

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA  
CIVILE EDILE E AMBIENTALE



**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA

---

**Oggetto della convenzione: “Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)”**

**RELAZIONE FINALE**

**Responsabile Scientifico: prof. Ettore Cardarelli**

**Team scientifico:**  
**prof. Ettore Cardarelli, ing. Michele Cercato,**  
**ing. Giorgio De Donno, sig. Francesco Pugliese**

**Realizzata per:**

**Consorzio di Bonifica Centro**  
**Via Gizio n°36, 65100 Chieti (CH)**  
**P.IVA 01803810694**

**dicembre 2016**

---

**Università degli Studi di Roma “La Sapienza”**  
**CF 80209930587 PI 02133771002**  
**D.I.C.E.A. – Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale**  
**Via Eudossiana 18, 00184 Roma**  
**T (+39) 06 44585089 F (+39) 06 44585091**  
**<http://www.dicea.uniroma1.it>**



*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*

---

**INDICE**

1.	PREMESSA	3
2.	INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO	4
3.	INDAGINE ELETTRICA	9
3.1.	MODALITÀ DI ESECUZIONE DELLA PROVA .....	9
3.2.	ANALISI E INTERPRETAZIONE DATI.....	12
3.3.	ALLINEAMENTO L1(linee 1-3) .....	17
3.4.	ALLINEAMENTO L2(linea 4).....	20
3.5.	ALLINEAMENTO L3(linea 5).....	21
3.6.	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE .....	22
4.	INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE	23
4.1.	MODALITÀ DI ESECUZIONE DELLA PROVA .....	23
4.2.	ANALISI E INTERPRETAZIONE DATI.....	25
4.3.	ALLINEAMENTO L1(linee 1A e 1B) .....	30
4.4.	ALLINEAMENTO L2 (linee 2A e 2B) .....	32
4.5.	ALLINEAMENTO L3 (linea 3).....	33
4.6.	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE .....	34
5.	INDAGINE DOWNHOLE	35
5.1.	FORI DI SONDAGGIO ED OPERAZIONI ACCESSORIE .....	35
5.2.	MODALITÀ DI ESECUZIONE DELLA PROVA .....	35
5.3.	ANALISI E INTERPRETAZIONE DATI.....	39
5.4.	SONDAGGIO SG1 .....	44
5.5.	SONDAGGIO SG2 .....	48
5.6.	SONDAGGIO SG3 .....	52
5.7.	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE .....	55
6.	CONCLUSIONI	56
7.	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	57



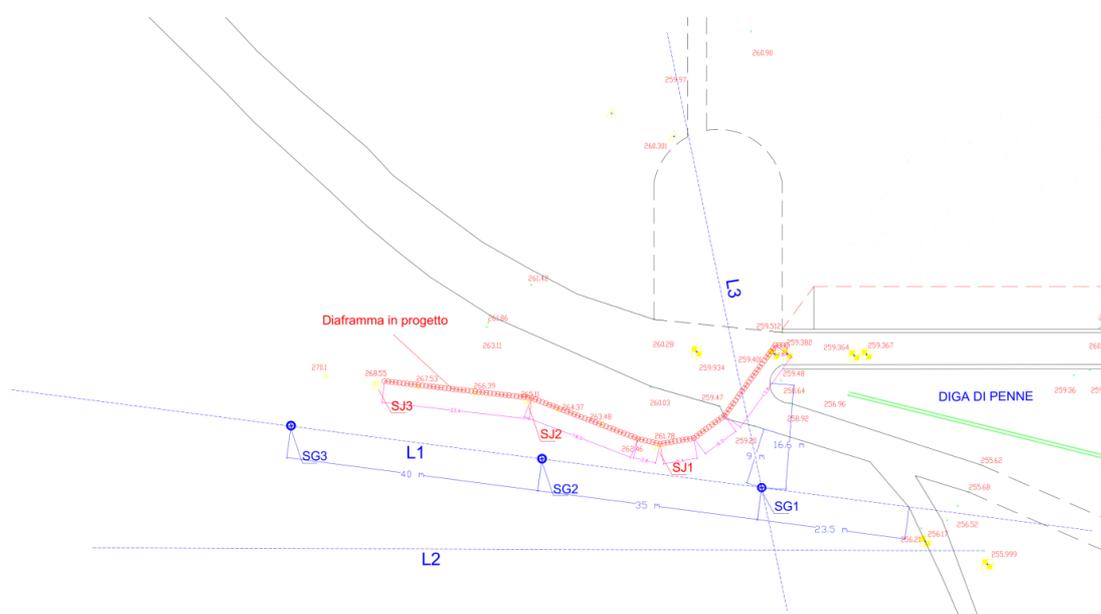
**“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale**

