
PROSPECÇÃO GEOFÍSICA

GEOFÍSICA

□ Métodos indirectos:

- Prospecção geofísica – conjunto de técnicas que investiga o interior da Terra a partir das variações detectadas em parâmetros físicos significativos e sua correlação com as características geológicas
- A aplicação de um determinado método depende das propriedades físicas do local

■ Métodos mais utilizados

□ Sísmico de refração:

- Zonamento geotécnico
- Características dinâmicas (E_d)
- Ripabilidade

□ Eléctrico

GEOFÍSICA

- Objectivos da aplicação de métodos de prospecção geofísica:
 - ❑ Definir características geológicas (espessura, ocorrência de falhas)
 - ❑ Avaliar volume de terras em manchas de empréstimo
 - ❑ Estudo de locais de pedreira
 - ❑ Localização de zonas em ruptura
 - ❑ Determinação da profundidade de alteração
 - ❑ Determinação das características elásticas do terreno (módulo de elasticidade dinâmico)
 - ❑ Avaliação da ripabilidade

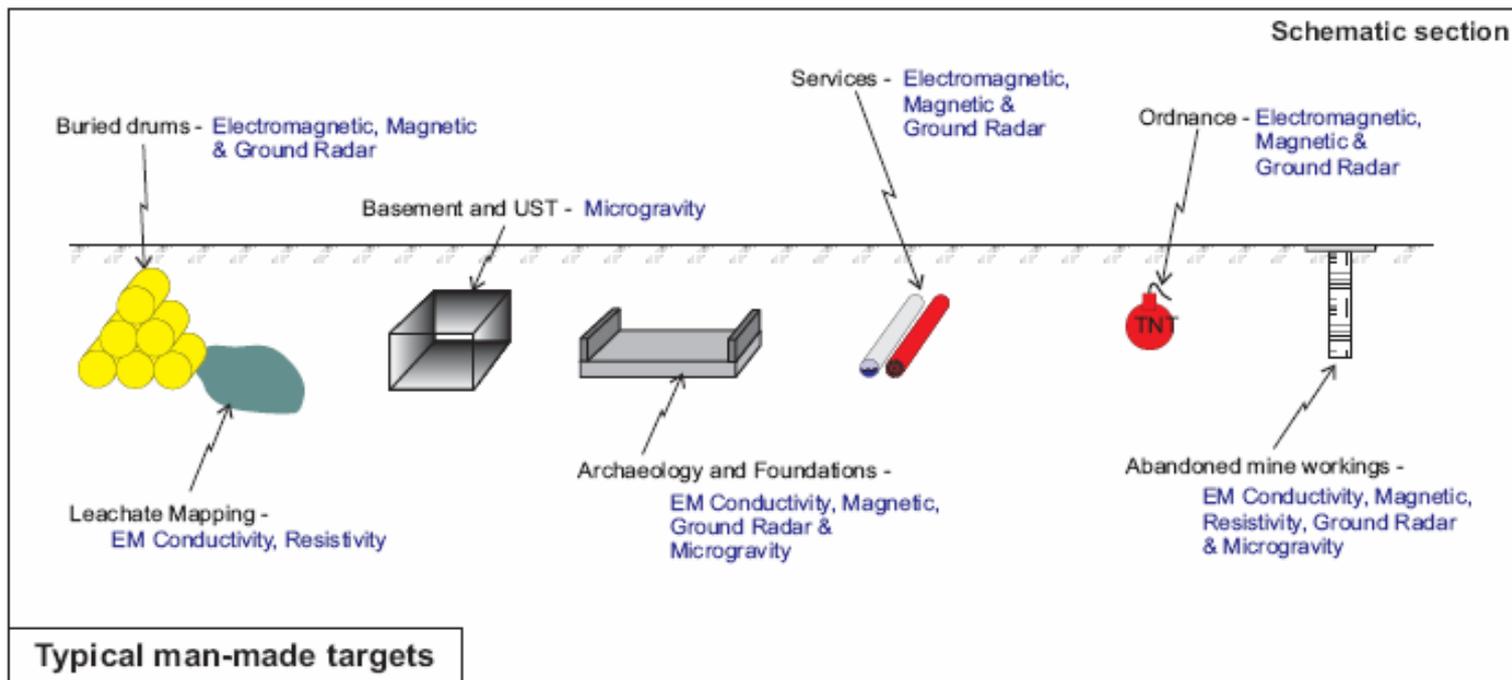
- ❑ Podem ser utilizados à superfície ou no interior do terreno

GEOFÍSICA

Geophysical Methods of Exploration Summarized

Method	Applications	Comments
Seismic refraction from surface	Obtain stratum depths and velocities, land or water. Geologic sections interpreted	Most suitable if velocities increase with depth and rock surface regular
Seismic direct (crosshole, uphole, downhole)	Obtain velocities for particular strata; dynamic properties; rock mass quality	Requires drill holes. Crosshole yields best results. Costly
Seismic reflection	General subsurface section depicted. Water bodies yield clearest sections	Land results difficult to interpret. Velocities not obtained. Stratum depths comp's require other data
Electrical resistivity	Locate saltwater boundaries, clean granular and clay strata, rock depth, and underground mines by measured anomalies	Difficult to interpret. Subject to wide variations. No engineering properties obtained. Probe configurations vary
Electrical conductivity	Obtain subsurface sections by data interpretation. Identify contaminant plumes by measured anomalies	Difficult to interpret. Subject to wide variations. No engineering properties obtained
Gravimeter	Detect faults, domes, intrusions, cavities, buried valleys by measured anomalies	Precise surface elevations needed. Not commonly used. Measures density differences
Magnetometer	Mineral prospecting, location of large igneous masses	Normally not used in engineering or groundwater studies
Ground-probing radar	General subsurface section depicted. Most useful to show buried pipe, bedrock, voids boulders	Interpretation difficult. Limited to shallow depths. No engineering properties
Thermography	Shallow subsurface section depicted. Useful for water pipeline leaks	Interpretation difficult. Limited to shallow depths. No engineering properties

GEOFÍSICA



(ABOVE) Schematic representation of typical targets (natural and man-made) and the most appropriate geophysical methods for a survey. The final choice of method (or combination of methods) will also depend on the prevailing ground conditions depth and size of target etc.

GEOFÍSICA

- Método eléctrico de resistividade
 - Estudo do campo de potenciais criado pela injeção de uma corrente eléctrica
 - Dois dispositivos mais utilizados
 - Realização de:
 - Sondagens eléctricas verticais (SEV)
 - Perfis eléctricos
 - Cartas de resistividade aparente
-

GEOFÍSICA

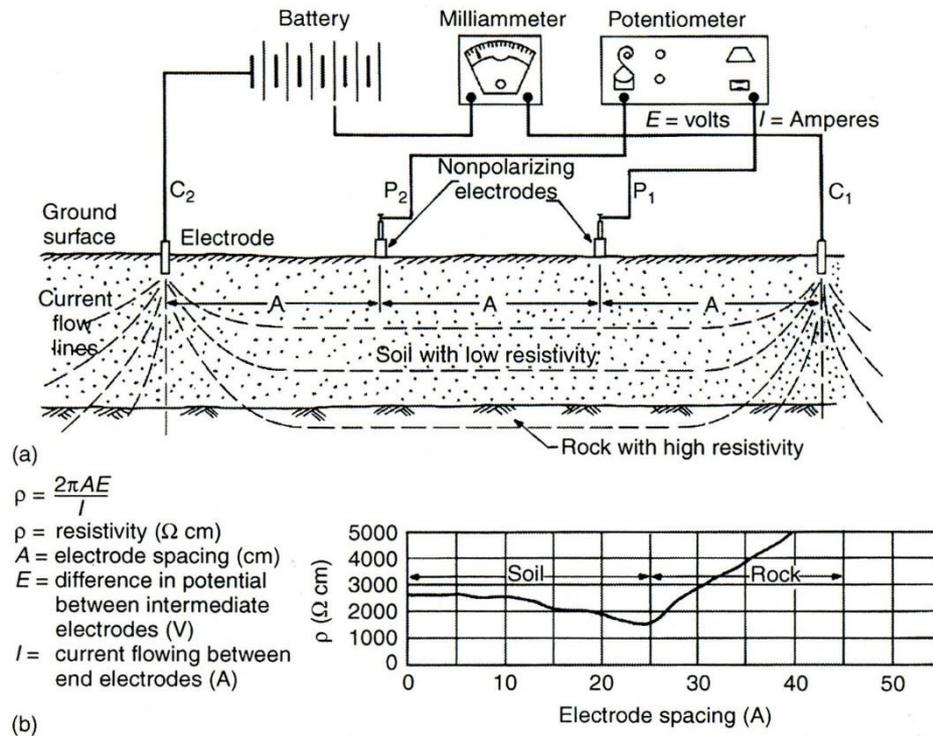


FIGURE 1.31

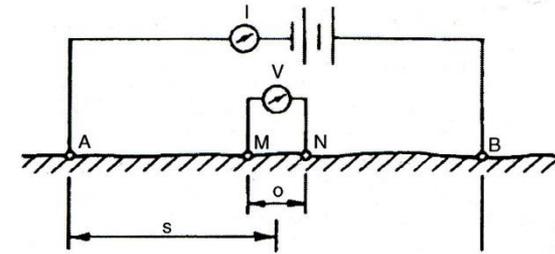
(a) Components of the electrical resistivity apparatus and the common four-electrode configuration of the Wenner array. (b) Typical resistivity curve. (From ASTM, Symposium on Surface and Subsurface Reconnaissance, Philadelphia, 1951. Copyright ASTM International, reprinted with permission.)

