



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 1379A -

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.**

PARAMETRI

- $\lambda = \frac{v}{f} \text{ [m]}$ → Lunghezza d'onda
- $E = \frac{F}{\Delta l} \text{ [Pa]}$ → Modulo elastico di compressione (uni assiale)
- $G \text{ [Pa]}$ → Modulo elastico di taglio
- $f = \frac{1}{T} \text{ [Hz]}$ → Frequenza di oscillazione
- $T \text{ [s]}$ → Periodo di oscillazione
- $\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{v}{\lambda} \text{ [Rad/s]}$ → Frequenza angolare
- $\phi = 2\pi \frac{x}{\lambda} \text{ [Rad]}$ → Fase iniziale dell'oscillazione
- $v_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ → velocità di propagazione onde piano longitudinali
- $v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ → velocità di propagazione onde trasversali
- $v_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}}$ → velocità onde longitudinali
- $v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ → velocità onde trasversali
- $d = (1-\phi) \cdot d_m + \phi \cdot d_p$ → Densità di bulk di un mezzo poroso ($d_m = \text{matrice}$; $d_p = \text{pori}$)
- $\phi = \frac{V_p}{V}$ → Porosità totale
- $S = \frac{V_F}{V_p}$ → Saturazione in un fluido
- $K = \frac{1}{\text{COMPRESSIBILITÀ}} \text{ [Pa]}$ → Modulo di compressione
- σ → Coefficiente di Poisson
- $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ → Numero d'onda (frequenza spaziale)

Mezzo confinato

Mezzo non confinato (semispazio)

VALORI

- (E) Acciaio $\rightarrow K \sim 200 \text{ GPa}$ Rocce/terreni \rightarrow non consolidati $\rightarrow K \sim 200 \div 300 \text{ GPa}$
 Acqua $\rightarrow K \sim 2,2 \text{ GPa}$ consolidati \rightarrow dolomia $\rightarrow K \sim 70 \text{ GPa}$
 Quarzomerele $\rightarrow K \sim 50 \text{ GPa}$

- $\frac{V_p}{V_s}$ Materiale consolidato $\rightarrow \frac{V_p}{V_s} \approx 1,5 \div 3$ Argilla saturata $\rightarrow \frac{V_p}{V_s} \approx 4 \div 8$
 Materiale non consolidato $\rightarrow \frac{V_p}{V_s} \approx 3 \div 4$
 Materiale non consolidato saturo $\rightarrow \frac{V_p}{V_s} \approx 4 \div 4,5$
 Sabbia asciutta $\rightarrow \frac{V_p}{V_s} \approx 2$
 Sabbia umida $\rightarrow \frac{V_p}{V_s} \approx 5 \div 6$

- V_p Aria $\rightarrow v_p \sim 330 \text{ m/s}$ V_s Aria $\rightarrow v_s = 0 \text{ m/s}$
 Acqua $\rightarrow v_p \sim 1500 \text{ m/s}$ Acqua $\rightarrow v_s = 0 \text{ m/s}$
 Rocce consolidate $\rightarrow v_p \sim 2000 \div 6000 \text{ m/s}$
 Rocce non cons. $\rightarrow v_p \sim 500 \div 2000 \text{ m/s}$
 Petrolio $\rightarrow v_p \sim 1200 \div 1300 \text{ m/s}$

- ϕ Carbonati (calcari) $\rightarrow \phi = 0 \div 45\%$
 Evaporiti $\rightarrow \phi \sim 0\%$
 Arenarie consolidate $\rightarrow \phi = 5 \div 15\%$
 Sabbie in consolidate $\rightarrow \phi \geq 30\%$
 Argille $\rightarrow \begin{cases} \phi_e \sim 0\% \\ \phi_c \geq 40\% \end{cases}$

SISMICA A RIFLESSIONE

● PREPROCESSING

- AGC (Automatic Gain Control) = Amplitude recovery
 ↓
 In profondità ↓ densità E sismica (Dispersione geometrica, Attenuazione litologica)
- STATIC CORRECTIONS
 ↓
 Eliminare effetti di Topografia riportando TUTT ad 1 piano isot.
- MUTING
 ↓
 Eliminare porzioni del sintagma mute, & fare di rumore
- FILTERING
 ↓
 ↑ rapporto $\frac{S}{N}$, ma ↓ risoluzione. Low cut filters (grand roll off); F-K filters (grand roll off)
- SORTING
 ↓
 CSP (Common Shot Point) → CMP (Common Mid Point)
- DEMULTIPLYING
 ↓
 Rimuovere segnali dati da risonanza (alto contrasto di impedenza o acqua), big disturbance

● PROCESSING

- DECONVOLUTION $t = W * C + N \rightarrow C = \text{coeff di rifl}$
 ↓
 Comprime l'ordine sismico → ↑ vertical resolution; ↓ rumore; ↓ effetto di riflen multiple
- VELOCITY ANALYSIS AND NMO CORRECTIONS
 ↓
 Velocità in cui fare correzione normalizza la Seimblance. Necessario x fare stacking
- STACKING
 ↓
 Ottenere le tracce zero offset; ↑ $\frac{S}{N}$. È il ^{valore delle} somma di TUTTE ^{CMP} relative a quel mid point
- MIGRATION
 ↓
 Spostare riflettori in posiz. reale; ↑ risoluz. laterale; eliminare diffezioni; immagine reale

Hp x deconvoluzione:

- 1) La Terra è fatta di strati orizz. con velocità
- 2) La sorgente genera 1 onda piana di ampiezza de ride 1 e isotro, no S.
- 3) Sorgente isotroica, forma d'onda non plana
- 4) Rumore nullo
- 5) Forma d'onda della sorgente nota

INTRO MICA

Metodi = basati su misure di varie spaziali e temporali di proprietà (difficile dare valori assoluti):

- MAGNETICHE (permeabilità magnetica) = capacità di un materiale di polarizzarsi in presenza di un $C. magn. ext.$ Presenza di aspetti ferromagnetici.
- ELETTRICHE (conduttività/resistività elettrica) → correnti ben correlabili con strutture di acqua nel suolo
- ELETTROMAGNETICHE (permeabilità dielettrica, conducibilità in funzione della f),
x vaste aree con base prefabbricata d'alghe
- SISTICHE (velocità e attenuazione onde PES), densità, moduli di compressione e taglio
- TERMICHE, anomalie del campo termico locale

Metodi:

- Naturali → ^{Mapetta} Gravimetrico (variaz di accelerazione di gravità dovute a variaz di densità)
- Artificiali → forzate; gran parte di metodi su scala locale

Metodi Simici → basati su propagazione di perturbazioni elastiche generate dalla superficie o in foro, e interpretazione della risposta con sensori posti in superficie o in foro

↳ Riflessione = esplorazione di dettaglio

Rifrazione = supporto alla rilevazione riflessa

Tomografia = analisi di dettaglio

Metodi elettrici ed EM. → basati sulle variaz di ρ del sottosuolo, in seguito

all'applicazione di un campo di corrente continua o alternata

↳ σ_{ep} = calcolato da porosità, natura, solimite fase fluida, T, p , interazione

Caratterizzazione proprietà idrogeologiche del terreno.

IP = capacità di trarre di magnetizzazione Elettrica (conduttore)

Approssimazione: proprietà pedometriche variabili → Scalari

Scopi pedometrici → Scala regionale → Geometrici e magnetici

↳ Dettaglio → Simici

SISMI CA

PROPRIETÀ

ONDA = ogni alternanza spaziale di massimi e minimi, variabile nel tempo, di qualsiasi grandezza fisica

Mezzi elastici e isotropi.

Una perturbazione meccanica produce in un mezzo continuo una perturbazione che si propaga nel mezzo attraverso un moto ondoso.

Diversi modi di oscillare delle particelle di terreno intermedie della propagazione.

1) MATERIALE OMOGENEO E ISOTROPO (E ELASTICO)

TIPICI DI ONDE SISMICHE

- Longitudinali = primarie (P); di volume; $v > v_s$; deformazioni di compress. ed espans.; vibrazioni polarizzate nella direzione di espansione del fronte d'onda
- Trasversali = secondarie (S); deformazioni tangenziali di forma del mezzo; di forma, $v_s < v_p$; vibrazioni del terreno dirette \perp alla direzione di propagazione (SH = piano orizz. ; SV = piano vertic.)

• Superficiali = all'interfaccia tra materiali aventi \neq propr. meccan.
 ↓
 Rayleigh (R) = vibrazioni confinate in piani verticali; composte, longitud. e trasversali
 cui, variare nel tempo descritto da ellisse (moto retrogrado, de π oppure 2π);

Ampiezza $\propto \exp(-\alpha z)$ con $\alpha = 1,5 \Rightarrow A = 0,1 A_0$; Poca attenuazione geometrica;

Max parte di E, \Rightarrow evento dominante all'inizio della distanza; $\frac{v_R}{v_s} = 0,87 \div 0,96$;

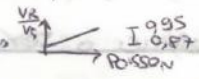
Propagazione diretta $\Rightarrow v_p = \frac{x}{\Delta t}$

$\frac{v_p}{v_s}$ = indipendente da densità e moduli meccanici

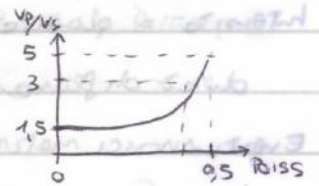
$\sigma = \text{Coeff. di Poisson} = \frac{\text{deformaz. rad. de. } (T_3)}{\text{deformaz. assiale}} \in (0, 0,5)$

• Materiale quadrilatero: poisson basso $\Rightarrow \frac{v_p}{v_s} \sim 1,5 \div 3$

• Materiale NC: poisson alto \Rightarrow dry: $\frac{v_p}{v_s} \approx 3 \div 4$

$(\frac{v_R}{v_s}, \text{poisson}) = \text{Lineare} \rightarrow$ 

Saturazione: $\frac{v_p}{v_s} \approx 4 \div 5$



$\frac{v_p}{v_s} \in (1,5 + 5)$

SISMOGRAMMA = Registrato grafico dell'accelerazione delle particelle di terreno a seguito del passaggio di una perturbazione sismica in un determinato punto.

SUPERFICIE O FRONTE D'ONDA = Luogo geometrico dei punti del mezzo nel quale, per un determinato istante, la fase dell'onda assume lo stesso valore

Mezzo omogeneo isotropo: la v di \perp più del fronte d'onda è diretta secondo la normale alla superficie
 \rightarrow Sorgente puntiforme \Rightarrow onde sferiche

- Integrazione = spazio vuoto tra grani o particelle poco compatte e spacciate (1')
- Di fratture = causata da azione meccanica o chimica in rocce porose (2')
- Vugolare = causata da organismi viventi e gessi, o da azione chimica a posteriori (1' o 2')

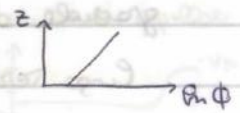
Processo diogenetico = stadi delle $\downarrow \phi$:

- Impacchieramento = $\uparrow p \Rightarrow$ porzioni + stabili, \uparrow contatti tra i grani
- Compattazione = $\uparrow p \Rightarrow$ \uparrow deformazione grani, fessure contatte saturate
- Cementazione = depositi di minerali di sintesi ~~alla~~ ^{nella} superficie libera dei grani

Porosità:

- Totale = tutti i vuoti
- Interconnessa = relative agli spazi interconnessi
- Effettiva = permeabilità effettiva al passaggio di fluido (difficile distinguere)

Fattori influenzati porosità primaria:

- Proprietà geometriche di grani e pori
- Processo diogenetico; quantità cemento
- Profondità e pressione \rightarrow influenza non esiste (ln o exp) \rightarrow 

DENSITA' di mezzo poroso

$$d = (1 - \phi) d_m + \phi d_p \rightarrow \text{media pesata}$$

- d = Bulk density = complessiva, \uparrow o di matrice dei pori
- d_m = Matrix density = media, del materiale tra i pori
- d_p = Pore density = dei pori o fratture, vuoto in parte del fluido che li riempie

Saturazione $\rightarrow S = \frac{V_f}{V_p}$

Roccia con gas e acqua $\Rightarrow d = (1 - \phi) \cdot d_m + \phi [S_w \cdot d_w + (1 - S_w) \cdot d_g]$

Roccia con gas, acqua, olio $\Rightarrow d = (1 - \phi) d_m + \phi [S_w \cdot d_w + (1 - S_w - S_{oil}) d_g + S_{oil} \cdot d_o]$

Densità vs profondità: $d(z) = d(z_0) + A \cdot \rho_m \left(\frac{z}{z_0}\right)$ $\rightarrow A = \text{coefficiente, legato alla permeabilità}$

VELOCITA' ONDE ELASTICHE - PARAMETRI ELASTICI

Senza spazio assegnato, sorgente piana, fronti sferici \Rightarrow il mezzo si deforma onde radiali \Rightarrow dipende da deformabilità volumetrica ($K, G =$ parametri in gioco)

considero onde σ (poisson)

\Rightarrow Velocità di propagazione: $v_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ \Rightarrow $v_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}}$ $v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ $\sigma = \left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 = \frac{2}{2(\sigma - 1)}$



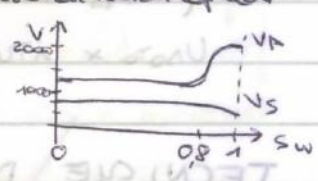
ROCCHE SEDIM. CONS. + ARGILLA \rightarrow $\downarrow v_s$ e \downarrow Moduli elastici

- v_p org. \ll matrice rocciosa
- deformabilità (o compressibilità) $>$ quarzo o carbonati
 \Rightarrow se \uparrow Tenere org. \Rightarrow \uparrow dipendenza v_p da p .
- propr. fisiche org. fortemente dipendenti dal contenuto d'acqua
 \Rightarrow completa dipendenza da S_w
- disposizione di minerali in matrice modifica catoti tra granuli

ROCCHE SEDIM. N.C.

