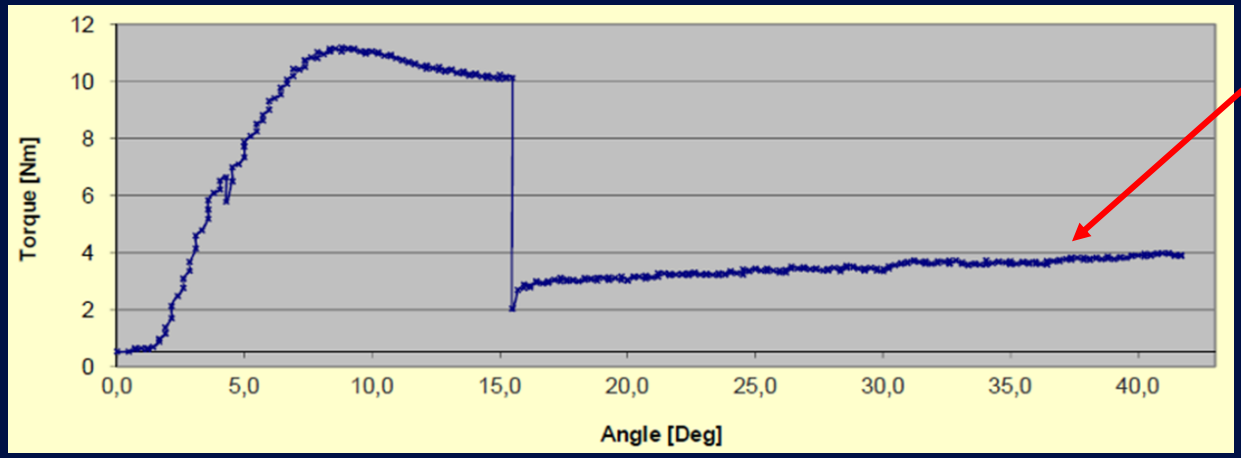


Equipamento antigo



Equipamento atual - eletrônico

Resultado típico do Ensaio VST



Para medir a resistência após o amolgamento, são aplicadas 10 voltas completas da palheta e lido o torque residual

Pena, Damasco. Notas de aula FESP, 2015.

Utilização do Ensaio

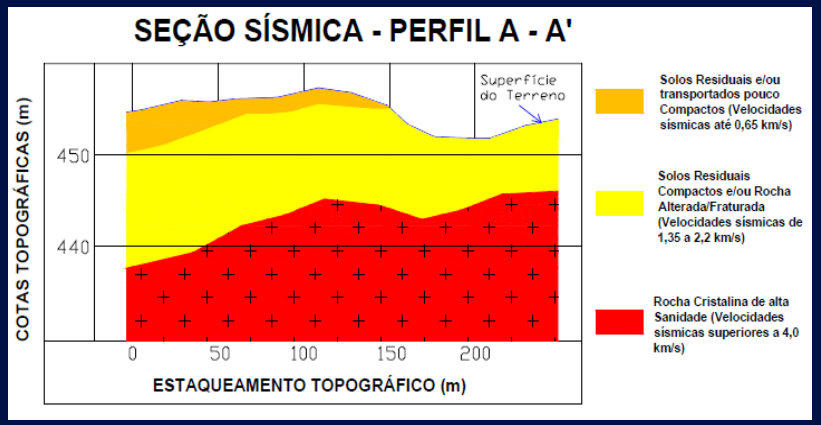
- Só em Solos Moles (baixadas aluvionares, mangues, com SPT até 4); e
- Obtenção de resistência ao cisalhamento não drenada “Su”.

Exemplo

Estudos de recalques de aterro sobre solos moles – Conjunto habitacional da CDHU (Jd. Pantanal)

Ensaios Sísmicos

São métodos geofísicos que utilizam a propagação de ondas mecânicas para investigação de propriedades do terreno



Principais Aplicações

- ✓ Determinar topo rochoso para fundações
- ✓ Caracterização litológica e estratigráfica / geotécnica dos terrenos
- ✓ Obter parâmetros elásticos de solos e rochas (Eo, Go, coef. Poisson) para fundações convencionais e especiais (fundação de máquinas, aerogeradores, etc)

As ondas sísmicas trabalham com deformações elásticas pequenas (10^{-3} a 10^{-5} %):

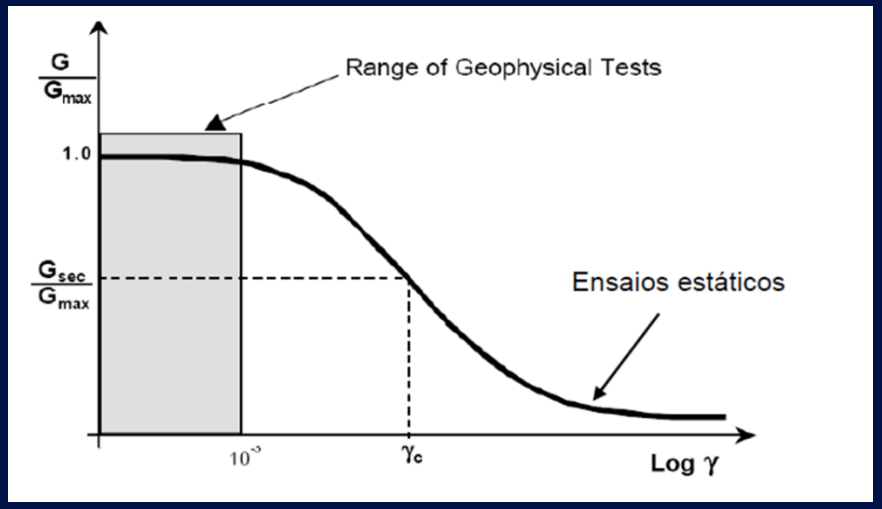
- onda compressional (P)
- onda cisalhante (S)
- onda superficial (Rayleigh e Love)

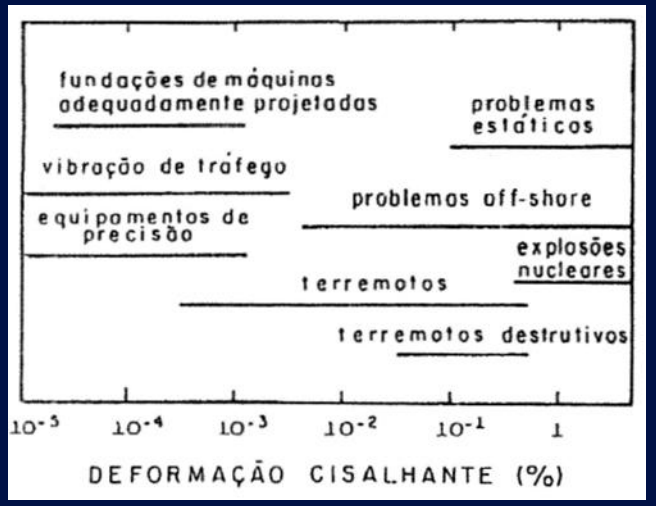
Determinação de parâmetros elásticos

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2}{2\cdot\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2} = \frac{\left(V_P^2 - 2\cdot V_S^2\right)}{2\cdot\left(V_P^2 - V_S^2\right)}$$ (coeficiente de Poisson dinâmico)

$$E = V_P{}^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1-2\nu)\cdot(1+\nu)}{(1-\nu)} = 2\cdot V_S^2 \cdot \rho \cdot (1+\nu)$$ (módulo de Young dinâmico)

$$G = \rho \cdot V_S{}^2$$ (módulo de cisalhamento dinâmico)