GEOFÍSICA

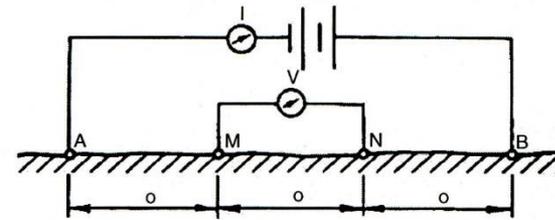
Adequado para estruturas horizontais e verticais; profundidade de investigação é 10% superior ao Wenner para igual AB

Mais sensível a contactos horizontais

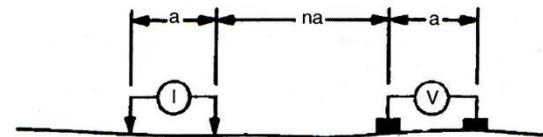
Mais sensível a contactos verticais



(a) Schlumberger array



(b) Wenner array

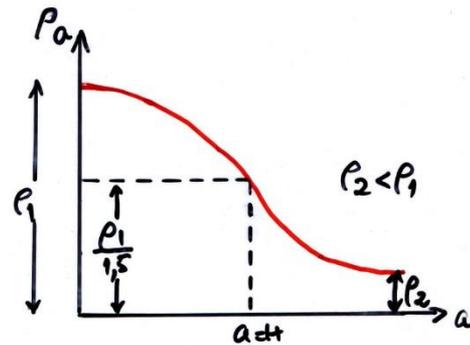
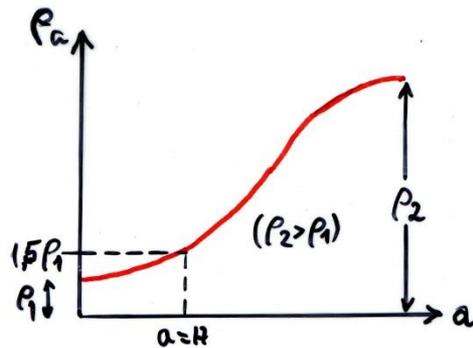
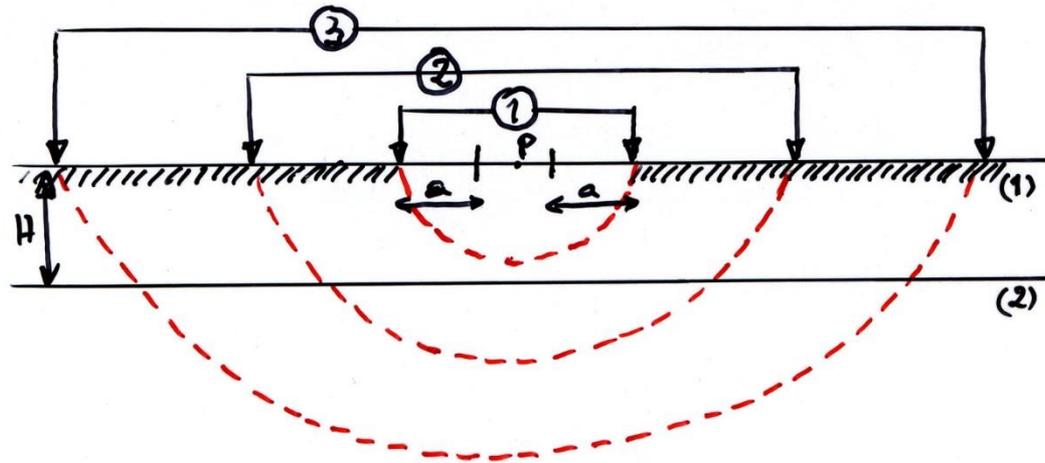


(c) AB source dipoles, MN receiving dipoles

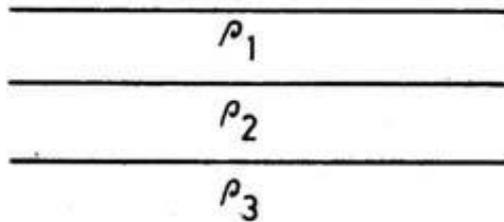
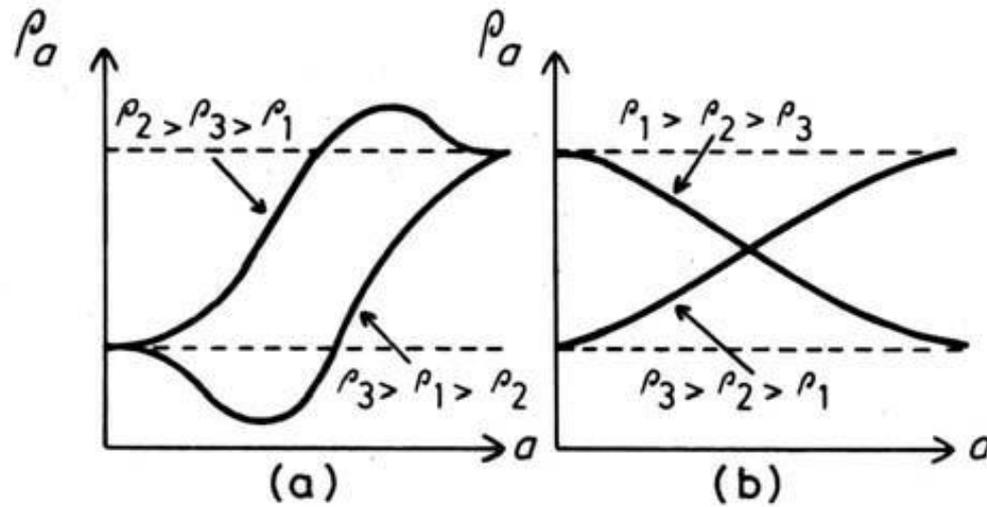
FIGURE 1.32 Electrode (array) configurations for resistivity measurements. (From ASCE *Technical Engineering and Design Guides*, adapted from the U.S. Army Corps of Engineers, 1998.)

GEOFÍSICA

• Sondagem Eléctrica Vertical

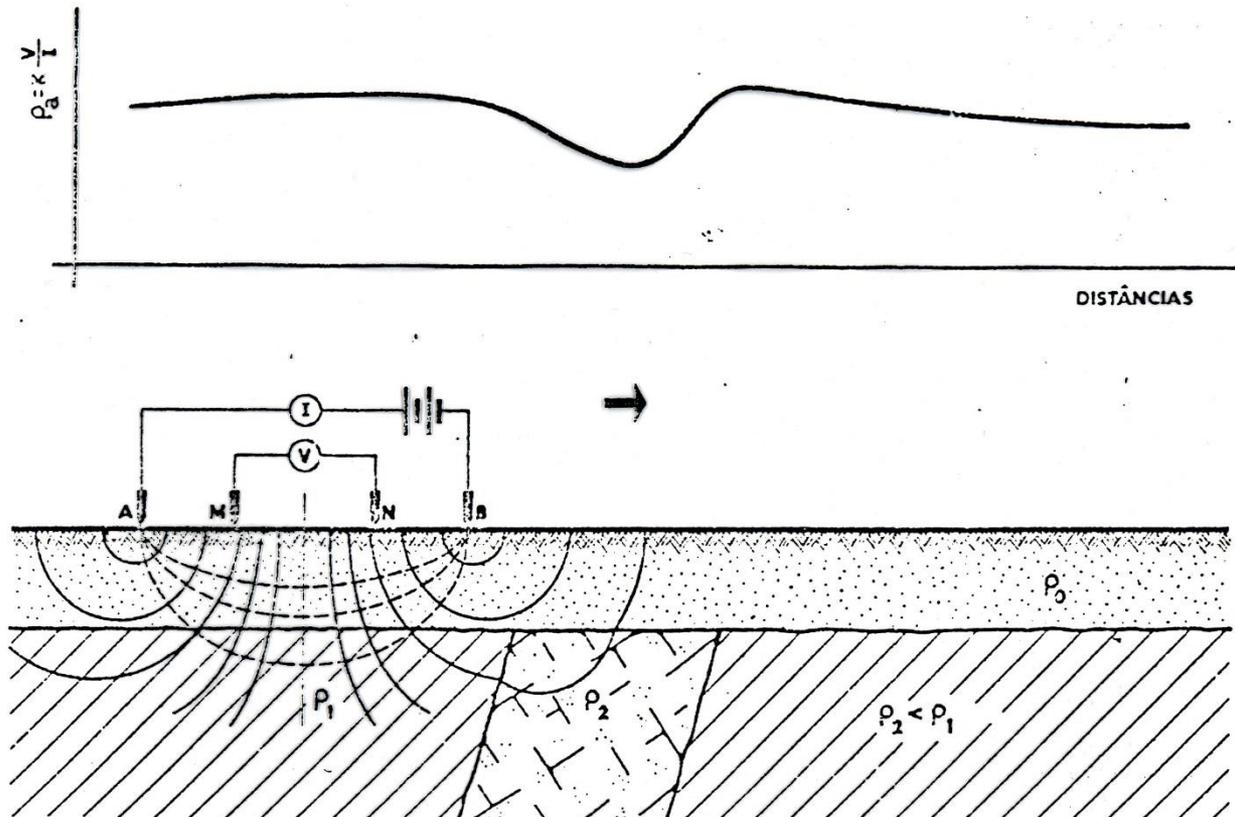


GEOFÍSICA



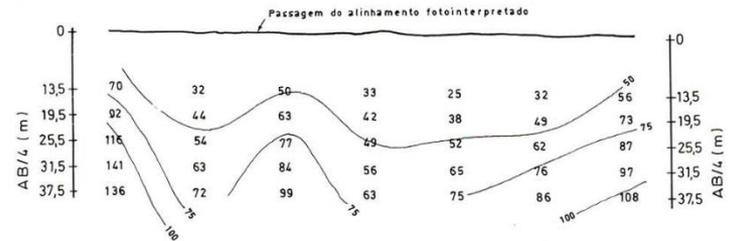
GEOFÍSICA

• Perfil eléctrico



GEOFÍSICA

PERFIL DE RESISTIVIDADES APARENTES



SECÇÃO VERTICAL DO SUB-SOLO

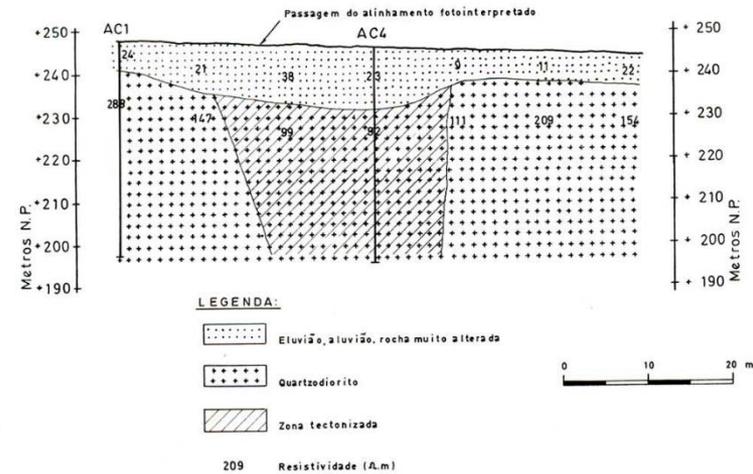


Fig. 4 : Perfil 10 — Ribeira do divor.

GEOFÍSICA

TABLE 1.11

Typical Resistivity Values for Geologic Materials^a

Materials	Resistivity	
	Ω ft	Ω m
Clayey soils: wet to moist	5–10	1.5–3.0
Silty clay and silty soils: wet to moist	10–50	3–15
Silty and sandy soils: moist to dry	50–500	15–150
Bedrock: well fractured to slightly fractured with moist soil-filled cracks	500–1000	150–300
Sand and gravel with silt	About 1000	About 300
Sand and gravel with silt layers	1000–8000	300–2400
Bedrock: slightly fractured with dry soil-filled cracks	100–8000	300–2400
Sand and gravel deposits: coarse and dry	>8000	>2400
Bedrock: massive and hard	>8000	>2400
Freshwater	67–200	20–60
Seawater	0.6–0.8	0.18–0.24

^a From Soilest, Inc.

Note: (1) In soils, resistivity is controlled more by water content than by soil minerals. (2) The resistivity of the pore or cleft water is related to the number and type of dissolved ions and the water temperature.

