

Nº 180166

A geofísica conversando com a geotecnia

Otávio Coaracy Brasil Gondolfo

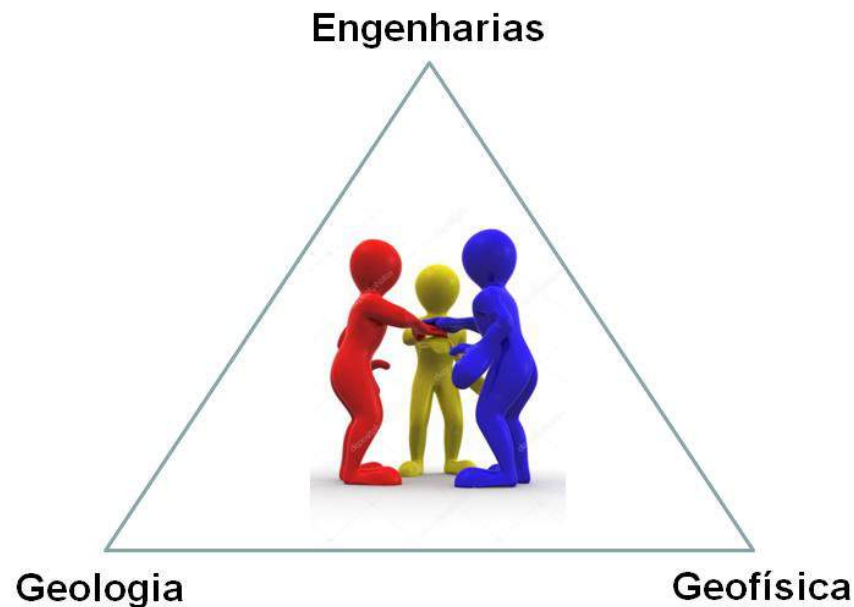
*Palestra apresentado no
GEONORTE, 2026, Umarizal,
PA. 35 slides.*

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.

PROIBIDO REPRODUÇÃO



A Geofísica conversando com a Geotecnia



15 de abril de 2026

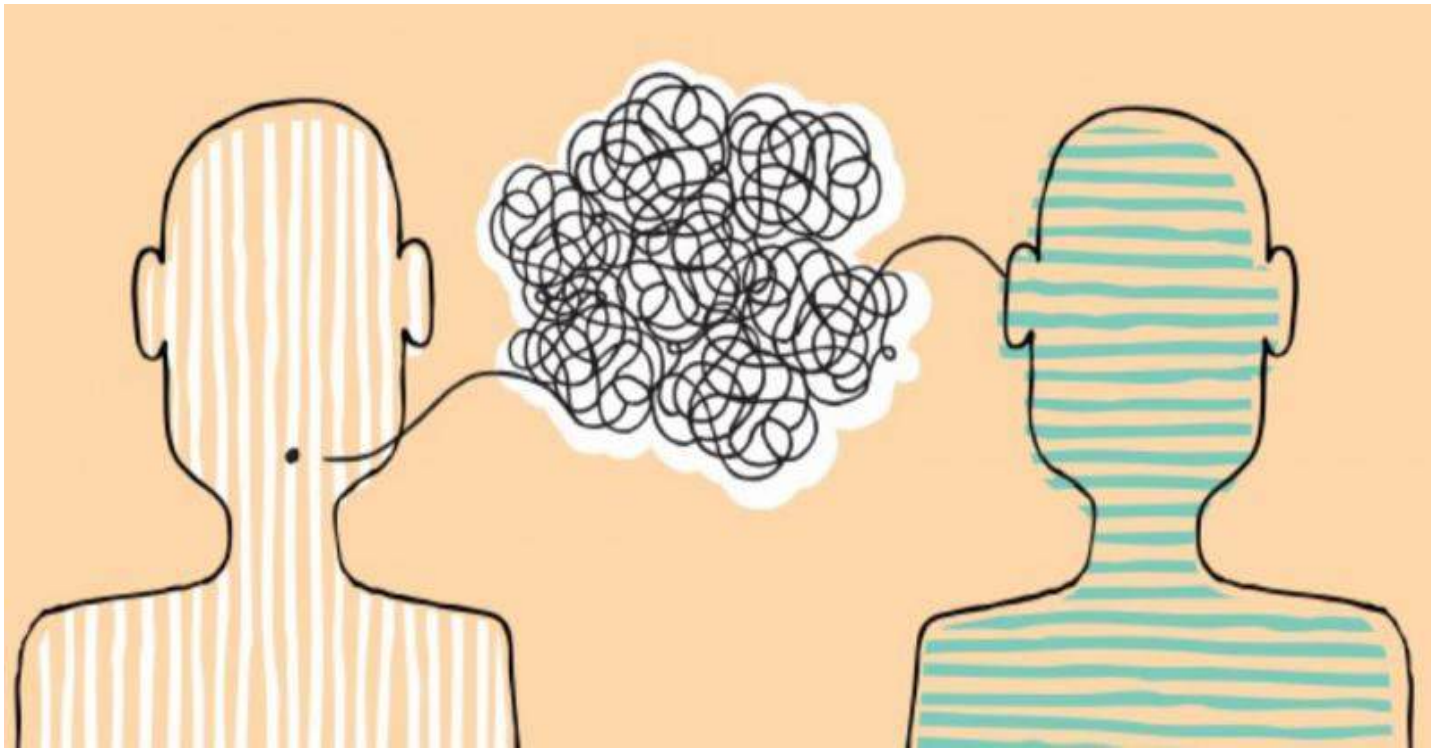
Otávio Coaracy Brasil Gandolfo - IPT

gandolfo@ipt.br

ipt INSTITUTO DE
PESQUISAS
TECNOLÓGICAS

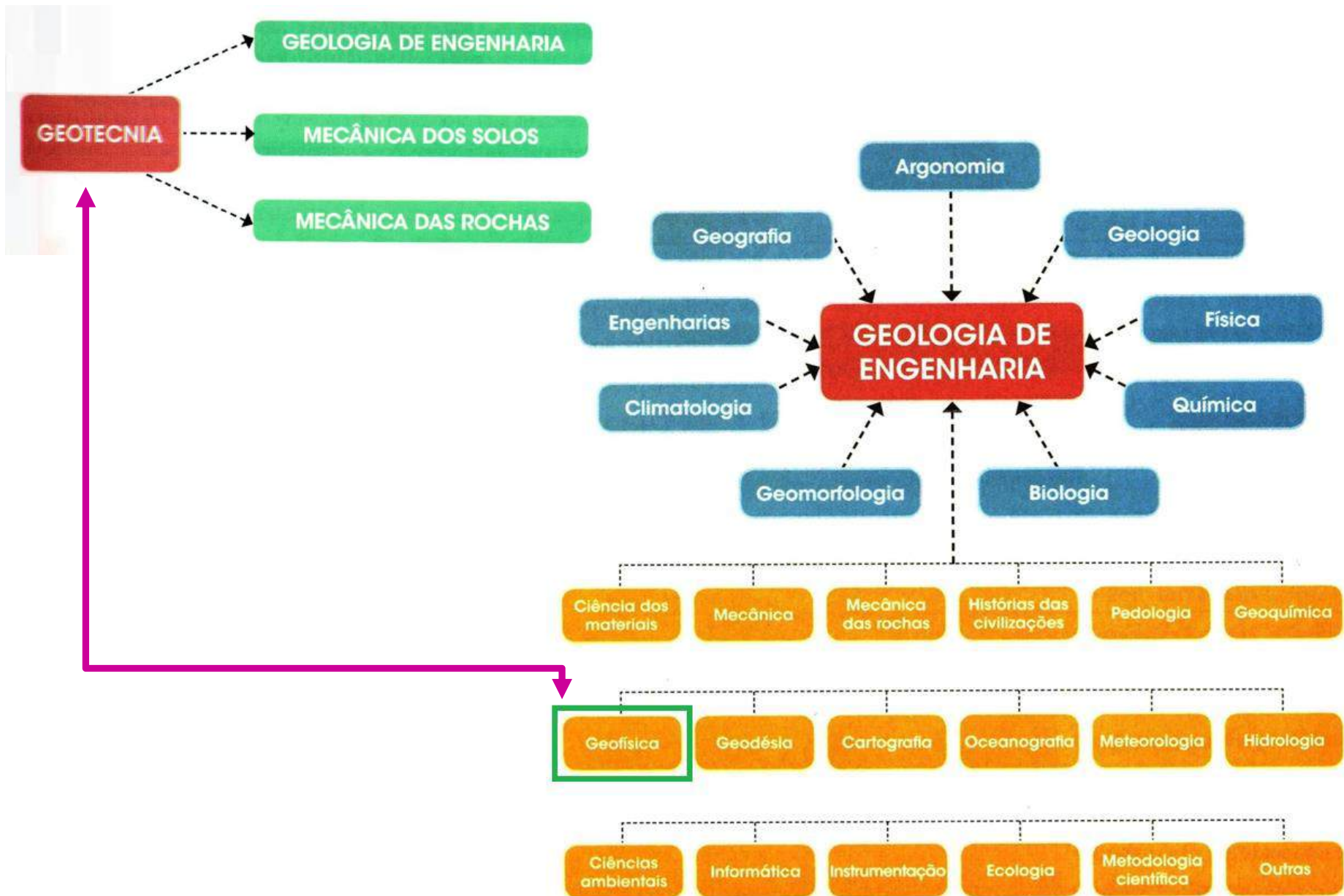
S **SÃO PAULO**
GOVERNO
DO ESTADO

O parâmetro geofísico (ex. resistividade elétrica, velocidade de propagação de uma onda sísmica) deve ser “traduzido” em grandeza geotécnica (saturação, permeabilidade, rigidez, etc.), em uma **linguagem compreensível para o engenheiro / geólogo**



Geofísico

Engenheiro / Geólogo



Uma ótima definição de Geofísica Aplicada

“A geofísica aplicada envolve a aplicação quase impossível da física clássica à Terra heterogênea e indócil, com um propósito prático em mente: o que se quer é o acoplamento entre a distribuição geológica, propriedades físicas e observações factíveis, governadas pela física clássica de um modo de complexidade além da sua aplicação normal”

(Backus, 1952)

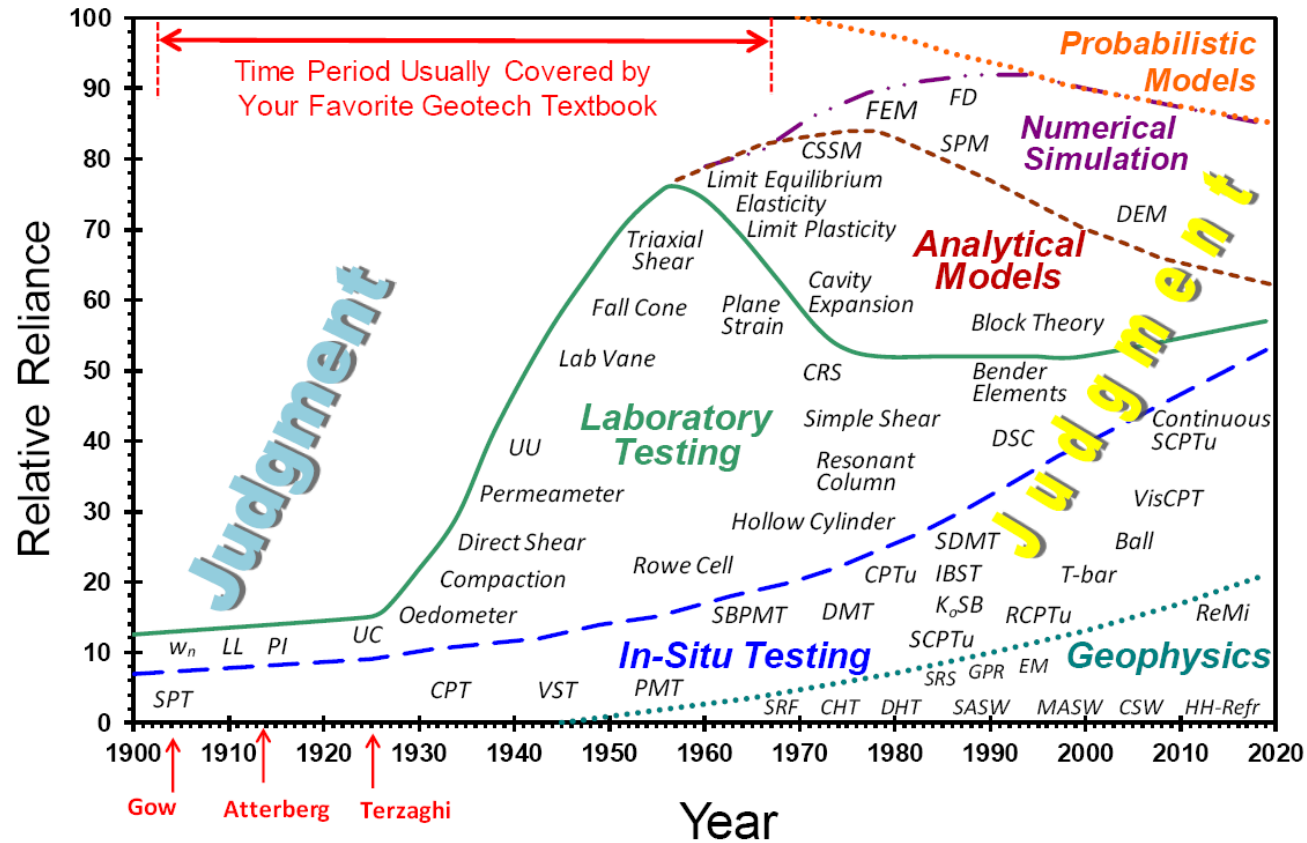


FIG. 1. Evolution of geotechnical information for design basis
(adapted from Lacasse 1985)



Dr. Paul W. Mayne

Professor
School of Civil and Environmental
Engineering
[Geosystems Group](#)

Georgia Institute of Technology
Atlanta, Georgia 30332-0355 USA

Balanced Approach to Geocharacterization

In-Situ



Laboratory



Geophysics

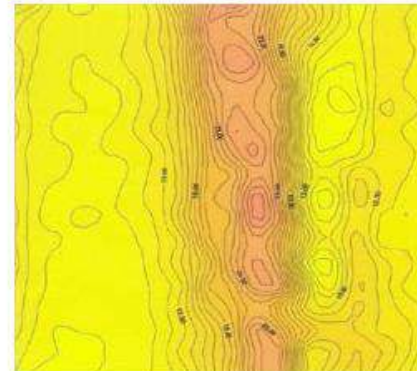
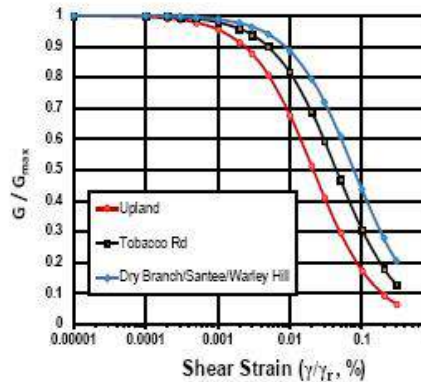
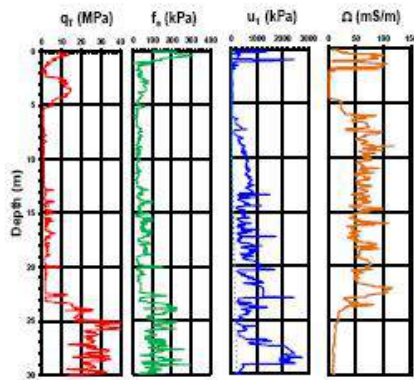


FIG. 6. Recommended balance of in-situ, laboratory, and geophysical testing for coverage in the introductory geotechnical course.

