

Boas práticas de ensaios geofísicos aplicados à engenharia civil

Otávio Coaracy Brasil Gandolfo

*Palestra apresentada para Universidade Federal da Bahia,
29/09, através do YouTube 74 slides.*

A série “Comunicação Técnica” compreende trabalhos elaborados por técnicos do IPT, apresentados em eventos, publicados em revistas especializadas ou quando seu conteúdo apresentar relevância pública.



FIM DE TARDE COM GEOFÍSICA

Boas práticas de ensaios geofísicos aplicados à engenharia civil

Otávio Coaracy Brasil Gandolfo
gandolfo@ipt.br



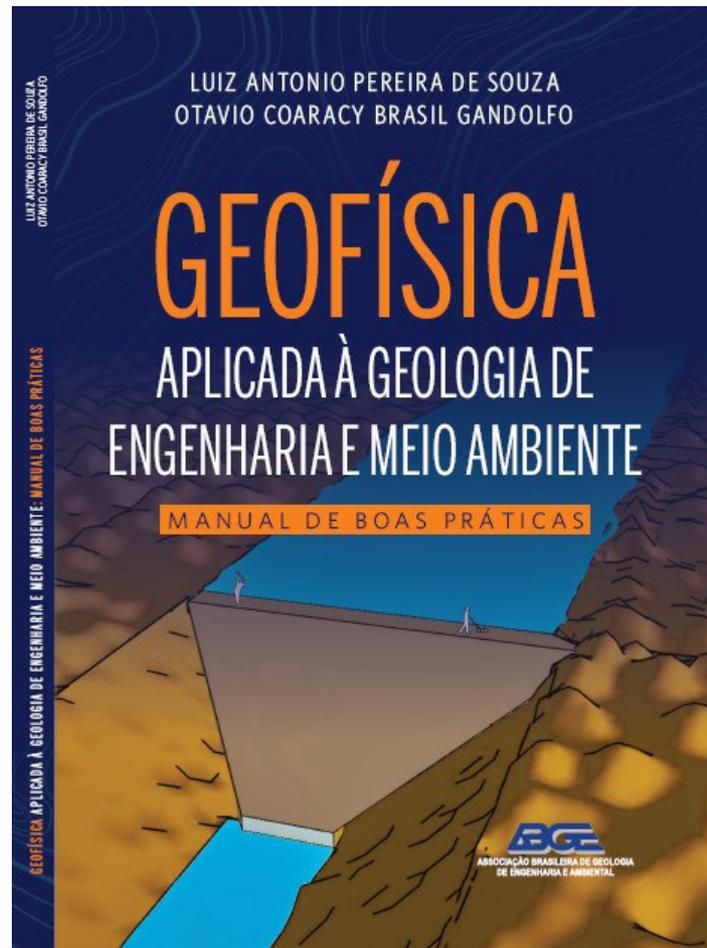
INSTITUTO DE
PESQUISAS
TECNOLÓGICAS

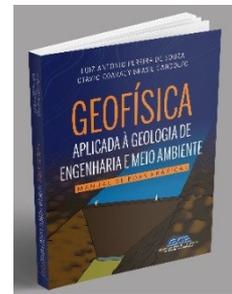
CIDADES, INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE
Seção de Investigações, Riscos e Gerenciamento Ambiental



**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE
GEOLOGIA DE ENGENHARIA
E AMBIENTAL**

GEOFÍSICA APLICADA À GEOLOGIA DE ENGENHARIA E MEIO AMBIENTE EM TERRA E EM ÁGUA





a) Caracterização geológica/hidrogeológica do meio físico:

- determinação da espessura de material inconsolidado e da profundidade do topo rochoso
- estratigrafia geológica/geotécnica
- detecção de zonas carstificadas, vazios e cavidades rasas
- análise de escorregamentos e caracterização de encostas
- determinação da profundidade do nível d'água
- etc...

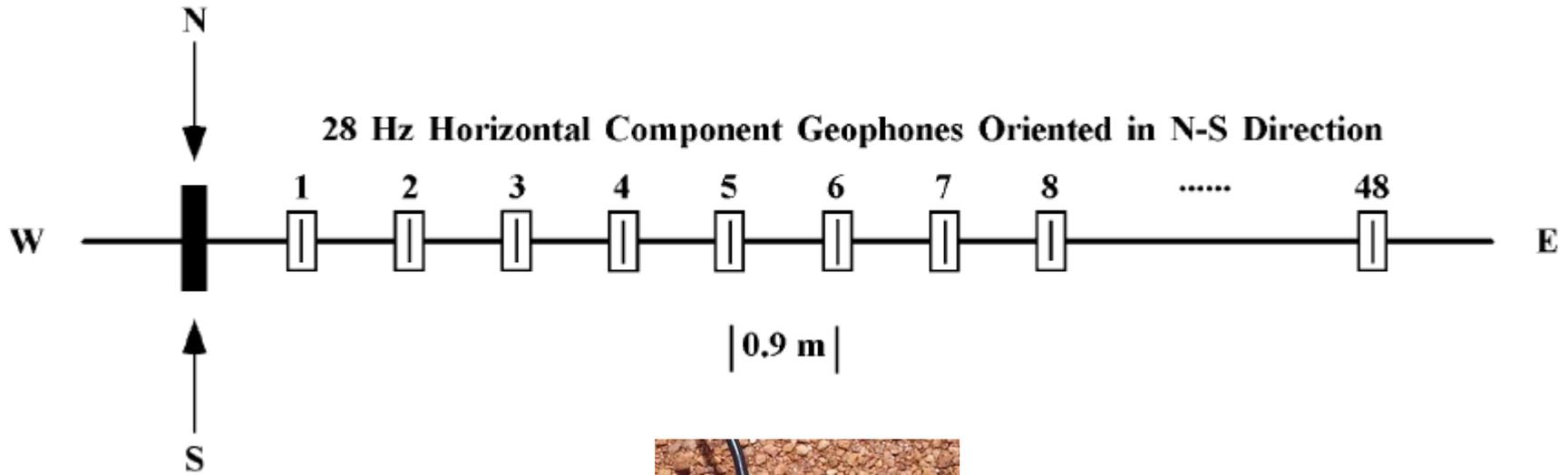
c) Caracterização de solos/rochas e ensaios em estruturas para fins de engenharia:

- determinação de módulos elásticos dinâmicos de maciços para engenharia geotécnica e de fundações
- determinação do grau de escarificabilidade de maciços
- etc...

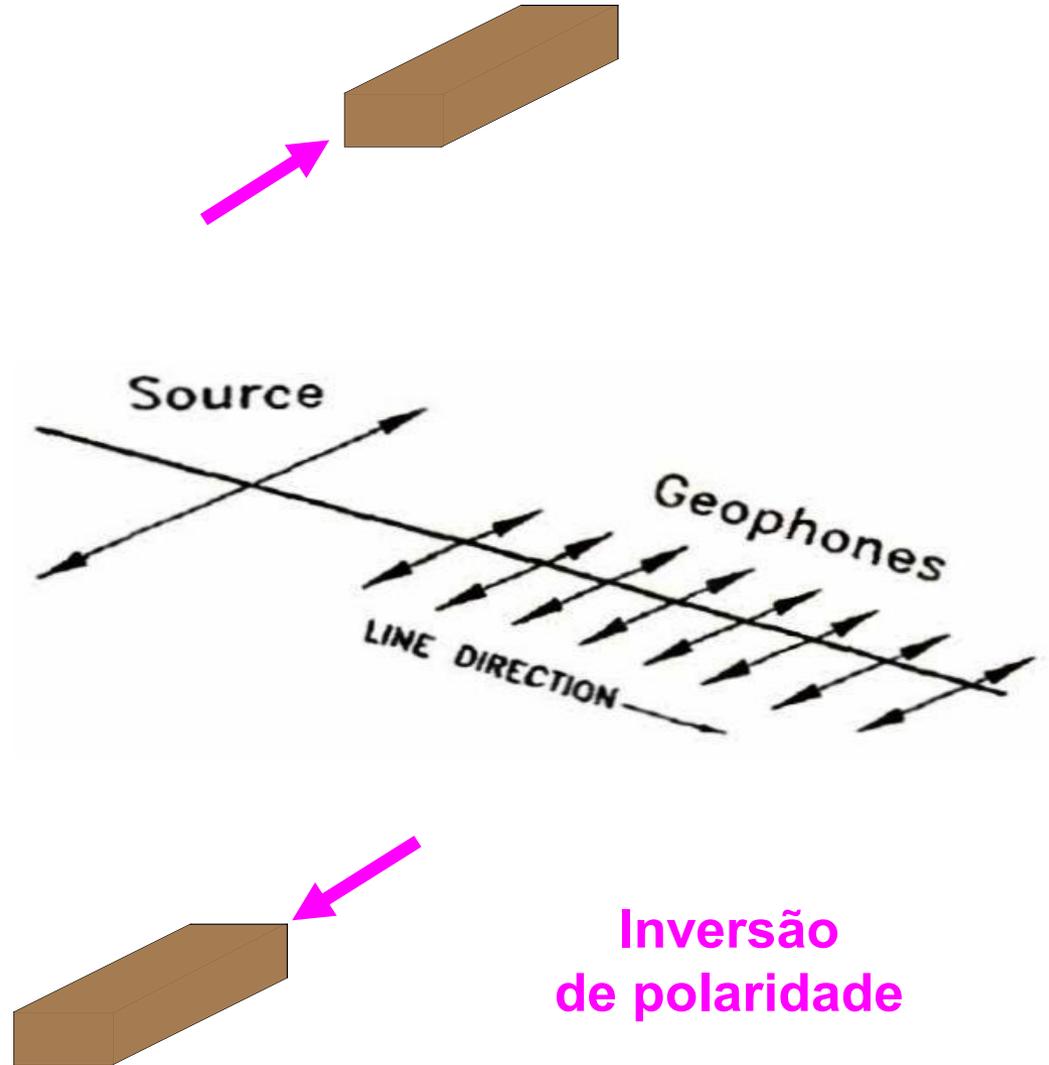
⇒ Métodos Sísmicos: **Sísmica de Refração (onda P e S)** e **MASW**

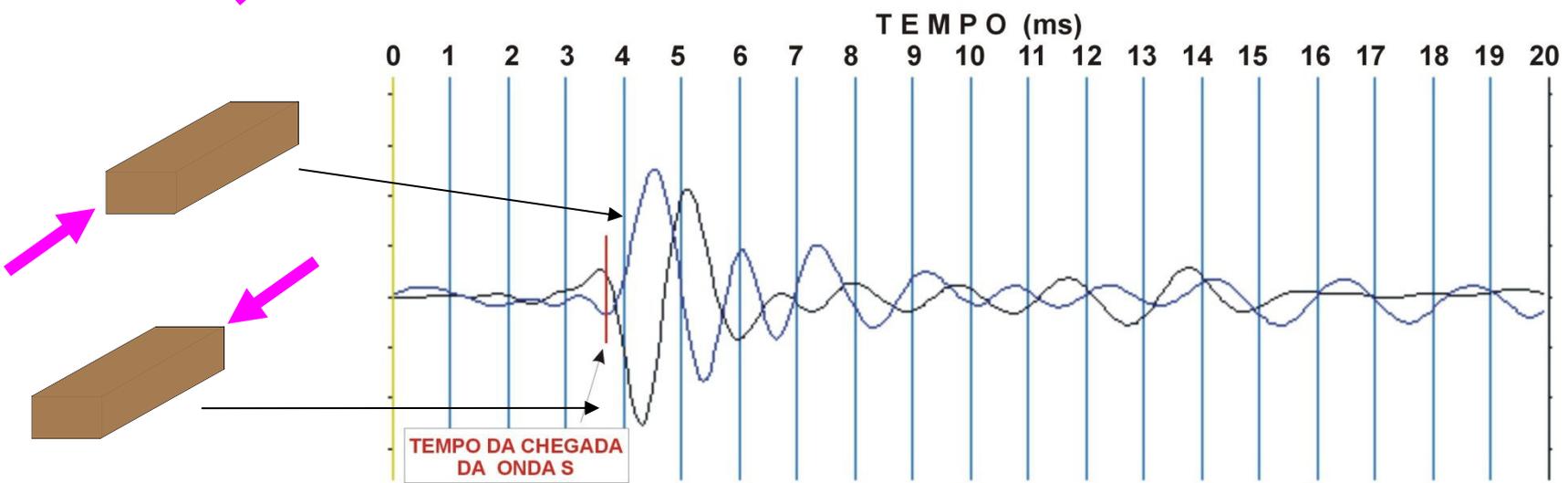
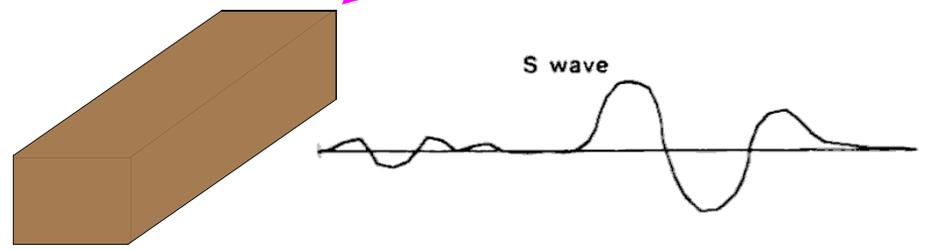
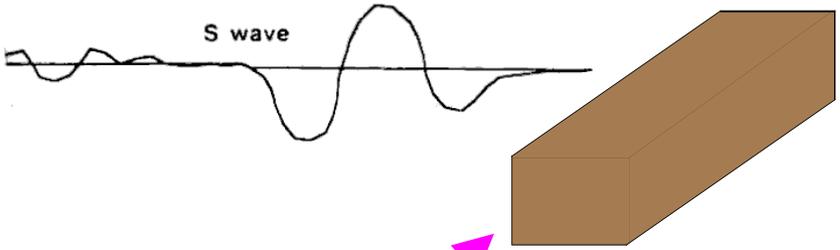
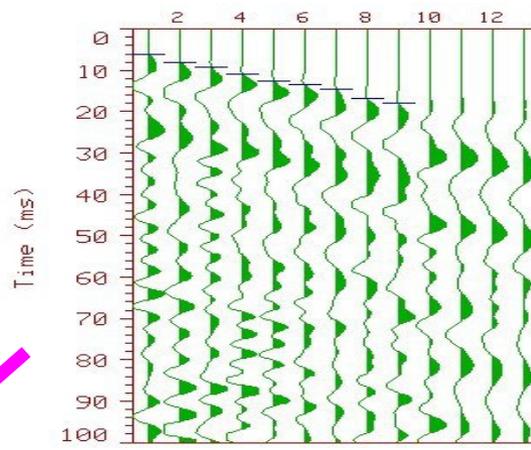
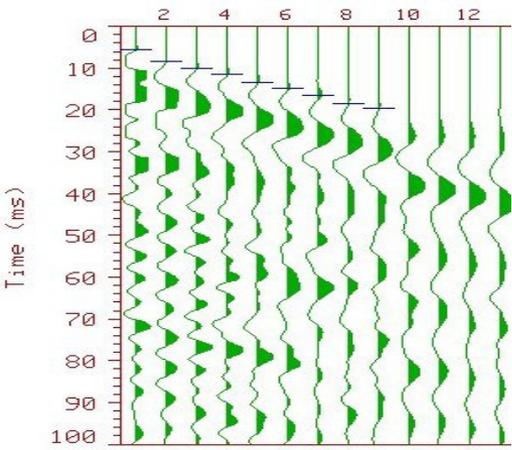
Refração com onda S

Direction of 6.3 kg Hammer Blows

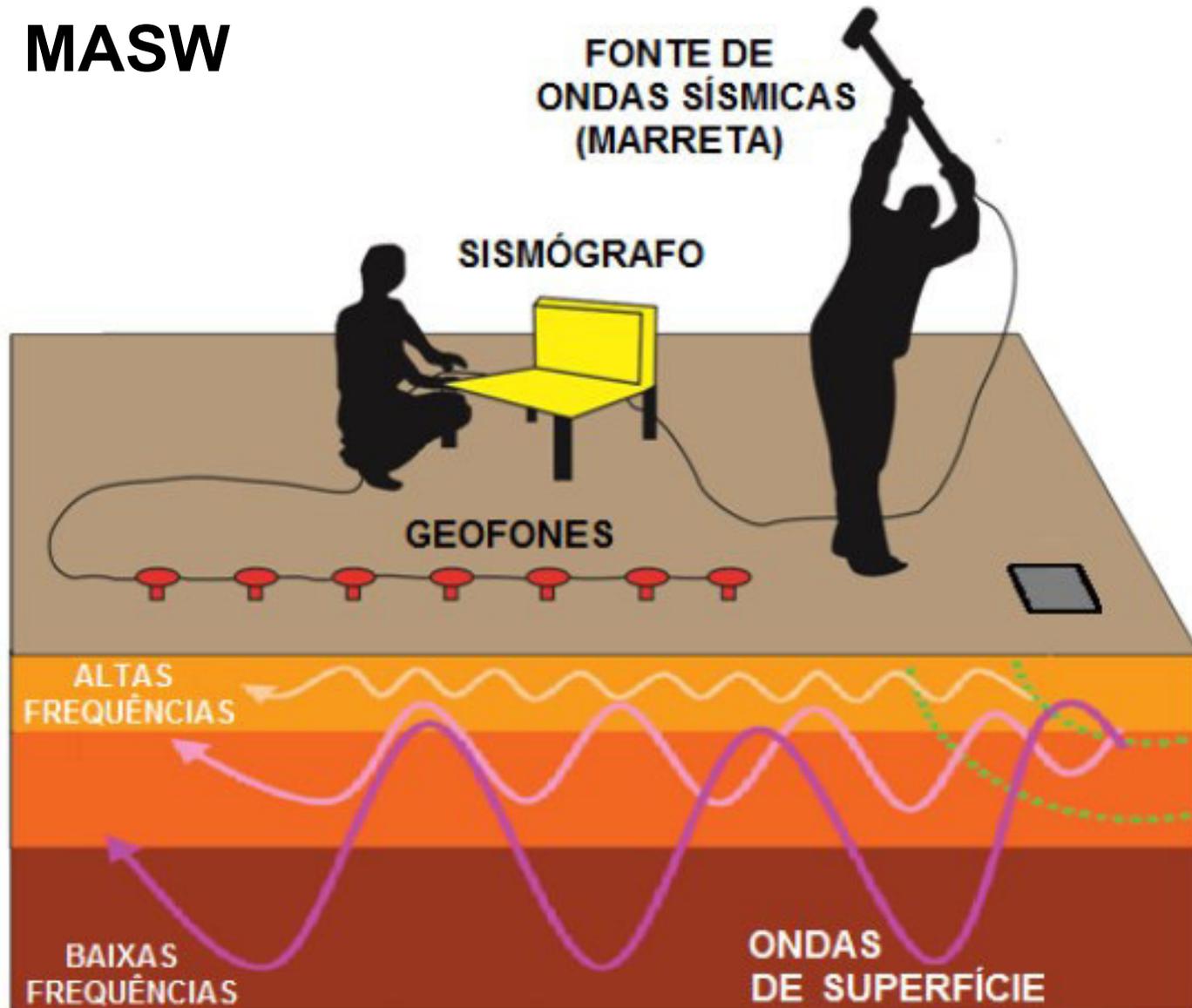


Refração com onda S





MASW



The Journal of
Environmental & Engineering
GEOPHYSICS

June 2005, Volume 10, Issue 2



Journal of Environmental and Engineering Geophysics
Volume 10, Issue 2, Jun 2005

MASW, The Wave of the Future
Editorial

Doug Crice
Geostuff

12996 Somerset Drive
Grass Valley, CA 95945 U.S.A.

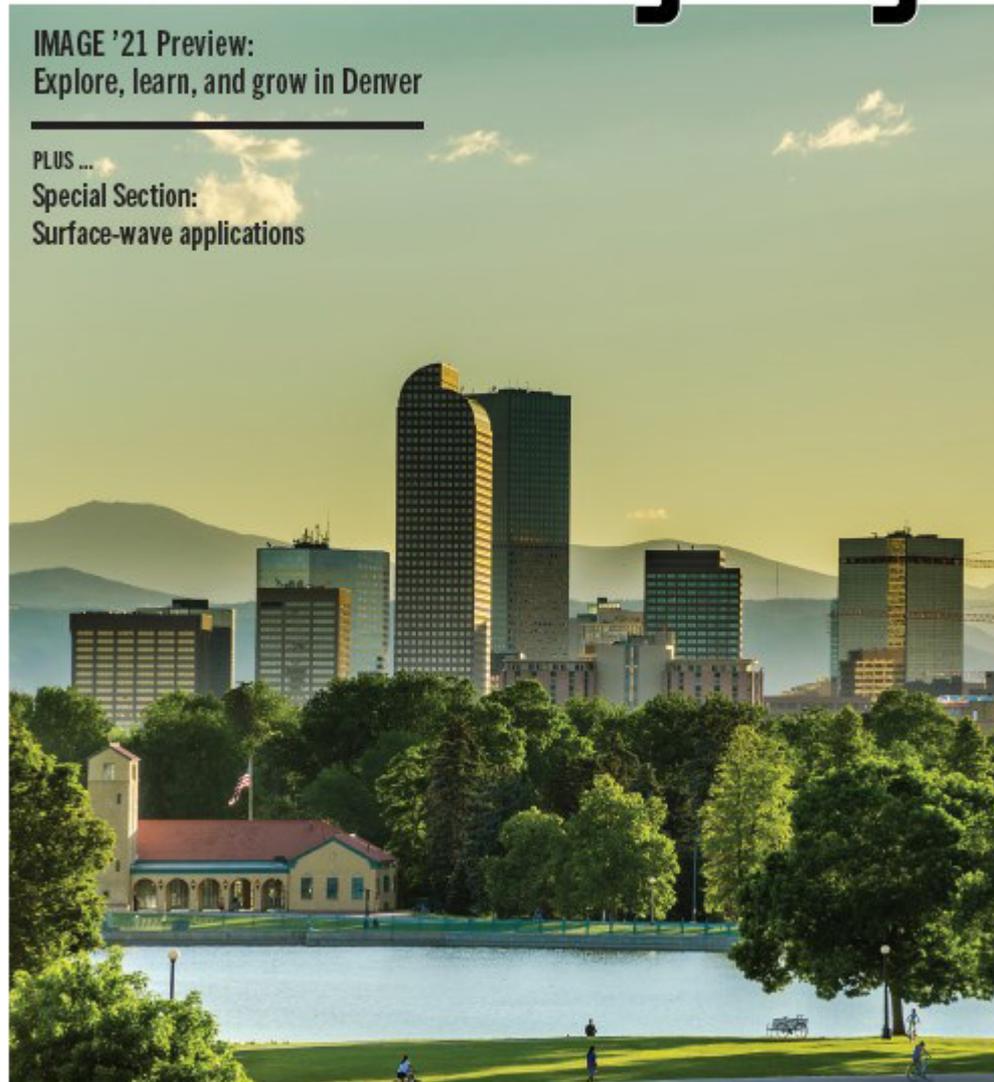
Email: dcrice@geostuff.com

<http://www.geostuff.com>

The Leading Edge[®]

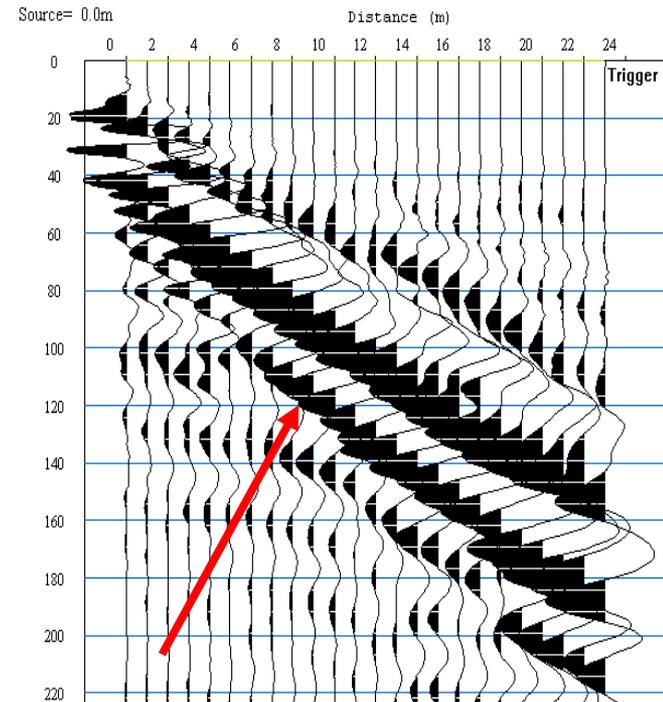
IMAGE '21 Preview:
Explore, learn, and grow in Denver