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Coesive} = \text{prevalgono complete interazioni chimiche/forze di legame (Argilla)} \\ \text{Non coesive} = \text{effetti di frizione tra le particelle della roccia} \end{array} \right.$

- Dipendenza da S_w : (non vale + Weller, che darebbe grafico S_w)
 - Propr. elastiche forzano condiz. del fluido nei pori: influenza v_p ed è tipo di dipendenza dalla p .
 - Contenuto d'acqua accentra effetti di contatto di particelle \rightarrow influenza di ten. nei capillari
 - v_p : $S_w > 0,95 - 0,90 \Rightarrow \uparrow v$ repentino, solo da q in S_w
 in poi inizia a sentire effetto acqua
 - v_s : cost. o poco, v_s si propaga solo x effetti aerativi
 tra i granuli \Rightarrow contatti + rocciosi, no contributo di matrice di coesione.
 - $G = \text{cost.}$ $\uparrow S_w \Rightarrow \uparrow$ contributo acqua in $d \Rightarrow \uparrow d_{drain} \Rightarrow \downarrow v_s = \sqrt{\frac{G}{d}}$



• Dipendenza da p :

Fattore fisico dominante = matrice delle cadute di carico (differenza $p_{ext} - p$):

$v = v_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^m \rightarrow m = \text{funzione di } \tau \text{ frazione dei granuli} \Rightarrow \neq \tau \text{ di contatto}$

\downarrow $\left(\begin{array}{l} \text{base x triangolare, alto x murate e orizzontali} \end{array} \right)$

Tale rapporto controlla anche dipendenza di v da z : $v = v_1 + v_2 \left(\frac{z}{z_0} \right)^m$

Porosità e org. $\Rightarrow \downarrow v_p$, $\uparrow v_s \Rightarrow$ elevati valori di ϕ org. $=$ alti $\frac{v_p}{v_s}$

VELOCITÀ W FLUIDI \rightarrow Modulo di compressione $= k_p < 4 \cdot k_{matrice}$

$v_s = 0$; v_p dipende da d, T e τ \rightarrow $\uparrow T \Rightarrow \uparrow v_p$ (solo in gas)

Gas \rightarrow Modulo di compressione $= k_p < 4 \cdot k_{matrice}$

SISMICA A RIFRAZIONE

Modello di riferimento 2D.

Circonfondo ai fenomeni relativi ad 1 modo sismico ordinario → onda P (onda S)

Raggio sismico = curva estrinseca

Optica geometrica = tipo di modello di riferimento, calcola i tempi di arrivo dei raggi riflessi e/o rifratti (obiettivo di risolvere e det. tali tempi di arrivo).

maglie (angolo piano) → h, v_1, v_2



LEGGI DI SNELL

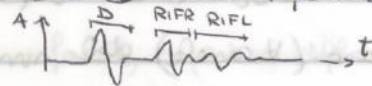
$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Rifraz totale lungo interfaccia: $i_2 = 90^\circ \Rightarrow \sin(i_2) = \frac{v_1}{v_2}$

Condiz. necessaria x fenomeno di rifraz: $v_1 < v_2$

Tempo di arrivo = le partic. iniziali ad oscillare e con della 1° perturbaz.

↓ A ma onde P: Dirette → Rifratte → Riflesse

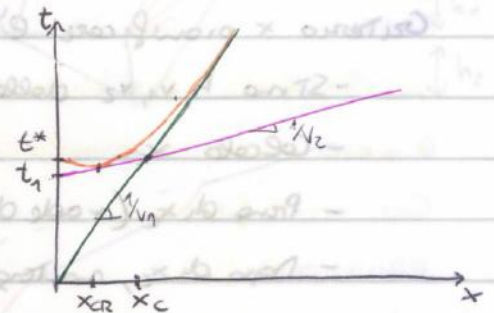


Tempo di percorso dipende da geometrie e dalle v

DROMOCRONA

Attraverso → ricostruisce i profili (dopo aver determinato i tempi di arrivo) e capisce se m di onde D, Rifl, Rifr.

Poi interpreta le differenze in termini di h, v_1, v_2



ONDE DIRETTE → $t = \frac{x}{v_1}$

ONDE RIFRATTE → $t = \frac{x}{v_2} + \frac{2h \cos i_2}{v_1}$

ONDE RIFLESSE → $t = \frac{2\sqrt{(\frac{x}{2})^2 + h^2}}{v_1}$ → iperbole $r(x, t)$

• Raggio critico fa 1 salto a $v_2 > v_1$

⇒ x_c = Cross Over Distance = arrivo simultaneo di dirette e rifratte

• t_1 è funzione, x_c è il raggio sismico che, dato 1 ricevitore posto sulla sorgente, ha criticamente brevettato (dove x coincide con x_c all'interfaccia); Se $\epsilon \rightarrow 0$, si sente

⇒ x_{CR} = Distanza critica, x avere rete rifratte → iperbole rifl t_3 rete rifr t_2 Angolo adde rifl $\hat{=}$ angolo rifl

{ Da dirette ricavato → v_1 (coeff. angolare)

{ Da rifratte ricavato → v_2 (coeff. angolare)

↳ h (angolo, del tempo intercettato) → $t_{1 \text{ SPEC. INT.}} = t_{1 \text{ TEORICO}}$

$$\Rightarrow t_1 = \frac{2h \cos i_2}{v_1}, \text{ dove } \cos i_2 = \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{v_2^2}}$$

$$v_d, v_u = f(v_2, \delta, \eta, c)$$

v_{20}, v_{2D} = velocità apparenti \rightarrow dipende da: spessore, inclinazione strato, rapporti di velocità

Equaz dei tempi di percorso, rifrazione:

$$S_1 \rightarrow t_{RIFR} = \frac{x}{v_0} + \frac{2D_0 \cos \delta}{v_1}$$

$$S_2 \rightarrow t_{RIFR} = \frac{x}{v_0} + \frac{2D_u \cos \delta}{v_1}$$

Tempi intercetti (per ricettore Dd e Du):

$$S_1 \rightarrow t_{10} = \frac{2D_0 \cos \delta}{v_1}$$

$$S_2 \rightarrow t_{10} = \frac{2D_u \cos \delta}{v_1}$$

Approssimazione per spessore v_2 (distanza, media v_u e v_d):

$$v_2 = \frac{2v_{20}v_{2D}}{v_{20}+v_{2D}} \cdot \cos \delta$$

MULTISTRATO $\rightarrow v_1 < v_2 < v_3 < v_4$

In direzione vedere curva dei \neq fasce ben rifrattile \neq interfacce.

Inclinazione decrescente dei \neq strati di direzione

$\uparrow z \Rightarrow \uparrow$ rugosità \Rightarrow coefficiente di rifrazione e rapporti di velocità \uparrow irregolarità

Riflessi \rightarrow distanze reciproche in ipso \Rightarrow teoria + facile, pratica difficile

FAGLIA CON RIGETTO VERTICALE

Spigolo di faglia = pila di discontinuità;

raggio di curvatura $\ll \lambda \Rightarrow$ movimento

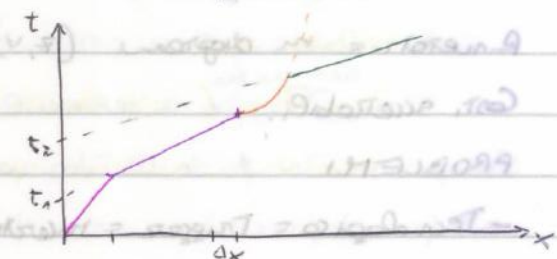
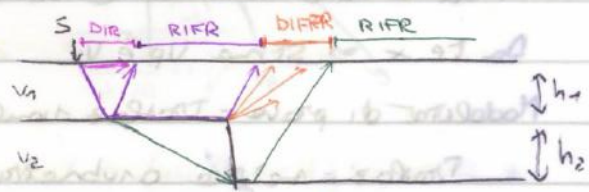
Eq tempi di faglia:

$$t_{DIFF} = \frac{\sqrt{h^2 + x^2}}{v_1} \rightarrow t^2 v_1^2 = h^2 + x^2 \text{ iperbole}$$

Da $t_2 - t_1 = \Delta t$ (sperimentale valore)

\Rightarrow trova rigetto verticale della faglia:

$$h_2 = \Delta t \frac{v_1 \cdot v_2}{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}$$



LIMITI DI RIFRAZ

1) Logaritmo coefficiente, distanze $S-R \gg z$

2) Crescente z .

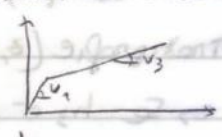
Condiz d'inversione delle v : $v_1 > v_2 < v_3, v_1 < v_3 \Rightarrow z$ crit, raggio di curvatura della normale \uparrow proiezione

\Rightarrow da interfaccia non emerge nulla, vedono solo v_2 e v_3

\Rightarrow Errori:

- Non vedo h_2

- Sottoline $h = h_1 + h_2 \rightarrow$ non reso conto del percorso fatto a $v_2 < v_1$



DOWN HOLE LOG = 92V

DHT. Valori di v nel senso degli strati, che miscolati lungo percorsi inclinati dei raggi sismici.

Strada di due 12 ricevitori nascosti, a \times profondità.

Molto rapida e semplice, 1 o 2 colpi

Idrofoni = microfoni pieni d'acqua sensibili a onde P.

↳ Ricevitori piezoelettrici = ricevono la pressione e la traducono in segnale elettrico

Per onde S servono ricevitori triondici appropiati ricomposti di rivestimento

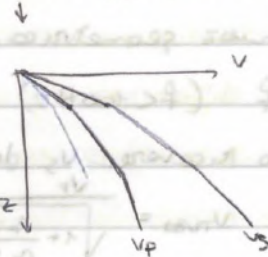
del foro in modo totale (cristallo)

↓
Tutti insieme \Rightarrow al max 2/4 gradi, logistica applicata.

Obiettivo = profilo verticale di onde P e S.

Prova \Rightarrow Diagramma (mappe superficie e v_p) \Rightarrow Profilo verticale (v_p, z)

Mere accurate di CHT



TOMOGRAFIA

Sezioni NC \rightarrow H_p : v. curvatura in modo grafico con z

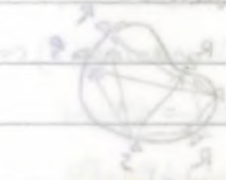
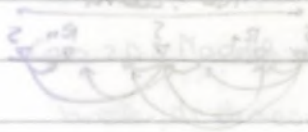
\Rightarrow Raggi X = raggi curvatura \rightarrow approccio replicato x risolvere problema

Modello diretto (Teoria ray tracing, valido x percorsi > 1)

Scopo = elaborare modello 2D o 3D di sub.

Fasi della Tomografia x tempi di percorso:

- Acquisiz (multiple scatti e multiple ricezioni)
- Sine tempi di corso, x VR x VS
- Definiz modello iniziale di v
- Risoliz modello diretto
- Procedo inverso = elaboraz modello inverso
- Rappresetaz grafica risulati



Disposiz e n° finito di SeR non consente di + Q univoco e' oggetto in modo completo
 → meglio provata e + rappresentaz non ben definite dell'oggetto.

RISOLUZIONE

• **Matematica** = robustezza di algoritmi nel poter ricostruire la misura del param investigato a partire da geometrie.

Dipende da: • geometrie e disposiz di SeR (d, n)

• dimensioni e disposiz celle

• presenza di inversare dati,

(o n° afferenze di misure)

• **Fisica** = modello di propagaz di onde nella sezione → λ

Se λ trip bis (ripeta geometrie migliori) → oggetto + turbato in modo ricostruibile

Se λ = oggetto → perturbate in modo ricostruibile

MODELLO DIRETTO

Hp di un modello di velocità → serie di tempi di corso e percorsi di raggi unici.

Caso 2D: Modell di velocità e fatto da 4 discretizzazioni della sezione ^{interizzata}
 nelle di dimensione regolare; a ciascuna energia $v = \text{cost} = 2 \times A$

Tracciare raggi unici:

- Curvilinei = variaz riferenti di v (+ Torogr. refr.)