● Geophysics in Geotechnical Engineering

- New Synergies between geophysical and geotechnical tests
- Seismic measurements
- Electromagnetics, Georadar
- Geoelectric tests

Conference topics

● Equipment, Measuring Techniques, Sampling

- Drilling & sampling methods for soils and rock
- Sample quality
- Laboratory testing
- Penetration testing (CPT, SPT, DMT, PMT, etc.)
- Geophysical testing
- Tooling for extreme environments (e.g. acid mines, arctic, deep ocean)
- Environmental measurements

● Mechanical Testing (CPT, SPT, DMT, PMT, VST, PLT)

- Interpretation of test results
- Correlations to estimate engineering properties
- Dissipation tests

● Geophysics in Geotechnical Engineering

- New Synergies between geophysical and geotechnical tests
- Seismic measurements
- Electromagnetics, Georadar
- Geoelectric tests



6TH INTERNATIONAL
CONFERENCE
ON GEOTECHNICAL
AND GEOPHYSICAL SITE
CHARACTERISATION

Website

<http://www.isc6.org>

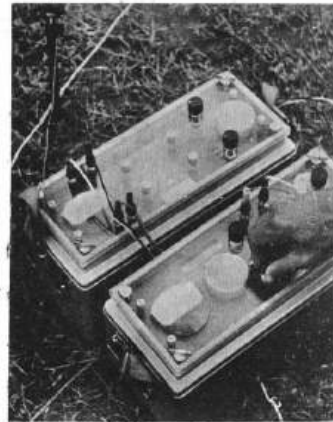
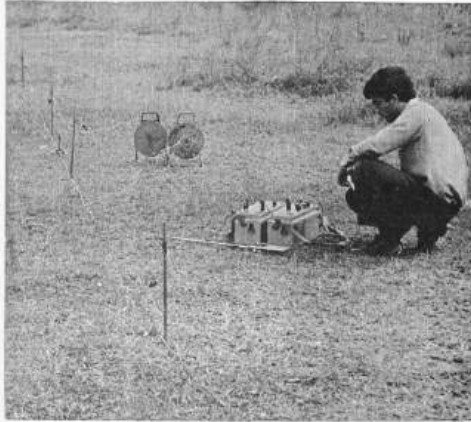
Email

Métodos Geofísicos para Geotecnia

- Métodos sísmicos - Refração, MASW, ensaios em furos (*crosshole* e *downhole*)
- Eletrorresistividade
 - GPR, Potencial Espontâneo, Magnetometria, Perfilagem de Poços
 - Outros

GEOLOGIA APLICADA À ENGENHARIA MECÂNICA DAS ROCHAS GEOTECNIA

- INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICAS PARA BARRAGENS, TÚNEIS, ESTRADAS E OBRAS ESPECIAIS.
- PROSPECÇÃO GEOFÍSICA PELOS MÉTODOS SÍSMICO E ELETRORRESISTIVIDADE.
- SONDAJENS ESPECIAIS PARA RECONHECIMENTO TOTAL DO SUB-SOLO.
- MEDIDA COM TRO-PARI DA ATITUDE REAL (RUMO E INCLINAÇÃO) DA SONDAGEM.
- EXTRAÇÃO DE TESTEMUNHOS ORIENTADOS.
- PROSPECÇÃO DE MATERIAIS NATURAIS DE CONSTRUÇÃO E ENSAIOS TECNOLÓGICOS EM AGREGADOS.
- ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES E TRIAXIAL EM ROCHA, A ALTAS PRESSÕES.
- DETERMINAÇÃO DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO.
- ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO "IN SITU" E ADERÊNCIA CONCRETO-ROCHA.
- ENSAIOS COM PRESSIÔMETRO (25 ATM.) EM FUROS DE SONDAGEM: DEFORMABILIDADE, CAPACIDADE DE CARGA E RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO.
- DETERMINAÇÃO DAS VIBRAÇÕES DE DETONAÇÃO PREJUDICIAIS ÀS ESTRUTURAS.
- INVESTIGAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES E CORTES EM SOLO E ROCHA.
- ESTUDO DE ESTABILIDADE DE OBRAS SUBTERRÂNEAS E DE MINAS A CÉU ABERTO.



SONDAGEM ELÉTRICA COM EQUIPAMENTO TERRAMETER AC. (ABEM)

GEOTÉCNICA S.A.
ENGENHEIROS CONSULTORES
AV. PAULISTA 688, 17º AND., TEL. 287-3411, S. PAULO
RIO DE JANEIRO - S. PAULO - BELO HORIZONTE - SALVADOR - BRASÍLIA

ALÉM DESTES, OUTROS PROBLEMAS DE GEOLOGIA APLICADA E ENGENHARIA CIVIL SÃO MAIS FÁCILMENTE RESOLVIDOS COM SÍSMICA E RESISTIVIDADE.

A PANAMBRA POSSUI COMPLETA LINHA DE EQUIPAMENTOS DE GEOFÍSICA. PEÇA INFORMAÇÕES E FOLHETOS.

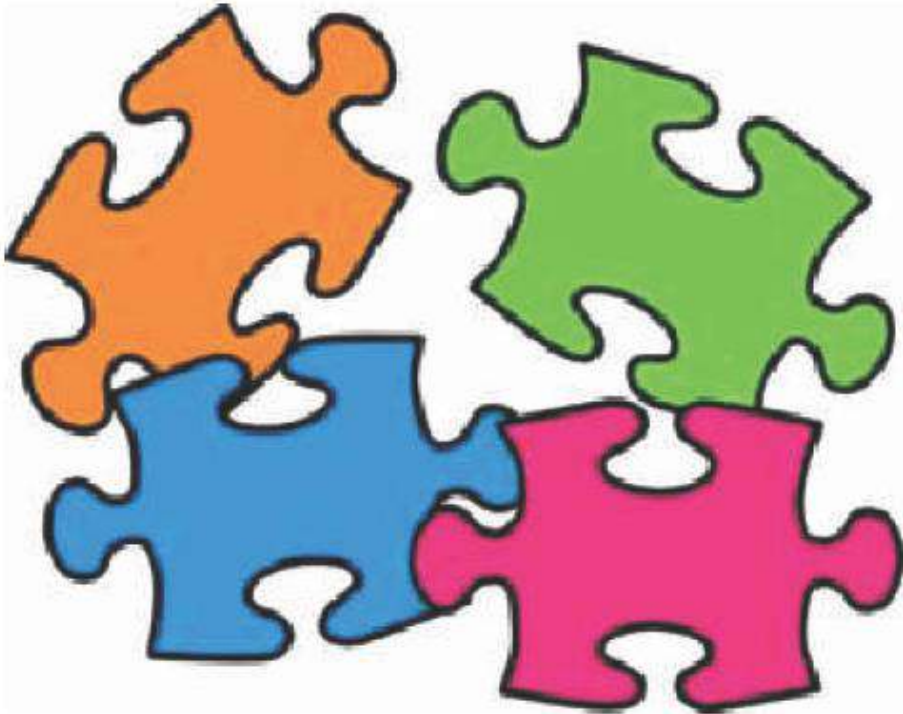
FILIAIS EM
BELO HORIZONTE - CURITIBA - PORTO ALEGRE - RECIFE - R. DE JANEIRO

PANAMBRA

SÃO PAULO
Av. Senador Góes, 150
Telefones: "Ponte"
Ponte: 257-6722 - 257-5042 PABX
Telex: (021) 661 - (021) 608
Pombal: 370
Caixa Postal: 5034

Os materiais geológicos apresentam variações tanto nas propriedades mecânicas e como nas eletromagnéticas

⇒ Resultados mais assertivos na investigação de uma área são obtidos quando são utilizados 2 (ou mais) métodos geofísicos de maneira conjunta e integrada



Which is the right geophysical tool?

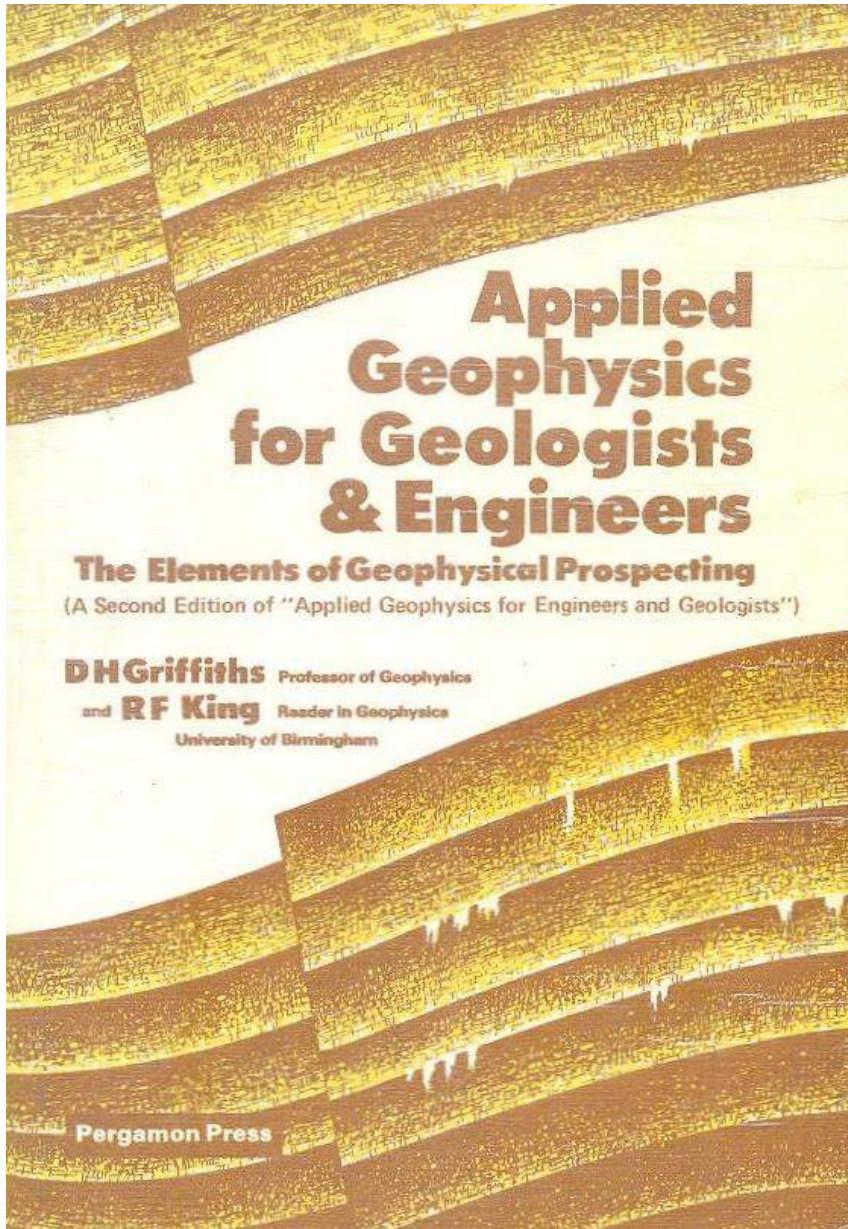
We solve the puzzle for you.
Choose the right
'combination' of geophysical
tools

GEOFÍSICA & MEDICINA



RX → distingue a parte dura (ossos) da parte mole (tecidos) do corpo

RM → permite visualizar melhor o contraste entre as partes moles do corpo



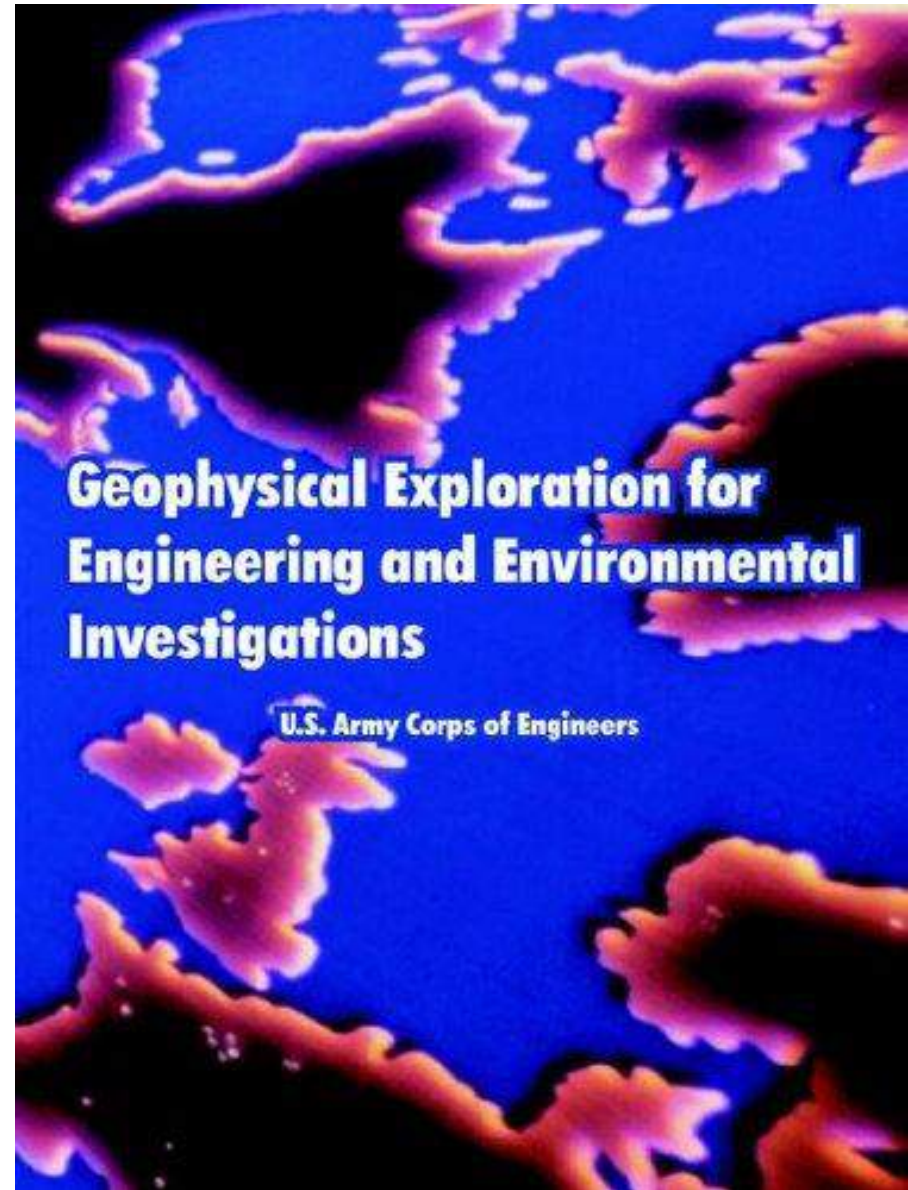
Applied Geophysics for Geologists & Engineers