**1. PREMESSA**

La campagna d’indagine geofisica oggetto della presente relazione, eseguita nell’ambito di una convenzione tra L’Ente Consorzio di Bonifica Centro, con sede e domicilio fiscale in Via Gizio n°36, 65100 Chieti e il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell’Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, con sede in via Eudossiana 18, 00184 Roma, dal titolo "Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)", ha come obiettivo l’esecuzione di, n.5 (cinque) profili geoelettrici costituiti ognuno da n.48 elettrodi per la determinazione di modelli di resistività del sottosuolo, n.5 (cinque) profili sismici a rifrazione eseguiti con tecnica tomografica e costituiti ognuno da n.48 geofoni e n.3 (tre) prove sismiche downhole per la determinazione dei profili di velocità di propagazione delle onde longitudinali (onde P) e delle onde di taglio (onde S) in tre fori di sondaggio (SG1, SG2, SG3) ubicati lungo la spalla destra della Diga di Penne, come mostrato in Fig.1.

Dette indagini geofisiche hanno lo scopo di investigare il sottosuolo della spalla destra della diga, individuando la geometria e la profondità delle principali formazioni geologiche presenti in situ nei primi 30 m circa e saranno di ausilio alla progettazione di un diaframma a tenuta idraulica, da effettuarsi orientativamente lungo il profilo indicato in rosso in Fig. 1, per ripristinare la tenuta idraulica dell’invaso.

Allo scopo di migliorare la profondità di investigazione e la copertura spaziale delle indagini geofisiche, i 5 profili elettrici e sismici sono stati distribuiti lungo 3 allineamenti (Fig. 1): L1, costituito da n.3 profili elettrici e n.2 sismici, L2, costituito da n.1 profilo elettrico e n.2 sismici e L3, costituito da un singolo profilo elettrico e sismico.



**Figura 1.1:** Penne (PE). Ubicazione delle indagini geofisiche.



## 2. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

L'area di studio rappresenta la spalla destra della diga di Penne, situata in provincia di Pescara, nei pressi dell'abitato da cui prende il nome e localizzata all'interno di una Riserva naturale, istituita nel 1987. La diga, gestita dal Consorzio di Bonifica Centro, ha la funzione di alimentare la centrale idroelettrica di Passo Cordone e al contempo sfruttare la risorsa idrica per l'irrigazione dei terreni ricadenti all'interno del Consorzio.



