

# **Allegato 3**

## **Indagini geofisiche**

**Allegato 4**  
**Relazione delle indagini geofisiche**

**TAMOIL RAFFINAZIONE S.P.A.**  
**RAFFINERIA DI CREMONA**

**VERIFICA DEL "TAGLIONE" IN CORRISPONDENZA DELL'ARGINE**  
**MAESTRO DEL FIUME PO**

**- INDAGINI GEOFISICHE -**

---

Indice	
<b>1. PREMESSA</b>	pag. 2
<b>2. METODOLOGIE D'INDAGINE GEOFISICA</b>	pag. 4
<b>2.1 CONSIDERAZIONI GENERALI</b>	pag. 4
<b>2.2 CONSIDERAZIONI PER IL CASO SPECIFICO</b>	pag. 5
<b>2.3 METODO DELLA TOMOGRAFIA ELETTRICA</b>	pag. 8
<b>2.4 METODO DELLA SISMICA A RIFRAZIONE</b>	pag. 9
<b>3 RISULTATI EMERSI DALL'INDAGINE GEOFISICA</b>	pag. 11
<b>3.1 DETTAGLIO DEI RISULTATI EMERSI DALL'INDAGINE GEOFISICA</b>	pag. 12

ALLEGATI

- ALLEGATO 1. *METODI GEOFISICI*

TAVOLE

- TAVOLA 1. CARTA D'INSIEME, UBICAZIONE DELLE INDAGINI GEOFISICHE
- TAVOLA 2. SEZIONI DI TOMOGRAFIA ELETTRICA
- TAVOLA 3. SEZIONI DI SISMICA A RIFRAZIONE

---

## **1. PREMESSA**

La presente relazione illustra i risultati emersi dall'indagine geofisica realizzata nell'area dello stabilimento Raffineria di Cremona, TAMOIL RAFFINAZIONE S.p.A.

La ricerca è stata svolta nell'ottica della caratterizzazione geofisica del sottosuolo dell'area. Questo per individuare e verificare la presenza del "taglione", ovvero di un setto impermeabile sotterraneo, realizzato inferiormente all'argine maestro del Fiume Po durante gli anni '50.

Di detto "taglione" non esistono evidenze dirette, né tecnico documentali, come suggerito dall'Agenzia Interregionale del Fiume Po (AIPO) di Parma.

Lo scopo dell'indagine è stato pertanto primariamente quello di verificare l'eventuale presenza del setto lungo tutto il suo sviluppo longitudinale, di meglio specificarne ubicazione e le caratteristiche tecniche.

La zona di studio riguarda il settore di valle idrologico dell'area dello stabilimento Raffineria Tamoil di Cremona, confinante con i terreni prossimi alle strutture ricreative adiacenti il Fiume Po.

Morfologicamente l'area è pianeggiante, su terreni intensamente antropizzati. L'argine del Fiume Po si trova rilevato di circa 4-5 m rispetto al piano campagna, con un gradone sul lato dello stabilimento. Lo sviluppo dell'argine è rettilineo, lungo tutto il settore investigato e direttamente confinante con lo stabilimento. Superiormente all'argine si trova una sede stradale pubblica. La superficie topografica a lato dell'argine si trova generalmente a prato.

La ricerca è avvenuta attraverso la delimitazione di superfici e volumi del terreno geofisicamente "omogenei".

L'indagine geofisica è stata svolta con il metodo della *tomografia elettrica con "caricabilità" del terreno* [Imaging DC Resistivity & Induced Polarization] e con il metodo della *sismica a rifrazione* [Seismic Refraction].

I rilievi geofisici sono stati realizzati durante il periodo Settembre 2005, in condizioni di terreno idonee.

---

## **2. METODOLOGIE D'INDAGINE GEOFISICA**

### **2.1 CONSIDERAZIONI GENERALI**

Si sottolinea come la prospezione geofisica costituisca una disciplina d'esplorazione del sottosuolo di tipo indiretto (*PnD, Prove non Distruttive*). Le anomalie riscontrate, ricondotte ad una variazione repentina nel terreno delle proprietà fisiche elettriche e di propagazione acustica, possono essere compatibili, attraverso un'opportuna interpretazione, con la presenza di strutture sepolte.

Risulta infatti specifico compito della geofisica, con i suoi vari metodi d'applicazione, individuare ed indicare tutte le località possibili in cui si trovi qualcosa che possa essere valutato inerente l'obiettivo dell'indagine.

Per questo tipo di anomalie, indicate come "possibili", almeno là dove non ne esista e quindi ne venga dichiarata la presenza certa, rimane risolutiva l'indagine diretta; resta comunque compito precipuo della geofisica indicarne la localizzazione, la distribuzione e le priorità delle eventuali successive verifiche dirette.

Nella letteratura scientifica è risultato statisticamente significativo, al fine di ottenere un'interpretazione univoca, affiancare nella stessa area differenti metodi d'indagine.

Per la presente ricerca il concetto descritto risulta tanto più rispondente quanto maggiore appare la risposta geofisica dell'oggetto di ricerca rispetto al materiale che lo ingloba; quando non è possibile precisare a priori quale sia l'obiettivo della ricerca (natura chimica, strutture in cls/c.a./ferro, tracce di attività disperate, materiali di riporto e/o rimaneggiati, etc.) né tantomeno lo stato fisico e lo stato di conservazione degli eventuali oggetti estranei al terreno naturale. La correlazione tra anomalie geofisiche e tipologie dei materiali è ipotetica e basata sull'esperienza e da dati di letteratura.

---

## **2.2 CONSIDERAZIONI PER IL CASO SPECIFICO**

Per la presente ricerca è stato ritenuto efficace l'impiego dei metodi della *tomografia elettrica con "caricabilità" del terreno* [Imaging DC Resistivity & Induced Polarization] e del metodo della *sismica a rifrazione* [Seismic Refraction].

Sono stati applicati secondo una metodologia di ricerca finalizzata sia alla copertura sistematica del territorio a valle dello stabilimento, sia per fornire un approfondimento di studio in alcune aree individuate significative nell'ottica della presente ricerca.

L'efficacia che i metodi hanno dimostrato nello studio di casi analoghi è dovuta alla differenziazione propria dei materiali e delle strutture antropiche che si possono incontrare nei primi strati del sottosuolo e che si trovano spesso interrate in condizioni simili.

Tali strutture sono caratterizzate da diversi valori di resistività elettrica, permeabilità elettrica e magnetica, tempo di "rilassamento" elettromagnetico, velocità di propagazione di onde di tipo elastico.

L'indagine geofisica, in accordo con il programma di lavoro concordato, è stata così strutturata:

- a) acquisizione dei dati di campagna in prima fase attraverso il metodo della *tomografia elettrica con "caricabilità"*.

