



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 1435A -

ANNO: 2015

A P P U N T I

STUDENTE: D Angelo

MATERIA: Geofisica Applicata, Prof.Godio

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**



Principles of applied electromagnetism in geophysics

Alberto Godio

DIATI – Politecnico di Torino



Principles

- Electromagnetic (EM) methods make use of the response of the ground to the propagation of the electromagnetic fields which are composed of alternating electric intensity and magnetic force.
- An electromagnetic field may be defined in terms of four vector functions E , D , H and B , where:

SONO 4 CAMPI, TRA LORO CORRELATI DALLE RELAZIONI SOTTO, PER MEZZO DEI PARAMETRI ELETTROMAGNETICI COSTITUTIVI $\rightarrow E, D, H, B$

E is the electrical field in V/m.

D is the dielectric displacement in Coulomb/m².

H is the magnetic field intensity in A/m.

B is the magnetic induction in Tesla.

INDIVIDUANO
CASI PROPRI
IL CAMPO EM

$$D = \epsilon E$$

$$B = \mu H$$

$$J = \sigma E$$



Principles

Maxwell's equations can be combined into a wave equation in both the **E (electrical)** field and **H (magnetic)** field

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0$$

Maxwell equations

FENOMENO DI ONDA PIANA (BIG DISTANZA DA SORGENTE E.M.)
 => 1D, FENOMENO NON DIMENSIONALE
 => POSSO TRASCURARE PROPAGAZIONE X E Y, SEMPLIFICO EQ MAXWELL

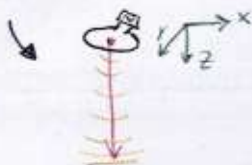
SONO FONDAMENTI DI FISICA, FANNO CAPRE COME C.E.M. SI PROPAGA N SPAZIO.

MAXWELL EQ = CORRE LA NOTAZIONE LOCO VARIABILI SPAZIO E TEMPO.

Plane wave propagation (1D) along z-axis

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} - \mu\sigma \frac{\partial E_x}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial z^2} - \mu\sigma \frac{\partial H_x}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 H_x}{\partial t^2} = 0$$



Solution for 1D harmonic (sinusoidal signal)

For a harmonic signal, expressed as follow

$$H_x = H_x(\omega, z) e^{-i\omega t} \quad E_x = E_x(\omega, z) e^{-i\omega t}$$

$$\omega = 2\pi f$$

The solution is

$$\frac{d^2 H_x}{dz^2} + \left(\underbrace{\omega^2 \mu\epsilon}_{\uparrow} + \underbrace{i\omega\mu\sigma}_{\uparrow} \right) H_x = 0 \quad \frac{d^2 E_x}{dz^2} + \left(\underbrace{\omega^2 \mu\epsilon}_{\uparrow} + \underbrace{i\omega\mu\sigma}_{\uparrow} \right) E_x = 0$$

- The first term in parentheses gives the relative contribution of **conduction currents**.
- The second term in parentheses corresponds to **displacement currents**

→ SOLUTION FOR 1D HARMONIC (SINUSOIDAL SIGNAL)

SE IL SEGNALE È SINUSOIDALE (ONDA GENERATA DA SEGNALE CONTINUO, CON UNA CERTA f)

⇒ POSSO CERCARE SOLUZIONI SEMPLIFICATE

LE SOLUZIONI PER H E E SONO MOLTO SIMILI.

EQ. D'ONDA ONDE SISMICHE = CORRELA SPAZIO E T CON PARAMETRO v DI PROPAGAZIONE, CHE È LEGATA AI PARAMETRI MECCANICI DEI MATERIALI.

⇒ RICAVALO 1 EQ. SIMILE A QUESTE ELMAGN, + UN TERMINE DI VELOCITÀ CON DERIVATA 2°.

QUI: $\begin{cases} \omega = 2\pi f \\ H_x = \text{ESPRIME VARIAZ SINUSOIDALE} \rightarrow \text{QUI C'È VARIABLE DEL TEMPO.} \\ \frac{d^2 H_x}{dz^2} = \text{QUI C'È VARIABLE SPAZIO} \end{cases}$

SPAZIO E TEMPO SONO CORRELATE DAL TERMINE $\text{TRA}(\dots) \rightarrow (\omega^2 \mu \epsilon + i \omega \mu \sigma)$

TALE TERMINE È DIRETTAMENTE CORRELATO AI PARAMETRI ELMAGN COSTITUTIVI.

HO 2 EQ, AVENDO 2 TERMINI CHE SI PROPAGANO SIMULTANEAMENTE.

TERMINE $\text{TRA}(\dots)$ È IN UN CERTO SENSO SIMILE AD UNA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEL C.E.M.

CAMPO SORGENTE = ARMONICA CHE OSCILLA NEL T.

⇒ DEVO TENER CONTO DELLA SUA f DI OSCILLAZIONE

⇒ NE TENGO CONTO IN ω .

QUINDI, MODALITÀ CON CUI C. ELMAGN SI PROPAGA DIPENDE DA f + 3 PARAMETRI COSTITUTIVI.

(\dots) = DIVISIBILE IN 2 PARTI:

- COMPARE ϵ ⇒ SONO 2 CONTRIBUTI CHE PESANO IN MODO f W FUNZIONE DI ω .
- COMPARE σ

⇒ POSSIAMO DEFINIRE UNA FREQUENZA DI TAGLIO → CUTOFF:

$\begin{cases} \text{SOTTO} = \text{PREVALE DIFFUSIONE} \Rightarrow \text{CONTROLLATA DA } \sigma \\ \text{SOPRA} = \text{PREVALE PROPAGAZ ONDOSA} \Rightarrow \text{CONTROLLATA DA } \epsilon, \epsilon' \times \text{POLARIZZAZ} \end{cases}$

MALE: $|\omega^2 \mu \epsilon| \leftrightarrow |\omega \mu \sigma| \rightarrow \text{TRA LORO, LE 2 PARTI SONO SFASATE DI } 90^\circ \text{ DAL TERMINE } i$

$\begin{cases} \mu \approx \mu_0 \Rightarrow \text{LO TRASCURO.} \\ \text{SEMPLIFICO } \omega. \end{cases}$

⇒ $|\omega \epsilon| \leftrightarrow |\sigma|$

• SE $\sigma \gg \omega \epsilon \Rightarrow$ TRASCURO IL 1° TERMINE, PREVALE IL 2°

⇒ CAMPO SI PROPAGA × CON INDEZ ELETTRICA.

DETTO "CAMPO DIFFUSIVO", MOLTO SIMILE AL CONTATTO GALVANICO

• SE $\sigma \ll \omega \epsilon$

⇒ PREVALGONO TERMINI LEGATI ALLA PERMETTIVITÀ ELETTRICA

⇒ CAMPO DI TIPO PROPAGATIVO

COMPARE ω :

↑ $\omega \Rightarrow$ ↑ POSSIBILITÀ DI EXE IN CONDIZ DI PROPAGAZ

MATERIALI NATURALI:

$\omega > 1 \div 10 \text{ MHz} \rightarrow$ FREQ. DI TAGLIO TRA I 2 TIPI DI CAMPO.

⇒ FACILE EXE IN CONDIZ PROPAGATIVE.

IL VALORE PRECISO DIPENDE DA σ E $\epsilon \Rightarrow$ DAL TIPO DI MATERIALE:

• MATERIALE MOLTO RESISTIVO (ROCCIA COMPACTA)

$\sigma = 10^{-3} \text{ S/m}$
 $\omega = 10^9 \text{ Hz}$ ⇒ $\sigma \ll \omega \epsilon$ PROBABILMENTE

• MATERIALE MOLTO CONDUTTIVO (ARGILLA)

$\sigma = 1 \text{ S/m}$
 $\omega = 100 \text{ Hz}$ ⇒ $\sigma > \omega \epsilon$, FACILE

ESEMPIO: ARGILLA

$\sigma = 1 \text{ S/m}$
 $f = 1000 \text{ Hz}$
 $\epsilon \approx 10 \epsilon_0$
 $(\epsilon_0 \approx 9 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}})$

DEVO CONFRONTARE:

$\sigma \leftrightarrow 2\pi f \cdot \epsilon$

$1 \leftrightarrow 2\pi \cdot 10^3 \cdot (10 \cdot 10^{-11})$

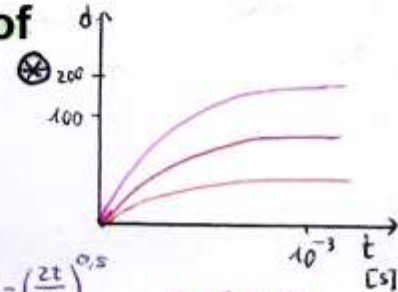
$1 \leftrightarrow 2\pi \cdot 10^{-6}$

⇒ $\sigma > 2\pi f \epsilon$

⇒ CONDIZ DI CORRENTE

Propagation of e.m field in natural media

- At low frequency (below 1 MHz) the propagation is a **diffusive process** (slow...)
- At high frequency (radio frequency, above 1 MHz), the propagation is due to polarisation effects at different scale (ionic, molecular or atomic); the **wave propagation** can be approximated with the same principle of seismic propagation (fast...)
- Attenuation of the e.m. field is related to the electrical conductivity of the material; it increases as electrical conductivity of the medium increase (**concept of skin depth**) \otimes VAI 46



$\sigma_1 = 0,01 \text{ S/m}$
 $\sigma_2 = 1 \text{ S/m}$
 $\sigma_3 = 10 \text{ S/m}$

SI VEDE CHE LA V E' PROPRIO LEGATA AL TERMINE CHE C'ERA NELL'EQ.
 ORD: $V \sim 10^5 \div 10^6 \rightarrow$ SE $\sigma \sim 10 \text{ } \Omega \cdot \text{m} \Rightarrow$ ARGILLA, MATERIALE ABB CONAUCTIVO
 \Rightarrow DIFFUSIONE E' MECCANISMO INTERMEDIO TRA V PROPAG ONDE ELASTICHE
 E V PROPAG RADIOFREQUENZE.
 \Rightarrow E' NECESSARIO X DIFFONDERE E' \rightarrow X T X POLARIZZAZ.
 DISTANZA X GERSA DAL C.E. DIFFUSIVO E' LEGATAA TUL CON LA RELAZ: $d = \left(\frac{2t}{\sigma\mu}\right)^{0,5}$
 \rightarrow VARIA DA 0,001 S A 1 S, E LA d VARIA W QUEL MODO.
 LA VELOCITA' VARIA NEL T \rightarrow DIMINUISCE, X QUESTI TEMPI.
 IN QUESTI ESEMPI:



$\mu = \mu_0 \Rightarrow$ VALGONO QUESTI GRAFICI
 $\uparrow \sigma \Rightarrow \downarrow v$ (E ALDENOT) \otimes

POLITECNICO DI TORINO

Diffusion velocity

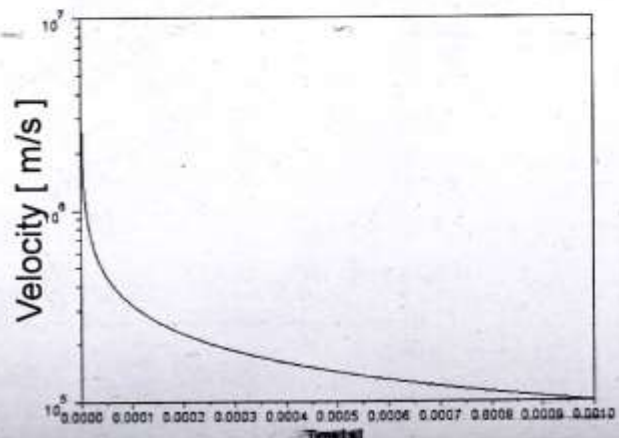
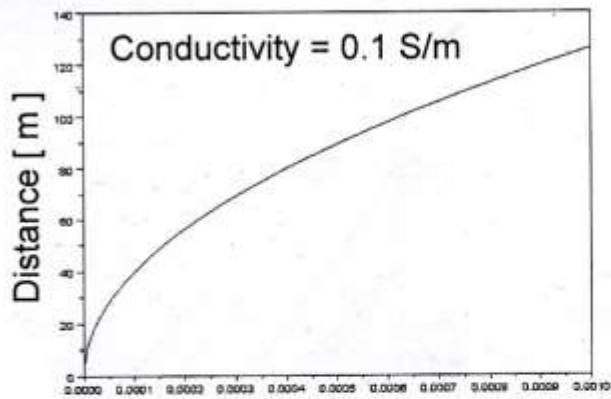
- In a isotropic homogeneous medium (at low frequency limit), the electrical field at the time t propagates at a distance from the source given as:

$$d = \left(\frac{2t}{\sigma\mu}\right)^{0.5}$$

- The **diffusion velocity** of the electromagnetic field is given

$$v = 2(\pi\sigma\mu t)^{-0.5}$$

- where σ - conductivity and μ is the magnetic permeability

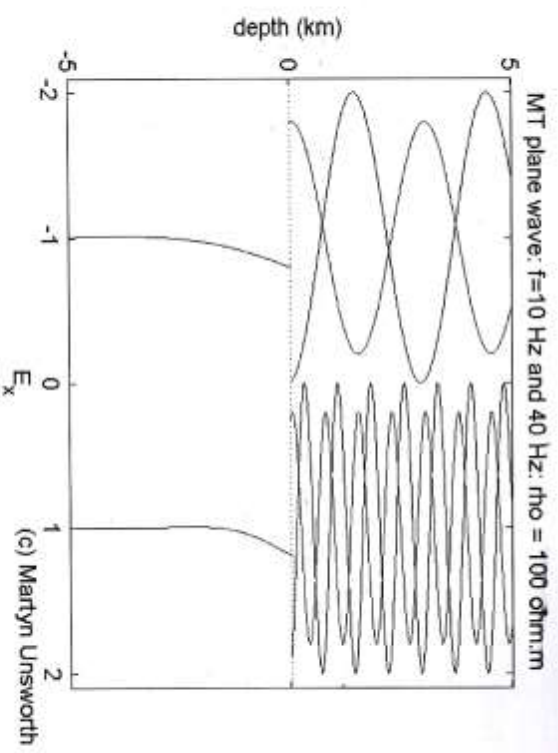


Skin depth

The depth of investigation depends on the adopted frequency and the conductivity distribution of the subsoil; the skin depth defines a conventional depth of investigation:

$$\delta = \left(\frac{2}{\omega \mu \sigma} \right)^{0.5} \approx 503 \cdot (1/f\sigma)^{0.5}$$

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, f is the frequency in Hz,
 σ - electrical conductivity in S/m
 μ - magnetic permeability H/m



These EM waves travel downwards (blue) to the Earth's surface and most of the energy is reflected upwards (red). Some energy enters the Earth and diffuses downwards. The depth of penetration in the Earth is controlled by the skin depth phenomena. The depth of penetration decreases as the EM signal frequency increases.

Propagation in a layered medium

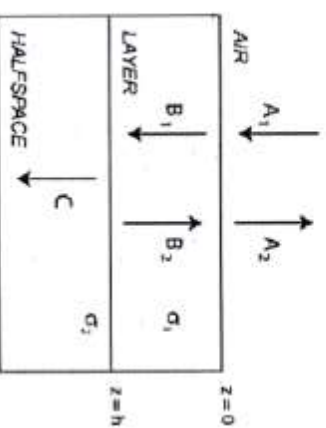
Assume a plane EM wave with angular frequency ω and amplitude A_1 , hits the ground at normal incidence.

The electric field is polarized in the x direction, and the magnetic field is polarized in the y-direction.

At the Air-Earth interface part of energy is reflected back in to the atmosphere (A_2) and part of energy propagates in to the Earth.

At the layer-halfspace interface a new reflection-transmission phenomena occur.

The amplitude A_2 and B_2 depend on the contrast of the e.m. properties of the air, layer and halfspace, according to similar principles of reflection and transmission coefficient in seismic.



Down going wave $E_x(z,t) = A_1 e^{-k_1 z} e^{-i\omega t}$

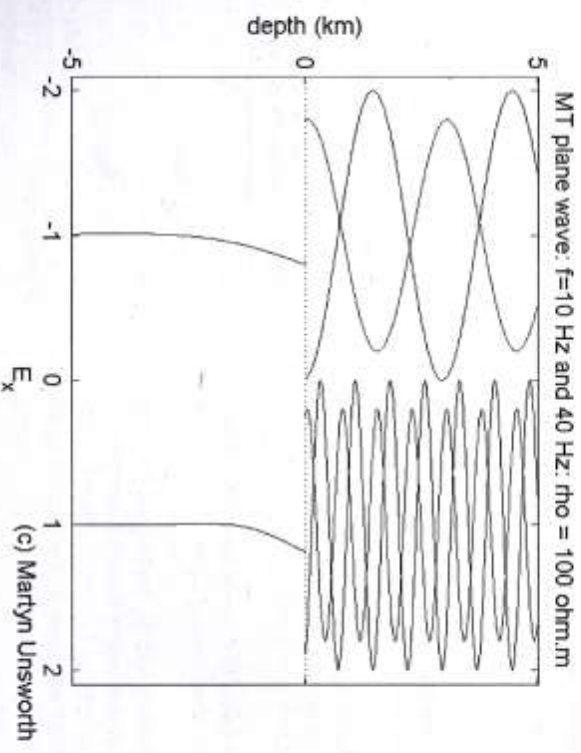
Up going wave $E_x(z,t) = A_2 e^{+k_1 z} e^{-i\omega t}$

Down going signal $E_x(z,t) = B_2 e^{-k_2 z} e^{-i\omega t}$

Up going signal $E_x(z,t) = B_2 e^{+k_2 z} e^{-i\omega t}$

Down going signal $E_x(z,t) = C e^{-k_2 z} e^{-i\omega t}$

Down going signal $E_x(z,t) = C e^{-k_2 z} e^{-i\omega t}$



TALE VALORE S DEV'ESSERE INVERSA PROPORZ. AD σ , E PROPORZ. A f :

$$S = \left(\frac{2}{\omega \mu \sigma} \right)^{0,5}$$

QST PROFONDITA' E' SPESSO PRESA COME LIMITE D'INDAGINE

SE POSSO APPROSSIMARE:

$$\mu \approx \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$$

⇒ CONVERTO LA FORMULA IN UN'ANALOGA:

$$S = 503 \cdot \left[\frac{1}{f \sigma} \right]^{0,5}$$

CON LA ROVINA, IMMETTO UN SEGNALE:

$$A = A_0 \cdot \sin(2\pi f \cdot t)$$

⇒ SE VOGLIO ANDARE + IN PROFONDITA', DEVO IMMETTERE SEGNALE A BASSA f , XKE L'ATTENUAZ E' + LENTA

MICROONDE → ALTE f

⇒ ARROSTO SI SCALDA DI + SULLA CROSTA (SKIN EFFECT)

VERIFICHIAMOLO, NEL FORNETTO:

$$f \sim 2 \div 5 \text{ GHz} \sim 3 \text{ GHz}$$

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}}{3 \cdot 10^9 \text{ Hz}} = 0,1 \text{ m}$$

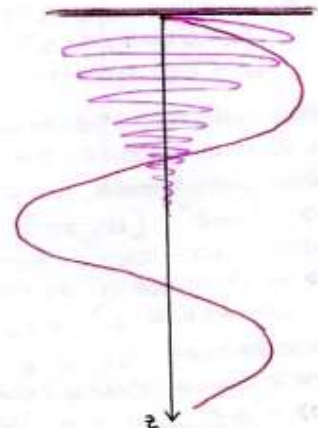
ARROSTO → λ DIPENDE DALLA QUANTITA' D'ACQUA CONTENUTA, CHE E' ~ 70%, CON ~ 30% = MATERIALE OILY, CHE FORSE E' MOLTO POLARIZZABILE

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{36}} = 0,5 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

$$\Rightarrow \lambda_{ARROSTO} = \frac{0,5 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{3 \cdot 10^9 \text{ GHz}} = 0,04 \text{ m}$$

$$H_p: \sigma = 0,1 \text{ S/m}$$

$$\Rightarrow S = 503 \left(\frac{1}{f \sigma} \right)^{0,5} = 503 \left(\frac{1}{3 \cdot 10^9 \cdot 0,1} \right)^{0,5}$$



MATERIALI NON OMOGENEI

IMMAGINO: STRATO E' OMOGENEO

⇒ $v_i = \text{cost}$, NELLO STRATO

V MATERIALE HA 1 SUA: $\epsilon_{c,i} = \epsilon_i + \epsilon_i''$

ED HA UNA: $\alpha_i \neq 0$

⇒ CIASCUNO STRATO DISSIP/A/TENUA E.

PROPAGAZ ONDOSA + SEMPLICE POSSIBILE:

ONDA PIANA, CHE SI PROPAGA \perp AL PIANO DI CAMPAGNA

(PRINCIPIO DI PROPAGAZ = REMOTE SENSING, DI INDAGINE DA SATELLITE)

○ = PARTE DEL SEGNALE RIFLESSA

● = PARTE DEL SEGNALE CHE VA IN PROFONDITA'

QUALE QUOTA?

DIPENDE DAI PARAMETRI:

CONTRASTO TRA $\epsilon_{r,1}$ ED $\epsilon_2 = 1$ (DELL'ARIA)

SE IL MEZZO E' NON DISSIPATIVO ($\alpha = 0$)

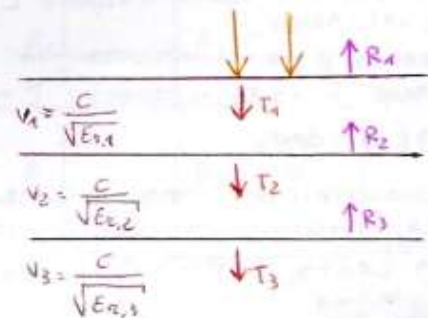
⇒ STIRO FACILMENTE:

$$R_1 = \frac{\sqrt{\epsilon_{r,1}} - \sqrt{\epsilon_0}}{\sqrt{\epsilon_{r,1}} + \sqrt{\epsilon_0}}$$

→ COEFF. RI RIFLESS. CHE DICE QNT SI TRASMETTE E QNT SI RIFLETTE

$$T_1 = 1 - R_1$$

→ COEFF. TRANSMISSIONE



Proprietà elettromagnetiche suoli e rocce

Alberto Godio
A.a. 2011-2012

PARAMETRI COSTITUTIVI $\rightarrow \sigma, \epsilon, \mu$

$\hookrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \sigma = \text{GIÀ VISTA} \\ \epsilon = \exists \text{ MODELLO } \times \text{ CORRELATO} \\ \text{AI PARAMETRI IDROGEOLOGICI} \end{array} \right.$

MEZZI POROSI:

σ ERA LEGATA A POROSITÀ E SATURAZIONE
 \downarrow
CERCHEREMO DI FARE LA STESSA
COISA CON ϵ

Permittività elettrica suoli e rocce

La **permittività elettrica** (nel Sistema Internazionale), o impropriamente **costante dielettrica** (nel linguaggio comune), è una grandezza fisica che descrive come un campo elettrico influenza ed è influenzato da un mezzo dielettrico.

Determina la capacità di un materiale di polarizzarsi in presenza del campo e definisce la predisposizione di un materiale a trasmettere (o *permettere*) un campo elettrico.

ϵ_r È MENO VARIABILE DI σ , ALVARARE DELLE CONDIZIONI
 $\Rightarrow \epsilon$ È IL PARAMETRO PIÙ ROBUSTO DI σ , SE VOGLIANO FARE CORRELAZIONI CON PARAMETRI IDROGEO. 05/12/2013
 SO CHE: $\sigma_b = \alpha \phi^n \cdot S_w^m \cdot \sigma_p \rightarrow \sigma_p = f(T, [S_{sat}]) \rightarrow \sigma_p = 0,25 \cdot TDS$ SALI DISIOLTI COMPLESSIVI IN LIQUIDO INTERSTIZIALE
 INVECE, PER ACQUA: $\epsilon_w = 78-82 \rightarrow$ LOW SENSITIVE TO SALINITY

Valori di permittività elettrica relativa di alcuni fluidi, suoli e altri materiali

MATERIALI ORGANICI
 (BIG PARTE DI HC
 LEGGERI \rightarrow BTEX)
 $\epsilon_r \sim 2 \div 2,5$

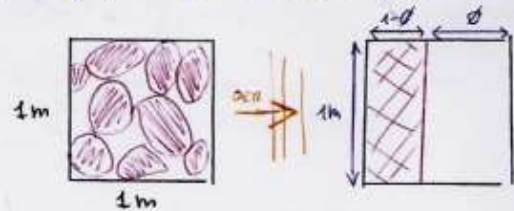
Material (Fluids)	Dielectric Constant (20-25°C)	Material (Solids)	Dielectric Constant (20-25°C)
Water	80.4 - 78.5	Ice (-12°C)	4.1 - 3.7
Ethanol	24.3	Fused Quartz (SiO ₂)	3.78
Ammonia	16.9	Sandy Soil (dry)	2.55
Benzene	2.29	Loamy Soil (dry)	2.51
Acetone	20.7	PVC	2.89
Air	1.0	Polyethylene	2.25
CO ₂ (liquid)	1.6	Teflon	2.1
CO ₂ (gas)	1.001	Wood (Douglas Fir)	1.90 - 1.95

Permittività elettrica e tangente di perdita di sedimenti poco consolidati e inquinanti di diverse composizioni a frequenza di 100 MHz (Olhoeft, 1986) e valori di resistività elettriche

Sand (weight %)	Clay (weight %)	Water (weight %)	Relative permittivity	Loss tangent	Electrical res. [Ohm m]
83.6	0	16.4	12.1	0.088	265
80.7	0	19.3	14.0	0.14	125
79.5	4.9	15.6	16.4	0.91	15.7
76.7	1.9	21.4	18.1	0.40	33.5
77.5	4.0	18.5	20.2	0.84	13.4
58.2	10.1	31.7	32.3	1.09	6.6
29.3	13.9	56.8	49.7	1.00	4.7
17.9	16.5	66.4	52.8	1.00	4.4
0	22.9	77.1	62.6	1.14	3.4

ALCUNI MODELLI DI CORRELAZIONE TRA ϵ E LA POROSITÀ ($\epsilon \rightarrow \phi$) \rightarrow SISTEMA A DUE FASI:

ϕ = GRANULI SOLIDI, MINERALI
 IL RESTO È VIDI, COMPLETAMENTE SATURATO DA FLUIDO
 \Rightarrow POSSO FARE IL MODELLO EQUIVALENTE (FUNZIONA SOLO X CERTE CONDIZIONI)



IMMAGINO: HO 1 DEM PIANA, CHE SI MADRAGA COSÌ.
 TEMPO TOT. DI TRANSITO \rightarrow TIME AVERAGE EQUATION:

$$t = t_s + t_f \quad (\text{SOLIDO} + \text{FLUIDO})$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\bar{v}} = \frac{1-\phi}{v_s} + \frac{\phi}{v_f}$$

\bar{v} = V MEDIA, X PERCORRERE 1m DI MATERIALE POROSO COSÌ ASSEMBLATO.