PLUS ...
Special Section:
Surface-wave applications

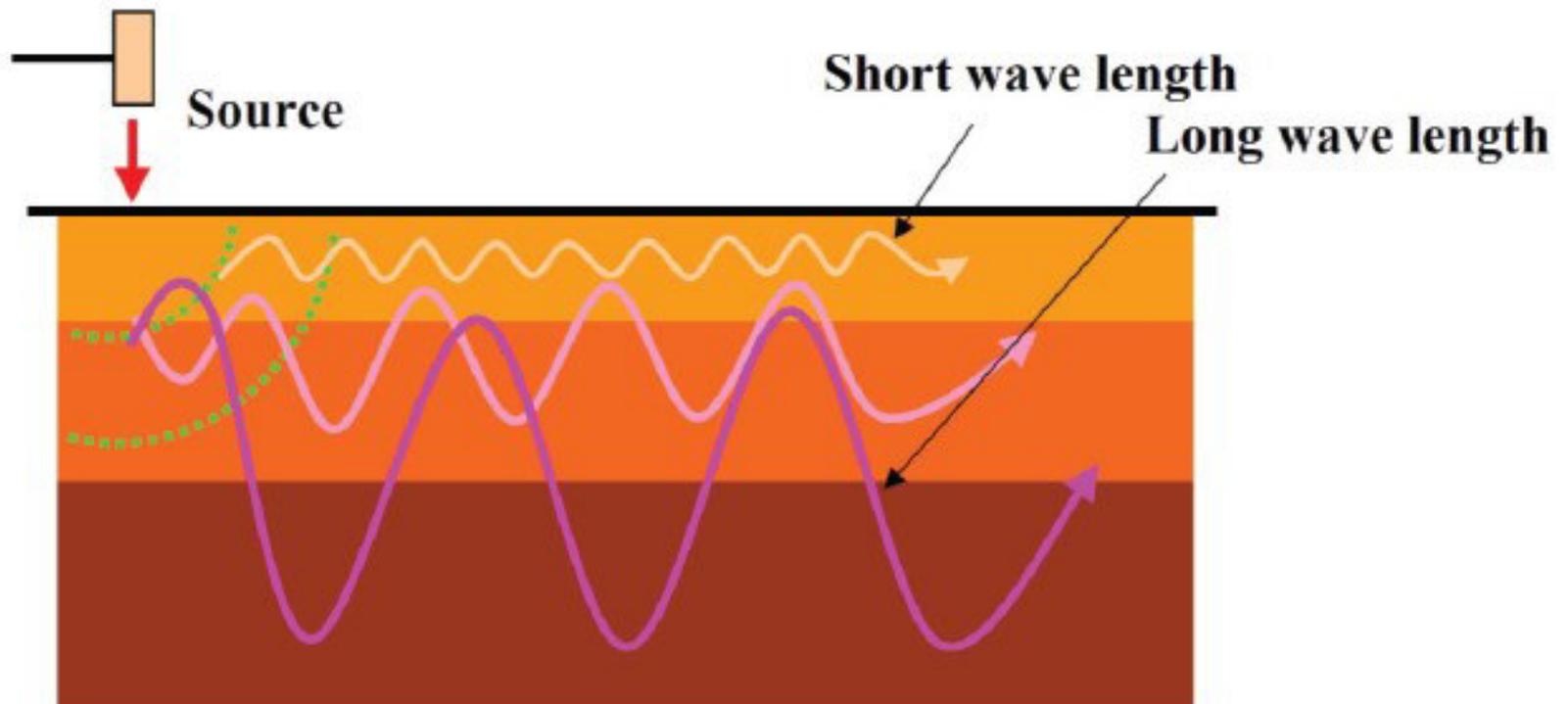


MASW

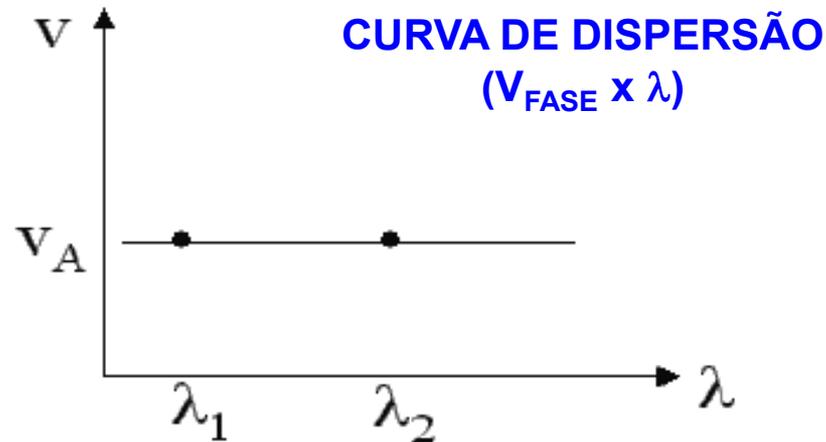
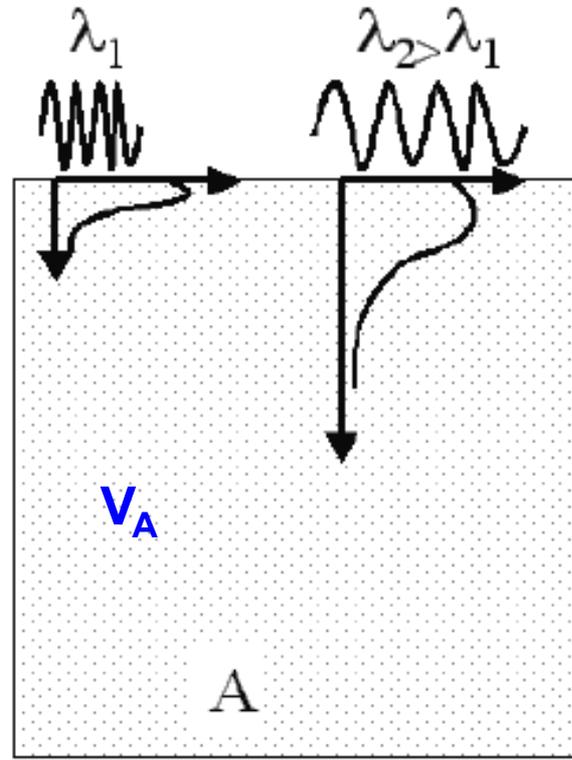
- Baseia-se na natureza dispersiva das ondas Rayleigh (ou das ondas Love) em um meio heterogêneo estratificado
- As velocidades das ondas de superfície variam em função da sua frequência, $V=V(f)$, isto é, são dispersivas
- Na geração de ondas compressoriais (ex., impacto de uma marreta), mais de 2/3 da energia gerada é transmitida sob a forma de ondas de Rayleigh



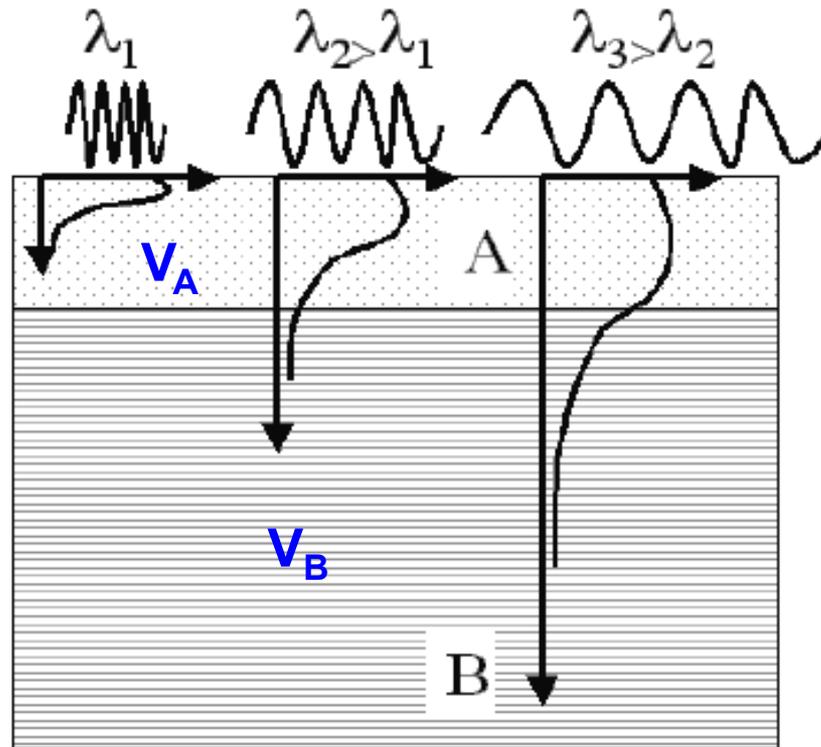
FREQUÊNCIA X PROFUNDIDADE



Em um meio homogêneo as ondas Rayleigh não apresentam dispersão

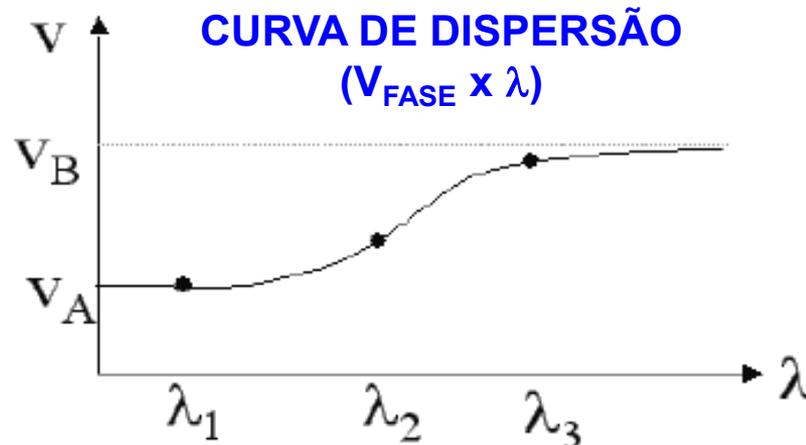


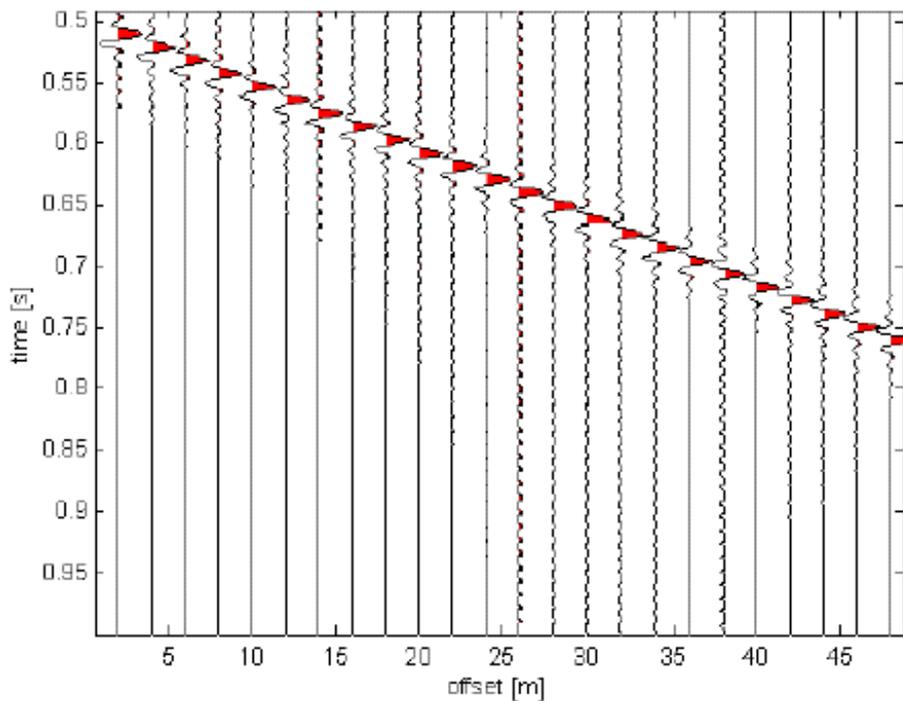
Contudo, em um meio onde a ρ e as velocidades sísmicas variam com a profundidade, elas tornam-se dispersivas



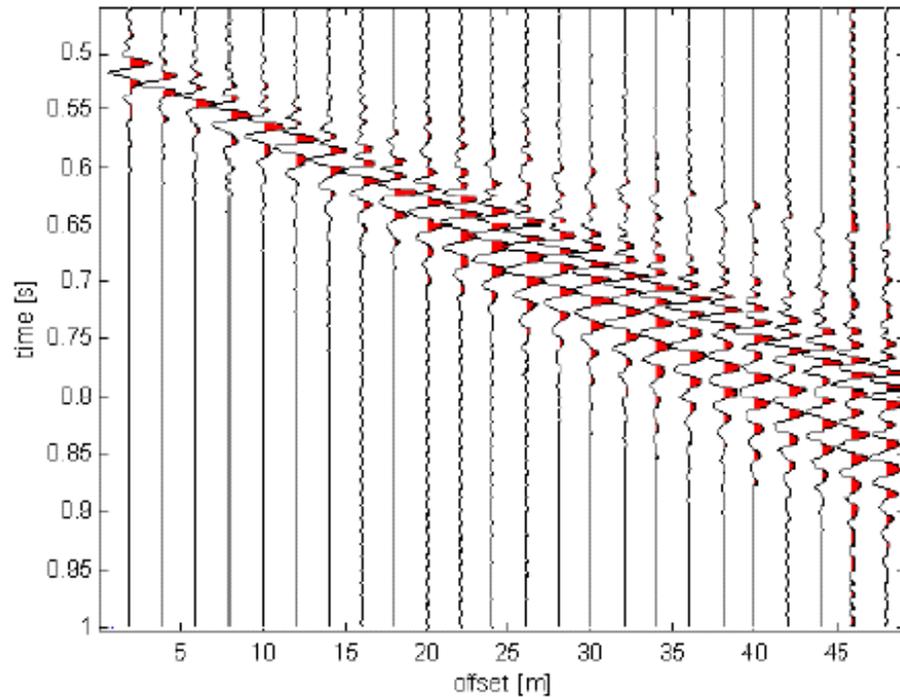
**MEIO
HETEROGÊNIO**

$$V_B > V_A$$



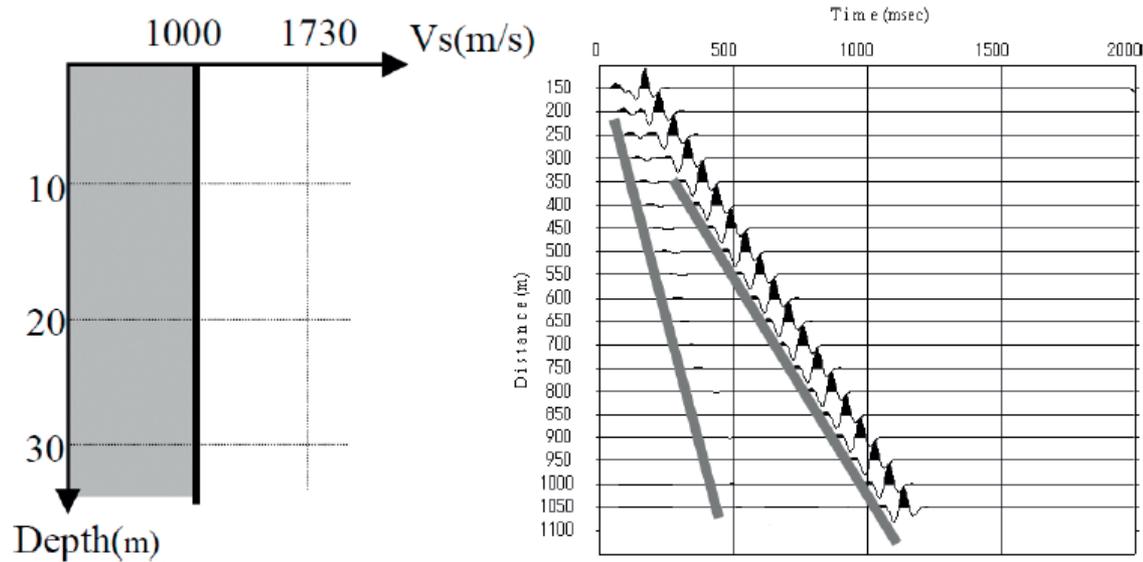


MEIO HOMOGÊNIO
↓
SEM DISPERSÃO
(wavelet não se modifica)