The Elements of Geophysical Prospecting
(A Second Edition of "Applied Geophysics for Engineers and Geologists")

DH Griffiths Professor of Geophysics
and **RF King** Reader in Geophysics
University of Birmingham

Pergamon Press

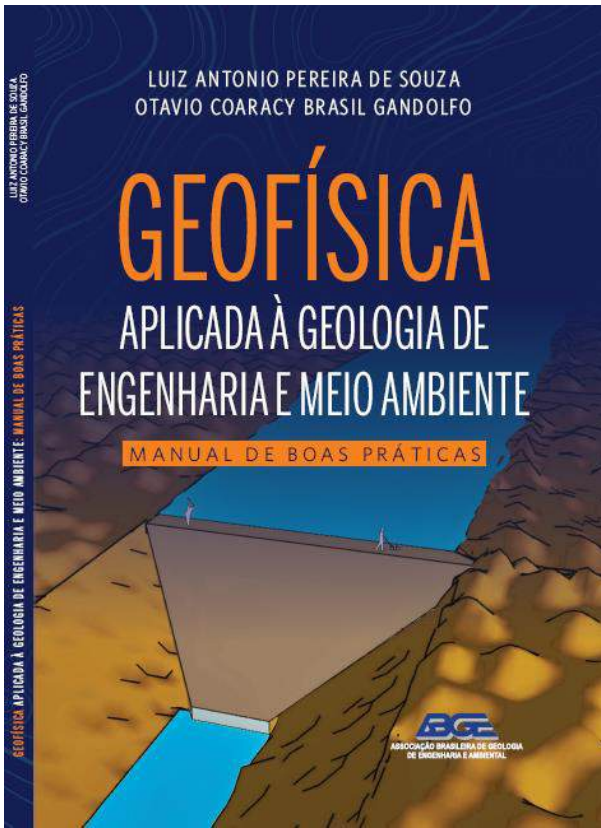
1983



Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations

U.S. Army Corps of Engineers

1995



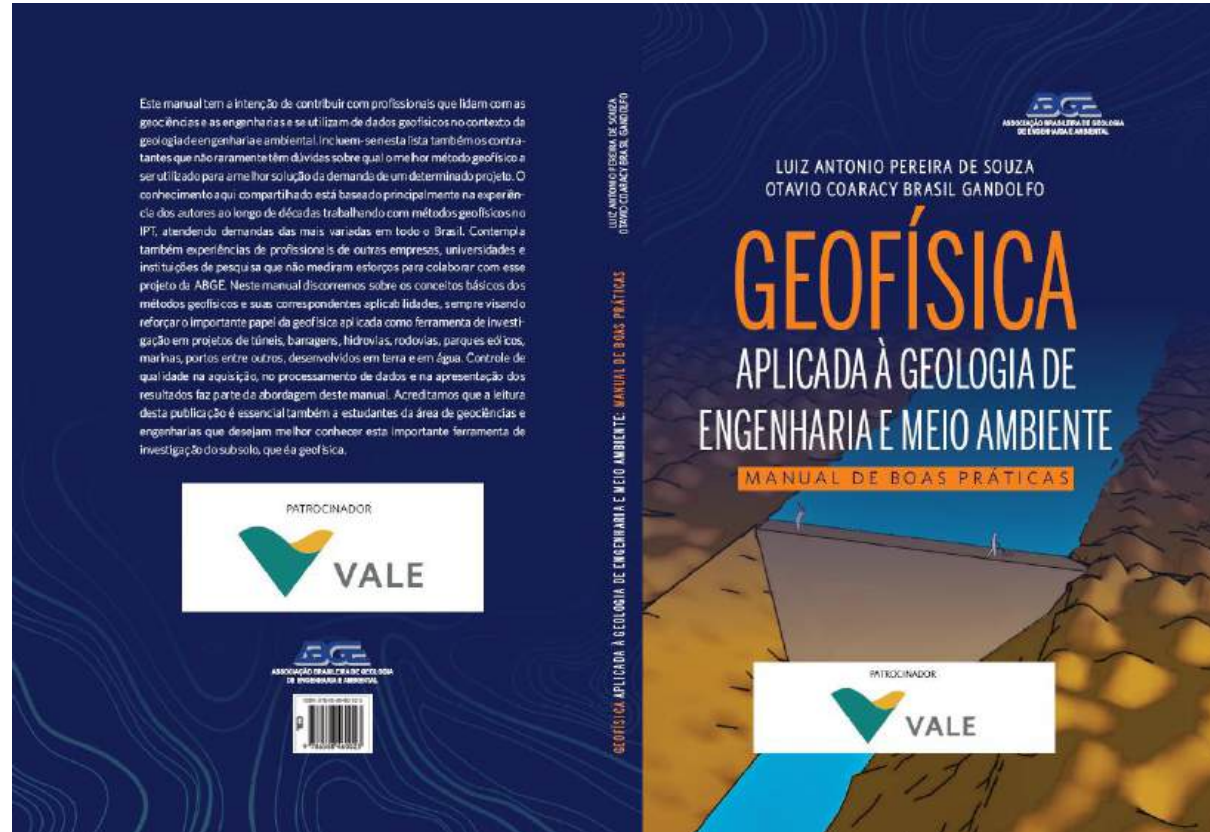
2021
(1ª Edição)



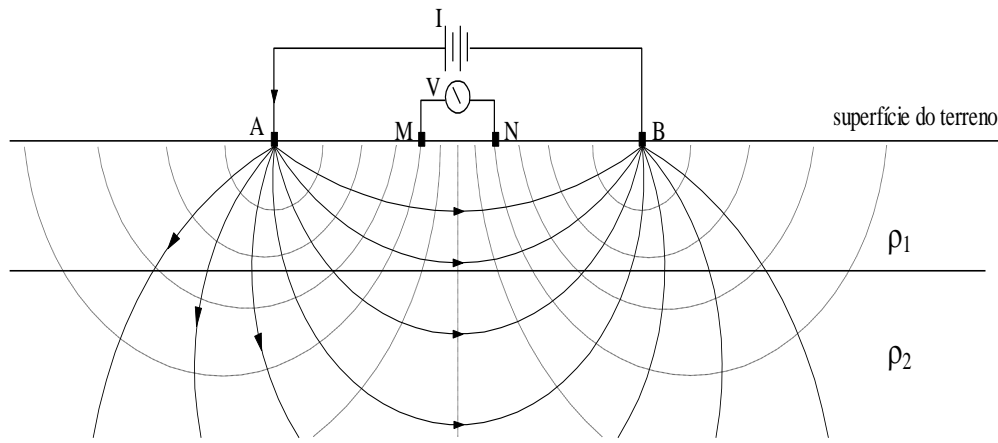
**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE
GEOLOGIA DE ENGENHARIA
E AMBIENTAL**



2023
(2ª Edição)



SEV (SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL)

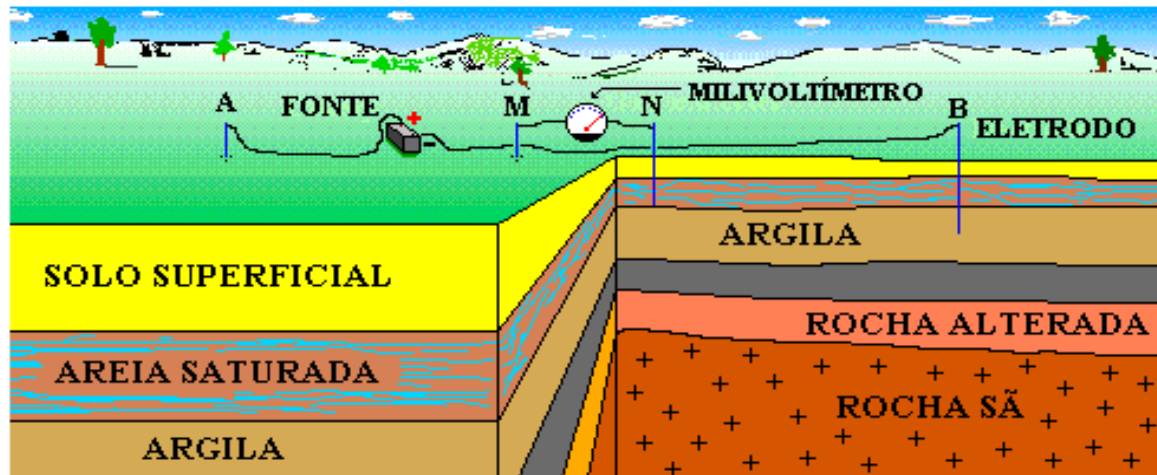
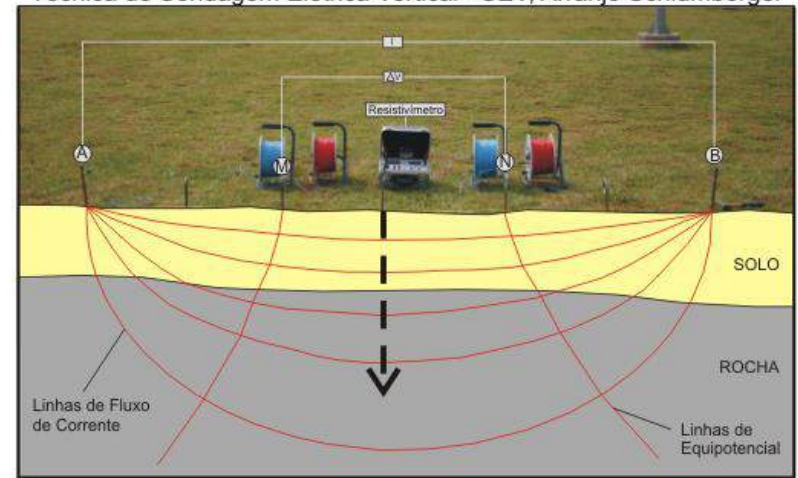


AB = eletrodos de corrente
MN = eletrodos de potencial

— linhas do fluxo de corrente
— linhas de equipotencial

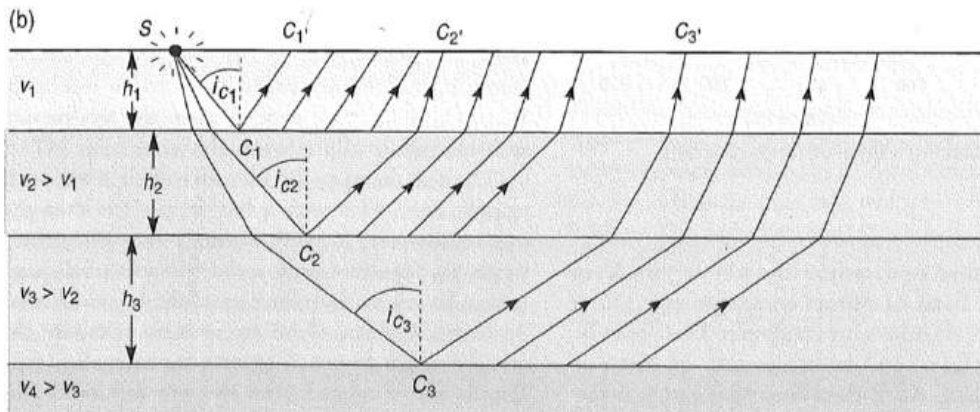
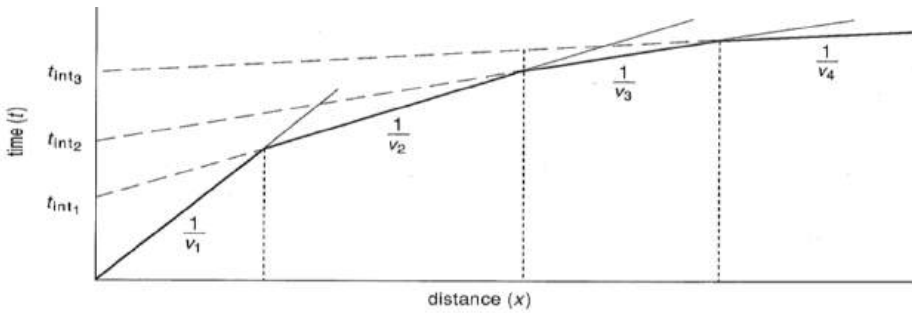
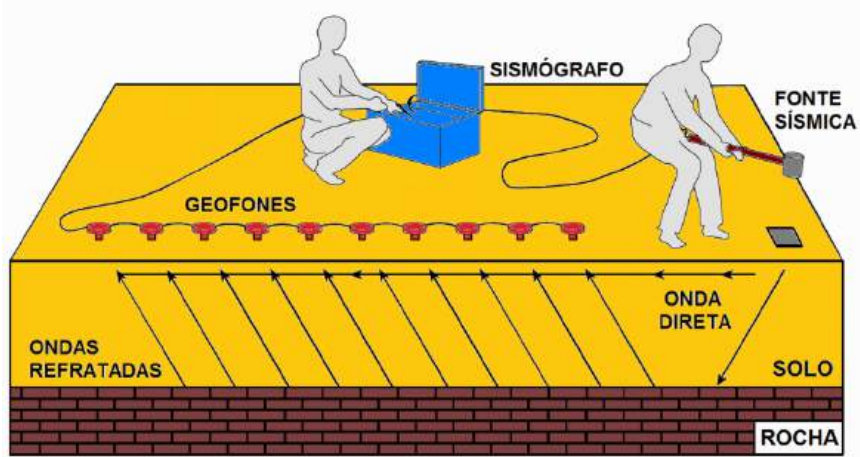
ρ = resistividade verdadeira das camadas

Técnica de Sondagem Elétrica Vertical - SEV, Arranjo Schlumberger

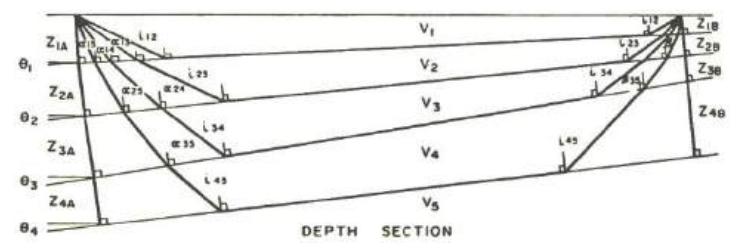
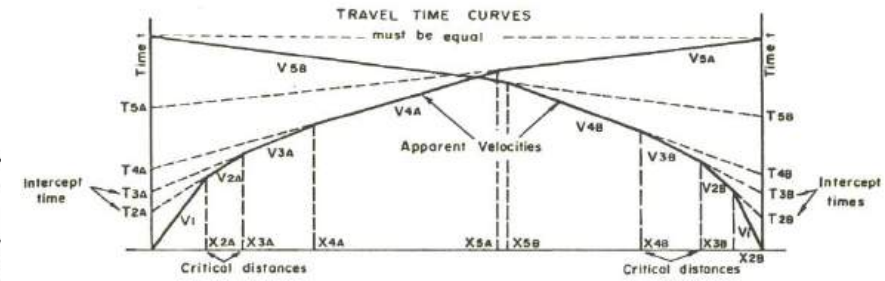