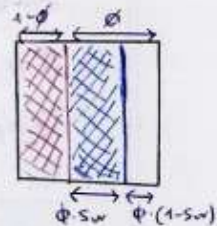
SIMILE ALL'EQ DI WILLIE DI OMBE SISTICHE

ACCETTABILE X FENOMENO PROPAGATIVO.
 QUEST'EQ. BASE IN SISTEMA BIFASICO.

SE HO 2 FLUIDI (2 LIQUIDI NON MISCIBILI, OPPURE L+G):

$$\frac{1}{\bar{v}} = \frac{1-\phi}{v_s} + \frac{\phi S_w}{v_w} + \frac{\phi(1-S_w)}{v_g}$$

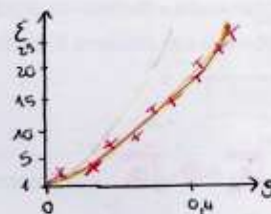
SOLDO
LIQUIDO
GRAS



MATERIALE POROSO, 2 FASI

- ϕ = COST
- $0 < S_w < 1 \rightarrow$ VARIABILE ??
- $\phi = \phi S_w$

HO QUEST'ANDAMENTO DEI PUNTI SPERIMENTALI



\Rightarrow L'EQ CHE MEGLIO LA APPROSSIMA È UNA LEGGE DI TIPO CUBICO: $\epsilon = f(\phi^3) \rightarrow$ POLINOMIO DI 3° GRADO.

$$\Rightarrow \epsilon = a_0 + a_1 \phi + a_2 \phi^2 + a_3 \phi^3$$

\hookrightarrow SPERIMENTALE, PÙ APPROSSIMARE "L'EQ DI WILLIE" VISTA PRIMA, CHE ERA UN MODELLO BASATO SU CONCETTI FISICI FATTA A PARTIRE DA UN MODELLO EQUIVALENTE.

PER CORRELARE LE 2 EQUAZ, USO: $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$

\Rightarrow POSSO FACILMENTE CONVERTIRE DA TERMINI DI V A TERMINI DI ϵ :

$$\frac{1}{\frac{c}{\sqrt{\epsilon}}} = \frac{1-\phi}{\frac{c}{\sqrt{\epsilon_s}}} + \frac{\phi}{\frac{c}{\sqrt{\epsilon_f}}}$$

DOVE: $\begin{cases} \epsilon_r = \text{PERM. ELETTR. RELATIVA DEL SISTEMA} \\ \epsilon_f = \text{DEL FLUIDO} \\ \epsilon_s = \text{DEL SOLIDO} \end{cases}$

$$\Rightarrow \sqrt{\epsilon_r} = (1-\phi)\sqrt{\epsilon_s} + \phi\sqrt{\epsilon_f} \quad \rightarrow \text{HO RICAVATO IL MODELLO DI CRIT (COMPLEX REFRACTING INDEX MODEL)}$$

IDEA DI BASE = COMPORTAMENTO COMPLESSIVO DEL SISTEMA È CALCOLABILE A PARTIRE DALLE FRAZIONI DI VOLUME DELLE SINGOLE FASI.

ESEMPIO

$Q_2 \rightarrow \epsilon_r = 3,8$

SAND $\rightarrow \phi = 0,5$

$S_w = \phi$ (NATURALE)

MISURO LA V DI DEM IN Q2:

$$v_{Q2} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot c = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{3,8}} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

ϵ_r = LA V DEI GRANULI SOLIDI CHE COMPONGONO LA SABBIA \Rightarrow MONOMINERALICA

• SISTEMA BIFASE = Q2 + ARW ($S_w = 0$) \Rightarrow APPLICO EQ "WILLIE" X CALCOLARE LA \bar{v} DEL MATERIALE:

$$\frac{1}{\bar{v}} = \frac{1-\phi}{v_s} + \frac{\phi}{v_p} \Rightarrow \bar{v} = 1,25 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

\rightarrow PER LA VP: $S_w = 0 \Rightarrow v_p = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ (ARW)

• INVECE, SE: $S_w = 1$ (È ANCORA SIST BIFASICO):

$$v_p = v_w = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{rw}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{2}} \sim 0,33 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\bar{v}} = \frac{1-0,5}{1,5 \cdot 10^8} + \frac{0,5}{0,33 \cdot 10^8} \Rightarrow \bar{v} \approx 0,9 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

(ARW E ALQUASONO LE 2 VELOCITÀ LIMITE CHE POSSO MISURARE IN NATURA)

SE CONSIDERASSI IL BULK (PER $S_w = 0$):

$$\sqrt{\epsilon_r} = (1-\phi)\sqrt{\epsilon_s} + \phi\sqrt{\epsilon_f} = 0,5 \cdot \sqrt{4} + 0,5 \cdot 1 = 1,5$$

$$\Rightarrow \epsilon_r = 1,5^2$$

INVECE, CON $S_w = 1$:

$$\sqrt{\epsilon_r} = 0,5 \sqrt{4} + 0,5 \sqrt{9} = 5,5$$

$$\Rightarrow \epsilon_r = 5,5^2$$

\Rightarrow VARIAZIONE DI LOGG PASSANDO DA DRY SATURAZ.

CON MODELLO A 3 FASI, AVREI ANCHE IL STEP INTERMEDI.

Equazioni principali

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \cdot \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

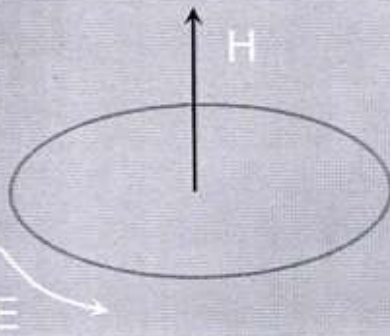
E - intensità campo elettrico (V/m)
 H - intensità di campo magnetico (A/m)
 ε - permittività elettrica [F/m]
 σ - conducibilità elettrica [S/m]

Per un campo variabile nel tempo secondo una oscillazione armonica sinusoidale:

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}_0 \cdot e^{j\omega t}$$

$$\mathbf{H}(t) = \mathbf{H}_0 \cdot e^{j\omega t}$$

$$\omega = 2\pi f$$



$$\nabla^2 \mathbf{E} = j\omega\mu\sigma\mathbf{E} - \omega^2\mu\varepsilon\mathbf{E}$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = j\omega\mu\sigma\mathbf{H} - \omega^2\mu\varepsilon\mathbf{H}$$

IL TIPO DI SORGENTE USATA:

- ATTIVI → SORGENTI ARTIFICIALI, SOPRATTUTTO INVESTIGAZIONI DI PICCOLA Scala (BIL' PARTE DEI METODI)
- SORGENTI NATURALI → CORRENTI CHE CIRCOLANO SU SUPERFICIE TERRESTRE, DI SOLITO RIFERITE A INDAGINI DI BIL' PROFONDITÀ.

Classificazione

TECNICHE = CLASSIFICAZIONE PRO ESSERE *

- Si distinguono in funzione delle modalità di acquisizione dei dati in tecniche in dominio di frequenza e di tempo → IN BASE AL PRINCIPIO SU CUI SI BASA (f, t)
- Possono utilizzare sorgenti naturali (solitamente per indagini a grande profondità) o artificiali;
- Nel caso di sorgenti artificiali si possono avere configurazioni con sorgenti remote (indagini VLF) o sorgenti locali.

VLF = SORGENTI REMOTE, SORGENTI RADIO DISPERSE SPARSE SU SUPERFICIE TERRESTRE. POSSONO ESSERE DISPERSE A 100-1000 Km DA ZONA D'INDAGINE

VLF = VERY LOW FREQUENCY → 45-30 KHz, SONO FREQUENZE BASSE DELLE FREQUENZE SOLITAMENTE USATE → (E' POSSIBILE USARE UN AMPIO SPETTRO).

LE FREQUENZE CONTROLLANO LA PROFONDITÀ UTILE D'INDAGINE: P.F. ⇒ PROF. SI ARRIVA SOLO A INDAGINI SUPERFICIALI

{ VLF → PROF. D'INDAGINE METRICA O DECIMETRICA

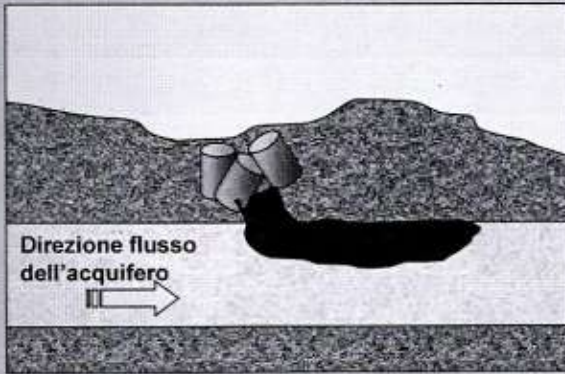
{ MICROONDE → MAX QLK DECIMETRO, INDAGINI MOLTO SUPERFICIALI

{ RF = RADIO FREQUENCY → 1-100 MHz

{ MICROWAVE → 10 GHz

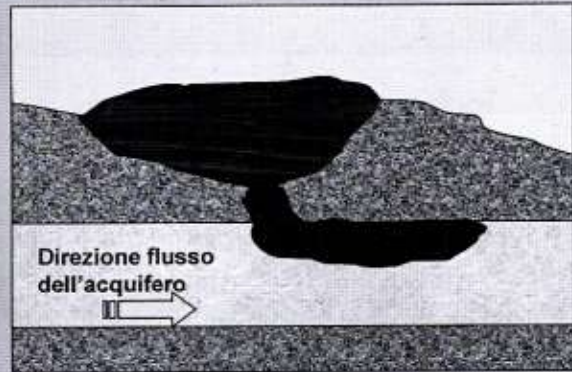
{ FREQ. NATURALI → 0,1-100 Hz

Applicazioni in campo ambientale



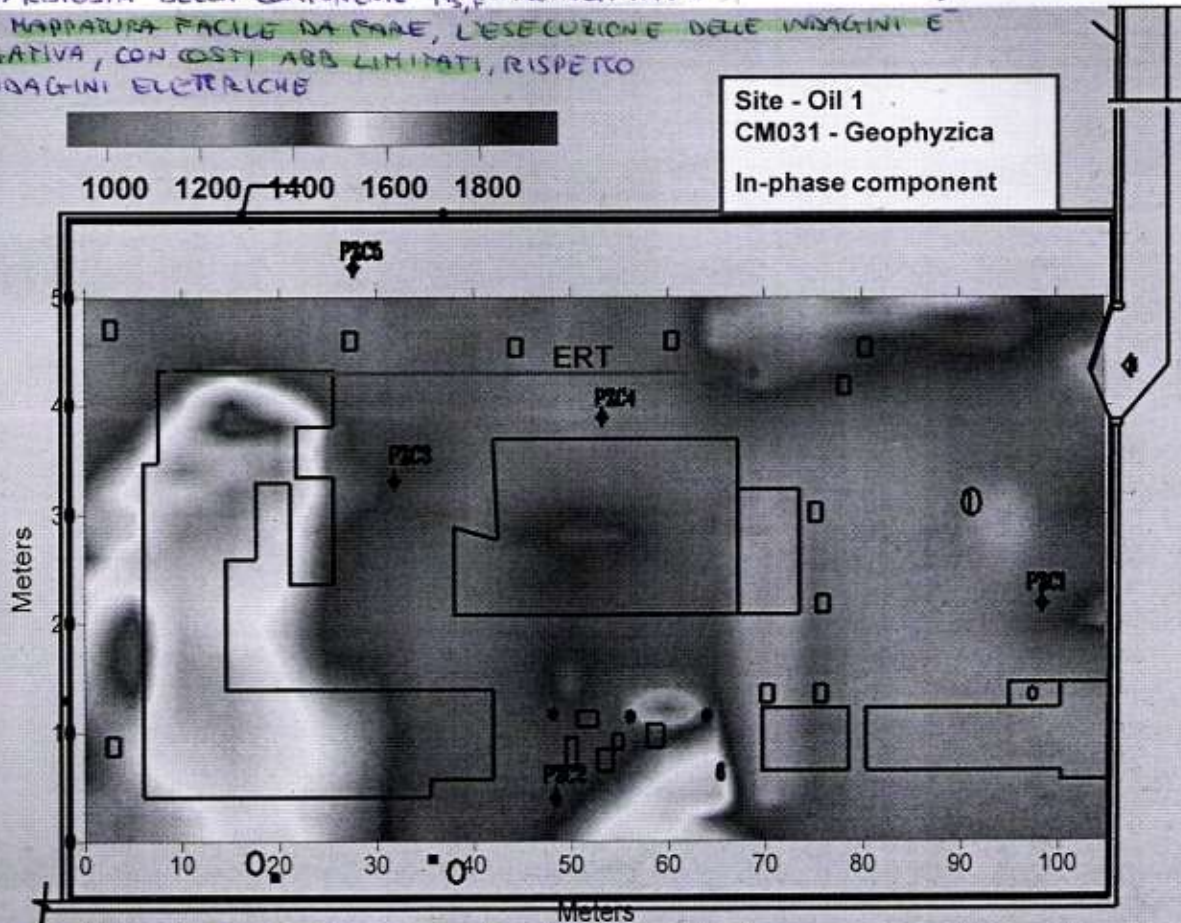
Individuazione di fusti sepolti a piccola profondità e di eventuale contaminazione di suoli e acquiferi (profili e mappe di parametri elettromagnetici)

Indagini in discariche non controllate ed individuazione di eventuale percolazione di fluido contaminante nel suolo e negli acquiferi



MAPPATURA DI UN LUOGO CONTAMINATO.
CONTAMINAZIONE \Rightarrow MINERALIZZAZ. NELL'ACQUIFERO
QST È LA RISPOSTA DELLA COMPONENTE $H_{s,f}$ \rightarrow QUALITATIVA
È UNA MAPPATURA FACILE DA FARE, L'ESECUZIONE DELLE INDAGINI È
SERIATIVA, CON COSTI ASS. LIMITATI, RISPETTO
AD INDAGINI ELETTRICHE

QST INDAGINE È FATTA
MOLTO SPESSE

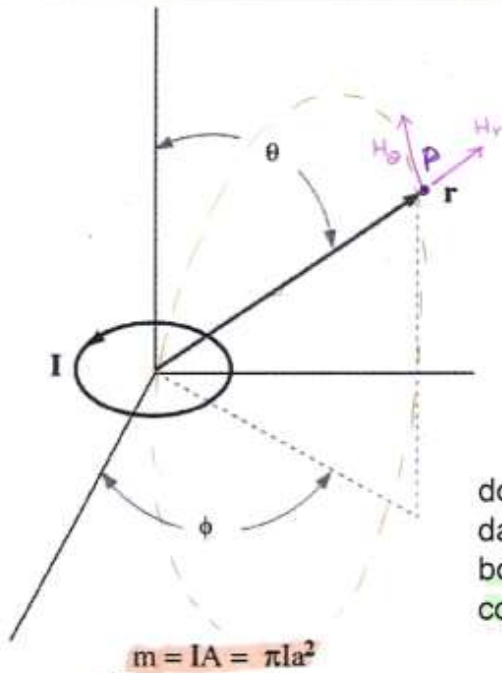


APPLICAZ. AMBIENTALI \rightarrow METODI ERT SONO USATI \times MAPPARE SITI, \times CAPRE
SE SONO CONTAMINAZIONE

FACCIAMO RIFERIM AD 1 SISTEMA DI COORD. SFERICHE.
 INTENSITA' DI CAMPO DATA DAL DIPOLO E' DATA DA 3 COMPONENTI.
 P = PUNTO LONTANO, IN CUI HO 3 COMPONENTI DEL C.E.N. (H_r, H_θ, E_ϕ)
 • = COMPONENTI RADIALE E TG.

Metodo in dominio di frequenza – concetti teorici

Il campo magnetico H generato da un dipolo nello spazio (\sim aria) è dato da



$$H_r = \frac{m}{2\pi} e^{-ik_0 r} \left(\frac{ik_0}{r^2} + \frac{1}{r^3} \right) \cos\theta$$

$$H_\theta = \frac{m}{4\pi} e^{-ik_0 r} \left(-\frac{k_0^2}{r} + \frac{ik_0}{r^2} + \frac{1}{r^3} \right) \sin\theta$$

$$E_\phi = \frac{\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} m}{4\pi} e^{-ik_0 r} \left(\frac{k_0^2}{r} - \frac{ik_0}{r^2} \right) \sin\theta$$

COMPONENTE DEL C.E., RESTA CONFINATO NEL PIANO

dove m è il momento magnetico del dipolo, dato dal prodotto della corrente per l'area della bobina, il numero di spire e la corrente, e k_0 è la costante di propagazione nello spazio libero.

$$m = IA = \pi a^2$$

$$k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$$

m CI SERVE A DEFINIRE INTENSITA' DEL SEGNALE GENERATO DALLA S, CHE DIPENDE DALLE DIMENSIONI DELLA BOBINA S
 $\uparrow I$ e/o $\uparrow A \Rightarrow \uparrow m \Rightarrow \uparrow H$

NOI FACCIAMO RIFERIMENTO AD 1 SOLA SPIRA.
 SOLENOIDE \Rightarrow + SPIRE
 \Rightarrow CAMPO SARÀ \propto AL N° DI SPIRE (UTILE)
 $\Rightarrow \uparrow m$, CHE: $m = nIA$

SI PARLA SEMPRE DI UNA PROPAGAZ. IN ARIA, DOVE IL CAMPO EM PRIMARIO NON E' PERTURBATO DA ALCUNA DISOMOGENEITA'

Campo magnetico in aria

Per piccoli valori di k_0 si ricava (dalla precedente equazione) la seguente relazione:

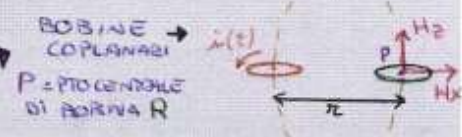
$$H_z = \frac{m}{4\pi r^3} (3 \cos^2 \theta - 1)$$

$$H_x = \frac{m}{4\pi r^3} \sin\theta \cos\phi$$

CI RIFERIAMO A Z BOBINE.
 VOGLIAMO STIMARE INTENSITA' DEL CEMA A DISTANZA r . TALE P CHACE SU STESSO PIANO DI BOBINA
 \Rightarrow LE 2 COMPONENTI SONO LINEARI, DIPENDENTI DA m , MA INVERSA M. PROPORZ. A r^3

BOBINE COPLANARI:
 $H_x \rightarrow 0 \rightarrow$ TRASCURABILE
 \Rightarrow FLUSSO CONCATENATO E PREVALENTE $\perp R$.
 AVENDO NOTE r E m (NOTA X CARAT. SPERIMENTALI), POSSO DETERMINARE X VIA ANALITICA L'INTENSITA' DI H_z
 \hookrightarrow SARÀ ATTENUATA X EFFETTO DI r^3

Per bobine in uno stesso piano (bobine co-planari):



$$H_z = -\frac{m}{4\pi r^3} = -\frac{n_1 A_1 I}{4\pi r^3}$$

dove n_1 e A_1 sono il numero di spire e l'area della bobina trasmittente.

L'ANALOGIA CON IL TRASFORMATORE

SE HO UNA STRUTTURA CHE INTERAGISCE CON IL C.E.M. PRIMARIO
 ⇒ SI COMPLICA.

AVERE UNA STRUTTURA ELETRICA CONDUTTIVA NEL SOTTOSCOLO
 ⇒ CEM. PU' INTERFERIRE CON ESSA.

SE HO UN CEM PRIMARIO IN ARIA, E NEL SOTTOSCOLO HO UNA BOBINA (O UNA SERIE DI SPIRE) PASSIVA

⇒ E' UN ELEMENTO CONDUTTIVO, PERMETTE CIRCOLAZIONE DI CORRENTE AL SUO INTERNO, SE ALCUNE LINEE DI FLUSSO DEL C.E.M. PRIMARIO PASSANO ALL'INTERNO

⇒ X INDUZIONE, TALI LINEE GENERANO UN FLUSSO
 ⇒ UNA CORRENTE VARIABILE NEL T CIRCOLA L'INTERNO
 ⇒ SI GENERA UN CEM SECONDARIO

NELLA BOBINA RICEVENTE, SENTO EFFETTO DI CEM PRIMARIO E DEL SECONDARIO

⇒ IL FLUSSO CONCATENATO CHE SI CREA SARA' ≠ DAI CASI PRECEDENTI

SE R E S SONO PARI PARALLELI, NON AVRO' COMUNQUE $H_x = 0$

XKE' LA COMPONENTE H_s LA MODIFICA:

$$\begin{cases} H_p \sim H_{p,z} \\ H_s \rightarrow \text{HA LE 2 COMPONENTI X E Z} \end{cases}$$



MAGGIORE E' LA CORRENTE SECONDARIA i_s CHE GENERA NELLA BOBINA, TANTO + SARA' FORTE IL CAMPO H_s

↳ SONO IMPORTANTI DIMENSIONE E FORMA DELLA BOBINA:

↑ DIMENSIONE ⇒ ↑ FLUSSO CONCATENATO ⇒ ↑ i_s

CONTANO ANCHE:

- DISPOSIZIONE NELLO SPAZIO
- LA SUA NATURA
- DISTANZA DA S E R

CAMPO SECONDARIO → SI ATTENUA CON d IN MODO $\propto \frac{1}{d^3}$ (STESSO MODO DEL CAMPO PRIMARIO).

RISPOSTA MIGLIORE = QUANDO VOGLIO MOVERE QUALCOSA DI MOLTO CONDUTTIVO IMMERSO IN UN MATERIALE MOLTO RESISTIVO

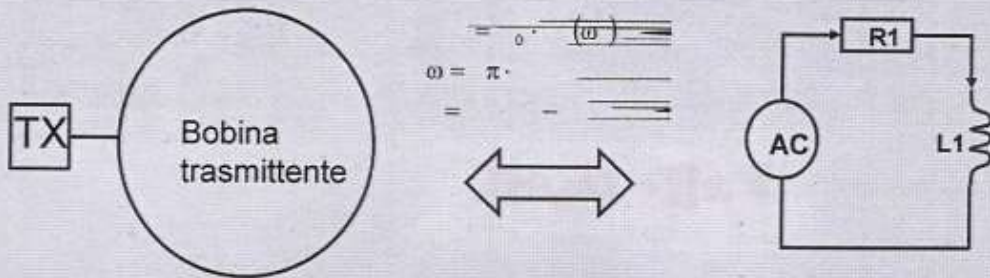
(IL MEGLIO SAREBBE AVERE TALE OGGETTO IMMERSO NELL'ARIA).

⇒ ALTE APPLICAZIONI IN IDROGEOLOGIA, X FROVARE ACQUA, O PAGHE SUBVERTICALI CON PRESENZA DI MATERIALI METALLICI

⊗ VAI A 32

POSSIBILE CAMPO DI $f \rightarrow f = 300 - 30'000 \text{ Hz} \rightarrow \text{AUDIO}$
 \Rightarrow DA QUALCHE CM A QUALCHE DECINA DI M. DI PROFONDITÀ

Circuito equivalente per dispositivi in dominio di frequenza



$v(t) = \text{VARIABILE NEL TEMPO}$
 \Rightarrow DEVO TENER CONTO ANCHE DEL COMPORTAMENTO AUTOINDUTTIVO
 $L_1 \frac{di}{dt}$

LEGGI DI OHM

NEL CIRCUITO TRASMETTENTE

Equazione del circuito equivalente in dominio di tempo

$$v_1(t) = L_1 \cdot \frac{di_1(t)}{dt} + R_1 \cdot i_1(t)$$

$R = \text{RESISTENZA DEL CAVO}$

Equazione del circuito equivalente in dominio di frequenza

$$\tilde{V}_1 = j\omega \cdot L_1 \cdot \tilde{I}_1 + R_1 \cdot \tilde{I}_1$$

Campo elettrico variabile nel tempo

CASO PARTICOLARE:
 Nel caso di una tensione alternata nel tempo secondo una legge sinusoidale $V = V_0 \sin(\omega t)$

La corrente nel circuito equivalente (resistivo-induttivo) è descritta dall'equazione: \rightarrow È UN CASO PARTICOLARE DELL'EQ. VISTA PRIMA

I e V SONO SFASATE DI α , CHE È LEGATO ALL'EFFETTO INDUTTIVO. SENZA L \Rightarrow NO SFASAMENTO, SAREBBE UN CIRCUITO SEMPLICE R, RESISTIVO

$$I = V_0 \cdot [(\omega \cdot L)^2 + R^2]^{-0.5} \sin(\omega t - \alpha)$$

dove

$$\alpha = \tan^{-1}[(\omega \cdot L) / R]$$

dove I è la corrente, V è la tensione, L è l'induttanza e R è la resistenza del circuito

QUANDO AVEVAMO VISTO LA RESISTIVITÀ, C'ERA SFASAMENTO DOVUTO A EFFETTI DI TIPO CAPACITIVO, DOVUTO AD UN SISTEMA CHE SI IDENTIFICA (IP).

QUI, INVECE, SFASAMENTO È DOVUTO AD AUTOINDUZIONE.