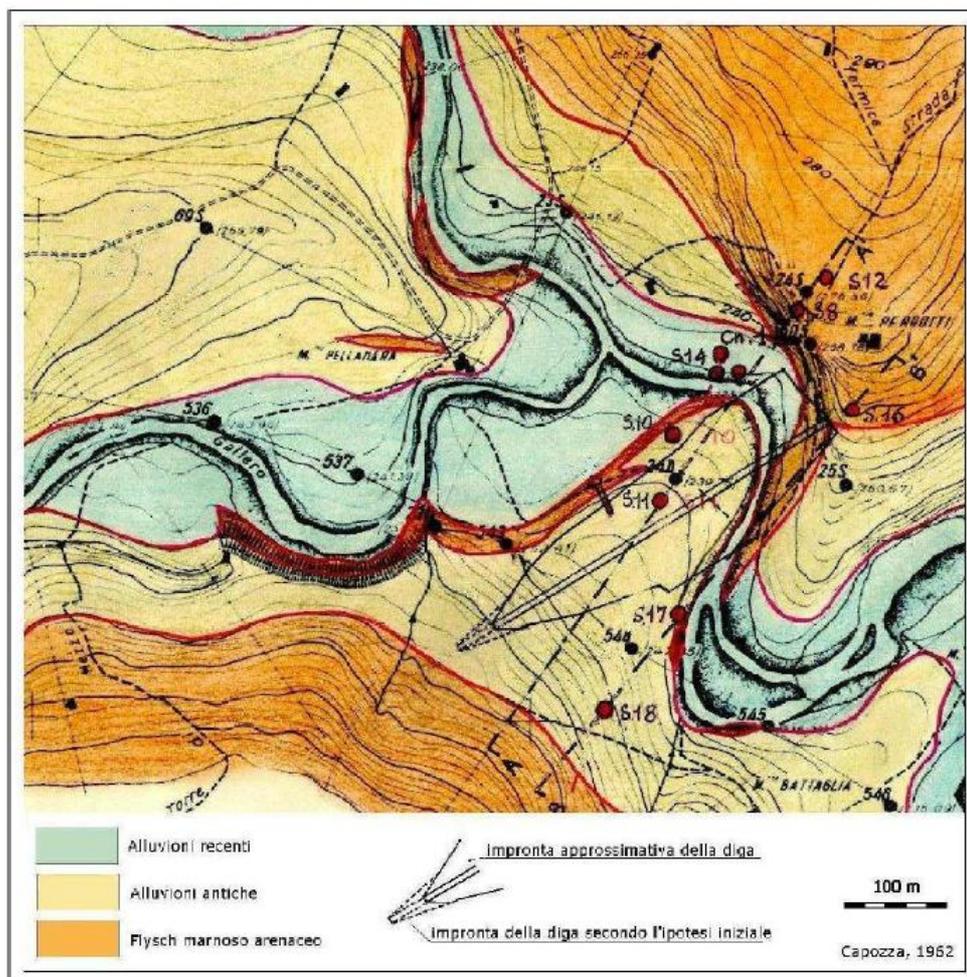
**Figura 2.1.** Area oggetto di studio: la Diga di Penne (PE)

La diga presenta un problema di filtrazione da monte a valle, testimoniato dal fatto che è stata riscontrata, in numerosi casi, la presenza di acqua a valle della diga. Il fenomeno insorge essenzialmente quando il livello idrico nell'invaso supera una certa soglia critica collocata in un intervallo di quote compreso tra 248 e 251 m s.l.m, frequentemente superato dall'invaso. Geomorfologicamente l'invaso del lago di Penne si estende nell'avampaese del massiccio carbonatico del Gran Sasso – Monte Prenna, nella fascia pedemontana collinare periadriatica e nel bacino idrografico del fiume Tavo al quale confluiscono fossi minori, come Gallero e Fonte Nuova. La stretta in corrispondenza della quale è ubicata la diga ricade poco a valle della confluenza da destra del torrente Gallero nel fiume Tavo. La sezione di sbarramento si presenta nettamente asimmetrica, con il fianco sinistro piuttosto acclive ed il fianco destro invece caratterizzato da modesta pendenza. Geolitologicamente la regione Vestina, nella quale è inserito l'invaso del lago, come rilevata dagli affioramenti delle ripide e profonde incisioni dei corsi d'acqua e da numerosi sondaggi, è costituita essenzialmente nel settore pedemontano dai complessi litologici di transizione dal dominio di piattaforma carbonatica al dominio di sedimentazione pelagica e dai depositi terrigeni quaternari pedemontani di regressione e di facies fluvio-lacustri, mentre nel settore montano dalle formazioni del



*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*

massiccio carbonatico del Gran Sasso – Monte Prenna. Concentrando l’attenzione sull’area della stretta della diga, questa è costituita da una successione di terreni marnoso-arenacei in facies di flysch, attribuita alla formazione Cellino del Pliocene Inferiore, che chiameremo “flysch marnoso” o “formazione marnoso-arenacea”. Prima della costruzione della diga, in corrispondenza del fondo valle e lungo la sponda destra, la formazione marnoso-arenacea era ricoperta da “alluvioni recenti” e “alluvioni antiche” del fiume Tavo. Questi terreni di alluvione, in corrispondenza dell’area di imposta del nucleo di tenuta, furono scavati ed asportati prima dei lavori per la realizzazione dell’invaso, restando invece inalterati in corrispondenza dell’attuale spalla destra della diga. In Fig. 2.2 si riporta uno stralcio della Carta geologica dell’ing. Capozza del 1962, la quale mette in luce le formazioni geologiche affioranti prima della costruzione dello sbarramento.