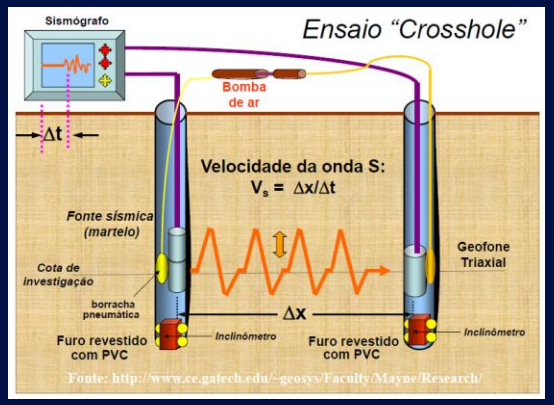


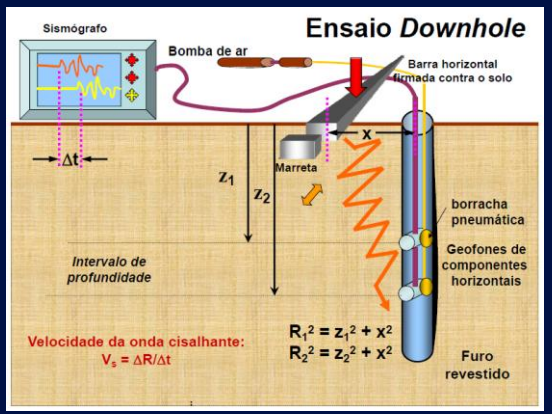


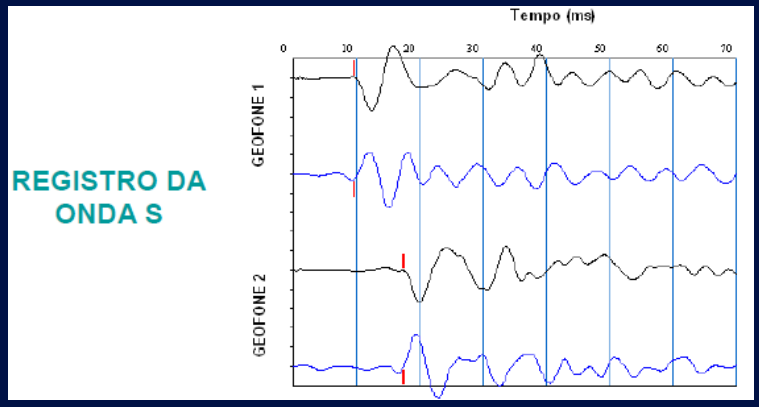
Técnicas de ensaios sísmicos

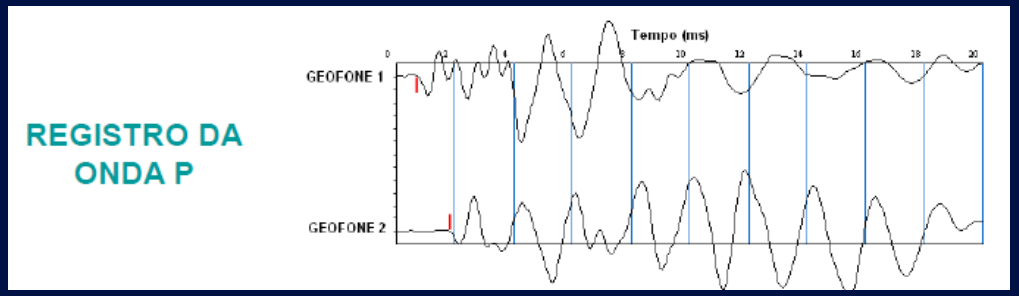
Que utilizam Furos

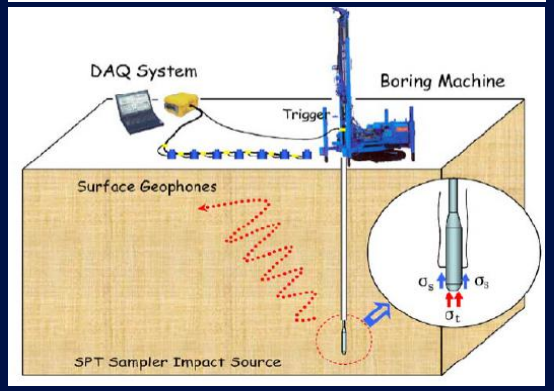
- Crosshole
- Downhole
- Uphole



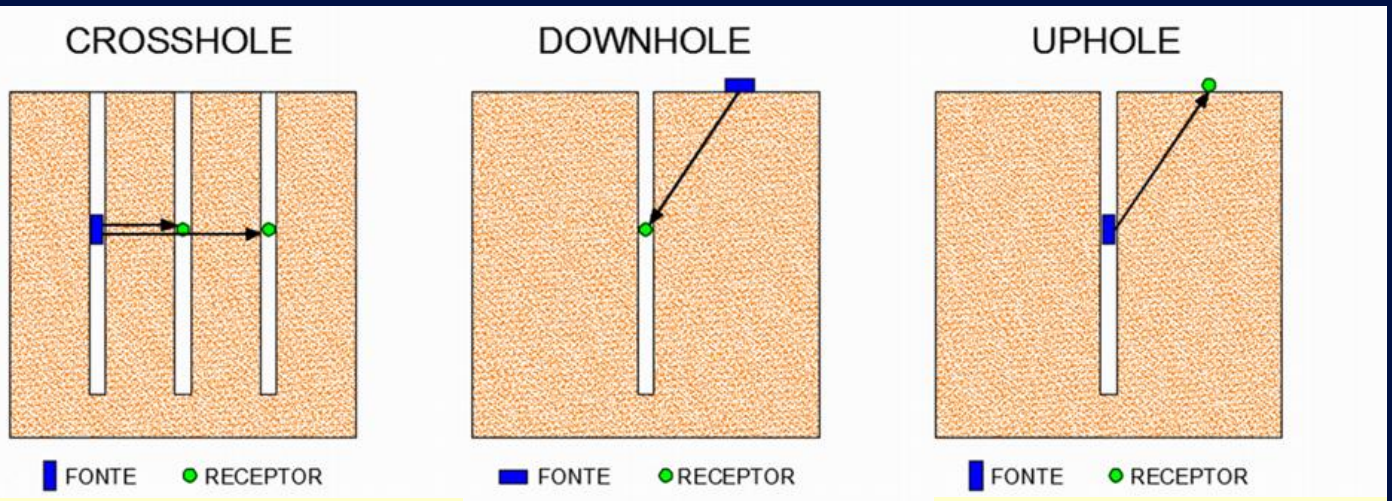








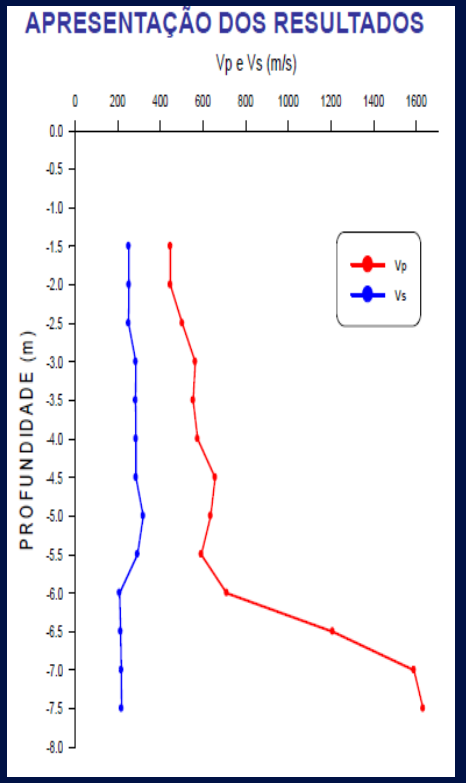
Resumo dos ensaios sísmicos



- Mede V_P e V_S
- Muito preciso
- Mais caro

- Mede V_P e V_S
- Menos preciso
  (do que o crosshole)
- Menos caro
  (um furo apenas)

- Mede V_P e V_S
- Menos utilizado
  (do que o downhole)
- Pode ser utilizado com SPT



Métodos sem Furos

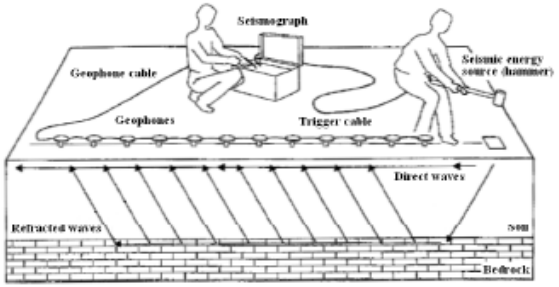
Método da Refração

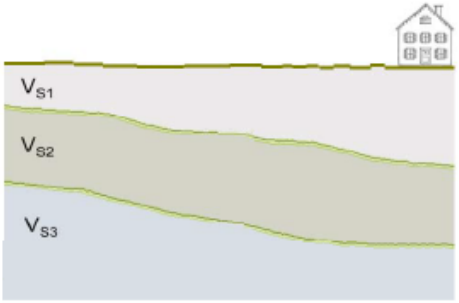
Método das Ondas Superficiais (SASW / MASW)