$\uparrow L \Rightarrow \uparrow \alpha$
 $\uparrow R$ (RESISTENZA) $\Rightarrow \alpha \rightarrow 0$ MA IN REALTÀ CI SAREBBE SFASAMENTO DI 90°

32 $\uparrow \omega (\Rightarrow \uparrow f) \Rightarrow$ VARIA α , PREVALE EFFETTO INDUTTIVO, È L'EFFETTO STRUTTURALE

Equazione del circuito equivalente
Dominio di tempo

$$v_1(t) = M_{23} \cdot \frac{di_3(t)}{dt} - M_{12} \cdot \frac{di_2(t)}{dt} - L_1 \cdot \frac{di_1(t)}{dt} + R_1 \cdot i_1(t)$$

$$v_2(t) = M_{12} \cdot \frac{di_1(t)}{dt} - M_{23} \cdot \frac{di_3(t)}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2(t)}{dt} + R_2 \cdot i_2(t) + C_2 \cdot \frac{di_2(t)}{dt}$$

$$v_3(t) = M_{13} \cdot \frac{di_1(t)}{dt} + M_{23} \cdot \frac{di_2(t)}{dt} - L_3 \cdot \frac{di_3(t)}{dt} + R_3 \cdot i_3(t)$$

$$\tilde{V}_1 = j\omega \cdot M_{23} \cdot \tilde{I}_3 - j\omega \cdot M_{12} \cdot \tilde{I}_2 - j\omega \cdot L_1 \cdot \tilde{I}_1 + R_1 \cdot \tilde{I}_1$$

$$\tilde{V}_2 = j\omega \cdot M_{12} \cdot \tilde{I}_1 - j\omega \cdot M_{23} \cdot \tilde{I}_3 - j\omega \cdot L_2 \cdot \tilde{I}_2 + R_2 \cdot \tilde{I}_2 + \frac{j}{\omega \cdot C_2} \cdot \tilde{I}_2$$

$$\tilde{V}_3 = j\omega \cdot M_{13} \cdot \tilde{I}_1 + j\omega \cdot M_{23} \cdot \tilde{I}_2 - j\omega \cdot L_3 \cdot \tilde{I}_3 + R_3 \cdot \tilde{I}_3$$

Equazione del circuito equivalente
Dominio di frequenza

$L_1, R_1, L_3, R_3, M_{13}$ - sono noti poiché caratteristiche strumentali
 V_1, V_3, I_1, I_3 - misurabili alle bobine trasmettenti e riceventi
 M_{13}, M_{23} - le mutue induttanze possono essere risolte solo per geometrie semplici (corpi sferici, piastre).
 L_2, C_2, R_2, I_2 - incognite del problema

Soluzione del circuito equivalente

Caso di conduttore LR (resistivo-induttivo)

Modulo

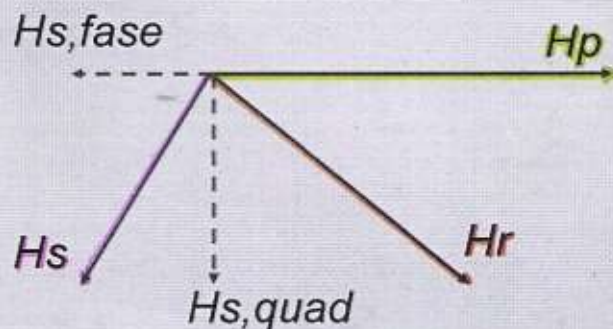
$$\left| \frac{H_s}{H_p} \right| = f(j\omega L_2, R_2, M)$$

Fase

$$\vartheta_p - \vartheta_s = \left(\frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \frac{\omega L_2}{R_2} \right) = \left(\frac{\pi}{2} + \phi \right)$$

IL ZC RIFERITO AL CIRCUITO PASSIVO (3.0 BOBINA)

Diagramma vettoriale



→ SKIN DEPTH E PROFONDITÀ D'INDAGINE

ω = PARAMETRO DA CONTROLLARE IN FUNZIONE DI σ DEL MATERIALE.

SERVE UN ADEGUATO COMPROMESSO X LAVORARE IN AMPIO RANGE DI σ .

↳ PICCOLA SCALA: $f = 300 \div 30.000 \text{ Hz}$ → ORMAI ACCETDATE COME RANCIE.

+ VADO IN PROFONDITÀ ⇒ ↓ f

LE NOSTRE MISURE AVVENGONO SEMPRE IN PRESENZA DI UN CAMPO PRIMARIO = FORZANTE

NOI MISURIAMO L'ANOMALIA DATA DAL SECONDARIO

⇒ È MOLTO MENO INTENSA DEL 1°

⇒ MISURA DELICATA, SPESSE INACCURATA ⇒ BIG INCERTEZZE

METODI BASATI SU DOMINIO DI f :

SONO MOLTO RAPIDI, SI PUÒ ANCHE CARMINARE LUNGO 1 PROFILO, FARE UNA GRANDE DENSITÀ DI MISURE A BASSI COSTI.

UNICO SVANTAGGIO = A VOLTE POSSONO ESSERE INACQUIRITI.

⊗ VAI A 37

→ RISPOSTA CORPO CONDUTTIVO SORGENTE REMOTA (ONDA PIANA)

CEM CHE INTERFERISCE COL CORPO. PERO', ORA E' ≠, SORGENTI DISTANTI, ADES. SORGENTE RADIO VLF.

VLF = VERY LOW FREQUENCY → 15 ÷ 30 KHz

POTENZE TRASMESSE = 150 ÷ 2000 KW

TRASMISSIONI A GRANDE DISTANZA → 1000 ÷ 2000 Km, CON RIDICOLA ATTENUAZIONE

IN ARIA:

SORGENTE FISSA A BIGA DISTANZA,

• CAMPO 1°^o SI DIFFONDE COME MEZZO OTTOGONICO

IN ACQUA = IL SEGNALE SI PROPAGA, MA ATTENUATO X LE CARAT. DI CONDUCIB. DELL'ACQUA

⇒ SI PROPAGA IN UNA PICCOLA SKINDEPTH

⇒ SOTTOMARINO PUO' COMUNICARE SE SE EMERGE

QUANDO SIAMO A 1000 Km DALLA SORGENTE, SINTONIZZO

R SULLA f CHE CI INTERESSA, E SO CHE IN ARIA IL C.M.

SI E' PROPAGATO ED ARRIVA ~ // AL P.C.

DATE LE CARAT. DI CONDUCIB. DEL SEMISPACIO, TALE SEGNALE SI ATTENUA CON z.

SE IL CORPO E' AD 1 PROFONDITA' TALE DA ESSERE ANCORA NELLA SKINDEPTH, LO VEDO. •

SORGENTE REMOTA: MISOSTO SUL PROFILO SOLO CON UN RICEVITORE

⇒ + FACILE, XHE Hp RESTA COST MENTRE MI SPOSTO SUL PROFILO LOCALE.

ANOMALIA • = DEPURATA DALL' Hp,

XHE IN TEORIA IL RICEVITORE CAPTA LA Σ (COMPOSIZ. VETTORIALE) DEI 2 SEGNALE, MA POSSIAMO TOGLIERNE UNO.

SE R E' ESATTAH SOPRA AL CORPO •
LINEE DI FLUSSO SN TG AL P.C. •

⇒ SE R E' // P.C., NON ABBIAMO FLUSSI CONCATENATI •

SI MISURA L'ANGOLO DI TILT = SFASAMENTO TRA CAMPO 1°^o RIO E 2°^o RIO.

IN REALTA', VETTORE CAMPO 2°^o RIO E' MOLTO + PICCOLO DEL 1°^o RIO

"SEGNO" DELL'ANGOLO DI TILT = SEGNO DELL'ANOMALIA.

DI SOLITO, ANOMALIA HA QUESTA FORMA.

+ IL CORPO E' PROFONDO (>h)

⇒ + ANOMALIA VARIA FORMA E MODULO

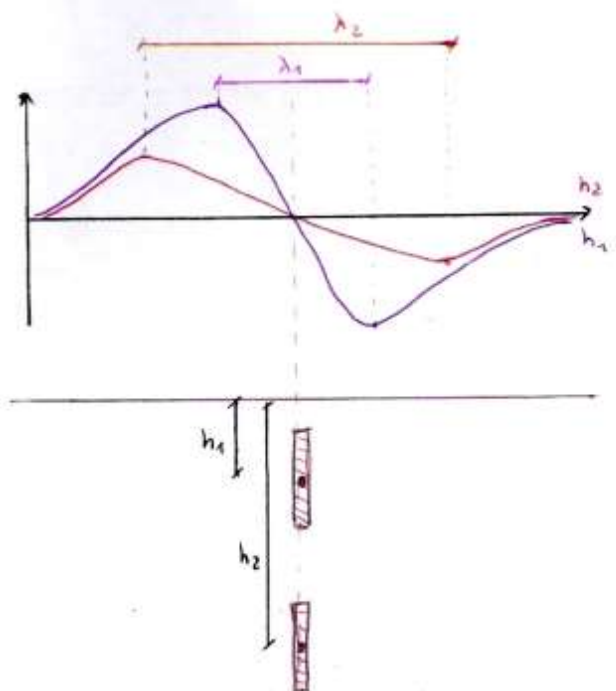
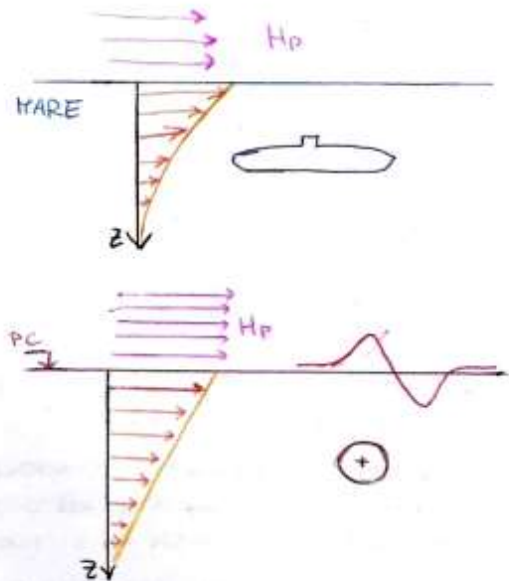
↑ h ⇒ { ↓ INTENSITA'
↑ λ = DISTANZA TRA I 2 PICCHI

IN GENERALE, ATTENUAZIONE DEL C.M.:

$$H \propto \frac{m}{r^3}$$

⇒ INTENSITA' DELL'ANOMALIA SI ATTENUA MOLTO CON LA PROFONDITA'.

⇒ BIG PERDITA DI CAPACITA' RISOLUTIVA



⊗ VAI A 39

Ellisse di polarizzazione

Occorre considerare che il campo primario (P) è un campo oscillante nel tempo secondo un legge sinusoidale

$$P(t) = P_0 \sin(\omega t)$$

Il campo secondario a sua volta oscilla nel tempo secondo con la stessa frequenza del primario e con uno sfasamento rispetto al primario

$$S(t) = S_0 \sin[\omega t - (\pi/2 + \phi)]$$

La risultante R esiste sempre ma è definita da un vettore che varia continuamente in ampiezza e ruota nello spazio.

Tale vettore descrive nello spazio un ellisse conosciuto come ellisse di polarizzazione, con asse maggiore inclinato di un certo angolo rispetto all'orizzontale (angolo di tilt).

Alcuni metodi elettromagnetici (VLF – very low frequency e AFMAG – audio-magnetotellurici), che utilizzano sorgenti remote si basano sulla misura di questo parametro

Risultante

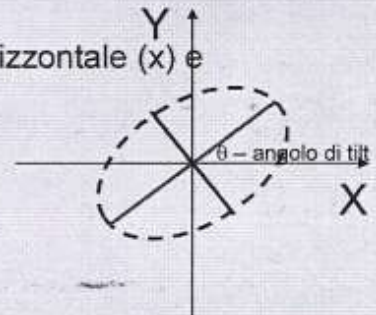
La risultante R può essere risolta nella sua componente orizzontale (x) e verticale (y), tale per cui:

$$R^2 = R_x^2 + R_y^2$$

dove

$$R_x = P_x \cos(\omega t) + S_x \cos(\omega t + \phi) = X \cos(\omega t + \phi_1)$$

$$R_y = P_y \cos(\omega t) + S_y \cos(\omega t + \phi) = Y \cos(\omega t + \phi_1)$$



risolvendo le equazioni precedenti ed eliminando ωt , si ricava la seguente relazione:

$$\frac{R_x^2}{X^2} - \frac{R_y^2}{Y^2} - \frac{2R_x R_y \cos \delta}{XY} = \sin^2 \delta$$

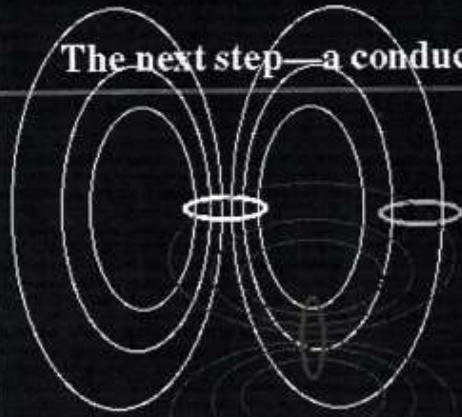
$$\delta = \phi_2 - \phi_1$$

$$\tan(2\delta) = \frac{XY \cos \delta}{X^2 - Y^2}$$

Equazione di un ellisse
Con assi X e Y con asse maggiore inclinato di un angolo θ , definito angolo di tilt

CASO IDEALE, CON 1 LOOP NELL'ARIA.
RODINA RICEVENTE = CAPTO SEGNALE LEGATO A COMPOSIZIONE VETTORIALE
DEI FLUSSI 1°ARIO E 2°ARIO

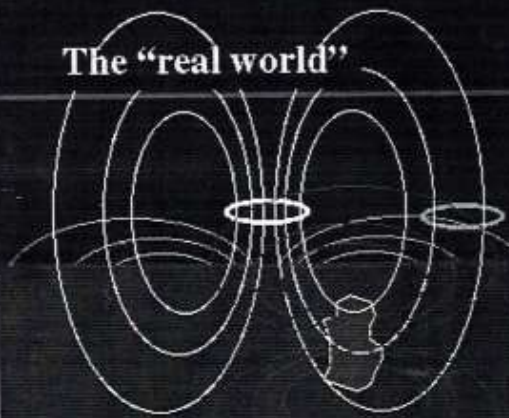
The next step—a conducting loop



- ◆ The voltage $V_T(t)$ is induced in the Receiver coil by both primary and secondary fields.
- ◆ $V_s(t)$ induced in the “anomalous” loop causes current $I_s(t)$ to flow there.

CORPO CONDUTTIVO NON È IDEALE
=> EFFETTI DISTORCENTI DEL CAMPO CAPTABILE
] INDUZIONE LEGATA ALLE CARAT. MAGN. DEL SEMISPAZIO SOTTOSUOLO, A CUI SI SOTTANO GLI
EFFETTI DEL CORPO INDUTTIVO REALE.
CAMPO GENERATO DAL SEMISPAZIO È MOLTO + DEBOLE DEL 1°ARIO E DEL 2°ARIO.

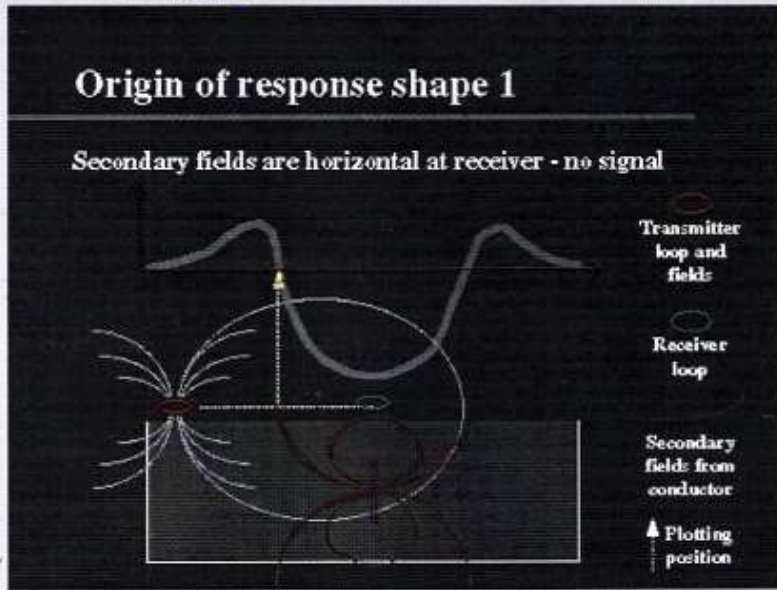
The “real world”



- ◆ The voltage $V_T(t)$ is induced in the Receiver coil by fields arising from the Earth, anomaly (and Tx) currents.
- ◆ Currents are induced in the uniform Earth; even more currents flow in good conductors.

+ IL CORPO È CONDUTTIVO
=> + CORRENTE CIRCOLA FACILMENTE E GENERA CAMPO 2°ARIO RILEVABILE

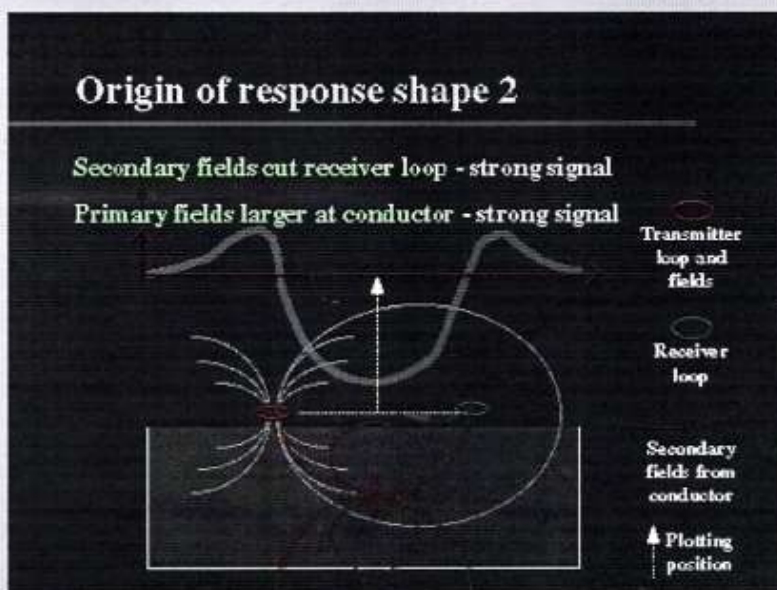
VEDIATO 2 POSIZIONI DELLA BOBINA RICEVENTE R.
 BOBINA POSTA QUASI SUL PIANO DI CINA GNA
 ↳ SE È POSTA SUL PIANO ORIZ, IL FLUSSO DI CAMPO 2° CHE SI POSSA CONCATENARE AD ESSA, NELLA POSIZ ESATTAI SOPRA AL CONDO (SE CAMBIASSI ORIENTAMENTO CAMBIEREBBE ANOMALIA, AD ES. SE LI METTO IN VERTICALE)
 => NO QUEL PTO A VALORE ZERO



→ GRAFICO:
 • ASCISSE = DISTANZA
 • ORDINATE = INTENSITA' DELLA RISPOSTA (DELL'ANOMALIA)

IL GRAFICO È GIÀ DERIVATO DAL CAMPO PRIMARIO

SE SI POSTO LE BOBINE IN MODO CHE LA LAMINA SIA AL CENTRO, TROVO UN PICCO AL MINIMO.
 QUI SE AVESSI BOBINA VERTICALE, TROVEREI UN FLUSSO 0
 => AVREI ANOMALIA NULLA



Strumentazione

Sorgente locale di corrente alternata alla frequenza o alle frequenze di riferimento; nei sistemi portatili per applicazioni a piccola profondità si hanno potenze di 1-10 W; per dispositivi FD le frequenze sono comprese tra 300 Hz e 20.000 Hz.

Bobine transmitter e receiver

Circuito di amplificazione (sintonizzato sulla frequenza del trasmettitore nei sistemi FD) e ad ampia banda (fino a 40 kHz) nei dispositivi TD

Dispositivo di lettura e registrazione.

I metodi VLF (Very Low Frequency -15 -30 kHz) utilizzano sorgenti remote e pertanto non necessitano di trasmettitore.

PER POTER CORRELARE IN MODO QUANTITATIVO CON LE σ , DEVO FAR SÌ CHE IL SISTEMA LAVORI IN PARTICOLARI CONDIZIONI:
 BASSO $B = n^\circ$ INDUZIONE DELLA STRUMENTAZIONE
 LA SUA DEFINIZIONE DATA QUI È RIGOROSAMENTE VALIDA SOLO IN UN SEMISPAZIO, CIOÈ CON $\sigma = \text{cost}$

SE NON VALE B PICCOLO \Rightarrow RISPOSTA MOLTO + COMPLICATA O NON CALCOLABILE

Conducibilità apparente per i dispositivi a basso numero di induzione

I dispositivi in dominio di frequenza consentono di ricavare direttamente il valore di conducibilità apparente dal rapporto tra campo secondario e campo primario in determinate condizioni di rapporto tra la spaziatura tra le bobine e la skin depth (basso numero di induzione - McNeill, 1980).

Il valore del numero di induzione si determina in funzione della spaziatura s tra le bobine RX e TX, della skin depth:

SPAZIATURA TRA LE BOBINE

$$B = \frac{s}{\delta} = \frac{s}{\left(\frac{2}{\omega \mu \sigma}\right)^{0.5}}$$

SKIN DEPTH

Per $B \ll 1$ ($B \sim 0,1$)

$$\frac{H_s}{H_p} \approx \frac{iB^2}{2} = \frac{i \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot \sigma \cdot s^2}{4}$$

LA RISPOSTA DEL SISTEMA È LEGATA ALLA SPAZIATURA TRA LE BOBINE, E TRENDE A ↓ CON LA SKIN DEPTH \Rightarrow FACILE RELAZIONE TRA σ, B E RISPOSTA $\frac{H_s}{H_p}$

μ_0 è la suscettività magnetica nel vuoto [$4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m]
 $\omega = 2\pi \cdot f$, con f frequenza in Hz,
 σ è la conducibilità elettrica in S/m,
 s è la spaziatura in metri tra le bobine.

La strumentazione viene progettata in modo da assicurarne il funzionamento in regime di basso numero di induzione; dalla misura di H_s , noto H_p , si risale al valore della conducibilità apparente del sottosuolo:

$$\sigma = \frac{4}{\omega \cdot \mu_0 \cdot s^2} \left[\frac{H_s}{H_p} \right]_q$$

VUOL DIRE CHE STO CONSIDERANDO UNA SFASATURA DI 90° (INFATTI, NELLE EQ. PRIMA C'ERA LA i)

BACCOLA
 ↳ OPERATIVAMENTE, SI DEVE CONTROLLARE LA Q DEL SISTEMA.

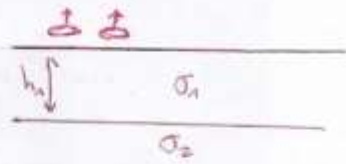
SPAZIATURA È FONDAMENTALE (È AL²)

LA FASE È LEGATA ALLE PROP. MAGNETICHE DEL MATERIALE.

→ RISPOSTA CUMULATIVA PER DISPOSITIVI A BASSO NUMERO DI INDUZIONE (LIN)

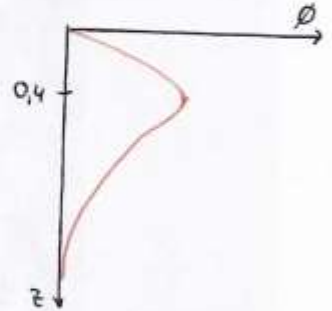
CASO DI RISPOSTA DI UN TERRENO STRATIFICATO, L'INDAGINE DA RISPOSTE \neq IN BASE ALL'ORIENTAMENTO DELLE BOBINE:

- ORIZ → SI OSSERVA LA CONDUCE APPARENTE, CHE È FUNZIONE DI: $\sigma_{app} = f(\sigma_1, \sigma_2, h)$ → σ_1 E σ_2 SONO PESATE IN FUNZIONE DI h
- VERTIC → PREVALE EFFETTO DI σ_1



ORIZZONTALI:

- Z INFINITE ⇒ RISPOSTA TRASCURABILE
- RISALENDO → MAN MANDO, INCONTRO STRATI A SENSIBILITÀ CRESCENTE ⇒ CREA UNA RISPOSTA CUMULATIVA CRESCENTE
- ↳ POSSO RICAVARE UNA RISPOSTA CUMULATIVA R .



QUESTA CURVA IDENTIFICA QUALE SARÀ LA RISPOSTA DI UN CERTO ELEMENTO AD UNA CERTA PROFONDITÀ:

R_{max} = R COMPLESSIVA, AVENDO TENUTO CONTO DI TUTTI GLI STRATERELLI PIAN PIANO CHE SI RISALE

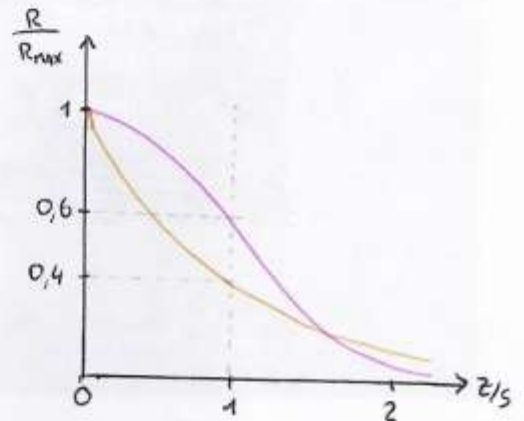
$R/R_{max} = [0, 1]$

• ORIZ:

$\frac{z}{s} = 1$ ⇒ QUEL CHE STA SOTTO PESA PER IL 60%, QUEL CHE STA SOPRA PER IL 40% (DENTRO ALLA RISPOSTA)

• VERTIC:

$\frac{z}{s} = 1$ ⇒ STRATI PROFONDI CONTANO SOLO PER IL 30% ⇒ CONFERMA LA SENSIBILITÀ.



LE EQUAZ DI TALI CURVE SONO FACILI DA RICAVARE.