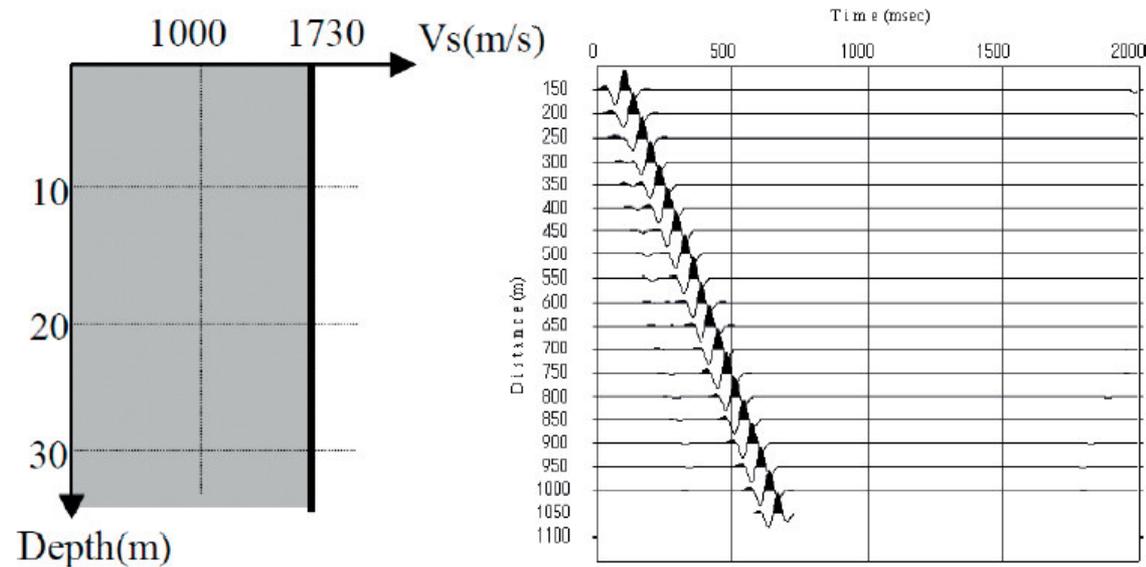


MEIO HETEROGÊNIO
↓
DISPERSÃO

MEIO HOMOGÊNIO \Rightarrow NÃO OCORRE O FENÔMENO DA DISPERSÃO

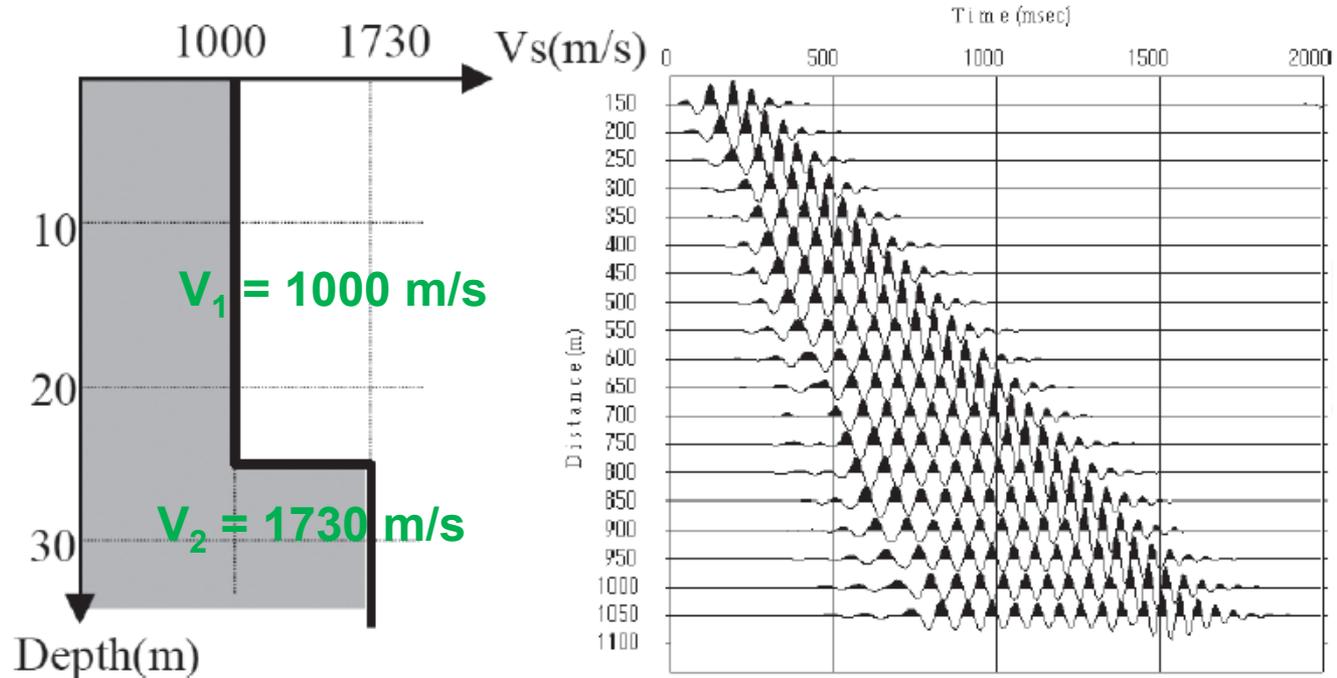


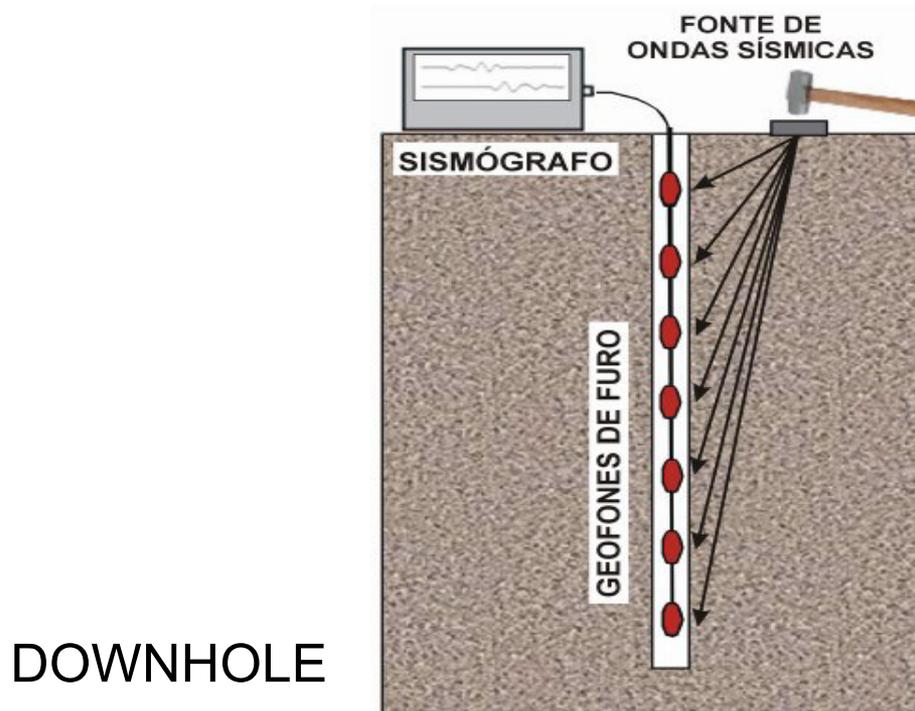
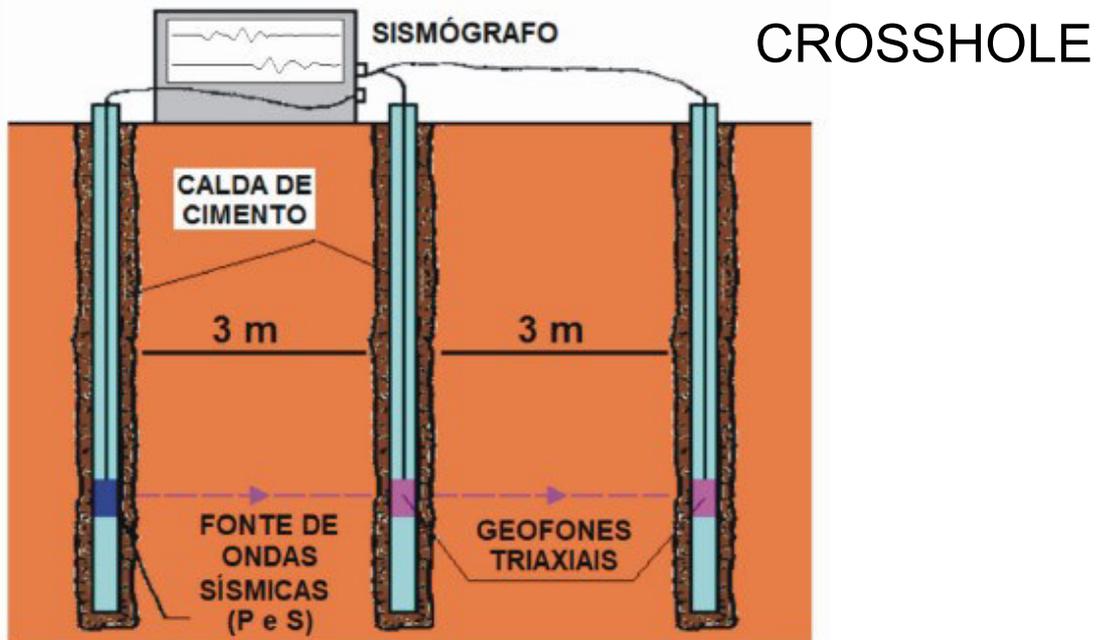
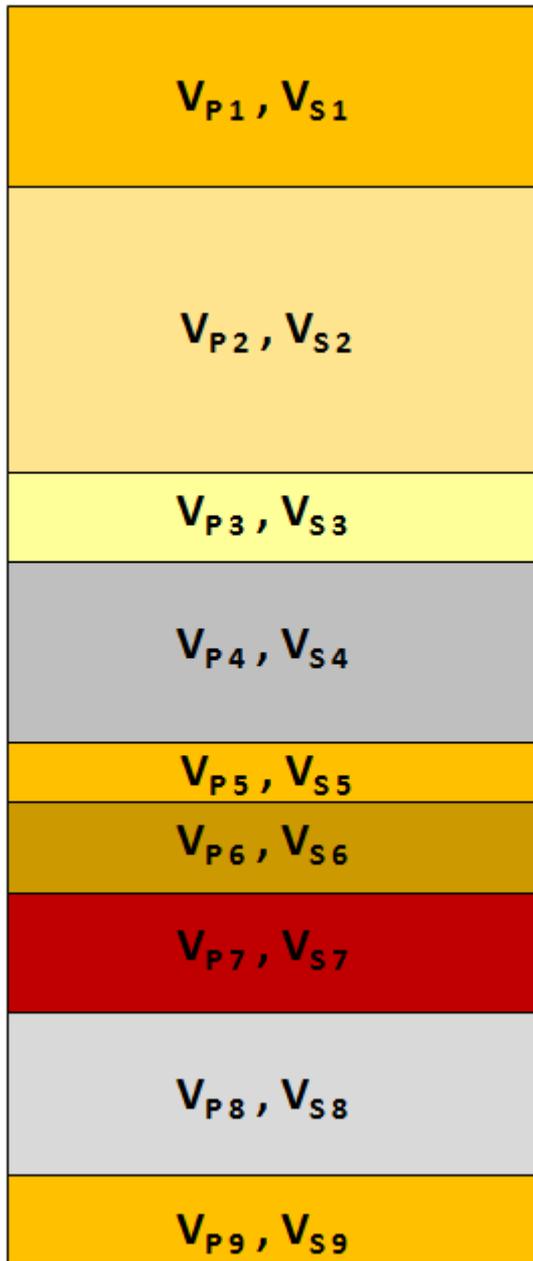
V = 1000 m/s



V = 1730 m/s

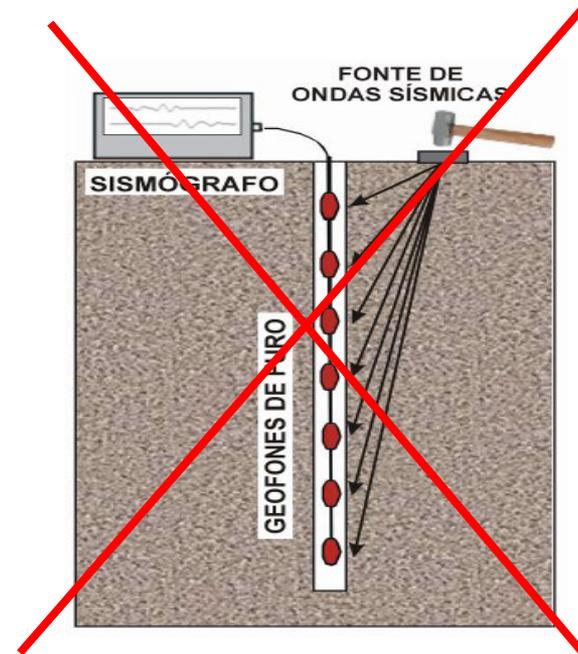
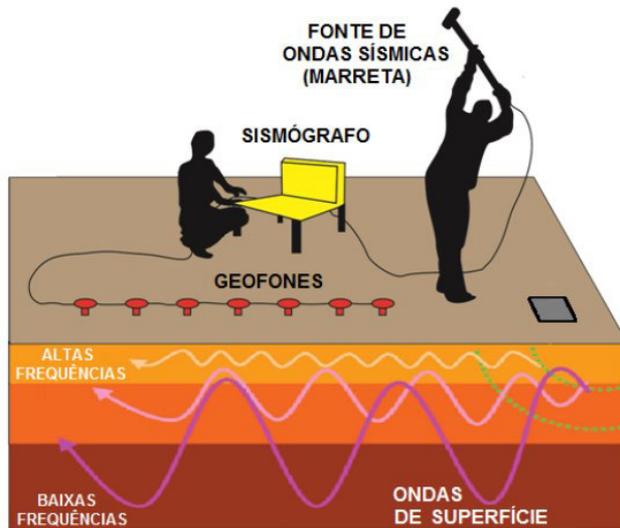
MEIO HETEROGÊNIO \Rightarrow OCORRE O FENÔMENO DA DISPERSÃO





Vantagens de se utilizar o MASW:

I) É um método de superfície



II) É possível realizar levantamentos em locais com presença de ruídos (situação que muitas vezes impossibilitam a execução de um ensaio de Sísmica de Refração, por exemplo)

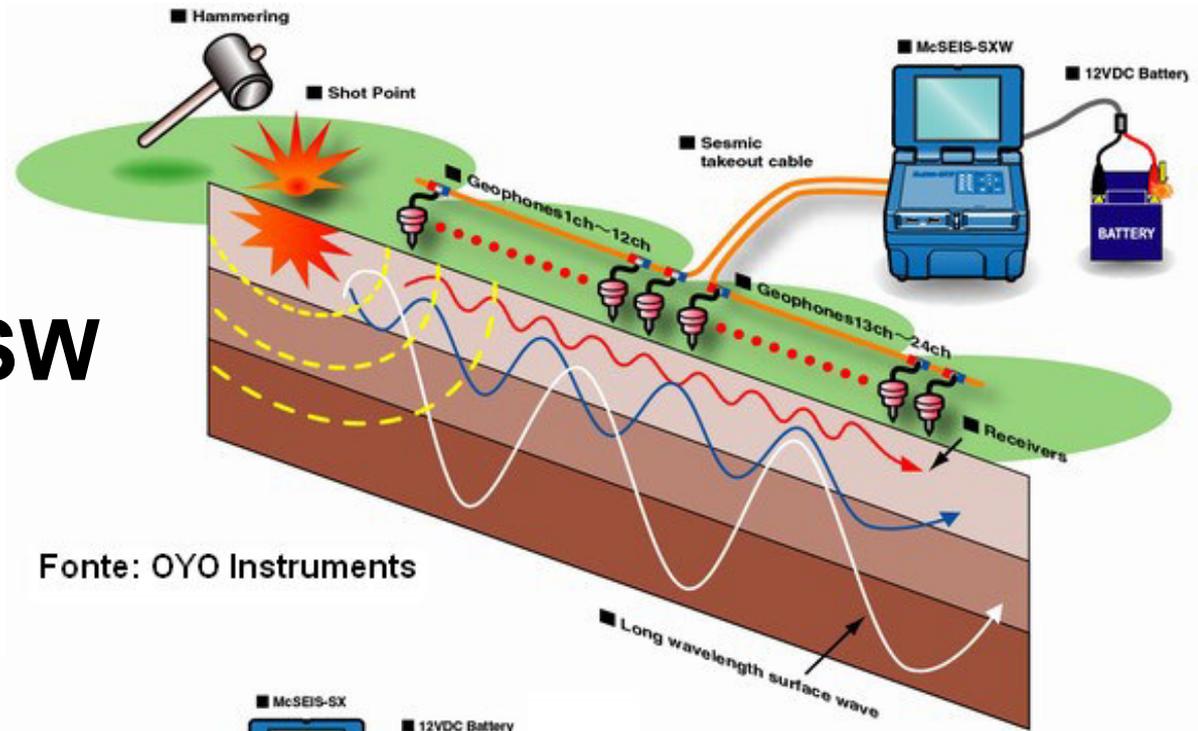
MASW to Investigate Subsidence in the Tampa, Florida Area

Richard D. Miller
Jianghai Xia
Choon B. Park

Kansas Geological Survey
1930 Constant Avenue
Lawrence, Kansas 66047



MASW



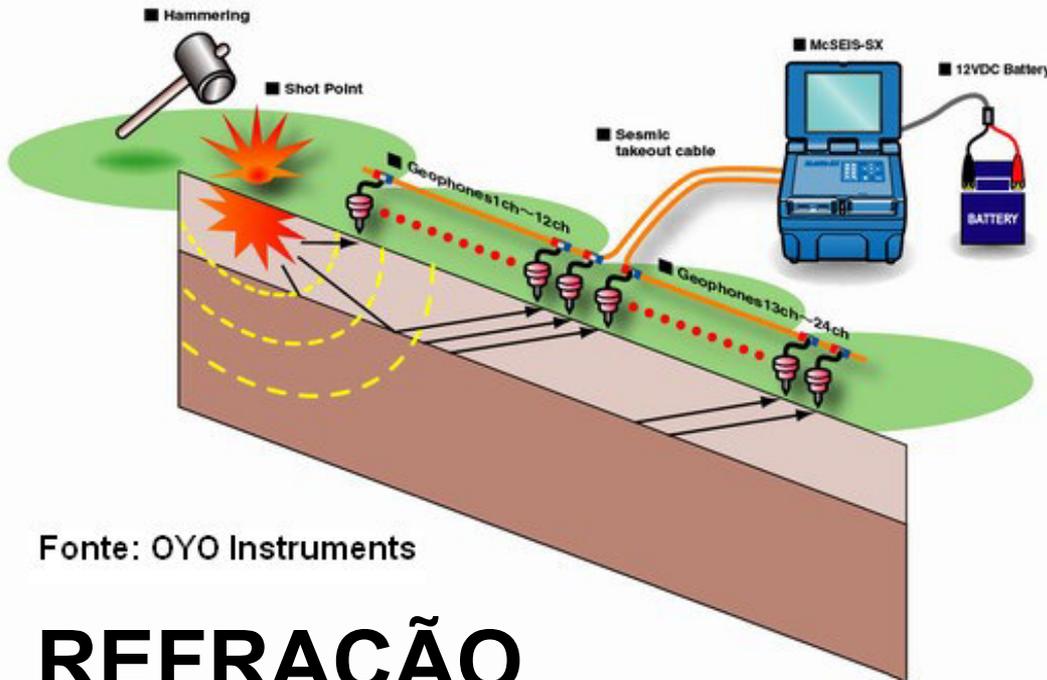
Fonte: OYO Instruments

⇒ Pode ser utilizado o mesmo arranjo

(mudando apenas alguns parâmetros)

Fonte: OYO Instruments

REFRAÇÃO



Parâmetros de campo

Fonte: <http://www.masw.com/index.html>

Recommended Values in ()

Depth (Z_{max}) ¹ (m)	Source (S) ² (lb)	Receiver (R) ³ (Hz)	Receiver Spread (RS) (m)				SR Move ⁶ (dx)			Recording ⁸				
			Length ⁴ (D)	Source Offset ⁵ (X_1)	Receiver Spacing (dx)		Lateral Resolution ⁷			dt ⁹ (ms)	T ¹⁰ (sec)	Vertical Stack ¹¹		
					24-ch*	48-ch	High	Medium	Low			C	N	VN
≤ 1.0	≤ 1 (1)**	4.5–100 (40)	1–3 (2.0)	0.2–3.0 (0.4)	0.05–0.1 (0.1)	0.02–0.05 (0.05)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (0.5)	0.5–1.0 (0.5)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)
1–5	1–5 (5)	4.5–40 (10)	1–15 (10)	0.2–15 (2)	0.05–0.6 (0.5)	0.02–0.3 (0.25)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (0.5)	0.5–1.0 (0.5)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)
5–10	5–10 (10)	≤ 10 (4.5)	5–30 (20)	1–30 (4)	0.2–1.2 (1.0)	0.1–0.6 (0.5)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (0.5)	0.5–1.0 (1.0)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)
10–20	≥ 10 (20)	≤ 10 (4.5)	10–60 (30)	2–60 (10)	0.4–2.5 (1.5)	0.2–1.2 (1.0)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (0.5)	1.0–2.0 (1.0)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)
20–30	≥ 10 (20)	≤ 4.5 (4.5)	20–90 (50)	4–90 (10)	0.8–3.8 (2.0)	0.4–1.9 (1.5)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (1.0)	1.0–2.0 (1.0)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)
30–50	≥ 10 (20) or passive	≤ 4.5 (4.5)	30–150 (70)	6–150 (15)	1.2–6.0 (3.0)	0.6–3.0 (2.0)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (1.0)	1.0–3.0 (1.0)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)
> 50	≥ 10 (20) or passive	≤ 4.5 (4.5)	> 50 (150)	> 10 (30)	> 2.0 (6.0)	> 1.0 (4.0)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (1.0)	≥ 1.0 (2.0)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)

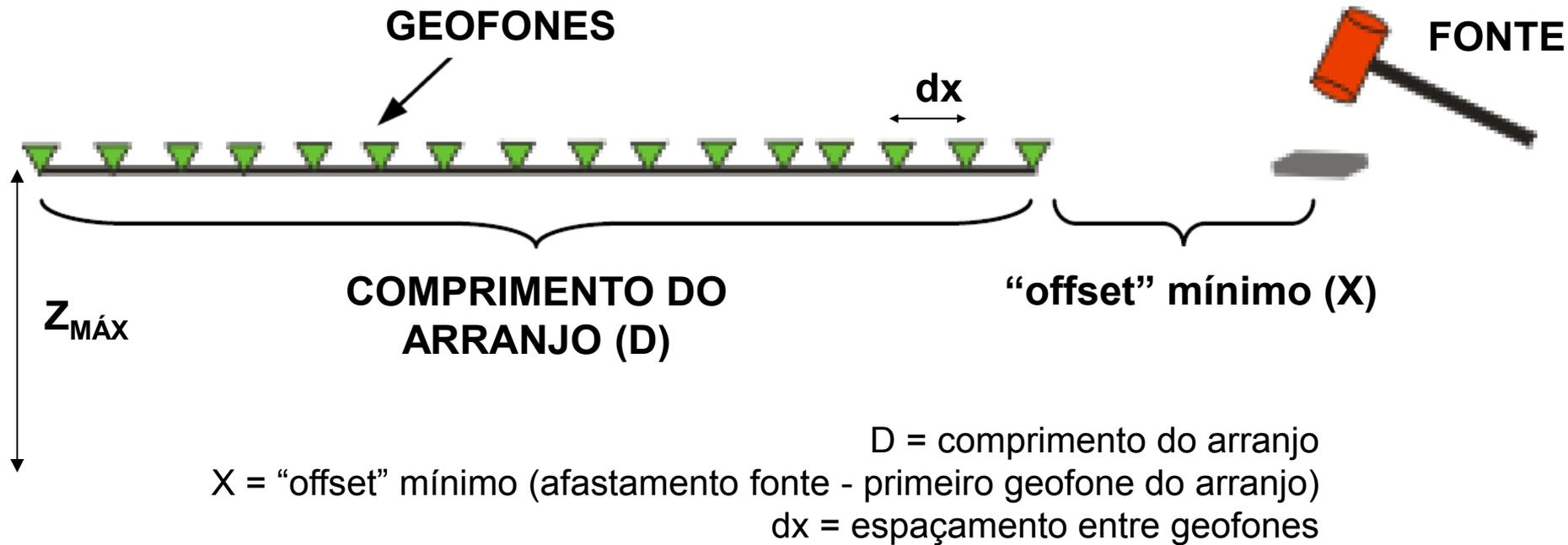
Destacam-se

- Frequência natural do geofone
- Espaçamento de geofones (tamanho do arranjo)
- *Offset* (distância fonte/primeiro geofone)
- Janela de tempo utilizada

Típicos parâmetros de campo utilizados no MASW

- Fonte: marreta (5 kg ou 8 kg)
- Receptor: geofone (componente vertical) de 4,5 Hz
- Sismógrafo: 24 ou 48 canais
- Espaçamento entre geofones: 0,5 m a 2,0 m
- Janela de tempo: 500 ms a 1000 ms (0,5 s a 1,0 s)
- *Stacks* (número de marretadas): 3 a 5

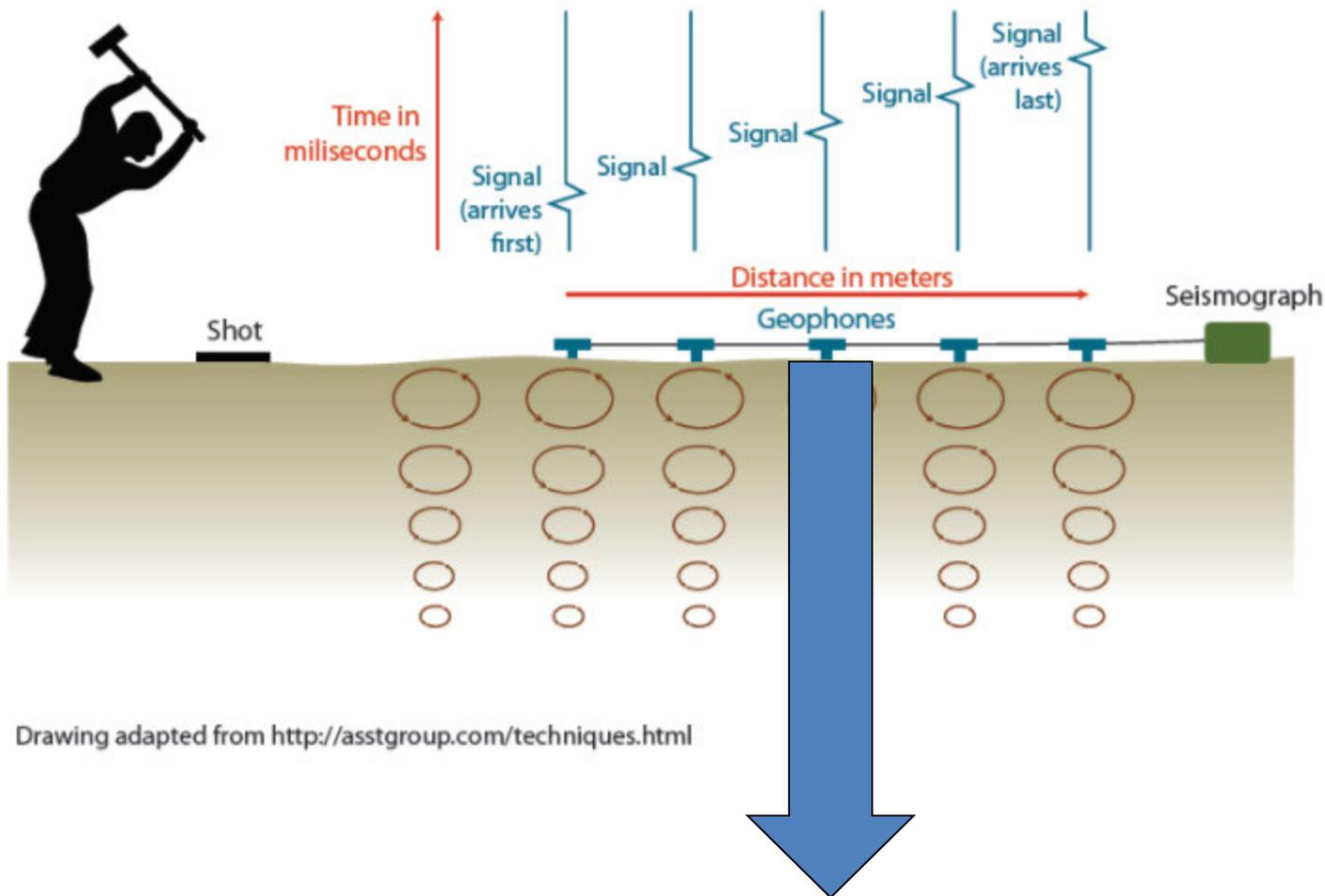
⇒ Profundidade típicas alcançadas (método ativo, utilizando marreta como fonte de ondas sísmicas): até 30 m



Exemplo:

- ✓ Espaçamento entre geofones: 2,0 m
- ✓ Sismógrafo de 24 canais → Comprimento do arranjo (D) = 46 m
- ✓ Profundidade esperada: em torno de 20 m $Z_{MÁX} \approx \frac{D}{2}$
- ✓ Offset mínimo: 4 m, 8 m, 12 m, 16 m

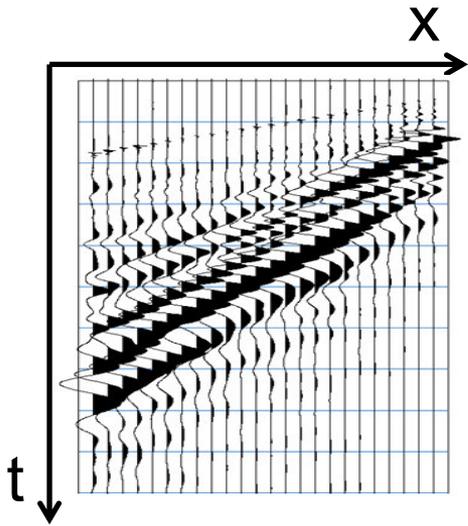
Figure 6. Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) Technique



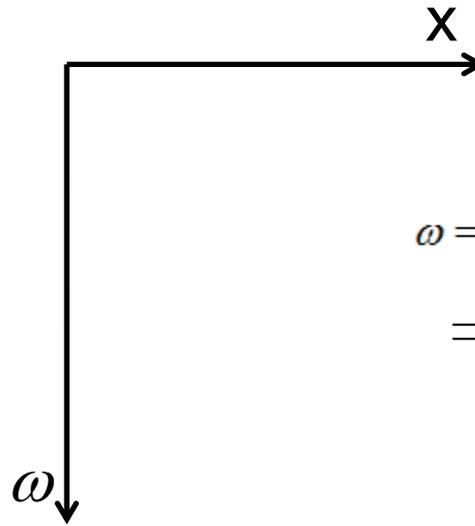
Drawing adapted from <http://asstgroup.com/techniques.html>

**Informação 1D (V_s versus profundidade)
em um ponto atribuído ao centro do arranjo**

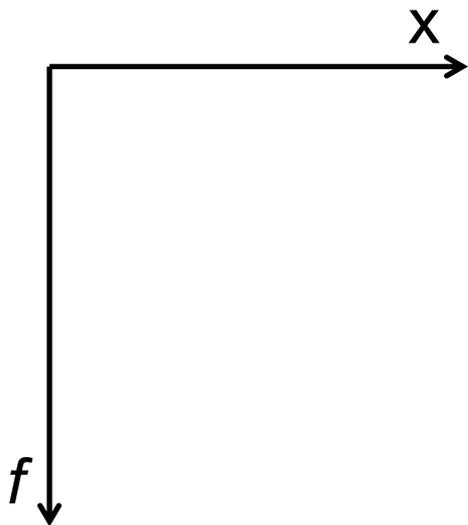
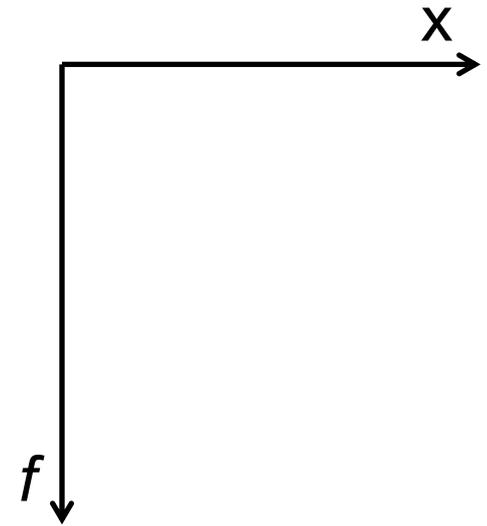
Do sismograma de campo, é gerada por processos matemáticos (transformação de domínio “tempo x distância” para “velocidade de fase x frequência”, aplicando FFT) uma **imagem de dispersão**