MASW (Multi-channel analyses of surface waves)

5. REFRAÇÃO SÍSMICA

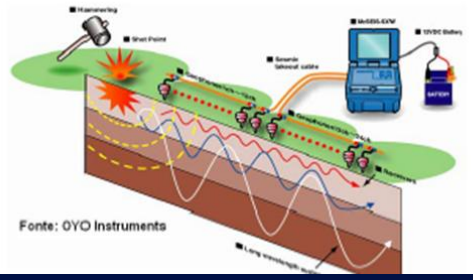
- Mede V_P (mais comum) e V_S (menos comum)
- Pouca resolução(define apenas 3 ou 4 camadas)
- Mais barato (não requer furos)





6. MASW

- Determina V_S (a partir de medidas da Rayleigh)
- Interpretação mais complexa e ambígua
- Mais barato (não requer furos)



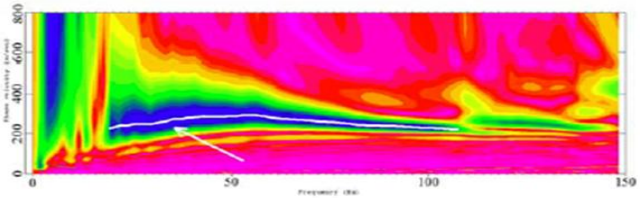


Figura 8. Local 1: curva de dispersão interpretada sobre o espectro de energia do sismograma.

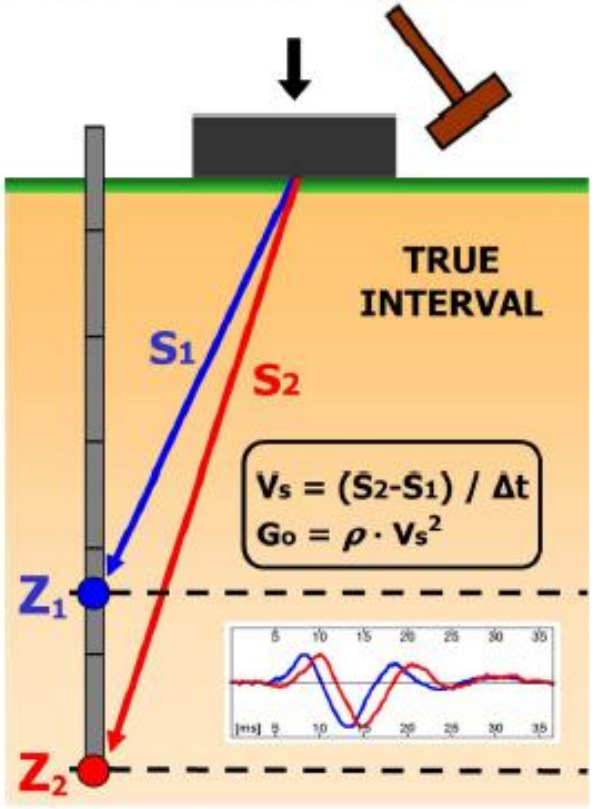
Outros equipamentos para sísmica

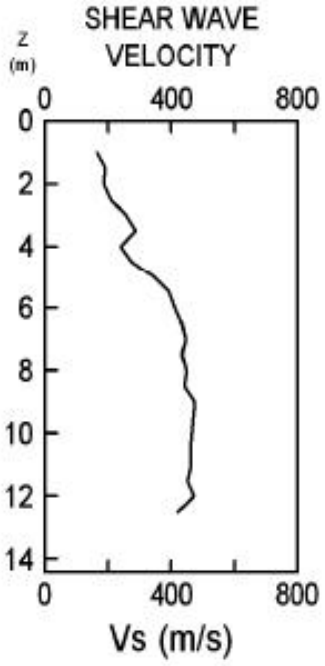
SEISMIC DILATOMETER (SDMT)

O “dilatômetro sísmico” é uma combinação do dilatômetro de Marchetti (DMT) e um módulo sísmico localizado acima da lâmina.