GEOFÍSICA

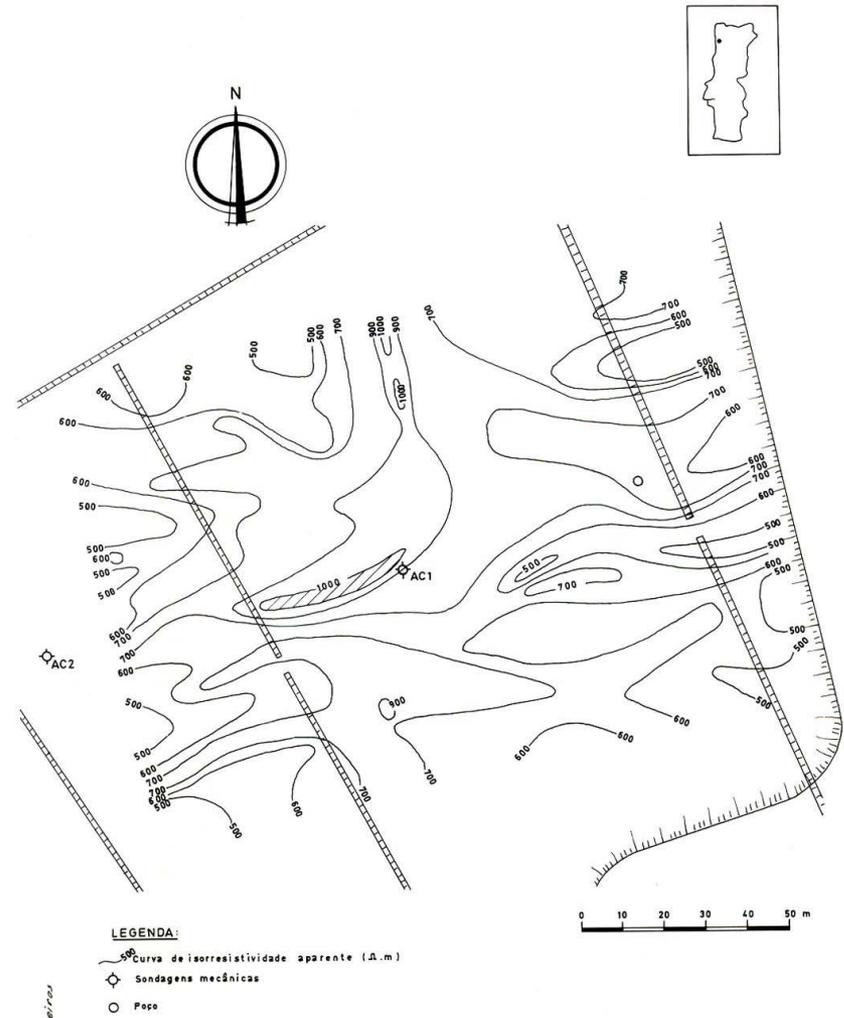
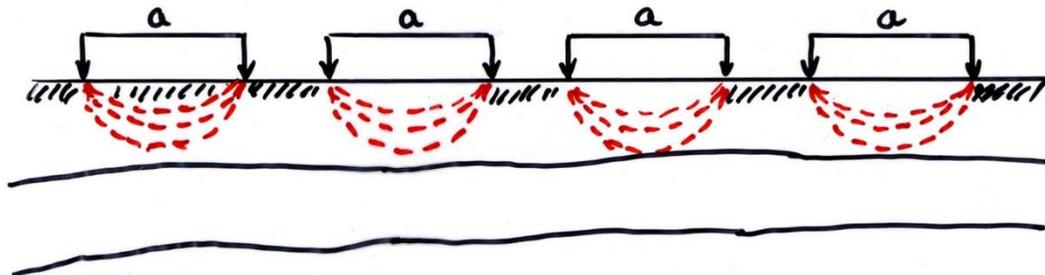


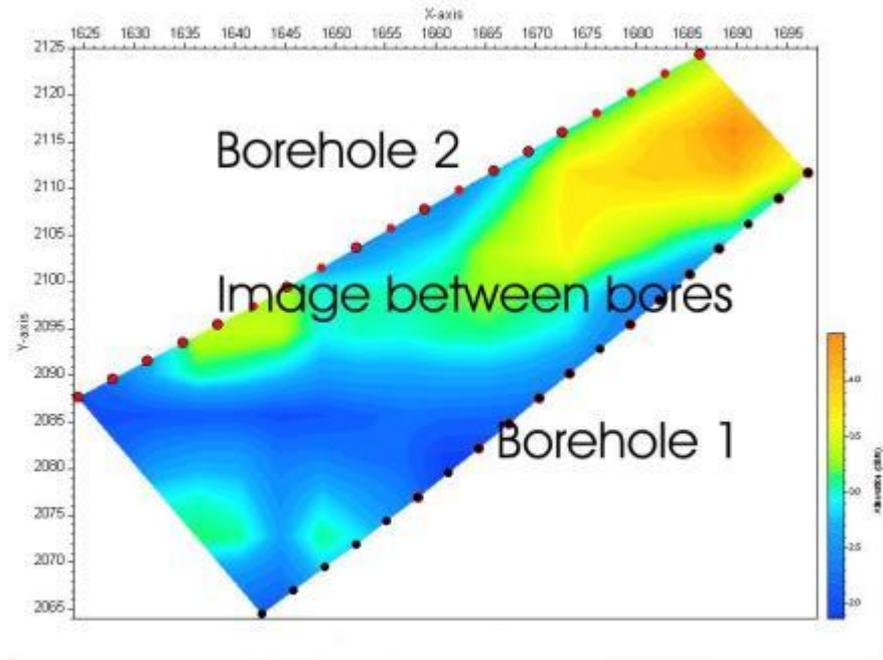
Fig. 7 : Carta de isorresistividades aparentes $AB = 300$ m $MN = 5$ m trofa.

GEOFÍSICA

- Carta de resistividade aparente



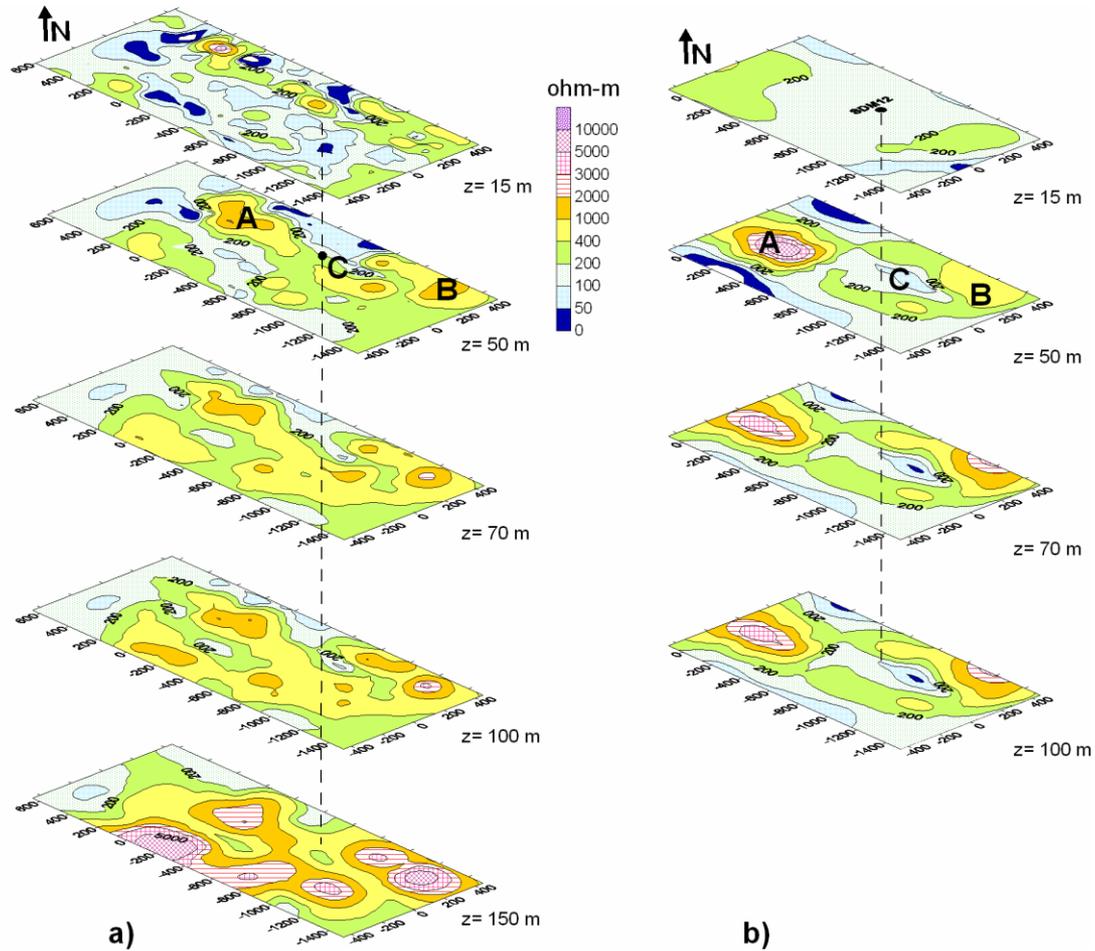
GEOFÍSICA



GEOFÍSICA

- A interpretação dos dados de resistividade é feita com recurso a modelação numérica assumindo-se um modelo simplificado para a variação da resistividade.
 - O modelo mais simples é o de **terreno estratificado (modelo 1D)** – assume-se que a resistividade eléctrica apenas varia com a profundidade. Este modelo é mais adequado para a interpretação das SEV.
 - Se houver vários perfis de dipolo-dipolo, devidamente espaçados, pode realizar-se a interpretação assumindo um **modelo 3D**
-

GEOFÍSICA



GEOFÍSICA

- Principal aplicação do método de resistividades:
 - Detecção de cavidade
 - Caracterização geotécnica
 - Prospecção de água subterrânea
 - Mapas litológicos
 - Prospecção de minério
 - Investigações arqueológicas
 - Detecção de plumas de contaminação e sua propagação
 - Monitorização de terrenos sujeitos a técnicas de melhoramento
 - Monitorização de processos subterrâneos (ex. recarga de aquíferos, intrusão salina, túneis)
-

GEOFÍSICA

- Prospecção sísmica
 - Reflexão
 - Refracção
 - Directo ou microssísmico
 - Materiais diferentes apresentam, em geral, diferentes velocidades de propagação das ondas elásticas
 - Consistem em produzir uma pancada e medir o tempo que o efeito demora a chegar aos receptores
 - A velocidade tende a aumentar em profundidade
-

GEOFÍSICA

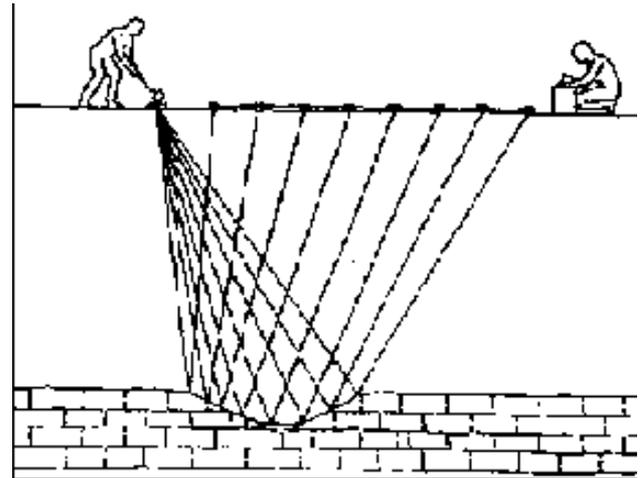
- Os métodos sísmicos baseiam-se na geração de ondas acústicas e na medição do tempo requerido para que estas ondas se propaguem da fonte de emissão até um conjunto de sensores (geofones ou hidrofones) dispostos à superfície ao longo de um perfil.
- Um equipamento de registro de dados (sismógrafo) capta os sinais recebidos pelos sensores e armazena-os em formato digital para posterior processamento e apresentação.
- A partir de sua geração, as ondas acústicas podem sofrer refrações ou reflexões nas interfaces entre dois meios, sendo que os tempos de trânsito e as velocidades de propagação das ondas nesses meios estão relacionados com a densidade, porosidade, composição mineralógica e propriedades elásticas dos materiais, além de fornecerem informações geológico-estruturais das rochas em profundidade.