- Rettilinei = semplifica x variaz di v < 30-40%

Obiettivo = calcolare la risposta teorica, ricomparz di 1 dataset (di tempi di corso)

Hp semplificative:

• Discretizzaz della sezione in celle, (rettilinee o subrettilinee), in cui ipotizzo una v

• In ogni cella la v = cost

• Percorso di raggi unici e rettilineo (valido se $v_1 \neq v_2$ non troppo)

⇒ (il percorso teorico e' gli replica f. teorica, e pare approssimare) → $\sum_{j=1}^n \frac{L_j}{v_j}$

$$t_{ij} = \int_L \frac{1}{v(L)} \cdot dL \approx \sum_{j=1}^n L_j \cdot \frac{1}{v_j} = \sum_{j=1}^n L_j \cdot S_j$$

i = raggio unico
 j = celle

$S = \frac{1}{v}$ = Costanza del raggio unico
 $n = n^{\circ}$ TOT di celle

Aut in toto un n° di tempi = $i = n^{\circ}$ raggi = $(n^{\circ}$ ricevitori) \times $(n^{\circ}$ sorgenti)

Il problema inverso si risolve per approssimazioni successive (iterazioni):

- 1) Hp di un modello iniziale di velocità = vettore $\vec{s}(0)$
- 2) Si calcolano i percorsi ed i tempi di volo di r raggi
- 3) Si costruisce la matrice dei tempi intercetti A e si risolve il problema:

Ⓐ Soluz. canonica ai minimi quadrati:

$$(A^T A) s = A^T t$$

- Se $\text{rang}(A) = 1 \Rightarrow s = (A^T A)^{-1} \cdot A^T \cdot t$

- $\text{Rango}(A) < 1 \Rightarrow s = (A^T A + \lambda I)^{-1} \cdot A^T \cdot t \rightarrow$ Smoothed Least Square

\hookrightarrow legge + robusta nei + sparsi, ordinato dei parametri nella cascata

Ⓑ $A(s(0) + \Delta s(0)) = (t(0) + \Delta t(0))$

$\Rightarrow \Delta s(0) = (A(0)^T \cdot A(0) + \lambda I)^{-1} \cdot A(0)^T \cdot \Delta t(0)$

$\lambda =$ fattore di regolarizzazione
 $\hookrightarrow \downarrow \lambda \Rightarrow \uparrow \text{no. iterazioni}$

4) Si minimizza l'errore quadratico tra tempi sperimentali e teorici:

Ⓐ $\min \|A \cdot s - t\|_2$

Ⓑ $\min \|A(0) \cdot \Delta s(0) - \Delta t(0)\|$

} « valore di soglia (= incertezza strumentale)

5) Se $e^- \ll$ soglia \Rightarrow Soluz. ritenuta accettabile

Se $e^- >$ \Rightarrow Calcola il nuovo vettore delle incertezze:

$s(1) = s(0) + \Delta s(0)$

TOMOGRFIA RIFRAZIONE

Differenza da Tomografia $\rightarrow A = f(s)$

\Rightarrow Scarto $t_{\text{teo}} - t_{\text{sp}}$ è adriaco del modello $\Rightarrow A \Rightarrow ds$

\Rightarrow Ma tanto i dati iterati, il min e Beale, dipende dalla qualità del modello iniziale

STEP ITERAZIONE

- 1) Hp $s_0 =$ modello iniziale di velocità
- 2) Soluz. probl. diretto \Rightarrow stime di $A = f(s)$ e t_{teo}
- 3) Soluz. probl. inverso \Rightarrow min. Beale $\Rightarrow s_1$
- 4) $s_1 =$ nuova hp iniziale

Interruppo : $\min < 5\%$ = errore strumentale

SISMICA A RIFLESSIONE

Rispetto alle tecniche \rightarrow "inverte" e per "profondità" \rightarrow costo \times idrocarburi

Soggetti potenti, \times arrivare a big Z.

Obiettivo = misurare i tempi di alcune porzioni del sonda. Dal raw data
 viene poi ad i valori sismici, che mette poi di ottenere il modello

Tecniche usate \times processing = basate su studi dei tempi e propagazione

Grande scala \rightarrow 3 step:

- Acquisizione = dati grezzi
- Processing = da dati grezzi al sismo
- Interpretazione

Eq. dei tempi $\rightarrow t = \frac{\sqrt{x^2 + 4h^2}}{v_1}$ \rightarrow parabola inverte rispetto ad O (se piano //)
 Annotato = rete ad dritta

Ampiezza della riflessione dipende da variaz delle prop. meccaniche tra 2 materiali

\Rightarrow Contrasto di \times pedale acustica $\rightarrow I_a = d \cdot v \Rightarrow I_{a1} \neq I_{a2}$

Abbondano \rightarrow Materiali diversi con I_a simile non riflessa \rightarrow difficile avere $\uparrow v$ e $\downarrow d$

Ipertbole:

$\bullet v_1 = \text{cost} \Rightarrow \times \uparrow h \Rightarrow \downarrow$ curvatura

$\bullet h = \text{cost} \Rightarrow \times \uparrow v_1 \Rightarrow \downarrow$ curvatura

STRATI MULTIPLI \Rightarrow per definire v_n di un'angolo rispetto al asse perpendicolare:

\bullet eq. ipertbole per un'acustica $\rightarrow t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{v_{rms}^2}$

dove: $\bullet t_0 = \frac{2h}{v}$ \rightarrow tempo di offset \rightarrow abbe e tempo lungo la verticale

$\bullet v_{rms}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n v_i^2 \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}$ \rightarrow velocità di Root Mean Square, cioè rata di tutti gli strati sopra alla rete in considerazione

Δt_i = parametrizzato quello strato, propagazione verticale

\bullet Formula di Dix: $v_n^2 = \frac{v_{rms, n}^2 t_n - v_{rms, n-1}^2 t_{n-1}}{t_n - t_{n-1}}$
 $h_n = v_n \left(\frac{t_n - t_{n-1}}{2} \right)$

Azzerando \times descrivere l'eq: $t \approx t_0 + \frac{x^2}{2v^2 t_0}$ \rightarrow NMO

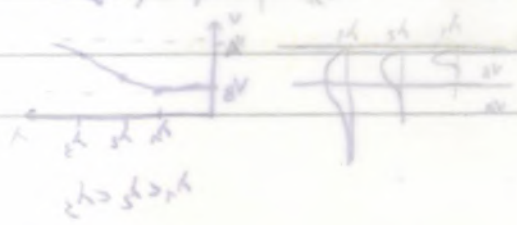
Normal Move Out = differenza dei tempi dovuto scatto in funzione dell'offset
 \rightarrow Dice qu't inibale e' curva

ONDE SUPERFICIALI

- Dimensione finita della risonanza all'interfaccia → Regg. radici precedenti
- con part. d'ob. con estensione laterale → Regg. di Fresnel

PROCESSING → vedi PRIMA

[Faded handwritten notes, likely bleed-through from the reverse side of the page]



λ piccola rispetto nel 1° strato
 λ big. in entrambi i strati \Rightarrow Po. non v. vera, e influenzata da strati sotto.

\Rightarrow DISPERSIONE GEOMETRICA \rightarrow dipendenza $v(f)$

\hookrightarrow non è legata ad \pm corse in un'area del mezzo, ma riflette la geometria delle direzioni delle propagazioni nel mezzo.

SISMOGRAMMA \rightarrow Ampiezza del segnale (base $f \Rightarrow$ viaggiare a v_2 + alta \Rightarrow curva \sim)

Mezzo stratificato \rightarrow Strati Omogenei, isotropi, elastici, lineari

Parametri di strato $\rightarrow v_s, \sigma(\text{o } v_p), d, H$

PROBLEMA DIRETTO \rightarrow proprietà

Contrao l'algoritmo che, partendo da un modello, ci permette di rappresentare le onde

\hookrightarrow Cerca gli zeri della funzione reale di Rayleigh, che forniscono coppie di valori $f-v$ (o $f-k$) che in le possibili soluzioni della propagazione.

Fattore = dispersivo + modale \rightarrow v f ha + v possibili, il terreno può vibrare in n modi, ha + soluzioni reali, possibili. Sistema può avere n stati di energia.

\hookrightarrow Moda fondamentale (quella a v + base) e non parte teorica, ha parte di v viaggiare qui

\hookrightarrow Modi superiori \rightarrow viaggiare a profondità inferiori

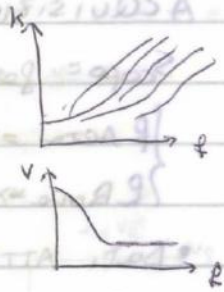
CURVA APPARENTE
 Curva $f-k \rightarrow$ Ci dà soluzioni teoriche di risonanza. Vediamo esatta

dove n è l'ipotesi E (più non corrisponde a soluzioni teoriche)

Curva di dispersione, $f-v \rightarrow$ vedo E e v degli strati. Qui:

f base \rightarrow vedo 2° strato $\Rightarrow v_2 > v_1$

f alta \rightarrow vedo 1° strato $\Rightarrow v_1 < v_2$



CARATTERISTICHE

CARATT

- Tecniche alternative/complementari + altre di propagazione a campo
- Scale: inologia e strato costa (300km) \div manifatti (pochi km)
- Base in funzione di direzione geometrica di onde superficiali
- Forme e profili verticali (o sezioni e volumi pseudo 2D/3D) di v_s

PROGETTA INVERSO

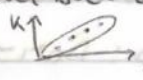
ANALISI SPETTRALE

Approccio + diffuso x elaboraz dei dati, (delle trasformate adotti in dominio (x, t) in info sulle dinamiche in dominio $(f-v)$).

Processo iterativo, mette di rappresentare i segnali misurati in dominio di $t(x)$ nel dominio di $f(k)$. ZFFT = Fast Fourier Transform

Operatore iterativo \Rightarrow trasforma i segnali: $x \rightarrow k, t \rightarrow f$

Spettro $f-k$ = mappa spettrale di distribuzione dell'E. Su risonabili adole superficiali (eventi ad alta E).



$v = \cos t \Rightarrow$ Rete, in fase di risonanza \Rightarrow max potenza + risonanza

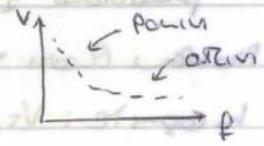
Evento principale di adole R. Inca di E in punti \rightarrow e convertito in (v, f) :

$v(f) = \frac{2\pi f}{k} \Rightarrow$ punti di curva di dispersione.

Dati passivi \Rightarrow Array 2D \rightarrow Origo, $\forall f$, una mappa $(k_x, k_y) \rightarrow v = \cos t \Rightarrow$ cerchio.

Max spettrali in cerchi, $x + f$, poi trasformati, in dominio (f, v)

Alto f \rightarrow curva di dispersione complessiva



Pot succedere che + modi di vibrare siano efficaci

\Rightarrow Trova le curve ^{modali} ~~modali~~, se cerca π max relativi \Rightarrow 1 n° n°

Aumentando il n° ordini \rightarrow ottimizza il rinvio e separa dei modi, ma se in troppi \rightarrow dati ruidosi, interferenze delle vortici Eterici.

INTERPRETAZIONE APPROSSIMATA 1/3

Rappresentazione dati in dominio operativo

Amplitude: il max di E si trova a $z = \frac{\lambda}{3}$,

ed E ha una $v_s \sim 1.1 v_R$

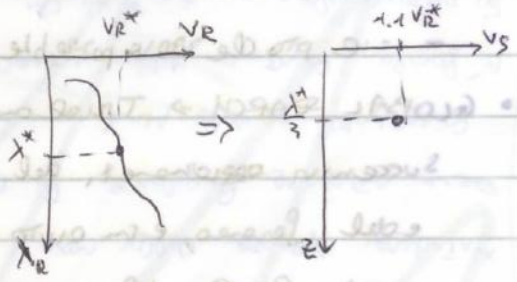
\Rightarrow Curve di dispersione x ~~modali~~ e ~~trasformate~~ in

(v approssimate, pseudo-profilo)

Per forza idea preliminare

Però (v_R, λ) \rightarrow Pseudo un pto $(v_R^*, \lambda^*) \Rightarrow$ il max ~~si trova~~, in (v_s, z) , a $z = \frac{\lambda^*}{3}$ e $v_s = 1.1 v_R^*$

Idea grande di come distribuito v_s , e decante x ~~si trova~~ da vortici molto grandi



GEOELETRICA

basano sulla propagazione naturale di un campo EM (naturale o artificiale) e nella velocità (in superficie o in foro) della risposta del terreno alla propagazione del campo. Frequenze basse, $\sim 1\text{ Hz}$

dividono i mezzi laterali o con la profondità di penetrazione di conduttività elettrica, permittività elettrica, suscettività magnetica. Minore la velocità di propagazione, minore la penetrazione.

Alta sensibilità e presenza di fluidi \Rightarrow usi e caratteristiche, molto occupate e rapporto solo a velocità non previsti. Buoni e corati di potenziali statici e dinamici.

Fate preliminarmente un rapporto a successive fasi: permeabilità, conduttività, densità, suscettività magnetica e fobilità:

- $SEV =$ un solo indagine, stazione fissa e raggiato verticale, \neq indagine velocità di conduttività in zone laterale. $Z = \text{prof. m} = \text{quadrato di m.}$

- $SEZ =$ rapporto elettrico velocità laterale di σ .

\Rightarrow Abbinato = tomografia.