Os ensaios DMT e sísmico são independentes e são executados simultaneamente na mesma sondagem

www.marchetti-dmt.it





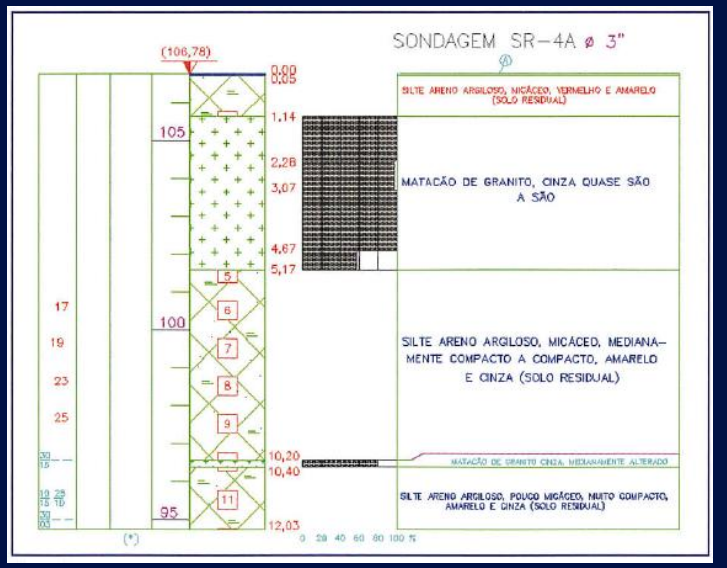
Imageamento Geoelétrico

Método de eletroresistividade – tem origem na década de 20 (irmãos Schumlebeger) – versão moderna do antigo “Caminhamento Elétrico”

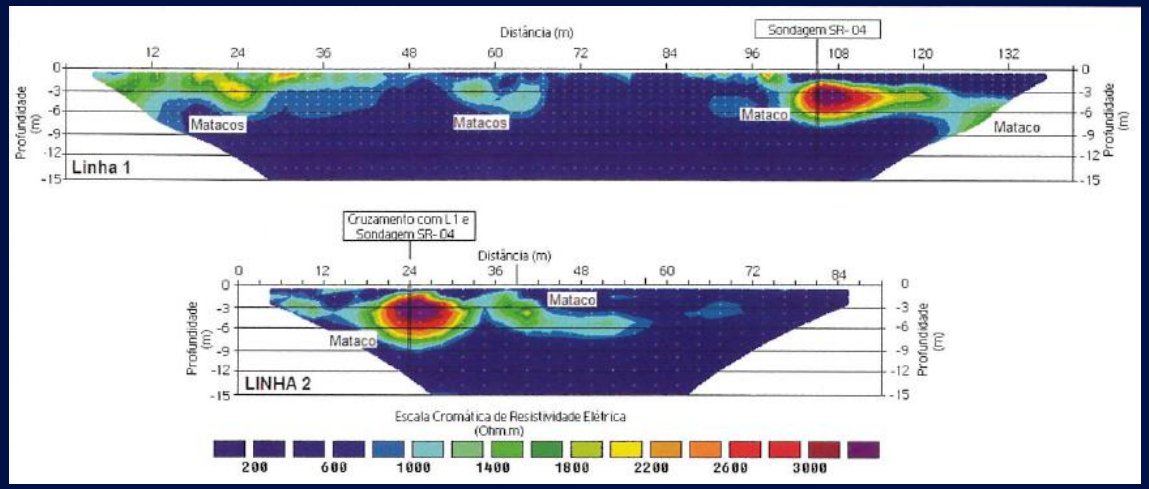
DETECÇÃO DE BLOCOS DE ROCHA PELO MÉTODO ELETRORESISTIVO – IMAGEAMENTO GEOELÉTRICO

Marchioreto e Machado (setembro de 2014)

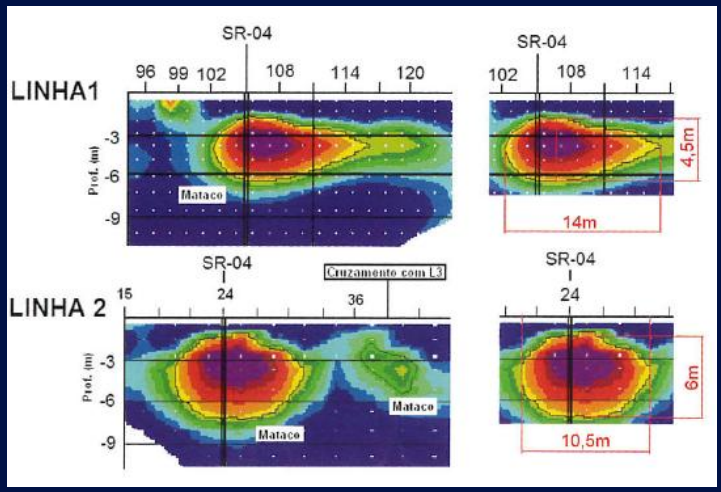
Revista fundações & Obras Geotécnicas



Caso de estudo: conhecida a presença de matacão -estimar suas dimensões.



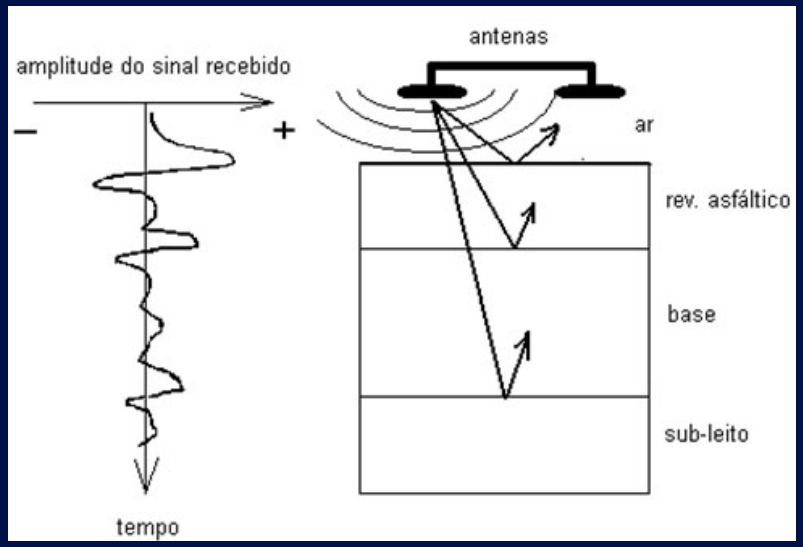
Seções de Imageamento Geoelétrico (SIGs)