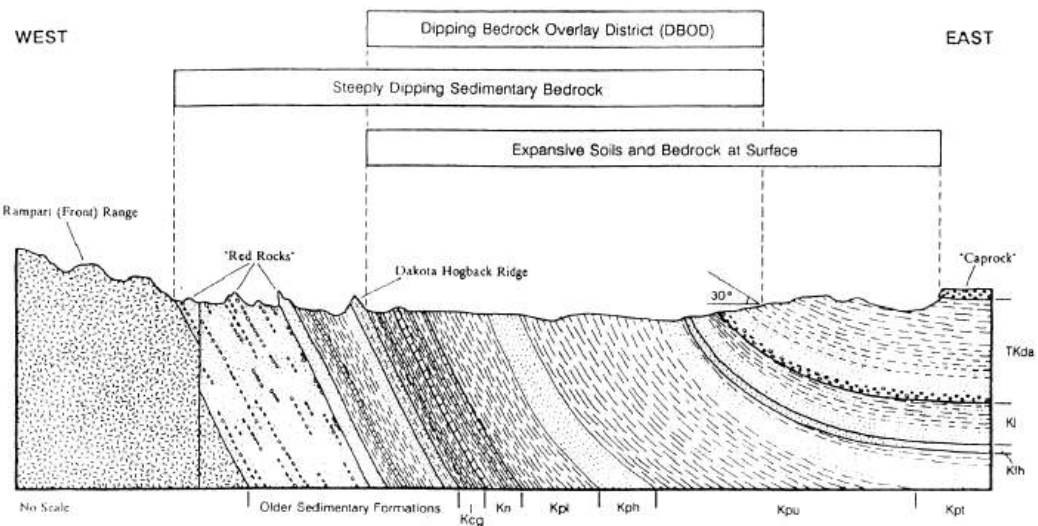
A aplicação correta de uma SEV ocorrerá em terrenos lateralmente homogêneos compostos de camadas estratificadas plano-paralelas ou com mergulhos muito suaves (GEOMETRIA 1D)

REFRAÇÃO SÍSMICA



MULTIDIPPING LAYER CASE - DEFINITION OF SYMBOLS (after Palmer, 1974)

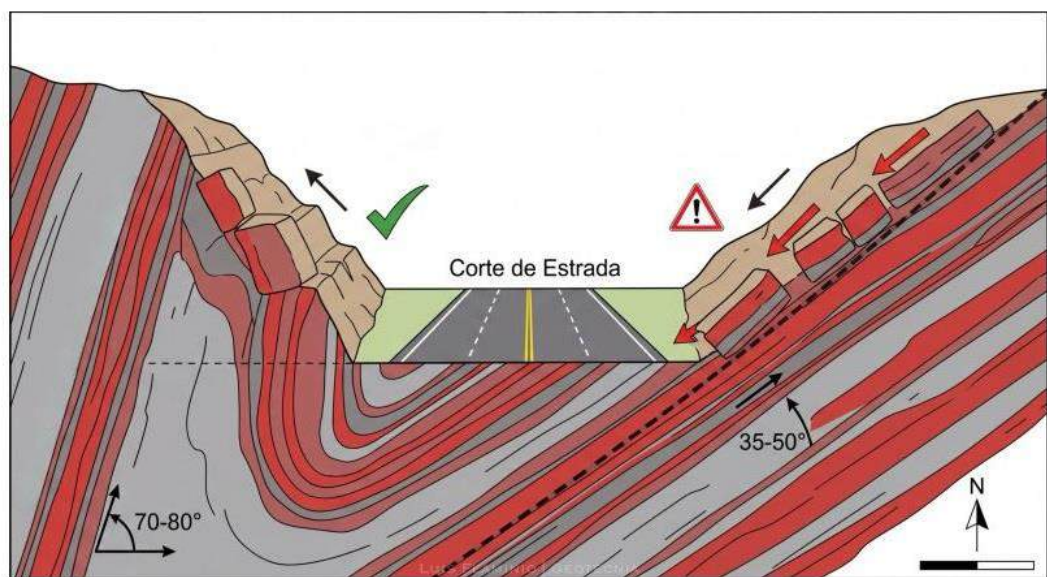
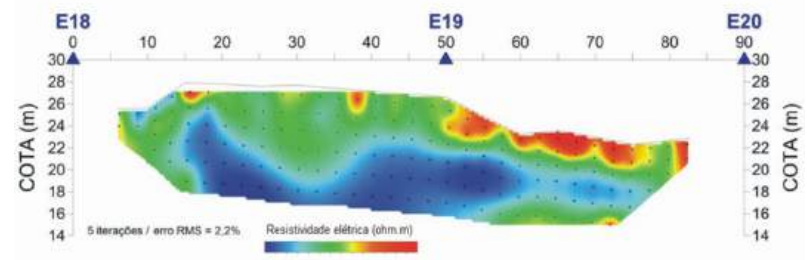
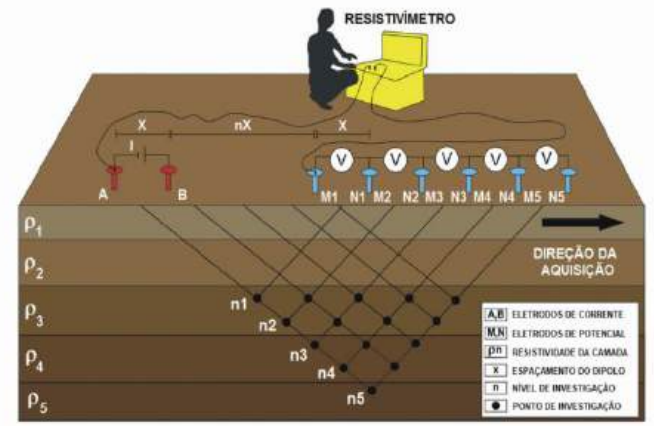




Kcg = Gartite Shale, Greenhorn Limestone, and Graneros Shale. Kn = Niobrara Formation.
 Kpl = Lower Shale Member of Pierre Shale. Kph = Hygiene Sandstone Member of Pierre Shale. Kpu = Upper Shale Member of Pierre Shale.
 Kpt = Upper Transition Member of Pierre Shale, Kih = Fox Hills Sandstone, Kl = Laramie Formation, TKda = Dawson Arkose

FIGURE 4.2 Geological cross-section showing dipping bedrock formation along the Denver Front Range area (after CGS).

Fonte: Fu Hua Chen. Soil engineering: testing, design, and remediation. 1999



Fonte: Luis Cesar Esteves Flaminio Filho (LinkedIn)

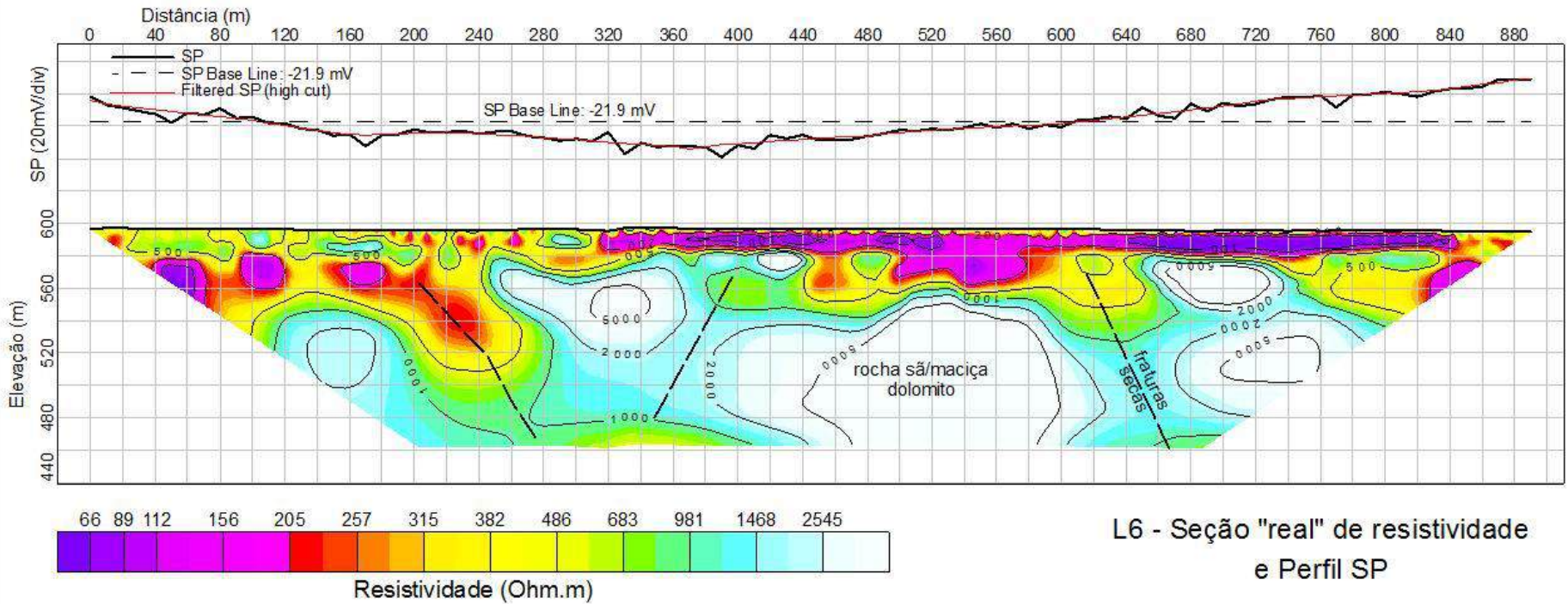


Local: Vazante-MG (área cárstica)

Equipamento: SYSCAL Pro switch - 72 eletrodos

Arranjo: dipolo-dipolo

Espaçamento entre eletrodos = 10 m



L6 - Seção "real" de resistividade e Perfil SP

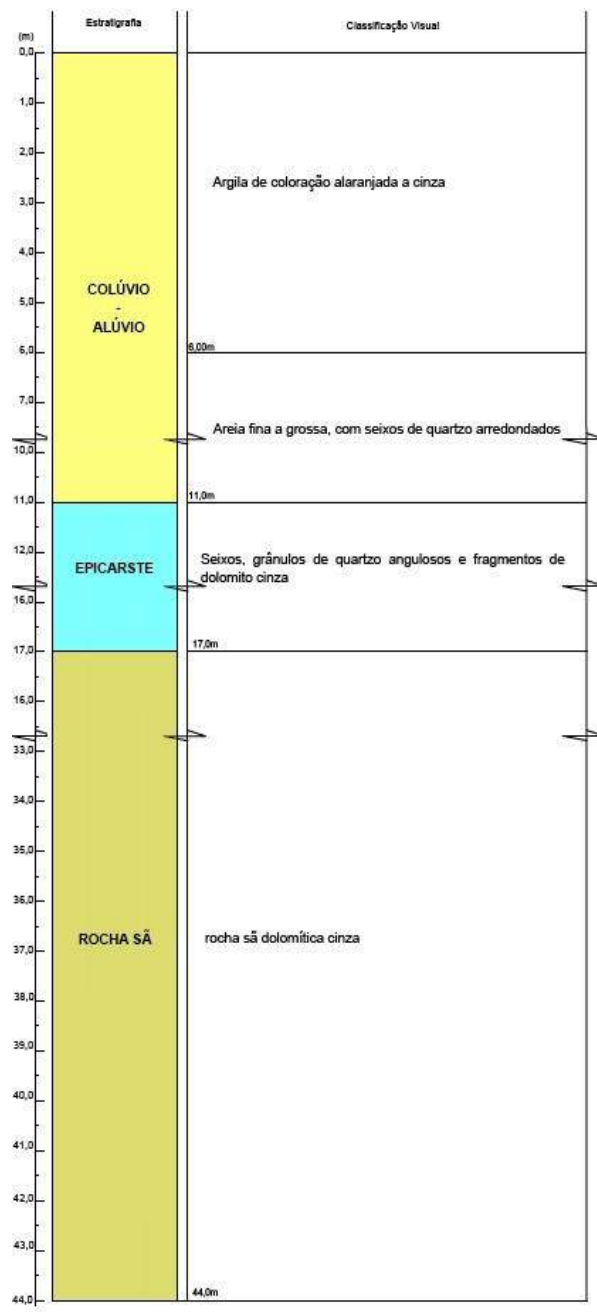
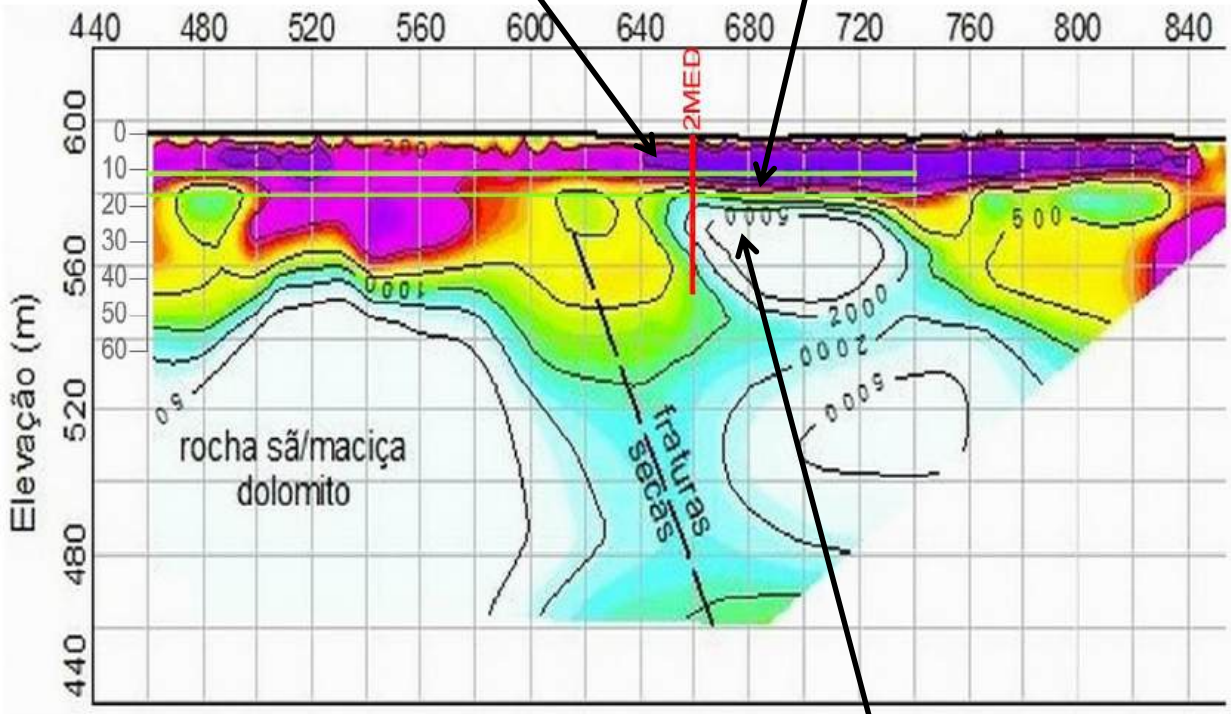
Local: Vazante-MG (área cárstica)

PIEZÔMETRO 2MED

COLÚVIO-ALÚVIO (0 m - 11 m)

EPICARSTE (11 m - 17 m)

ROCHA SÃ (>17 m)