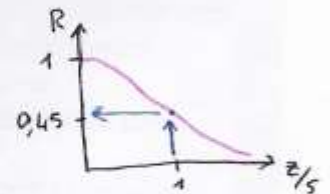
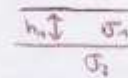
• CASO 2 STRATI, BOBINE ORIZZONTALI

$h_{horiz} = \frac{h_1}{s} \Rightarrow \sigma_{app} = \sigma_1 \cdot [1 - R(h_{horiz})] + \sigma_2 \cdot R(h_{horiz})$

DOVE: $R(h_{horiz})$ = RISPOSTA CALCOLATA NELL'INTERFACCIA. ↳ SERVE PER PESARE IL CONTRIBUTO DELLE DUE σ .

SE: $h_{horiz} = 1$

$\Rightarrow \sigma_{app} = \sigma_1 [1 - 0,45] + \sigma_2 \cdot 0,45 \rightarrow$ DOVE $R(h_{horiz}) = 0,45$ DERIVA DAL DIAGRAMMA



• CASO 2 STRATI, BOBINE VERTICALI

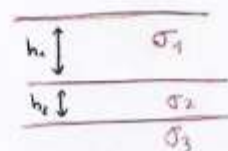
USO L'ALTRA CURVA, CON LA STESSA FORMULA:

$\sigma_{app} = \sigma_1 [1 - 0,25] + \sigma_2 \cdot 0,25$

⇒ σ_{app} È CONDIZIONATA DALLE CARAT. INTRINSECHE DEL MATERIALE, MA ANCHE DAL TIPO DI BOBINE CHE USO.

TUTTO QUESTO È ESPANDIBILE AL CASO DI + STRATI

3 STRATI: VEDI FORMULA IN SLIDE



Strumentazione Elettromagnetica Misure in dominio di frequenza - FDEM



STRUMENTAZIONE + USATA E' QUESTA ->

Strumentazione Geonics Ltd
(Canada)

EM38 - prof. indagine 1-1.5 m
spaziatura bobine 0.75 m
frequenza - 16 kHz

EM31 - prof. indagine 4-6 m
spaziatura bobine 4 m
frequenza - 9,7 kHz

EM34 - prof. indagine 40-60 m
spaziatura bobine 10-20 m
frequenza - 300 Hz

CON GPS, NON SI FANNO DEI SEMPLICI PROFILI, MA PROFILI PARALLELI SPAZIATI DI SPAZIATURA METRICA.

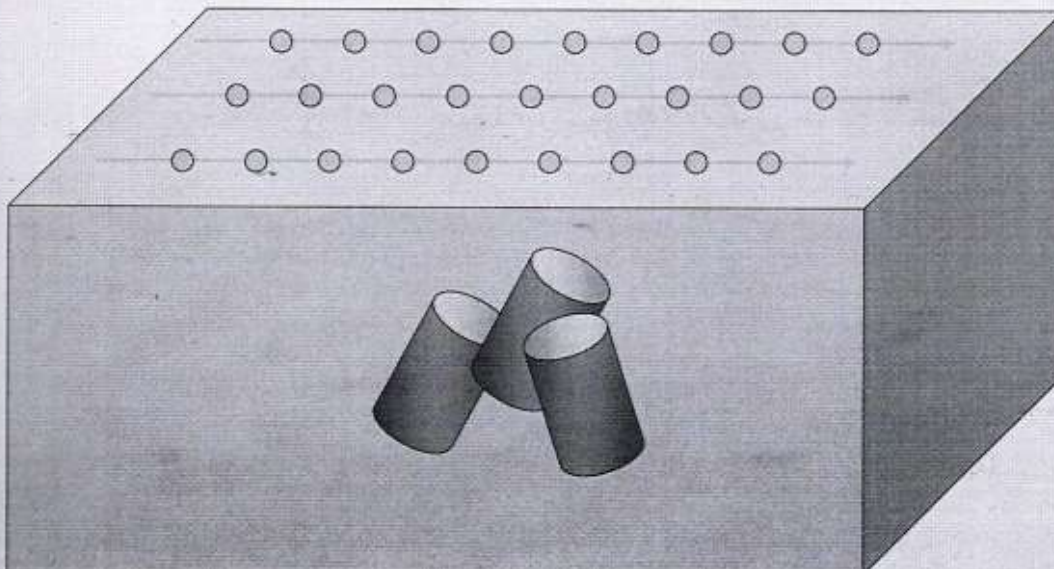
SI POSSONO FARE CAMMINANDO ANCHE LETTURE SONO FAITE MOLTO VELOCI



Pianificazione ed esecuzione delle misure

Per problemi ambientali (individuazione di fusti sepolti, caratterizzazione di siti contaminati, individuazioni di contaminanti, indagini in discariche non controllate) si procede con misure lungo profili affiancati; le misure sono spaziate di 1-2 m e i profili sono distanziati tra loro di 2 m.

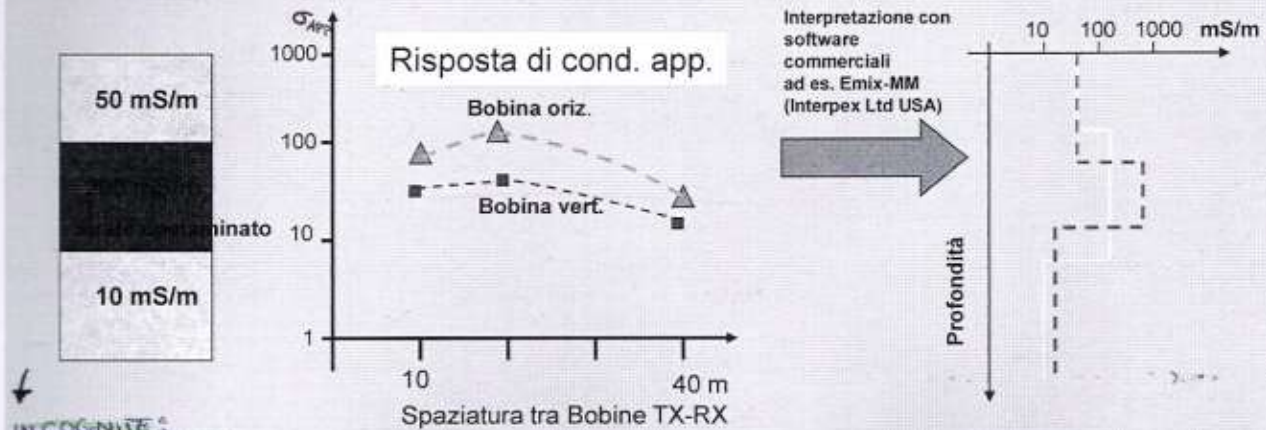
I risultati sono rappresentati sotto forma di profili o mappe dei parametri investigati (conducibilità apparente e componente in fase del segnale elettromagnetico).



FORTE ANALOGIA CON SONDAGGI ELETTRICI VERTIC, XLE PROFONDITÀ IMMAGINE E LEGATA A DISTANZA TRA LE BOBINE (L_i, ERA APERTURA DEGLI ELETTRODI).

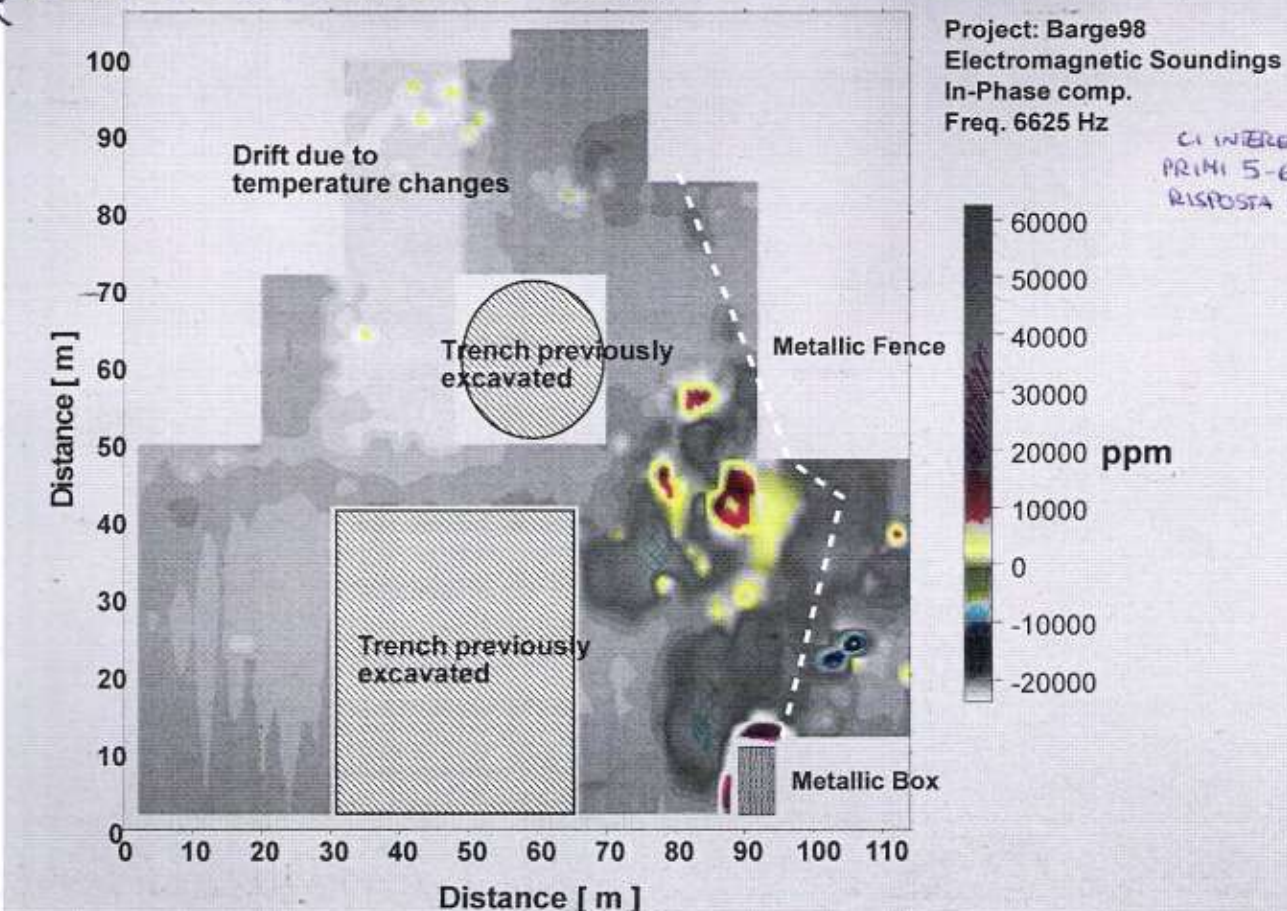
POSSO CERCARE DI AVERE INFO A * PROFONDITÀ, STRUTTURANDO SPAZIATURA TRA BOBINE E SENSIBILITÀ:
 LASCO FISSA S E SPASSO R (T SPAZIATURA)
 => OGNI VOLTA, VARIANO LA SENSIBILITÀ E LA RISPOSTA
 => PER LA STESSA STAZIONE DI MISURA, OTTIENGO ALTENO UN TOT. DI PUNTI *

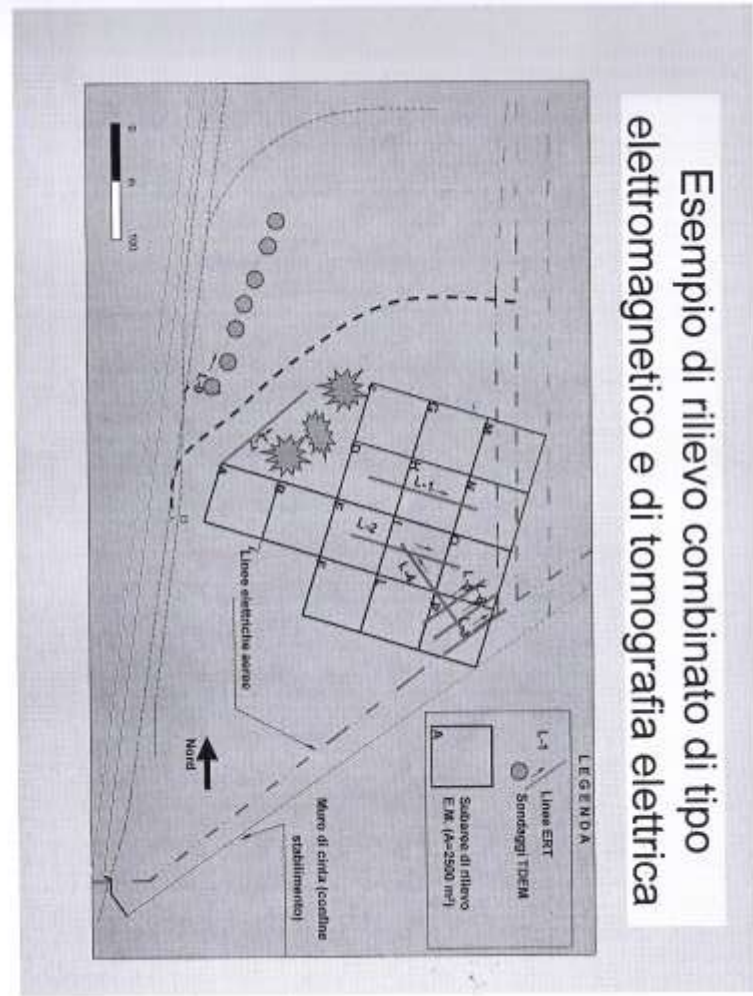
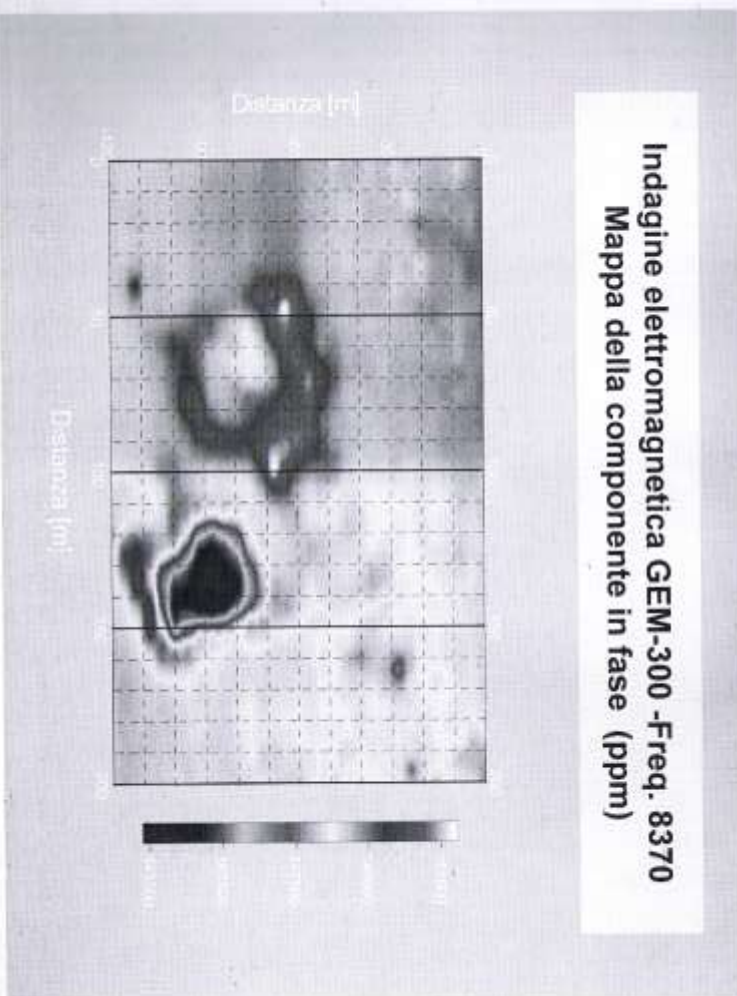
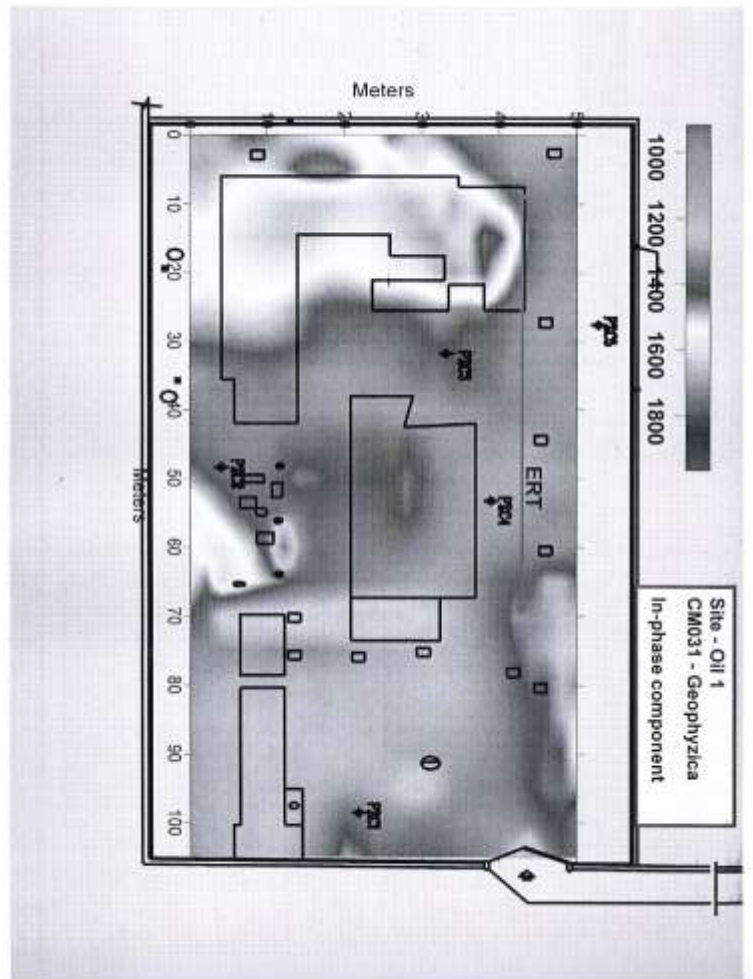
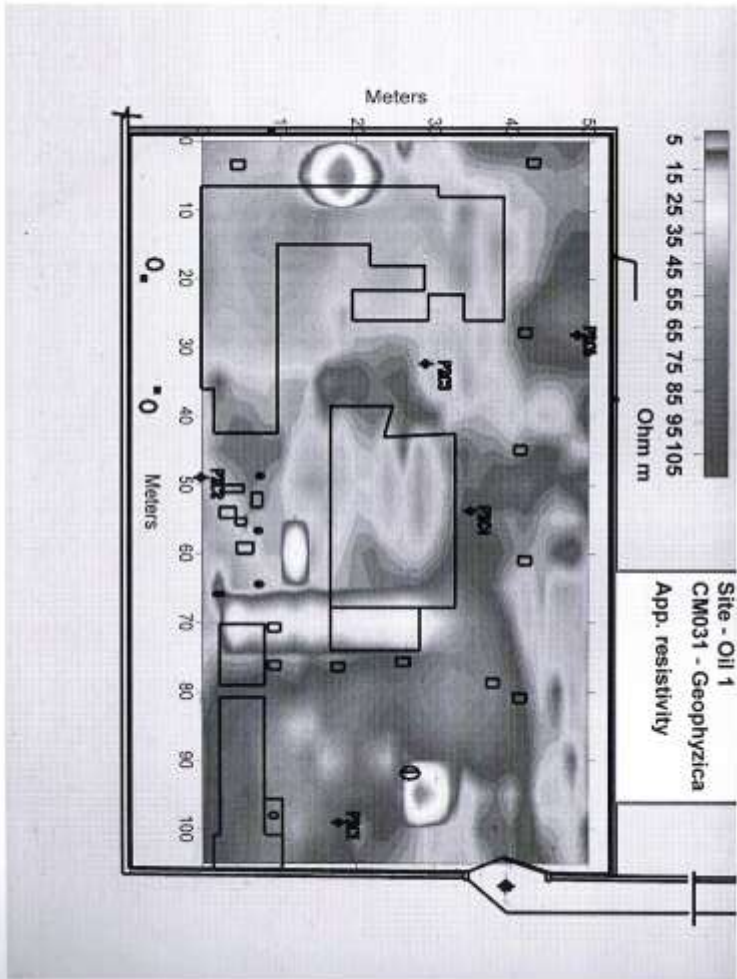
Con dispositivi EM34-3 della Geonics si può misurare la risposta in fase ed in quadratura (conducibilità apparente) per tre diverse spaziature tra le bobine (10-20-40 m) con bobine orizzontali e verticali.



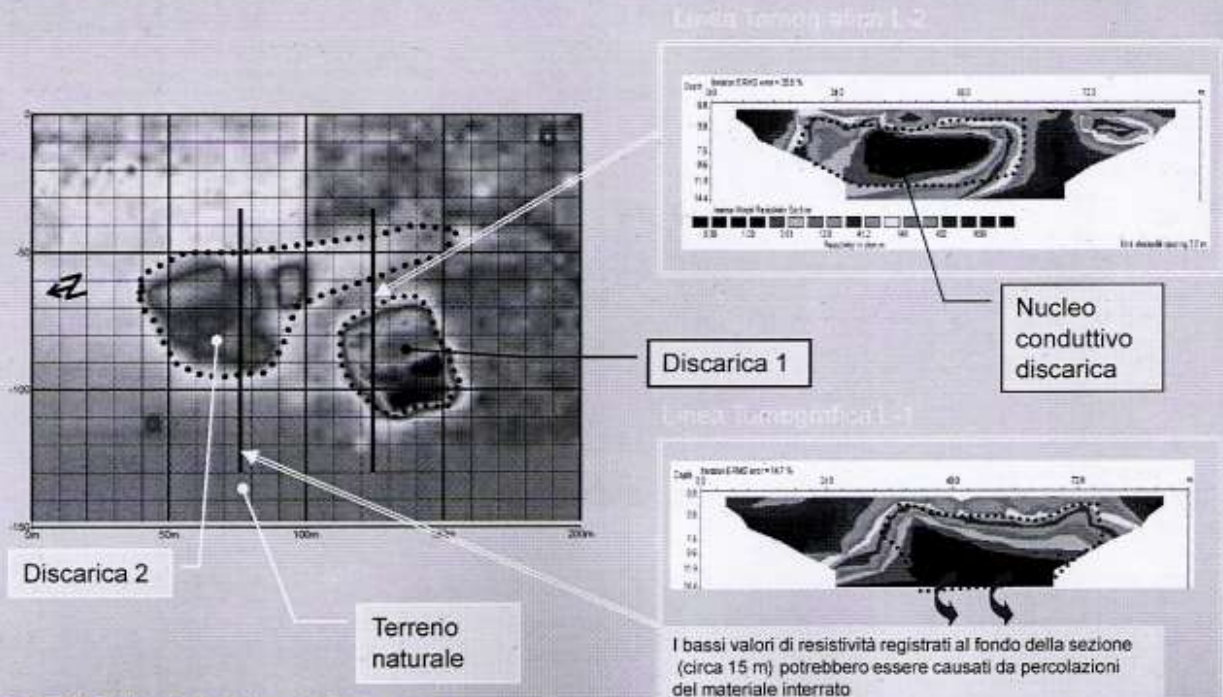
INCOGNITE:
 - P. DEGLI STRATI
 - PROFONDITÀ DELLE INTERFACCIE
 PER 3 STRATI:
 - 6 PUNTI => 6 POSSIBILI EQ. DI RISPOSTA EL. MAGN.
 - 5 INCOGNITE (h₁, h₂, σ₁, σ₂, σ₃)
 => SE HO ALMENO QUESTO N° DI INFO, POSSO RISOLVERE
 => RICAVO STRATIGRAFIA DEL SOTTOSUOLO -> MODELLI DI SOTTOSUOLO EQUIVALENTI

DISCARICA IN AMBIENTE FLUVIALE, DOVE SONO STATI NESSI FANGHI RICCHI DI MATERIALI FERROSI
 => RISPOSTA IN FASE È ABBA FORTE
 SI VEDE COME IL METODO SI A SENSIBILE ALLA PRESENZA ANTRORICA.





Confronto tra i dati GEM-300 con i risultati della tomografia elettrica



SONO TECNICHE MOLTO SIMILI AISEV, CONSENTONO DI COSTRUIRE STRATIGRAFIE VERTICALI DEL SOTTOSUOLO.

OGGI = USATE ANCHE X INTERPRETAZ DELLE SEZ. VERTICALI SIMILI AI RISULTATI OBTENIBILI CON TOMOGRAFIE ELETR.

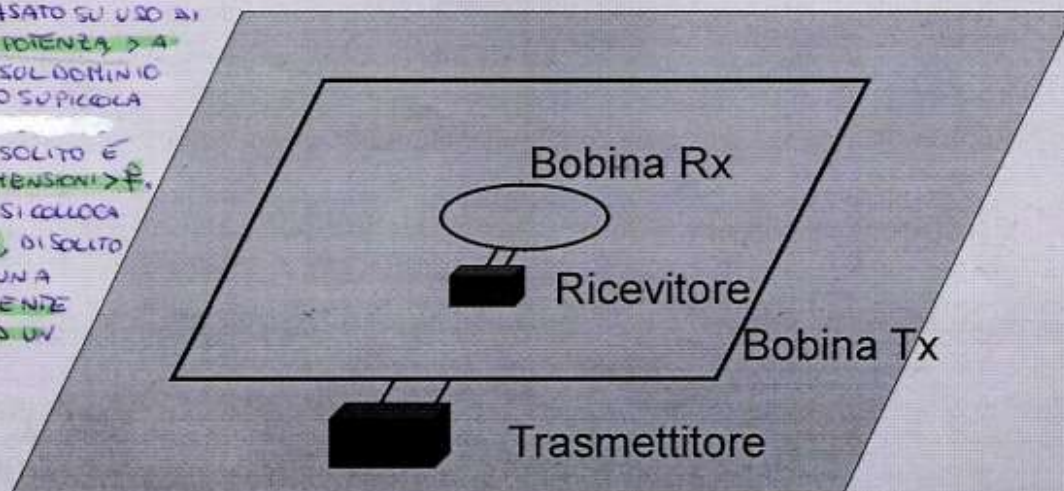
Metodi TDEM per indagini a media profondità

Per le applicazioni a media profondità (fino a 150 metri di profondità) si possono usare bobine trasmettenti (loop) di forma quadrata e lato di 25 o 50 m. Nel cavo elettrico che costituisce la bobina trasmettente viene immessa corrente (intensità di 3-10 A) sotto forma di impulsi di durata di pochi millisecondi.