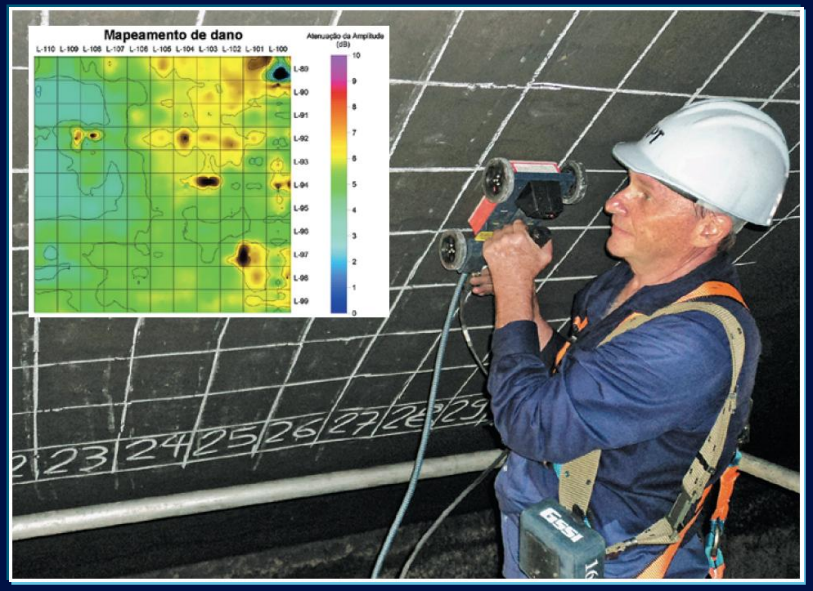
Dimensões aproximadas do matacão

GPR - Ground Penetrating Radar

GEORADAR – investigação a poucos metros da superfície
Introduzido no Brasil nos anos 90 - método não destrutivo



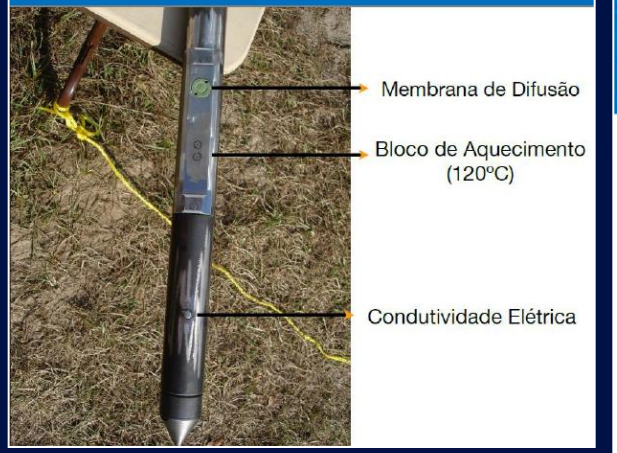
- Localização de tubulações
- avaliação de pavimentos e estruturas de concreto



Investigação Geo-Ambiental

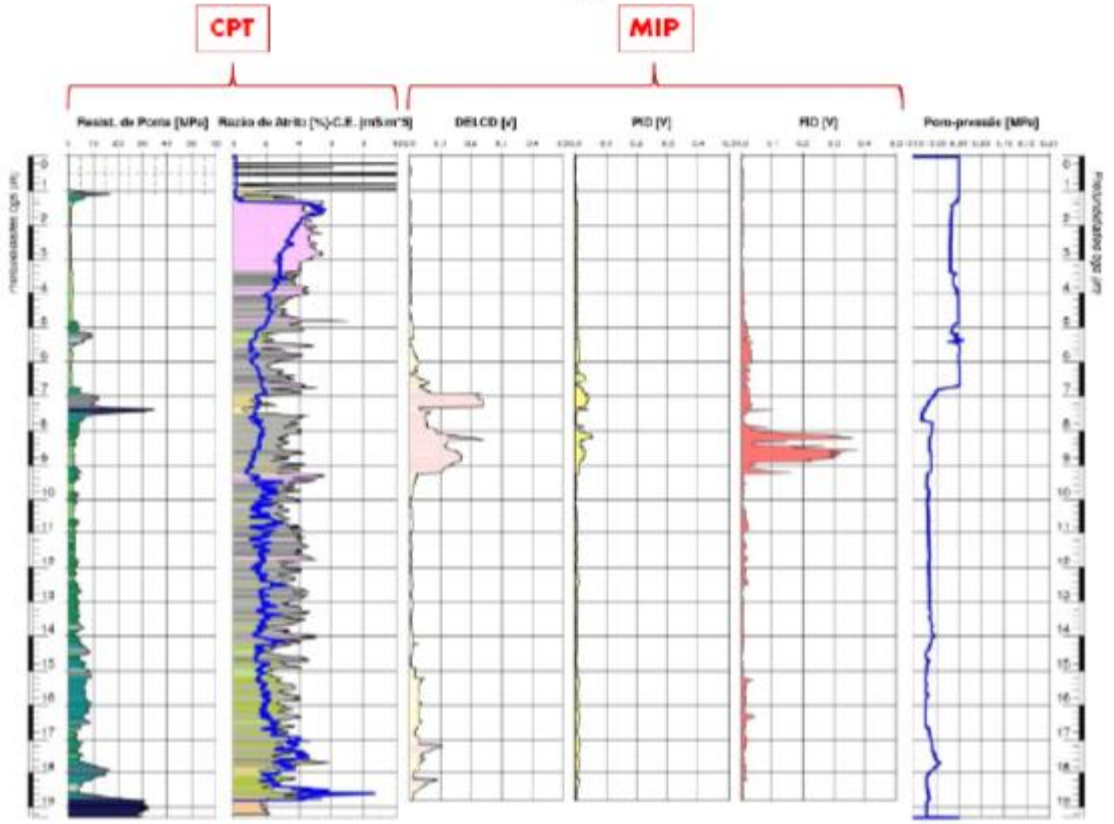
Atualmente, em qualquer terreno com suspeita de contaminação (AS) deve ser feita investigação preliminar e posteriormente a confirmatória.

MIP – MEMBRANE INTERFACE PROBE



AMOSTRAGENS DE ÁGUA

Combinação de Técnicas: CPT – Cone Penetration Test + MIP – Membrane Interface Probe



Fonte: Quinnan, 2012

Quaresma Filho. Notas de aula FESP, 2015.

Investigação Geo-Ambiental

Investigação que requer muita tecnologia cada vez mais

Ensaios de Condutividade Hidráulica (Slug Test)

Amostragem de gás

Quaresma Filho. Notas de aula FESP, 2015.

Ensaios, além das simples sondagens ...

Investigações de Campo

- Amostragem Integral
- Ensaio CPTu
- Ensaio DMT
- Pressiômetro PMT
- Vane Test
- Sísmicos
- Geo-ambientais

Ensaios de Laboratório

- Caracterização
- Permeabilidade
- Adensamento
- Expansibilidade
- Colapsividade
- Resistência / Cíclicos
- Coluna Ressonante

Desempenho

- Provas de Carga
- Medida de recalque
- Ensaios PDA
- Ensaios PIT
- Instrumentação

Investigação de Campo x Ensaios de Laboratório

Campo: menos precisos, mais representativos, todas as camadas são reconhecidas; e

Laboratório: poucas amostras, pouca representatividade do todo, dependente da qualidade da amostragem, estado de tensões conhecido, mais precisos.