Geofísica & Geotecnia



GEOPHYSICAL METHODS FOR DETERMINING THE GEOTECHNICAL ENGINEERING PROPERTIES OF EARTH MATERIALS



3.1 APPLICATIONS RELATED TO GEOTECHNICAL PROPERTY MEASUREMENTS

3.1.1 ELASTIC PARAMETERS

3.1.2 STRENGTH PARAMETERS

3.1.2.1 Shear Strength of Soils

3.1.2.2 Unconfined Compressive Strength of Rock

3.1.3 CONSOLIDATION PARAMETERS

3.1.4 COEFFICIENT OF LATERAL EARTH PRESSURE

3.1.5 RIPPABILITY

3.1.6 EARTHWORK/GRADING FACTOR

3.1.7 ROCK MASS CLASSIFICATION

3.1.8 MASS DENSITY

3.1.9 POROSITY

3.1.10 WATER CONTENT

3.1.11 PERMEABILITY

3.1.13 ATTERBERG LIMITS

3.2 APPLICATIONS RELATED TO SHEAR WAVE VELOCITY MEASUREMENTS

3.2.1 DIFFERENCES IN SCALES AND RESOLUTION AMONG GEOPHYSICAL METHODS

3.2.2 UNCERTAINTY IN GEOPHYSICAL METHODS AND VARIOUS PROXIES

3.2.3 MEASUREMENT OF VS30 FOR COMPUTING SITE AMPLIFICATION FACTOR

3.2.4 MEASUREMENT OF VS PROFILES FOR GROUND RESPONSE ANALYSIS

3.2.5 MEASUREMENT OF VS FOR LIQUEFACTION TRIGGERING EVALUATION

3.3 ESTIMATING VS FROM PENETRATION RESISTANCE MEASUREMENTS AND FROM PROXIES

3.3.1 CORRELATIONS BETWEEN VS AND PENETRATION RESISTANCE

3.3.2 PUBLISHED RELATIONS BETWEEN VS AND PENETRATION RESISTANCE

3.3.3 PROXIES FOR VS30

3.4 ESTIMATING VS FROM LABORATORY TESTING

3.4.1 RESONANT COLUMN TESTING

3.4.2 TRANSDUCERS AND BENDER ELEMENTS

3.4.3 APPLICABILITY OF LABORATORY TESTING



California Department of Transportation

Report Number CA-17-2111

February 15, 2018

Relações entre os módulos dinâmicos com V_P e V_S

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

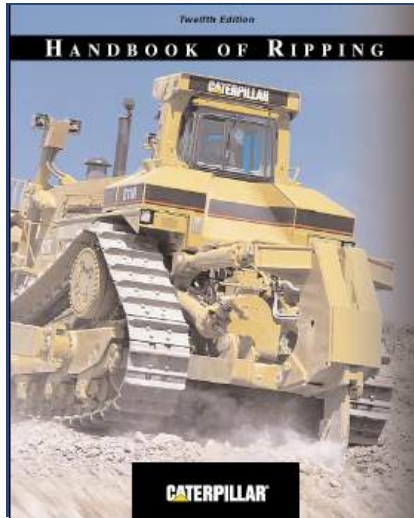
$$E = V_P^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1 - 2\nu) \cdot (1 + \nu)}{(1 - \nu)} = 2 \cdot V_S^2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu) \quad (\text{módulo de Young dinâmico})$$

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

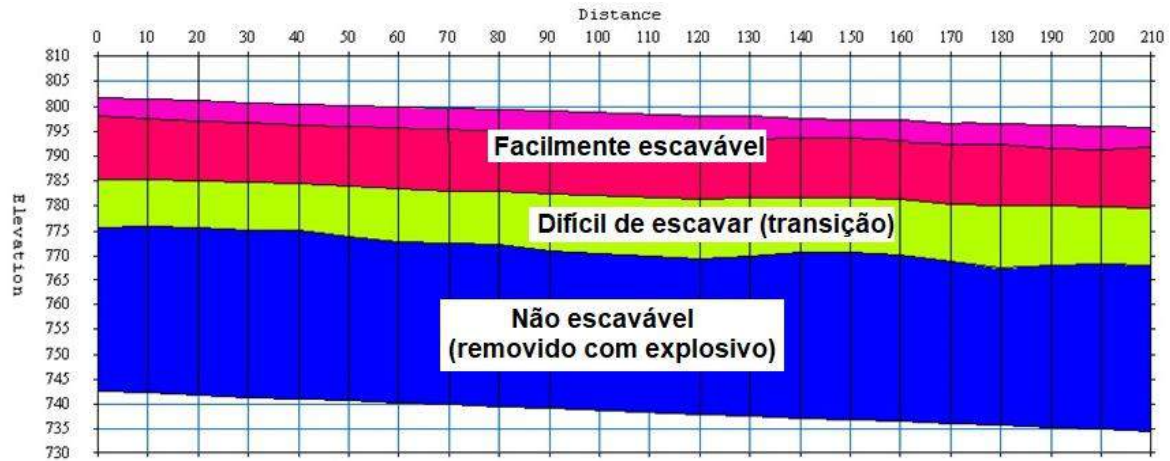
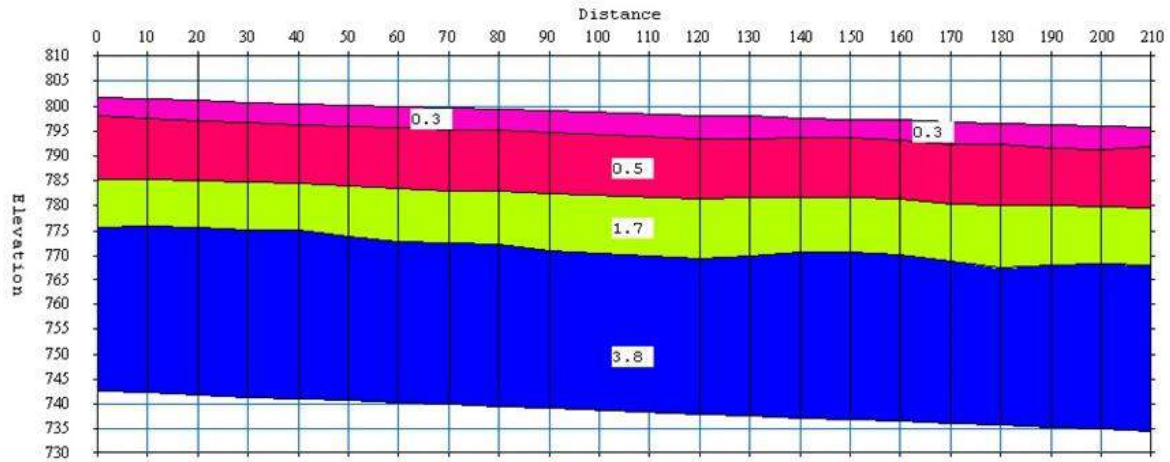
V_P e $V_S \rightarrow$ Medidos pelos ensaios sísmicos

ρ (massa específica) \rightarrow Conhecida ou estimada $\rho = \gamma_N / g$

ESCARIFICABILIDADE (RIPPABILITY)



Parâmetro: V_p
(Sísmica de Refração)



| Velocity (m/s) | Rippability |
|----------------|----------------------|
| < 1050 | Easily Ripped |
| 1050 – 1500 | Moderately Difficult |
| 1500 – 2000 | Difficult Ripping |
| > 2000 | Unrippable |



Table 3.9: Caltrans rippability chart (adapted from Leeds 2002). Note: Limited to Caterpillar D9 series.

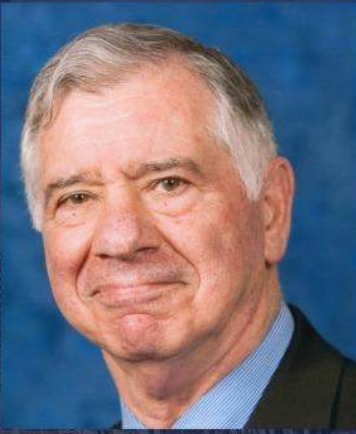
PRESENTATION
Use of Shear Wave Velocity for Foundation Design

HARRY G. POULOS
Emeritus Professor, PhD
Dist.M.ASCE

JUL 03 | 6:00pm BRT

Realização
Geotecnia
Brasil

**CicloGB
2024**



<https://www.youtube.com/watch?v=54-7UeHxXA8>

Geotech Geol Eng (2022) 40:1921–1938
<https://doi.org/10.1007/s10706-021-02000-w>

ORIGINAL PAPER

Use of Shear Wave Velocity for Foundation Design

Harry G. Poulos

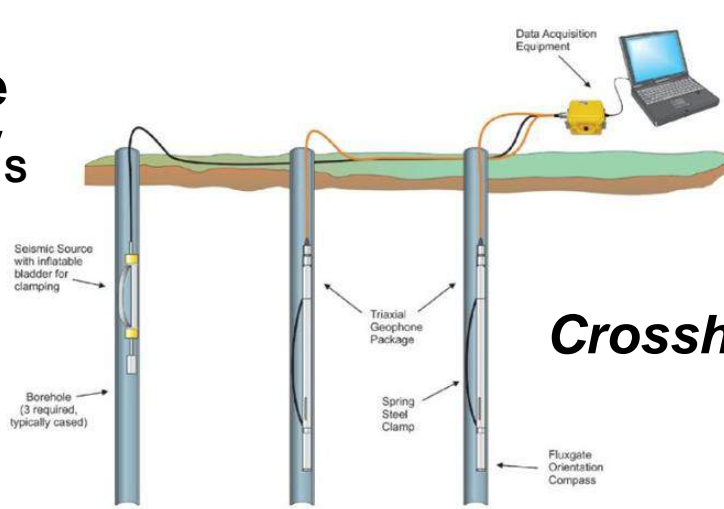


$V_s \Leftrightarrow$ rigidez

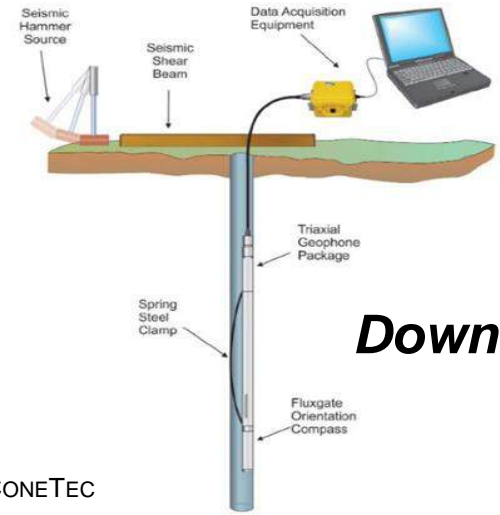
$$G_{\text{máx}} = \rho \cdot V_s^2$$

$G_{\text{máx}}$ é um parâmetro de referência na caracterização dos geomateriais

Ensaio sísmicos que determinam V_s



Crosshole

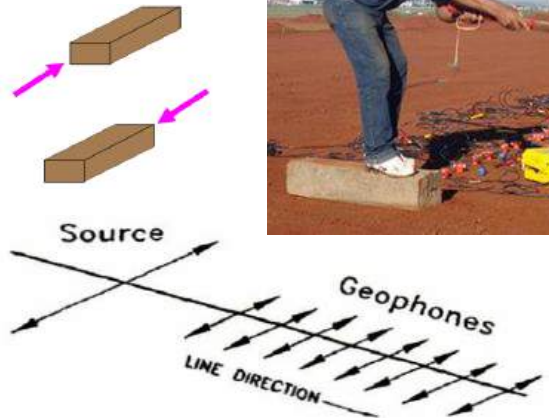


Downhole

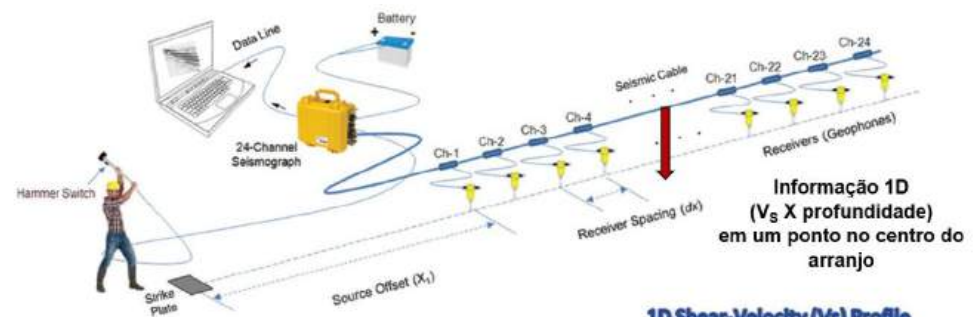
Fonte: CONETEC



Refração (onda S)

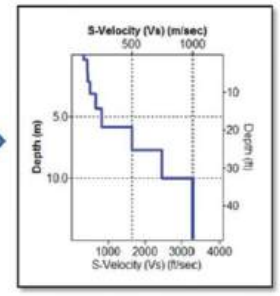


PRECISÃO

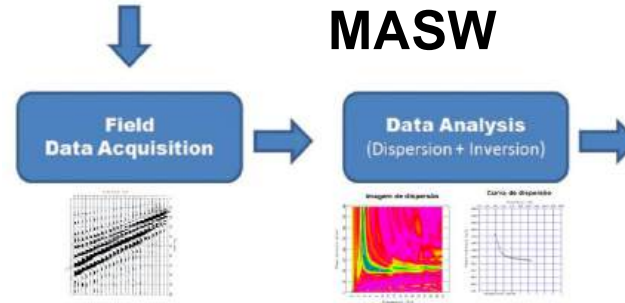


Informação 1D (V_s X profundidade) em um ponto no centro do arranjo

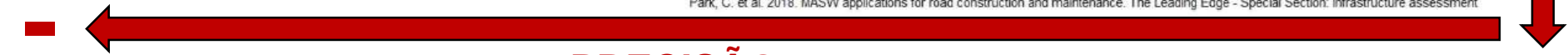
1D Shear-Velocity (V_s) Profile



MASW



Modificado de Park, C. et al. 2018. MASW applications for road construction and maintenance. The Leading Edge - Special Section: Infrastructure assessment



PRECISÃO

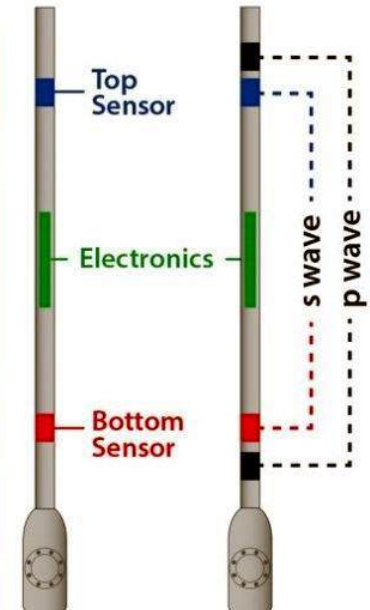
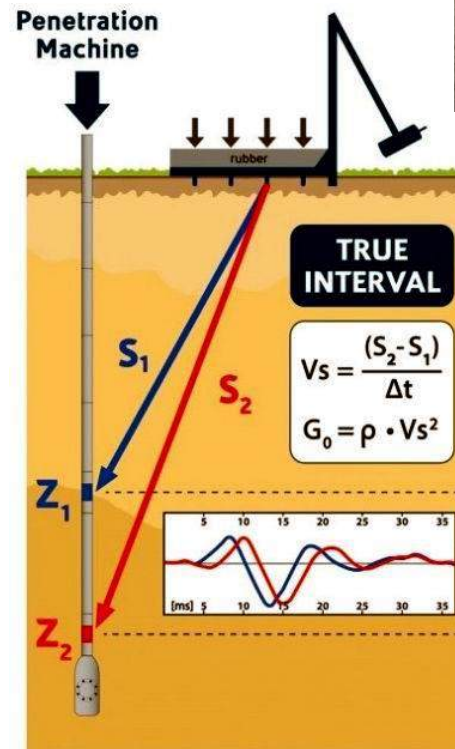
Piezocone sísmico: cone + 2 geofones