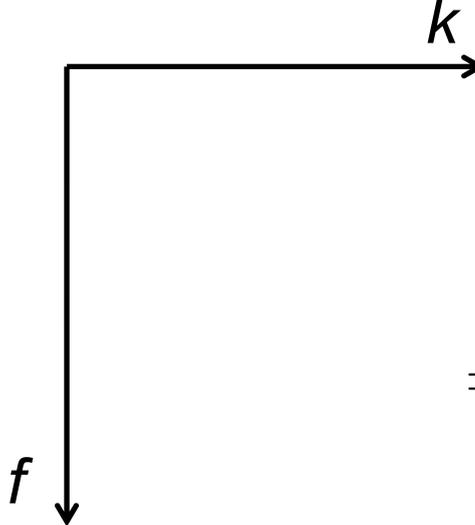
FFT



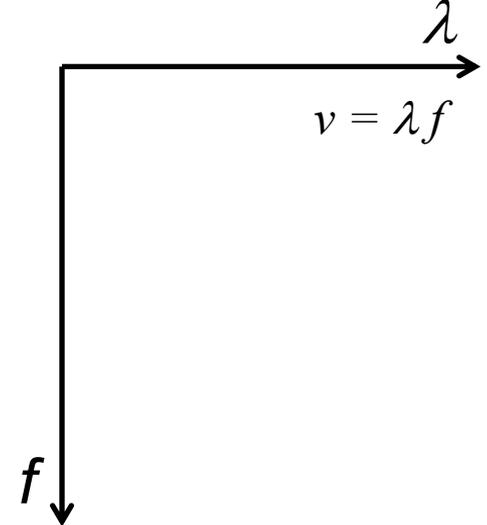
$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$
$$\Rightarrow f = \frac{\omega}{2\pi}$$



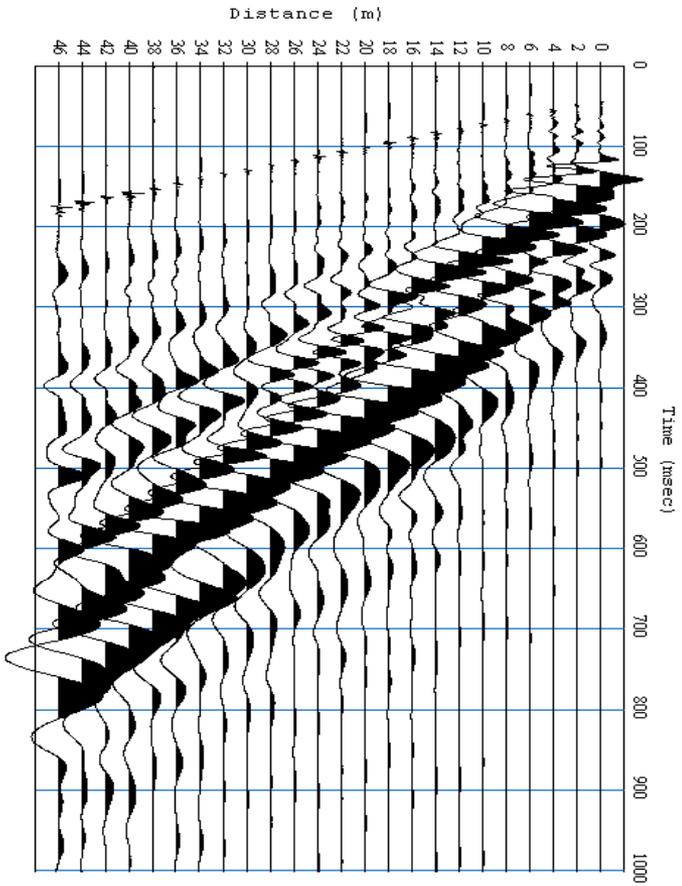
FFT



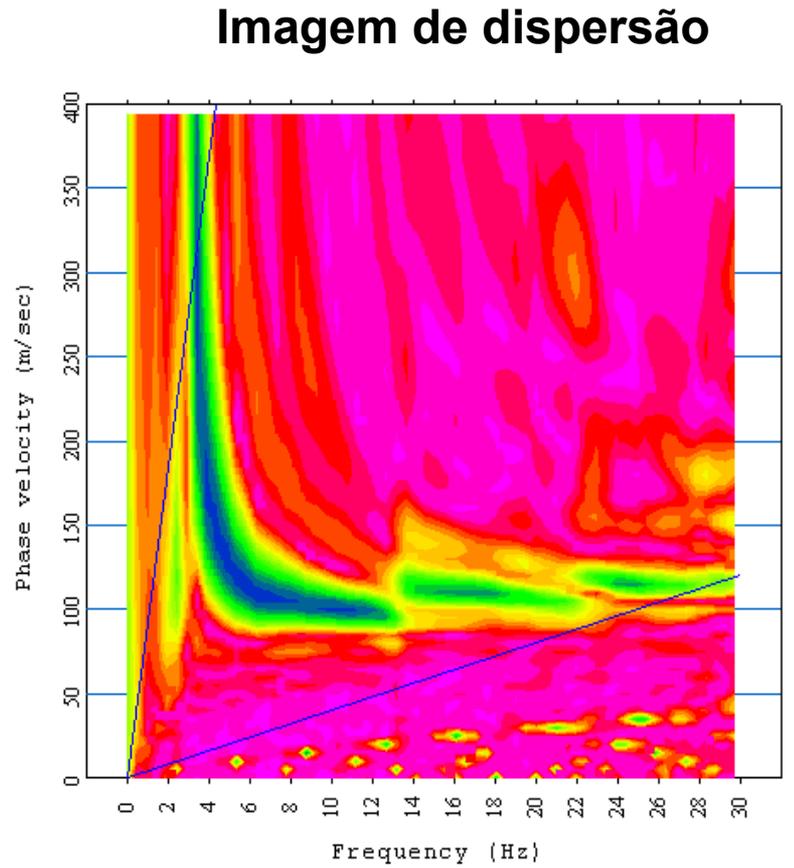
$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$
$$\Rightarrow \lambda = \frac{2\pi}{k}$$



$$v = \lambda f$$

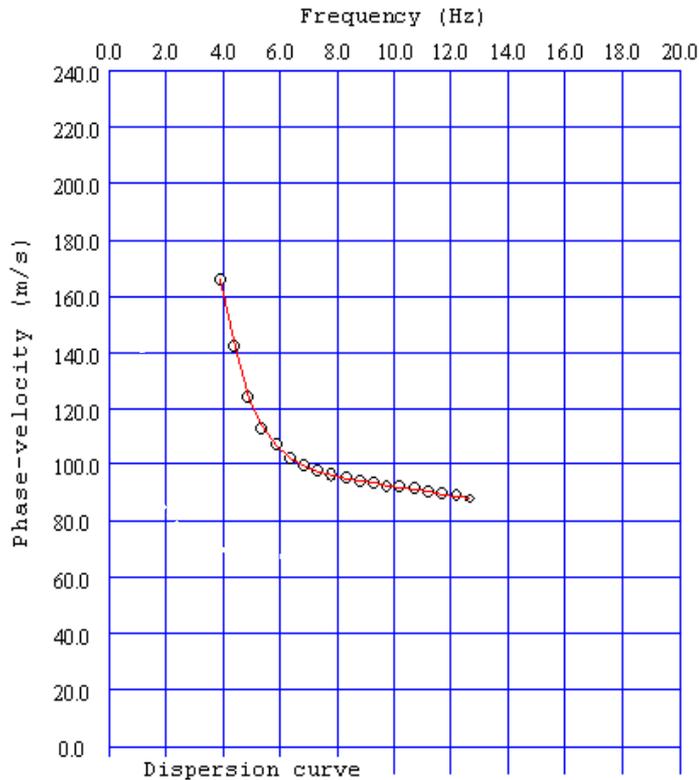


Sismograma

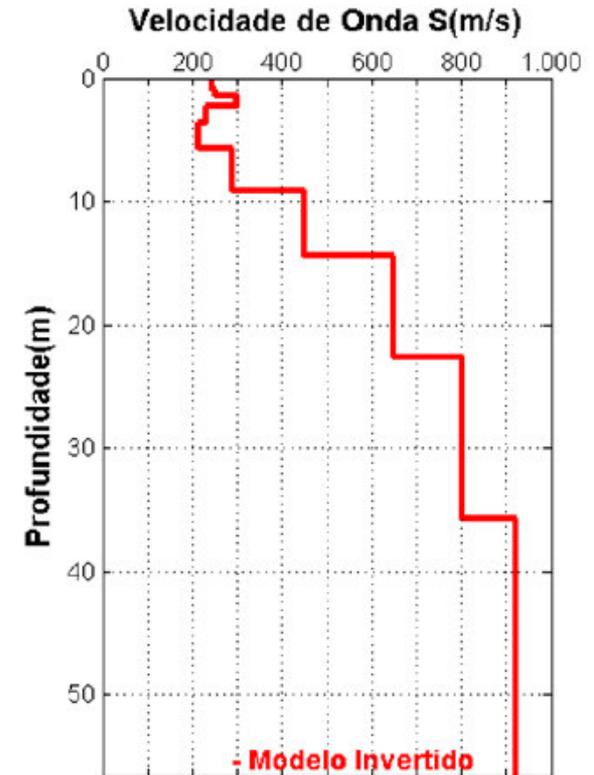


Processamento matemático obtém o perfil de VS versus a profundidade, a partir da inversão da **curva de dispersão**

Curva de dispersão



Modelo VS x profundidade



MASW 2D: resultado de diversos levantamentos MASW 1D ao longo de uma linha

S. Donohue et al./Soil & Tillage Research 128 (2013) 54–60

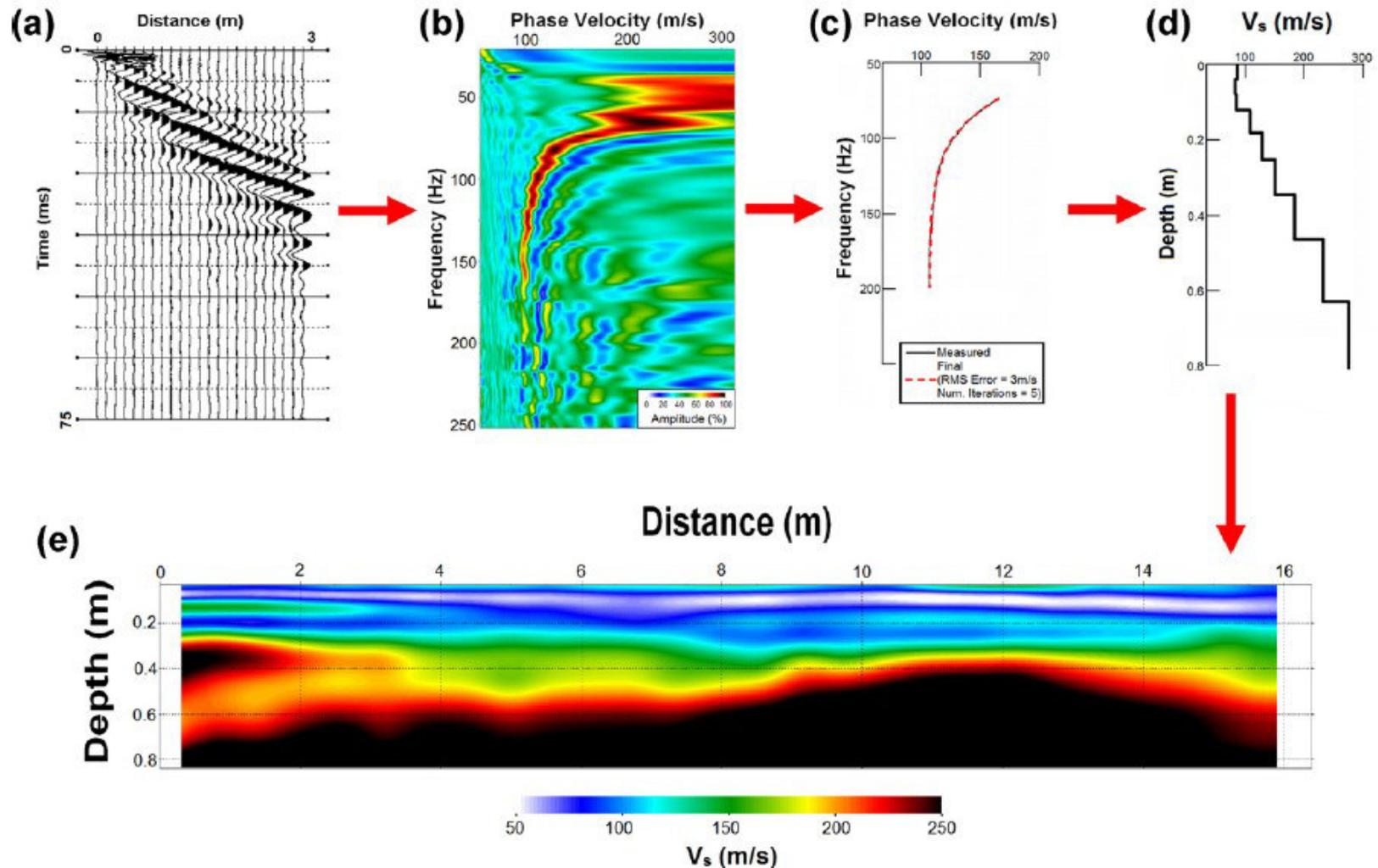
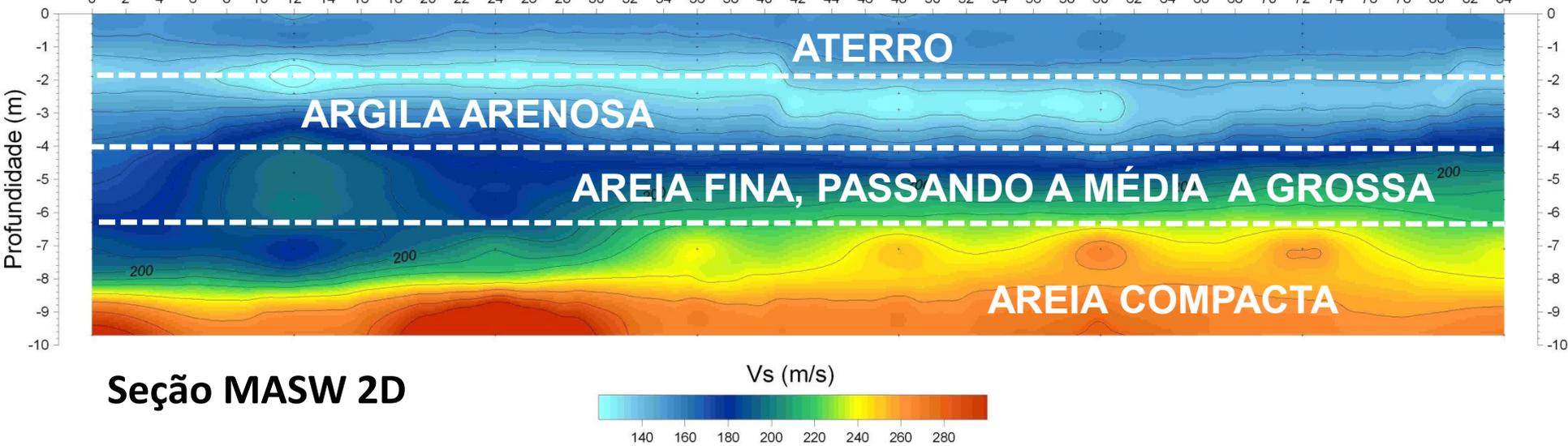
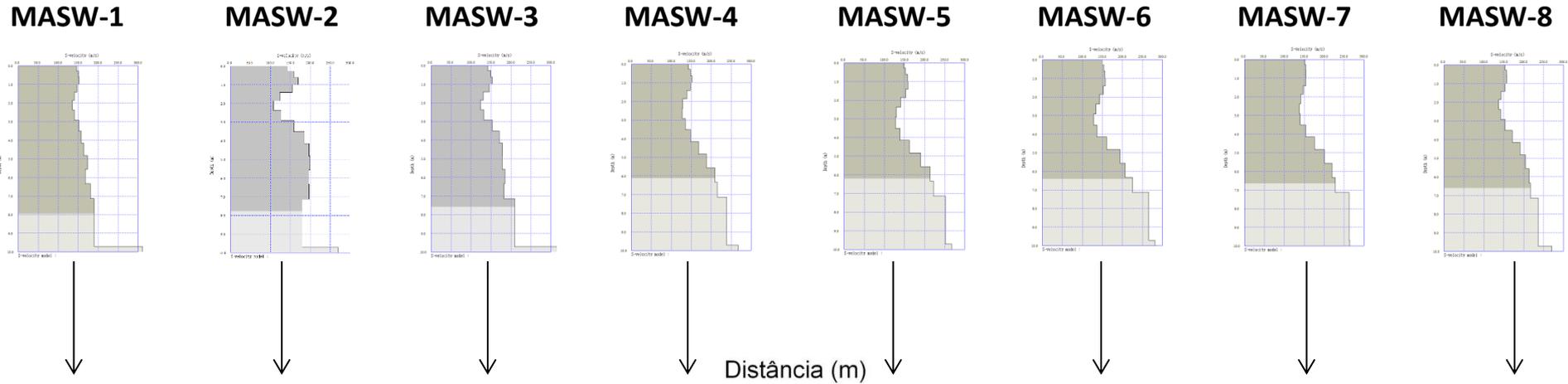
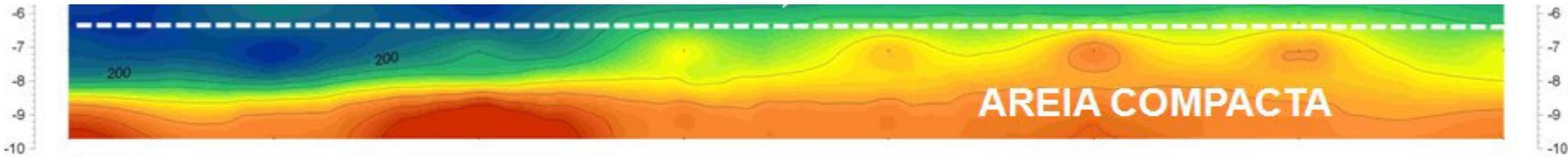


Fig. 1. The various stages involved in producing a 2D MASW profile, (a) raw seismic data, (b) dispersion curve image, (c) and (d) inversion and production of a 1D V_s -depth profile and (e) 2D V_s image combining inverted 1D V_s profiles.

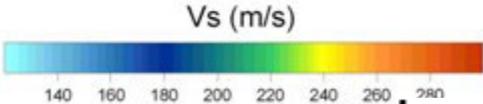
8 levantamentos MASW 1D



Seção MASW 2D



$$V_S = A \cdot N^B$$



$$V_S = 270 \text{ m/s}$$

Tabela 2 - Correlações: N(SPT) e V_S (adaptado de Hanumantharao & Ramana, 2008).

Autor	Correlação	Solo	País
Shibata (1970) **	$V_S = 32.0N^{0.50}$	Areias	Japão
Ohta <i>et al</i> (1972)\$	$V_S = 87.0N^{0.36}$	Areias	Japão
JRA (1980) **	$V_S = 80.0N^{0.33}$	Areias	Japão
Seed <i>et al</i> (1983)	$V_S = 56.4N^{0.50}$	Areias	USA
Lee (1990)	$V_S = 57.0N^{0.49}$	Areias	USA

$$V_S = 87,0N^{0,36} \Rightarrow N_{SPT} = 23$$

$$V_S = 57,0N^{0,49} \Rightarrow N_{SPT} = 24$$

Resistência à penetração (Número N do SPT)	Compacidade da areia
0 a 4	muito fofa
5 a 8	fofa
9 a 18	compacidade média
18 a 40	compacta
acima de 40	muito compacta

Fonte: Carlos de Souza Pinto. Curso básico de mecânica dos solos. Oficina de Textos, 2000.

SOLOS MOLES



Fotos: Arquivo pessoal | Márcio Almeida

As argilas moles costumam surgir em planícies costeiras e podem chegar a 50 m de espessura

SOLOS MOLES

Ocorrem geralmente em regiões litorâneas e em baixadas, particularmente em áreas de manguezais e de estuários

- alta umidade
- alto índice de plasticidade
- percentual elevado de argila
- elevada compressibilidade
- baixa resistência à penetração ($SPT \leq 4$)
- baixa resistência ao cisalhamento
- baixa capacidade de suporte

SOLOS MOLES: Métodos para identificação em ensaios de campo

- SPT (N_{SPT} muito baixos, em geral $N_{SPT} \cong 0$)
- Ensaios de palheta (*VT-Vane Test*)
- Piezocone (CPTu)
- Dilatômetro de Marchetti (DMT)
- Ensaios sísmicos (MASW, SCPTu, SDMT)

$$G_{\text{máx}} = \rho V_s^2$$

Se $\rho = 1,5 \text{ g/cm}^3$
 $V_s = 180 \text{ m/s}$

$\Rightarrow G_{\text{máx}} = 48,6 \text{ MPa}$

Soil profile type	Soil profile name/generic description	Shear wave velocity, fsseet/second (m/s)	Standard penetration test (blows/foot)	Undrained shear strength, psf (kPa)
S_A	Hard rock	>5,000 (1,500)	—	—
S_B	Rock	2,500 to 5,000 (760 to 1,500)	—	—
S_C	Very dense soil and soft rock	1,200 to 2,500 (360 to 760)	>50	>2,000 (100)
S_D	Stiff soil profile	600 to 1,200 (180 to 360)	15 to 50	1,000 to 2,000 (50 to 100)
S_F	Soil requiring site-specific evaluation.			

(From UBC 1997, Table 16-J.)