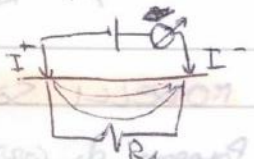
corrente elettrica più forte:

- Naturale = rotazione da fenomeni magnetici terrestri

- Artificiale = ad es. 2 elettrodi, flusso di corrente da I^+ a I^- . Distribuzione di linee di corrente dipende da σ . (Linee equipotenziali, \neq linee di corrente in bpt). $\frac{V}{I} = R$



Circuito equivalente = ha un unico (R_1) uguale a quello del terreno. R_1 dipende da resistività e dai parametri



specifici della roccia

PARAMETRI FISICI

Conduttività el = capacità di un materiale di permettere il passaggio di una corrente elettrica. Parametro intrinseco che determina un flusso e intensità di corrente.

Permittività el = capacità di un materiale di immagazzinare energia EM. Detto costante dielettrica.

Suscettività magn. = capacità di un materiale di magnetizzarsi in presenza di un campo esterno.

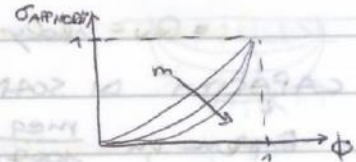
- SUOLO + ARGILLA (Fraz. argilla alta) $\Rightarrow \sigma_{argilla}$ e σ_{tot}
- SUOLO + TDS (contaminanti disciolti) $\Rightarrow \uparrow \sigma_{fluido}$, alle condizioni misurabili con acque
- SUOLO + HC RECENTI $\Rightarrow \uparrow \rho_{tot}$, $\downarrow \phi_{eff}$ \downarrow mobilità ionica, c'è spazio di ritenzione relativo e non misurabile
- SUOLO + HC ALTA PERMANENZA $\Rightarrow \uparrow \sigma$ per contributo di fraz. solida, + presenza di depredatore; modif. della specie di scambio

Si cerca di collegare le parametr. di osservazione (σ) con i parametr. idrogeol.

MODELLO DI ARCHIE - Mezzo saturo (mezzargilla)

$\sigma_m = a \cdot \phi^m \cdot \sigma_f$ $\rightarrow \sigma_f =$ del fluido; $\sigma_m =$ della miscela fluido + solido

Si assume che σ gran. solida sia trascurabile



MODELLO DI ARCHIE - Mezzo poro saturo

$\sigma_m = a \cdot \phi_m^m \cdot S_w^n \cdot \sigma_f$

Parametri empirici usati \rightarrow esse dato che la curva segue 1 curva in 1 certa condizione che dipende dalla struttura della roccia:

- $n \approx 2$ \rightarrow esponente di saturazione
- $a = 0,5 \div 2,5$ (xlat + 0,8 ÷ 1,2) \rightarrow coef. site dependent, varia + volta
- $m = 1,3 \div 2,5$ \rightarrow esponente di cementazione, dipende da forma di partic. solide della roccia.

- Sabbie N.C. $\rightarrow m = 1,3$
- Arenarie calcaree $\rightarrow m = 1,8 \div 2$

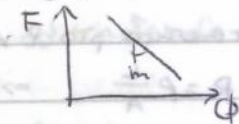
FATTORE DI FORMAZIONE

Acqua nei pori cariche ioni e cationi di sali disciolti. \rightarrow attribuisce a σ_m m. 2 modi:

- σ elettrolitico = geometria di pori (o fratture) comuni determine geometria di percorso conduttivo (Modello Archie)
- σ elettrolitico = interf. elettrica tra fluido e matrice solida all'interfaccia fluido/solida. Dipende da superficie interna dei pori. (Modello Waxman, Smith)

Fattore formazione = rapporto ρ_a (specifico di roccia nativa) e ρ_w (specifica miscela):

$F = \frac{\rho_a}{\rho_w}$



ARCHIE, CON FAC. FORMAZ:

- Saturo $\rightarrow \frac{\rho_a}{\rho_w} = F = \frac{a}{\phi_m^m}$
- Poro. Saturo $\rightarrow \frac{\rho_a}{\rho_w} = F = \frac{a}{\phi_m^m S_w^n}$

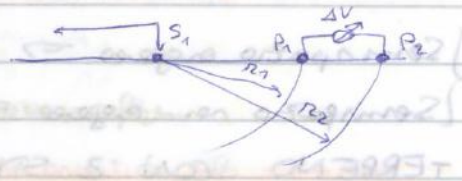
MISURA DI DIFFERENZA DI POT. (GRADIENTE)

2 elettrodi di V collegati ad 1 circuito di misura

Vale princ. di sovrapposizione

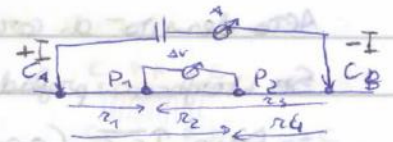
$$\Delta V = V_1 - V_2 = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

$\downarrow V$ se $\uparrow r \Rightarrow V_1 > V_2$



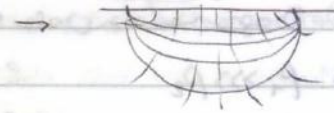
QUADRIPOLO ELETTRICO (general configuration)

$$\Delta V = \Delta V_A + \Delta V_B = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_4} - \frac{1}{r_3} \right) \right]$$



$\Rightarrow \rho = k \frac{\Delta V}{I} \rightarrow k = \text{fattore geometrico}; \Delta V, I = \text{ammisurazioni}$

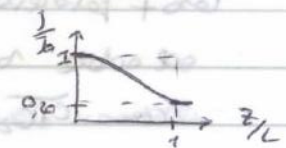
Qu 1 & 4 elettrodi in fondo, le Ccl e disturbate da nostra presenza di elettrodi. Superfici equip in $m + 1$ m e m_2 de, m zone circolari in x e z coordinate



Andatura del potenziale V e -1 metrico.

Intensità di corrente $J \rightarrow$ densità propria in zone superficiali

$$\text{a } z=L \Rightarrow J = 0,20 \cdot j$$



\Rightarrow linee di corrente = distrib. fortiori omogenea per z .

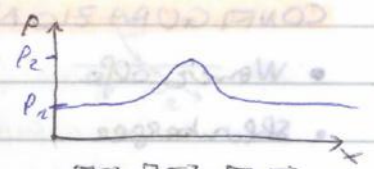
\Rightarrow qualità di info $>$ in superficie.

DISCONTINUITA' (data 1 Ccl negli unif, S_{in} e S_{out})

Perturbazione di ρ distrib. di linee di corrente attorno

al bastardo (= variaz di prop. el).

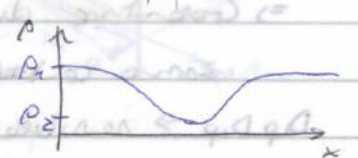
$\bullet \rho_2 \gg \rho_1$ ($\rho_2 = \text{aria}$) \rightarrow linee poco dense, ρ_2 big densità d'aria.



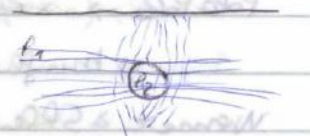
In superficie misur (a pari distanza di elettrodi) linee equip + distaccate tra $\rho_0 \Rightarrow \Delta V + \text{piccolo}$



$\bullet \rho_2 \ll \rho_1 \Rightarrow$ densità rispetto ρ_0 big densità, linee circolari e ravvicinate a minor resistenza. Linee equip + ravvicinate,



in superficie $\Rightarrow \Delta V + \text{big}$

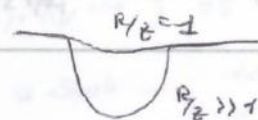


Curve = $\rho_{app} = f(\rho_{eff} \text{ dei } z \text{ naturali, geometriche})$

Andatura di $\rho_{app} =$ mediana ρ_{eff} di una variaz rispetto ad 1 notevole a gener

Sua entità dipende da: $\bullet \rho_1/\rho_2 =$ contrasto di proprietà

$$\bullet \frac{R}{z} = \text{profondità}$$



SEV: TEORIA SORGENTE IN IMMAGINE

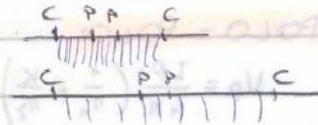
Sistemi piani //, sorgenti elettricamente

→ interfaccia la curvatura di ρ → Rifraz di linee drette e riflem.

Materiali nei sorgenti ⇒ legge di Ohm non è valida → \vec{A} no vic analitica, no numerica.

X^s → modelli replicati, geometria replica ⇒ \exists serie analitica

SEV, Shewmonizer: INCERTEZZE



Se carica elettrica I e fascio cost P ⇒ $\downarrow \Delta V$ misurato

→ incertezza della misura po- l'altro m%, fine al 10%.

Per migliorare (prendere ΔV + big) ⇒ allarga elettrodi P o ↑ I

Misura = ci dai intervalli di misura, e il valore effettivo de rima e ^{calcolato} ~~data~~ in tab

Modello. Pone oltre forti risonanze, incertezza ± 20%

$$I_p \approx 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \Rightarrow I_p \approx 2\pi(a + \Delta a) \frac{\Delta V + \Delta \Delta V}{I + \Delta I}$$

Teoria Sorgente immagine = permette di calcolare la distrib di campo el + modelli

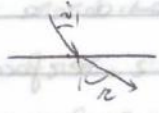
di solo nella replica. X calcolare risposta forma di fmm di SEV e SEC

Interfaccia tra 2 mezzi a ≠ ρ ⇒ Rifrazione:

$$\frac{\tan i}{\tan r} = \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

→ se $\rho_1 > \rho_2$ ⇒ diverge

Diverge positivo a negativo



INTERFACCIA TRA 2 SEMISPAZI OMOGENEI

Interfaccia = superficie non riflettente, K = coeff di riflessione

Superfici equip → Localmente = sfera, vicia interfaccia = interbale

$$h P'' \rightarrow V_p'' \approx \frac{\rho_1 I}{4\pi r}$$

h P, vicia interfaccia ⇒ V_p = (effetto immagine) + (parte perturbata)

$$\Rightarrow V_p = \frac{\rho_1 I}{4\pi} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{K}{r_2} \right)$$

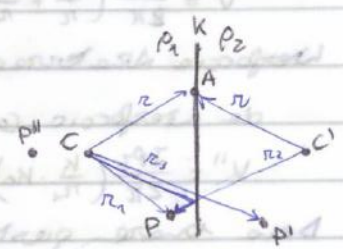
h P', come se avessi avuto un solo mezzo ρ_2 (Tolgo parte che è stata riflessa)

$$\Rightarrow V_{P'} = \frac{\rho_2 I}{4\pi} \left(\frac{1}{r_3} - \frac{K}{r_3} \right)$$

h A = generica pto sulla superficie, deve avere: $V_A \equiv V_{P''}$ e $r_1 \equiv r_2 \equiv r_3 \equiv r$

$$\Rightarrow \frac{\rho_1 I}{4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{K}{r} \right) = \frac{\rho_2 I}{4\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{K}{r} \right) \Rightarrow \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{1-K}{1+K}$$

⇒ Definire il coeff di riflessione $K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$



2FO

PROPRIETÀ ELETTRICHE DDP

• Se $\sum U \rightarrow 0 \Rightarrow V_p \rightarrow V_n \Rightarrow P_{APP} \sim P_1$

• Se $\sum U \gg z \Rightarrow P_{APP} \sim P_2$

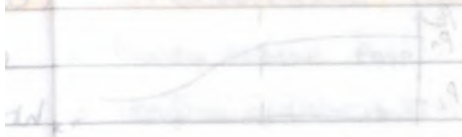
• Sfruttamento \rightarrow espressione apparente (partendo da T_{e} sig. mag. e)

$P_{APP} = P_1 (1 + Z D's) \rightarrow$ per Z elevatissimi //

$D's = \frac{V_{PER}}{\frac{I P_1}{\pi}}$

SENSIBILITÀ \rightarrow \exists possibilità di fare analisi di sensibilità \rightarrow \pm certa configurazione

\times vedere $P_e \neq$ var. in Z e nelle λ e μ



CONTATTO VERTICALE \rightarrow $\frac{dV}{dx} \rightarrow \frac{dV}{dx} \rightarrow \frac{dV}{dx}$

$\frac{dV}{dx} \rightarrow \frac{dV}{dx} \rightarrow \frac{dV}{dx}$

$\frac{dV}{dx} \rightarrow \frac{dV}{dx} \rightarrow \frac{dV}{dx}$

TOMOGRFIE ELETTRICHE DI P

Combinazioni di SEO e SEV.

Da 48 a 96k anno di elettroni, allineati lungo i profili, collegati con i cavi
multiplex ad i intere automatica di controllo, che diventa in vera definizione
quali usare in elettroni. Rapporto spaziale lunghezza interdi / profondità idogre

Per studiare sezione di i nra

luzio a quadrupolo a distanza a, b, irradia \Rightarrow 1° strato

Poi, $Ta \rightarrow z \cdot a$, $Ta \rightarrow z^2 \cdot a$, etc...

Se $Ta \Rightarrow$ profondità ma \downarrow n° \Rightarrow ρ_0 + densità
di nra in superficie.

Rappresentazione riserati = Pseudosezione di Papp, triangolare, neppure a base
max (nello strato). Forma e l'aspetto della configurazione (alla ne resistività)

\hookrightarrow Contouring \Rightarrow neppure continua.