Durante la fase di acquisizione dei dati è stata impostata la profondità massima ottimale d'esplorazione per il sito in particolare (circa 30 m), al fine di garantire il raggiungimento dello scopo del lavoro e di fornire un'adeguata risoluzione delle discontinuità rilevate. Le misure del terreno sono state disposte opportunamente al fine di garantire la distribuzione laterale della corrente di energizzazione per il coinvolgimento delle strutture in oggetto per la presente. Ciò a scapito di una locale attenuazione nella risoluzione di strutture poste invece nel primo sottosuolo e superficiali rispetto alla profondità d'indagine, peraltro non richiesta; le zone sottoposte ad

esplorazione sono state pianificate secondo sezioni trasversali e longitudinali all'area di indagine;

- b) acquisizione dati con il metodo della *sismica a rifrazione* [Seismic Refraction]; le zone sottoposte ad esplorazione sono state pianificate secondo sezioni trasversali all'area di indagine. Ciò in modo da indagare nel dettaglio i settori rappresentativi delle strutture e di stabilire la giacitura nel contesto dei terreni naturali in posto;

Ciascuna ricerca è consistita nelle seguenti fasi:

- a) indagine geofisica;
- b) trattamento (*processing*) dei dati geofisici e definizione di aree del terreno "geofisicamente" omogenee;
- c) interpretazione dei dati;
- d) costruzione di un modello strutturale locale, nel peculiare contesto dell'obiettivo dell'indagine.

---

### **2.3 METODO DELLA TOMOGRAFIA ELETTRICA**

Il metodo della tomografia elettrica consiste nella misura, effettuata con particolare tecnica, della *resistività elettrica* del terreno indagato. La *resistività* è funzione principalmente della natura

chimica (i vari tipi di rocce e di terreni presenti in natura, i vari materiali e composti) ed elettrolitica (presenza o meno d'acqua, di umidità e di sali disciolti) delle rocce e dei terreni stessi. La "caricabilità" del terreno (*Polarizzazione Indotta*) consiste nella misura del tempo di decadimento (*decay time*) del potenziale applicato, susseguente all'interruzione della corrente immessa, cioè nella misura della "caricabilità" residua trattenuta dal mezzo d'indagine sottoposto a corrente. Anche tale grandezza risulta variabile in funzione soprattutto della natura del terreno e della roccia attraversati.

I dati, dopo adeguata valutazione con eliminazione delle misure anomale, sono stati elaborati con il metodo dei *minimi quadrati ad elementi finiti* attraverso il software RES2DINV (*Rapid 2-D resistivity & IP inversion using the least-squares method*, M.H. LOKE, 2000; DEGROOT-HEDLIN & CONSTABLE, 1990; SASAKI 1992).

I principi fondamentali di riferimento per il metodo si trovano descritti nella allegata APPENDICE 1. *Metodi geofisici.*

<p>RESISTIVITY &amp; INDUCED POLARIZATION IMAGING SYSTEM</p>	<p><b>Trasmittente T<sub>x</sub></b>  Tensione di eccitazione: 400 V (800 V picco-picco)  Output: 100 W  Accuratezza corrente trasmessa: <math>\geq 0,5\%</math> a 100 mA  Lunghezza pulsazione: 0,1-0,4  Ciclo commutato in DC  Resistività mode: plus-minus-minus-plus  IP mode : plus-zero-minus-zero</p> <p><b>Ricevitore R<sub>x</sub> multicanale per sistema multielettrodo</b>  <i>Resistività mode</i>  Impedenza Input: &gt; 10 M<math>\Omega</math>  Risoluzione: <math>\pm 30</math>nV (8 sec integrale di tempo)  Accuratezza <math>\Delta V/\Delta I</math>(0,5 sec integrale di tempo): &gt;1% a 1 <math>\Omega</math> da 1 mA a 1000 mA con carico resistivo da 0-380 k<math>\Omega</math></p> <p><i>Induced Polarization mode</i>  Impedenza Input: &gt;10 M<math>\Omega</math>  Automatic Ranging <math>\pm 250</math>mV, <math>\pm 10</math> V, <math>\pm 400</math> V  Risoluzione: <math>\pm 30</math> nV  Tipo di misura: Time domain chargeability (M)  Intervallo di base di integrale: 20 msec o 16,67 msec differenziato per frequenza di rete di potenza locale</p>
--	--

**Tab. 2.** Caratteristiche tecniche principali della strumentazione utilizzata.

I dati elaborati sono rappresentati nelle tavole allegate:

- TAVOLA 2. SEZIONI DI TOMOGRAFIA ELETTRICA

## **2.4 METODO SISMICA A RIFRAZIONE**

La sismica a rifrazione studia la propagazione di onde sismiche negli strati del sottosuolo (onde d'urto alla frequenza acustica, generate da una massa battente o da esplosivo) attraverso l'analisi dei fattori fisici fondamentali delle onde rifratte. Infatti, dai diversi

tempi di arrivo delle onde P (onde prime rifratte che giungono ai sistemi di ricezione, detti geofoni), che si propagano a seconda dello spessore e con velocità proprie per ogni tipo di roccia o ammasso roccioso, si ricavano le caratteristiche geometriche dei principali rifrattori presenti nel sottosuolo, semplificati nei tratti delle principali discontinuità rilevate.

<p>SISMICA A RIFRAZIONE [SEISMIC REFRACTION]</p>	<p>N° Channels: 12  Record Time: 25, 50, 100, 250, 500, 1000, 2000 ms.  Record Size: 8 bits, by 1000 sampled points for each channel.  Sample Interval: 25 to 2000 microseconds.  Delay Time: 0 to 5.0 sec.</p> <p>Signal Enhancement: Successive shots may be summed in digital memory.  Maximum stack count (number of summed shots): 255.  Timing: Crystal-controlled, 0,01% accurate.  Input Impedance: 20,000 ohms resistive.  Maximum input signal: 0.35 Volts (+ or -) before clipping.  Preamplifier Gain: 33 db.  Amplifier Gain: 0, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60, 66 db (user selectable).  Quantization Level: 95 mVolts.  Frequency Response: 3 hz to 1000 hz, <math>\pm 0.5</math> db (filter out).  Filter: Lowout, 40-hz corner frequency, butterworth filter.  Damping Factor: 0.5; rolloff is 12 per octave.</p>
--	--

**Tab. 3.** Caratteristiche tecniche principali della strumentazione utilizzata

I principi fondamentali di riferimento per il metodo si trovano descritti nella allegata APPENDICE 1. *Metodi geofisici.*

I dati elaborati sono rappresentati nelle tavole allegate:

- TAVOLA 3. SEZIONI DI SISMICA A RIFRAZIONE – SEZ. ARG1; SEZ. ARG. 2

---

### **3. RISULTATI EMERSI DALL'INDAGINE GEOFISICA**

L'elaborazione e l'interpretazione dei dati consente di formulare alcune considerazioni che sono di seguito descritte ed illustrate nella cartografia allegata (TAVOLE 1, 2, 3) che costituisce parte integrante della presente relazione.

Generalmente l'indagine geofisica ha evidenziato la presenza di anomalie nella normale dispersione degli impulsi irradiati nel terreno che risultano significative nell'ottica ambientale propria della presente indagine.

Le zone di anomalia rilevate attraverso le sezioni di indagine geofisica svolte trasversalmente all'argine del Fiume Po consentono di individuare la presenza di materiali a maggiore relativa conducibilità elettrica (ovvero minore relativa resistività elettrica) rispetto ai terreni circostanti incassanti.

La zona di anomalia è compatibile con la presenza di un setto di natura argillosa, relativamente più conduttiva rispetto ai terreni naturali incassanti, in posto, tipici del territorio.

Dette anomalie sono state rilevate pressoché continue lungo tutto lo stendimento di misura a valle dello stabilimento, pari a circa 1000 m.