DEPÓSITO DE SOLO MOLE DE SARAPUÍ II, RIO DE JANEIRO - RJ



DEPÓSITO DE SOLO MOLE DE SARAPUÍ II, RIO DE JANEIRO - RJ

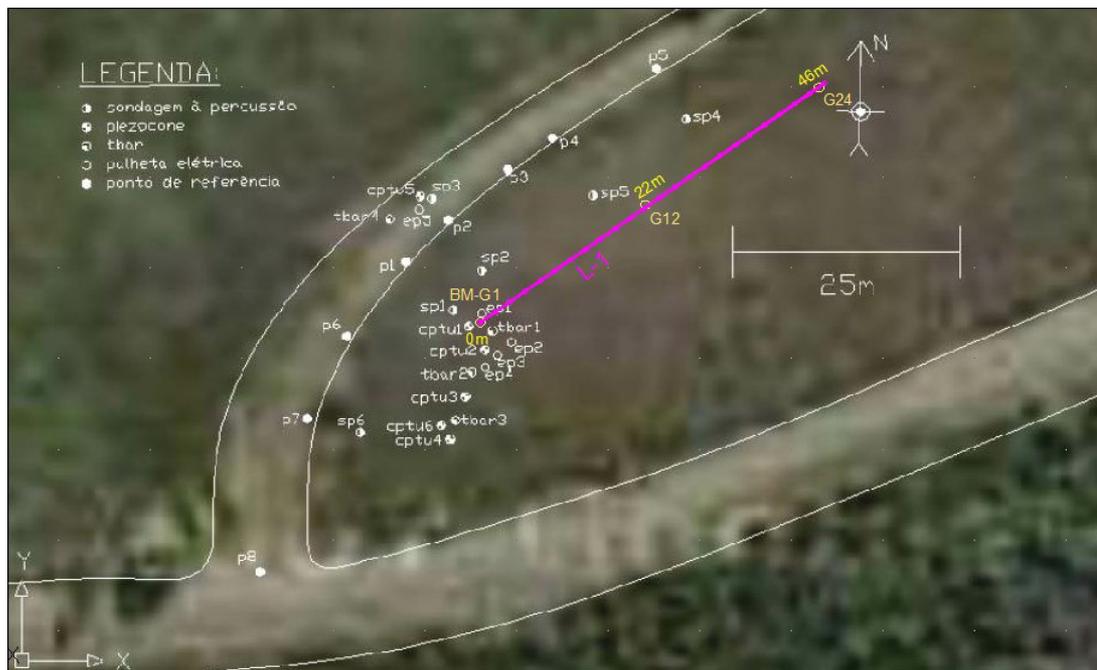


2ª feira, 4 / 2 / 2019

3ª feira, 5 / 2 / 2019

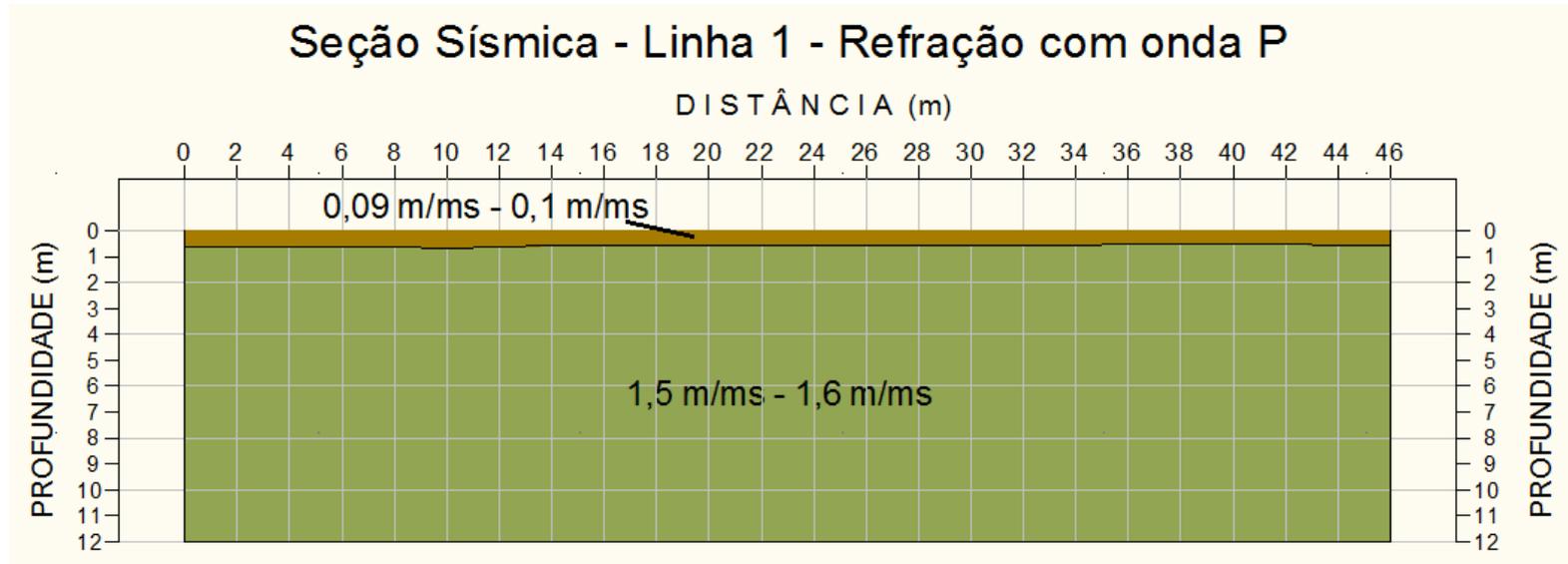


DEPÓSITO DE SOLO MOLE DE SARAPUÍ II, RIO DE JANEIRO - RJ



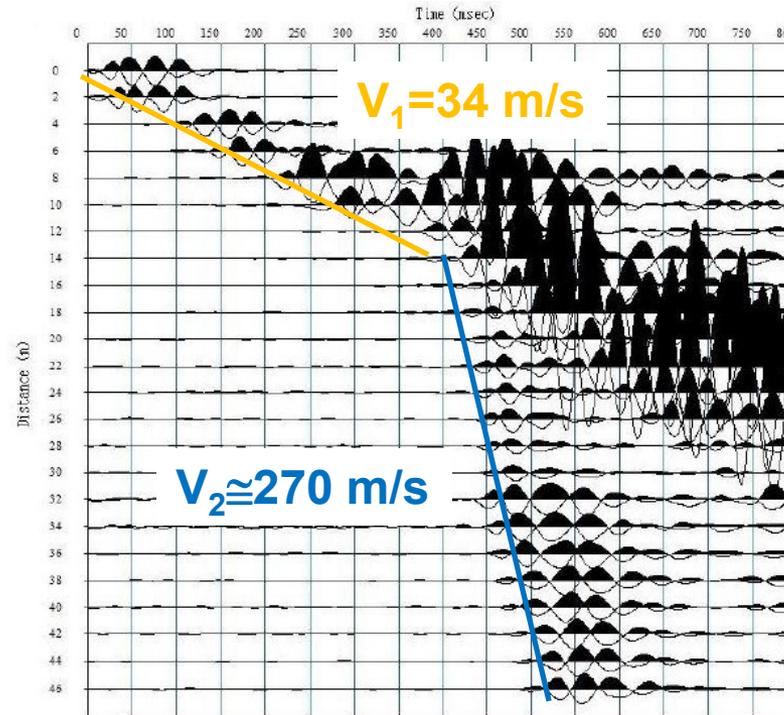
- ✓ Refração (onda P)
- ✓ Refração (onda S)
- ✓ MASW

Sísmica de Refração (onda P)

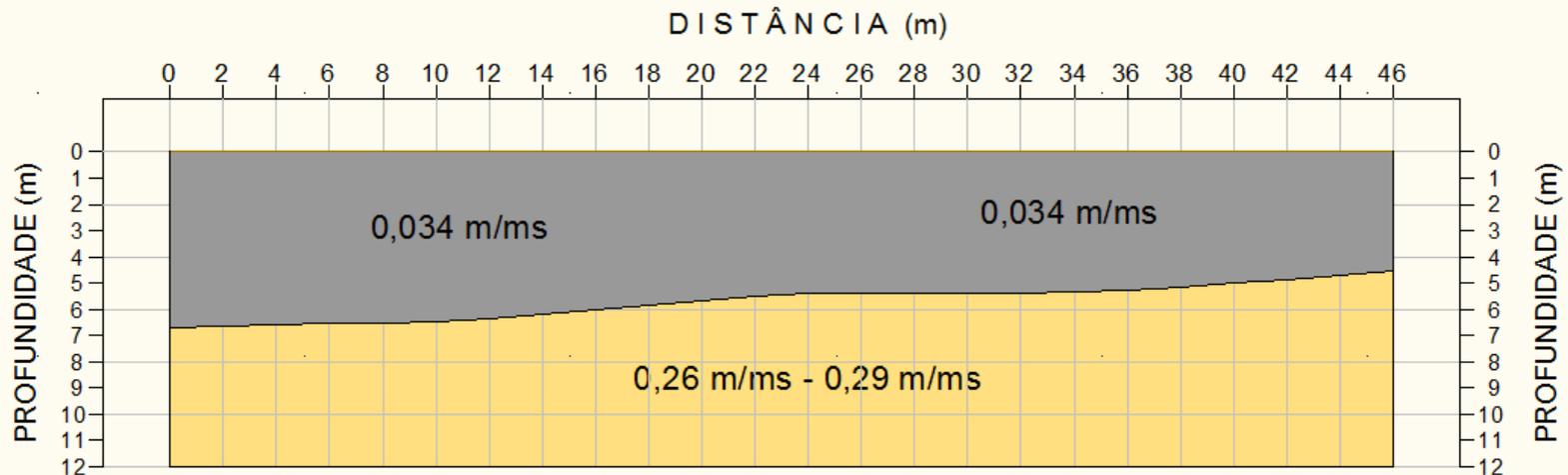


⇒ Onda P não fornece nenhuma informação abaixo do N.A.

Sísmica de Refração (onda S)

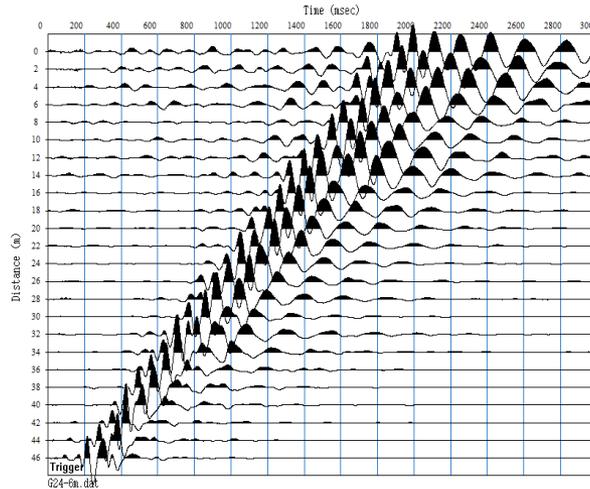


Seção Sísmica - Linha 1 - Refração com onda S



MASW

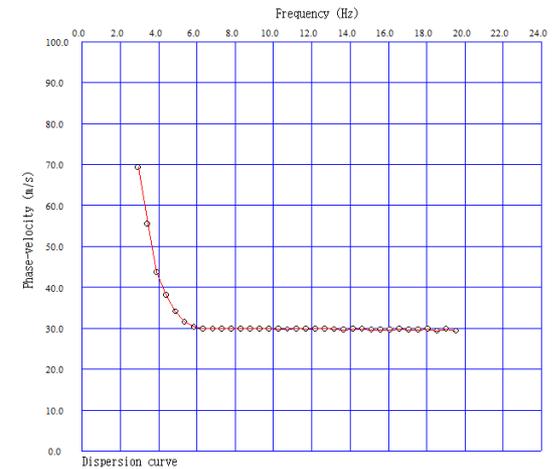
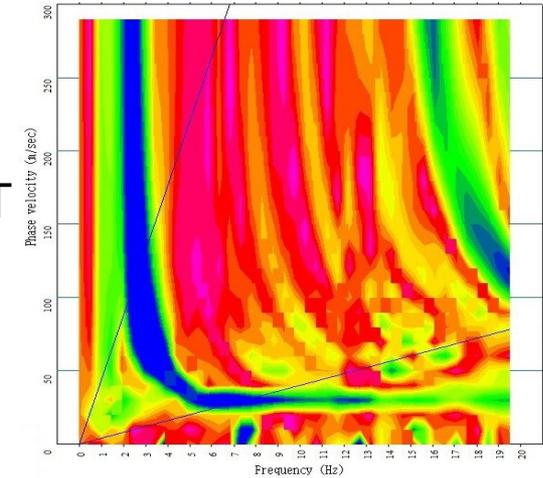
Sismograma com o registro das ondas superficiais (ondas Rayleigh)



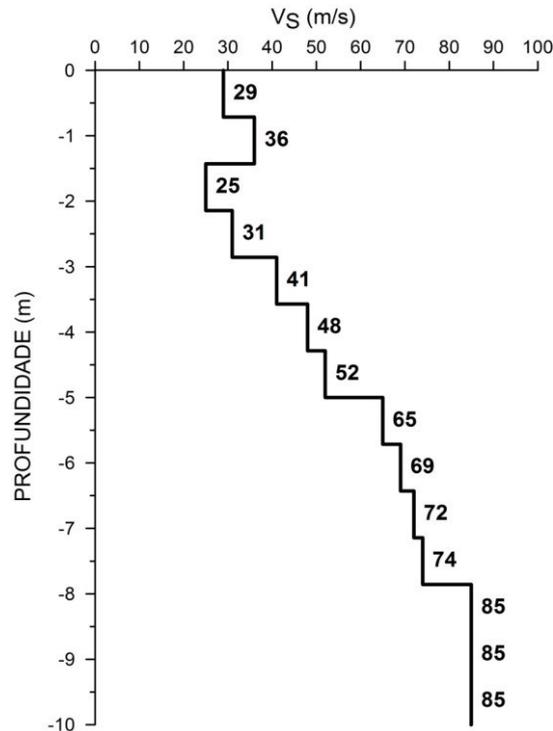
Dupla FFT



Imagem de dispersão



Curva de dispersão extraída da imagem

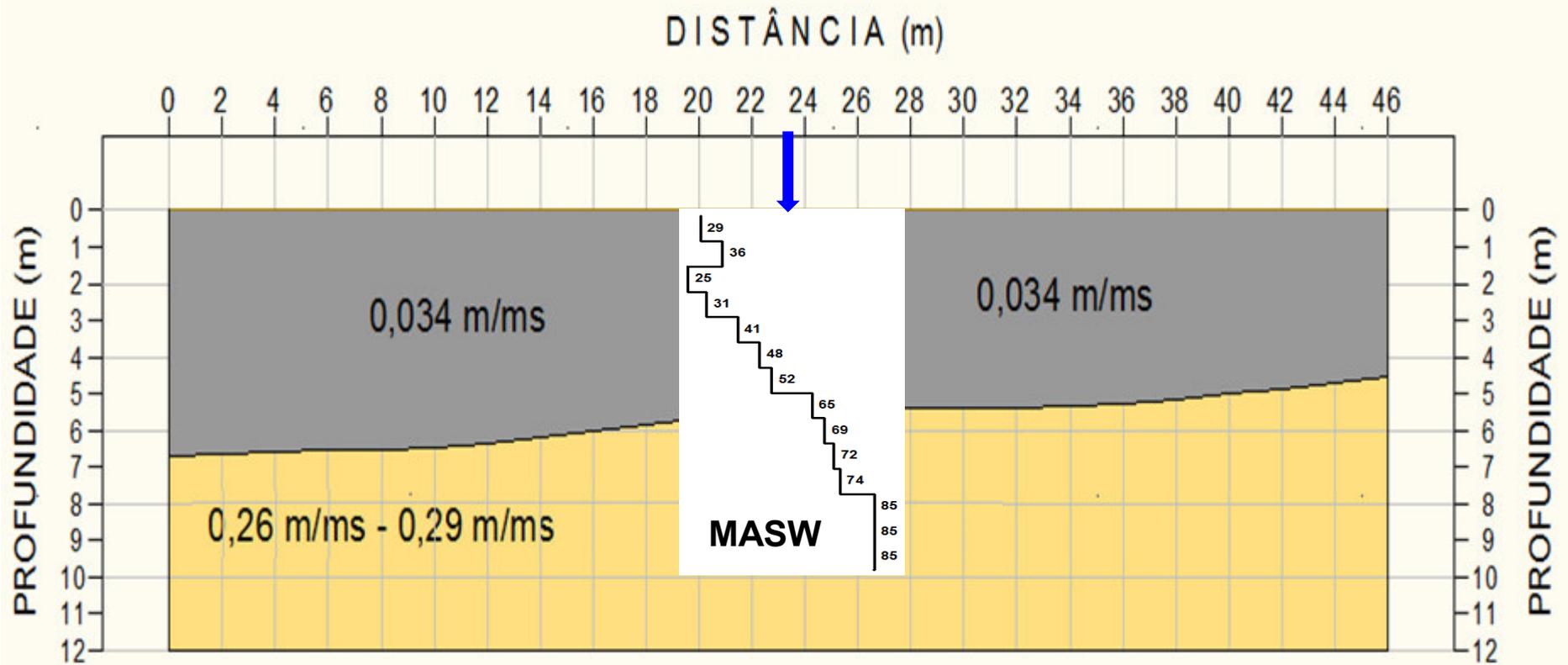


Perfil 1D (V_S x profundidade) obtido por processo de inversão



Comparação dos resultados de Refração com onda S e MASW

Seção Sísmica - Linha 1 - Refração com onda S



DEPÓSITO DE SOLO MOLE DE SARAPUÍ II, RIO DE JANEIRO - RJ

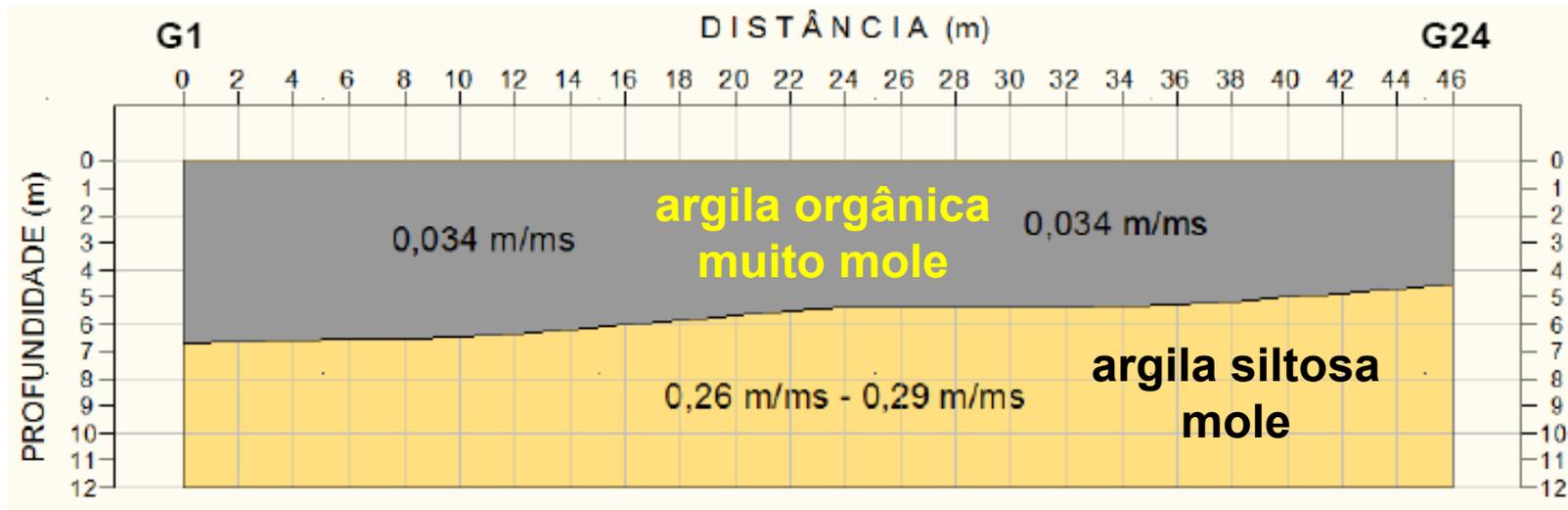
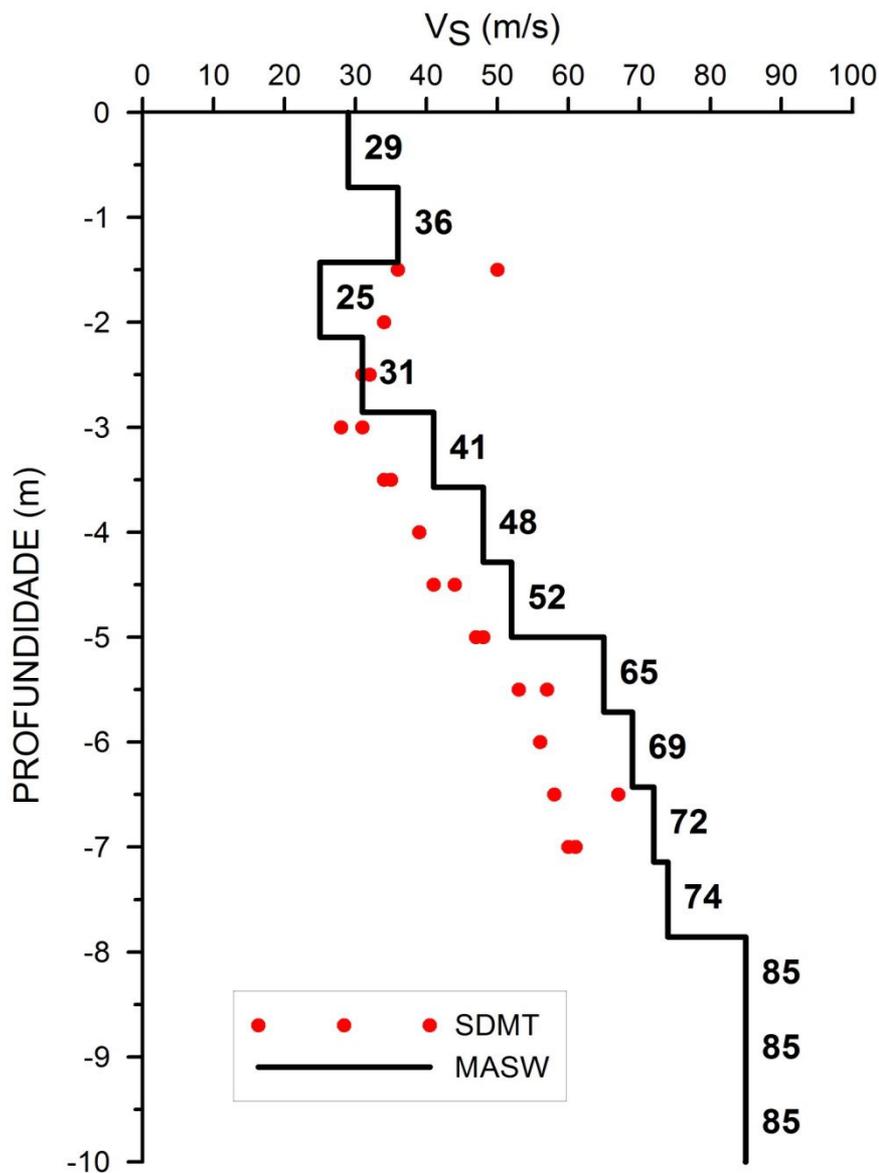


TABLE 2.7 Soil Profile Types

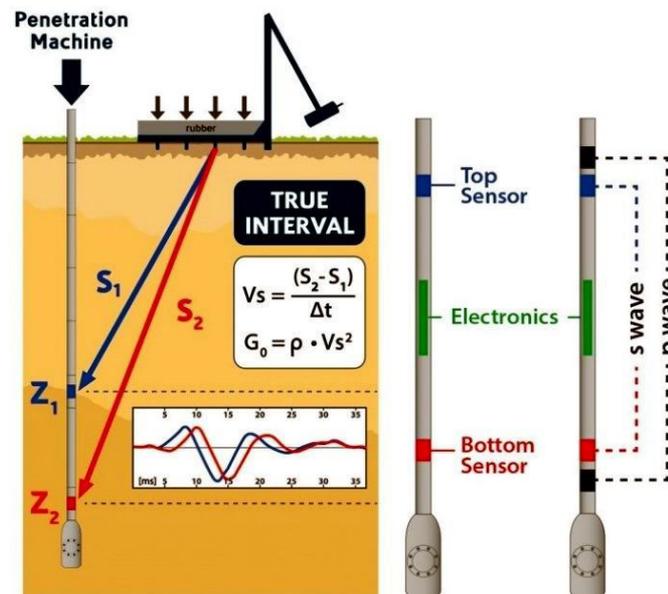
Soil profile type	Soil profile name/generic description	Average soil properties for top 100 feet (30,480 mm) of soil profile		
		Shear wave velocity, fsfeet/second (m/s)	Standard penetration test (blows/foot)	Undrained shear strength, psf (kPa)
S_A	Hard rock	>5,000 (1,500)	—	—
S_B	Rock	2,500 to 5,000 (760 to 1,500)	—	—
S_C	Very dense soil and soft rock	1,200 to 2,500 (360 to 760)	>50	>2,000 (100)
S_D	Stiff soil profile	600 to 1,200 (180 to 360)	15 to 50	1,000 to 2,000 (50 to 100)
S_E	Soft soil profile	<600 (180)	<15	<1,000 (50)
S_F	Soil requiring site-specific evaluation.			

$$V_S = 34 \text{ m/s} \lll 180 \text{ m/s}$$

DEPÓSITO DE SOLO MOLE DE SARAPUÍ II, RIO DE JANEIRO - RJ



Dilatômetro de Marchetti Sismico (SDMT) - Damasco Penna



TRATAMIENTO DE SOLOS MOLES

MASW na avaliação da eficácia de tratamento de solos

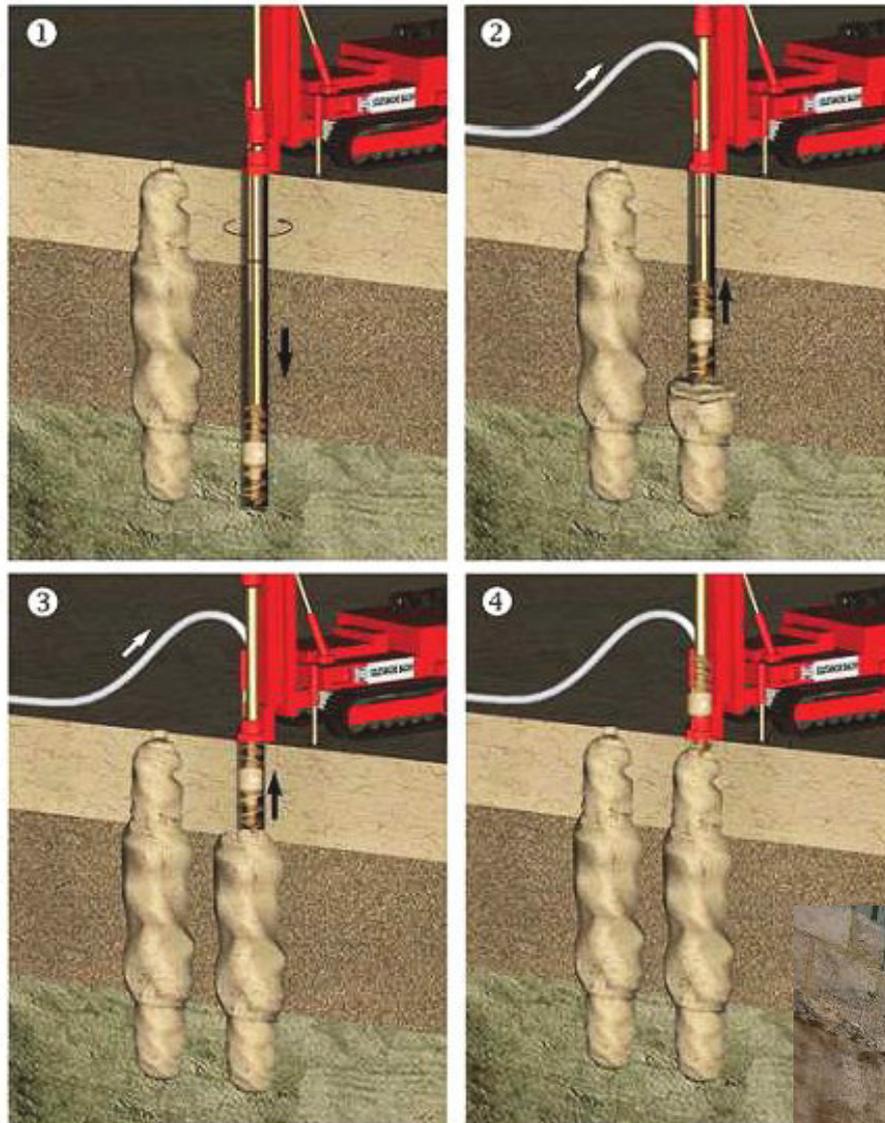
- ✓ Ensaios convencionais fornecem apenas informações localizadas das propriedades do solo investigado
- ✓ Ensaios sísmicos de MASW investigam um volume maior e mais representativo do material investigado

Compaction Grouting (CG)

As colunas de Compaction Grouting (CG), como colunas de grande deslocamento, são executadas mecanicamente por meio de trado contínuo específico, garantindo sua continuidade e diâmetro mínimo, com o bombeamento da massa de grout através da haste central interna do trado, executado simultaneamente com sua retirada do solo, resultando num aumento da densidade do solo envolvente.