Da fare dover ottenere le perfetture

ELABORAZIONE DATI \rightarrow Metodo iterativo

- Pseudo sezione Papp

- Verifica qualità dati:

 - Elettro avarie

 - Reciprocità delle misure, elettro dati de f da misure iniziali

- Modello diretto: uso modelli geologici e nra superficiali. Decide le parametri usare
per il modello. Discretizza sez nra, eccetto ungeandare fa iniziali;
con metodimmerici calcolo le V ai nodi di V alla, che corrisponde alle po ed alle
configuraz elettriche usate; Per ogni nodo determina i eqle correnti, parametri
del modello (ρ), le voltre V terra ed il V perm misurato.

Inversione: risolvere le misura di eq \rightarrow minimi quadrati \rightarrow $\min(V_{teo} - V_{sini})$.

Soluzione = nuova distrib dei voltre di par nodi.

Controllo qualità di elaborazione \rightarrow se solo et statistiche e proficom

buono \rightarrow OUTPUT. Altrimenti, torna al modello diretto.

Disturbi controllate = percorsi preferenziali / perdite di percolato

Applicat ambienti tomografici \rightarrow discorde non calcolate \rightarrow nra sporedi, nra +
benfica c/o verticalizzaz

TOMO GRAFIA ELETTRICA IN FORO

POLARIZZAZIONE

Stessi principi di Torgge unico in foro. + o - e replica (20 + fori) di tor. el. normale

Rapporto interasse / profondità - fori = 1:2

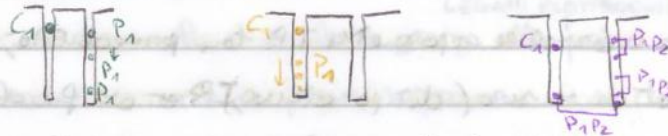
Profondità - fori = $96 \text{ km} = 80 \text{ m}$

Pole configuraz elettriche possibili, polo-polo e derivato. ~24 elettrici in 4 fori.

• POLO-POLO, CROSSHOLE

• POLO-POLO, IN HOLE

• POLO-DI-POLO



Elettrici → possono essere ottenuti integrando in piezometri, in placche di acciaio che si attaccano, con tutti i poli e collegati alle interfacce.

Velocità rispetto a misure da superficie → discretizzazione avviene in + celle (non sempre restano in problema sovraesposto).

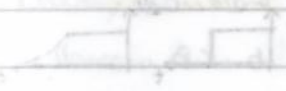
Alta capacità (induttiva), natura capacitiva

Analisi di sensibilità: in base alle configuraz, cambio la capacità di risposta,

cioè la sensibilità alle variaz di ρ .

XV configuraz ho zone a ± sensibilità

⇒ incertezze ± due celle ≠ zone



MECCANISMI

- **Polarizzazione di elettrodo** = dovuta all'interazione elettrochimica al contatto tra Me e fluido con presenza di ioni disciolti. Merezzi notivi elettrico-Gravimetrici: se c'è C. el \Rightarrow accumulo di ione in parte opposta direzione di corrente del Cel.
- **Polarizzazione di resistenza** = legata a presenza di partic. caricate elettricamente, negative sulla superficie (ossidi) \Rightarrow mobilità di ioni + e limitate da interazione catodica con LEGAMI ELETTROCHIMICI
 \Rightarrow grande passaggio di corrente per accumulo di ione + atomo alle partic. negative.
 Rimozione del Cel \Rightarrow le ioni si ridistribuiscono nei pori e restituiscono un ΔV che decade nel t.
 \Rightarrow Mob. ioni \rightarrow durante il moto \rightarrow tornare a condiz. + ossigeno, restituiscono il ΔV .

CONTAMINANTE ORGANICO

Fenomeno elettrolitico. Passaggio di corrente nei pori \Rightarrow concentrazione di ioni in presenza di un elettrolita catodico org. Inverto corrente \Rightarrow è accumulo di ioni \Rightarrow vede ΔV , dipende da:

- [ioni]; • mobilità; • legami elettrici superficiali tra contaminante ioni in soluzione

EFFETTI ELETTROCHIMICI \rightarrow legati a reazioni redox

- **Riduzione**: IP ad alta f ($> 10\text{Hz}$) e sensibile a condiz. granulometriche che facilitano il trasporto rapido di e⁻ alle interfacce tra minerali o tra fluido e minerali.
 Aumento di IP = diagnostiche di processi riduttivi del $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ (scambio rapido, danno alle f. + dte).
- **Ossido/Riduzione**: IP a bassa f e + sensibile a processi elettrici in acqua (dte).
 Processi di scambio e⁻ ridotti da ossid. sulfuri = bassa f \Rightarrow diagnostici di riduz. sulfuri.
 Presenza via di Fe^{2+} e sulfuri in soluzione e ppt di $\text{FeS} \Rightarrow$ Trasporto di fase in ampio spettro di f . Dipende da:
 - permeabilità da ione elettrolitico durante
 - superficie specifica e granulometria del ppt

NOQUINANTI METALLICI

In teoria I_0 , se non seppelito aerobico in sole misure di p. E⁻ + mercato
 e effetto di IP

DOMINIO DI FREQ

Sim. a figurez elem di domo t. Comportam. elet. di molti materiali po' variare

con la f. \rightarrow corso te fa ai re intera scelta la risposta.

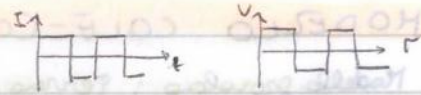
Non faccio + muove nel transitorio. uso sempre correnti alternate.

EFFETTO FREQUENZA - osservo un fenomeno a 2 valori di f $\rightarrow f_1 \geq 10 f_0 \rightarrow f \in [0,01; 100]$ Hz

- Materiale non polarizz \Rightarrow forme d'onda rovesce

La forma del segnale inverte, senza distorsione

$$\rightarrow P_{a,0} \cong P_{a,1}$$

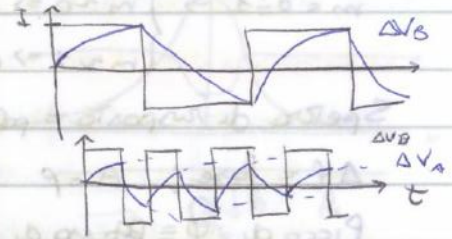


- Materiale polarizz \Rightarrow

• Basso f \rightarrow transitorio, ΔV_B stabilizza a

valore di regime dopo 1 po'

• Alto f $\rightarrow \Delta V$ non ha tempo a stabilizzarsi, TRANSIENTE DI CARICA nel valore di regime (recidoe + base del V)



\Rightarrow Nota differenza $\Delta V_A \neq \Delta V_B \rightarrow \Delta V_A < \Delta V_B$

$$\Rightarrow \text{a vedo } P_{app} \propto \frac{\Delta V}{I} \Rightarrow P_{app,A} < P_{app,B}$$

Poss. ritardare la risposta in freq del nostro \rightarrow leggere P misurato alle

\neq f ed il fenomeno IP, attraverso il parametro FE:

$$FE = \frac{P_{a,0} - P_{a,1}}{P_{a,1}}, \text{ dove } f_0 < f_1$$

SFASAMENTO \rightarrow tra segnale di corrente e di tensione delle \neq f

12 segnali fase forme d'onda omnia (numerabile):

$$I = I_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$$

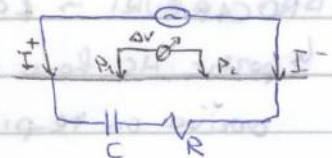
$$V = V_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) \Rightarrow \text{sfasato} \rightarrow \Delta \varphi = \varphi_1 - \varphi_0 \text{ (gk nell'ord)}$$

\uparrow mezzo polarizz $\Rightarrow \uparrow \Delta \varphi$

Dovuta a presenza di C in circuito equivalente

Na polarizz \rightarrow solo R $\Rightarrow \Delta \varphi = 0$

Uno \neq f $\rightarrow f = 0,1 \div 100$ Hz



Sfasato $\neq 0 \div 2^\circ$ della f de us \rightarrow variazioe fa (osservare le forme

oche \neq f oscillare di ωt)

• $f < 1$ Hz \Rightarrow data correat tra $\Delta \varphi$ e presenza di t/c in fase re parata

• $f = 0,1 \div 10^3$ Hz \Rightarrow titolo medio, l'ita' terreno = caratterizzat idrodinamica

• $f = 0,1 \div 10^4$ Hz \Rightarrow campo motoro, ricerca di guicneti di effetti dinamici

POTENZIALE SPONTANEO

STRUTTURE METALLICHE SEPOLTE (cavi e condotti)

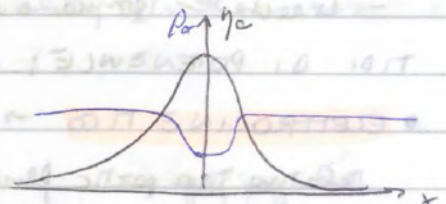
Polverizzazione superficiale di un corpo cilindrico ovoidale (elettrici conduttori) in un campo elettrico uniforme (big data da C_1, C_2 fmi). // P.C.

H_p: • lunghezza o altezza elettrica

- piccola ϵ
- piccola rete trasversale (r_0)
- alta σ del corpo
- struttura o polvere elettronica.

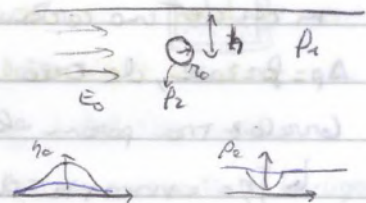
Si fa analisi abbinate di onde f_{app} e η_{app}

Se $p_1 > p_2 \Rightarrow$ la gnt curva



$\lambda =$ indice di polarizzabilità $= 0 \div 1$

La $\lambda = 1 \Rightarrow$ big attività elettrochimica cilindro/terzo



Anomalia verso in funz di h/r_0

$\uparrow h/r_0 \Rightarrow$ tendenza \Rightarrow perdita di capacità conduttiva

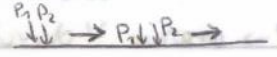
Se anomalia $\leq \pm 15\%$ rispetto background di base

\Rightarrow confuso col rumore

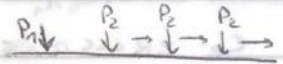
ACQUISIZIONE

Lungo profili o punti distribuiti in 1 maglia prestabilita \Rightarrow apertura areale
 2 modo di misura

- Spazio coppia $P_1 P_2$. Distanza tra essi = 5-6m.



- P_1 fissa = stazione base; P_2 mobile \Rightarrow Cavi lunghi



$P_1 \rightarrow$ in caso in 1 pto dove non ci sia anodo, per il che misure in rifente ad esso \Rightarrow Serie aree piaz. di rifer. ≈ 0 . Anodo, P_2 mobile + avere uso lungo nel tempo.

STRUMENTAZIONE

- Elettrodi impolari zincabili = minimizzazione fenomeno di polarizzazione di elettrodi. + cor. Piccolo stabile a misura.



Pareti porose; sol. incompressibile del Me del picceto.

Colo sol. + rete porosa di corrente tra nob e itero, ΔV tra nob e

pto di misura al picceto: $\Delta V < 0,1 \div 0,2 mV \Rightarrow$ minimizzata V background.

Meslo elettrodi rivestiti con + tinto de acciaio (gera V di stato \Rightarrow big errori)

- Milivoltmetro = Milmetro. Sensibilità $\sim 0,1 mV$
- Cavi \rightarrow lunghi e resistenti

SORGENTI POSSIBILI DI RUMORE

Metalli saturato; Variaz T ; Proprietà nob; Variaz elettrolita; Effetti topografici; Tellurici ($\Delta V(T)$ per ripetute di fusto o variaz)

INTERPRETAZ QUALITATIVA

Si platano profili (V, x) o neg $m(a)$ contate, Partiz areale \equiv net piano piaz. aree

Alcune me di profondità di aspetto strambi, da prefedire di areale (arpiezzo)

ΔV ristretti \sim decine di mV



Solo preliminare.

MODELLI DI INTERPRETAZIONE

Anodie date da oggetti di forma siple \rightarrow sfera, cono, diga verticale

\Rightarrow Si usa la risposta di 1 duplo el., + dimensione areale e profondità

Situa finite = fusto verso anodo \sim zone latera \Rightarrow instaura potenz el

\Rightarrow Fusto si comporta in dipolo

\Rightarrow Modellazione tale istoz, usando fusto = sfera



Analisi Teorica = legge a:

- Contributo di un dipolo el, polarizzato a z^o da un polarizza opposto a nazionale
- α = angolo nchez dipolo
- Forme, natura, profondità del corpo; come m distribuite corule de governo energia

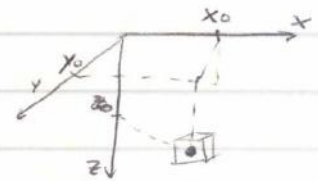
INTERPRETAZIONE QUANTITATIVA → grandie el divede

↳ 3D, x individuare forme e profondità del corpo

Metodo = correlaz di grandie di V e le sue derivate lungo

13 orlo

Caso sfera polarizz vertic.