GEOFÍSICA

Em Geotecnia a **Sísmica de Reflexão** é utilizada fundamentalmente em meios não consolidados.

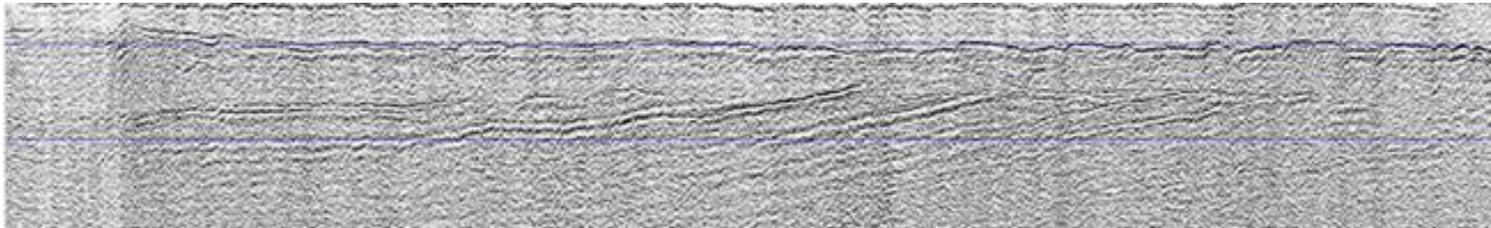
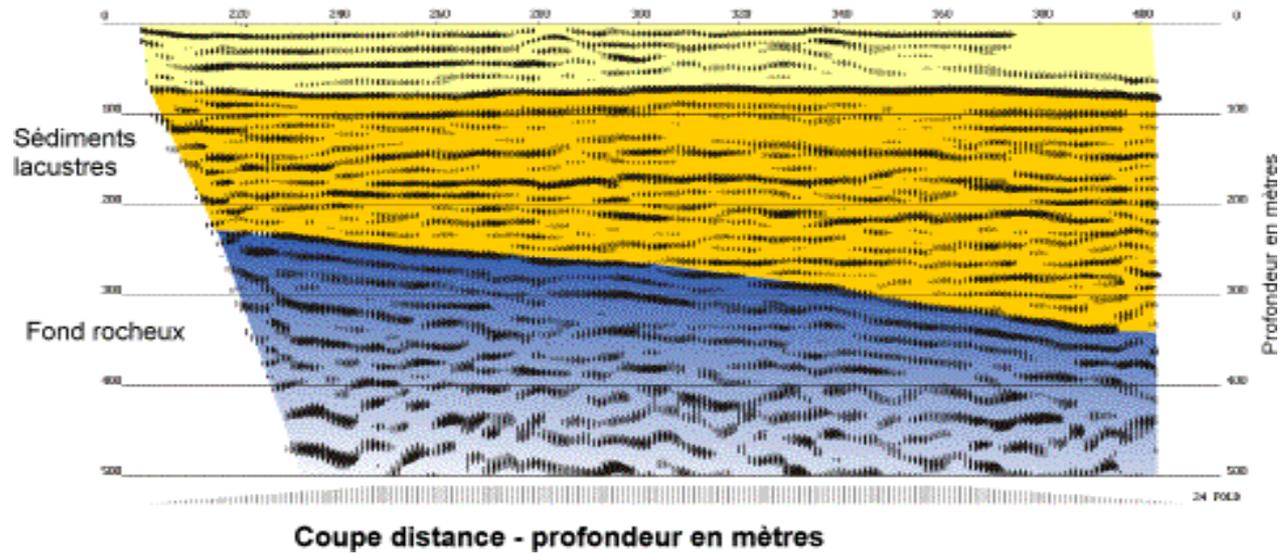
Mostra elevada resolução para a caracterização mecânica em meios pouco deformados.

A aplicação desta técnica tem como vantagem a possibilidade de obter a velocidade de propagação de ondas compressivas/corte.



GEOFÍSICA

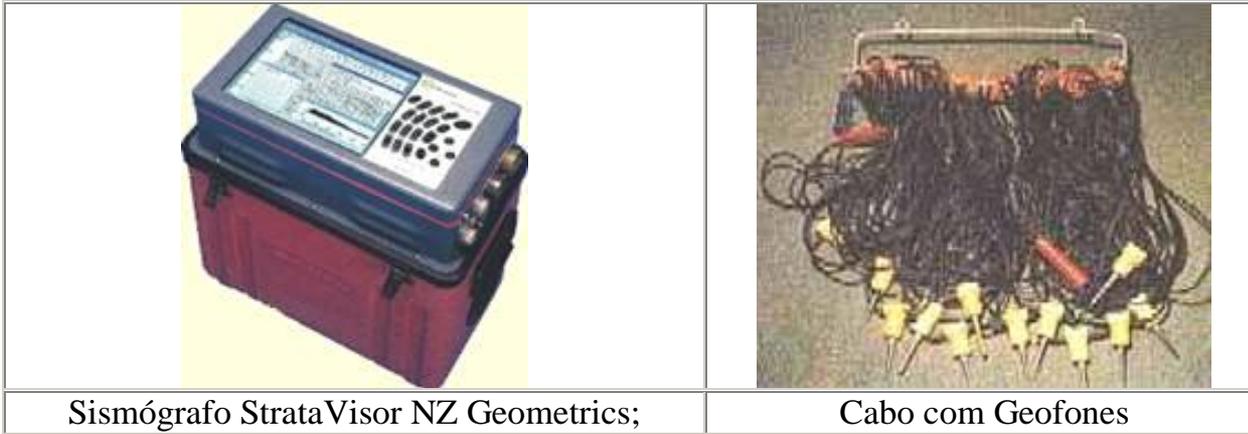
- Reflexão sísmica



GEOFÍSICA

- O método de **refracção sísmica** baseia-se na geração de ondas sísmicas (ondas P) que se propaga no terreno e se refracta em fronteiras de meios com **velocidades de propagação crescentes em profundidade**, e com características suficientemente contrastantes.
- A aplicação do método consiste na detecção de diferentes refractores em profundidade e na determinação das suas velocidades de propagação, através da obtenção dos tempos de percurso das ondas sísmicas refractadas em interfaces com suficiente contraste das respectivas velocidades de propagação. Um perfil de refracção sísmica é materializado na superfície do terreno, pela colocação de vários receptores de energia sísmica, designados por geofones, e afastados entre si de uma determinada distância constante ao longo de um alinhamento.
- A execução combinada de refracção de ondas compressivas (P) e de corte (S) permite estimar a distribuição dos coeficientes de Poisson e do módulo de rigidez máximo (ou módulo de distorção máximo).
- Os resultados devem ser confirmados por sondagens mecânicas.

GEOFÍSICA



GEOFÍSICA

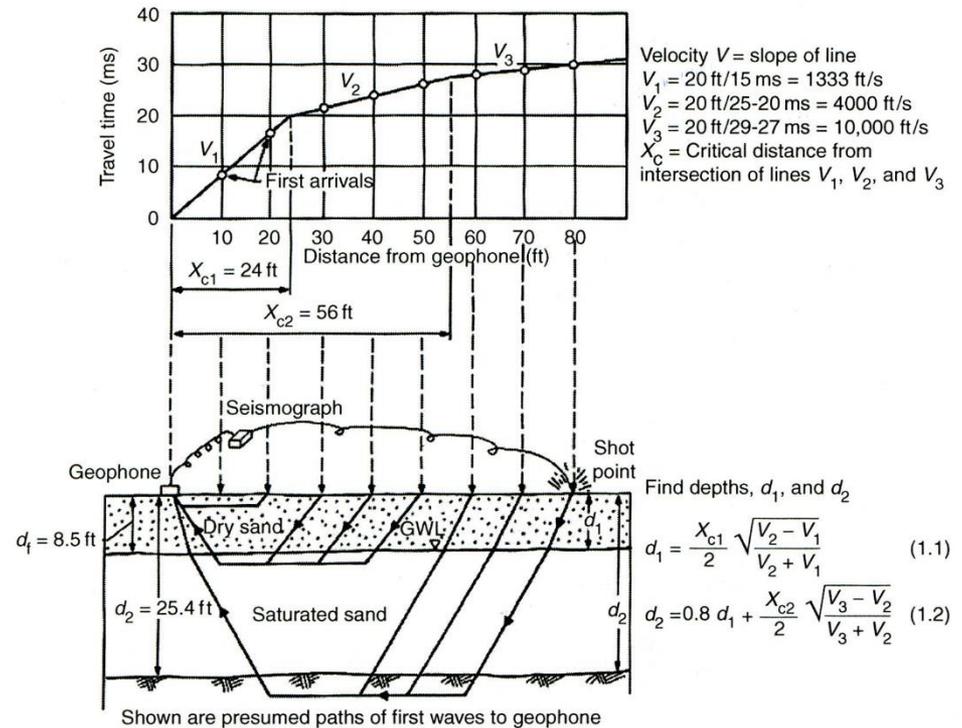
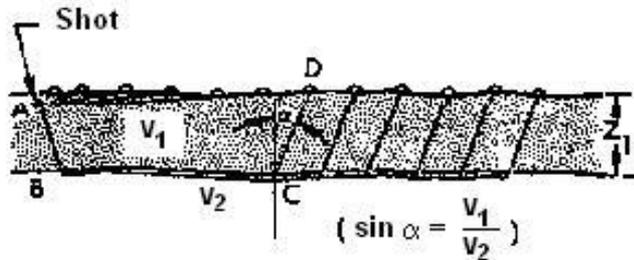
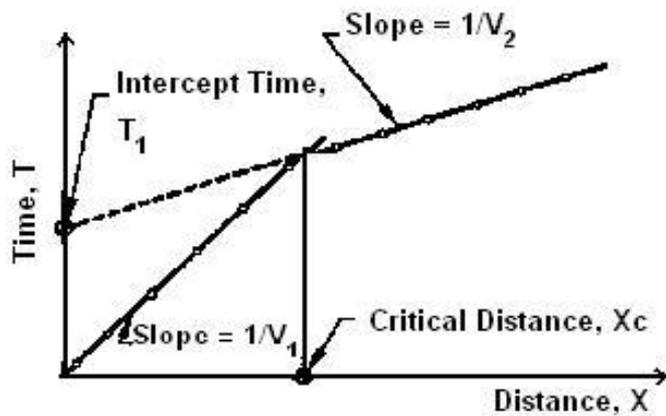
- A fonte de energia pode ser:
 - Uma pancada de martelo (para pesquisa superficial < 10m)
 - Um disparo
 - Explosivos, quando a profundidade ou a atenuação de energia é um factor importante
 - A profundidade de pesquisa é limitada pela máxima extensão possível para os cabos e pelas condições do disparo
 - Em geral, o cabo sísmico deve ter comprimento triplo da profundidade prevista para a prospecção