---

### **3.1 DETTAGLIO DEI RISULTATI EMERSI DALL'INDAGINE GEOFISICA**

L'ubicazione del "taglione", in relazione alla posizione dell'argine maestro del Fiume Po, e la relativa geometria sono state studiate attraverso la realizzazione di sezioni sia di tomografia elettrica che di sismica a rifrazione disposte trasversalmente all'argine (TAVOLA 1).

I risultati emersi (TAVOLE 2, 3) consentono di valutare positivamente la presenza, nei tratti considerati, di una struttura geometricamente subverticale, ubicata in posizione intermedia al rilevato dell'argine.

La struttura si trova realizzata anche all'interno del corpo dell'argine, sopraelevata rispetto al piano campagna generale.

La struttura (TAVOLA 2, Sezioni TE 9, TE 10) si estende a partire dal corpo stesso dell'argine, pertanto è sopraelevata dal piano generale di campagna. In profondità si estende nel sottosuolo fino a circa 9-10 m dal piano generale di campagna.

La larghezza della struttura risulta stimabile pari a circa 6-8 m.

In particolare le sezioni di misura effettuate hanno fornito valori di compatibilità con la presenza di un setto di terreno. Dal punto di vista della caratterizzazione elettrica resistiva dei terreni, i valori misurati (20-50 ohm-m) corrispondono con terreno argilloso, avente resistività inferiore rispetto ai terreni naturali in posto tipici del territorio (50-150 ohm-m per i terreni saturi d'acqua; 100-500 ohm-m per i terreni asciutti).

Dal punto di vista sismico (TAVOLA 3), le misure sono state interpretate con modello semplificato a due strati. In particolare il primo spessore di terreno superficiale è stato assimilato ad un mezzo avente velocità di propagazione delle onde sismiche pari a circa  $330 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Il secondo strato è stato assimilato ad un mezzo avente velocità di propagazione delle onde sismiche pari a circa  $800\text{-}1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

La morfologia di ritrovamento del secondo strato più profondo (800-1000 m-s-1) individua graficamente la presenza di un innalzamento del tetto di tale "substrato" in corrispondenza dell'argine.

Le sezioni di studio svolte longitudinalmente e parallelamente all'argine consentono invece di effettuare alcune valutazioni qualitative inerenti la continuità della struttura.

Si evidenzia che le misure e gli spessori rappresentati nelle sezioni longitudinali al setto, si riferiscono a distanze in profondità che

devono considerarsi in diagonale rispetto alla sommità del "taglione". Ciò in quanto le misure sono state svolte con il dispositivo ubicato al piede dell'argine, sul lato dello stabilimento.

Sulla base di queste misure il setto "taglione" risulta molto probabilmente continuo ed omogeneo lungo tutto il suo sviluppo longitudinale misurato, pari a circa 1000 m. Ciò a causa dei valori relativamente inferiori di resistività elettrica rispetto al terreno naturale in posto tipico della zona. Questo comprova la continuità laterale longitudinale della presenza del setto nel sottosuolo investigato.

Eventuali difformità, che tuttavia possono ascrivere all'effetto elettrico causato da variazioni della litologia naturale incassante il "taglione", sono state individuate (TAVOLA 2) nella sezione TE 4 alla progressiva 110-140 m; nella sezione TE 7 alla progressiva m 70-100 m.

**ALLEGATO 1**  
**METODI GEOFISICI**

## Metodo di Resistività e "caricabilità" in tomografia elettrica

Le prospezioni geoelettriche di resistività (*Direct Current Resistivity sounding* o *Méthode des Résistivité*) si basano, in generale, sugli effetti sotterranei di una corrente elettrica, rilevabili in superficie attraverso misure di differenza di potenziale o di corrente.

I minerali costituenti le rocce, nella loro originaria fase solida, sono pressoché degli isolanti perfetti.

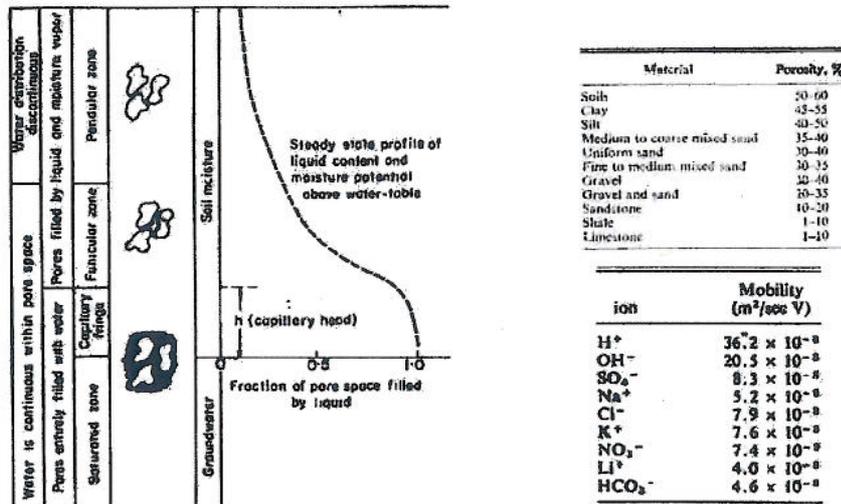


FIG. A1. La fase liquida nei terreni incoerenti (a sinistra). (da Meyboom, 1987) Intervalli di porosità delle rocce e principali ioni presenti naturalmente nei fluidi delle rocce (a destra). (da McNeill, 1980)

La resistività di un terreno, grandezza che esprime la sua attitudine all'attraversamento di una corrente elettrica, dipende dalla porosità, dal grado di imbibizione della roccia e dalla resistività

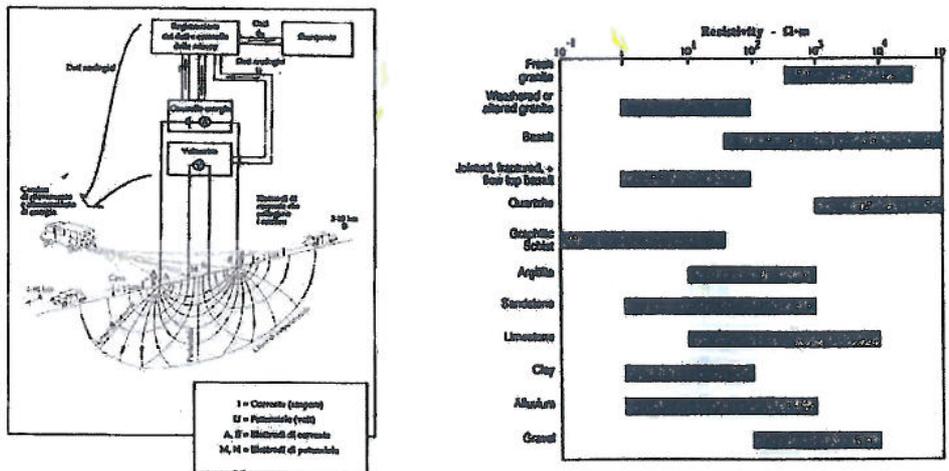


FIG. A2. Configurazione generale del metodo geoelettrico di resistività (a sinistra). (da Vogelsang, 1994). Intervalli tipici di resistività delle rocce (a destra). (da Culley et al., 1975)

dell'acqua o dei fluidi contenuti; quest'ultime, a loro volta, dipendono dalla temperatura e dal contenuto, dalla qualità e quantità dei sali disciolti. In definitiva la *resistività* di un terreno dipende da fattori che intervengono a strutturare e modificare le rocce, fattori di natura chimica e fisica costituenti le rocce ed i materiali.