↳ Considero picca P_1 → pare approssimare il valore di V_p

de divede ricavato:

$$V_p \approx m \frac{\cos \theta}{r^2} \rightarrow \theta = 0 \Rightarrow \cos \theta = 1 \Rightarrow V_p \approx \frac{m}{r^2}$$

Correlaz replica ma gradie e le sue derivate m generica divede r:

$$\frac{dV_p}{dr} \approx -\frac{2m}{r^3} = -\frac{2}{r} V_p$$

Scompondo $r = m(x, y, z) \Rightarrow$ trova relaz simili

↳ **Equazione di omogeneità di Euler:**

$$x_0 \frac{\partial F}{\partial x} + z_0 \frac{\partial F}{\partial z} + N B = x \frac{\partial F}{\partial x} + N F$$

→ F = corpo ragun totale

↳ B = valore del corpo ragunale

N = indice strutturale = modello di decadimento del corpo con la distanza dalla sorgente

E_q e riscrivibile:

$$(x-x_0) \frac{\partial V}{\partial x} + (y-y_0) \frac{\partial V}{\partial y} + z_0 \frac{\partial V}{\partial z} = -2 V_p$$

Caso 2D = rilievo alle pare esterne x le parez del centro dell'elemento

m superficie ⇒ trascuro attributo lungo y, natura + replica:

$$(x-x_0) \frac{\partial V}{\partial x} + z_0 \frac{\partial V}{\partial z} = -2 V_p$$

↳ espote = $-2 = N$ indice strutturale → dice come il corpo el decade con la distanza,

m base a forme e profondità dell'oggetto (riconducibile ad 1 forma di forma)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Sfera} \rightarrow \text{ta } V_p \sim \frac{m}{r^2} \Rightarrow N=2 \\ \text{Cilindro} \rightarrow V_p \sim \frac{m}{r} \Rightarrow N=1 \end{array} \right.$$

Incongnite → $x_0, z_0 \Rightarrow$ Se misuro $V_p, \frac{\partial V_p}{\partial x}$, ricavo $\frac{\partial V_p}{\partial z}$ (misure a \neq quote, o

posizione de misure di corpo)

⇒ Sintesi strutturalista, de ruolo ottiene x_0, z_0

ELETTRICITÀ

Si può ottenere una freq di taglio \rightarrow cut off \rightarrow $\left. \begin{array}{l} \text{Sotto} \rightarrow \sigma \\ \text{Sopra} \rightarrow \epsilon \end{array} \right\}$

Devo confrontare: $|\omega^2 \mu \epsilon| \leftrightarrow |\omega \mu \sigma| \rightarrow \mu \sim \mu_0 \Rightarrow$ eliminata μ_0
 $\Rightarrow |\omega \epsilon| \leftrightarrow |\sigma|$

• $\sigma \gg \omega \epsilon \rightarrow$ Campo diffusivo, n. propaga + cond. elettrica.
 \Rightarrow Eq Maxwell diva: $\nabla^2 H_x - \mu \sigma \frac{\partial H_x}{\partial t} = 0$ (trascuro termine con $\omega \epsilon$)

• $\sigma \ll \omega \epsilon \rightarrow$ Campo propagativo, prevale ϵ . $\uparrow \omega \Rightarrow \uparrow$ possibilità di est. in qst n. tra. Stemp. principi di propog. sinuati.

Frequenza di taglio $\rightarrow f > 1 \div 10$ MHz \rightarrow vale preciso dipende dal tipo di materiale

Argilla \rightarrow basse f \rightarrow trascuro $\epsilon \Rightarrow$ campo diffusivo
 Roccia calcarea \rightarrow alte f prevale campo propog.

Semispazio omogeneo e ca $\epsilon, \sigma = \text{cost}$, con sorgente sinusoidale:

PROP $\frac{d^2 E_x}{dz^2} + k^2 E_x = 0$

$\hookrightarrow k^2 = \omega^2 \mu \epsilon + i \omega \mu \sigma = \alpha + i \beta \rightarrow$ costante di propagazione

Campo propagativo \rightarrow \neq sole di polariz, n. funz del c.nagn:

• Atomico $\rightarrow p^+ e^-$

• Molecolare \rightarrow come acqua

• Ionico \rightarrow come TP, effetto legato a ϵ

Velocità:

• Diffusivo $\rightarrow v = 10^5 \div 10^6 \frac{m}{s} \rightarrow$ Molto lento, in corde el. in sottile del
 deve orientarsi e muoversi, in tortuosità

• Propagativo $\rightarrow v = 10^8 \frac{m}{s} = 1/3 \text{ m/ns} \rightarrow$ Molto rapido, legato alle radiofrequenze

Dispersione delle EM

• Aria \rightarrow dispersione geometrica, ma dispersione trascurabile \Rightarrow campo propagativo

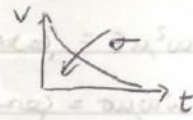
• Materiali = elettrici conduttivi \Rightarrow $\sigma \neq 0 \Rightarrow$ \uparrow effetto dissipativo (Joule)

Campo diffusivo = distanza percorso in mezzo

omeg & non omeg: $d = \sqrt{\frac{z t}{\sigma \mu}}$

Velocità di diffusione: $v = \frac{z}{\sqrt{\pi \sigma \mu t}}$

$\hookrightarrow \uparrow \sigma \Rightarrow \downarrow v, \downarrow d$



PERMETTIVITÀ ELETTRICA

Grandezza fisica che descrive come il campo elettrico, riferito ad un riferimento da un mezzo dielettrico.

Capacità di un materiale di polarizzarsi in presenza del campo.

Precedenza di un materiale a trasferire in c.e.

Campi sinusoidali \Rightarrow danno di $f \Rightarrow$ Si usa perché complesso:

$$\epsilon_c = \epsilon' + i\epsilon'' \rightarrow \epsilon' = \text{Termine proporzionale}; \epsilon'' = f(\sigma) = \frac{\sigma}{\omega} = \text{Termine dissipativo}$$

• Airo $\rightarrow \epsilon_c \approx \epsilon'$

• Mezzi perfettamente resistivi $\rightarrow \epsilon' \gg \epsilon''$

• Mezzi conduttivi $\rightarrow \epsilon' \sim \epsilon''$

In base a ϵ_r si distinguono i materiali:

• Polarizzabili $\rightarrow \epsilon_r > 10 \rightarrow$ strutture e polarizzabili e forzato, a livello

ionica (mezzi porosi, sali, macrol, solventi (corrosivi))

• Non polarizzabili $\rightarrow \epsilon_r < 10 \rightarrow$ Reticoli cristallini non polarizzabili,

macce compatte, bene saturate macrol

Acqua $\rightarrow \epsilon_r$ dipende da (ma ha variaz $<$ di σ):

• $\uparrow T \Rightarrow \uparrow \epsilon_r$

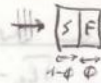
$\rightarrow \epsilon_r \propto$ parametro + robusto

• Stato: Solido $\Rightarrow \downarrow \epsilon_r$, Reticolo cristallino labile

• Solvato \rightarrow piccole variaz

MODELLI DI CORRELAZIONE $\epsilon \rightarrow$ CONTENUTO VOLUMETRICO DI FLUIDO

Cubo di solido \Rightarrow modelli equivalenti. Arriva OEM piena

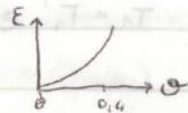


Tempo di transito = Tre overlap equation (int bifasico):

$$t = t_s + t_f \Rightarrow \frac{1}{v} = \frac{1-\phi}{v_s} + \frac{\phi}{v_f} \rightarrow \tilde{v} = \text{volume} + \text{correzione} \text{ di volume}$$

$$\text{SNT bifasico} \Rightarrow \frac{1}{v} = \frac{1-\phi}{v_s} + \frac{\phi s_w}{v_w} + \frac{\phi(1-s_w)}{v_g}$$

Materiale bifasico \rightarrow se $\phi = \text{cost}$, trovare i più pratici \rightarrow



$\Rightarrow \epsilon(\phi)$ (material) de regola approssimativa ϵ di tipo cubico: $\epsilon = f(\phi^3)$

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

Per combinare risultato con ed il modello: $v = \sqrt{\epsilon_r}$

$$\sqrt{\epsilon_r} = (1-\phi)\sqrt{\epsilon_s} + \phi\sqrt{\epsilon_f}$$

Idea di base: comparazione esplicita del sistema ϵ calcolabile a partire dalle frazioni delle varie fasi.

METODI IN DOMINIO DI f

SLINGRAM - DOMINIO f

$z = \text{qualche cm} \div \text{qualche decina di m}$
 $f = 300 \div 30000 \text{ Hz}$

Bobine generatrici: $I(t) = I_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$



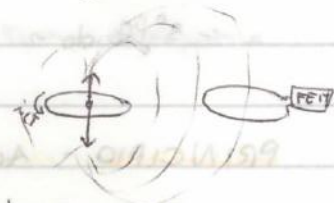
\Rightarrow Si genera il campo lungo la verticale = caratteri di dipolo verticale.

Big parte di tecniche in dominio f usano sorgente = bobine, ω -controllate ω f .

deci sarò derivato \Rightarrow calcoli pfa adatti d'olografia $\Rightarrow S = f(f, r)$

Ricevitore = ipso, capta una Fem proporz. al flusso (variabile ad t) del CEM che è concatenato alla bobina ricevente.

Linee di flusso del CEM in ellissi, descrivono le caratteristiche della componente magnetica



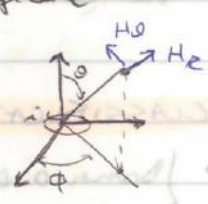
Fem = tensione variabile nel t , α flusso concatenato alla bobina.

$\hookrightarrow V(t) = V_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi_1)$ \rightarrow sfasata, dipende da:

- ritardo di $I(t)$
- distanza R-S \rightarrow costante, e più dove sfasato (che è big mezzo ^{notevoli})
- dimensioni bobine $\rightarrow \uparrow \text{rup} \Rightarrow \uparrow$ flusso concatenato \rightarrow più amplificare

Campo magnetico H generato da 1 dipolo magnetico a 3 componenti.

(uso coord. sferiche): H_r, H_θ, E_ϕ (calcolo nel piano)



Intensità dipende da $m = nIA = \text{momento magnetico del dipolo}$

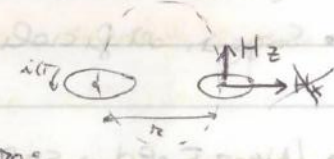
$(\uparrow I, \uparrow n, \uparrow A \Rightarrow \uparrow m \Rightarrow \uparrow H)$

Per piccoli valori di $K_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = \text{costante di propagazione in spazio libero}$:

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

Per bobine piane:

$$H_z = -\frac{m}{4\pi r^2} = -\frac{n_1 A_1 I}{4\pi r^2} \quad H_x \approx 0$$



QNT C non induce un C nel m bobine R \rightarrow legge di Ampere:

$\nabla \times E = i \mu_0 \omega H$ \rightarrow marea, tale segnale è sfasato di 90° dalla H ($i!$)

\Rightarrow Tensione ai capi della bobina R: $V = \frac{i \mu_0 \omega n_1 n_2 A_1 A_2}{4\pi r^2} I$

Struttura del CEM con caduta nel rasoio \Rightarrow interagisce col CEM primario.

Ades, bobine passive \rightarrow permette circolari di corrente al suo interno (regola di CEM concatenando generando \pm flusso) \Rightarrow Si genera un CEM secondario.

\Rightarrow la bobina R sotto effetto di campo primario + secondario, si genera \pm flusso \rightarrow \pm da primo \rightarrow \pm da primo \rightarrow \pm da primo \rightarrow \pm da primo

METODI IN DOMINIO DI f

$H_s \rightarrow \begin{cases} H_{s,r} = \text{Pole} = \text{Componente orientata in apparenza di fase rispetto a } H_p \\ H_{s,q} = \text{Quadratura} = \text{Componente orientata in quadratura di fase rispetto a } H_p \end{cases}$

$\begin{cases} \omega L \gg R \Rightarrow H_{s,r} \text{ prevale} \rightarrow \text{volta alle perf: } \uparrow f \Rightarrow \uparrow \omega L \\ \omega L \ll R \Rightarrow H_{s,q} \text{ prevale} \end{cases}$

Soluz. analitica = veloce \times ~~OTPI~~ ^{di forma} semplice, obiettivi \rightarrow modelli numerici

Rispetto ai metodi elettrici:

\uparrow richiesta info

\uparrow complessità algoritmi \times interpretazione

INDUTTANZA ELETTRICA DI UN CIRCUITO

Attitudine di un circuito elettrico a caratterizzarsi col flusso di campo Φ_{lc} generato dalla corrente elettrica I che scorre nel filamento $\rightarrow L = \frac{\Phi_{lc}}{I}$ [H]

Dipende da: Forma; Dimensioni; $N = \text{n}^\circ$ avvolgimenti; $I = \text{intensità}$ corrente; μ_0

(Per un solenoide rettilineo, lungo $L > 10$ diametro $\rightarrow L = \frac{\mu_0 \cdot N^2}{L}$)

SKIN DEPTH

Profondità a cui l'ampiezza del campo risulta attenuata di $\frac{1}{e}$ rispetto al valore di campo in corrispondenza della superficie: $A_z = A_0 \cdot (1 - \frac{z}{\delta})$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0}} \approx 503 \cdot \sqrt{\frac{1}{f \rho}}$$

PROFONDITÀ D'IMMAGINE

\downarrow A cui un mezzo elettrico conduttivo produce un'onda EM indistinguibile in superficie

$$z \in \frac{\delta}{5} \div \frac{\delta}{4} \rightarrow \text{big non venete.}$$

$$\uparrow \alpha \Rightarrow \downarrow \delta; \quad \uparrow f \Rightarrow \downarrow \delta$$

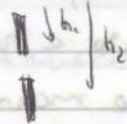
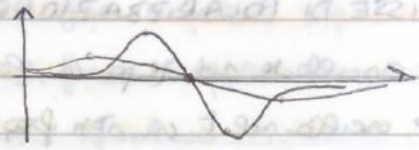
Metodi basati in dominio $f \rightarrow$ molto rapidi, big densità di misure a bassa costo, anche lungo 1 profilo.