Il campo elettromagnetico primario si diffonde in profondità e interagisce per induzione con le strutture elettricamente conduttive. Si interrompe il passaggio di corrente e si valuta al dispositivo ricevente un transiente di forza elettromotrice indotta dal campo magnetico

secondario

PRINCIPIO = BASATO SU USO DI UN T (DI ALTA POTENZA > 4 QUELLE VISTE SUL DOMINIO DI F, ALMENO SU PICCOLA SCALA). BOBINA T DI SOLITO È UN CAVO DI DIMENSIONI > F. ALL'INTERNO, SI COLLOCA IL SISTEMA R, DI SOLITO COMPOSTO DA UNA BOBINA RICEVENTE COLLEGATA AD UN RICEVITORE.



SIAMO ANCORA NEL CASO DI PROPAGAZIONE DI C.E.M. IN REGIME DIFFUSIVO

POSSO IMMAGINARE:

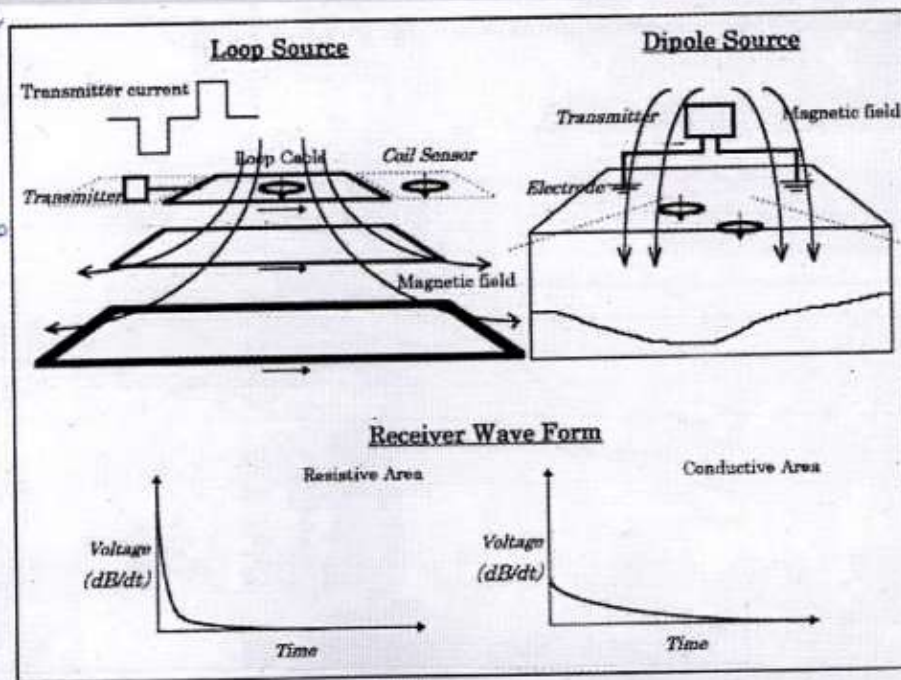
TDEM configurazione di misura

SE IL SISTEMA È CARICATO DA UNA BOBINA TRASMETTITRICE = BIG RETTANGOLO, POSTA SUL SOTTOSUOLO, ED IMMETTIAMO UN IMPULSO (ONDA QUADRA CONCILIO V_0 , COME VISTO IN PRECEDENZA)

⇒ LE CORRENTI INDOTTE NEL SOTTOSUOLO SONO COME DEI RETTANGOLI VADANO SEMPRE +BIG (RICALLANO FORMA DI ISORINATI)

È COME SE CI FOSSE RO TANTI ANELLI DI CORRENTE INDOTTA CHE SI PROPAGANO A PROFONDITÀ VIA VIA CRESCENTE

SONO LE CORRENTI ZIRIE CHE SI OSSERVANO NEL TRANSIENTE

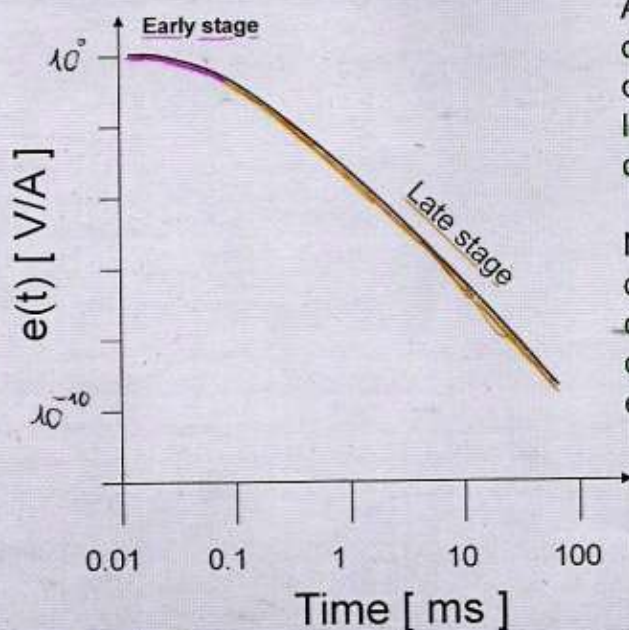


Typical TDEM Survey Setup and Receiver Wave Form

From: MINDECO

⊗ VAI A 62

Risposta di un mezzo omogeneo



Al ricevitore si osserva una graduale diminuzione della f.e.m indotta che diventa con gradiente costante (in log-log) per tempi lunghi di osservazione.

Nella fase del late stage, l'andamento del segnale TDEM dipende da caratteristiche strumentali (momento di dipolo magnetico) e dalla conducibilità elettrica del mezzo.

e = INTENSITÀ DEL SEGNALE NORMALIZZATA

DIAGRAMMA BILOGARITMICO CI FA OSSERVARE MEGLIO LA DINAMICA DEL SEGNALE

⊗ VAI A 63

$m =$ MOMENTO OSCILLANTE, DIRETTO \perp PIANO SU CUI GIACE LA BOBINA.

+ È BIG LA BOBINA

\Rightarrow \uparrow INTENSITÀ DEL CEN. GENERATO

\Rightarrow POSSO AUMENTARE DIMENSIONI DELLA BOBINA \times CERCARE DI OTTENERE INFO \rightarrow PROFONDITÀ.

\Rightarrow OTTIENGO UN SEGNALE SHIFTATO VERSO L'ALTO.

\Rightarrow C'È UN t_0 MAGGIORE

QUINDI, 12 MODI IN CUI POSSO AGIRE SONO: $\uparrow I$ OPPURE $\uparrow A$.

• SU I CI SONO LIMITI DI DISPONIBILITÀ DELLE POTENZE, SI ARRIVA A $I = 30A$ PER ARRIVARE A PROFONDITÀ DI ODG = 1 Km.

\Rightarrow SERVONO GENERATORI IMPORTANTI, POCO TRASPORTABILI

• PER AGIRE SU A :

- PICCOLE PROFONDITÀ (PICCOLA SCALA) \Rightarrow BOBINE DI 20×20 m

- PER ARRIVARE A $Z = 1$ Km $\Rightarrow A = 500 \times 500$ m

IN PRIMA APPROSSIMAZIONE, SI PUÒ DIRE CHE A CONTA MOLTO,

\rightarrow PROFONDITÀ D'INDAGINE È \sim LATO DELLA BOBINA (O POCO +).

QUESTE INDAGINI, \times COME LE STIAMO VEDENDO, SONO MIRATE A NOTARE LE VARIAZIONI DI σ , CON LA PROFONDITÀ.

\Rightarrow \times OTTENERE DETEROSTRATIGRAFIE VERTICALI, CON RISULTATI SIMILI A QUELLI OTTENIBILI CON ISEV.

AFFIANCANDO TANTI DI QUESTI SONDAGGI (MUOVENDO LA BOBINA LUNGO UN PROFILO) SI OTTIENE UNA SEZIONE 2D.

\otimes VAI A 61

\rightarrow RISPOSTA DI UN MEZZO OMOGENEO

IN R , OSSERVO IL DECREMENTO DI $F_{em}(e)$ NEL TEMPO.

È LA RISPOSTA CHE DI SOLITO SI OSSERVA IN TERMINI DI VOLT, NORMALIZZATA \times LA CORRENTE CHE PASSA NELLA BOBINA T (Ampere).

\Rightarrow COME UDM SAREBBE UNA RESISTENZA.

SE AVESSI MATERIALE MOLTO RESISTIVO, IL SEGNALE SI ATTENUA MOLTO VELOCE NEL T

\Rightarrow DIFFICILE OSSERVARLO IN MONO CORRENTE SENZA DIAGRAMMA BILOG.

È HA UNA DINAMICA MOLTO MARCATO:

RISPETTO ALL'ISTANTE INIZIALE, FINO A QUANTO RIESCO AD OSSERVARLO E SI ATTENUA MOLTO:

10 ODG IN 100 ms \rightarrow (È UN TEMPO GIÀ IMPORTANTE).

\rightarrow 10 \div 100 ms \Rightarrow PROFONDITÀ D'INDAGINE \sim OLTRE CENTINAIO DI M

CON QUESTE DINAMICHE DI REPENTINA VARIAZIONE,

È DIFFICILE TECNOLOGICAMENTE

\Rightarrow ANALIZZATORI DI SEGNALE SONO PIU'OSTO SENSIBILI E DELICATI

ANCHE CON UN MATERIALE OMOGENEO & ISOTTOPO, IL DIAG. BILOG CI FA NOTARE 2 FASI \neq DEL COMPORTAMENTO

• = "Early Stage"

ATTENUAZ. POCO RILEVANTE, QUASI COST.

CEN SI DIFFONDE \times LO RIV. RADIALMENTE, NEGLI ORIZZONTI + SUPERFICIALI, È UN TRANSITORIO LEGATO ALL'INTERRUZIONE DEL SEGNALE IN T.

LA PROPAGAZIONE È PREVALENTI. ORIZZONTALE.

QUESTA FASE È INDIPENDENTE DALLE CARAT. DI σ DEL MATERIALE, È LEGATA ALLE DIMENSIONI DELLA BOBINA

• = "Late Stage"

DOPO QLK FRAZIONE DI MS, FORTE ATTENUAZIONE.

DECRESCITA \sim LINEARE (NEL DIAG. BILOG), ANDAMENTO \sim COST.

LE CARAT. DI σ SONO IMPORTANTI.

L'EARLY STAGE NON È DIAGNOSTICO, DIPENDE SOLO DA UN PROCESSO DI DIFFUSIONE ORIZZ

\Rightarrow NON PUÒ ESSERE USATO,

\Rightarrow DOVREMO RIFERIRCI SOLO AL "Late Stage", IN CUI L'ANDAMENTO NEL T DIPPENDE σ .

PIÙ LA 1° FASE SI ESTENDE NEL T, + SARÀ IMPOSSIBILE

INDIVIDUARE LE CARAT. DI σ DEGLI STRATI + SUPERFICIALI

(LÌ, NON ABBIAMO INFO INTERPRETABILI).

STRUMENTAZIONE TDEM

LA STRUMENTAZIONE TDEM È NATA A SCOPI IDROLOGICI E MINERARI. (STUDIARE CAVITÀ IN NORD AMERICA, POI ESTESA IN ALTRI CONTINENTI A RICERCHE IDROLOGICHE), MOLO APPLICATA IN AFRICA.
⇒ INDAGINI A MEDIA-GRANDE PROFONDITÀ, FINO A OLTRE CENTINAIO DI M.

SISTEMI TO-VERSATILI IN BASE ALLA PROFONDITÀ D'INDAGINE.

① = STENDALONE, CON GENERATORE E RICEVITORE INCORPORATO.

BATTERIA CHE GENERA UN SEGNALE A PICCOLA INTENSITÀ E CAPTA ANDAMENTO DEL SEGNALE IN R.

MOLTO PORTATILE, ARRIVA AL MAX A GESTIRE LOOP DI 50×50 m (MAX $100 + 100$ m)

⇒ INDAGINI A PICCOLA PROFONDITÀ, MAX 100 m

CORRENTI EROGABILI = 3-4 A

⇒ PICCOLE INDAGINI SU PICCOLA SCALA.

MEDIA PROFONDITÀ → SISTEMA + COMPLICATO, CON UN GENERATORE DI 2-3 kW

⇒ CORRENTI ALMENO FINO A 10 A.

È ANCORA PORTATILE, MA STRUTTURA + DELICATA.

FINO A ~300 m ⇒ SERVONO ALMENO 10 A.

PROFONDITÀ FINO A 1000 m = STRUMENTAZIONE + COMPLICATA E DELICATA.

ALMENO 10-15 kW, 30 A ⇒ GENERATORI NON FACILMENTE TRASPORTABILI

LOOP = 50×50 m

IN BASE ALLA ≠ STRUMENTAZIONE CHE USI, LA PROFONDITÀ D'INDAGINE VARIA A Z^2 DEL LOOP CHE POSSONO GESTIRE.

LOOP = CAVI CRESI X TERRA, CON DETERMINATE CARAT. DI σ , SONO CONDUTTORI DI 1 mm^2 DI SEZIONE, COSTO = OLTRE DECINA DI €

BOBINA R E + DELICATA (SOLENOIDE).

RISPETTO A MISURE IN DOMINIO f → CAMBIA POCO (POI DI VISTA STRUMENTALE).

VARIA IL PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO OPERATIVO, CIOÈ LA FORMA D'ONDA GENERATA.

IN GENERALE → 2 MODALITÀ OPERATIVE:

• CLASSICA = RIFERITA ALLA STRUMENTAZIONE VISTA FINORA

• PIÙ MODERNA = + FACILE DA GESTIRE, GENERA UN DEM VARIABILE NEL t CON UNA FORMA D'ONDA VOLUTA (IMPULSO, DISOLITO), GENERANDOLA CON CONTATTO GALVANICO. (2 ELETTRODI FISSATI X TERRA COLLEGATI AD 1 TRASMETTITORE).

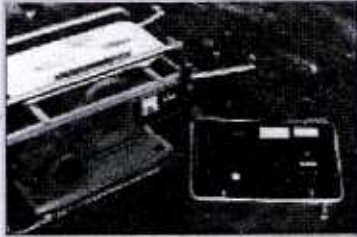
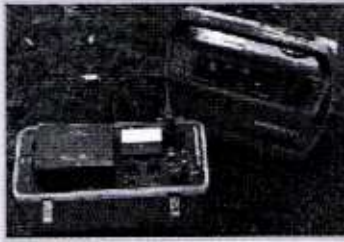
⇒ NO LOOP, SI IMMETTE CORRENTE CON UN CIRCOLO ELETTRICO. (GENERAZIONE CORRENTE ALTERNATA).

È 1 PO' + FLESSIBILE, POSSO DISTANZIARE GLI ELETTRODI FACILMENTE.

R È SEMPRE UNA BOBINA CHE CAPTA FEM \mathcal{E} IND

⊗ VAI A 67

Strumentazione TDEM



Strumentazione Geonics

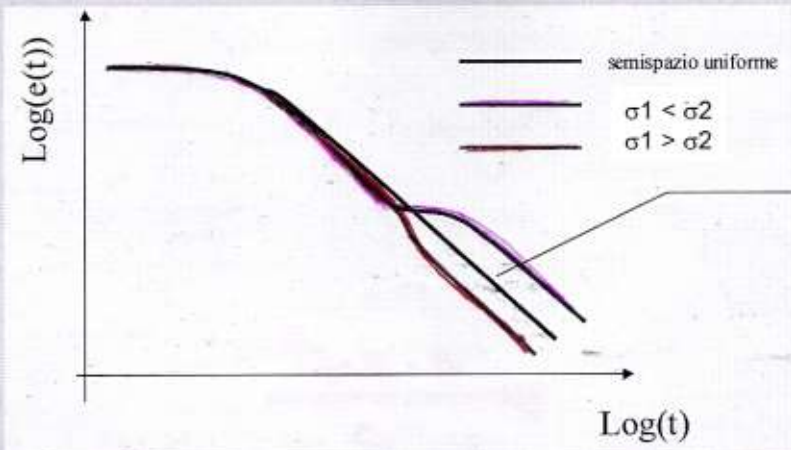
TEM47 - piccola profondità - fino 100 m
 TEM57 - media profondità - fino 300 m
 TEM37 - grande profondità - fino 1000 m
 EM42 - grande profondità - oltre 1000 m

⊗ VAI A 65

QUEST'È L'EQ. CON CUI IL SEGNALE DECADA NEL TEMPO

Risposta TDEM semi-spazio omogeneo e uniforme e nel caso di un'interfaccia pian-parallela

IN PRIMA APPROSSIMAZIONE, POSSIAMO RICONOSCERE LA RISPOSTA TEORICA NEL CASO DI UN SEMISPACIO OMOGENEO E ISOTROPO AD UNA SEMPLICE RELAZIONE



È LA FEM OSSERVATA

$$e(t) = \frac{k_1 \cdot M \cdot \sigma^{3/2}}{t^{5/2}}$$

Resistività apparente (semi-spazio omogeneo e uniforme)

$$\rho_{app}(t) = \frac{k_2 \cdot M^{2/3}}{e(t)^{2/3} t^{5/3}}$$

QUESTE 2 RELAZ. SONO VALIDE PER MATERIALE OMOG. E ISOTR., ESSENDO IN CARTE STAGNE ⇒ PER TUNNELI

PARAMETRI STRUMENTALI:

- k_1 = COEFF. DI RESIST. DELLO STRUMENTO, DATO DALLO COSTRUTTORE
- M = MOMENTO DI DIPOL. MAGNETICO → IL PARAMETRO PIÙ IMPORTANTE
- ↳ $M = n \cdot I \cdot A$ → n = NO. DI AVVOLGIMENTI DELLA BOBINA T (PIÙ È ALTA LA DENS. DI SPIRE)

MODIFICANDO M (UNO DEI 3 TERMINI), SHIFTO LA CURVA. MA NOI INTERESSA LA SUA INCLINAZIONE.

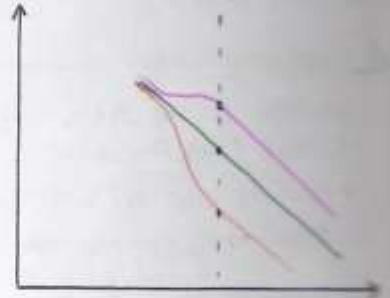
VANTAGGIO → SE ↑ M ⇒ POSSO ARRIVARE A PROFONDITÀ SUPERIORI

⊗ VAI A 68

→ SONDAGGI TDEF - INTERPRETAZIONE 1D

POSSIAMO USARE LO STRUMENTO V_{DIFF} X INTERPRETARE I SONDAGGI:

- SEMISPAZIO OMOGENEO
⇒ RICAVO INFO COST
- SEMISPAZIO NON OMOGENEO
⇒ RICAVO CURVA CHE HO EXE • OPIURE •, A SECONDA DI $\sigma_1 \geq \sigma_2$



IN TERMINI DI VELOCITÀ DI DIFFUSIONE:

- $\sigma_2 > \sigma_1$ ⇒ OSSERVO UN RITARDO DELLA DIFFUSIONE DEL CAMPO
- $\sigma_2 < \sigma_1$ ⇒ HO UN ANTICIPO

⇒ POSSO COLLEGARE LA CURVA DI VARIAZ DELLA σ DEI YARBERN IN TERMINI DI V_{DIFF} .
QUEST VALE RIGOROSAMENTE X IL SEMISPAZIO.

POSSO APPLICARE IL CONCETTO DELLA V_{DIFF} X INTERPRETARE LE PROFONDITÀ A CUI EFFETTIVAM
POSSO OSSERVARE LA VARIAZ DELLE CURVE DI CONDUCIA.

(FACCIO 1 PO' DI MISURE, RICAVO LE V_{DIFF} MEDIA, ED IN BASE AD ESSA USO ALGORITMI)
⇒ XPRUDIMENTALE

MODELLO DI NIBLETT - BOSTICK :

CONSENTE DI FARE 1 CONVERSIONE DIRETTA DAL SEGNALE OSSERVATO (TRANSITORIO) AD UN
SEGNALE PIU' EFFETTIVO IN FUNZ. DELLA Z , BASANDOSI SUL CONCETTO DI V_{DIFF} .

BASANDOCI SU TALE MODELLO, LA PROFONDITÀ EFFETTIVA E' LEGATA ALLA σ

⇒ MISURANDO P_{APP} , POSSO RICAVARE INFO (CON QUEST SEMPLICE ALGORITMO) DELLA PROFONDITÀ
A CUI OTTENGO QUELL'INFO IN UN CERTO SPANIE t .

⊗ VAI A 74

Velocità di diffusione

DIFFUSIONE DELLA CORRENTE
A t CRESCENTI:

← OSSERVO LA
MAX INTENSITA'
DI CORRENTE
CHE CIRCOLA
IN UN CERTO ORIZZONTE
LA CUI DISTANZA DALLA SORGENTE E' d

- In un mezzo omogeneo, il transiente del campo elettrico raggiunge un valore massimo alla profondità di diffusione:

$$d = \left(\frac{2t}{\sigma\mu} \right)^{0.5}$$

↓
BASSA σ ⇒ IL CAMPO E' TAVOLCE
E VA + IN PROFONDITA'

- Il massimo si propaga in profondità con un valore di velocità (in un semispazio conduttivo) pari a:

$$v = 2 \left(\pi\sigma\mu t \right)^{-0.5}$$

↑
v = COST,
PER MATERIALE
OMOGE & ISOTROPICO

- dove σ è la conducibilità elettrica e μ la permeabilità magnetica del mezzo e t è l'istante di osservazione

Sondaggi TDEM - Interpretazione 1D

I dati di resistività apparente vengono trasformati in una resistività effettiva del sottosuolo ad una profondità approssimata, dando origine ad una distribuzione continua di resistività con la profondità lungo la verticale della zona investigata.

Schema di inversione Niblett-Bostick

Si ricava una curva di fase equivalente dal dato di resistività apparente TDEM

$$\rho_{eff} = \rho_{app} \cdot [(90/\phi) - 1]$$

Dove la fase equivalente (ϕ) si ricava dalla derivata rispetto al tempo della curva di resistività apparente (in dominio logaritmico)

$$\delta_{eff} = \left(\frac{3.9 \cdot \rho_{app} t}{2\pi \cdot \mu_0} \right) \rightarrow \text{PROFONDITA'}$$

Si definisce un periodo T equivalente: $T = 3.9 t$.

Si ottiene l'equazione:

$$\rho_{eff} = \rho_{app} \cdot \left[1 + \frac{(\partial \log \rho_{app})}{(\partial \log T)} \right]$$

⊗ VAI A 69

→ CONFRONTO CON MISURE IN DOMINIO DI FREQUENZA

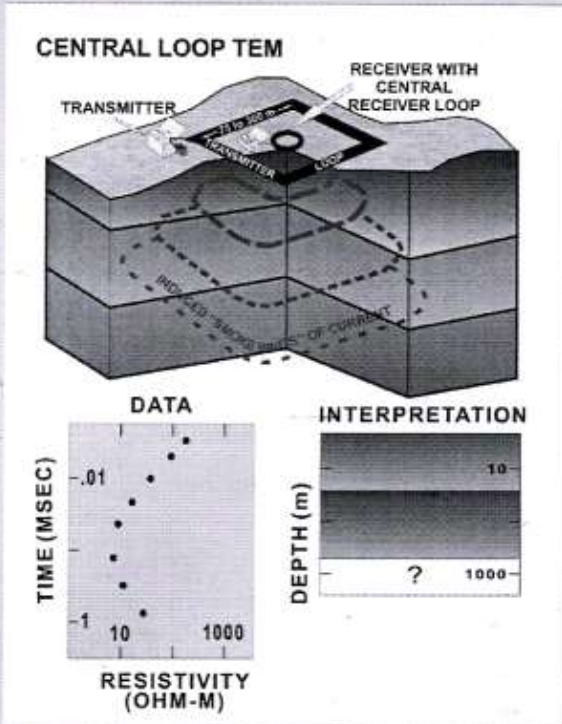
- ⓑ) Misure poco sensibili a eventuali disallineamenti tra le posizioni del trasmettitore e del ricevitore.
 Se retto il ricevitore poco centrato, l'interpretazione è ancora valida.
 Dominio di f → un piccolo disallineamento, cioè variaz della distanza dal TC di uno delle 2 bobine (sopra il suo raggio di curvatura)
 ⇒ varia la distanza effettiva tra la bobina R e la T
 ⇒ Ripercussioni in termini di campo primario concatenato. (non c'è + vettore di vettori \times cui restava solo il radiale che si semplifica).
 ⇒ LA RISPOSTA DI CAMPO PRIMARIO non sarà + uguale a quella teorica che dobbiamo calcolare \times dedurre il valore di campo 2°ario.
 ⇒ il campo 2°ario si porta dietro quest'errore di disallineamento.
 Lavorando in zone accidentate (necessità di avere operatori posti a quote \neq)
 ⇒ La topografia determina questo tipo di disallineamento
 ⇒ Condiziona molto le misure in dominio di f .
- ⓒ) Le misure del transiente avvengono quando il campo 1°ario è ristretto (non circola ovunque)
 ⇒ Misure in assenza di energizzazione.
 La dinamica del segnale è difficile da seguire, essendo un transitorio che si azzerava molto rapidamente
 ⇒ Aspetto strumentistico delicato, che può portare incertezze
 Però, evita la necessità di eliminare l'interferenza al campo 1°ario
 ⇒ Misure molto + accurate.
- ⓓ) La skin depth conta sempre (il segnale si attenua tanto + quanto + conduttivo è il materiale circostante), ma meno.
 Potenza erogata → qualche decina di kW
 ⇒ il segnale è distinguibile dal rumore onde \times lunghi tempi di osservazione ($\uparrow z$)
 È + una questione tecnologia e di qualità di R e T.