Con il metodo di *resistività* in corrente continua *D.C. Resistivity* (In realtà la tecnica attuale utilizza corrente in frequenza capace sia di escludere i notevoli disturbi della corrente di rete di 50 Hz sia di prevenire effetti di *saturazione elettrica* del terreno che ne impediscono l'esplorazione in profondità) viene immessa nel sottosuolo, mediante due elettrodi (A, B), una corrente elettrica che determina una differenza di potenziale

Rocce/Materiale	Resistività (ohm-m)
Argilla, marne, grasse	3 - 30
Argilla, marne, magre	10 - 10
Argilla sabbiose, sil.	25 - 105
Sabbie con argille	50 - 200
Sabbia, ghiaia in falda	200 - 600
Sabbia, ghiaia asciutta	500 - 5000
Calcare, gesso	500 - 3500
Armaria	300 - 3000
Granito	2000 - 10.000
Craie	600 - 6000
Rifiuti domestici	12 - 30
Fanghi industriali	40 - 200
Piombo contaminato da rifiuti domestici	1 - 10
Obiettivo	150 - 700

Clay generation	↓	Increasing	
Dissolution	↓	Induration	↑
Faulting	↓	Carbonate Precipitation	↑
Salt Water Intrusion	↓	Silicification	↑
Shearing	↓	Metamorphism	⊗

↓ Decreases    ↑ Increases    ⊗ Increases or Decreases

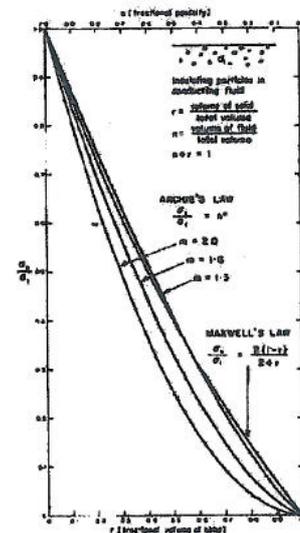


FIG. A3. Intervalli tipici di resistività di terreni, di rocce e di materiali di discarica (a sinistra, alto). Processi geologici che influenzano la resistività delle rocce (a sinistra). (da Ward, 1990). Rappresentazione della legge di Archie e della legge di Maxwell che esprimono la conducibilità in funzione della porosità del terreno. (da McNeill, 1980)

misurata mediante altri due elettrodi (M, N). Condizione fondamentale perché il metodo risulti efficace è che esista e sia elevato il contrasto di *resistività* tra gli oggetti dell'indagine.

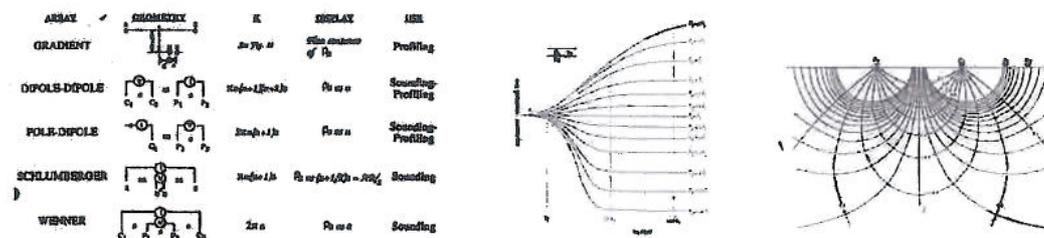


FIG. A4. Le configurazioni elettrodeiche più utilizzate nei rilievi di misura di resistività e di caricabilità del terreno (a sinistra). (da Ward, 1990). Esempificazione di master curves di resistività, Schlumberger, modello a due strati (al centro). (da Cagniard, 1953). Distribuzione della corrente e delle linee equipotenziali in un terreno omogeneo intorno a due elettrodi (a destra). (da Van Nostrand & Cook, 1966)

Dal valori noti di corrente erogata, dalla configurazione geometrica degli elettrodi e dalla differenza di potenziale misurata si calcola analiticamente la *resistività apparente* dei terreni indagati e del loro stato fisico.

Le misure possono essere svolte sul terreno mediante due schemi generali: distanziando via via gli elettrodi e mantenendo grosso modo fisso il centro della configurazione per la misura del potenziale. Si ottiene in tale modo una profondità di esplorazione via via maggiore (Sondaggi

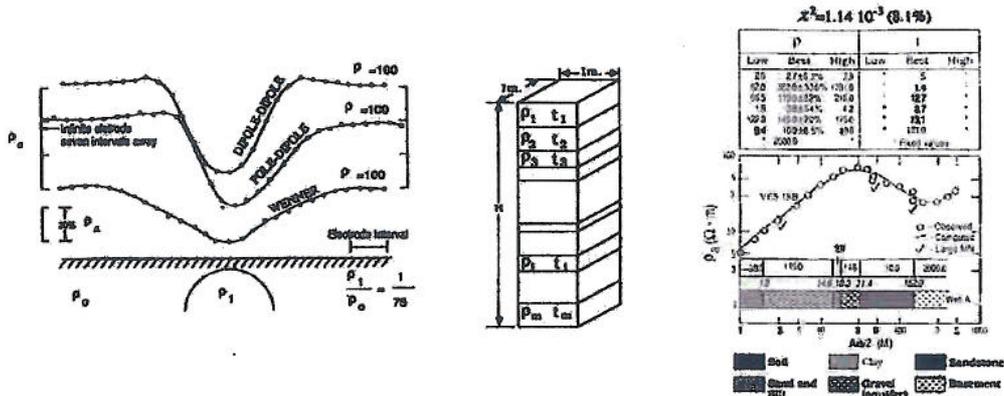


FIG. A5. Confronto tra profili di resistività ottenuti con configurazioni elettrode diverse su una sfera sepolta (a sinistra). (da Sumner, 1978). Modello teorico di terreno pluristratificato di resistività  $\rho$  e spessore  $t$  (al centro). (da Ward, 1990). Interpretazione a 7 strati di un Sondaggio Elettrico Verticale, tipo Schlumberger (a destra). (da Rijo et al., 1977)

Elettrici Verticali); oppure, mantenendo fissa una configurazione, essa viene spostata per intero sul terreno in modo da sviluppare dei profili nell'area d'indagine. In tal modo si ottiene una misura

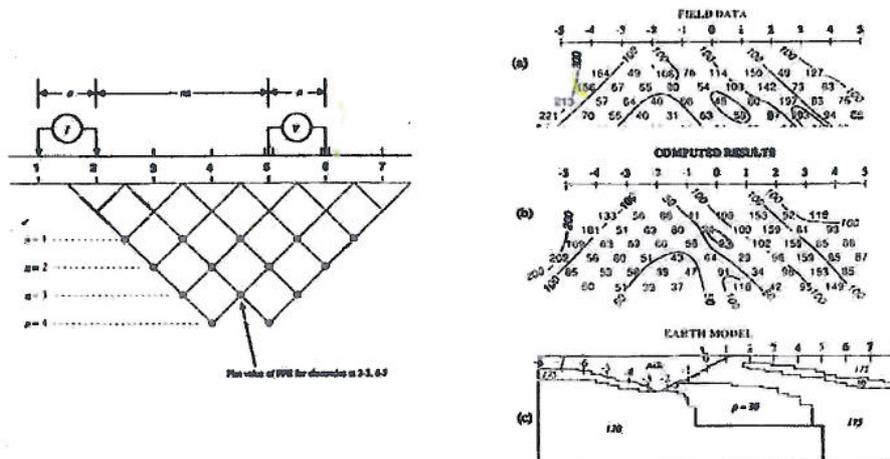


FIG. A6. Modello di geoelettrica dipolo-dipolo in tomografia, combined sounding and profiling (a sinistra). (da Ward, 1990). (a) valori misurati in tomografia, dipolo-dipolo; (b) valori calcolati da software di inversione grafica; (c) modello interpretativo del sottosuolo (in colonna, a destra). (da Hohmann, 1982)

delle variazioni laterali di *resistività* (Sondaggi Elettrici Orizzontali). I valori calcolati di *resistività* apparente vengono opportunamente rappresentati graficamente ed elaborati attraverso *software* specifici per il confronto delle curve sperimentali con curve di *resistività* teoriche ("abachi delle curve di *resistività* tipo" o *master curves*) per l'interpretazione.