Dilatométrico sísmico: lâmina + 2 geofones



CPTU sísmico (SCPTU)

DMT sísmico (SDMT)



SCPTU

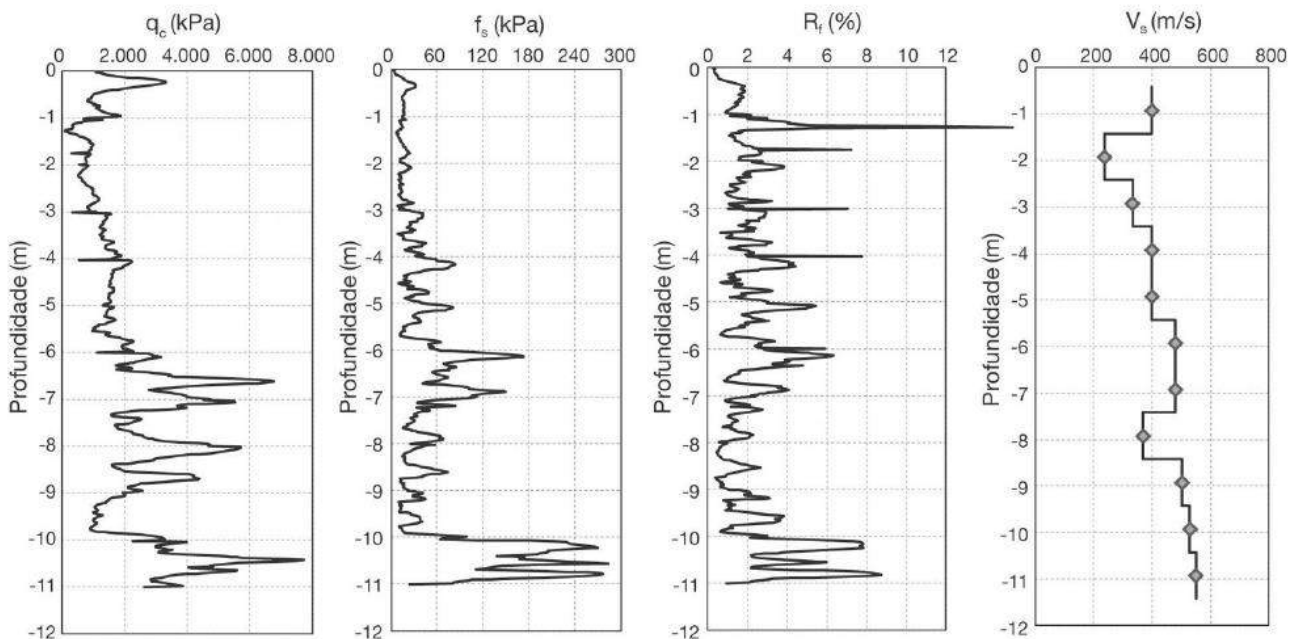
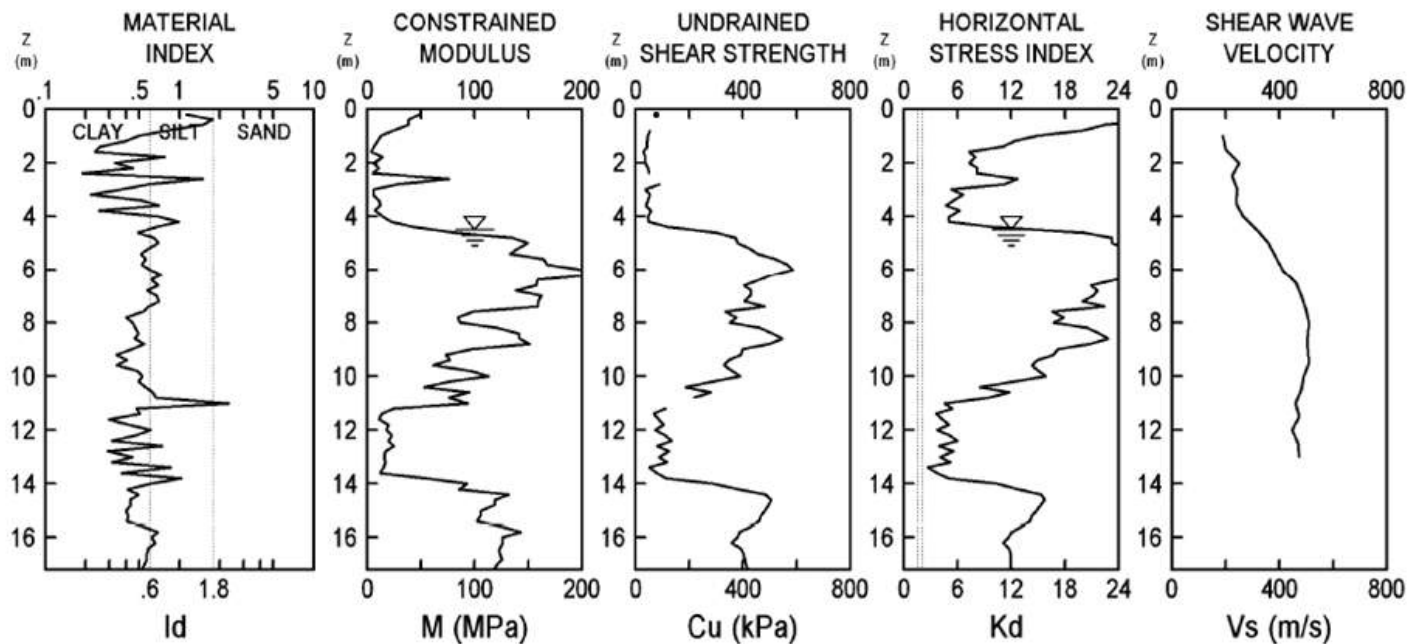
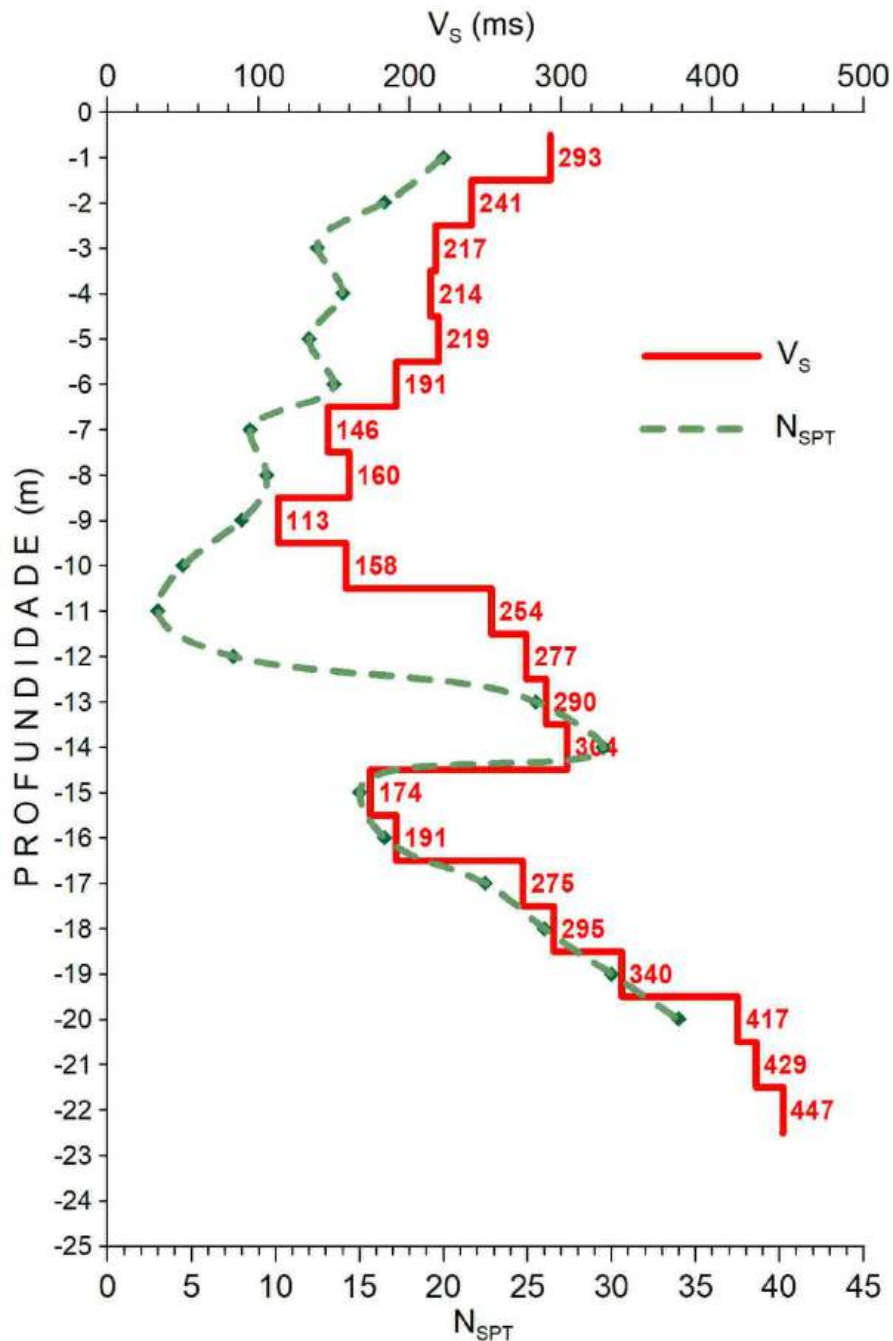


FIG. 3.8 Resultado típico de um cone sísmico

SDMT



V_S & N_{SPT}



Ensaio *Crosshole*

Tabela 11 - Correlações N_{SPT} e V_s .

| Pesquisador | Local | Tipo de Solo | Função | a | b |
|-------------------------------|---------------------|----------------|--------------|-------|-------|
| Imai e Yoshimura (1970) | Japão | Todos os solos | $V_s = aN^b$ | 76 | 0,33 |
| Fujiwara (1972) | Japão | Todos os solos | $V_s = aN^b$ | 92,1 | 0,337 |
| Ohsaki e Iwasaki (1973) | Japão | Todos os solos | $V_s = aN^b$ | 81,4 | 0,39 |
| Ohsaki e Iwasaki (1973) | Japão | Areia | $V_s = aN^b$ | 59,4 | 0,47 |
| Imai e Tonouchi (1982) | Japão | Todos os solos | $V_s = aN^b$ | 97 | 0,314 |
| Seed e Idriss (1981) | EUA | Todos os solos | $V_s = aN^b$ | 61,4 | 0,5 |
| Seed et al. (1983) | EUA | Areia | $V_s = aN^b$ | 56,4 | 0,5 |
| Lee (1990) | Taiwan | Areia | $V_s = aN^b$ | 57,4 | 0,49 |
| | | Silte | | 105,6 | 0,32 |
| | | Argila | | 114 | 0,31 |
| | | Todos os solos | | 121 | 0,27 |
| Athanasopoulos (1994) | Grécia | Todos os solos | $V_s = aN^b$ | 107,6 | 0,36 |
| | | Areia | | 85,3 | 0,42 |
| | | Argila | | 121,7 | 0,33 |
| Sykora e Stokoe (1983) | EUA | Argila | $V_s = aN^b$ | 100,5 | 0,29 |
| Iyisan (1996) | Turquia (Erzincan) | Todos os solos | $V_s = aN^b$ | 51,5 | 0,516 |
| Athanasopoulos (1994) | Grécia | Todos os solos | $V_s = aN^b$ | 107,6 | 0,36 |
| | | Siltes | | 85,3 | 0,42 |
| | | Argila | | 121,7 | 0,33 |
| Jafari et al. (2002) | Irã (Teerã) | Todos os solos | $V_s = aN^b$ | 19 | 0,85 |
| | | Siltes | | 22 | 0,77 |
| | | Argila | | 27 | 0,73 |
| Hasançebi e Ulusay (2007) | Turquia (Yenisehir) | Todos os solos | $V_s = aN^b$ | 90 | 0,309 |
| | | Areia | | 90,82 | 0,269 |
| | | Argila | | 97,89 | 0,26 |
| Hanumantharao e Ramana (2008) | Índia (Delhi) | Todos os solos | $V_s = aN^b$ | 82,6 | 0,43 |
| | | Areia | | 79 | 0,434 |
| | | Silte | | 86 | 0,42 |

| | | | | | |
|--------------------------------|---------|----------------|-------------------|--------|-------|
| Tsiambaos e Sabatakakis (2011) | Grécia | Todos os solos | $V_s = aN_{60}^b$ | 105,7 | 0,327 |
| | | Areia | | 79,7 | 0,365 |
| | | Argila | | 112,2 | 0,324 |
| | | Silte | | 88,8 | 0,37 |
| Marto et al (2013) | Malásia | Todos os solos | $V_s = aN^b$ | 77,13 | 0,377 |
| | | Areia | | 75,05 | 0,388 |
| | | Argila | | 91,87 | 0,361 |
| Fatehnia (2015) | EUA | Todos os solos | $V_s = aN^b$ | 77,1 | 0,355 |
| Fabbrocino et al. (2015) | Itália | Todos os solos | $V_s = aN^b$ | 90,353 | 0,317 |
| | | Silte | | 149,3 | 0,192 |
| | | Argila | | 110,5 | 0,252 |
| Kirar et al. (2016) | Índia | Todos os solos | $V_s = aN^b$ | 99,5 | 0,345 |
| | | Areia | | 100,3 | 0,338 |
| | | Argila | | 94,4 | 0,379 |
| Thokchom et al. (2017) | Índia | Todos os solos | $V_s = a + bN$ | 160,5 | 3,311 |
| | | Areia | | 189,6 | 2,641 |
| | | Silte | | 143,1 | 3,925 |
| | | Argila | | 156,8 | 3,395 |