GEOFÍSICA

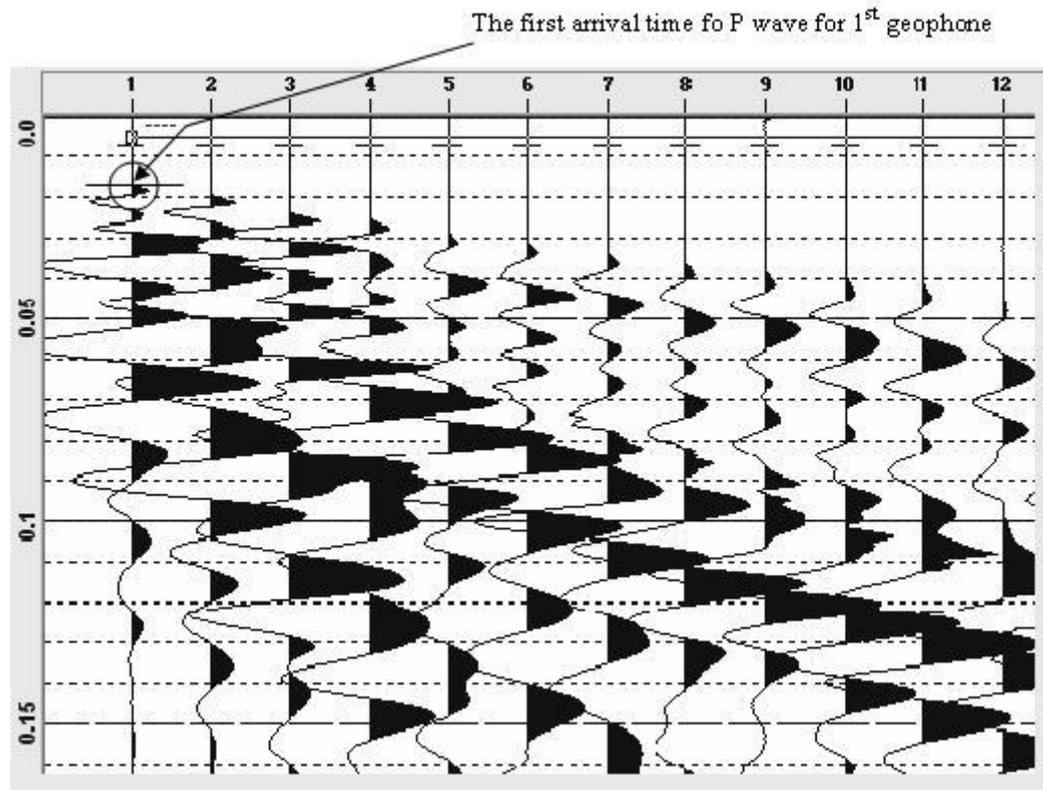
- Refracção sísmica
 - Permite determinar
 - Se o contacto entre formações de características diferentes é ou não horizontal
 - A espessura das formações
 - A ripabilidade
 - O módulo de elasticidade dinâmico, coeficiente de Poisson e módulo de rigidez (os módulos dinâmicos têm valores mais elevados do que os estáticos)
 - Pressupõe que a velocidade de propagação das ondas elásticas aumenta em profundidade
 - A partir da distância crítica as primeiras ondas a chegar ao receptor são as ondas refractadas

GEOFÍSICA

Tem por base a **lei de Snell**

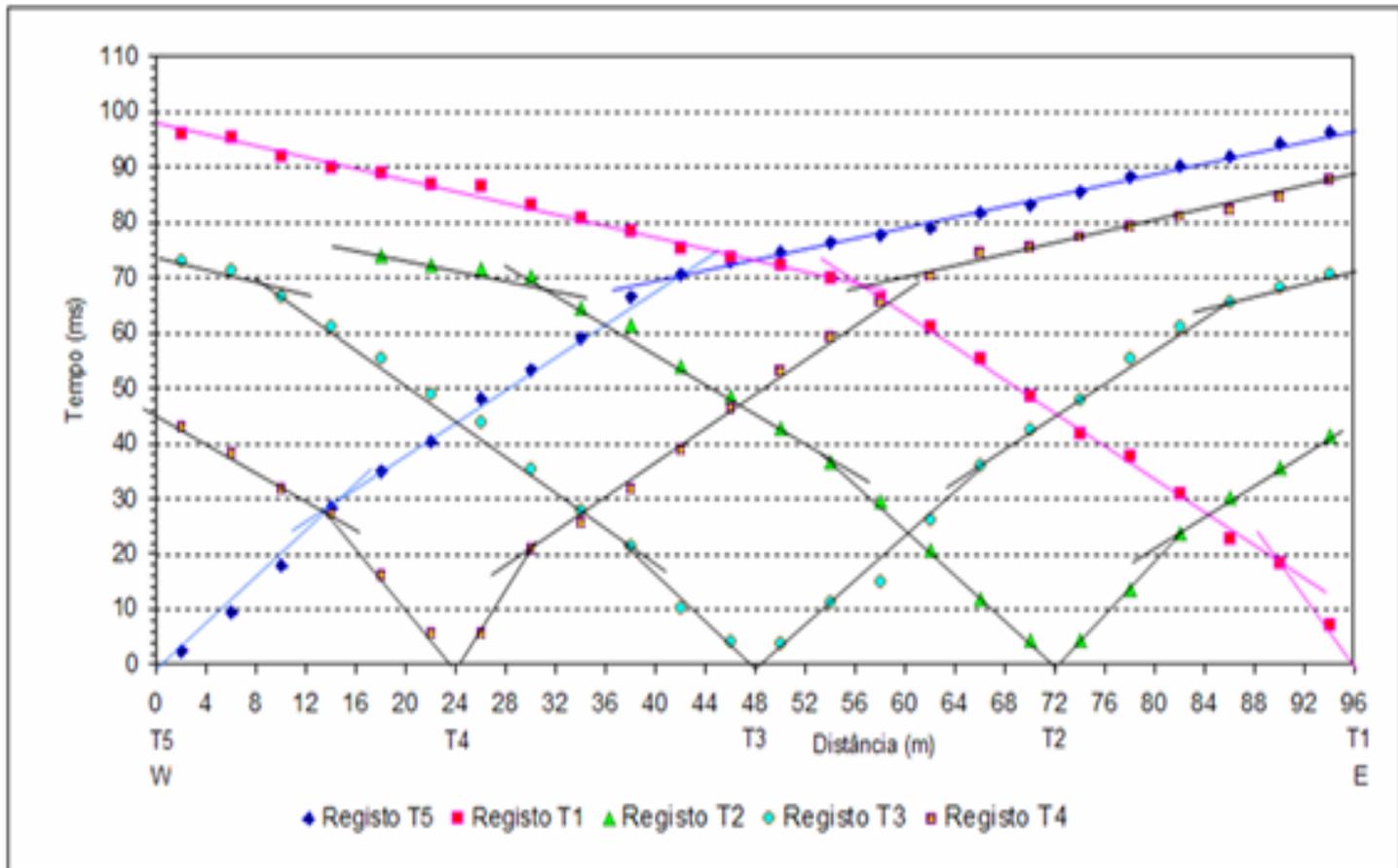


GEOFÍSICA

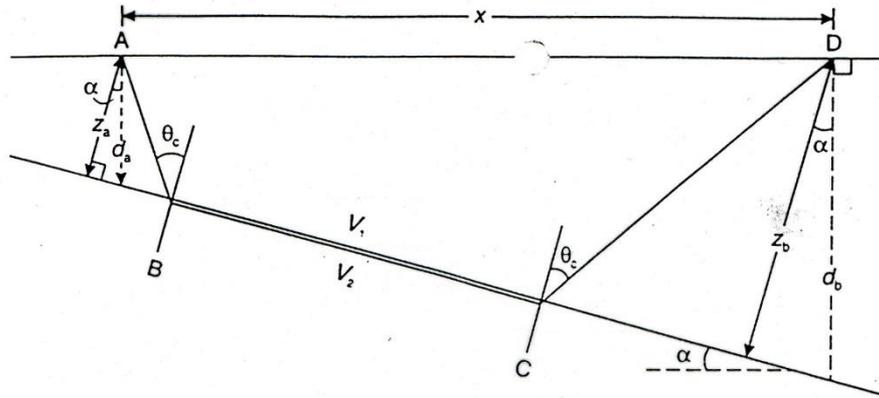


Tempo de chegada das ondas P a um equipamento sísmico com 12 canais

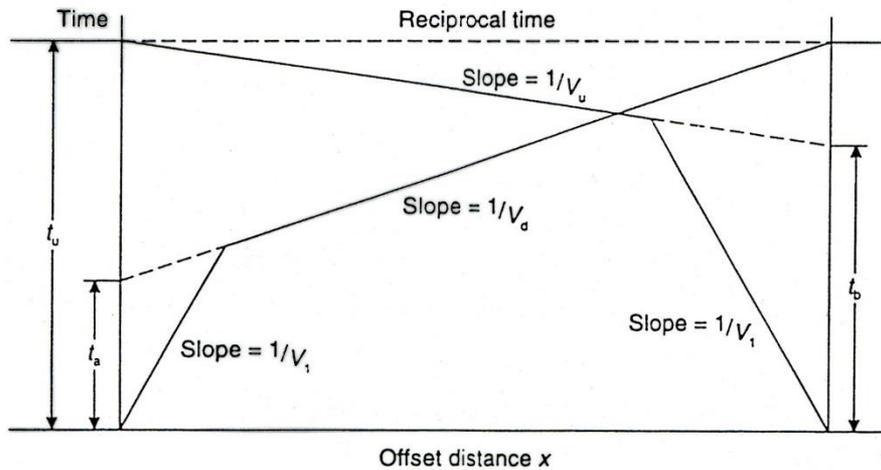
GEOFÍSICA



GEOFÍSICA



(B)



GEOFÍSICA

Velocidad de propagación de las ondas longitudinales en rocas

Roca sana	Velocidad de propagación de las ondas V_p (m/s)
Arenisca	1.400-4.200
Basalto	4.500-6.500
Caliza	2.500-6.000
Conglomerado	2.500-5.000
Cuarcita	5.000-6.500
Diabasa	5.500-7.000
Dolerita	4.500-6.500
Dolomía	5.000-6.000
Gabro	4.500-6.500
Gneiss	3.100-5.500
Granito sano	4.500-6.000
Lutita	1.400-3.000
Marga	1.800-3.200
Mármol	3.500-6.000
Pizarra	3.500-5.000
Sal	4.500-6.000
Yeso	3.000-4.000