La combinazione dei due sistemi, *combined sounding and profiling*, adottando intervalli fissi di interdistanza tra gli elettrodi, consente di sviluppare un Profilo Elettrico Verticale, ossia una *tomografia* elettrica che si sviluppa lungo una determinata linea sul terreno.

- Signal-to-noise ratio  
 Electromagnetic coupling  
 Sensitivity to lateral location  
 Resolution of steeply dipping structures  
 Resolution of horizontal structures  
 Depth of exploration  
 Sensitivity to depth of target  
 Sensitivity to dip  
 Sensitivity to surficial inhomogeneities, sounding  
 Sensitivity to surficial inhomogeneities, profiling  
 Sensitivity to bedrock topography  
 Sensitivity to lateral effects  
 Shielding by uniform conductive overburden  
 Sensitivity to topography

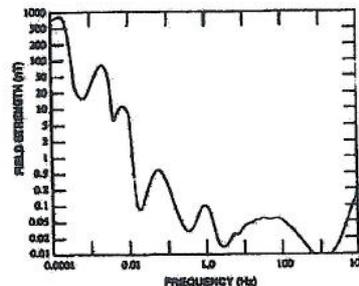


FIG. A7. Fattori che influenzano la scelta della configurazione elettroica nei rilievi di *resistività* e di *caricabilità* del terreno (a sinistra) (da Ward, 1990). Spettro del campo magnetico generale, *cultural noise* (a destra). (da Campbell, 1967)

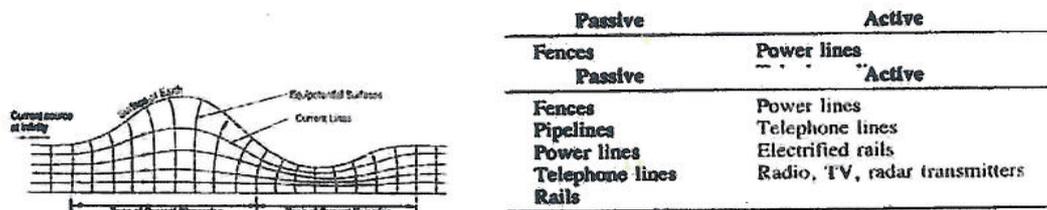


FIG. A8. Influenza della topografia sulla distribuzione delle *superfici equipotenziali* e delle *linee di corrente* (a sinistra). (da Fox et al., 1980). Sorgenti di effetti d'interferenza d'origine antropica, *cultural noise* (a destra). (da Ward, 1990)

Tale configurazione è particolarmente efficace per l'individuazione di discontinuità di *resistività* sia in profondità che laterali al terreno ed in condizioni di presenza d'acqua di falda. Consente quindi di delimitare, in sezione e quindi in volume, attraverso un'opportuna interpretazione dei valori, anomalie locali generate da strutture localizzate come corpi di discarica, tracce di dispersione di inquinanti, strutture in generale.

#### Caricabilità o Polarizzazione Indotta

Il metodo della *polarizzazione indotta I.P.* (*Induced Polarization* o *Polarisation Induite*) si applica attualmente contemporaneamente al metodo della tomografia elettrica di *resistività*.

La Polarizzazione Indotta fu sviluppata dapprima per la prospezione di piccole concentrazioni di elementi metallici, disseminati in *layer*, nell'ambito di ricerche per l'esplorazione mineraria.

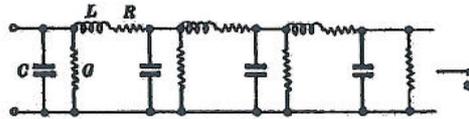


FIG. B1. Una porzione di terreno percorsa da corrente elettrica in frequenza può essere rappresentata schematicamente come una linea di trasmissione a parametri distribuiti. C = Capacità; L = Induttanza; R = Resistenza; G = Conduttanza; z= direzione dell'asse lungo il quale il mezzo risulta percorso da corrente. (disegno da Stratton, 1941)

Le prime applicazioni in campo ambientale risalgono agli anni '70 (Angoran *et al.*, 1974; Towle *et al.*, 1985; Zonge *et al.*, 1985; Hughes *et al.*, 1986; Anderson *et al.*, 1988).

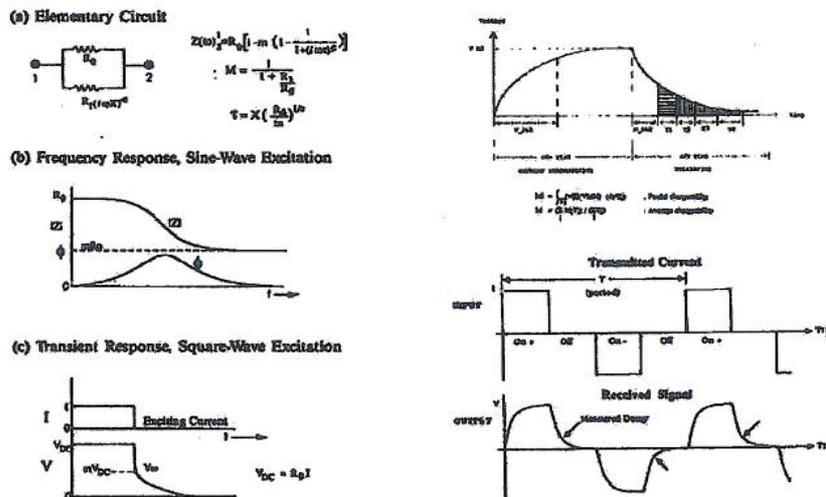


FIG. B2. Modello di circuito semplificato di una porzione di terreno. (a) Circuito elementare; (b) applicazione di corrente sinusoidale: Z = ampiezza,  $\phi$  = fase; (c) applicazione di corrente quadra: V = tensione iniziale e residua di "caricabilità" (a sinistra). (da Pelton *et al.*, 1978). Forma dell'onda trasmessa Tx ed in ricezione Rx (a destra). (da Ward, 1990)

La polarizzazione indotta è un fenomeno generato dalla stimolazione di una corrente elettrica che viene osservata dopo l'applicazione di una tensione al terreno. Il metodo si basa sull'osservazione della curva di decadimento del potenziale, susseguente all'interruzione della corrente immessa, cioè sulla misura della "caricabilità" residua trattenuta dal mezzo d'indagine sottoposto a corrente. Per un terreno omogeneo di dimensioni infinite, il tempo di decadimento è funzione della resistività del terreno e non cambia al variare della coppia dei punti tra i quali si misura la differenza del potenziale. Se nel terreno è incluso un corpo metallico o con proprietà analoghe, si verificano anomalie nel decadimento elettrico, in funzione del tempo. Lo stesso fenomeno si osserva anche per polarizzazione di contaminanti organici che possono eventualmente trovarsi nel terreno di un sito contaminato. La configurazione tipica per l'acquisizione dei dati di questo tipo varia in funzione di numerose variabili. Solitamente i poli elettrodi sono distanziati tra loro di un multiplo  $n$  ( $n^\circ$ ) di  $a$

(m). La profondità d'indagine è funzione della distanza tra i due poli ( $n \times a$ ). Sono generalmente utilizzati più valori di  $n$  consentendo di effettuare *pseudosezioni di polarizzabilità* del terreno.