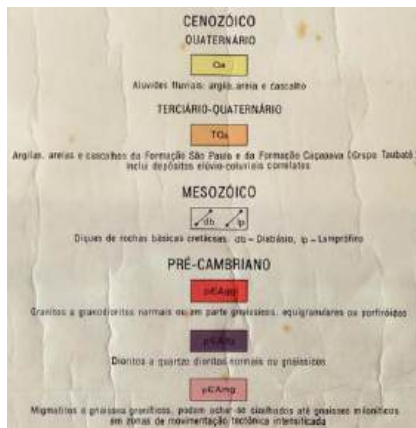
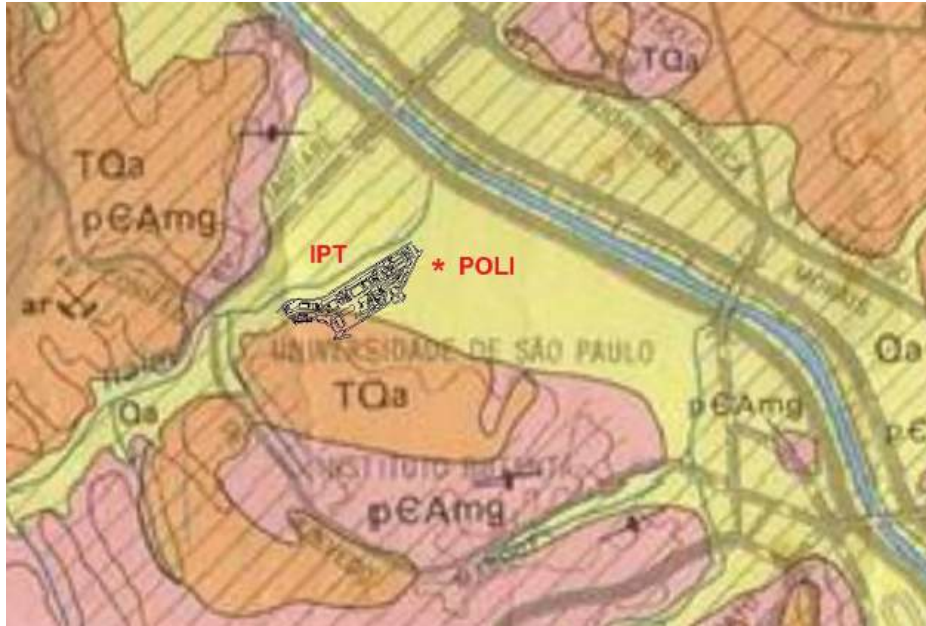
Santos, F.S. Método MASW na análise do melhoramento de solos com a técnica CPR Grouting. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, UERJ, Rio de Janeiro.

$$V_s = A \cdot N_{SPT}^B$$

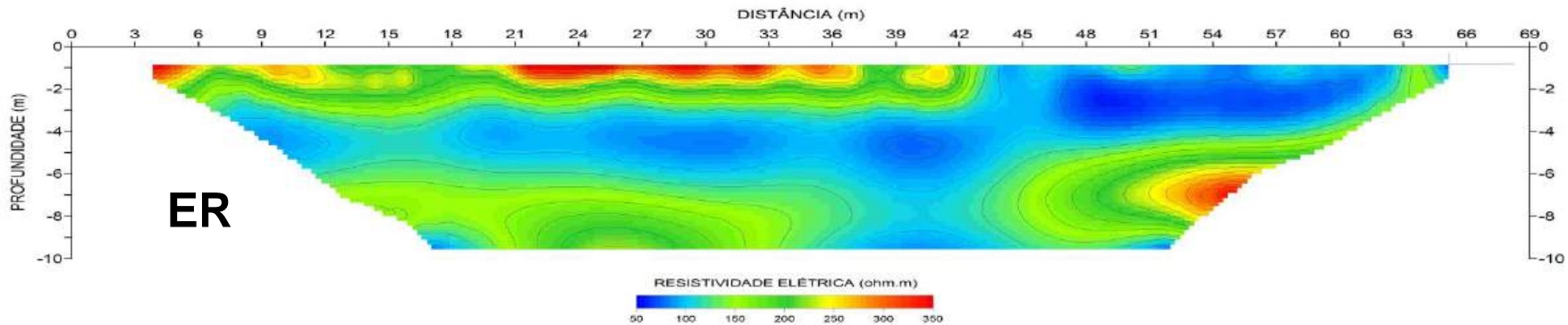
$$V_s = A + B \cdot N_{SPT}$$

A, B = constantes empíricas

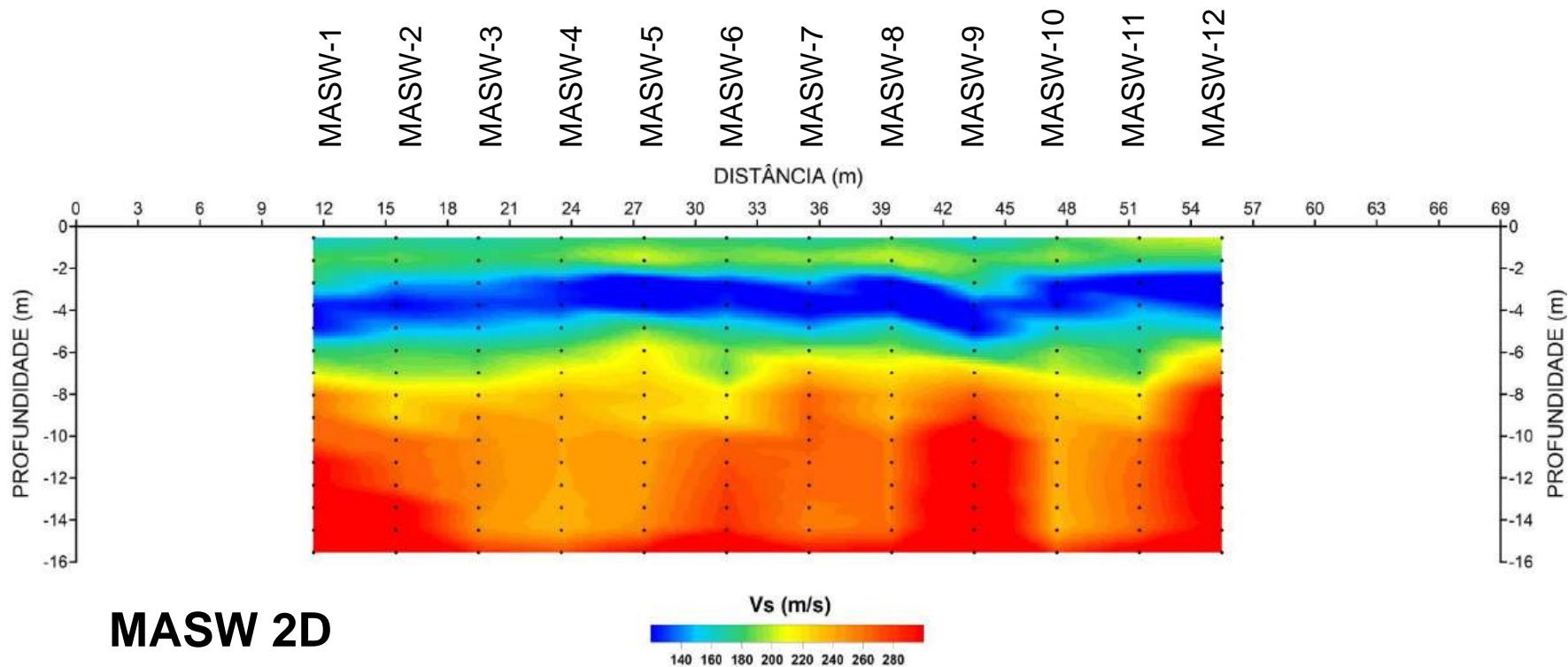
Ensaio de Eletrorresistividade e MASW (Poli Civil, São Paulo - SP)

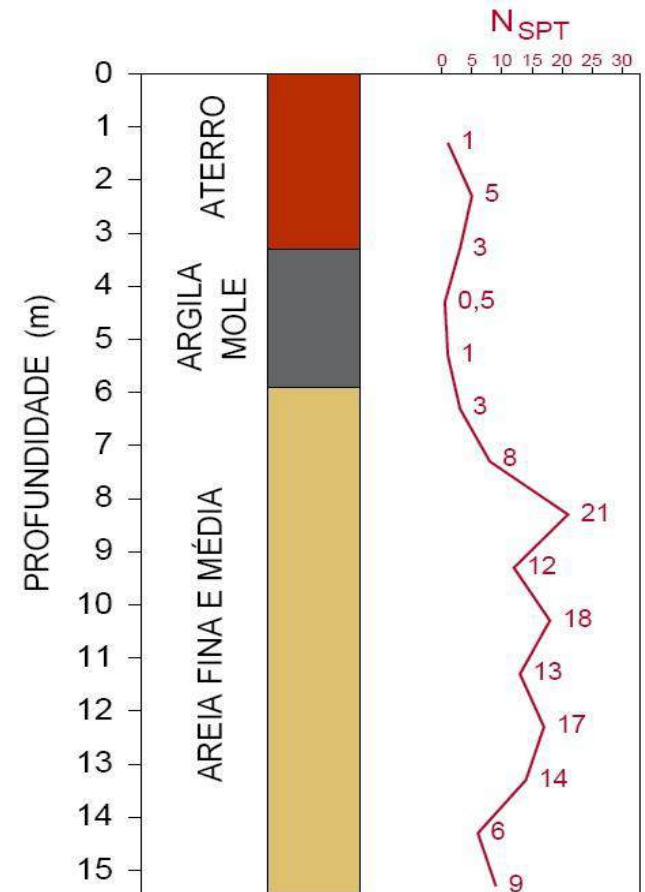
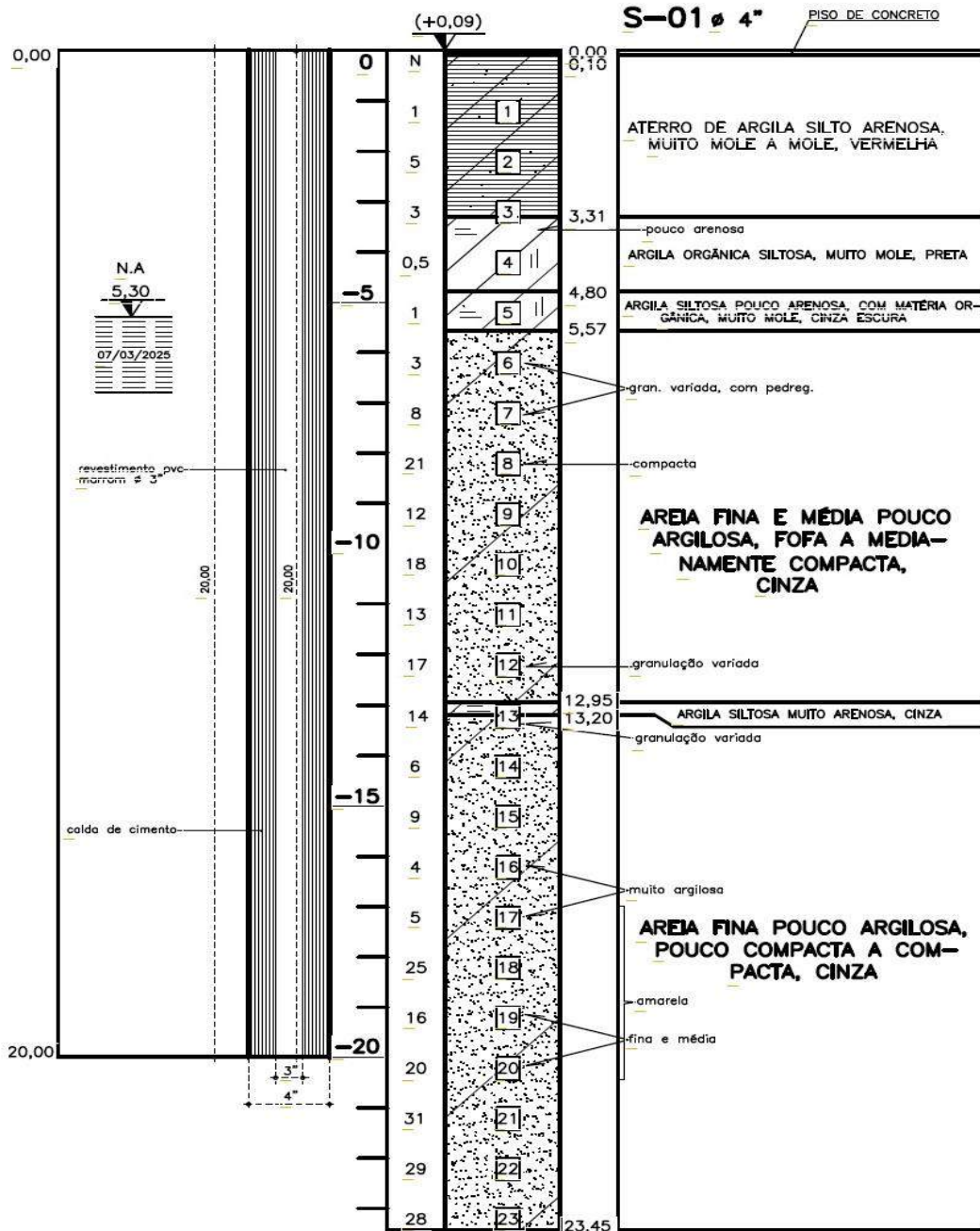