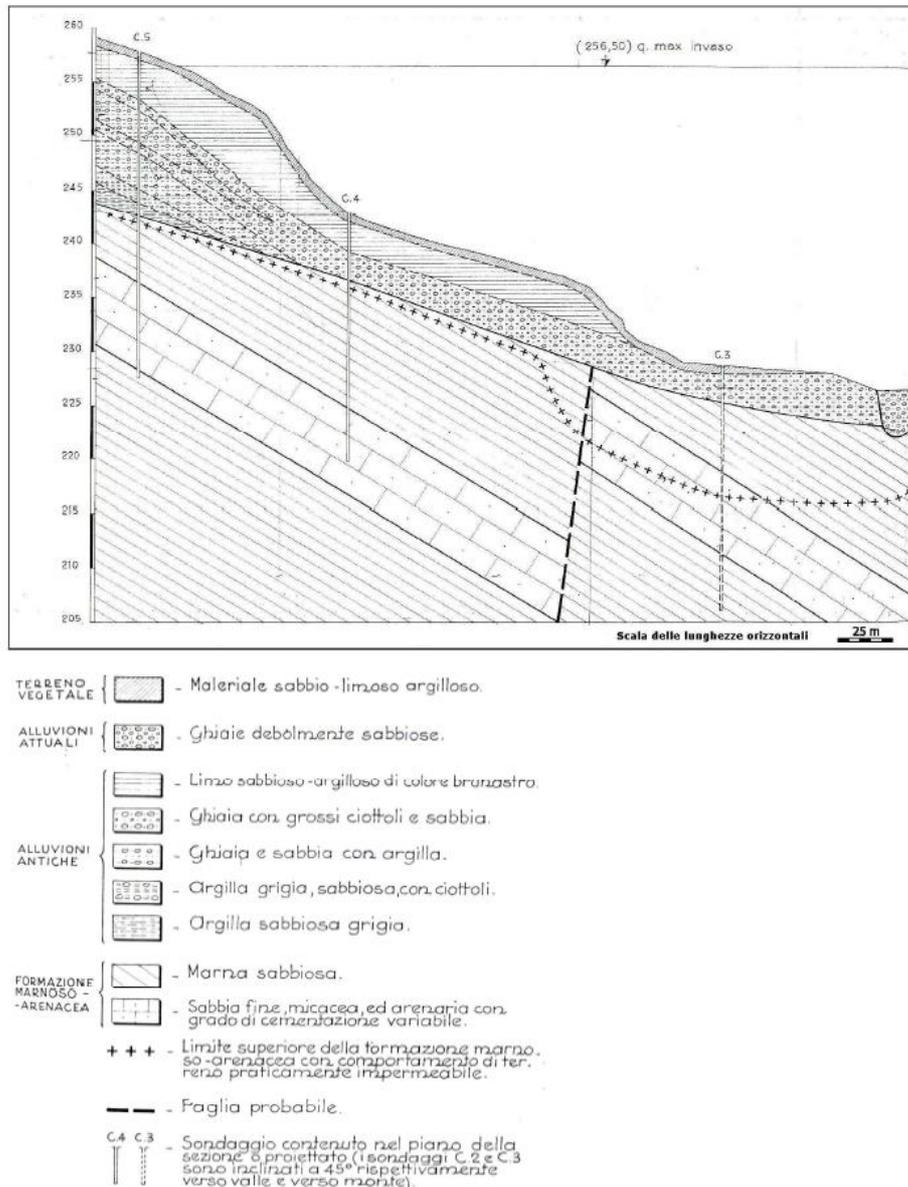


**Figura 2.2:** Stralcio della Carta geologica elaborata da Capozza nel 1962.



**“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale**

Con riferimento alla spalla destra della diga, questa appare costituita, in relazione alla sezione geologica di Capozza del 1964 (Fig. 2.3), dall’alto verso il basso della colonna litostratigrafica, dal terreno più recente a quello più antico, da alluvioni recenti, costituite da formazioni prevalentemente limo-argillose con frazioni sabbiose e da alluvioni antiche, principalmente ghiaie e ciottoli in matrice limosa più o meno abbondante. Il flysch marnoso-arenaceo, formazione estesa con continuità in tutta l’area rilevata, ammantata dai due stati sopra descritti, affiora solo localmente in sommità al pendio.