⊗ VAI A 75

SE NON VUOLIO ANDARE AD ALTE PROFONDITÀ, MA BASTA AD OSSERVARE W CARTE GEOLOGICO E ING. AMB (OLK DECINA DI M.)
 => STRUMENTAZIONE PORTABILE, CON 2 OPERATORI SI POSSONO ESEGUIRE + SONDAGGI AL GIORNO

42° DEL LOOP È DELLA TORO GRAFIA

TDEM - acquisizione dati



Acquisizione di ogni singolo sondaggio in pochi minuti => ADA PROVAZIONE

Strumentazione leggera e facilmente trasportabile ☺

Più sondaggi al giorno in funzione delle dimensioni dei loop

Costi: da 200 a 600 euro per ogni sondaggio -> PIU' ECONOMICO, SOPRATT X INDAGINI SUPERFICIALI

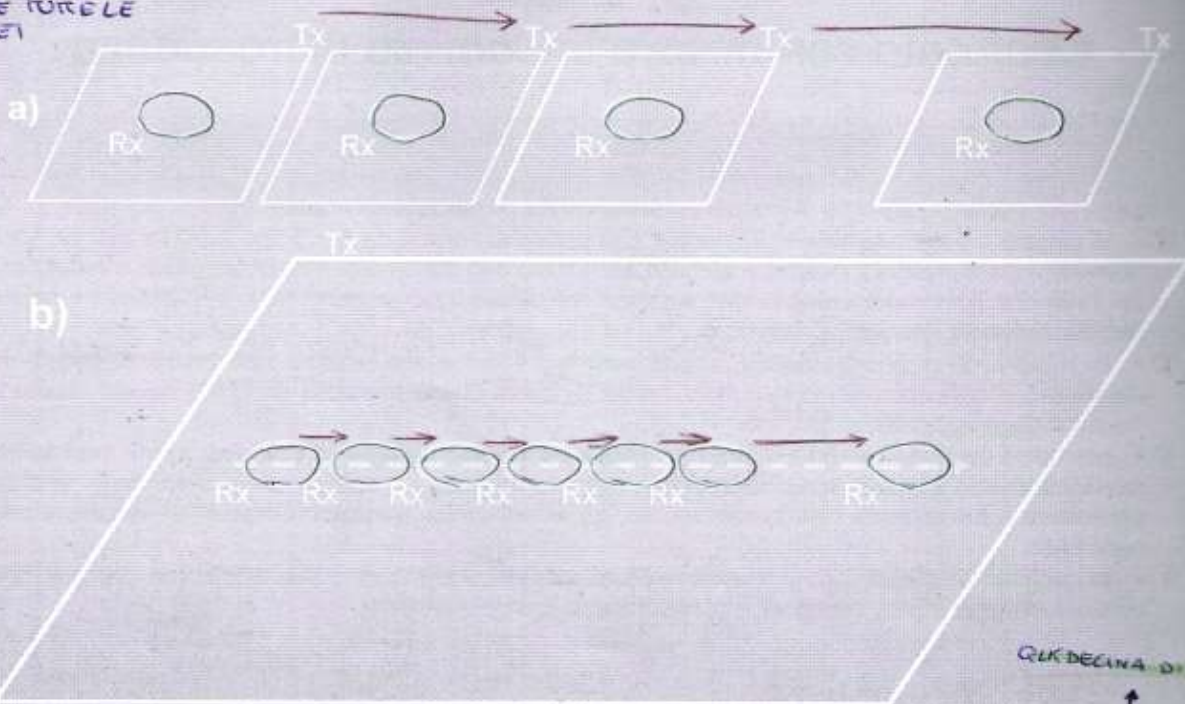
SINGOLO SONDAGGIO = INFO 1D

SE SI POSTO IL SISTEMA R+T LUNGO 1 PROFILO, OTTENGO UNA SERIE DI SONDAGGI AFFIANCATI, E POI INTERPRETO V SINGOLO SONDAGGIO COME SINGOLO DATASET. -> OTTENGO, PER V, 1 CURVA.

- MATERIALI X FERREI STRATIF -> TTE LE CURVE SONO UGUALI
- MATERIALE CON FAGLIA -> NON FUNZIONA
- MATERIALE CON BLANDE VARIAZIONI LATERALI

Schemi di acquisizione di dati TDEM

IL METODO FUNZIONA, POSSO UNIRE TUTTE LE INFO 1D DEI SONDAGGI



SCHEMA - CONVENZIONALE, X AREE MEDIO - PICCOLE (OLK CENTINAIO X OLK CENTINAIO DI M.), SUPERFICIALI

LOOP T MOLTO GRANDE, CHE RESTA FISSO SULL'AREA.
 R SI MUOVE LUNGO 1 SERIE DI PROFILI

Effetti magnetici sulle misure TDEM

La viscosità magnetica, nota anche come superparamagnetismo (SPM), si riferisce ad una particolare instabilità magnetica tale per cui la suscettibilità magnetica risulta dipendente dalla frequenza.

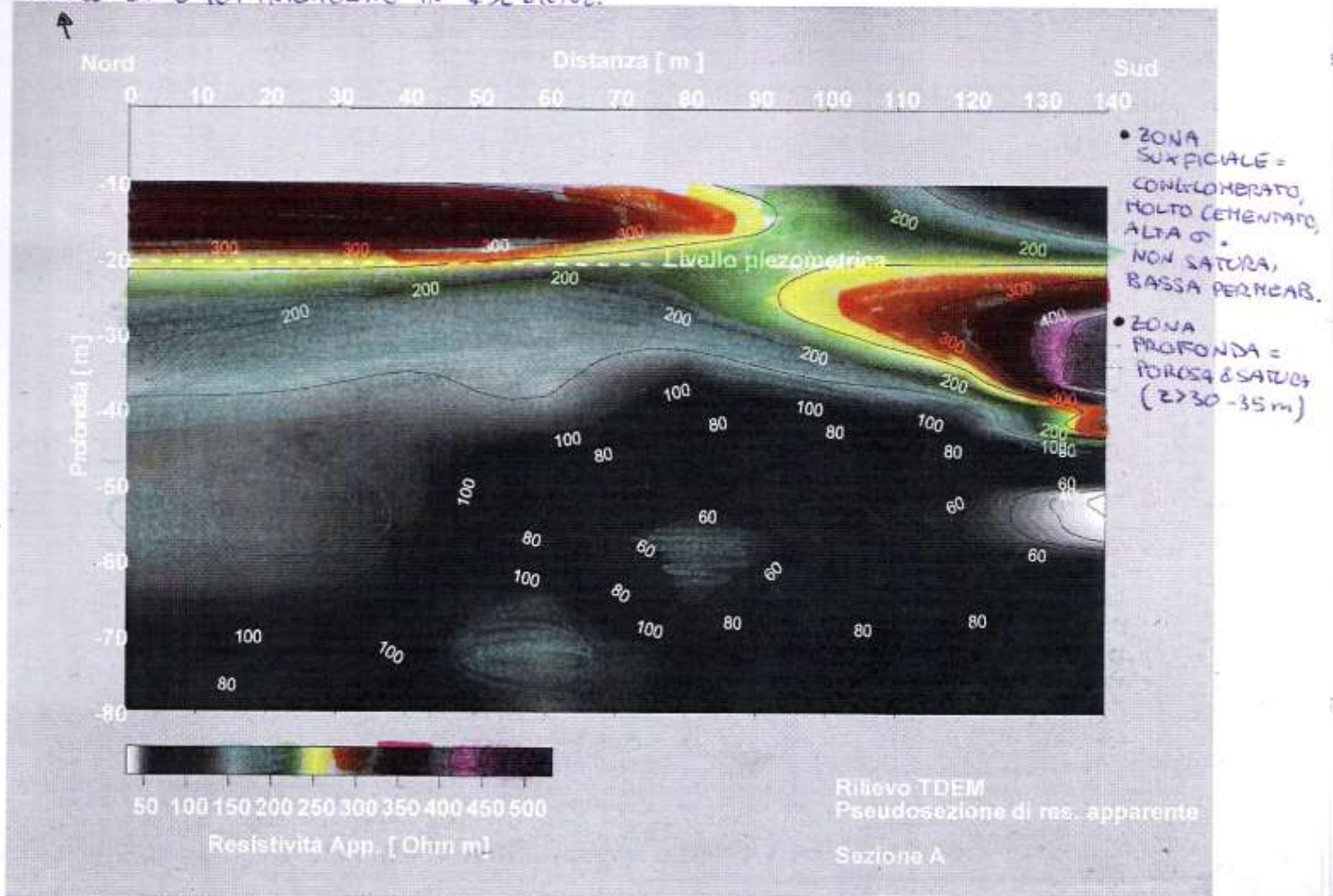
L'effetto di superparamagnetismo SPM viene considerato come una dispersione della suscettività magnetica della roccia o del suolo per mezzo al variare della frequenza

Nelle misure geofisiche, si manifesta sia nelle misure in dominio di frequenza a basso numero di induzione e nelle misure in dominio di tempo.

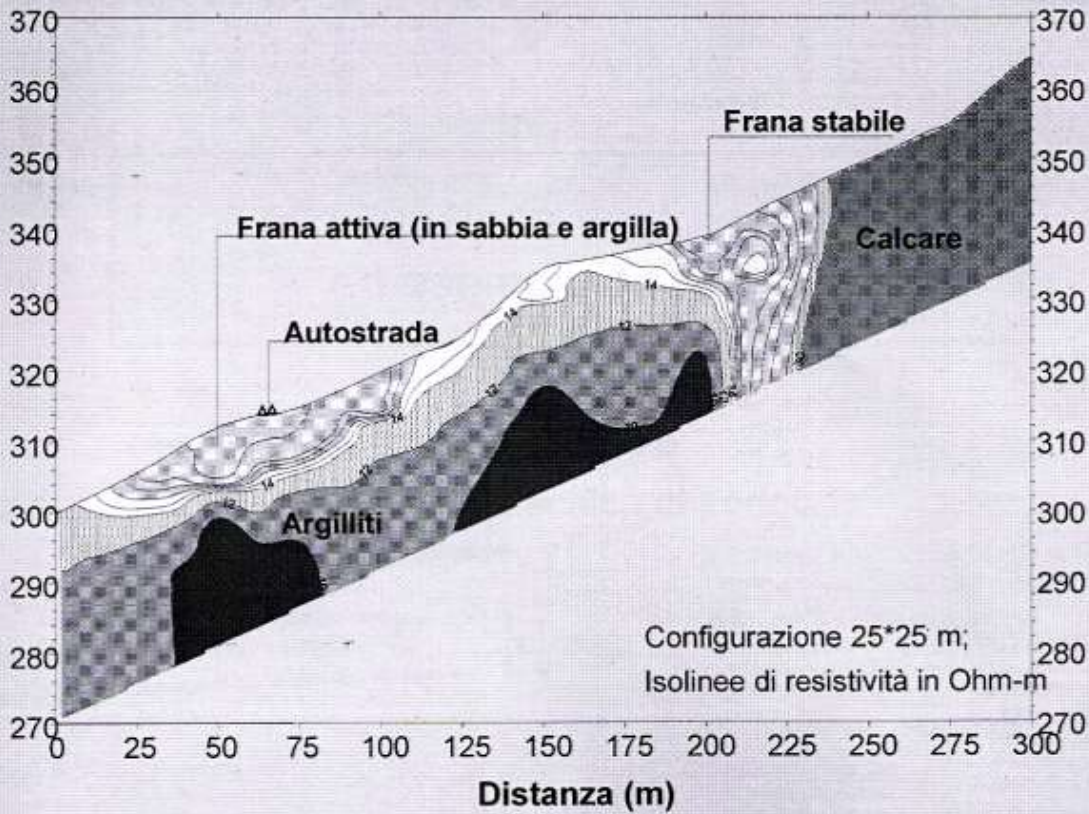
SPM è dovuto alla presenza di particelle fini di minerali magnetici quali magnetite (Tropin, 1967, Clark, 1980), ematite, (Creer, 1959); In campo archeologico, noto ed utilizzato a partire dagli anni 60 (Colani e Aitken, 1966);

Si riscontra spesso nelle prospezioni in rocce vulcanitiche ed in coperture di suoli lateritici.

INDAGINE DI TIPO ARCHEOLOGICO IN ZONA PADANA, PER EVIDENZIARE PRESENZA DI 1 ZONA SATURA. QUI, ERANO TANTI PICCOLI SONDAGGI (LOOP 25x25 m) TRA DI LORO AFFIANCATI, INTERPRETATI IN MODO SINGOLO 1D E DOI INTERPOLATO IN 4 SEZIONE.



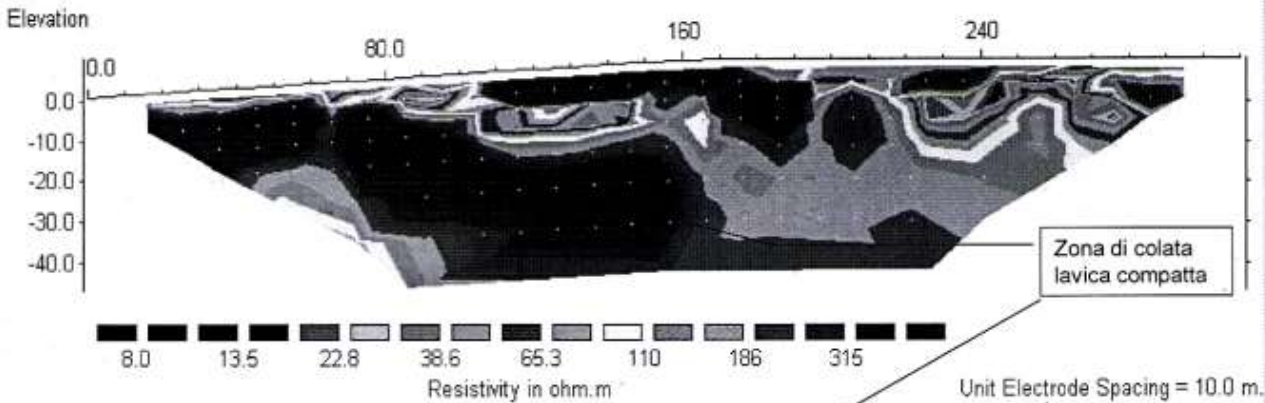
APPLICAZIONI IN CAMPO GEOTECNICO, X STUDIARE LE CARAT. GEOLOGICHE DI UN MATERIALE IN FRANA.



X DIFFERENZIARE IL MATERIALE IN FRANA (PNEU-BASSE P ~ 20 Ωm) DA MATERIALE A MONTE, CIOE' CALCARE (P ~ 50-60 Ωm).
 SI TROVA UN LIMITE TRA LE 2, CIOE' UN'EVENTUALE ZONA DI SCIVOLAMENTO.
 QUEST'INFO VA CALIBRATA (DA INFO QUALITATIVE SULLA VARIAZ DI PAPP) CON DELLE PERFORAZ, X CAPIRE I LIMITI E LA SUPERFICIE DI SCIVOLAMENTO.

TDEM - Pseudosezione di resistività di una frana

QUEST'È UN ESEMP. SU UN VERSANTE: TANTI SONDAGGI AFFIANCATI HA XMESSO OTTENIMENTO DI INFO QUANTITATIVE, NONOSTANTE LA TOPOGRAFIA.



Anguillara - Indagini Geofisiche
 Tomografia elettrica (alto) e sezione di resistività da TDEM (basso) - (valori in Ohm m)
 Dicembre 2000

LA RADIAZIONE NEL SOTTO SUOLO NON È ESATTAMENTE ISOTROPA, L'È NON SI IRADIA CON STESSA INTENSITÀ IN LE DIREZIONI DI POLI, A CARATTERI COSTRUTTIVE, NON SONO IN GRADO DI IRRADIARE E IN TUTTE LE DIREZIONI, MA L'È IRRADIATA È PREVALENTEMENTE FOCALIZZATA IN 2 FASCI, UN CONO DI RADIAZIONI.

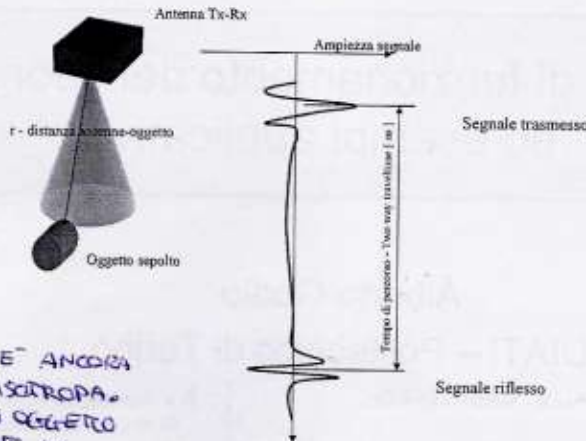
L'È SI CONCENTRA X LO + SECONDO UN ANGOLO DI IRRAZIONE, CHE È DETERMINATO DALLE CARATTERISTICHE DEL MATERIALE.

Tracce Radar e Radargrammi

QUESTO FATTO DETERMINA CERTE CARATTERISTICHE DI DIRETTIVITÀ DELL'ANTENNA, CIOÈ L'ANTENNA NON CERCA DI ILLUMINARE IL + EFFICACEMENTE POSSIBILE L'OGGETTO DELL'INDAGINE.

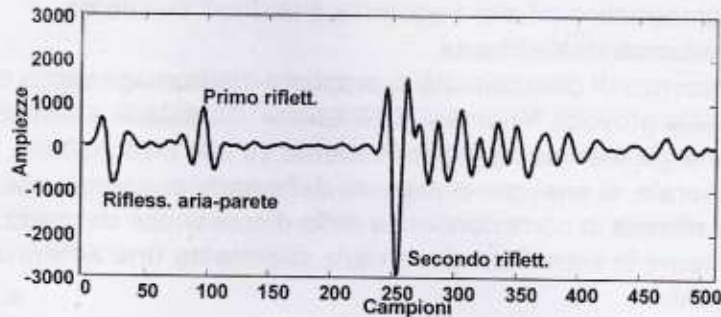
OSSERVEREMO IL FENOMENO DELL'INTERFERENZA DATA DALL'OGGETTO SOLO SE IL CONO IRRAZIA L'OGGETTO.

IL PRINCIPIO DELLA RIFLESSIONE È ANCORA VALIDO, ANCHE SE È NON È + ISOTROPA. A STUDIARE LA PRESENZA DI UN OGGETTO NEL SOTTO SUOLO, STUDIO SOPRATTUTTO LA PARTE DI È RIFLESSA.



⊗ VAI A 84

Esempio di segnale georadar



ANTENNA 200-400 MHz

↳ PICCOLE-MEDIE PROFONDITÀ
↳ λ MEZZA METRICALI ~ 5-10 m

Antenne a diversa frequenza principale per differenti contesti applicativi

INDAGINI A BILIE RISOLUZIONE, PICCOLA SCALA

↳ 1500-2000 MHz
↳ λ 140cm, DECIMETRICA (DIPENDE DELLA V)



Antenna da 400 MHz per rilievi su strade, ponti, rilievi per individuazione di manufatti sepolti (cavità, tubazioni, serbatoi)



Antenna da 1500 MHz per rilievi su manufatti, statue, monumenti, rivestimenti etc.

82

⊗ VAI A 87

POTREMO POI ANALIZZARE IL CONTRIBUTO DELL'ONDA RIFRATTA CON n_c E CHE TORNA IN SUPERFICIE (LO CAPIAMO IN R).

n_c DIPENDE DALLE CARATTERISTICHE DEL MATERIALE.

I FENOMENI SONO:

- 1) PROPAG. ONDA DIRETTA NEL MATERIALE
- 2) PROPAG. ONDA DIRETTA IN ARIA
- 3) RIFLESSIONE
- 4) PROPAG. CON RIFRAZ. IN DISCONTINUITA' TRA 2 MATERIALI.

NEL CASO DI INTERFACCIA PARI PARALLELA:

- ONDA DIRETTA → NON IMPORTA
- ONDA RIFLESSA → HA t CHE E' DETERMINABILE CON L'EQ VISTA
- RAGGIO BIRIFRATTO → POSSO SCRIVERE IL t DI PERCORSO DI QUESTO RAGGIO, CHE E' RIFRATTO 2 VOLTE SECONDO ANGOLO CRITICO:

$$t = \frac{z}{v_1} + \frac{2h \cdot \cos \theta_c}{v_1} \rightarrow \text{UGUALE ASSISTITA}$$

STRATO INCLINATO = VALGONO TUTTE LE EQ VISTE IN SINTESI.

CAMBA SOLO UNA COSA:

LE CARATTERISTICHE DELLA v PROPAG. NON DIPENDONO + DAI PARAMETRI MECCANICI, MA DAI PARAM. EM, SOMMATE DA PERMEABILITA' MAGN. E DA PERMETTIVITA' EL.

⊗ VAI A 81c

→ continua: diffrazione?

RISPETTO A QNT STUDIATO FIN'ORA, CERTI OGGETTI (CON DIMENSIONI COMPARABILI O INFERIORI A λ) DETERMINANO ANCHE FENOMENI DI DIFFRAZIONE

⇒ PROPAGAZ. IN T. LE POSSIBILI DIREZIONI.

UNA PARTE DEI FENOMENI D'INTERFERENZA E' LEGATA ALLA DIFFRAZIONE.

LUNGHEZZE D'ONDA IN GIOCO DIPENDONO DALLA f CHE USIAMO NEL SEGNALE IRRADIATO:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

⇒ PER STUDIARE LA λ DOVREMO CONOSCERE LE CARATTERISTICHE EM

ADES.:

- $v = 0,1 \text{ m/ns} \rightarrow \text{E' } \frac{1}{3}$ DELLA C IN ARIA

- $f = 100 \text{ MHz}$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{0,1 \cdot 10^9 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{100 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = 1 \text{ m}$$

- se: $f = 1 \text{ GHz}$

$$\Rightarrow \lambda = 0,1 \text{ m}$$

LE METODOLOGIE D'INDAGINE DETERMINANO LA POSSIBILITA' DI ACQUISIRE INFO SU FENOMENI COMPLETTI:

- ANTENNE RET COLLEGATE ASSIEME NELLO STESSO BOX (ACCARE SPESO)
 - ⇒ L'UNICO FENOMENO CHE POSSO CAPIRE E' RIFLESSIONE, AL MAX LA DIFFRAZIONE.
- ANTENNE RET SEPARATE E DISTANZIATE UN PO'
 - ⇒ POSSO CAPIRE I 4 FENOMENI DI PROPAGAZIONE

FORME NONA TIPOLOGIE DELLE ONDE IRRADATE DAL RADAR:

NOI CI RIFERIAMO AI RADAR DI TIPO IMPULSATO → [+ SEMPLICI E DIFFUSI, MA NE] CON MOLTE TIPOLOGIE COSTRUTTIVE.

E' FATTO DA UN PICCO DI MAX (+) E UN PICCO DI MIN (-), CIRCA SIMMETRICI.

f E' DETERMINATA DAL PERIODO T DELL'IMPULSO:

$$T = \frac{1}{f}$$

SI CERCA DI IRRADIARE LA f MOLTA.

ANTENNE HANNO CARATTERI COSTRUTTIVE, IN BASE ALLA f CHE VOGLIO IRRADIARE.

⇒ LE DIMENSIONI DELLE ANTENNE SONO LEGATE ALLO f :

SE CONSIDERIAMO LE ANTENNE CHE SONO SEMPLICI DIPOLI RESISTIVI

⇒ DIMENSIONE DEL DIPOLO E' LEGATO ALLA λ CHE VOGLIAMO GENERARE, LUNGHEZZE $\sim \frac{\lambda}{2} = \frac{1}{2f}$

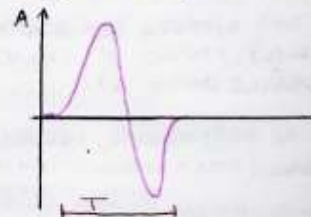
ESEMPIO:

$f = 100 \text{ MHz}$

$v = 0,1 \text{ m/ns}$

$$\Rightarrow \lambda = 1 \text{ m (VISTO PRIMA)}$$

⇒ ANTENNA = DIPOLO LUNGO DA 25 - 50 CM



QUINDI:

SE $T \propto \lambda \Rightarrow \downarrow \alpha$

\Rightarrow È DETERMINATA LA MODALITÀ CON CUI E SI PROPAGA NEL SCORSOLO ED INTERFERISCE CON DISCONTINUITÀ.

QUINDI:

RAGGIO DI FRESNEL = MODO X QUANTIFICARE QUAL'È LA MAX PARTE DI E CHE INTERFERISCE CON L'OGGETTO.

(VALE ANCHE X LA SISMICA, MA MENO).

$\uparrow z \Rightarrow \uparrow$ FOOTPRINT = DIMENSIONE BASE DEL CONO CHE INTERFERISCE CON L'OGGETTO.

IN QUESTO CASO: SUFFICIE DISPARATE PAN//

\Rightarrow POSSO INDIVIDUARE LE DIMENSIONI DI QUESTA BASE DEL CONO, CHE IDENTIFICA IL 95% DELL'E CHE VIENE RE-IRRADIATA.

C'È SI, BASA SULL'ANGOLO DI RADIAZ, MA LA DIMENSIONE DELLA BASE DEL CONO (E QUINDI LA RISPOSTA DELL'INTERFACCIA) È LEGATA ANCHE AL FATTO CHE L'E PÙ È X L O T RIFLESSA, X L E INTERFERISCE CON $\frac{1}{4}$ DELLA SUA λ

\Rightarrow L'INTERFERENZA COSTRUTTIVA È X L O T LEGATA AL CONTRIBUTO $\frac{\lambda}{4}$, LE ALTRE PARTI SONO MINORITARIE.

IN FUNZIONE DI CIÒ, SI PUÒ CALCOLARE QUALE SIA IL RAGGIO DI TALE CONO, E COME ESSA INTERFERISCE CON L'INTERFACCIA.

GEOMETRIA: $r = \sqrt{\left(L + \frac{\lambda}{4}\right)^2 - L^2}$

\Rightarrow RAGGIO DI FRESNEL $\rightarrow r = \sqrt{\frac{\lambda^2}{16} + \frac{7}{2} L \lambda}$

\Rightarrow DIMENSIONI DI TALE r DIPENDONO DA L E λ :

$$\begin{cases} \uparrow L \Rightarrow \uparrow r \\ \uparrow \lambda \Rightarrow \uparrow r \end{cases}$$

OCCORRE POI DETERMINARE COME L'E VIENE RESTITUITA IN SUPERFICIE, AVENDO UNA CERTA DISCONTINUITÀ.