I fenomeni che avvengono a livello microscopico nel materiale sottoposto a corrente elettrica sono globalmente di due tipi: *polarizzazione elettrodica* e *polarizzazione di membrana*.

### Polarizzazione elettrodica

Ogni volta in cui cambia la modalità di conduzione di una corrente, per esempio da *ionica* a *metallica*, viene richiesta energia dal sistema affinché della corrente fluisca nella nuova interfaccia. Questa barriera costituisce una *impedenza elettrica* (Schelkunoff, 1938). Le superfici della maggior parte dei solidi possiedono attrazione molto modesta tra ioni e cationi. Nelle immediate vicinanze della superficie esterna del solido è presente uno strato di ioni, essenzialmente immobili, costituito da uno o da alcuni, in numero, strati molecolari di spessore.

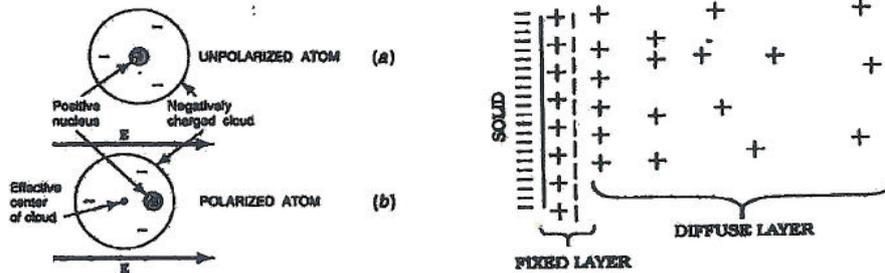


FIG. B1.1. (a) Atomo in equilibrio; (b) atomo polarizzato per applicazione di un campo elettrico (a sinistra). (Kraus, 1982). Teorica distribuzione anomala degli ioni all'interfaccia solido - liquido (a destra). (Ward, 1990)

Nelle immediate vicinanze di tale stratificazione c'è anche un gruppo di ioni relativamente mobili, di segno di carica uguale od opposto, conosciuto come strato di *diffusione*. Il numero di ioni anomali in questa zona decresce esponenzialmente verso l'esterno, a partire dallo strato verso la concentrazione ionica del liquido. La particolare distribuzione degli ioni illustrata è solo una tra quelle possibili; risulta essere però la più comune.

Mentre le cariche disposte sulla stratificazione fissa sono abbastanza stabili al movimento, le cariche sulla stratificazione diffusa sono funzione della temperatura, della concentrazione di ioni presenti nell'elettrolita allo stato normale (cioè non sottoposto a corrente elettrica), della valenza elettronica e della *costante dielettrica* del mezzo.

Ci sono due circuiti possibili per cui la corrente può essere trasportata attraverso le stratificazioni descritte, cioè attraverso l'elettrolita oppure per conduzione "metallica" (v. Fig. B1.1).

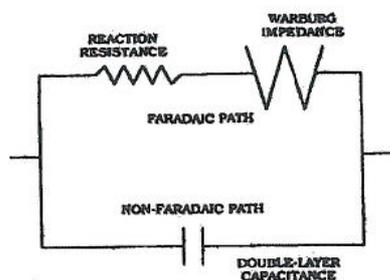


FIG. B1.2. Modello di circuito elettrico di rappresentazione dell'impedenza interfacciale. (Ward, 1990)

Il percorso di tipo di *Faraday* e quello *non-Faraday*. Il passaggio di corrente nel tipo *Faraday* è il risultato di una reazione elettrochimica come l'ossidazione o la riduzione di alcuni ioni. Si può sviluppare la diffusione degli ioni dall'interfaccia. La carica viene fisicamente trasportata dal movimento degli elettroni.

Nel caso *non-Faraday*, le particelle cariche non attraversano l'interfaccia; piuttosto una corrente si genera dall'alternarsi dei processi di carica e scarica delle due stratificazioni. Questo processo si può rappresentare come un fenomeno di tipo *capacitivo*, con variazione di *impedenza* al variare della frequenza.

Nel tipo *Faraday*, l'*impedenza* associata al trasferimento elettrico è rappresentata da una reazione di *resistenza*. Il processo di diffusione di ioni non è invece rappresentabile così semplicemente come da una combinazione di resistori e di capacità. Esso è riferito ad una *impedenza* detta di *Warburg*, la cui intensità varia inversamente con l'inverso della radice quadrata della frequenza. L'*impedenza* d'interfaccia tra molti metalli - elettroliti può quindi essere generalmente descritta in tale maniera. Per frequenze maggiori di 1000 Hz, la maggior parte delle *correnti* elettriche seguono un percorso di tipo *non-Faraday*; per cui l'*impedenza* di interfaccia cambia, al variare della frequenza, approssimativamente come l'inverso della frequenza. Diminuendo la frequenza, la maggior parte della corrente viene trasportata attraverso il circuito tipo *Faraday* e quindi l'*impedenza* di bassa frequenza varia con la frequenza ( $f$ ) in un intervallo che va da  $f^{1/2}$  a  $f^0$ , a seconda dell'intensità di *impedenza* di rapporto *Warburg / Resistenza*.

Queste condizioni si applicano chiaramente ad modello ideale costituito da un *elettrodo* posto in un *elettrolita* puro. Gli stessi concetti sono tuttavia applicabili con buona approssimazione al modello costituito da terreno percorso da corrente, con le varianti per cui gli *elettrodi* (i grani minerali di semi-conduttori) ed *elettroliti* (soluzioni nei pori) sono tutt'altro che chimicamente puri.

Il circuito di (Fig. B1.2) illustra il fenomeno della *polarizzazione indotta*. Tale modello è noto come principio di *Cole-Cole* (1941), schematizzato secondo Pelton *et al.* (1978) nella relazione:

[con  $I = (-1)^{1/2}$ ;  $\omega = 2\pi f$ ;  $C$  = capacità;  $\tau$  = grandezza dipendente dall'induttanza  $L$  e dalla geometria del sistema]

$$Z(\omega) \cong R_0 \left[ 1 - m \left( 1 - \frac{1}{(1 + i\omega\tau)^c} \right) \right] \cong R - i\omega L$$

In un processo di *rilassamento*, la fase del circuito equivalente raggiunge il massimo nel punto in cui il valore assoluto dell'impedenza  $Z$ , attraverso il circuito, decade dalla resistenza  $R_0$  a  $m R_0$ , essendo  $m = (1, 2, 3, \dots)$  e mostra una inflessione nel picco di fase.