Ensaios de Laboratório

Caracterização

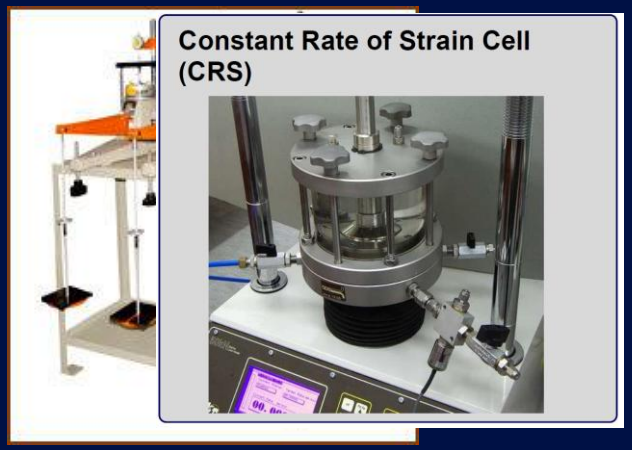
Resistência ao Cisalhamento

- Cisalhamento direto
- Triaxial convencional
- Triaxial com trajetória de tensões
- Simple shear
- Torsional Shear

Permeabilidade

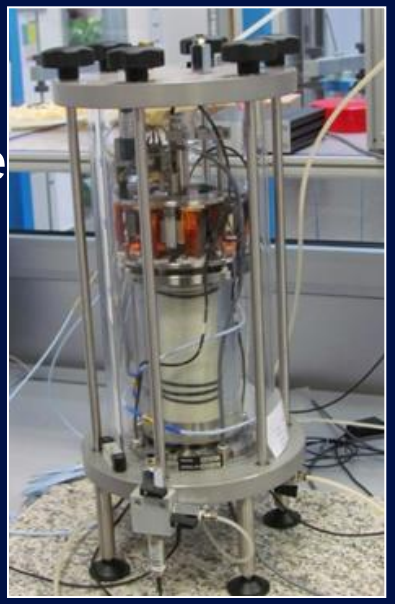
Ensaios de Laboratório

Adensamento Unidimensional



Deformabilidade (altíssima precisão)

Coluna Ressonante

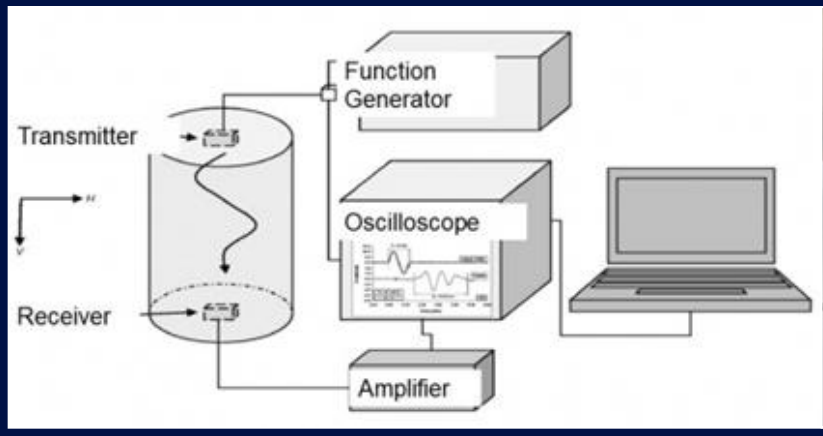


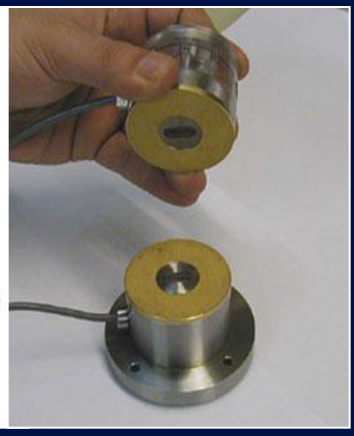
Efeito Hall

Ensaios cíclicos

Triaxial cíclico
Torcional Cíclico

Bender elements

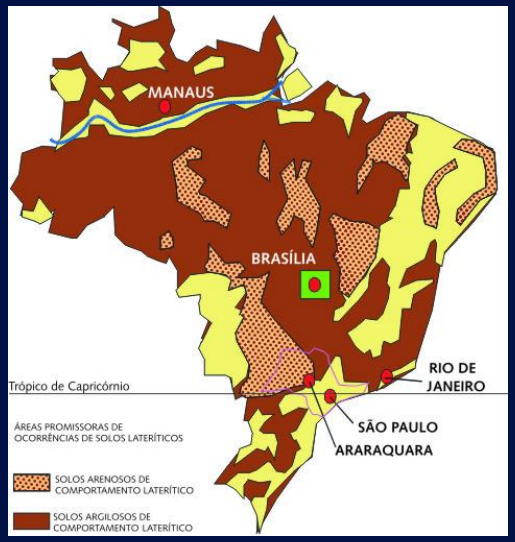




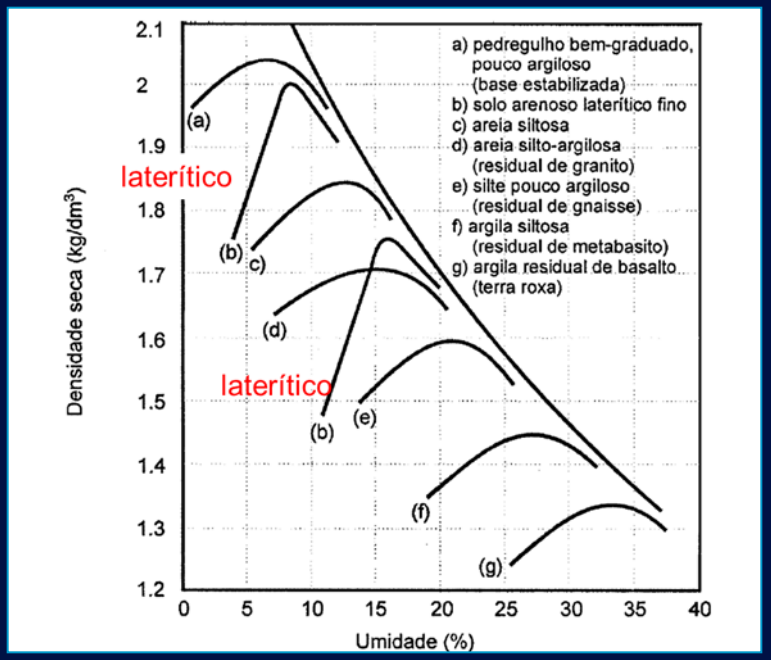
SOLOS ESPECIAIS

- solos lateríticos
- solos colapsíveis
- solos expansivos
- solos moles

Solos Lateríticos



- solos superficiais presentes nas regiões tropicais.
- ricos em óxidos de alumínio e de ferro que provocam a agregação das partículas.
- cor preponderantemente vermelha ou amarela



Como identificar solos lateríticos

Investigação de Campo:
cross hole, CPT ou DMT sísmicos

Ensaio de Laboratório:
metodologia MCT (Nogami e Villibor); coluna ressonante; inclinação do ramo seco da curva de compactação (Ignatius, 1992)