Inconveniente: possa essere macchiosi $\rightarrow H_s \ll H_p$, misure delicate, necessità

Attenuazione del C.ETT $H \propto \frac{m}{z^3}$

\Rightarrow bisogna ottenere di nuovo un prefattore, bisogna prendere di account l'attenuazione.

$\uparrow h \Rightarrow$ $\left\{ \begin{array}{l} \downarrow \text{numero} \\ \uparrow \lambda = \text{distanza tra 2 picchi} \end{array} \right.$



Se ne vuole un corpo nero + conduttiva del materiale circostante

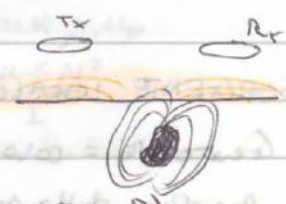
SORGENTI LOCALI

R&S = vicini alla casa, si spostano sempre avanti, $P = 1 \div 10 \text{ W}$

- esempi \rightarrow
 - $d \approx 1 \text{ m} \Rightarrow f \approx 30 \div 100 \text{ kHz}$, $z \approx 1 \text{ m}$ \rightarrow piccola prefattore
 - $d = 4 \div 5 \text{ m} \Rightarrow f \approx 10 \text{ kHz}$, $z \approx 4 \div 5 \text{ m}$
 - $d = \text{decine di m} \Rightarrow f \approx 300 \div 1000 \text{ kHz} \Rightarrow z \approx 50 \text{ m} \rightarrow$ bobine + big

Nei casi reali: \exists indovinare legato alle caratteristiche del

temperatura ambiente, che cosa è molto + debole di H_p e del H_s data dalla presenza di un materiale conduttiva



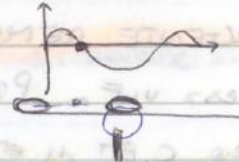
Segue il prefattore in $R \propto e^{-f}$ (prefattore, forma del corpo, distanza corpo - R)

\hookrightarrow Nota: posizione del corpo rispetto a S e R.

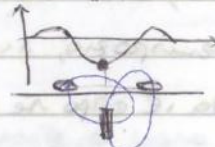
ESEMPIO - PROFILO DI UNA FAGLIA CONDUTTIVA

T_x - R_x coplanari orizzontali. Antenna ricevente e trasmittente, fondo 1 metro. Lungo 1 profilo + forma.

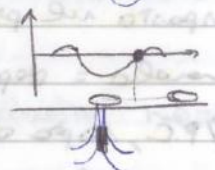
• R_x sopra foglio \Rightarrow il piano di campo (che si porta) carattere ad esso, $\propto e^{-f}$ cioè non T_x . \Rightarrow Area $e^{-f} = 0$



• R_x e T_x a cavallo di foglio \rightarrow picco di min, corpo riceve forte campo da T_x ; R_x riceve forte campo del corpo.



• T_x sopra foglio \rightarrow il campo di campo che si caratterizza alla foglia, in $\propto e^{-f}$ \Rightarrow segnale nullo



Ai piedi \rightarrow 2 effetti di attenuazione positive, dati da flussi residui

Analisi di misure + polsi ambientali:

Profili affiancati, distati 2m, misure $\forall 1-2m$. Con GPS

Risultati = profili o mappe di parametrizzazione (σ o H_s, f)

SISTEMI EM A F VARIABILE

voce da studenti

Testativi + misurare \neq profondità \rightarrow velocità f , frequenza \rightarrow periodo cost.

Unità: ms^{-1} , $\text{bit} \cdot \text{s}^{-1}$ e f (periodo) \rightarrow Non sempre funzione

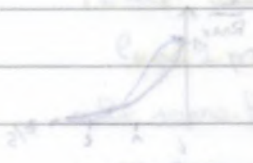
Ricevere info di velocità \rightarrow con profondità:

Sondaggio generico \rightarrow f fissa, S variabile \rightarrow ad + misurazione di R e S , velocità

La risposta e la sensibilità

\rightarrow Vada sempre + in profondità (analogo a SEU) \rightarrow addeco: profili verticali,

modelli di rotazione equivalenti



METODI LATTIM

Quindi: spessore e forma calcolato dalla cost. del materiale, le CFT e il mercato in modo \neq . Valdiffusa dipende da σ

Ma vorremo per cercare anche di σ .

Guida: • ordinato dal diametro \Rightarrow info su σ del materiale

• segnali a \neq istanti separati \Rightarrow info a \neq profondità.

Devo capire se il Mes. Temo: con struttura verticale, $\uparrow t \Rightarrow$ suono a \neq profondità

Problemi pratici \rightarrow segnale si verifica nella velocità

raggiunge valori affidabili con cura di fatto

(nessi ritorni) \Rightarrow Segnali \neq e osservabili per $t < t_0$, dove

t_0 è il tempo di diagnosi della σ del materiale

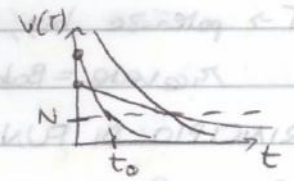
Per migliorare profdib \rightarrow elett. tecnologia nuovi si può agire per $\uparrow m = I \cdot A$

• $\uparrow A \Rightarrow \uparrow$ CFT generato \Rightarrow le segnali si fa verso l'alto, $\uparrow t_0$

A costa della, $z \sim A \Rightarrow$ $\left\{ \begin{array}{l} A = 20 \times 20 \text{ m} \Rightarrow \text{piccolo scalo, basse } z \\ A = 500 \times 500 \text{ m} \Rightarrow \text{fino a } z = 1 \text{ km} \end{array} \right.$

• $\uparrow I \Rightarrow \text{Max } e^{-I} = 30 \text{ A}$ per avere $z = 1 \text{ km}$, dove \rightarrow limiti di dissipabilità delle potenze, serve generatori importanti.

Ma il modo, oltre al. strati verticali (invece a SEV)



RISPOSTA MEZZO OMOGENEO

E quel da osservato in R \rightarrow decerato di fem nel tempo.

Disegna bilag \rightarrow te. deriv. e difficile osservabile,

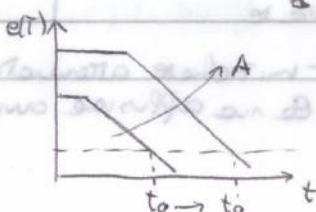
attorno e nella velocità nel t.

e \rightarrow Breve nella mercato: $\Delta t = 100 \text{ ms} \Rightarrow \downarrow 10 \text{ odg}$

\Rightarrow Difficile tecnologia e osservazione \Rightarrow Analizzatori di segnali + $\uparrow t_0$ e \uparrow CFT

• EARLY STAGE = Attenuazione piccola, quasi cost. CFT affide $\times \theta$ + reddib in circuiti superficiali. Transitorio, indip. da σ , e legato a dinami. lastra.

Non diagnostico. + e \rightarrow \Rightarrow + e \rightarrow possibile vedere le cost. di σ di circuiti superficiali. $\uparrow A \Rightarrow$ $\left\{ \begin{array}{l} \uparrow \text{early stage} \Rightarrow \uparrow \text{zonazione superficiale} \\ \uparrow t_0 \Rightarrow \uparrow \text{profondità} \end{array} \right.$



\Rightarrow Devo calibrare A in fine del tipo di indagine

Per le differenze da strutture di retoli derivano f. Vora il principio
 otario (forma d'ado parata).

Modalità operative:

- Classica → f. vora
- Moderna → + facile da gestire. Genera oem variabile nel t con catote galion
 (2 elettrodi finati x terra, collegati ad ± T). Si mette corrente con un dipos
 elettronico (corrente di ioneta). Facile dimensionare gli elettrodi.

R = sempre una bobina de capto Fem 2^o mo.

SEMI-SPAZIO OMOGENEO E UNIFORME, INTERFACCIA PIAN //

Risposta realio in caso di semispazio omogeneo (equazioni le regole
 decade nel t), nel caso itoge:

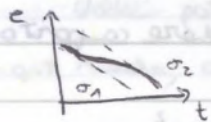
$$e(t) = \frac{k_1 M \sigma^{3/2}}{t^{5/2}} \Rightarrow f_{app}(t) = \frac{k_2 \cdot M^{2/3}}{e(t)^{2/3} t^{5/3}}$$

dove: • k_1, k_2 = coeff di risp della struttura, pari

• $M = nIA$ → se lo redifio, studio la curva

Due strati:

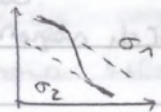
- $\sigma_1 < \sigma_2$ → Porto delle 2 curve de avremo in 2 semiposi onq.



A portio di ogre wait: $\sigma_2 > \sigma_1 \Rightarrow$ St + mato

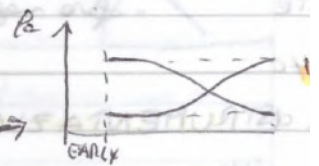
Tempi picoli → regale vede σ_1 . It ⇒ Transitione, interfere
 con σ_2 . Annotatamente, regale appiuge σ_2

- $\sigma_1 > \sigma_2$ → Curve σ_1 it + molto adero



Usando B relaz di $f_{app}(t)$, ricavo il valore di $R_e(t)$

a x profondità ⇒ interpreto qualitativon e condonato
 del regale in fun di t



Paro di pede da → Corat strumetale (K, M)

- Corat di p effettivo dei 2 strati

Elabora elettrostatigrafie di fapp in funzione di profondità

Interpolaz di x radessi ⇒ elaboraz rez verticali di σ_{JA}

N.B. → Dal dato f_{app} , misuro 1 curva di fase equivalente $\phi = f_{ciclo} \cdot t$ derivata rispetto al tempo delle curve f_{app} .

$$\Rightarrow S_{eff} = \left(\frac{3,9 \cdot f_{app} \cdot t}{2\pi \cdot M_0} \right)$$

$$P_{eff} = P_{app} \left[\left(\frac{90}{\phi} - 1 \right) \right]$$

Definito → $T = 3,9 \cdot t =$ periodo equivalente

$$\Rightarrow P_{eff} = P_{app} \cdot \left[1 + \frac{\Delta \log P_{app}}{\Delta \log t} \right]$$

Qui è chiara procedura e interpretazione in modo corretto e regolare rispetto.

X non stratificato orizz, vortici laterali mesurabili.

Vedo vortici graduali di p orizz (marked) ⇒ non vedo vortici repentini

⇒ Limite, vortici e movimenti stratigrafici graduali

In un metodo misuro 1 fluro orientata ad R → Prevedere la ne

Componente verticale → $\phi \propto \frac{dB_z}{dt}$ ⇒ può risultare dalle vortici laterali

⇒ vortici se la trovi vortici laterali (non facile, ma affiora), che

non è noto e può applicare modelli 1D replica e deservire

strutture applicate

invece, metodi elettrici → V_{log} ⇒ vortici laterali

CONFRONTO: TDEM VS DOMINIO f_c

- Robustezza molto + big (devo avere dati in m^2 , che al R capto segnali di piccola

- Misure poco sensibili a problemi legati ad inaccuratezza in posizioni di R e t.

(divall, nonnet $\Delta R \cdot \Delta R$) ⇒ possibile trovare in zone topografiche accidentate

Don f_c : piccoli divall, non vanno in Hp concettuali, zero ≠ del teorico ($H_x \neq$

- Interferenza con Cagnoli, ⇒ sondaggi verticali scarsi, valutazione anche effetti di

vortici laterali di correnti che. Anomalo del segnale difficile da seguire,

transiente → o rapidom. ⇒ aspetto sussumito delicato, non facile.

- Profondità non d'indagine e + legata a correnti tecnologiche (Persepolis da Te

rumore elettrico di R) che alla skin depth (lo cui 1 po' d'indagine, che il

segnale si attenua in funzione di σ

$$(2, 10^9) \leftarrow \text{...} \leftarrow \frac{f_{max}}{f_{min}} = 10^9 = (1, 10^9)$$

GEORADAR

Basati su risposta di 1 segnale EM ad alta f che viene inviato da un'area T .
 Si analizza la risposta delle particelle E che viene riflessa in corrispo di discontinuità delle propr. EM e che torna in superficie, dove viene captata da un'area R

Radiofrequenze: $\left\{ \begin{array}{l} 10 \text{ MHz} \rightarrow \text{geologico, idrogeologico, geologico} \\ 200-600 \text{ MHz} \rightarrow \text{piccola rete perforata, prospezioni geotecniche} \\ 900 \text{ MHz} - 2 \text{ GHz} \rightarrow \text{Manufatti, rilevati, m. scavi} \end{array} \right. \begin{array}{l} \uparrow \\ \downarrow \\ \text{RISOLUZIONE} \end{array}$

E si propaga, non diffonde \Rightarrow Caratterizza il terreno $\epsilon_c = \epsilon' + i\epsilon''$, ma misura la parte ϵ'' : $\epsilon' \gg \epsilon''$

Stadere discontinuità delle propr. EM \rightarrow caratteri di E \rightarrow problema \neq facile.