**Figura 2.3.** Sezione geologica della spalla destra in asse diga (F. Capozza, 1964)



*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*

---

Tale formazione risalente al Pliocene, è costituita da marne, marne argillose e/o arenarie in strati sottili, raggruppate in genere in pacchi con spessore da alcuni metri alla decina di metri, alternate a potenti bancate di arenarie miste a sabbie fini, più o meno cementate.

Si evidenzia come nella sezione geologica di Capozza viene supposta una probabile faglia, la quale comporterebbe una traslazione della lente di arenaria e sabbia rispetto al sottosuolo marnoso.

Numerose prove granulometriche e di permeabilità condotte in laboratorio su campioni estratti da suoli che costituiscono la spalla destra consentono di definire le caratteristiche idrogeologiche dei terreni che strutturano il rilevato. Nelle formazioni litologiche, per i parametri idrologici, si possono distinguere tre classi di permeabilità: i terreni permeabili sono rappresentati dalle alluvioni antiche, prevalentemente ghiaioso-sabbiose, le quali presentano un coeff. di permeabilità  $k > 1$  cm/s; i terreni semipermeabili sono rappresentati dalle alluvioni recenti limo-sabbiose e anche gli strati arenacei sabbiosi della formazione Cellino, come la lente che si nota in figura 4.3, questi suoli presentano un coefficiente di permeabilità  $k$  compreso tra 1 e  $10^{-4}$  cm/s; infine i terreni poco permeabili, assimilabili ad impermeabili, sono rappresentati dalla formazione marnosa, con un coefficiente  $k$  stimato inferiore a  $10^{-4}$  cm/s.

A partire dal suddetto quadro idrologico, le indagini geofisiche commissionate hanno l'obiettivo di ricostruire più nel dettaglio la stratigrafia della spalla destra della diga, in maniera propedeutica alla realizzazione di un diaframma a tenuta idraulica che dovrebbe raggiungere la formazione a bassa permeabilità costituita dal flysch marnoso in modo da ripristinare la piena funzionalità dell'invaso in esame.

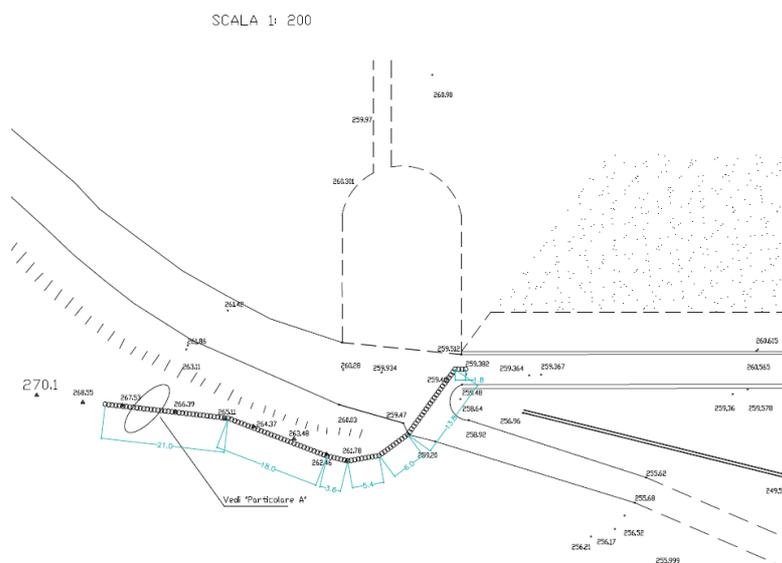
Il progetto preliminare di tale diaframma, a pali secanti (Fig. 2.4), prevede infatti di raggiungere una cospicua parte del pendio della spalla destra della diga fino a raggiungere la formazione marnosa-arenacea in modo ad impedire la circolazione idrica a valle di detta zona. Appare quindi fondamentale, per la buona riuscita del progetto, la ricostruzione della stratigrafia nella zona indagata ed in particolar modo l'individuazione della profondità della formazione marnoso-arenacea.