Rigidez dos Solos Lateríticos

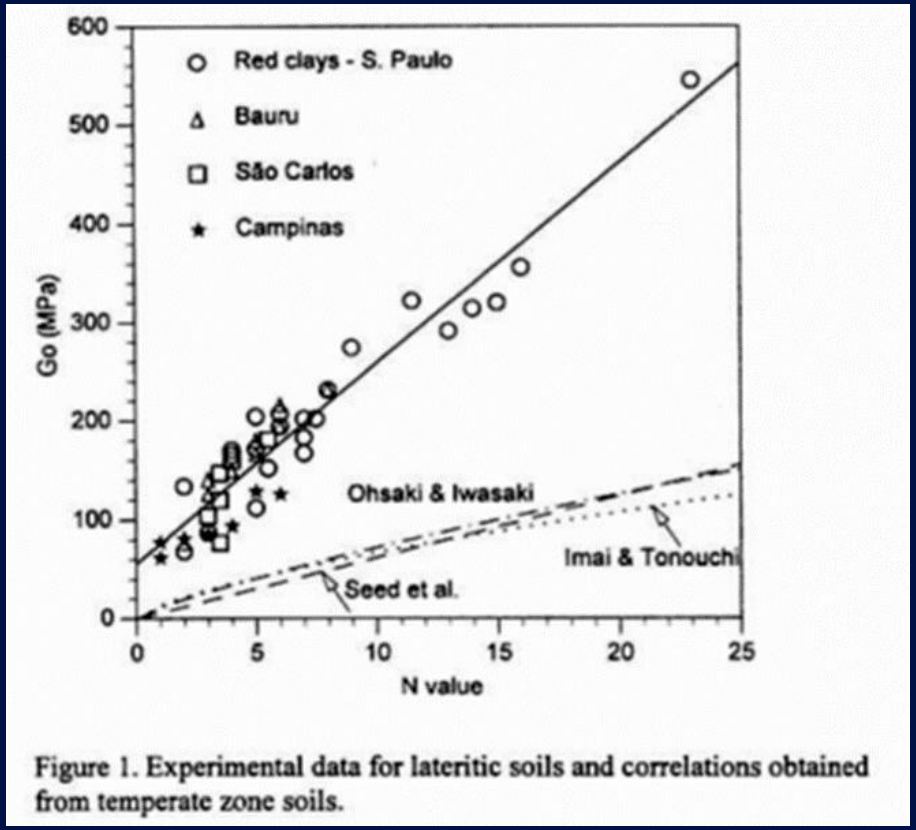


Figure 1. Experimental data for lateritic soils and correlations obtained from temperate zone soils.

Correlação G_o (cross-hole) e N_{spt}
Barros, 1997

Solos lateriticos mostram rigidez muito superior à que seria esperada pelo valor do N_{spt} (2 a 4 x)

Caso de Obra em Solos Lateríticos

Fundações prontas e a constatação de que as cargas estruturais são quase o dobro das que foram consideradas em projeto.
O que fazer?

Luciano Décourt
Engenheiro Consultor, Professor Universitário, São Paulo, Brasil

COBRAMSEG' 2006
XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IV Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
III Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia
Anais 2006

- 25 pavimentos, fundações em hélice contínua.
- Cargas nos pilares seriam 80% superiores às utilizadas no projeto.
- Análise de consultores: reforço de fundações seria inevitável (40% a 100% dos pilares).

Investigações realizadas:
Ensaios *Crosshole* (confirmação de solo laterítico)
Provas de carga confirmam capacidade de carga..

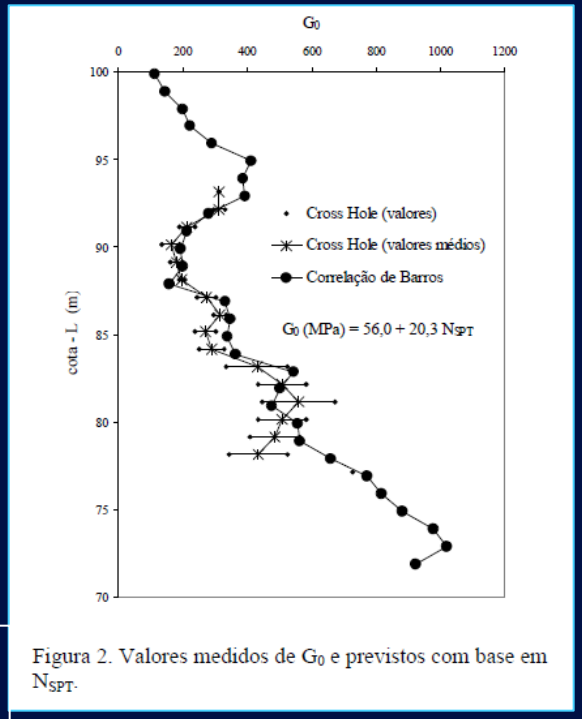


Figura 2. Valores medidos de G_0 e previstos com base em N_{SPT}.

O que fazer? Nada! Recalques medidos (~2,0 mm).

Solos lateríticos: "projetos de fundação podem custar 40% ou menos que um projeto em solo não laterítico" ***(Luciano Décourt)***

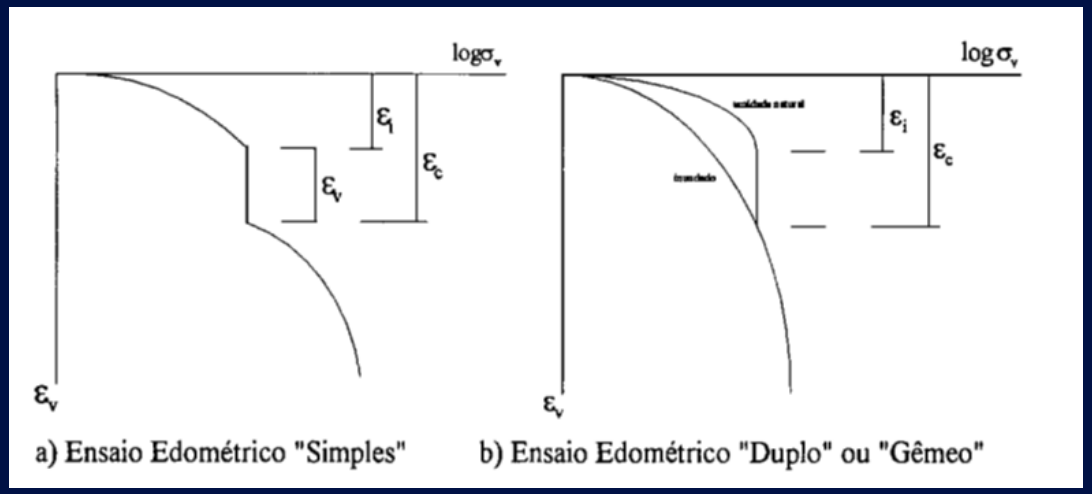
Solos Colapsíveis

Sofrem significativa redução de volume (recalque) quando umedecidos, com ou sem aplicação de carga adicional.