FENOMENI INEVITABILI:

1) Propagazione onda diretta in aria \rightarrow antena = identica nel dorso, \rightarrow direzione
 la max parte di E in volo (\uparrow effic), ma parte di E va verso e arriva ad R .

Tempo di ritorno minimo, precede tutto il resto:

$$t = \frac{x}{c}$$

2) Propagazione onda diretta nel materiale $\rightarrow T \rightarrow R$, se nel 1° orizzonte la radiazione
 se isotropo $\rightarrow t = \frac{x}{v_1}$

3) Riflessione \rightarrow da \pm discontinuità nel fondo. Segue ottica geometrica. $E = E_i + E_r$ (riflessa).

$$t = \frac{2\sqrt{\epsilon_1^2 + h^2}}{v_1}$$

\rightarrow eq di tempi di ritorno del raggio riflesso

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}}$$

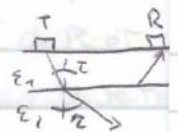
\rightarrow dipende dal contrasto di permittività EM

4) Rifrazione \rightarrow capto e carattere di E in discontinuità tra 2 materiali.

Legge di Snell $\rightarrow \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin \theta}{\sin \theta'} \Rightarrow \sin(\theta') = \frac{v_1}{v_2} = n_{\text{rel. Totale}}$

$$\Rightarrow t = \frac{x}{v_2} + \frac{2h \cos \theta}{v_1} \Rightarrow \text{tempo di ritorno globale bifratto, interfaccia per //}$$

Strato normale $\rightarrow \theta = 90^\circ$



DISPOSITIVO GEORADAR:

- Antenna trasmettitrice \rightarrow + diffusa = dipolo (in risonanza risonante), emette un C. el. orientato ad alta f ai capi di un cavo. Dipolo all'interno del quale acilto orientato ad almeno f , \Rightarrow Si genera C. el. ad alta f

- Unità centrale di controllo e registrazione dati \rightarrow trasmette alla T la forma d'onda da inviare, registra poi la risp. di R. Collegata a RET o CAN

GEORADAR

Oscilloscopio: dato impulso, si osserva la riflessione con 1 certo ritardo.

↳ Capta un segnale di tensione in R e lo converte in un segnale in funzione del tempo. \Rightarrow Possibile poi identificare la parte nello spazio dell'oggetto, analizzando il tempo di ritorno dell'impulso (se mezzo e omogeneo, e la v propag e nota) $\rightarrow t = \frac{2r}{v}$

RAGGIO DI FRESNEL \rightarrow radar e in 1 convez base.

α = angolo di radar = semiapertura del cono, dipende dalle caratteristiche del materiale



magia: OET e generato da un dipolo polarizzato sul terreno, // alla superficie

\Rightarrow C'E' il vettore orientato lungo la direzione del dipolo.

Piano verticale: α e' l'angolo al vertice del dipolo e' nel piano, e poi deve propagarsi in modo. Tutta E' e' racchiusa in $\alpha = 0 \div \pi$ rifraz.

e' con la OET in transizione da area non a 1 rifraz

\Rightarrow Per trovare α in 1° approssimazione, in caso di campo E oscillare // superficie,

che dipende dalle caratteristiche dei materiali $\rightarrow \sin \alpha = \frac{v_1}{v_2}$

Valori estremi: Jockey $\rightarrow \alpha \approx 1^\circ$, piccolo

Grubito $\rightarrow \alpha \approx 30^\circ$, ampio

$\Rightarrow \uparrow E \downarrow \alpha$

$\uparrow E \Rightarrow \uparrow$ forza punt = dimensioni base cono

Raggio di Fresnel = modo x quantificare qual'è la parte di E che interferisce e identifica il 95% dell'E che viene risondata.

Se superficie di ripresa pian // \Rightarrow r e' legato alle se fatto che e' il riflesso

e' x B + collegato al contributo di interferenza con $\frac{\lambda}{4}$

$$\Rightarrow r = \sqrt{\left(L + \frac{\lambda}{4}\right)^2 - L^2} = \sqrt{\frac{\lambda^2}{16} + \frac{1}{2} L \lambda} \rightarrow \uparrow L, \uparrow \lambda = \uparrow r$$

Spazio-risultivo e' legato ad α e r

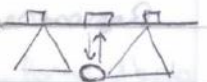
α dipende da:

↳ Caratteristiche costruttive del mezzo, • E

Antenna vede oggetti più di un'ora sopra, a distanza x.

Qua e' esaton sopra \rightarrow mino dista radar target

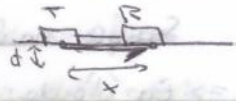
\Rightarrow apice parabole



ACQUISIZIONE → 2 modi

- Offset costante → stesso T-R lungo ± prof. b, fascio laterale diretto.

Simile ad offset T → R, da n° passo a profondità d, tempo di arrivo = $t = \frac{x}{v_1}$



Buca + ripetizione nel x, uso speciale, offset d, X refl. singolo

- Offset variabile → acquisiz + flessibile. T fuso, T solo R.

Interfaccia pte // ⇒ Capta:

- onda in onda

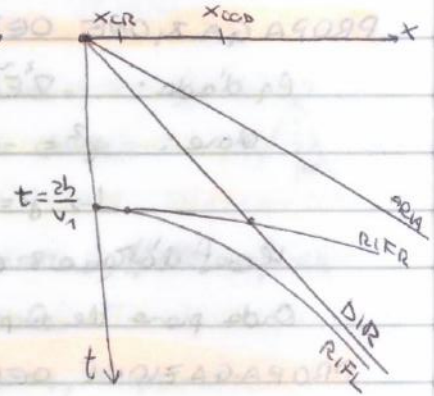
- onda diretta ⇒ ricevo v_1

- onda riflessa = 1 x balle, ondata = onda diretta

- rifratto ⇒ ricevo h da v_1 , onda $t = \frac{2h}{v_1}$ (tempo rinvio)

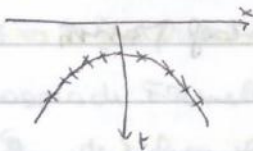
↳ velocità, rispetto refl = rinvio onda v_2

Cadiz recupero: $v_1 < v_2 \Rightarrow E_1 > E_2 \rightarrow$ poco frequentemente individuabile

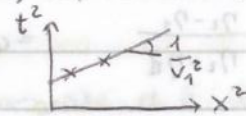


MODALITÀ DI ACQUISIZIONE

- Riferisce modo → offset cost. Sino di 1° approssimazione della v propria, che in presenza di ^{↳ RIFLETTORE PICCOLO} oggetto ben localizzato determina 1 x balle la cui curvatura dipende da v: → Metodo $T^2 X^2$: predice pti rxm dell'1 x balle, rispetto indagine (T^2, X^2):



$$t = \frac{2\sqrt{\frac{x^2}{v_1^2} + h^2}}{v_1} \Rightarrow t^2 v_1^2 = x^2 + 4h^2 \rightarrow$$



→ La rete di interferenza più la coeff apertura = $\frac{1}{v_1^2}$

Interferenza = tempo di offset → $t_1^2 \Rightarrow$ ricevo: $h = \frac{v}{2t_1}$

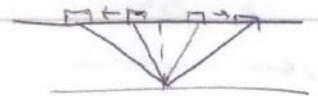
Se non c'è rete originale → $v \sim \cos t$

Obiettivi: • realizzare appati

• realizzare in termini qualitativi dove non = localizzare nello spazio, possibile solo se in rete le caratteristiche di v del materiale

- Misure per trasparenza → T-R disposte su pareti di oggetto. R. caso le caratteristiche di v del materiale

- Acquisizione con apertura multiple → Spazio multi-risposta T-R, step by step, rispetto ad ± pto nodale dell'acquisizione.



EQUAZIONE RADAR → hp: $\lambda \ll z$, propagazione onda piana

Definire la capacità di un dispositivo radar di individuare un oggetto remoto

$S = 10 \log\left(\frac{P_r}{P_t}\right) \Rightarrow$ Sensibilità a range dinamico del dispositivo.

↳ Rientra ma è proprio dei materiali da cui è fatto il sistema.

- P_t = potenza, regola il flusso isotropico
- P_r = densità deflessa, e' quella che R capta:
 - Power Flux (z) = $\frac{P_t}{4\pi z^2}$ → Flusso di P a distanza z da T.
 - Power Flux (z) = $\frac{P_t \cdot G_t}{4\pi z^2}$ → Flusso irradiato da T nel e' isotropico, funzione di guadagno
 - P.F. Reradiated (z) = $\frac{P_t \cdot G_t \cdot \sigma \cdot \Gamma}{4\pi z^2}$ → Potere del flusso irradiato dall'ogg, dipende da $\sigma = RCS =$ Radar Cross Section.

P_{oi} , e' reradiato → Γ

• P.F. Received = $\frac{P_t \cdot G_r \cdot \sigma \cdot \Gamma}{4\pi (z^2)^2}$ → arriva a T; tiene conto di distanza geometrica

• $P_r = \frac{P_t \cdot G_r \cdot \sigma \cdot \Gamma \cdot A_e}{4\pi (z^2)^2}$ → Intersezione dell'area, A_e e' l'area equivalente

• P.F. nuova di T che interseca il flusso reradiato dell'ogg

• $P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot \sigma \cdot \Gamma \cdot A_e}{4\pi (z^2)^2} \cdot \exp(-2\alpha z)$ → con termine dissipativo. $z =$ andata + ritorno

+ bige-attenuazione, + captato flusso → regola e'

Radar = non è il mare disteso di apparati radar. La parte riflessiva e' interseca tra le parti: $1 \text{ cm} + W_{\text{pallottola}} + W_{\text{albero}} + A_{\text{ve}}$
 Sine sulle strutture di ghiaccio ed acqua

FAR FIELD → Antenna T-R > diverse lunghezze d'onda → fronte d'onda in R approssimabile in onda piana → approssimazione sferica + riflessione

RISOLUZIONE = minima dimensione dell'oggetto da ancora percepire un fianco rilevabile dal rilevatore radar. Dipende da λ del segnale.
 Eq radar ci dice che può identificare l'ogg, non le riesce a distinguere da quello vicino

• Verticale → Distanza tra gli oggetti deve essere $\Delta \gg \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda}{2}$. Esempio singolo traccia
 Quindi, serve a precisione: $\uparrow f \Rightarrow \uparrow$ risoluzione \downarrow profondità

• Laterale → tra 2 ogg alla stessa quota. Esempio immagine. Dipende da λ e dalle caratteristiche EM del mezzo: $\uparrow \epsilon \Rightarrow \uparrow$ risoluzione laterale

$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$

TDR

TIME DOMAIN REFLECTOMETRY → emette impulsi ad alta f (da 1 a 9 GHz) che si propagano lungo aste rettilinee. Leggermente invasivo (infrusione). X radi sp. Strada facile di corrotti EM. $z \sim z \sim 3m$ max. Facile misurare ρ_v e parassiti del suolo, con accuratezza $< 5\%$. Spesso non serve calibrare a campioni prelevati. Ottimo rivelatore ipozole e temporale. Misura semplice, misure automatiche, 2 bobine x misure ripetute nel t. In vaste aree → non stoppa, ad es. centraline da 200-250 m.

STEP

- Invio impulso EM a $f > 1 \text{ GHz}$, oppure gradina di tensione molto rapida.
- Strada semplice a zero lungo aste, andata + ritorno.
- Ricerca di vada di zero lungo le aste.
- Con e/o Topp x correlare tale valore al contenuto idrico del mezzo.

CAVO COASSIALE → corrotti di perno e spessore delle corrotti del materiale circolante → $v \rightarrow \epsilon$. $z_{cavo} = 50-60 \Omega m$

Sensore → la v di pade delle corrotti nel suolo

ANALOGIA CON LINEA DI TRASMISSIONE

E_i = generatore di segnale, eroga segnale in forma d'onda voluta.
 Linea di trasmissione = cavo coassiale → corrotti d'impedenza = z_0

• Se il cavo finisce nel vuoto → $E_i \rightarrow$ al pade, ha 1 corrente d'impedenza intrinseca tra z_0 e $z_L =$ impedenza del cavo, che qui è $z_L = z_0$

• Se il cavo è carico ricettore con un R molto piccolo → \square
 ⇒ Ora ora $z_L \equiv z_{SHUNT}$

Se $\uparrow (z_L - z_0) \Rightarrow$ + ve segnale e riflesso → lo vedremo in $e(t)$ all'oscilloscopio

Coefficiente di riflessione → $\rho = \frac{E_r}{E_i} = \frac{z_L - z_0}{z_L + z_0}$ $\rho \in [-1, 1]$

VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE

$v = \frac{z_L}{t} \rightarrow e^{-f(\epsilon)} \rightarrow \epsilon_s = \left(\frac{c}{v}\right)^2 = \left(\frac{c t}{z_L}\right)^2 \rightarrow t =$ andata e ritorno

⊗ $z =$ dato m.a