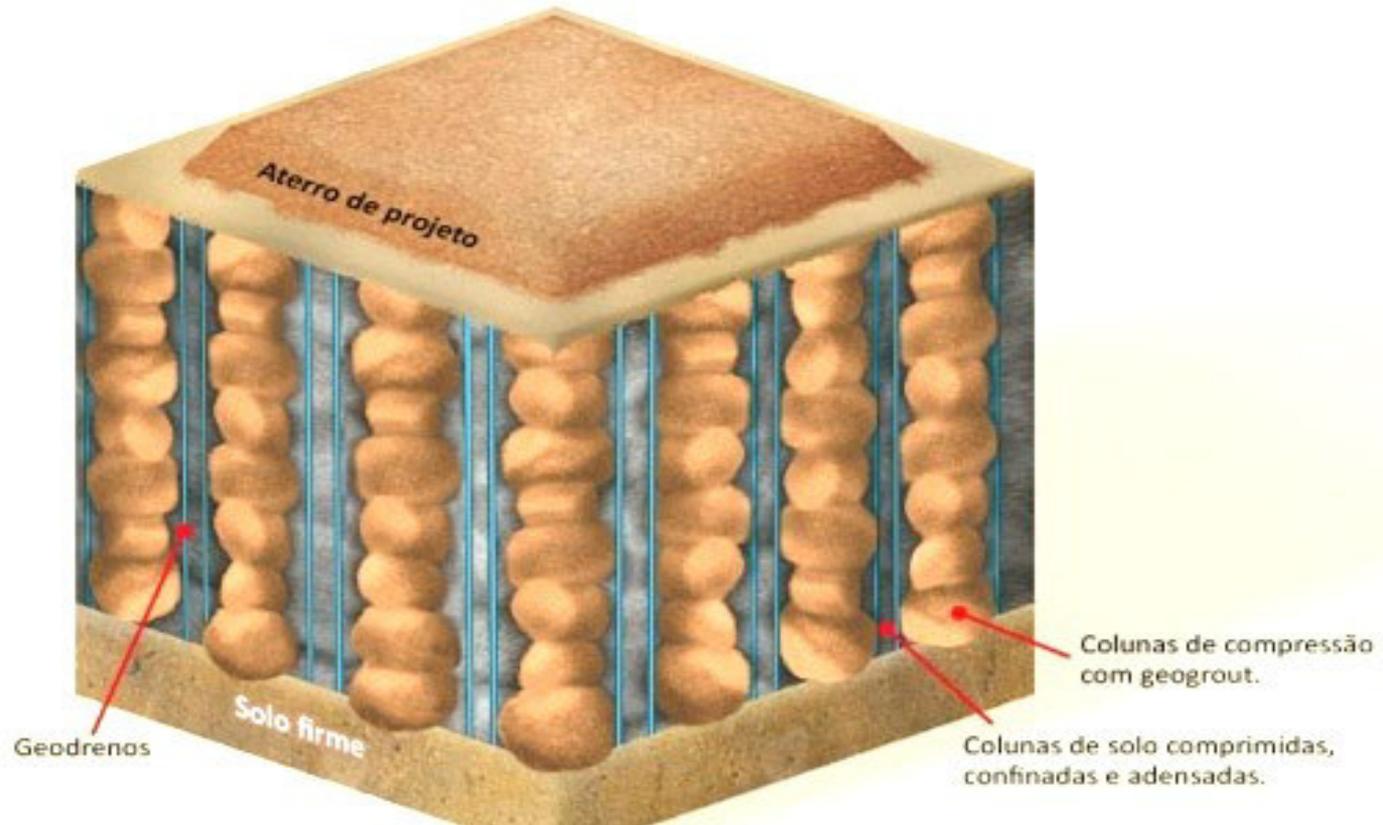
A velocidade de perfuração pode produzir de 200m a 400m por dia/equipe, dependendo do diâmetro do trado, da profundidade e da resistência do terreno. Isso porque após a perfuração do solo - processo executado com pouca vibração - o trado é retirado na medida em que o grout é bombeado, evitando desconfinamento do solo.

São utilizadas para melhorar as características das camadas compressíveis do solo e para reduzir sua compressibilidade com a utilização de colunas semirrígidas de reforço do solo. Ao contrário da solução de transferência de carga, que é projetada para suportar toda a carga das estruturas, o objetivo da solução de Compaction Grouting é aumentar a rigidez da massa de solo, reduzindo globalmente os recalques totais e diferenciais, compartilhando a carga da estrutura entre o solo e as colunas de Compaction Grouting.



$$G = \rho \cdot V_s^2$$

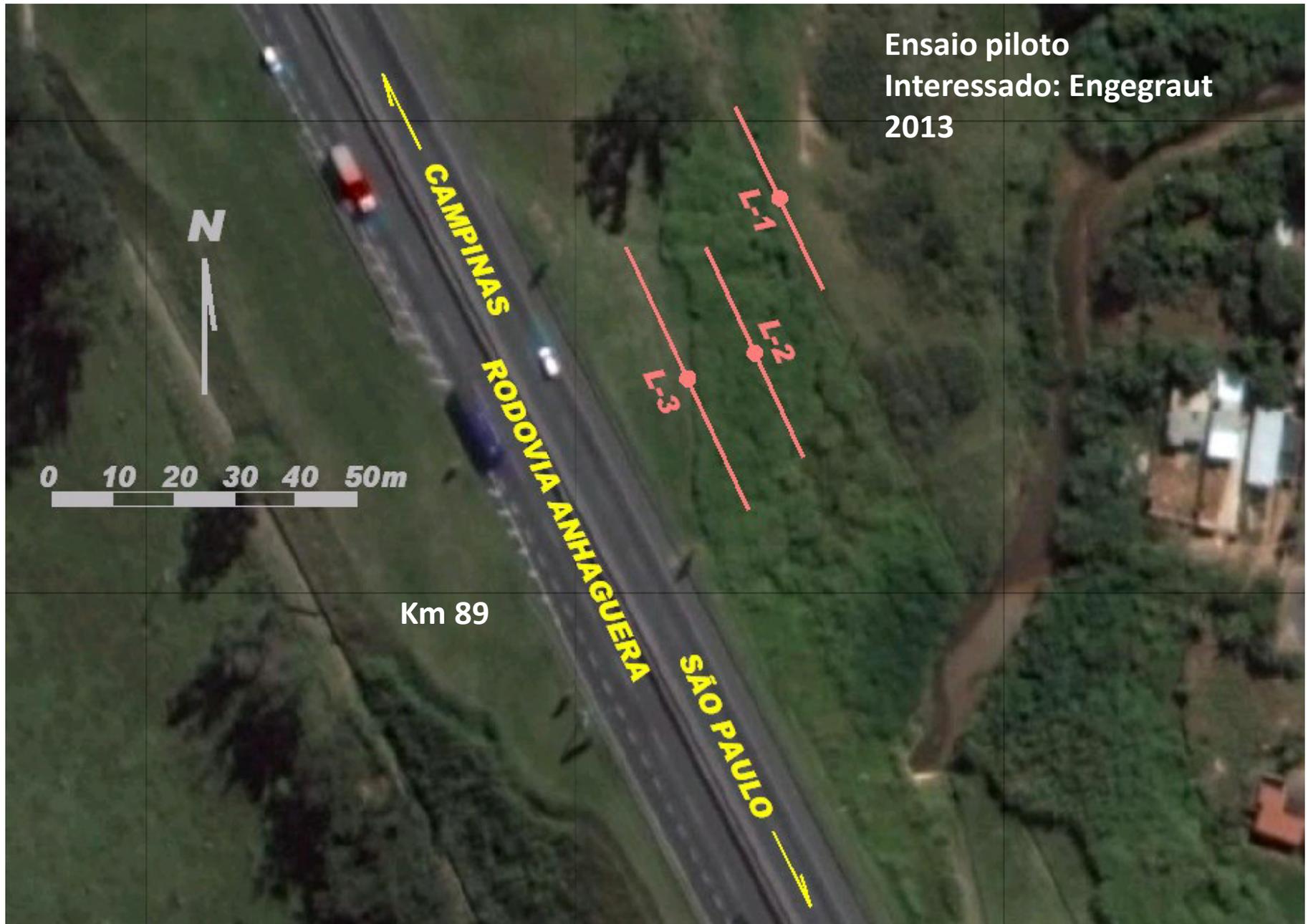
Técnica CPR (Consolidação Profunda Radial)



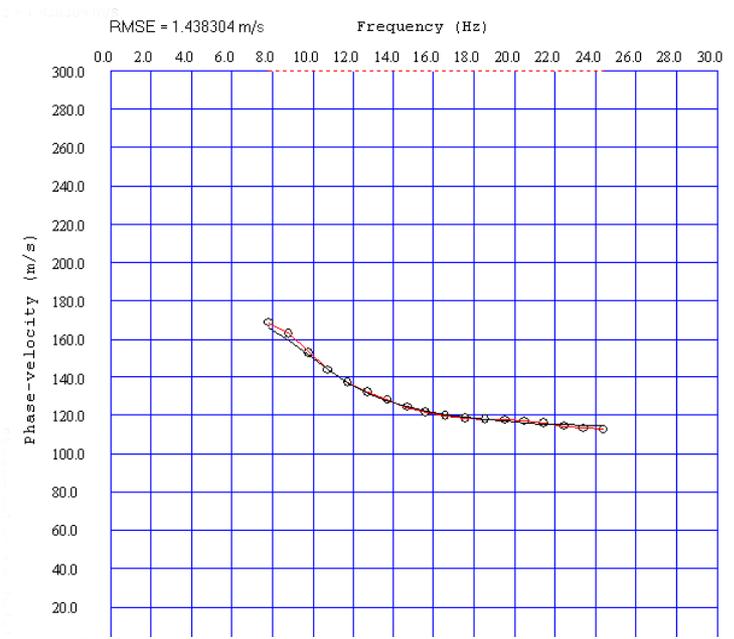
A técnica CPR tem como objetivo a melhoria da rigidez de solos moles.

Inicialmente são cravados geodrenos no terreno e, em seguida, são formadas colunas de adensamento via expansão de cavidades, formando bulbos no interior do solo

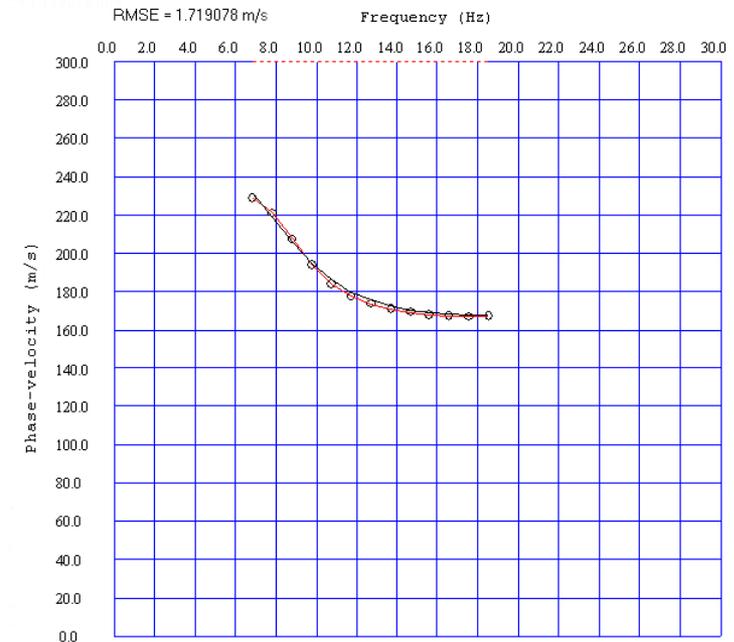
Estudo de caso: ampliação de pista na rodovia Anhanguera

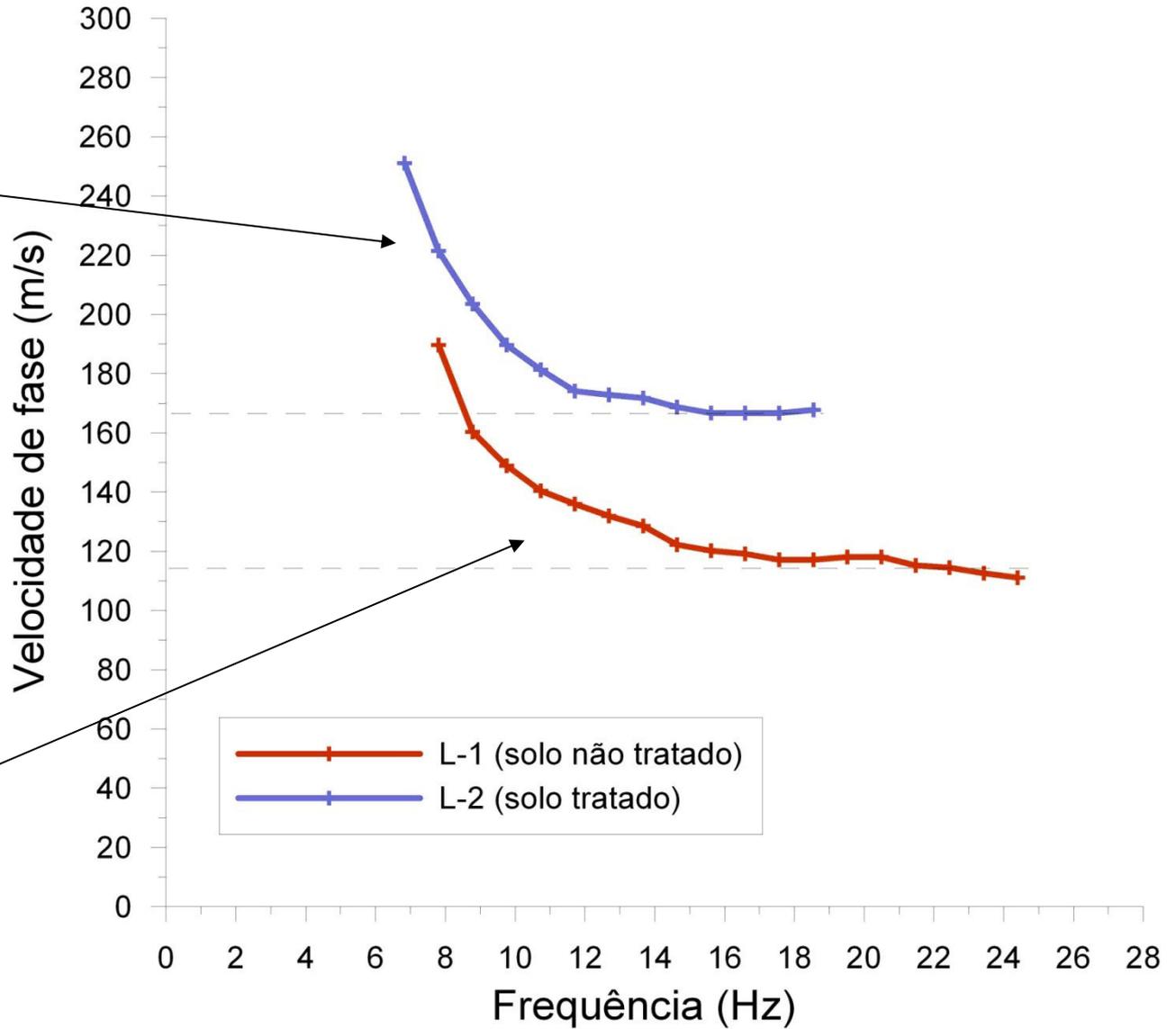
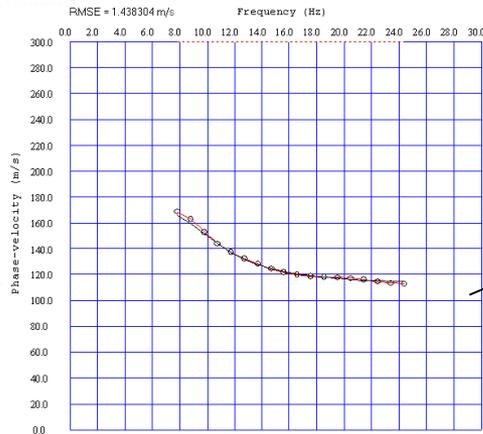
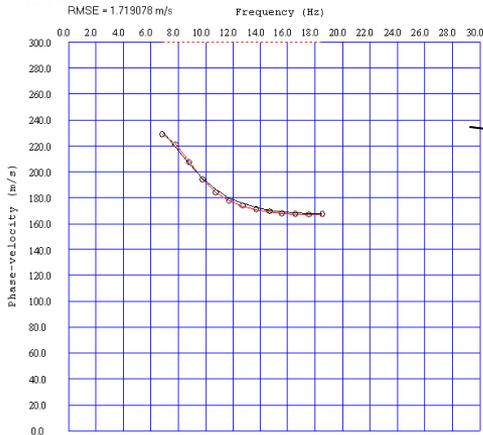


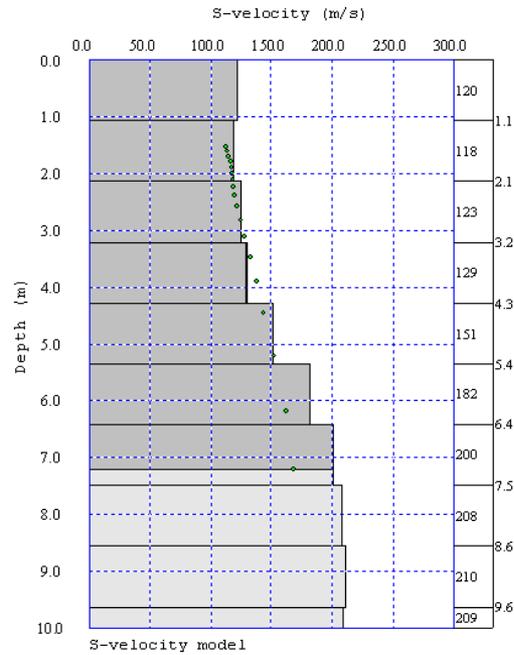
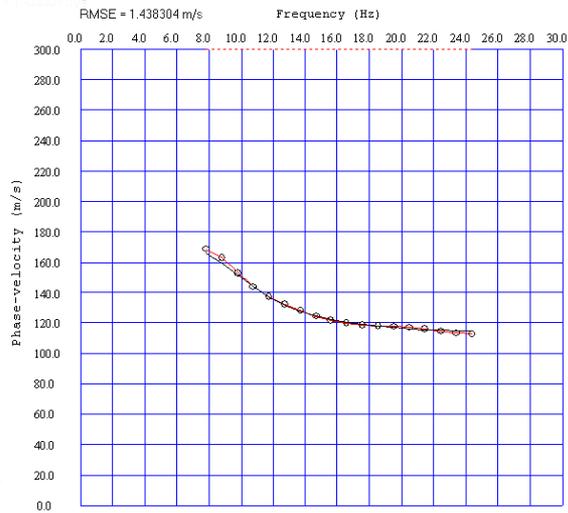
SOLO NÃO TRATADO



SOLO TRATADO

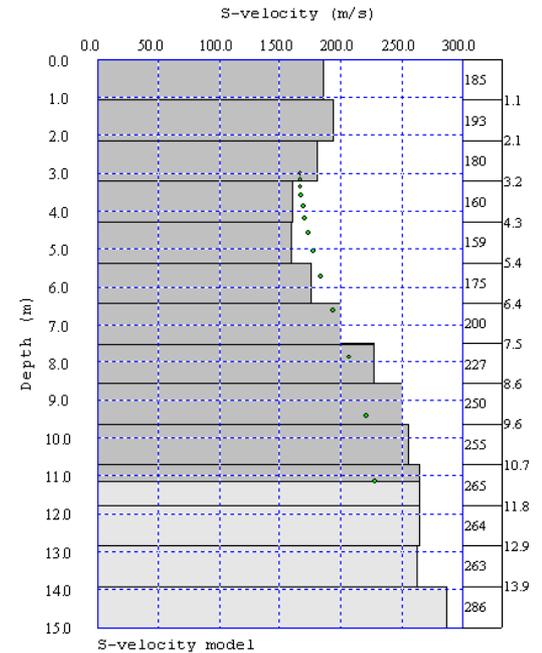
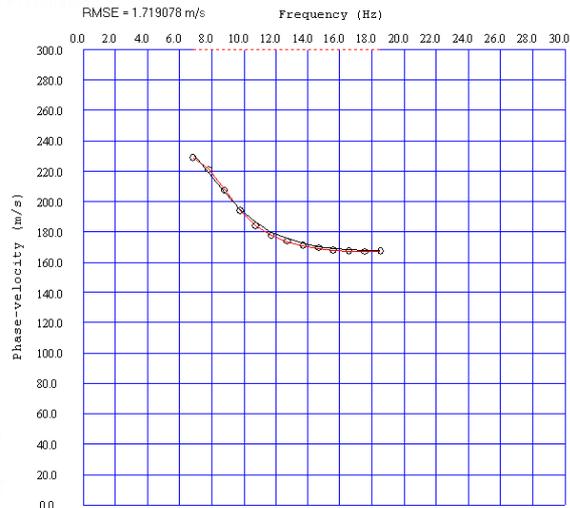