\hookrightarrow DIPENDE DA: • QUANTO È DISTANTE L'OGGETTO (L)

- LE CARATT. INTRINSECHE DEL SISTEMA (f)
- LE CARATT. INTRINSECHE DEL MATERIALE (v)

QUESTA È IMPORTANTE SOPRATT NEL DETERMINARE LA CAPACITÀ RISOLUTIVA ORIZZ (IO HO L'INFO MEDIA SU TUTTA LA BASE DEL CONO).

CAPACITÀ RISOLUTIVA È LEGATA A α E r .

\hookrightarrow CAPACITÀ DI DISTINGUERE 2 OGGETTI ORIZZONTALMENTE VICINI.

⊗ VAI A 82

→ RILIEVO GEORADAR SU LASTRE CLS ARMATO

PROPAGAZ. DELL'E NON È PERFETTAMENTE FOCALIZZATA IN UN FASCIO STRETTO, MA HA UN CERTO ANGOLO DI APERTEZZA (α), CHE DIPENDE DA:

- CARATT. COSTRUTTIVE DEL MEZZO
- VALORE DI PERMETTIVITÀ: \downarrow PERMETT \Rightarrow RAGGIO FOCALIZZATO

• L'ANTENNA INTERFERISCE CON L'OGGETTO PRIMA ANCHE DI ARRIVARE SOPRA, LO VEDO QND È A DISTANZA x .

• QND ANTENNA È SOPRA, VEDO 1 RIFLESSIONE, LA DISTANZA ANTENNA-TARGET È MINIMA.

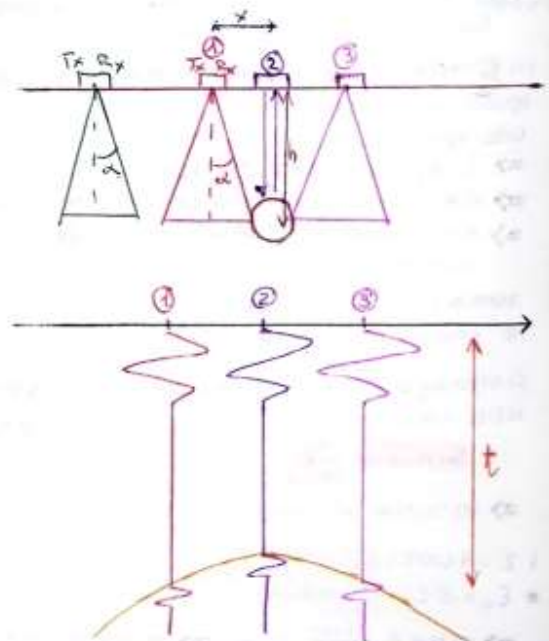
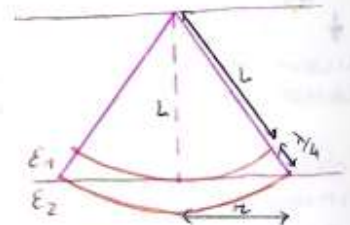
\Rightarrow VEDO UN RITARDO, CHE DIPENDE DA $x \Rightarrow$ DA α .

$\bullet \Rightarrow t = \frac{2\sqrt{x^2 + v^2}}{v}$

$\bullet \Rightarrow t = \frac{2h}{v}$

• SE COLLEGO I PUNTI, VEDO CHE È UN IPERBOLE

⊗ VAI A 87



Propagazione onda elettromagnetica in un mezzo resistivo (aria)

Dalla legge di Ampere si ricava che ad ogni campo elettrico variabile nel tempo e' associato un campo magnetico variabile nel tempo, con frequenza angolare ω

$$\nabla \times H = J + j\omega \epsilon E$$

$$\nabla \times H = [\sigma + j\omega \epsilon] E$$

valida per un segnale variabile nel tempo e nello spazio con legge sinusoidale:

$$E(t, z) = E_0 \cdot \cos(\omega t - kz + \phi_0)$$

L'equazione d'onda per il campo elettrico ed il campo magnetico variabili nel tempo con funzione di tipo sinusoidale si ricava dalla equazione di Ampere

$$\nabla^2 E - \gamma^2 E = 0$$

$$\nabla^2 H - \gamma^2 H = 0$$

$$\epsilon_c = \left(\epsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \right)$$

$$\gamma^2 = -k^2 = -\omega^2 \mu \epsilon_c$$

dove ϵ_c e' la permittivita' elettrica complessa che tiene conto della permittivita' elettrica del mezzo e della conducibilita'; la parte reale si riferisce al termine di propagazione del campo, mentre la seconda parte rappresenta il termine dissipativo del campo, k e' il numero d'onda.

dove il simbolo tilde indica che al posto dei vettori si sta operando con i corrispondenti fasori, tali per cui

$$E(t) = \text{Re} \left[\tilde{E} \cdot e^{j\omega t} \right]$$

$$\tilde{E} = E_0 \cdot e^{j(\phi_0 - \pi/2)}$$

La velocita' di propagazione dell'onda dipende dalle caratteristiche costitutive elettromagnetiche del mezzo:

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{\omega}{\omega \sqrt{\mu \epsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}}$$

Nel vuoto (aria):

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \approx 3 \cdot 10^8$$

La lunghezza d'onda:

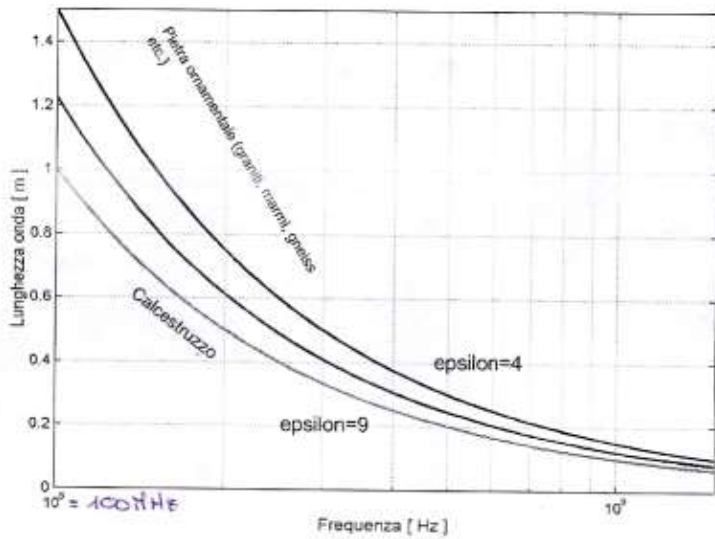
$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{v}{f}$$

γ = COST. DI PROPAG. DELL'ER. NONNA.
DIRETTAM. CORRELATA ALLA V PROPAG.

EC: $\begin{cases} \text{PARTE RE} = \text{PROPAGAZ.} \\ \text{PARTE IM} = \text{DISSIPAZ.} \end{cases}$

CLS $\rightarrow \epsilon \sim 9$
MAX PARTE DELLE ROCCHE $\rightarrow \epsilon = 4 \div 9$
E' POSSIBILE RICAVARE L'ESTIMA DELLA VARIAZ. DI λ IN BASE AI VALORI DI ϵ (CIOE' DELLA V)
 \uparrow F D'INDAGINE
 $\Rightarrow \lambda$ DIVENTA DECIMETRICA
 \Rightarrow CAPACITA' RISOLUTIVA CENTIMETRICA.

Lunghezza onda al variare della frequenza



MEZZO DISSIPATIVO
 \Rightarrow ELEVATA ATTENUAZ. DEL SEGNALE, CHE DIPENDE DA f E DALLA ϵ .
ER. NONNA DEL CAMPO E' SEMPRE LA STESSA, IL PARAMETRO E' ANCORA γ , MA ORA IL CONTRIBUTO Im NON E' TRASCURABILE.
 \Rightarrow DEVO SEPARARE LE 2 PARTI DI ϵ (RE E COMPLESSA)
 α = COSTANTE, COEFF. DI ATTENUAZIONE
 \hookrightarrow DIPENDE DA f E DALLA ϵ COMPLESSA (SIA RE CHE Im).
 $\left\{ \begin{array}{l} \alpha \text{ ALTO (PALLA)} \Rightarrow \alpha \text{ ALTO} \\ \sigma \text{ ALTO} \Rightarrow \alpha \text{ ALTO} \end{array} \right.$

OST E' 1 ALTRO MODO X ESPRIMERE LA SKIN DEPTH, IN BASE AL COEFF. DI ATTENUAZIONE:
 $\uparrow \alpha \Rightarrow \downarrow$ SKIN DEPTH (C'E' L'CORRELAZIONE).
SE HO ONDA PIANA (1D) CHE SI PROPAGA SOLO LUNGO Z
 \Rightarrow SOLUZE SEMPLIFICATE:
 $E(z) = E_0 \cdot e^{-\alpha z}$
MANCA XO' IL TERMINE DI DISSIPAZ. GEOMETRICA



Propagazione in un mezzo conduttivo

$$\nabla^2 E - \gamma^2 E = 0$$

equazione d'onda per il campo elettrico, espressa per mezzo dei corrispondenti fasori del campo elettrico

$$\gamma^2 = -\omega^2 \mu \epsilon_c = -\omega^2 \mu (\epsilon' - j\epsilon'') = -\omega \mu \left(\epsilon' - j \frac{\sigma}{\omega} \right)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

$$\gamma^2 = \alpha^2 - \beta^2 + j2\alpha\beta = -\omega^2 \mu \epsilon' + j\omega^2 \mu \epsilon''$$

da cui si ricava il valore del coefficiente alfa e beta

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} - 1 \right]^{0.5}}$$

e' il coefficiente di attenuazione in Np/m

La soluzione per un'onda piana che si propaga nella direzione z

$$\frac{d^2 E_x(z)}{dz^2} - \gamma^2 E_x(z) = 0$$

$$E(z) = x E_{x0} \cdot e^{-\gamma z} = x E_{x0} \cdot e^{-\alpha z} \cdot e^{-j\beta z}$$

$$|E(z)| = |E_{x0} \cdot e^{-\alpha z} \cdot e^{-j\beta z}| = |E_{x0}| \cdot e^{-\alpha z}$$

Il campo elettrico si attenua esponenzialmente con la distanza in funzione dei coefficienti di attenuazione. Il processo di attenuazione converte parte dell'energia in calore che si dissipa nel sottosuolo.

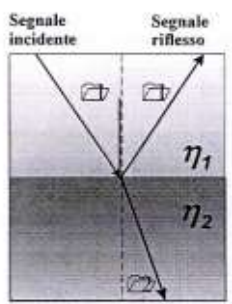
I COEFF. SONO LEGATI AI PARAMETRI DI IMPEDENZA.
 SISTICA: IMPEDENZA = DENSITA' x VELOCITA'
 QUI, IMPEDENZA EN E'
 CORRELATA AI PARAMETRI EN, E
 LIRACCHIUSE TUTI.

Propagazione dell'onda all'interfaccia tra due mezzi

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon} \left(1 - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right)^{-0.5}} \quad [\text{Ohm}]$$

$$\delta_s = \frac{1}{\alpha} \quad [\text{m}]$$

Impedenza intrinseca del mezzo
 Rapporto tra skin depth e coefficiente di attenuazione



Coefficienti di trasmissione e riflessione nel caso di riflessione normale all'interfaccia (Leggi di Snell):

$$\theta_{inc.} = \theta_{rifl.}$$

$$\frac{\sin \theta_{tra.}}{\sin \theta_{inc.}} = \frac{v_2}{v_1} = \sqrt{\frac{\mu_1 \epsilon_1}{\mu_2 \epsilon_2}}$$

$$\Gamma = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1}$$

$$\tau = \frac{2 \cdot \eta_1}{\eta_2 + \eta_1}$$

Riflessione → Γ È DEFINITO IN BASE ALLE IMPEDENZE (SEMPRE DEFINITE ALLO STESSO MODO)
 Trasmissione → DEVO AVERE: **Γ + τ = 1**

SI PUO' OTTENERE 2 FORMULE SEMPLIFICATE X MATERIALI MEDIANI RESISTIVI ⇒ DISSIPAZ E' RIDICOLA.
 E' UN CASO INTERMEDIO, VALE X MAX PARTE DEI MATERIALI LAPIDEI.
 POSSIAMO, DOPO AVER FATTO L'APPROSSIMAZ DI α, USARE LE EQ X STUDIARE LA SKIN DEPTH

Attenuazione e propagazione in materiali lapidei e nel calcestruzzo



Attenuazione in mezzo poco-dissipativo (onda piana)

BASSA σ ⇒ SE ε'' << ε', POSSO APPROSSIMARE α COSI.
 HO ANCORA α PROPORZ. A σ

$$\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \ll 1$$

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

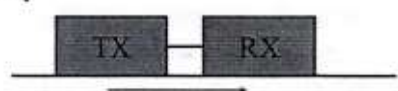
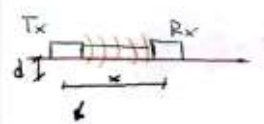
$$\beta = \omega \cdot \sqrt{\mu \cdot \epsilon}$$

Np/m
 rad/m

NEL CAMPO DELLE ACQUISIZ X RIFLESSIONE, PARLEREMO DI 2 PRINCIPALI MODALITA' DI ACQUISIZIONE.
 OFFSET COST: TAGLIO IL SISTEMA T-R LUNGO UN PROFILO, MANTENENDO WALETRATA LA DISTANZA. SI MISURA X LO + LONDA DIRERTA DA T → R, CHE SI PROPAGA X PROFONDITA' d ~ λ.

1. CASO IDEALE: MATERIALE NEUTRALI RESISTIVO (ARIA, ADE) ⇒ α = 0
2. MEZZI CONDUTTIVI ⇒ α = f(ω, ε'', ε')
3. MEZZI POCO CONDUTTIVI ⇒ α ≈ $\frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$

Acquisizione



POSSO STUDIARE IL TEMPO DI PERCORSO:
 $t = \frac{x}{v_x}$
 SE x = 1m ⇒ IL SEGNALE IRRADIATO DOVRA' AVERE:
 λ = 0,2 ÷ 0,5 m
 ⇒ f = 500 ÷ 900 MHz

Ground wave
 Offset costante
 Velocità onde dirette
 Profondità: dipende dalla distanza tra antenne e dalla lunghezza d'onda

Riflettore
 Offset Variabile
 Vel. onde dirette e riflesse
 Profondità: dipende dalla potenza del segnale radar, dalla presenza di riflettori etc.

TRASLANNO IL SISTEMA, OTTENGO INFO SUL t, E QUINDI (ESSENDO x = COST) SU v_x.
 QUEST'APPLICAZ E' BUONA X MAPPATURA DEL SUOLI X USO AGRICOLA, DA ESSO SI PUO' RICAVARE θ.

→ MODALITÀ POSSIBILI DI ACQUISIZIONE DEI DATI RADAR

b) ACQUISIZIONE CON COPERTURA MULTIPLA

LA POSIZ. VARIA SIA PER T CHE PER R, LESISTO SIMULANEAMENTE

↳ NON LO FACCIO X CONTINUITÀ MA STEP BY STEP, RISPETTO A UN PUNTO MEDIANO DELL'ACQUISIZIONE.

NEL CASO IDEALE DI INTERFACCIA DI SEPARAZE PIAN//:

IL PUNTO MEDIANO IN PROFONDITÀ È ILLUMINATO DA 2 ANGOLI (TRASLASCANDO IL CONCETTO DI α).

LIMITI DI QUEST'ACQUISIZIONE:

α DA UNA MAX. DISTANZA DI SEPARAZE TRA T E R X LA QUALE POSSO EFFETTIVAMENTE CAPTARE L'ARRIVO DI UN RAGGIO CON ANGOLO MOLTO AMPIO RISPETTO ALLA NORMALE.

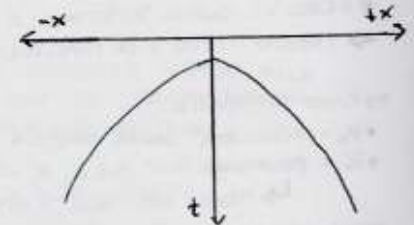
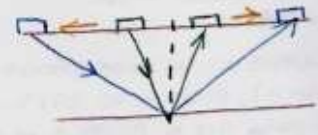
GRANDE DISTANZA → TEORICAMENTE, TALE RADIAZ. HA POCHISSIMA E.

IMMAGINANDO CHE LA RADIAZ. SIA ISOTROPA, POSSO DIRE CHE È POSSIBILE RICEVERE E ANCHE CON ANGOLI PIU' STRETTI.

RISPETTO AL PTO. MEDIANO, POSSIAMO RICEVERE UN FENOMENO DI RIFLESSIONE CHE È ANCORA UN'IPERBOLE, LE CUI LEGGI SONO SEMPRE LE STESS.

↳ $t = 2 \frac{h}{v_s}$

⇒ PER STRATO PIAN//, HO QUESTO GRAFICO (IPERBOLE APPUNTO), TUTTO UGUALE AL CASO DI T FISSA E R MOBILE.



CASO DI RIFLETTORE INCLINATO → DIVENTA + INTERESSANTE:

• $h =$ DISTANZA MINIMA TRA IL PTO. DI RIFLESSIONE E L'INTERFACCIA

① = PUNTO DI PARTENZA: T E R

⇒ $t = 2 \frac{h}{v_s}$

② = POSIZ. IN CUI SPOSTO T E R, POSSO USARE TEORIA DELLA SORGENTE IMMAGINE:

• = NORMALE RISPETTO ALL'INTERFACCIA, PROIETTO LA SORGENTE IN PROFONDITÀ

⇒ SORGENTE VIRTUALE T_x' , SPECULARE T_x

⇒ IDENTIFICO IL PERCORSO DEL RAGGIO RIFLESSO IN QUESTE 2 POSIZIONI DI T E R.

③ = ALLONTANO ANCORA

⇒ OTTENGONO UN ALTRO CORSO DEL RAGGIO RIFLESSO.

STRATO INCLINATO DETERMINA DEI T PERCORSO, CHE STANNO SU UN'IPERBOLE, MA ORA NON SARÀ + SIMMETRICA:

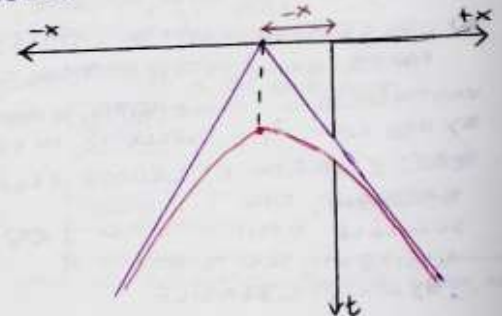
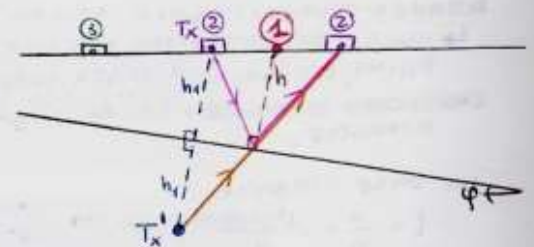
CALCOLO I TEMPI DI PERCORSO DEL RAGGIO A PARTIRE DALLA TEORIA DELLA SORGENTE IMMAGINE, ED APPLICANDO IL TEOREMA DI CANTOR...?

⇒ $t = f(v_s, \psi)$ → È ANCORA UN'IPERBOLE DI RIFLESSIONE, CHE PERÒ È CONDIZIONATA DA ψ , NON È + SPECULARE: IL VERTICE È POSTO A DISTANZA $=x$ DALL'ASSE DELLE ORDINATE.

• = ASINTOTI = ARRIVO DELLE ONDE DIRETTE, CHE ORA SON TRALATE DI $-x$ ANCHESS.

⇒ INCLINAZ. DELLO STRATO DETERMINA UN'EQ. DEI TEMPI DI CORSO ASSIMILABILE ALL'IPERBOLE, CHE X'0' APUNTO È TRALATA A Δx O SX IN FUNZIONE DELL'INCLINAZ. DELLO STRATO.

⇒ CON QUESTO TIPO DI ACQUISIZIONE, IDENTIFICARE L'INCLINAZ. DELLO STRATO (OLTRE A v_{ch}) È POSSIBILE.



QUINDI, LE DIVERSE MODALITÀ DI ACQUISIZIONE POSSONO ESSERE USATE X IDENTIFICARE + OGGETTI GEOLOGICI:

- RIFLESSIONE MULTIPLA = PER PROBLEMI COMPLESSI COSTRATI INCLINATI
- RIFLESS. CON OFFSET VARIABILE = X STUDIARE IN DETTAGLIO IL COMPORTAMENTO DI INTERFACCIE PIAN//
- RIFLESS. SINGOLA = SEMPLICE DIAGNOSTICA DELLA PRESENZA DI OGGETTI, SNE INDIVIDUARNE LA PROFONDITÀ.

⊗ VAI A 93

→ ESEMPIO DI ACQUISIZIONE IN RIFLESS. SEMPLICE: X SCOPI GLACIOLOGICI

I DISPOSITIVI SONO ELETTRASPORTATI O TRASCINATI LUNGO LA SUPERFICIE (COME IN QUESTO CASO).

VANTAGGIO DI USO DI RADAR = POTER STUDIARE SPESSORE DEGLI APPARATI GLACIAI A BIG PROFONDITÀ, FINO A 1000M. ANCHE STUDIO DI LAGHI SEPOLTI (DATI DALLA PRESSIONE).

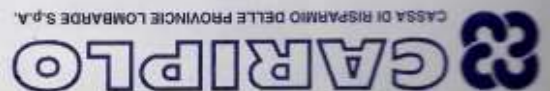
IN QUEST ESEMPIO: { POCCHI MHz (8-10), BASSE F
ANTENNE BIG (5-10m) MONTATE SU ALI DEI VEICOLI.

DISCRETA CAPACITÀ RISOLUTIVA (METRICA O SUBMETRICA).

VANTAGGI:

- α QUASI TRASCURABILE, XKE' IL GIACCO HA α QUASI TRASCURABILE IN ASSENZA DI ACQUA LIQUIDA.
- STIME ABS. BUONE DI PROFONDITÀ DELL'INTERFACCIA
↳ $v_{chicco} = 0,17 \text{ m/ms}$

SI USANO ANCHE IMMAGINI A RIFLESS. SEMPLICE, COME IN QUEST CASO.



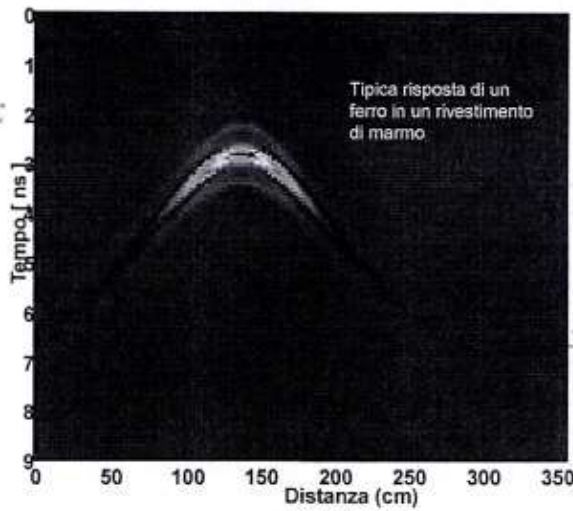
INDAGINI A PICCOLA SCALA, COME AD ES. RICERCA DI UN PICCOLO PEZZO DI METALLO.

⇒ ARTEFATTI DI RISPOSTA SONO COSÌ, L'È È DISTRIBUITA W. XBOU.

QUI, I # COLORINDICANO L'È CHE È STATA REIRADIATA DALL'OGGETTO:

- → E=0
- → E MAX → LA SI HA QND ANTENNE TER SONO ESATTAM SOPRA L'OGGETTO.

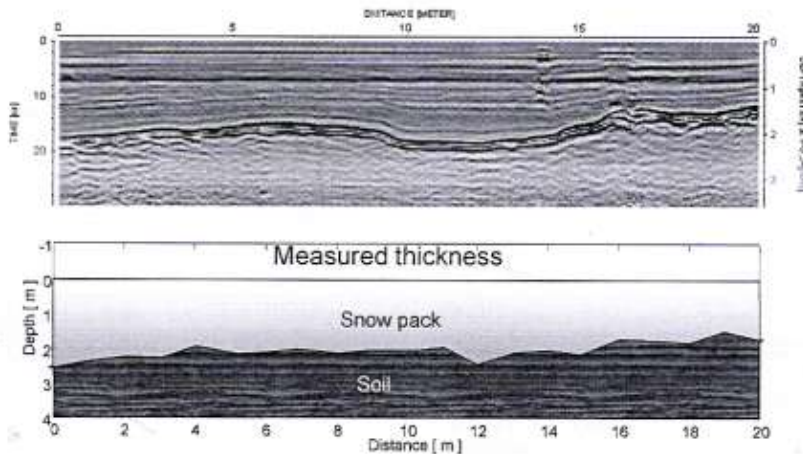
Artefatto della risposta radar



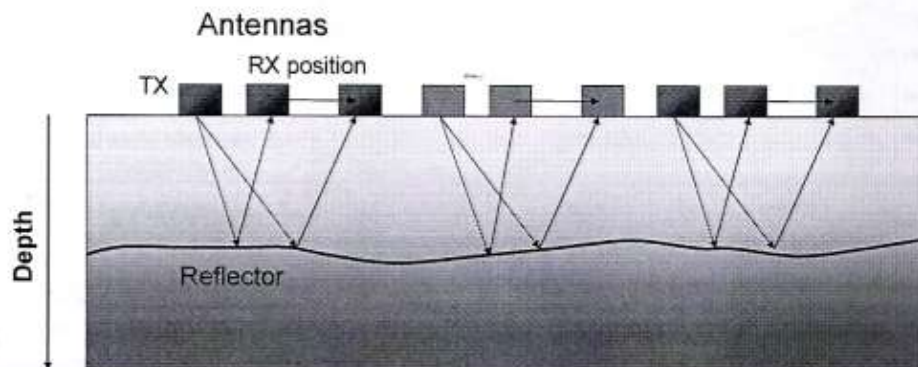
La risposta di un oggetto, rilevabile da una sezione georadar, presenta tipici artefatti, che sono causati dalle modalità con cui la radiazione elettromagnetica interferisce con la struttura sepolta. Pertanto le sezioni radar non sono direttamente rappresentative della dimensione dell'oggetto che provoca la risposta.