### Polarizzazione di membrana

La *polarizzazione di membrana* è particolarmente importante nelle rocce contenenti una bassa percentuale di argilla nella matrice. L'effetto di questo tipo di polarizzazione aumenta notevolmente in rocce porose in cui le particelle d'argilla bloccano parzialmente il passaggio alle soluzioni di ioni Fig. B2.1. La nuvola cationica di *diffusione* in vicinanza della superficie del minerale argilloso è caratteristica del sistema argilla-elettrolita.

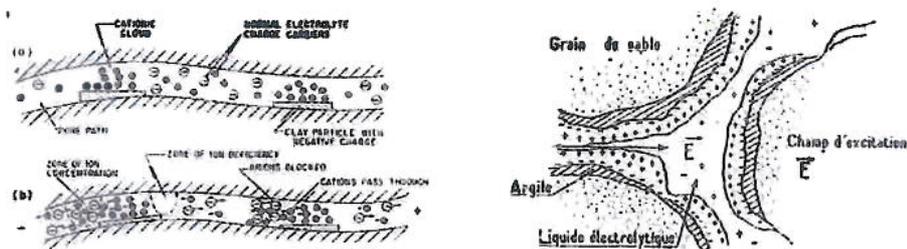


FIG. B2.1. Rappresentazione della *polarizzazione di membrana* in roccia contenete minerali argillosi. (a) prima dell'applicazione di un *campo elettrico*; (b) dopo l'applicazione di un *campo elettrico* (a sinistra). (da Ward & Fraser, 1967). Rappresentazione della formazione di una *membrana elettrolitica selettiva* (argilla) per gli ioni della fase liquida generati dall'applicazione di un *campo elettrico* (a destra). (da Vacquier, 1956)

Applicando un potenziale elettrico, le cariche positive si trasportano facilmente attraverso la nube cationica, tuttavia invece le cariche negative trasportate si accumulano (v. Fig. B2.1); esiste quindi una membrana ione-selettiva. All'eliminazione del potenziale elettrico, tutte le cariche ritornano nella loro posizione di equilibrio.

Di conseguenza, una quantità in sovrabbondanza sia di cationi che di anioni si genera ad una estremità della zona di membrana, mentre una carenza di essi si localizza nella parte opposta. Il numero totale delle cariche di un segno non è generalmente significativamente diverso da quelle di segno opposto. Questa concentrazione di ioni genera un gradiente opposto al flusso generale creando una generale diminuzione delle cariche mobilitate. Tale diminuzione è tanto più accentuata a variazioni di frequenza moderate (per esempio a 0.1 Hz) rispetto al tempo di diffusione degli ioni tra una zona di membrana e l'altra. Per variazioni rapide rispetto al tempo di diffusione (per esempio 1000 Hz) la mobilità ionica non si riduce sostanzialmente. Quindi la *conducibilità elettrica* del sistema membrana aumenta all'aumentare della frequenza della corrente. La maggior parte delle cariche *adsorbite* adiacenti ad un'interfaccia è contenuta entro una *distanza  $d$*  dalla superficie, per cui (Grahame; 1947):

$$d = \frac{K_e kT}{[2ne^2v^2]^{1/2}}$$

In cui

$n$  = concentrazione ionica dell'elettrolita allo stato naturale

$v$  = valenza elettronica degli ioni allo stato naturale

$e$  = carica elementare

$K_e$  = permeabilità dielettrica relativa del mezzo fluido

$k$  = costante di Boltzman,  $1.38054 \times 10^{-16}$  Erg/°K

$T$  = temperatura

Per l'esplorazione ambientale è importante notare come lo spessore  $d$  della stratificazione aumenti con la permeabilità dielettrica e con la temperatura e diminuisca invece con la concentrazione ionica e con la valenza degli elementi. In plumes di contaminanti del terreno e nelle dispersioni di agenti chimici, i fluidi sia tossici che non tossici possono notevolmente influenzare la distanza  $d$ . Maggiore è il valore di tale distanza, maggiore è la probabilità che i pori del terreno possano essere bloccati da una stratificazione di diffusione. La polarizzazione indotta è quindi tanto maggiore quanto  $d$  risulta grande.

Tale considerazione vale sia per la polarizzazione di membrana che per quella elettrodica.

	$P_e$	IP
Abandoned mineshafts—detection	X	X
Archaeological site—delineation	X	X
Chemical waste disposal—contamination plumes	X	?
Cropland salinization and desalinization—changes with time and space	X	X
Dams—integrity of foundation, status	X	X
Earthquake risk—evaluation of fault movement	X	X
Engineering geology—mapping	X	X
Faults—detection, delineation	X	X
Foundations—integrity, soil/bedrock interface	X	X
Groundwater—delineation, evaluation, protection, contamination	X	X
Karst topography—soil/bedrock interface	X	X
Landfills—delineation, contamination plumes, drums	X	X
Landslides—delineation, water content	X	X
Materials exploration—detection and delineation	X	X
Nuclear waste disposal—pre-site delineation	X	X
Oil shale retort monitoring	X	X
Permafrost—delineation of active layer and ice lenses	X	X
Rippability—delineation of weathered rock	X	?
Road siting—soil/bedrock interface	X	X
Tunnels and cavities—detection and delineation	X	X

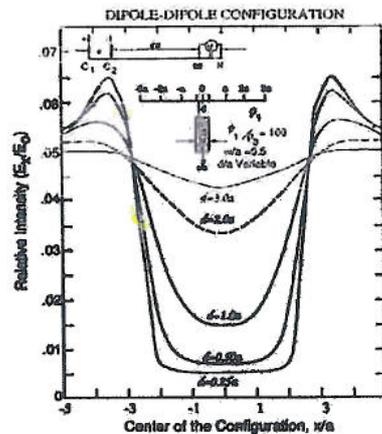


FIG. B2.2. Campi di applicazione dei metodi di resistività e di polarizzazione indotta (a sinistra). (da Ward, 1990). Configurazione dipolo-ipolo. Profili di rappresentazione del rapporto dell'intensità del campo elettrico rispetto a quello primario  $E_0 = I\rho_1/8.25 \pi a^2$ , a varie profondità, su una struttura conduttiva verticale (a destra). (da Dey *et al.*, 1975)

Si ricorda infine come talora si possa incorrere in valori negativi di polarizzazione indotta, come anche di resistività, durante l'acquisizione dati. I valori negativi sono generati da condizioni complesse di strutturazione e configurazione del sistema terreno – strutture presenti – dispositivo. In genere occorrono misure negative a causa di "noise" elettromagnetico, presenza di conduttori nel terreno di forma geometrica particolare, coperture di terreno notevolmente conduttive.

### Metodo di Sismica a rifrazione

La sismica a rifrazione studia la propagazione di onde sismiche negli strati del sottosuolo (onde d'urto alla frequenza acustica, generate da una massa battente o da esplosivo) attraverso l'analisi dei fattori fisici fondamentali delle onde rifratte. Infatti, dai diversi tempi di arrivo delle onde P (onde prime rifratte che giungono ai sistemi di ricezione, detti geofoni), che si propagano a seconda dello spessore e con velocità proprie per ogni tipo di roccia o ammasso roccioso, si ricavano le caratteristiche geometriche dei principali rifrattori presenti nel sottosuolo, semplificati nei tratti delle principali discontinuità rilevate.