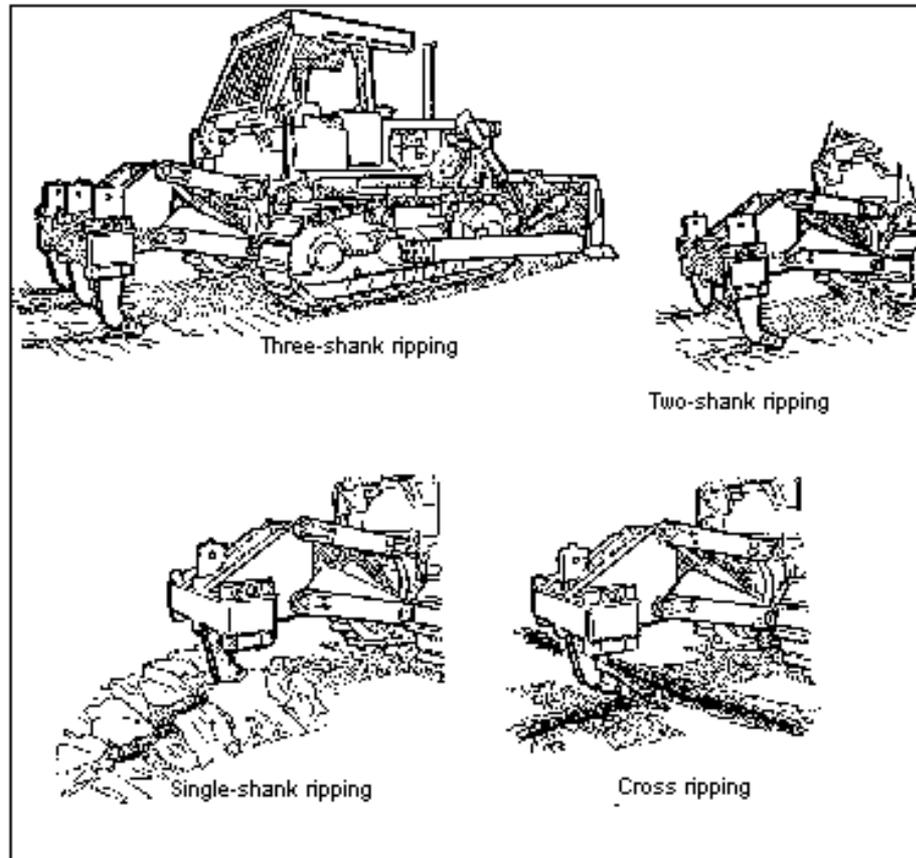
GEOFÍSICA

- Ripabilidade depende de:
 - Diaclasamento
 - Espessura
 - Natureza – dureza, grau de alteração, *fabric*
 - Sucessão dos materiais

 - Quanto menor a velocidade de propagação das ondas elásticas, maior a ripabilidade
 - Cartas de ripabilidade
-

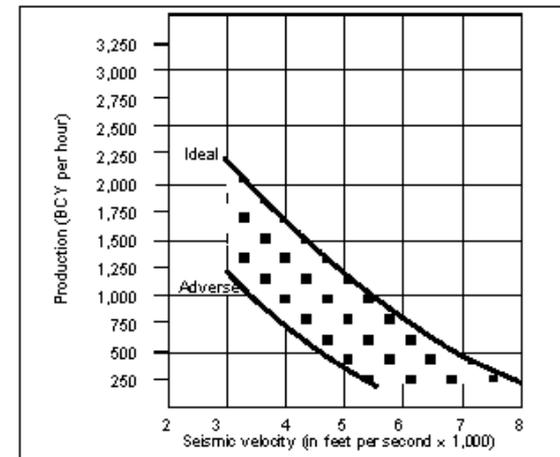
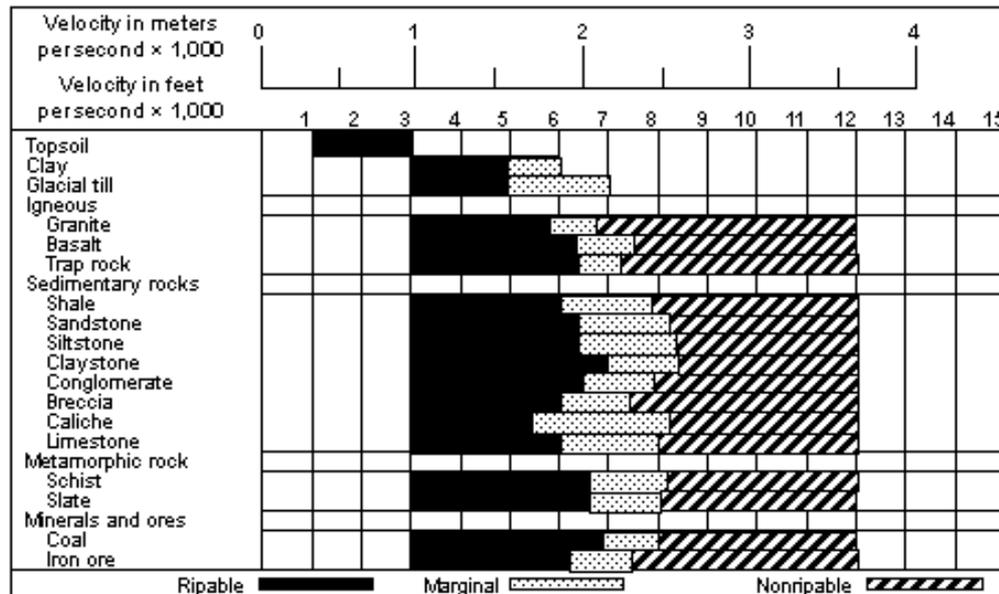
GEOFÍSICA

Utilização de *rippers*



GEOFÍSICA

- Carta de ripabilidade



GEOFÍSICA

- O ensaio "crosshole" permite determinar os módulos de elasticidade de maciços "in situ". Este ensaio consiste na geração de ondas sísmicas P e S num furo de sondagem e seu registro em um ou mais furos adjacentes
 - A fonte e os sensores devem estar no mesmo nível de investigação. A norma ASTM D4428 apresenta os detalhes para execução desses ensaios.
 - Exemplo de aplicação: Identificação de plumas de contaminação.
-

GEOFÍSICA

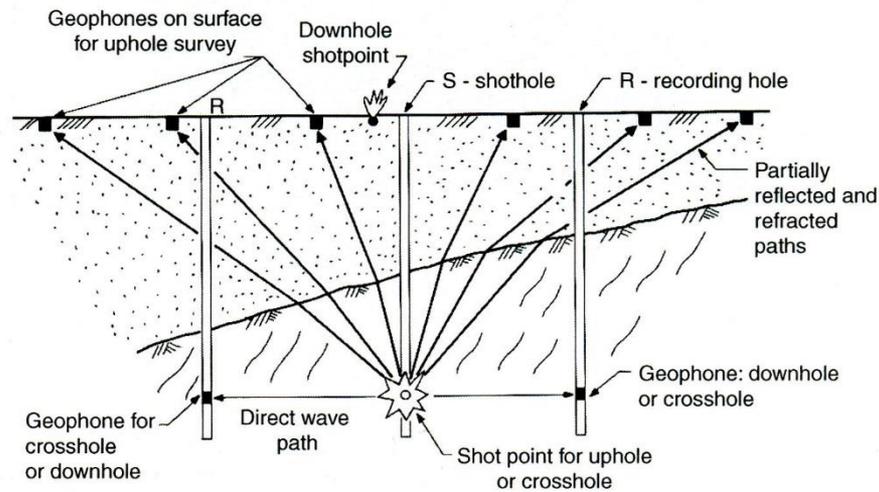
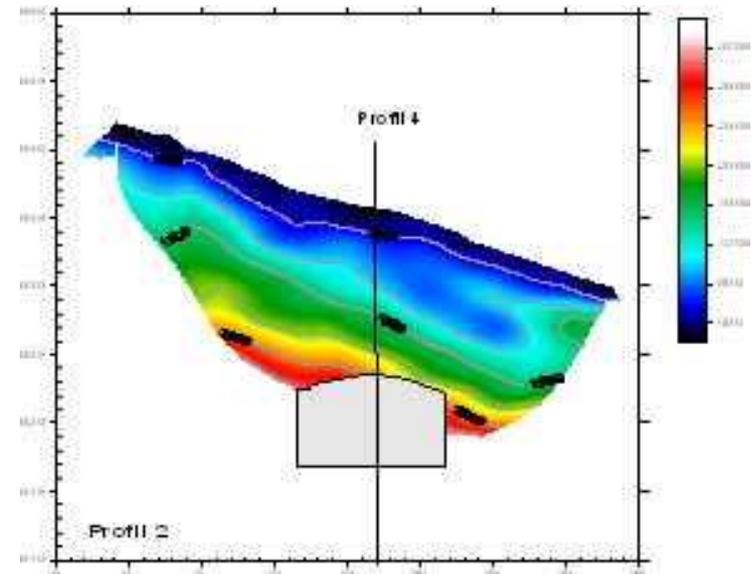
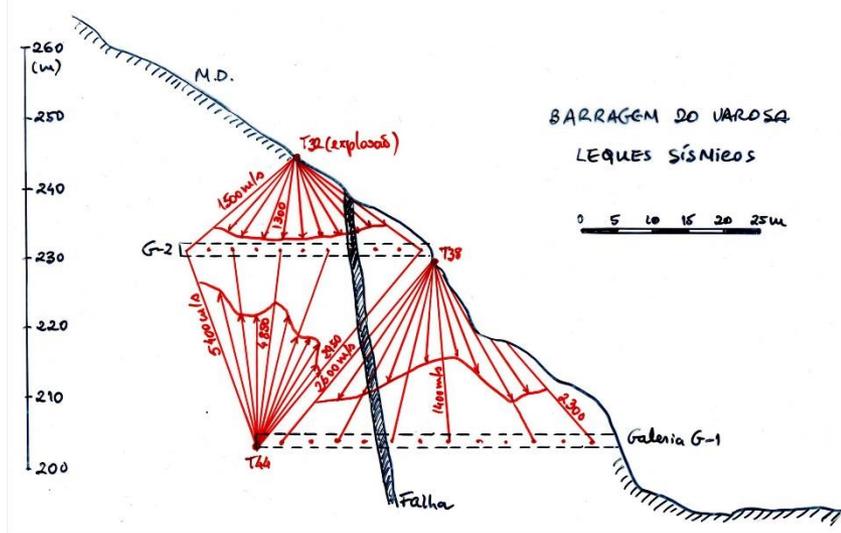


FIGURE 1.27

Direct seismic methods to measure dynamic properties of soils and rocks, and assess rock mass quality. A single borehole is used in the uphole or downhole survey; array of usually four borings is used in the crosshole survey. In uphole surveys, the geophones should be set on rock. If possible, to obtain measurements of rock quality.