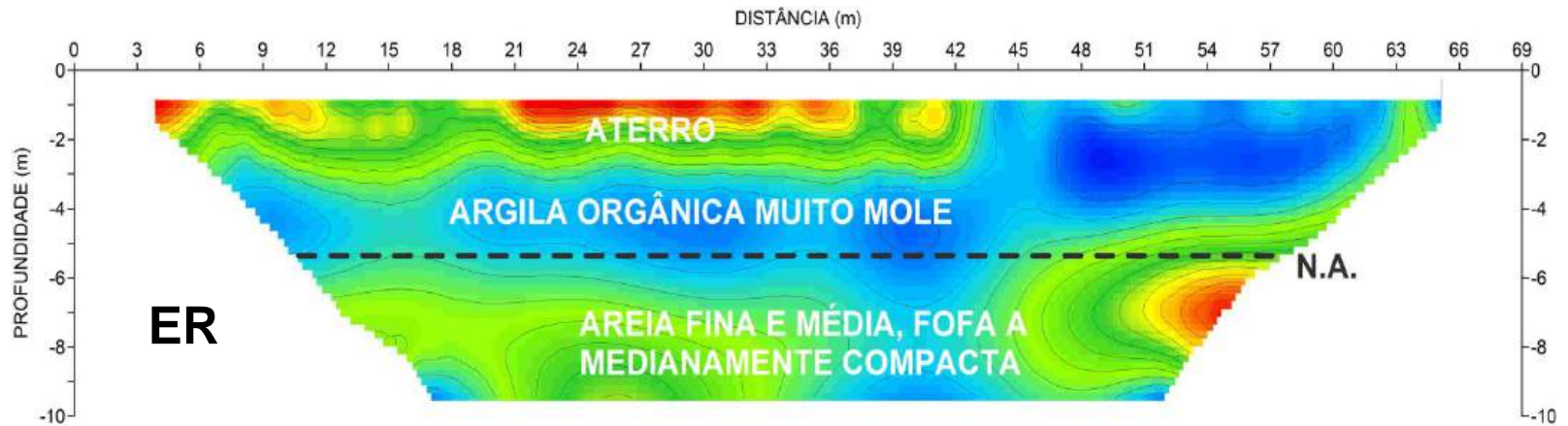
Ensaio ER e MASW 2D



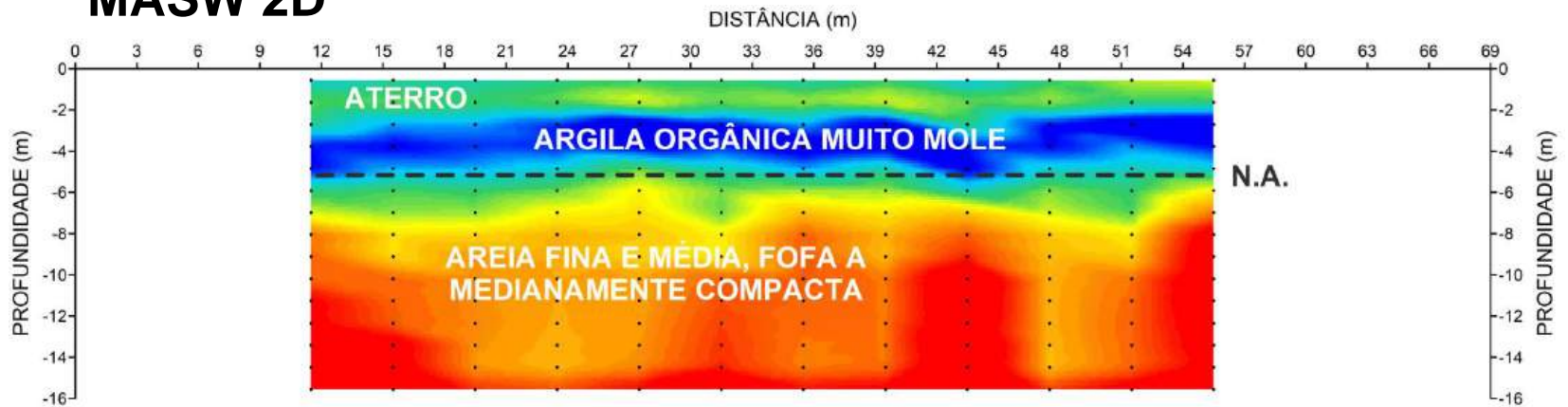
12 ensaios MASW 1D, espaçados de 4 m





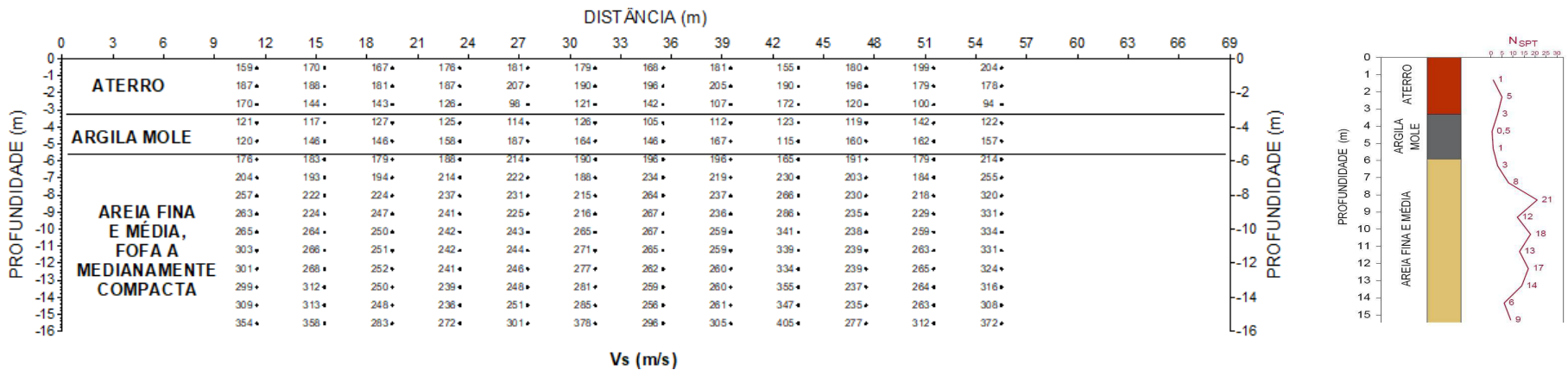


MASW 2D



⇒ Argila orgânica mole: ρ baixas / V_S baixos

⇒ Areia fofa a medianamente compacta: ρ altas / V_S altos



$$V_S = A \cdot N_{SPT}^B$$

Aterro: $V_S = 155,1 \cdot N_{SPT}^{0,17}$ (Pitikilas et al., 1992)

Argila mole: $V_S = 165,7 \cdot N_{SPT}^{0,19}$ (Pitikilas et al., 1992)

Areia: $V_S = 79,0 \cdot N_{SPT}^{0,434}$ (Hanumantharao e Ramana, 2008)

V_S (MASW) \rightarrow N_{SPT}

0 m - 3,3 m: Aterro

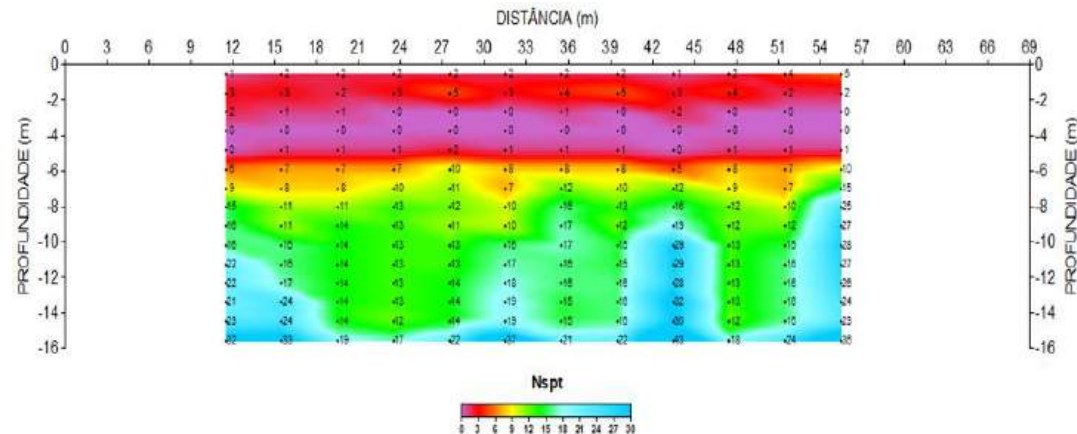
$$N_{SPT} = \left(\frac{V_s}{155,1} \right)^{1/0,17}$$

3,3 m - 5,6 m: Argila mole

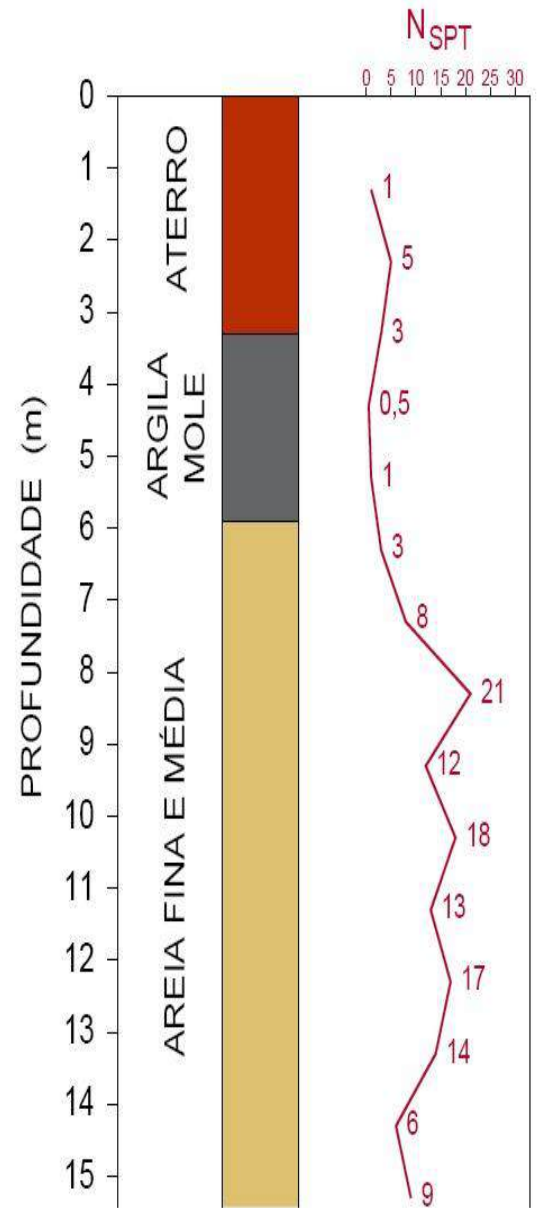
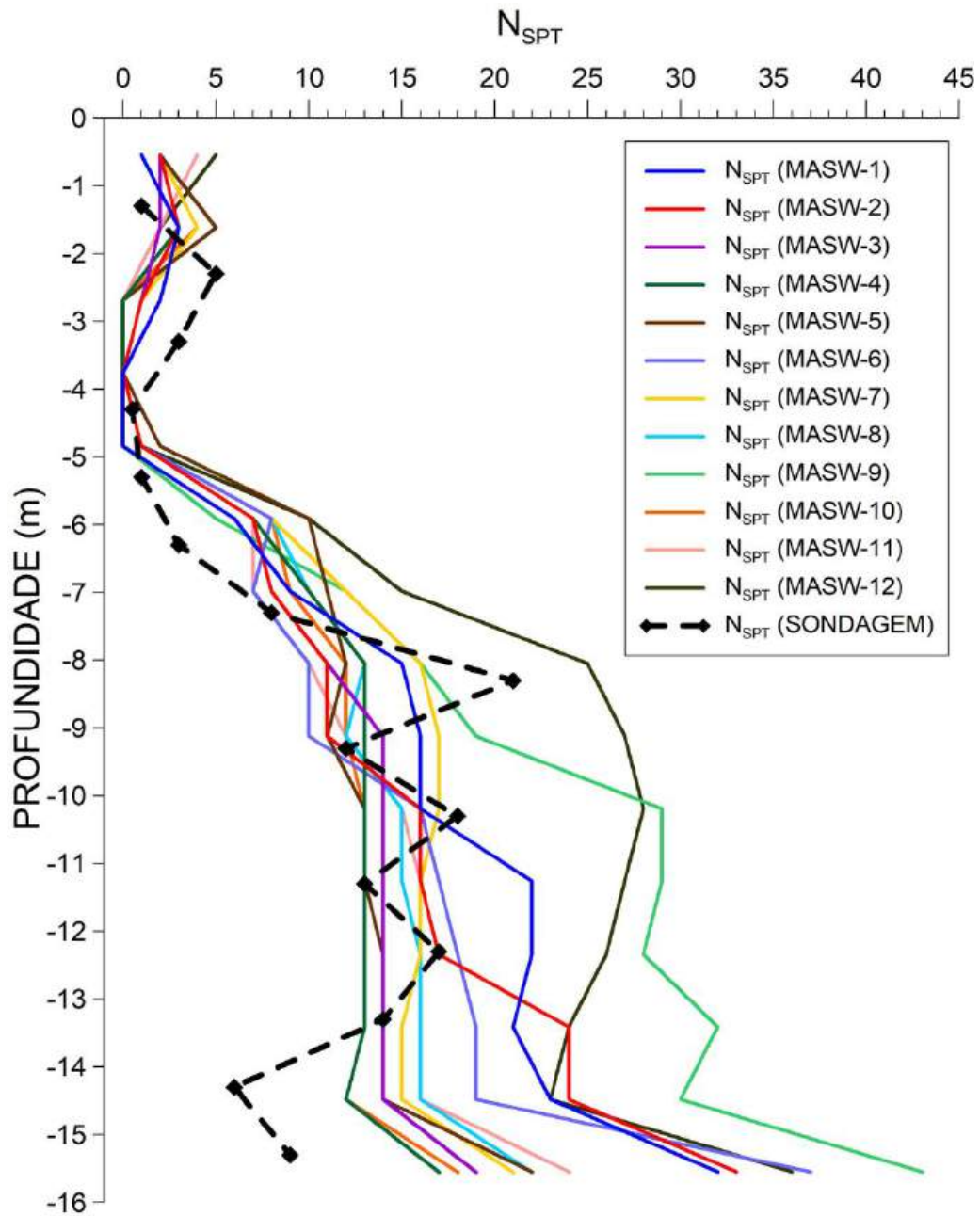
$$N_{SPT} = \left(\frac{V_s}{165,7} \right)^{1/0,19}$$

> 5,6 m: Areia fina e média

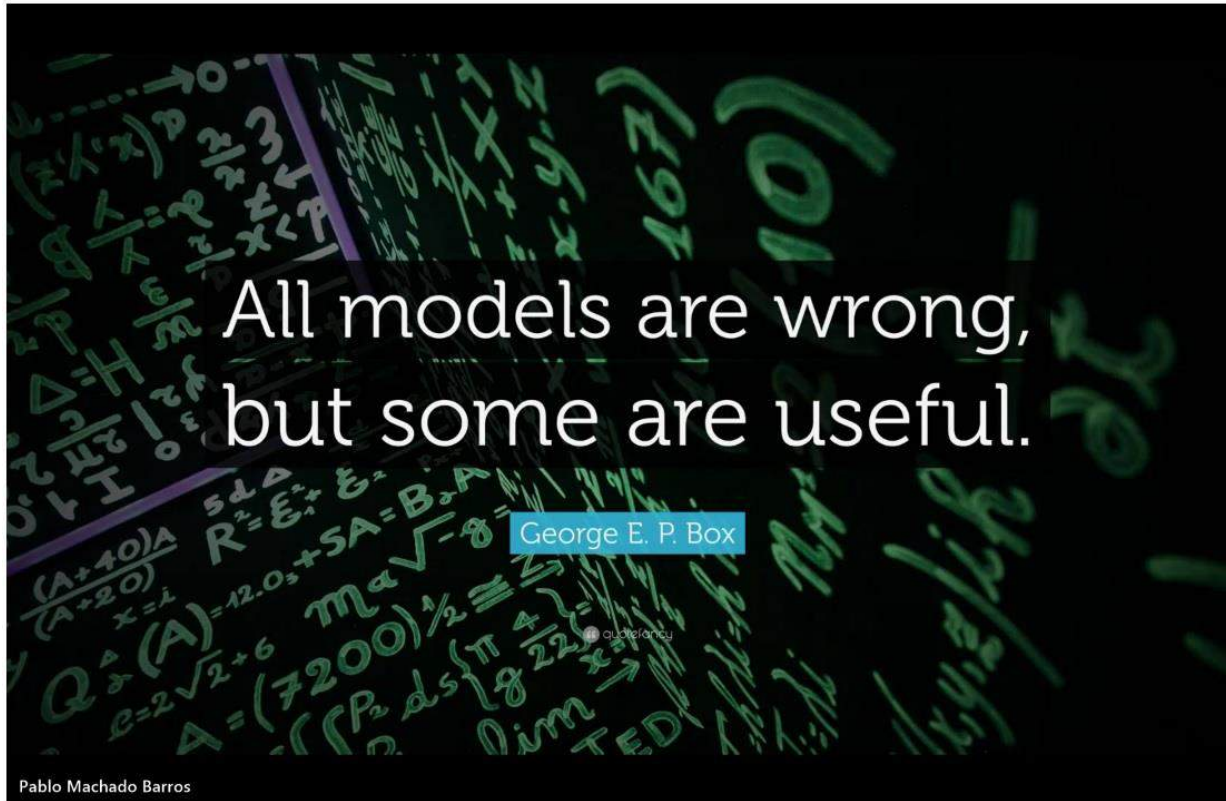
$$N_{SPT} = \left(\frac{V_s}{79,0} \right)^{1/0,434}$$



“Seção de N_{SPT} ” obtida a partir de V_S



Para finalizar, uma mensagem para todos nós, engenheiros, geólogos e geofísicos



Pablo Machado Barros - Machine Learning na Geofísica

<https://www.youtube.com/watch?v=KbKkMb2r54>