Se S è la sorgente di energia e G è il geofono ricevitore il tempo necessario, perché il segnale copra la distanza SG (= x) viaggiando nel primo strato (onde dirette) sarà:

$$t = \frac{x}{V_1}$$

Oltre alle onde dirette, al geofono giungono le onde rifratte dal secondo strato. In questo caso il tempo necessario perché il segnale rifratto venga ricevuto è:

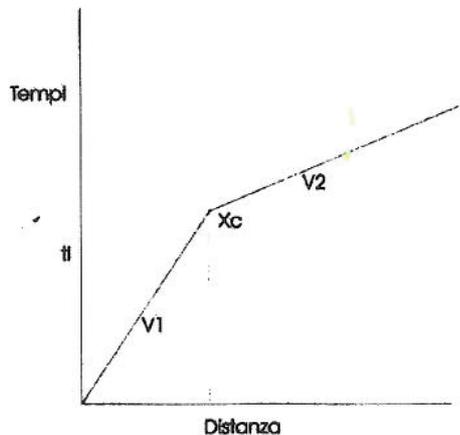
$$t = \frac{x}{V_2} + \frac{2h}{V_1} \cos \alpha_{12}$$

dove h è lo spessore dello strato e  $\alpha$  è l'angolo limite di incidenza. La quantità

$$\frac{h}{V_1} \cos \alpha_{12}$$

viene detto *tempo di ritardo* o *delay time*.

Ponendo su grafico in ascissa la distanza dei geofoni dallo stendimento della sorgente e in ordinata i tempi di arrivo del segnale ai singoli ricevitori, si ottengono due segmenti retti (dromocroni), con il secondo tratto meno inclinato del primo. I reciproci dei coefficienti angolari delle due dromocroni corrispondono alle velocità delle onde P nei due strati ( $V_1$  e  $V_2$ ). Il rapporto fra le due fornisce il valore dell'angolo limite:



$$\alpha_{12} = \arcsen\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$$

La profondità del secondo strato può essere ricavata attraverso la determinazione del tempo intercetto del secondo strato o dell'ascissa del punto di curvatura. Il tempo intercetto si

ottiene estrapolando la dromocrona fino ad intercettare l'asse dei tempi. In pratica corrisponde al tempo di arrivo del segnale rifratto per  $x=0$ :

$$t_i = \frac{2h}{V_1} \cos \alpha_{12}$$

e quindi è uguale al doppio del tempo di ritardo. Quindi lo spessore è dato da:

$$h = \frac{t_i V_1}{2 \cos \alpha_{12}}$$

Il punto di curvatura corrisponde alla distanza alla quale arrivano contemporaneamente le onde dirette e le onde rifratte. Nel grafico coincide all'ascissa in cui giace l'intersezione delle due dromocrona. Noto  $x_c$  lo spessore del primo strato si ricava dalla relazione:

$$h = \frac{x_c}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}$$

Nel caso di più di due strati la procedura è analoga. Il tempo di arrivo al geofono G delle onde rifratte dall'interfaccia dello strato n è fornito dalla relazione

$$t_n = \frac{x}{V_n} + \frac{2h_{n-1}}{V_{n-1}} \cos \alpha_{n-1,n} + \dots + \frac{2h_1}{V_1} \cos \alpha_{1,n}$$

Anche in questo caso le velocità dei singoli rifrattori si ottengono calcolando il reciproco del coefficiente angolare di ogni dromocrona e i valori degli angoli limite dal rapporto delle

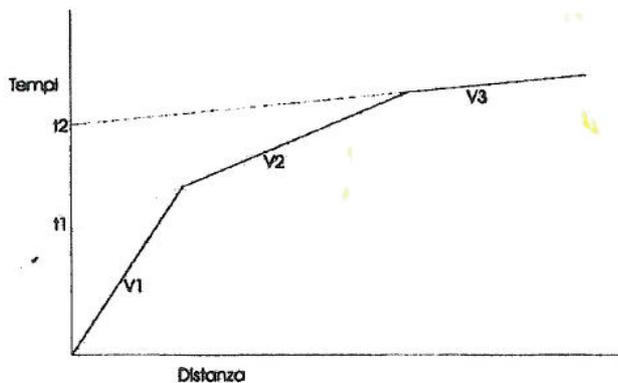
velocità ( $\alpha_{n-1,n} = \arcsen\left(\frac{V_{n-1}}{V_n}\right)$ ).

Per il calcolo degli spessori dei singoli strati si procede come indicato di seguito:

• si stimano i tempi intercetti di ogni dromocrona;

• si calcola lo spessore del primo strato con la relazione:  $h_1 = \frac{t_1 V_1}{2 \cos \alpha_{12}}$ , dove  $t_1$  è il tempo

intercetto della dromocrona relativa al secondo rifrattore;



• si calcola lo spessore del secondo strato con la relazione  $h_2 = \frac{t_2 V_2}{2 \cos \alpha_{23}} - \frac{2h_1}{V_1} \cos \alpha_{13}$ ,

dove  $h_1$  è lo spessore del primo strato, ricavato in precedenza, e  $t_2$  il tempo intercetto del terzo rifrattore;

L'interpretazione dei risultati può avvenire con metodologie diverse. Si descrive generalmente il Metodo reciproco generalizzato (G.R.M.).

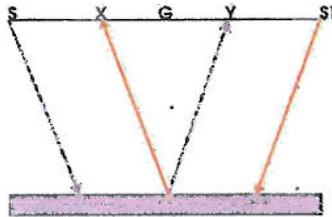
Nel caso in cui la morfologia del rifrattore sia irregolare è possibile utilizzare il metodo reciproco generalizzato (G.R.M.) (Palmer, 1980). Questa metodologia interpretativa

consente di ricostruire l'andamento di strati di forma qualsiasi, anche nel caso di variazioni laterali di velocità.

La valutazione avviene attraverso l'analisi dei tempi e delle dimensioni del dispositivo utilizzato. La funzione velocità è:

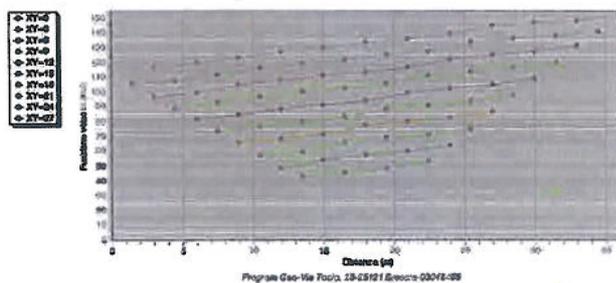
$$T_v = \frac{(T_{sy} - T_{s1x} + T_{ss1})}{2}$$

dove  $T_{sy}$  è il tempo necessario al segnale proveniente dalla sorgente S per giungere al punto Y,  $T_{s1x}$  è il tempo che impiega il segnale per arrivare nel punto X partendo dalla sorgente S1 e  $T_{ss1}$  è il tempo di estromità. G è il geofono virtuale posto a metà della distanza XY.



Nel diagramma: distanza - funzione velocità ottenuto si individua il valore XY ottimale, corrispondente alla curva che meglio approssima una retta.

Orbita funzione velocità errore 3



Si stima  $V_n$ , la velocità delle onde P nel rifratte, posta uguale al reciproco del coefficiente angolare della curva funzione velocità selezionata.

In corrispondenza di ogni valore di XY si stima, sempre con un passo di calcolo uguale a XY, la funzione tempo-profondità:

$$T_g = \frac{T_{sy} + T_{s1x} - \left( T_{ss1} + \frac{XY}{V_n} \right)}{2}$$