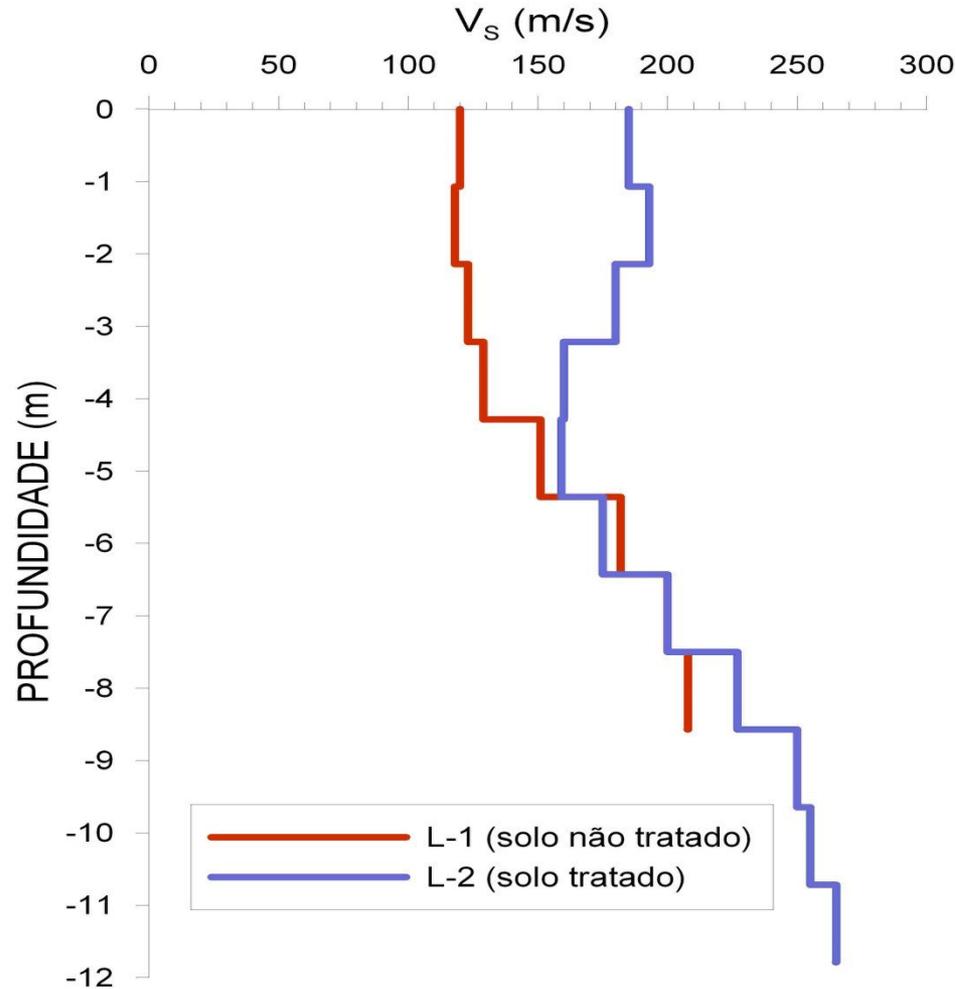


SOLO NÃO TRATADO

SOLO TRATADO



Modelos de V_s x profundidade das linhas L-1 e L-2

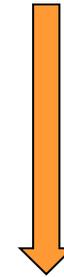


$$V_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}}$$

d_i = espessura da i -ésima camada (m)

V_{si} = velocidade da onda S na i -ésima camada (m/s)

i = índice que representa uma camada do modelo entre 1 e n



Valores médios de V_s (solo tratado e solo não tratado) obtidos dos ensaios MASW

Local	Descrição	V_s médio
L-1	solo não tratado (natural)	141 m/s
L-2	solo tratado	178 m/s

→ Aumento de 28%

MASW Control of Grouting

Alessandro Cirone* and Roger Rodrigues, Engegraut Ltda, and Choon Park, Park Seismic LLC

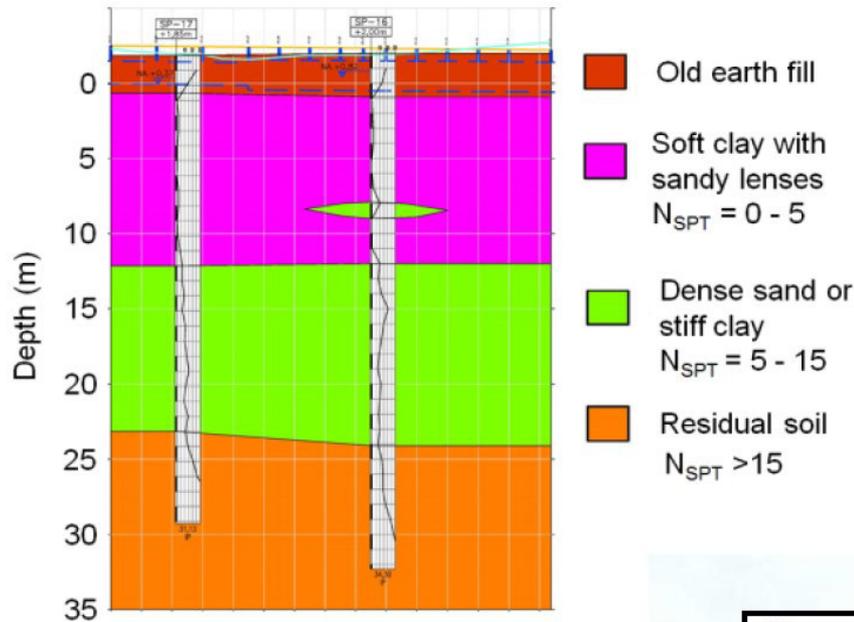


Figure 1. Generalized subsurface profile.

Local: área da Vila Olímpica nas obras para as Olimpíadas de 2016 no Rio de Janeiro-RJ



Figure 2. Grouting work in progress at Pontal Oceânico.



© 2017 SEG
SEG International Exposition and 87th Annual Meeting

MASW Control of Grouting

Alessandro Cirone and Roger Rodrigues, Engegraut Ltda, and Choon Park, Park Seismic LLC*

NÃO TRATADO
Linha 1

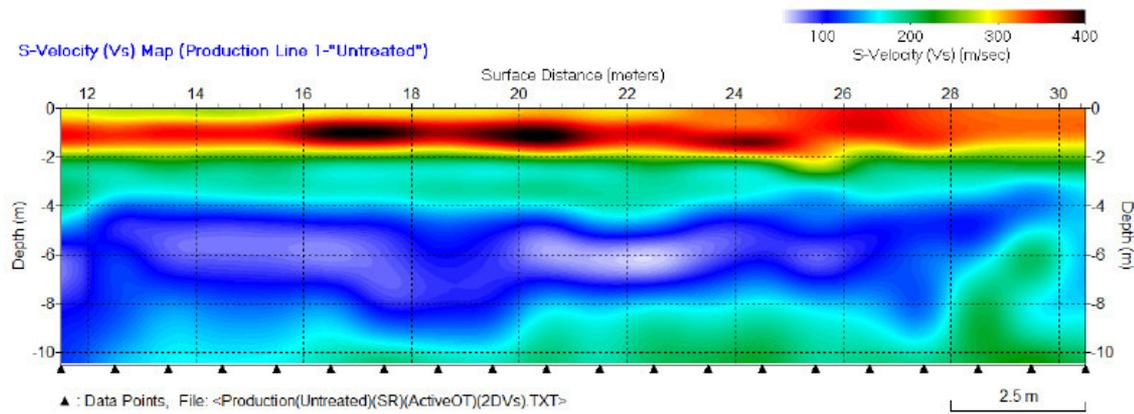


Figure 3. Velocity (Vs) map at Production Line 1 – untreated soil site.

TRATADO
Linha 3

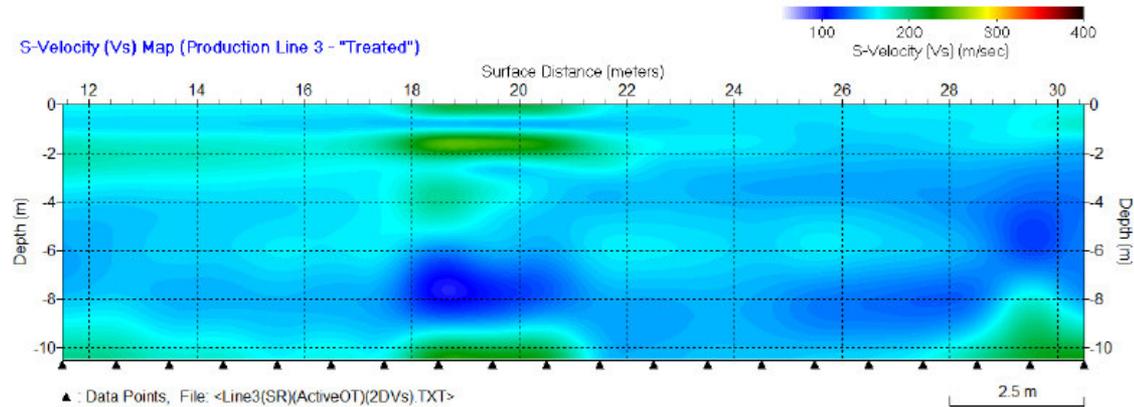


Figure 4. Velocity (Vs) map at Production Line 3 – improved (grouted) soil site.

DIFERENÇA
Linha 3 - Linha 1

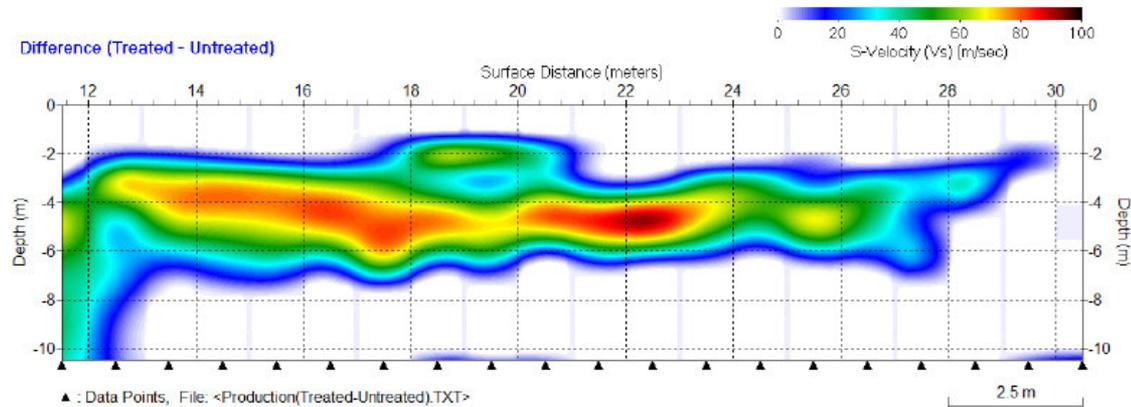


Figure 5. Velocity (Vs) difference map obtained by subtracting Line 1 from Line 3. A depth offset was applied to compensate difference in surface level between the two sites.

DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA DE ATERROS

Determinação da espessura do pacote de RSU sobre o solo de fundação
⇒ É uma informação é importante nos estudos de estabilidade do aterro



Fonte: <http://www.acaoengenharia.com.br>

Limitação ⇒ dificuldades de investigação direta (sondagem) sobre o aterro:
complexidade, riscos

Levantamento de campo: Itapira-SP

Geologia: solos residuais de gnaisses e migmatitos (siltes arenosos com coloração variegada)



Levantamento de campo: Itapira-SP



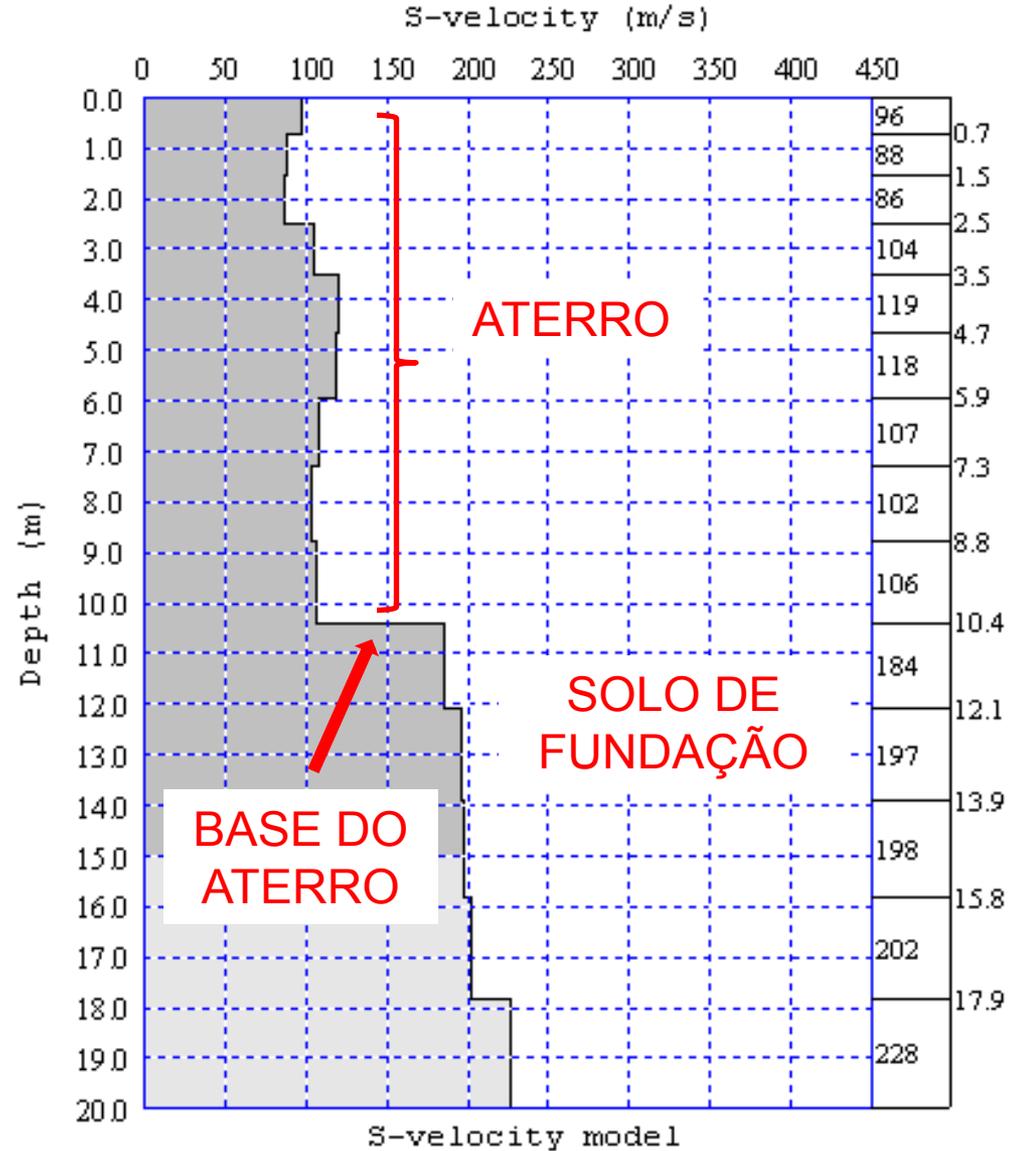
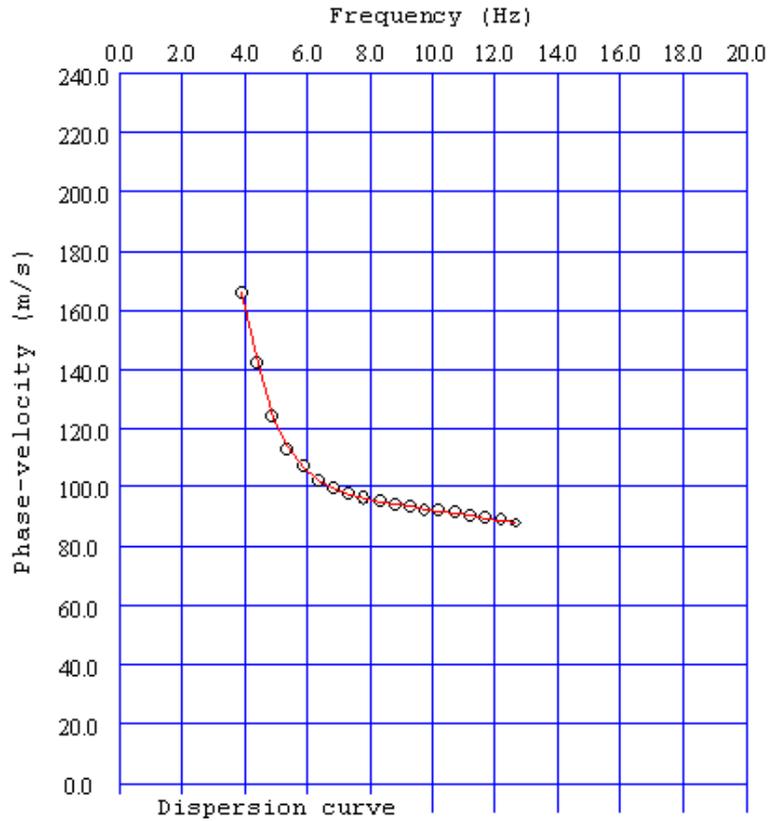
Linhas de MASW: realizadas sobre as bermas do aterro

Levantamento de campo: Itapira-SP



Resultados

Curva de dispersão

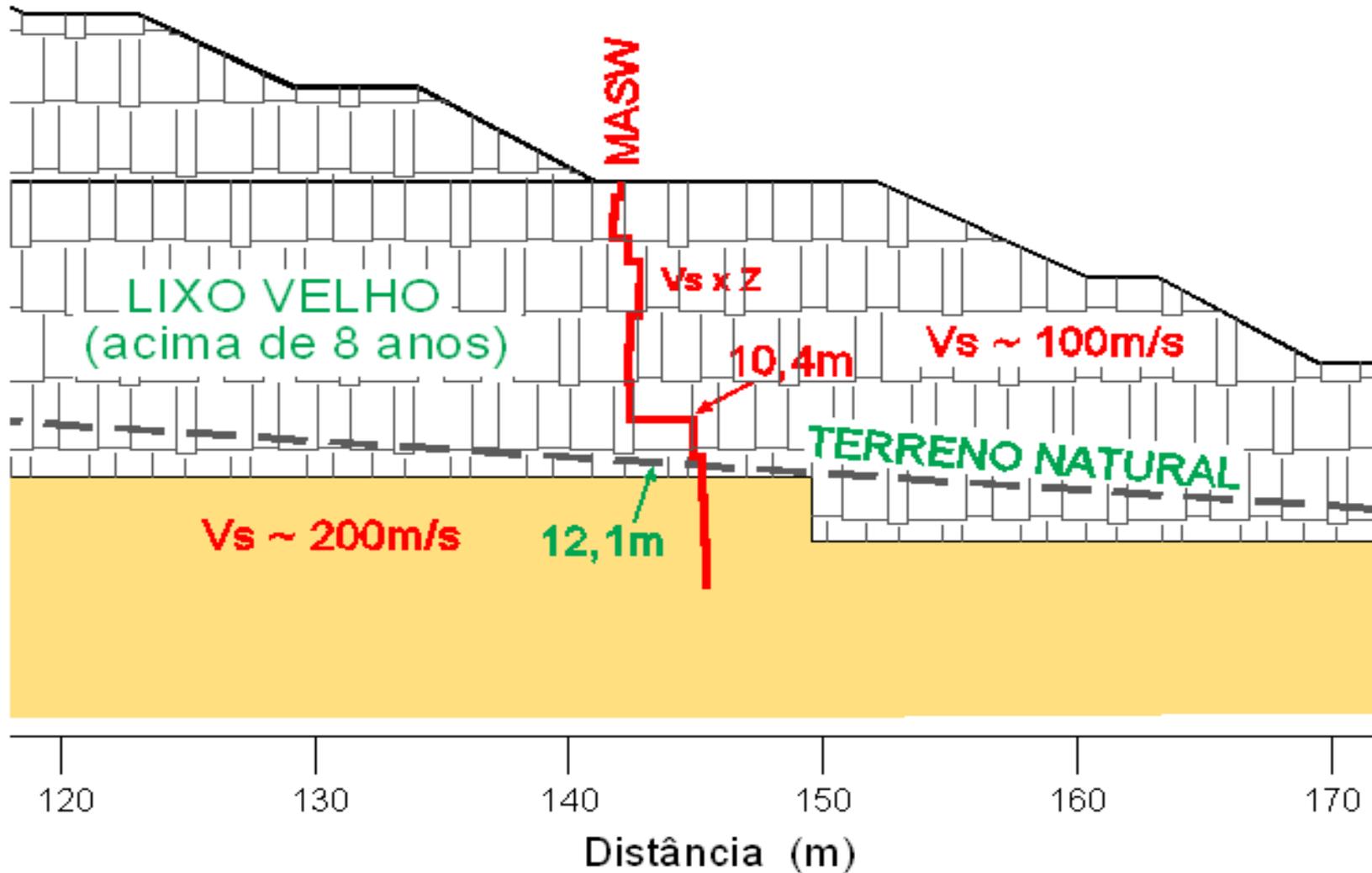


Modelo V_S x profundidade

Resultados

Espessura do aterro de RSU

estimativa da engenharia = **12,1m**
modelo $V_s \times Z$ (MASW) = **10,4m**



Obras de ampliação do Aeroporto de Goiânia - GO



Aeroporto de Goiânia





⇒ Possível inversão de velocidade, $V_2 < V_1$:

Sísmica de Refração / MASW

Contudo, a Sísmica de Refração (onda P e S) foi utilizada para obter informações das propriedades da 1ª camada (aterro)

Equipamento

- Sismógrafo Geode (Geometrics): 24 e 48 canais
- Geofones de componente vertical (4,5 Hz)
- Geofones de componente horizontal (28 Hz) geophones
- Fonte sísmica: marreta

Sísmica de Refração & MASW: os dados foram adquiridos utilizando-se o mesmo arranjo de campo

Parâmetros de campo

Sísmica de Refração

- ✓ 24 geofones
- ✓ Intervalo entre geofones = 0,5 m (comprimento do arranjo = 11 m)
- ✓ 1 tiro por arranjo (assumiu-se refratores planos e sem mergulho)

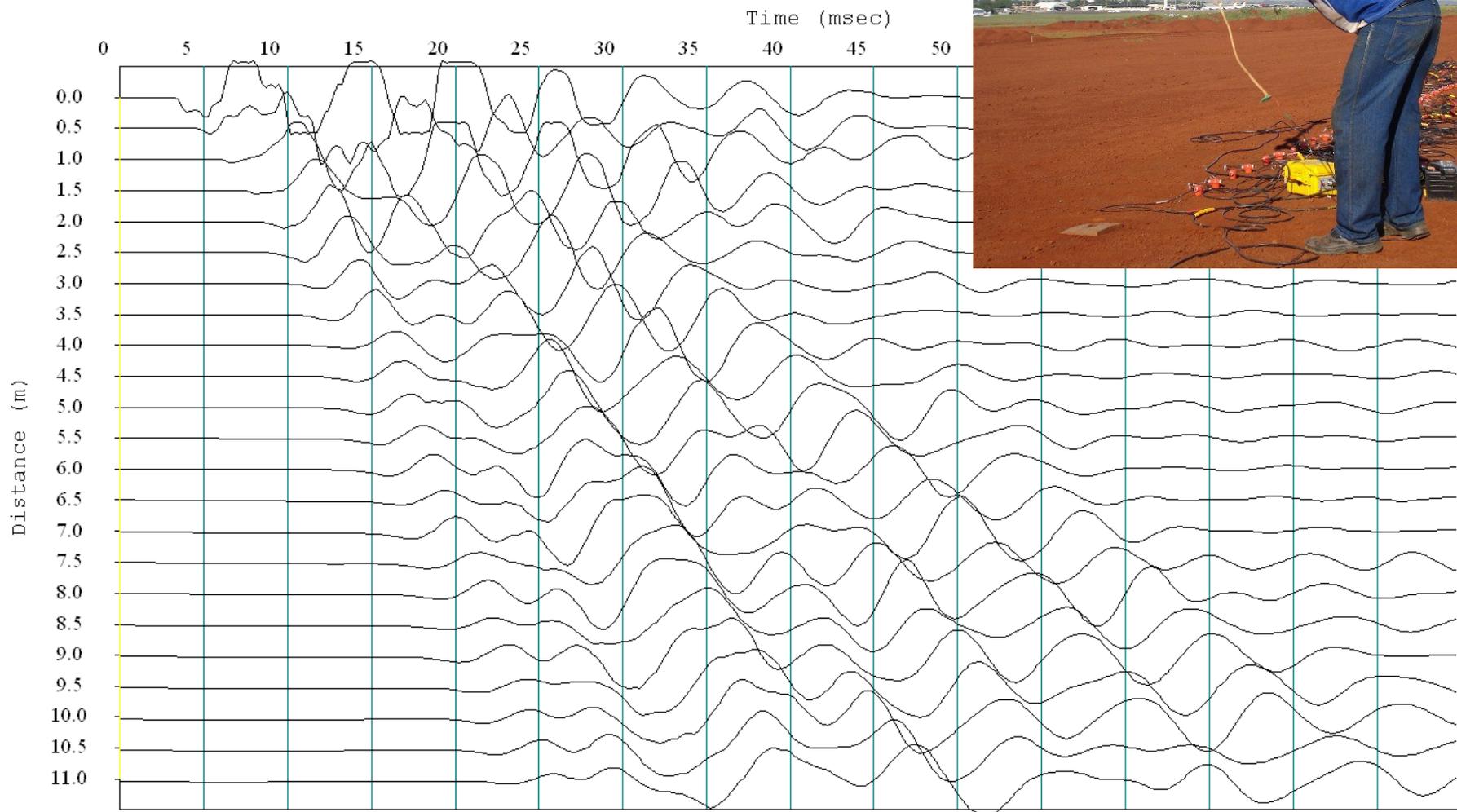
Parâmetros de campo

MASW (parâmetros de campo)