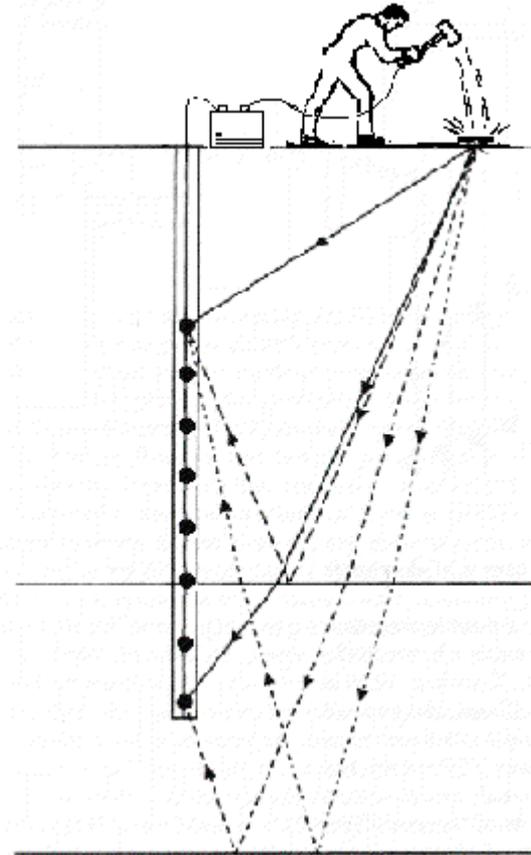
GEOFÍSICA

- Ondas directas
 - Tomografia



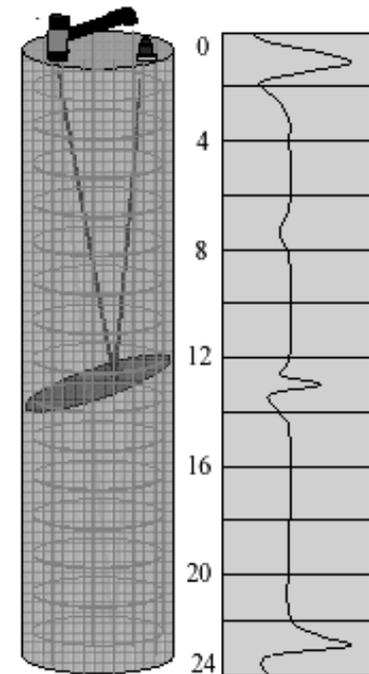
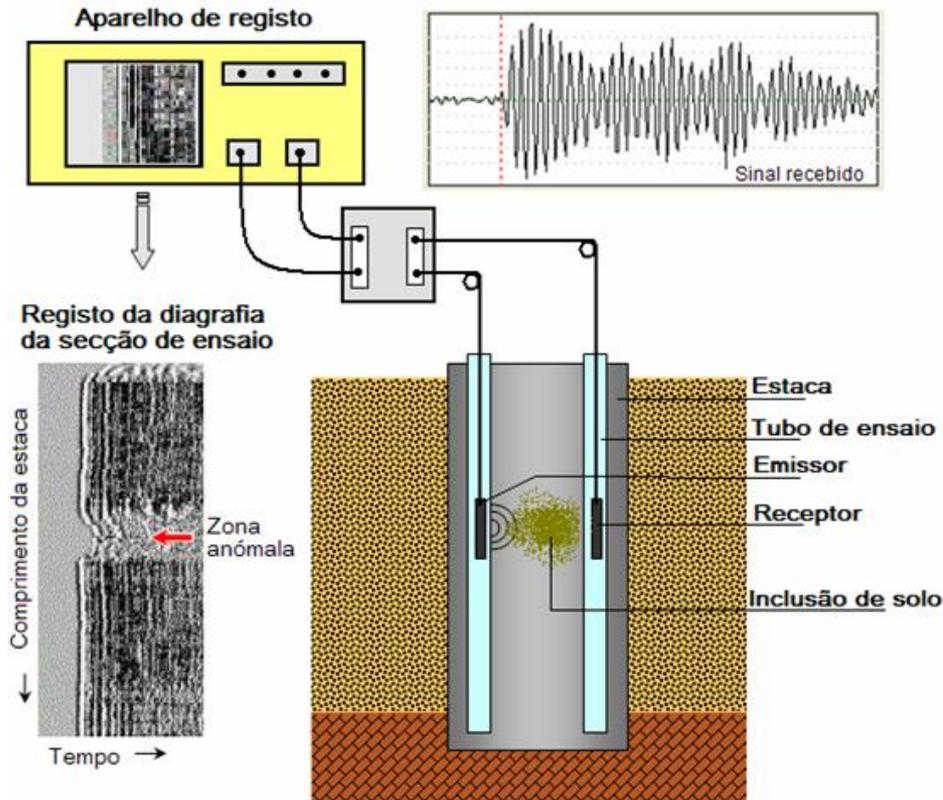
Downhole

- O método downhole constitui o método mais simples e económico dos métodos sísmicos em sondagens, uma vez que requerem apenas 1 furo de sondagem.
- A energia sísmica é gerada à superfície a uma distância determinada da boca do furo
- Os geofones são colocados ao longo do furo
- Podem detectar-se as ondas S com um geofone triaxial que se desce no furo
- O registo de ondas P e S permite traçar curvas tempo-distância
- Podem ser calculadas as propriedades elásticas



GEOFÍSICA

Exemplo de aplicação:
integridade de estacas



Velocidade de propagação entre pares de tubos em estruturas de betão (crosshole sonic logging CSL ou crosshole acoustical testing)

DIAGRAFIAS

- ❑ Realizadas ao longo dos furos de sondagem, permitindo diminuir os inconvenientes da furação sem carotagem
- ❑ Registos contínuos ao longo dos furos de sondagem
- ❑ Em pesquisa de água para uso industrial ou municipal (devido ao custo) e em furos profundos
- ❑ Podem ser:
 - Temperatura
 - Salinidade
 - Geométricas – inclinação dos estratos, inclinação e orientação da sondagem, diâmetro do furo (*caliper*)
 - Sónicas
 - Visuais – televisão, periscópio
 - Magnéticas
 - Eléctricas:
 - ❑ Polarização espontânea, resistividade, indução, *laterolog*
 - Radioactivas:
 - ❑ Gamma, gamma-gamma, neutrões

DIAGRAFIAS

- Método eléctrico
 - ❑ Em furos não entubados
 - ❑ Resistividades – normais curtas / normais longas / sondas laterais
 - ❑ *Microlog* – normal / inverso
 - ❑ Potencial espontâneo (*SP self potential*)
 - ❑ Por indução

Natureza	SP	Resistividade
Margas e argilas	Nulo	Baixa
Areias com água doce	Moderado	Elevada
Areias com água salgada	Elevado	Baixa
Arenitos cimentados	Baixo	Elevada
Calcários	Baixo	Elevada

DIAGRAFIAS

- Método eléctrico:
 - A) Resistividade
 - Sonda normal – sonda de potencial: desce no furo elétrodo A, M (e B)
 - Grande : $AM = 1,60$ m
 - Pequena: $AM = 0,40$ m
 - Curva simétrica
 - Sonda lateral ou inversa – sonda de gradiente: desce no furo A, M e N
 - Distância MN pequena relativamente a AO
 - Maior penetração no terreno
 - Pode não detectar camadas finas
 - Curva assimétrica

DIAGRAFIAS

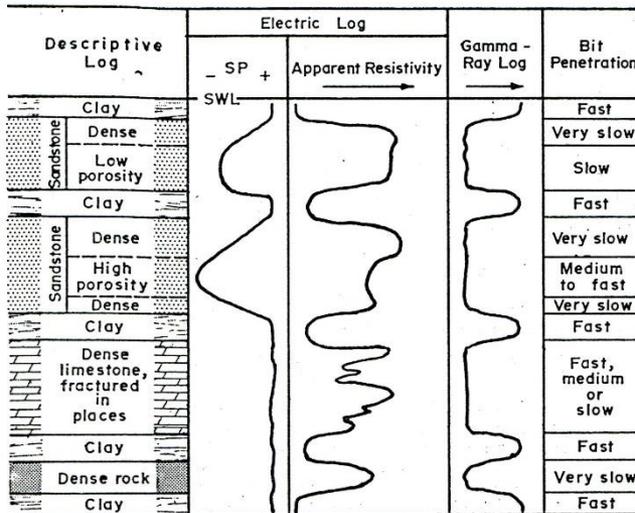


Figure 130. Artificial geophysical logs of consolidated rock strata separated by clay beds.

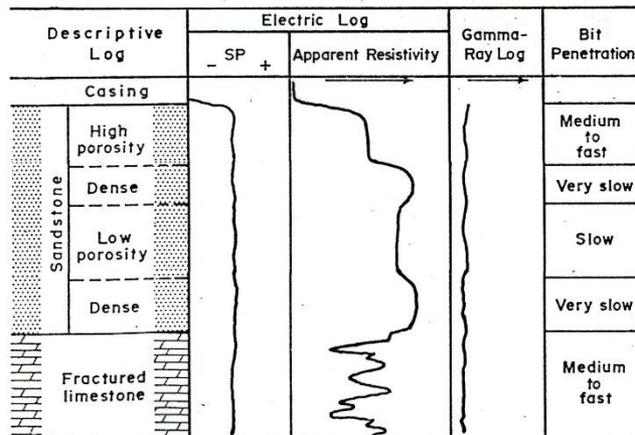


Figure 131. Artificial electric and gamma-ray logs of consolidated rock strata. Porous strata are fresh-water aquifers. In the absence of clay beds, gamma-ray log shows nothing.

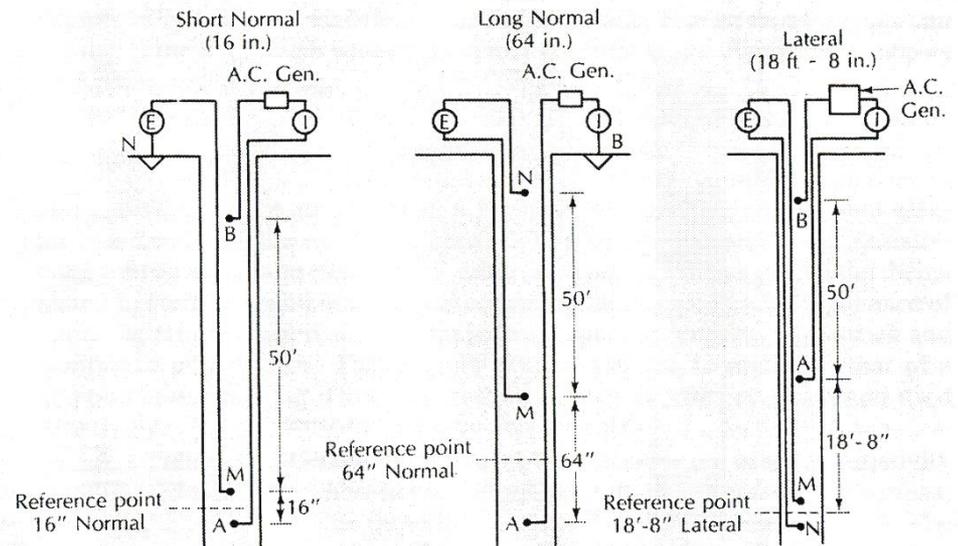


FIGURE 13.23 Electrode configuration for various resistivity logging devices.