Opportune procedure di elaborazione dei dati consentono di passare dalle sezioni radar grezze a immagini che meglio localizzano gli oggetti sepolti.

GPR Fraiteve - Snow profile 1 - 1 GHz



GPR - CMP data acquisition



⊗ VAL A 95

→ MODALITÀ DI ACQUISIZIONE WARR

WARR = Wide Angle Refraction & Reflection

↳ ALTRO MODO X IDENTIFICARE UN'ACQUISIZIONE CON OFFSET VARIABILE.

PARTENDO DA OFFSET VARIABILE, POSSO RICAVARE INFO CON ANGOLI DI APERTURA PIUTTOSTO GRANDI, MAI MAI CHE TRABLO R.

IN QUESTO CASO, POSSIAMO CERCARE DI STUDIARE IL CONTORNO DI UNDE RIFL. E DIRETTE E SE \exists ANCHE RIFRAZ. \Rightarrow POSSO TALVOLTA PROVARE QUESTA DEFINIZIONE.

PARTENDO DA QUESTA DEFINIZIONE, SI POSSONO RICAVARE DEI PROFILI VERTICALI DI V.

QND ABBIAMO MODELLO A STRATI, ABBIAMO UNA 1° ED UNA 2° RIFLESSIONE, CON CURVATURA \neq A 2° DELLO STRATO SOVRASTANTE

\Rightarrow X STUDIARE IN DETTAGLIO LA DISTRIBUZIONE DI V PARTENDO DA QUESTO SEMPLICE MODELLO:

- ANALIZZO LE SINGOLE ONDE DI RIFLESSIONE, LA LORO CURVATURA, OPPURE
- USO ALGORITMI DI INVERSIONE DELLE VMESE DISTRIBUITE LUNGO LA VERTICALE

SI RICAVA UNA SPECIE DI V_{MEDI} (CHE È UNA SPECIE DI V SMOOTHED) CHE È:

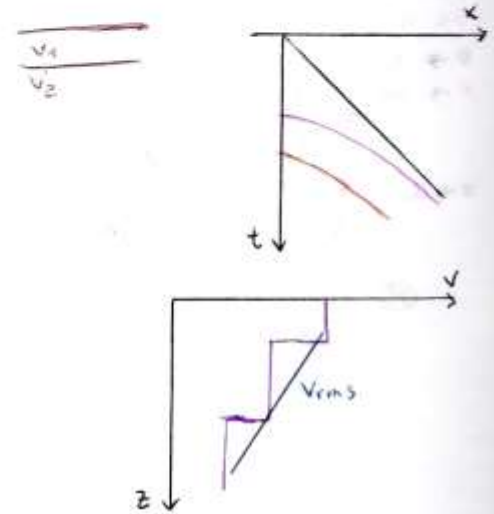
$$V_{rms} = \sqrt{\frac{\sum v_i^2 \cdot t_i}{\sum t_i}} \rightarrow \begin{cases} v_i = v \text{ NEI SINGOLI STRATI} \\ t_i = t \text{ X CORSO NEI SINGOLI STRATI} \end{cases}$$

V_{rms} = VELOCITÀ DI ROOT MEAN SQUARE, CHE È PONDERRATA SULLA V E SUGLI SPessori DEI SINGOLI STRATI

\Rightarrow SI RICAVA UN PROFILO SMOOTHED DI V

↳ CERCO DI RICAVARLO QUANDO SONO NOTE LE IPERBOLI

⊗ VAI A 97



→ EQUAZIONE RADAR

DEFINIAMO UN APPROCCIO X STABILIRE CAPACITÀ DI PENETRAZIONE E RILEVABILITÀ DEI SISTEMI RADAR. CI STANNO SIA LE PROPRIETÀ DEI MATERIALI (= RISPOSTA DEGLI OGGETTI) SIA LE CARATT. DEL SISTEMA.

CUORE DELL'EQ = SENSIBILITÀ = $\frac{P_r}{P_t}$

SE $P_r = 100$ \Rightarrow MI CHIEDO QUAL'È LA POTENZA CHE IL SISTEMA PUÒ RICEVERE X AVERE 1 RISPOSTA RILEVABILE

↳ È UNA CARATT. DEL DISPOSITIVO, DEFINITA IN DECIBEL.

ORA, SI PARLA DI POTENZE, NON + DI E E AMPIEZZE DEL SEGNALE.

UNA VOLTA STABILITA LA SENSIBILITÀ DEL DISPOSITIVO, DEVO CAPIRE SE 1 CERTO OBIETTIVO PUÒ ESSERE INDIVIDUATO ($P_r \sim 1W$).

FLUSSO DI POTENZA \rightarrow IMMAGINO IL FLUSSO ISOTROPICO, COE' h_p = ANTENNA DISTRIBUISCE LA POTENZA IRRADIATA IN TTE LE DIREZIONI.

QUANDO IL FLUSSO INTERCETTA UN OGGETTO POSTO AD UNA CERTA DISTANZA, PARTE DELL'E È RIRADIAATA (RIFLESSA) VERSO L'ANTENNA R

↳ QUANTA DIPENDE DA:

- Γ = COEFF. DI RIFLESSIONE, CARATT. DELL'OGGETTO
- SULLA SUPERFICIE CHE EFFETTIVAMENTE INTERCETTA IL FLUSSO DI E, LA SUPERFICIE ESPOSTA $\rightarrow \sigma$
- ↳ RCS È CORRELABILE A TALE SUPERFICIE

\Rightarrow POWER FLUX RE-RADIATION = QUELTA PARTE DI E CHE VIENE REIRADIAATA.

⊗ VAI A 98

IN ANTENNA R AVIATO POWERFLUX RECEIVED, IN CUI RIENTRA IL FATTO CHE È REIRRADIATA SI DISPERSO GEOMETRICAMENTE SU SUPERFICIE SEMPRE + LARGHE, NEL RITORNO → DISPERSIONE GEOMETRICA DELLA POTENZA REIRRADIATA.

A_e = TERMINE CORRELATO ALLE DIMENSIONI FISICHE DELL'ANTENNA.

P_r = PARTE DI POTENZA CHE POSSIAMO RICEVERE IN R. È DATO DA 1 EQ IN CUI CI SONO LE CARATT. INTRINSECHE DELL'OGGETTO, DEI MATERIALI E DELL'ANTENNA.

La potenza totale reirradiata dall'oggetto

All'antenna ricevente: Powerflux-received = $\frac{P_t \cdot G_t \cdot \sigma \cdot \Gamma}{4\pi \cdot (z^2)^2}$ [W/m²]

$P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot \sigma \cdot \Gamma \cdot A_e}{4\pi \cdot (z^2)^2}$ [Watt] $G = \frac{4 \cdot \pi}{\Delta\theta \cdot \Delta\phi} = \frac{4 \cdot \pi \cdot A_e}{\lambda^2}$

Se si considerano le perdite di potenze per effetto di dissipazione sotto forma di calore:

$P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot \sigma \cdot \Gamma \cdot A_e}{4\pi \cdot (z^2)^2} \cdot \exp(-2\alpha \cdot z)$ [Watt]

z è la profondità a cui è localizzata la frattura o la discontinuità o l'oggetto sepolto (tubo, cavo etc.)
 G è una funzione guadagno caratteristica delle antenne trasmettenti e riceventi, A_e è l'area effettiva dell'antenna ricevente (area equivalente che intercetta il flusso re-irradiato dall'oggetto)
 σ è una funzione denominata radar cross section, che dipende dalle caratteristiche geometriche dell'oggetto riflettente, α è il coefficiente di attenuazione; Γ è il coefficiente di riflessione
 λ è la lunghezza dell'onda elettromagnetica (si ipotizza che $\lambda \ll z$ ovvero di essere nelle condizioni di propagazione di onda piana).

$P_e \sim$ QUALCHE W
 EA SERVE COME VERIFICA PREVENTIVA DELLE CAPACITÀ DI INDIVIDUARE UN CERTO OGGETTO IN CERTI CONDIZIONI.

HANCA TO ANCORA IL TERMINE DISSIPATIVO (E' CAUSE PROPAGAZ AVVENISSE W ARM): SE PROPAGAZ AVVIENE W SVOLTO, DEVO ARRIVARE TERMINE DI DISSIPAZIONE INTRINSECA

L'ESPONENTE È IL COEFF. DI ATTENUAZIONE, (IL z INDICA ANDATA + R.TORNO).

SE PARTO DALLA SENSIBILITÀ: RADAR: $S = 100 \div 120$ DB SE L'ANTENNA HA:

$V = 100$ V
 $\Rightarrow S = 20 \log\left(\frac{V_t}{V_r}\right) = 20 \log\left(\frac{100}{10^{-3}}\right) = 20 \log(10^5) = 100$ dB

VOLEVO VEDERE SE L'ANTENNA È IN GRADO DI CAPTARE $V_R = 1$ mV = 10^{-3} V
 ⇒ MORENTO CHE CON QUESTI VALORI È POSSIBILE
 ⇒ QUESTO DEFINISCE LA CAPACITÀ DEI SISTEMI DI RICONOSCERE GLI OGGETTI, NOTE LE CARATT. DEL DISPOSITIVO.

RADAR METEOROLOGICI POSSONO ESSERE USATI A CERCARE DI DETTARE LA DISTANZA DEGLI APPARATI NUVOLOSI.

NUVOLE = MISCELA ACQUA + GHIACCIO, DOVE L'ACQUA È W FORMA PELLICOLARE ATTORNO ALLE PARTICELLE.

SI POSSONO USARE MODELLI ETT (1° + COMPLICATI).



NEL V, CONSIDERO LA COESISTENZA DI: ICE + W PELLICURE + W LIBERO + AIR

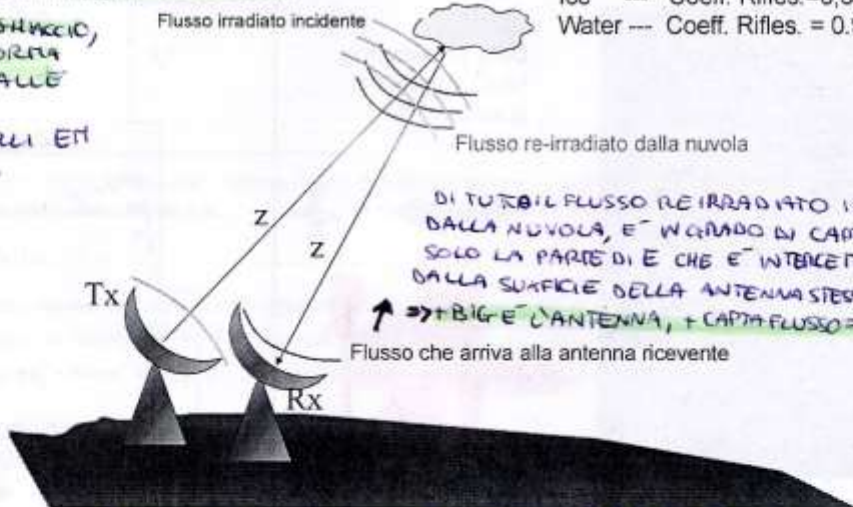
⇒ SI CERCA LA ENUNCIA, DELLA MISCELA?

$\begin{cases} \epsilon_{ice} = 3,2 \\ \epsilon_{wl} = 85 \div 87 (T=0^\circ C) \\ \epsilon_{wp} < 10 \\ \epsilon_a = 1 \end{cases}$

$\epsilon_{wp} < \epsilon_{wl}$ XKE HANNO MENO POSSIBILITÀ DI POLARIZZARSI, RISPETTO ALL'ACQUA LIBERA (↓ GRADO DI LIBERTÀ)

Flusso irradiato incidente

Ice --- Coeff. Rifless. = 0,3
 Water --- Coeff. Rifless. = 0,95

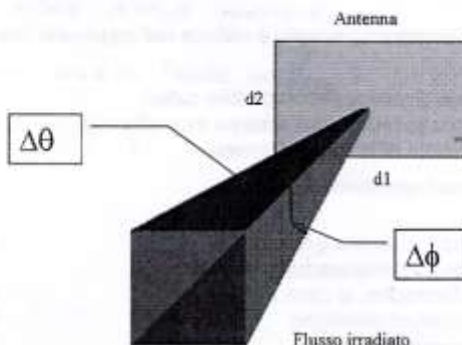


DI TUTTO IL FLUSSO REIRRADIATO ISOTROPICAMENTE DALLA NUVOLOSA, È W GRADO DI CAPTARE SOLO LA PARTE DI E CHE È INTERCETTATA DALLA SUPERFICIE DELLA ANTENNA STESSA.

⇒ + BIG È L'ANTENNA, + CAPTA FLUSSO ⇒ MEGLIO.

COSTANTIA RIFLETTIVO SARÀ INTERMEDIO TRA I 2 VALORI DEI COEFF. DI RIFLESS. ⇒ STIMANDO IL COEFF. DI RIFLESS., SI PUÒ STIMARE LA DISTANZA ED IL CONTENUTO DI GHIACCIO ED ACQUA. QUESTO È LO SCHEMA CHE USATO ANCHE X WAGINI DI SUOLO

Area effettiva e guadagno dell'antenna



$G = \frac{4 \cdot \pi}{\Delta\theta \cdot \Delta\phi} = \frac{4 \cdot \pi \cdot A_e}{\lambda^2}$

$A_e = d_1 \cdot d_2 \cdot \epsilon$

dove ϵ è l'efficienza dell'antenna (< 1)

IMMAGINO: INDAGINE CON OFFSET COSTANTE QUASI NULLO.
 GRAFICO (Distanze t) = MANTE TRACCE RADAR AFFIANCATE SO CHE L'OGGETTO DETERMINA COME CURVA UN'IPERBOLE DI RIFLESSIONE.
 SE I 2 OGGETTI SONO TROPPO VICINI, LE 2 IPERBOLE INTERFERISCONO NEGATIVAMENTE TRALORO, FINCHE' (ALLIMITE) POSSONO SEMBRARE UN'UNICA IPERBOLE.
 => NON DISTINGUIAMO I 2 OGGETTI.

12 PARAM. PRINCIPALI DA CUI DIPENDE LA RISOLUZIONE:

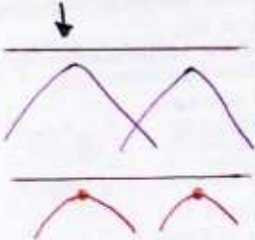
1) VELOCITA': VARIAMO LE IPERBOLE
 $v = \lambda / \rho$
 => $\uparrow \lambda \Rightarrow \downarrow$ CAPACITA' RIS. LAT.



- V ALTE, IPERBOLE A RTA => SI SOVRAPPONGONO
- V BASSE, IPERBOLE STRETTE

2) α :

- $\alpha = 0 \Rightarrow$ DISSIPAZ. INTRINSECA RIBOTTA
 => POSSO VEDERE EFFETTI DELL'ANTENNA ANCHE SE SONO A BIG DISTANZA
 => VEDO LE CODE DEGLI OGGETTI
- $\alpha = 0 \Rightarrow$ VEDO MENO PARTE DELLE IPERBOLE
 => LE CODE POTREBBERO NON INTERFERIRE
- α MOLTO ALTO
 => ALL LIMITE, POTREI PERSINO NON VEDERE LE IPERBOLE

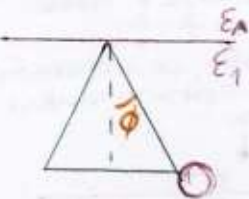


PATTERN DI RADAR:

+ E' APERTO, E' FACILE OTTENERE IPERBOLE APERTE, CHE INTERFERISCONO TRALORO (IL CONO VEDE PRIMA GLI OGGETTI AFFIANCO, E' MENO CONCENTRATO SUL SINGOLO OGGETTO).

SE $\uparrow E \Rightarrow \downarrow \phi \Rightarrow \uparrow$ CAPACITA' RIS. LAT.
 $\downarrow v \Rightarrow \downarrow \lambda$ (A PARI ρ)

$$\sin \phi = \frac{v_1}{v_2}$$



Risoluzione

Esempio:

In un rivestimento marmoreo caratterizzato da un valore della costante dielettrica relativa $\epsilon_r = 9$, la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche a 1000 MHz, risulta:

$$v = c / \sqrt{\epsilon_r}$$

c - velocità delle onde elettromagnetiche nello spazio libero ($3 \cdot 10^8$ m/s)

$$v = 0.1 \text{ m/ns}$$

Lunghezza d'onda

$$\lambda = v / f = 0.1 \cdot 10^9 / (1000 \cdot 10^6) = 0.1 \text{ m}$$

Convenzionalmente la capacità risolutiva del rilievo radar è compresa tra 1/4 e 1/2 della lunghezza d'onda. Pertanto, in questo caso è possibile individuare anche oggetti le cui dimensioni (o meglio la sezione trasversale rispetto al profilo radar) siano di 2-3 cm.

Risoluzione laterale: definisce la minima distanza di separazione tra due oggetti, posti alla stessa profondità, tale per cui i due oggetti forniscono due distinti eventi radar

La risoluzione laterale dipende dalla lunghezza d'onda e dalle caratteristiche elettromagnetiche del mezzo.

Se la distanza è troppo piccola i due eventi si sovrappongono e l'individuazione dei due oggetti diventa ambigua.

Profondità di indagine

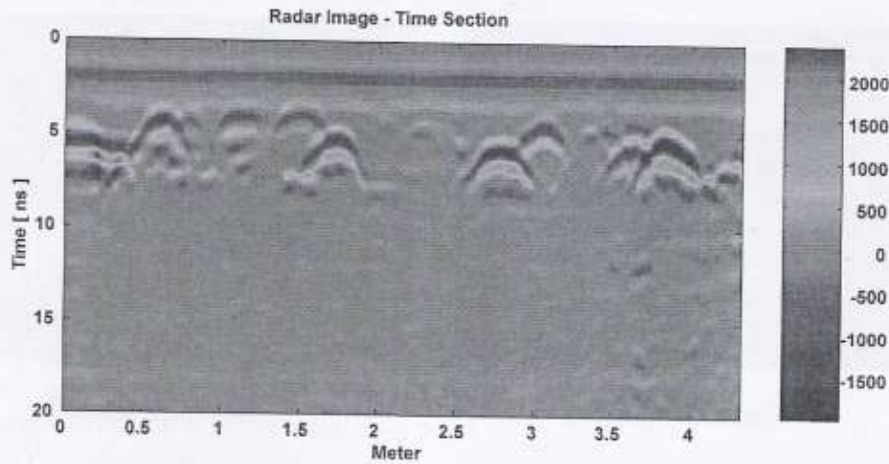
Il segnale radar si attenua rapidamente nei mezzi naturali per un duplice effetto:

dispersione geometrica dell'energia; come per la luce, l'energia radar si attenua con il quadrato della distanza dalla sorgente;
dissipazione di energia sotto forma di calore; parte dell'energia viene dissipata durante la propagazione nel mezzo per effetto Joule; tale attenuazione è maggiore nei mezzi elettricamente più conduttivi (ad esempio argille) rispetto ai mezzi rocciosi più resistivi.

In molti calcestruzzi, la presenza di additivi chimici utilizzati per accelerare i processi di maturazione del cemento rende il mezzo elettricamente molto conduttivo, causando un'elevata dissipazione dell'energia elettromagnetica e quindi una ridotta profondità di indagine.

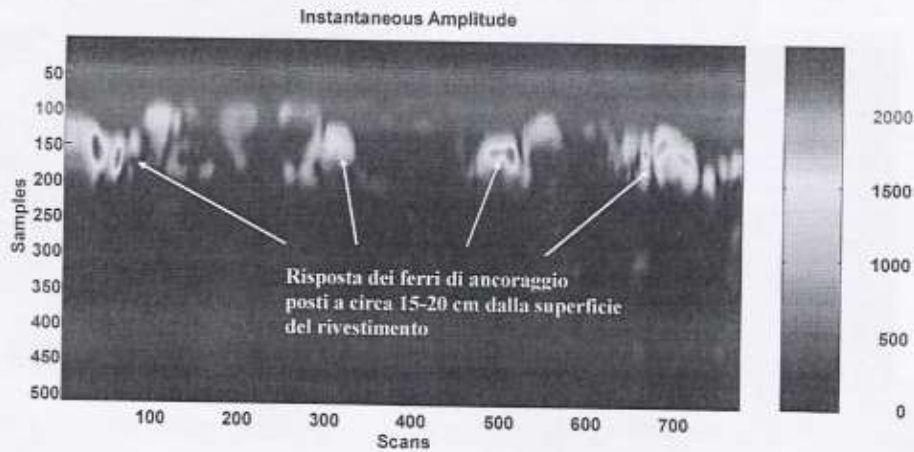
Sezione radar grezza

Rilievo Duomo di Torino
su rivestimento marmoreo
interno per individuare
la presenza di ferri di ancoraggio
Freq. 1000 MHz - Profondità di indagine
compresa tra 40 - 60 cm

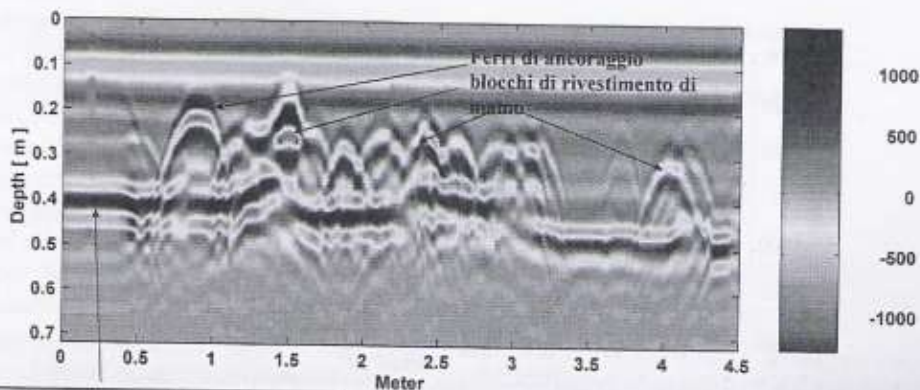


Sezione radar elaborata

L'elaborazione mette in evidenza
in modo molto più chiaro, rispetto
alla sezione grezza, la presenza
di ferri nel rivestimento.



Rilievo Georadar - Duomo Torino Freq. 1000 MHz - Sezione grezza

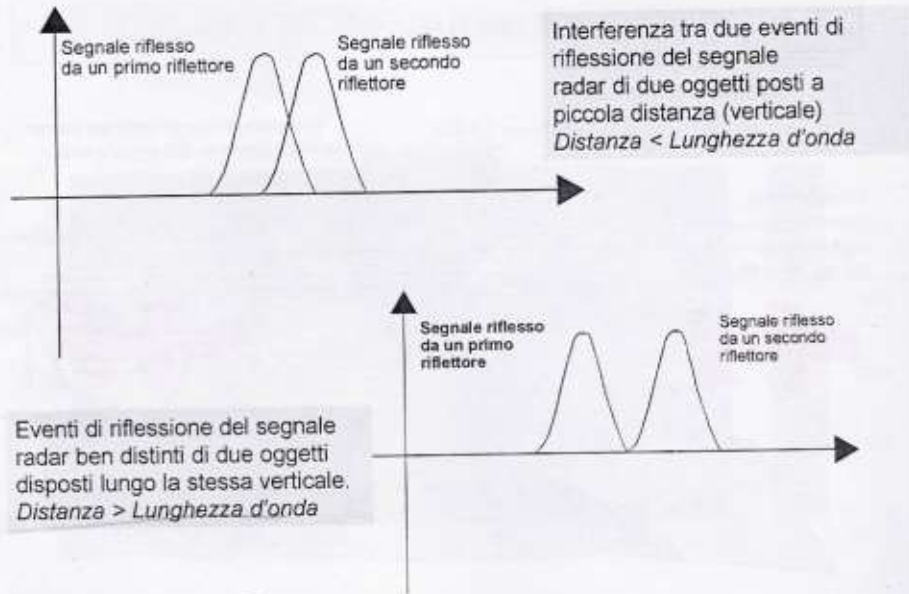
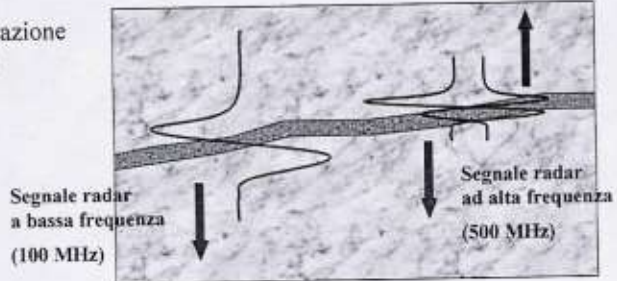


Interfaccia tra il rivestimento in marmo
e la struttura muraria portante

Profondità di indagine e risoluzione

Dipendono dalle caratteristiche del versante roccioso e dall'antenna utilizzata:
principio generale - basse frequenze maggiore profondità di indagine ma risoluzione spaziale ridotta

Problema nella individuazione di strati sottili e fratture



AMBITO GEOTECNICO.
 CONTESTO APPLICATIVO DI BIG INTERESSE X GEORADAR, AD ES. X STABILITÀ DI CERTI VERSANTI.
 ROCCE CONSOLIDATE => RIDOTTA ATTENUAZIONE DEL SEGNALE RADAR.

- QUESTE SONO ALCUNE DELLE POSSIBILI PROBLEMATICHE DI INDAGINE:
- X BANCHI DI COLTIVAZ
 ↳ SCOPRIRE FRATTURE // PIANO DI VERSANTE
 - DEBOLEZZE STRUTTURALI
 ↳ DISCONTINUITÀ SUBVERTICALI AL VERSANTE

Problematiche nelle indagini di versanti rocciosi