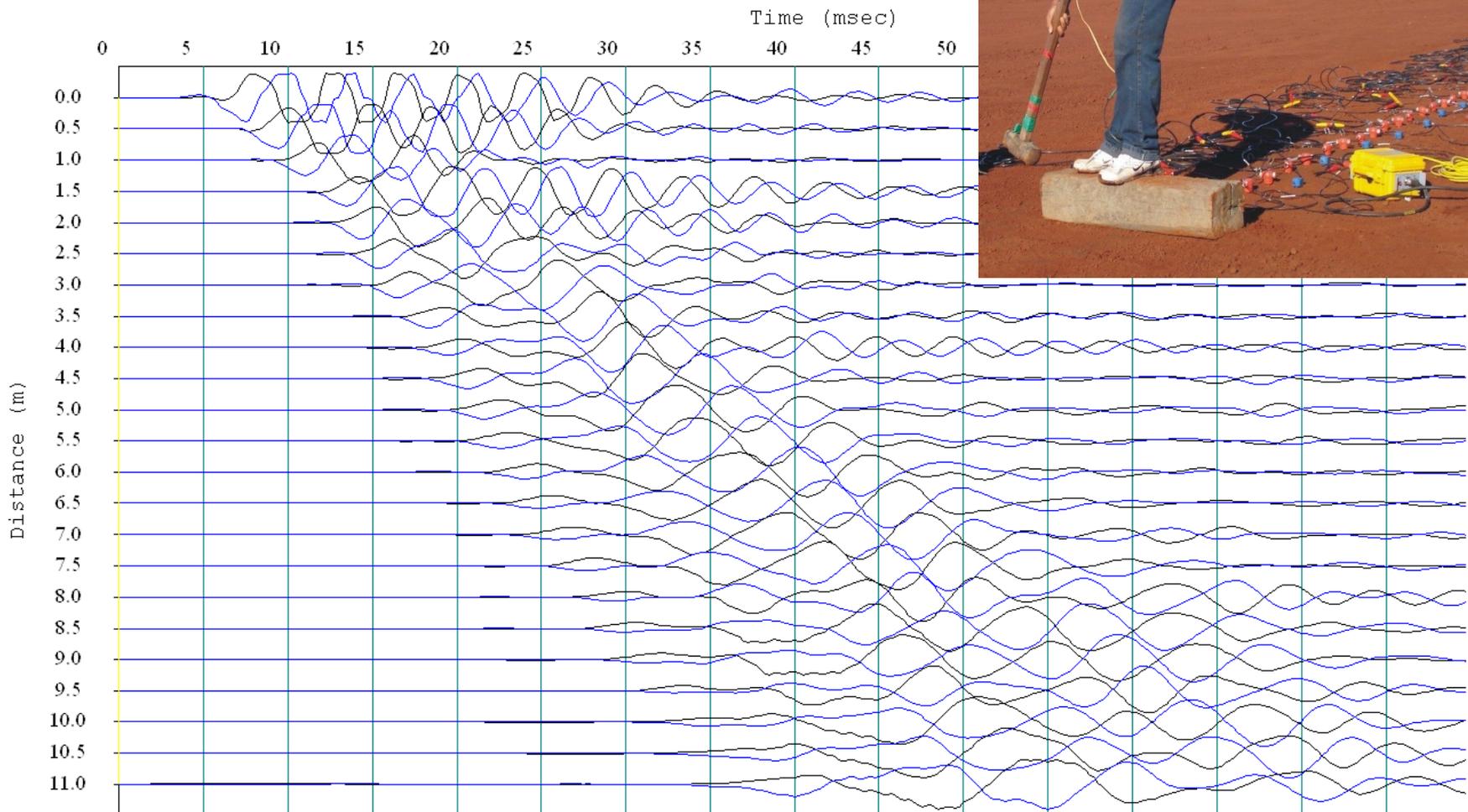
- ✓ 48 geofones
- ✓ Intervalo entre geofones = 0,5 m e 0,25 m
- ✓ Investigação alcançando em torno de 5 m de profundidade



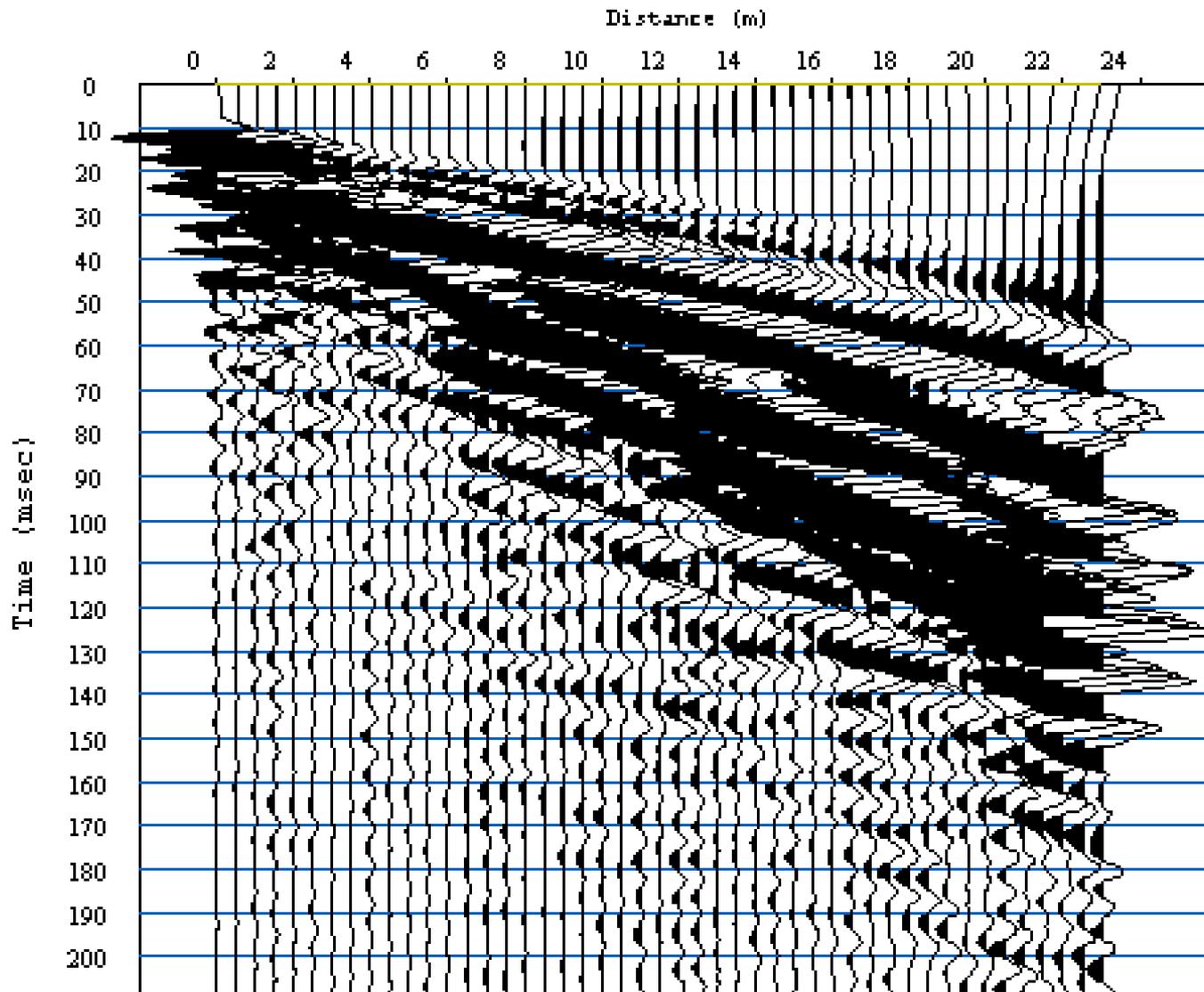
Sismograma obtido com a onda P (3 stacks)



Sismograma obtido com a onda S (2 stacks)



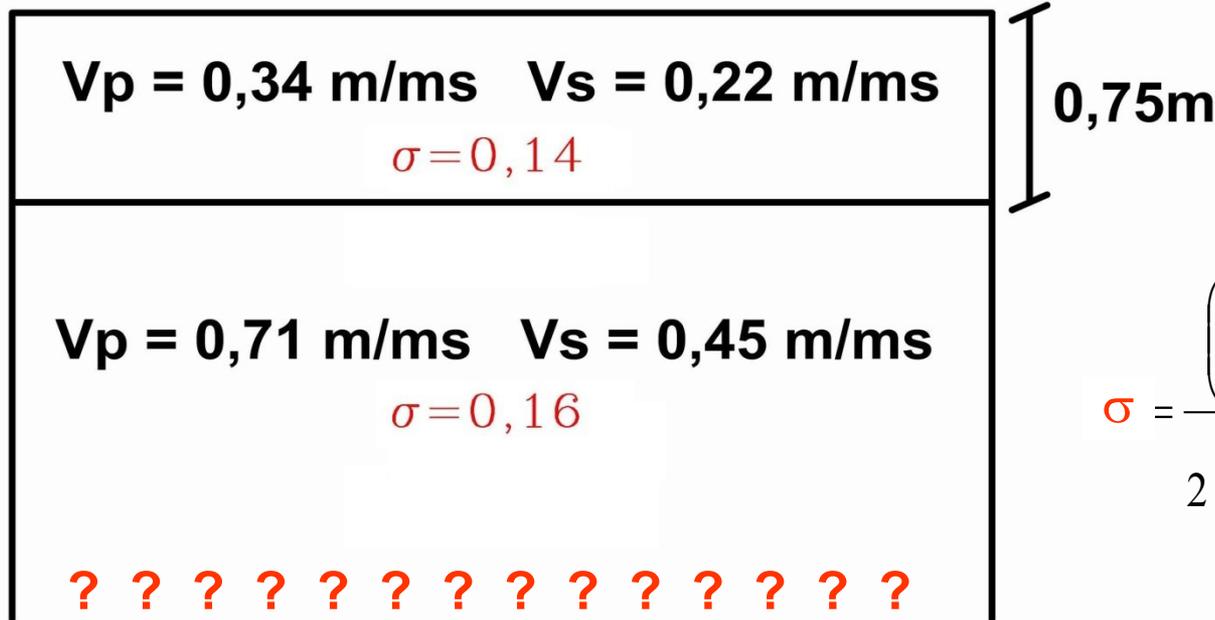
MASW



Sismograma obtido no levantamento
MASW (3 stacks), offset=3m

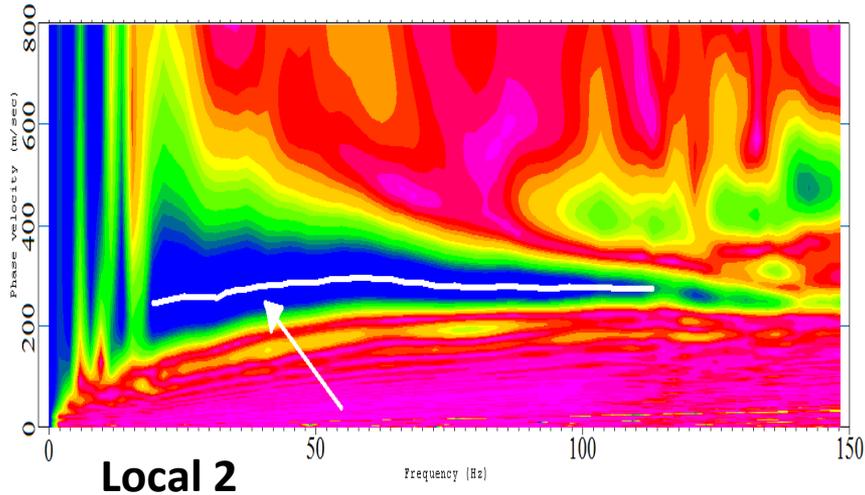
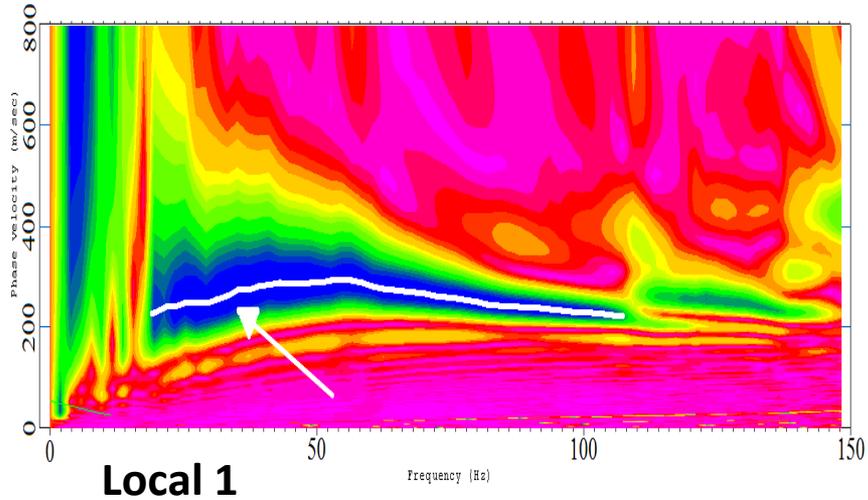
Modelo obtido da Sísmica de Refração (onda P e S)

Two-layer model



$$\sigma = \frac{\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2}{2 \cdot \left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2} = \frac{(V_P^2 - 2 \cdot V_S^2)}{2 \cdot (V_P^2 - V_S^2)}$$

Resultados dos ensaios de MASW



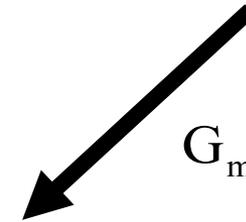
PROCEDIMENTOS
MATEMÁTICOS DE
INVERSÃO DOS
DADOS



CURVA

V_s
X

PROFUNDIDADE



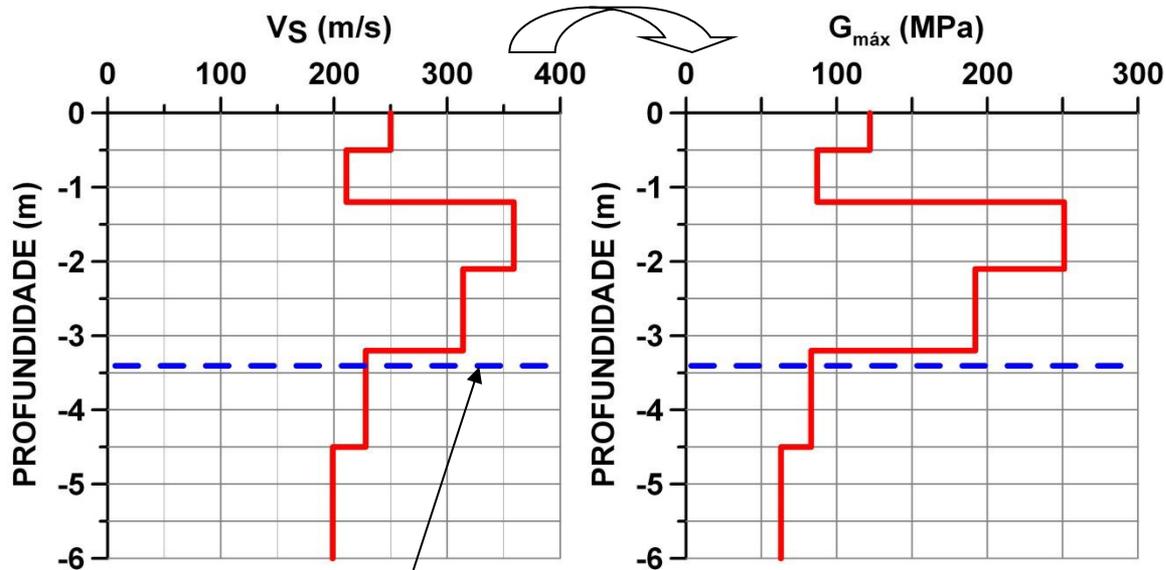
$$G_{\text{máx}} = \rho \cdot V_s^2$$

CURVA

$G_{\text{MÁX}}$
X

PROFUNDIDADE

$$G_{\text{máx}} = \rho \cdot V_S^2$$



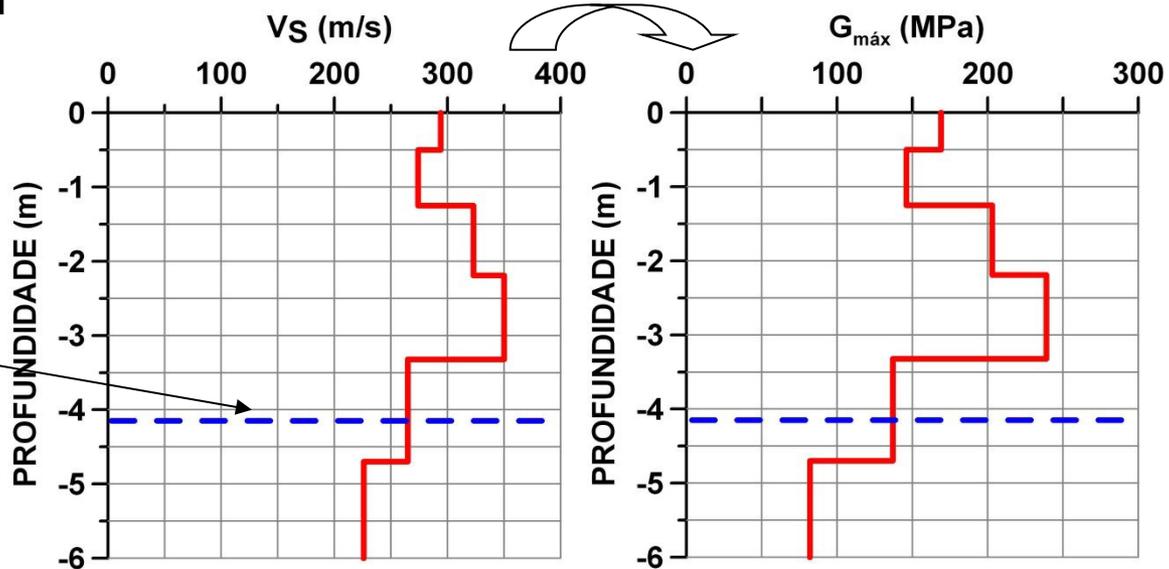
OBS.

$\rho = 1.950 \text{ kg/m}^3$ (aterro compactado)

e

$\rho = 1.600 \text{ kg/m}^3$ (terreno natural)

$$G_{\text{máx}} = \rho \cdot V_S^2$$



posição do contato
aterro – solo natural
estimada dos ensaios
CPT

Análise integrada dos dados CPT e MASW

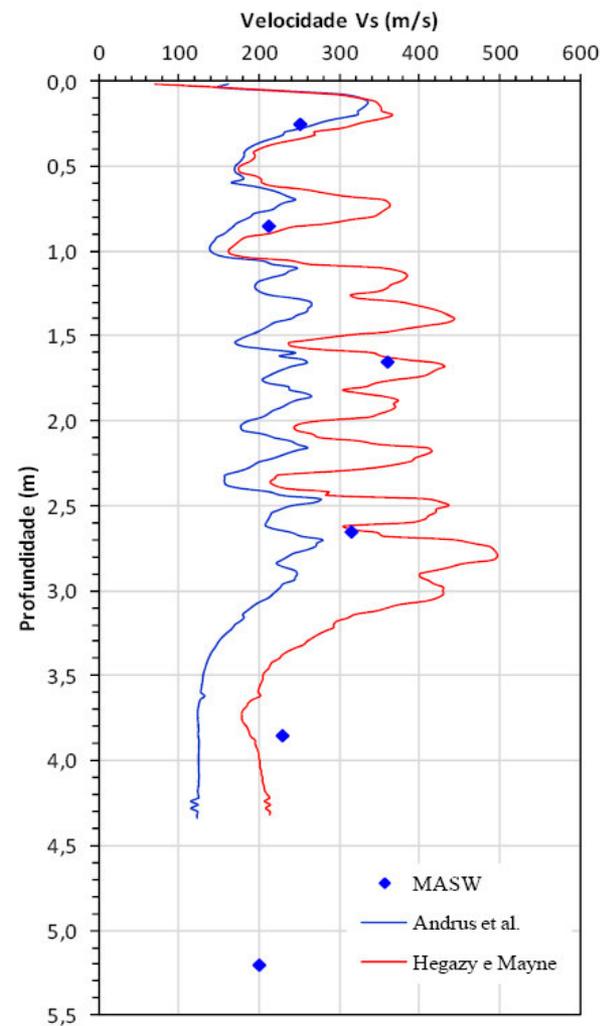
Hegazy e Mayne (1995):
$$V_s = [10,1 \log(q_t) - 11,4]^{1,67} \left(\frac{f_s}{q_t} 100 \right)$$

Andrus et al. (2007):
$$V_s = A Q_t^B I_c^C \frac{\sigma'_{v0}}{P_{atm}}$$

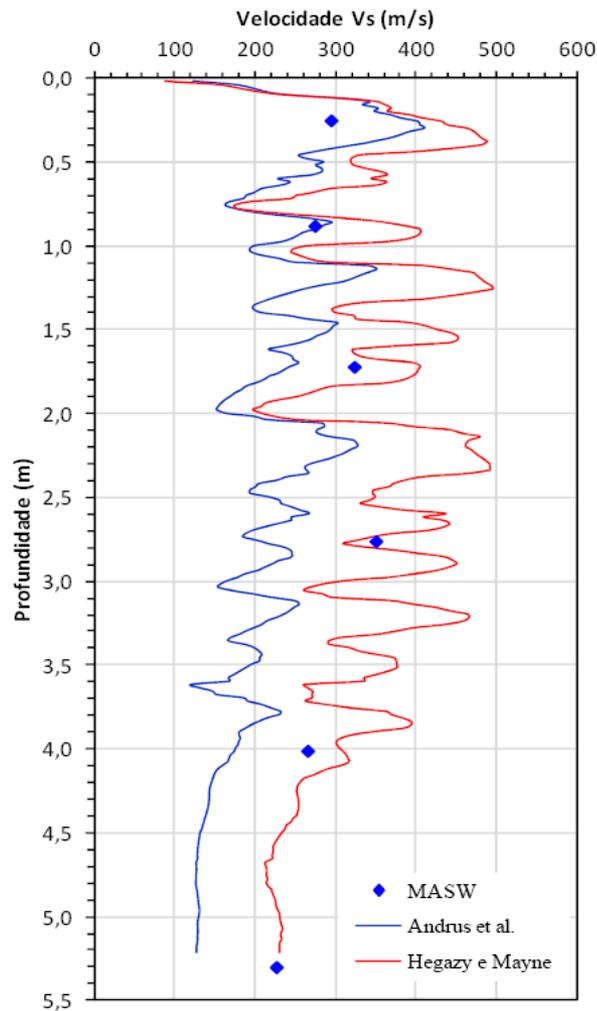
Foram feitas estimativas de V_s a partir das equações nos dois locais ensaiados

Análise integrada dos dados CPT e MASW

Comparação entre os valores previstos de V_s a partir do CPT e valores determinados nos ensaios MASW



Local 1



Local 2

✓ os valores obtidos neste estudo se encontram mais próximos dos resultantes da correlação de Hegazy e Mayne