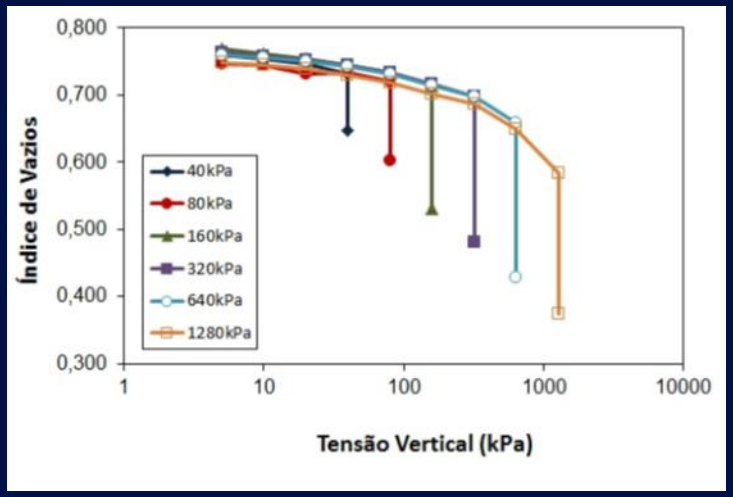
Baixo grau de saturação, estrutura macroporosa (alto indice de vazios), cimentação de partículas ou sucção

Cidade de São Paulo: Argila porosa vermelha
Estado de SP: Sedimentos cenozoicos
Brasil: principalmente em SP e PE

Como identificar: Em laboratório: ensaios edométricos com inundação ou duplo.
Em Campo: prova de carga com inundação



a) Ensaio Edométrico "Simples" b) Ensaio Edométrico "Duplo" ou "Gêmeo"



Solos Expansivos

Sofrem aumento de volume quando umedecidos.
Podem provocar levantamento de estrutura.

Solos não saturados
Argilo-minerais expansivos (esmectitas)
Também contraem quando ressecados.

Na cidade de São Paulo:
Argila dura cinza esverdeada (Taguá)

No Estado de SP:
Bacia Sedimentar de Taubaté

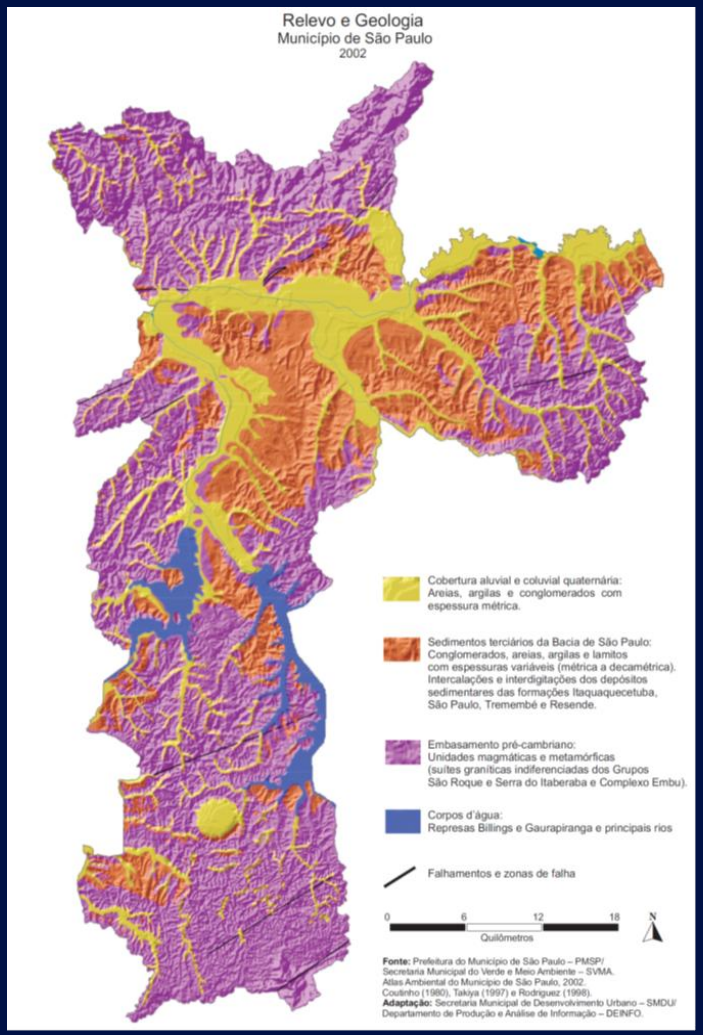
Argila dura cinza esverdeada (Taguá)

Como identificar:
Ensaios de Laboratório:
Análises mineralógicas e ensaios edométricos – expansão livre e de pressão de expansão

Niyama S. Notas de aula FESP, 2015.

Solos Moles

Altamente compressiveis e muita baixa resistência



Argilas Moles em São Paulo:
Origem fluvial com até 5 m.

- Solos sedimentares argilosos com valores de SPT ≤ 4 (muito moles SPT ≤ 1)
- Origem fluvial ou marinha
- Cinza escuro ou preto
- Espessura dos depósitos: de 1 a 7 m (aluvião fluvial) ou até 70 m (solos marinhos)

Problemas:

Rebaixamento do lençol

Construção de aterros

Como determinar propriedades:

- SPT – não serve! (só para espessura)
- Vane Test (obter S_u) e CPT_U (obter C_v)
- Triaxial UU, CU ou Compressão Simples(S_u)
- Ensaio de adensamento (σ_{vm}, C_r, C_c, c_v)

Caso da Vila do Pan (2007)

Aterro sobre solo mole sem critério

Fundações em solo mole não apresentam nenhum segredo.
Basta que sejam seguidos os devidos procedimentos.

CONCLUSÕES

- Maioria dos problemas de fundações ocorre por precária investigação do terreno.

- Na prática brasileira prevalece o uso exclusivo de sondagem SPT. Imprescindível mas insuficiente. Expectativa de melhora com a nova norma.

- Diversos outros ensaios *in situ*, com muito maior quantidade e qualidade de informação, estão disponíveis no Brasil.

- Ensaios de laboratório: alta precisão, dificuldade com relação à representatividade das amostras e qualidade da amostragem. Em certas situações são imprescíndíveis.

- Atenção com solos colapsíveis, solos expansivos, solos moles, solos contaminados.

- Tirar melhor proveito das boas características dos solos lateríticos

CONCLUSÕES

- Com uma melhor investigação geotécnica, ganha-se em segurança, qualidade e custo. Programa de investigação deveria ser função do custo x benefício x desconhecimento.

- Status atuais de normas e seguradoras exigem mais investimentos em investigações geotécnicas

- Previsão de recalques exige maior interação entre projetistas de fundações e estruturas, pois recalques dependem da rigidez da estrutura.

- Só maior exigência das projetistas e conscientização das incorporadoras podem mudar atual cultura vigente.

OBRIGADO!

jmbarros@ipt.br