DIAGRAFIAS

- B) Microlog
 - Para camadas delgadas pouco resistentes
 - Cake com poucos milímetros de espessura
 - Pequena penetração
 - Usa 3 eléctrodos muito próximos
 - Micronormal – 0,25 m (B-M-A)
 - Microinversa – 0,37 m (A-M-N)

DIAGRAFIAS

- C) Potencial espontâneo
 - Tem origem no contacto entre meios de natureza diferente (formações geológicas e fluido de furação)
 - Em furos não entubados e cheios de água ou lama
 - Permite distinguir formações permeáveis de impermeáveis
 - Usa eléctrodos M e N
 - Usa potencial da argila como referência (camadas porosas com desvio para esquerda)
 - Permite avaliar espessura da camada permeável

DIAGRAFIAS

- Métodos eléctricos fornecem indicação quanto a:
 - Qualidade química (se lama tem mais sais do que a água subterrânea, relação entre pequena normal e grande normal)
 - Localização de entrada de água
 - Litologia
 - Porosidade
-

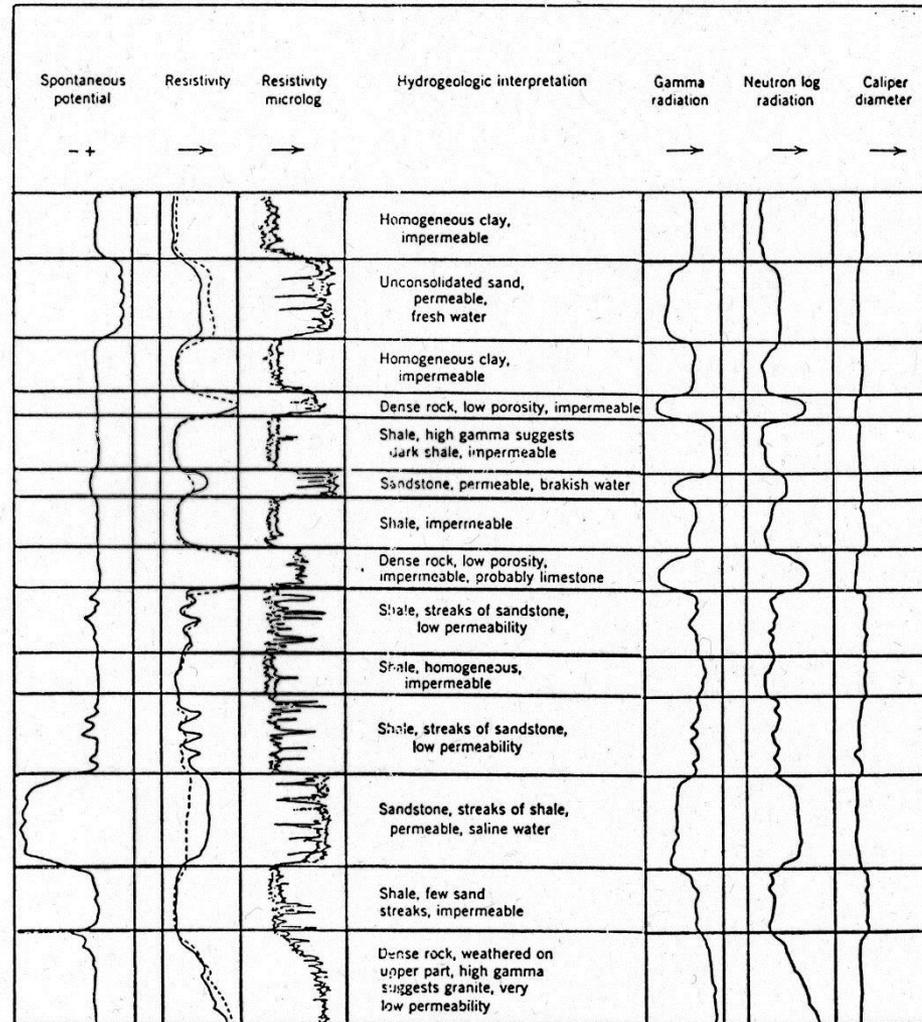
DIAGRAFIAS

- Diagrafias radioactivas
 - Furos podem ser entubados
 - Não são afectadas pela lama de furação
 - Necessitam precauções especiais
 - Medem número de desintegrações num período de tempo
 - Raios gamma – radioactividade natural (potássio 40, urânio 238, tório 232);
 - aumenta com argila, feldspatos, fosfatos
 - Neutrões (PbBe) – absorção de neutrões de hidrogénio está relacionada com existência de água
 - aumenta com a porosidade
 - Gamma-gamma (Cobalto 60)

DIAGRAFIAS

- Diagrafias radioactivas:
 - Permitem detectar camadas porosas por trás do entubamento
 - Localiza camadas finas de areia em margas e argilas
 - Detecta substâncias minerais
 - Depende de materiais argilosos
 - Interpretação:
 - Argila – picos radiactivos, não responde aos neutrões
 - Calcários, areias, arenitos – fraca radiactividade, respondem a neutrões
 - Reactividade natural é:
 - Fraca – calcário, dolomite, arenito, salgema
 - Forte – argila, marga, xisto, bentonite

DIAGRAFIAS



A combination of six common logs of a hypothetical test hole showing the hydrogeologic interpretations.

DIAGRAFIAS

- Termometria
 - A temperatura do furo depende de:
 - Gradiente geotérmico
 - Presença de entubamento, lama e cimentação
 - Da condutividade das diferentes rochas
 - Pode ser feito em furos entubados
 - Caliper
 - Mede diâmetro de furos sem entubamento
-

DIAGRAFIAS

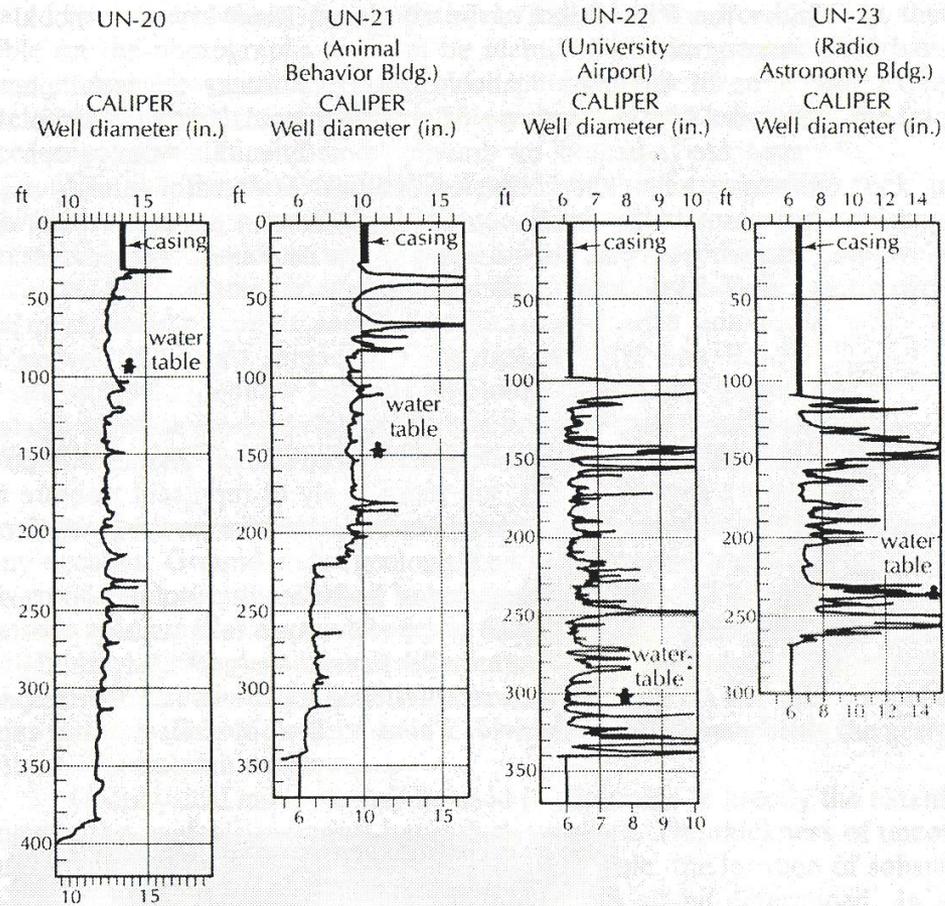


FIGURE 13.4 Caliper logs of wells in an area of carbonate rocks in central Pennsylvania. Wells UN-20 and UN-21 were drilled in interfracture areas; Wells UN-22 and UN-23 were located on fracture traces. Source: L. H. Lattman and R. R. Parizek, *Journal of Hydrology* (Elsevier Scientific Publishing Company) 2 (1964): 73–91. Used with permission.

DIAGRAFIAS

TABLE 13.1 Summary of log applications

Required Information on the Properties of Rocks, Fluid, Wells, or the Ground-Water System	Widely Available Logging Techniques That Might Be Utilized
Lithology and stratigraphic correlation of aquifers and associated rocks	Electric, sonic, or caliper logs made in open holes; nuclear logs made in open or cased holes
Total porosity or bulk density	Calibrated sonic logs in open holes, calibrated neutron or gamma-gamma logs in open or cased holes
Effective porosity or true resistivity	Calibrated long-normal resistivity logs
Clay or shale content	Gamma logs
Permeability	No direct measurement by logging. May be related to porosity, injectivity, sonic amplitude
Secondary permeability—fractures, solution openings	Caliper, sonic, or borehole televiewer or television logs
Specific yield of unconfined aquifers	Calibrated neutron logs
Grain size	Possible relation to formation factor derived from electric logs
Location of water level or saturated zones	Electric, temperature, or fluid conductivity in open hole or inside casing, neutron or gamma-gamma logs in open hole or outside casing
Moisture content	Calibrated neutron logs
Infiltration	Time-interval neutron logs under special circumstances or radioactive tracers
Direction, velocity, and path of ground water flow	Single-well tracer techniques—point dilution and single-well pulse; multiwell tracer techniques
Dispersion, dilution, and movement of waste	Fluid conductivity and temperature logs, gamma logs for some radioactive wastes, fluid sampler
Source and movement of water in a well	Injectivity profile; flowmeter or tracer logging during pumping or injection; temperature logs
Chemical and physical characteristics of water, including salinity, temperature, density, and viscosity.	Calibrated fluid conductivity and temperature in the well; neutron chloride logging outside casing; multi-electrode resistivity
Determining construction of existing wells, diameter and position of casing, perforations, screen	Gamma-gamma, caliper, collar, and perforation locator; borehole television
Guide to screen setting	All logs providing data on the lithology, water-bearing characteristics, and correlation and thickness of aquifers
Cementing.	Caliper, temperature, gamma-gamma; acoustic for cement bond
Casing corrosion	Under some conditions, caliper or collar locator
Casing leaks and/or plugged screen	Tracer and flowmeter

Source: W. S. Keys and L. M. MacCary, "Application of Borehole Geophysics to Water-Resources Investigations," in *Techniques of Water-Resources Investigations*, U.S. Geological Survey, 1971, Book 2, Chap. E1.

DIAGRAFIAS

- Conclusão:
 - ❑ Inclinação dos estratos: televisão, periscópio, microdispositivo eléctrico
 - ❑ Diâmetro: caliper
 - ❑ Porosidade: Gamma-gamma, neutrões, resistividade
 - ❑ Grau de saturação: resistividade, neutrões
 - ❑ Fracturação: resistividade
-