A tal fine sono state programmate le indagini geofisiche di tipo elettrico, con lo scopo di ricostruire la geologia della zona dato che tali indagini, basate sullo studio della resistività elettrica, sono fortemente diagnostiche in presenza di cambiamenti litologici che interessino la granulometria dei materiali (per esempio il passaggio dai limi-argillosi alle sabbie e alle ghiaie) il contenuto d'acqua (quindi l'individuazione di una possibile falda idrica) ed infine il contenuto di argilla (per esempio il passaggio dalle ghiaie alle marne, aventi un contenuto più o meno alto di argilla).

Una volta ricostruiti i modelli di resistività elettrica si è pianificata l'esecuzione di indagini sismiche a rifrazione con tecniche tomografiche, approssimativamente sugli stessi allineamenti delle precedenti. Queste indagini, indagando la propagazione delle onde sismiche

**“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale**

permettono di individuare con buona risoluzione i passaggi stratigrafici tra terreni più o meno rigidi (p.es. il passaggio tra argille e ghiaie) o determinare la presenza della falda. Sono state inoltre anche utili per avvalorare la ricostruzione effettuata tramite le indagini elettriche.



**Figura 2.4.** Planimetria di progetto del diaframma a tenuta idraulica.

Infine, per minimizzare l'errore nella stima della profondità delle formazioni e validare definitivamente la ricostruzione del sottosuolo già effettuata con le indagini elettriche e di sismica a rifrazione e di caratterizzare dal punto di vista elastico i litotipi individuati con le precedenti indagini, sono state eseguite indagini sismiche di tipo downhole in fori di sondaggio appositamente preparati, in tre punti considerati maggiormente rappresentativi della zona in esame, in relazione all'andamento delle interfacce tra strato e strato identificate tramite le indagini superficiali, in modo tale da essere d'ausilio per la corretta progettazione del diaframma suddetto.

Nei paragrafi seguenti si dettaglieranno i metodi di acquisizione ed elaborazione dei dati nonché i risultati ottenuti per ogni singola tecnica, effettuando quindi delle considerazioni conclusive in funzione degli obiettivi prefissati.



### **3. INDAGINE ELETTRICA**

#### *3.1. MODALITÀ DI ESECUZIONE DELLA PROVA*

##### 3.1.1. Strumentazione

Lo strumento di acquisizione utilizzato è il georesistivimetro Syscal Pro48 della Iris Instruments dotato di una centralina elettronica (o switch) interna allo strumento in grado, autonomamente, di controllare la scelta degli elettrodi attivi. La corrente inviata è regolata automaticamente (fino a un massimo di 2,5 A) per assicurare la migliore qualità dei risultati. La precisione strumentale è dello 0,5% per quanto riguarda le misure di resistività apparente e dell'1% per quanto riguarda le misure di caricabilità, non eseguite in questo caso. Lo strumento è provvisto di un generatore interno da 200 W ed effettua in automatico la compensazione dei potenziali spontanei.

La campagna d'indagine, eseguita nei giorni 15-17 dicembre 2015, ha riguardato l'esecuzione di rilievi 2D secondo le geometrie che verranno dettagliate nel seguito, facendo seguito alle informazioni acquisite durante il sopralluogo preliminare. In particolare, è stata massimizzata l'efficienza dell'acquisizione, esprimibile come il numero di misure effettuate nell'unità di tempo, in relazione agli obiettivi richiesti (risoluzione, profondità) e tenendo conto dell'influenza delle limitazioni logistiche sulla qualità dei dati.

Per ciascuna linea 2D si sono utilizzate la configurazione dipolo-dipolo e polo-dipolo. Tali dispositivi si rivelano generalmente più stabili relativamente alla qualità del segnale in caso di rapporto segnale-rumore non ottimale permettendo di ottenere una maggiore risoluzione, soprattutto per gli orizzonti superficiali ed intermedi.

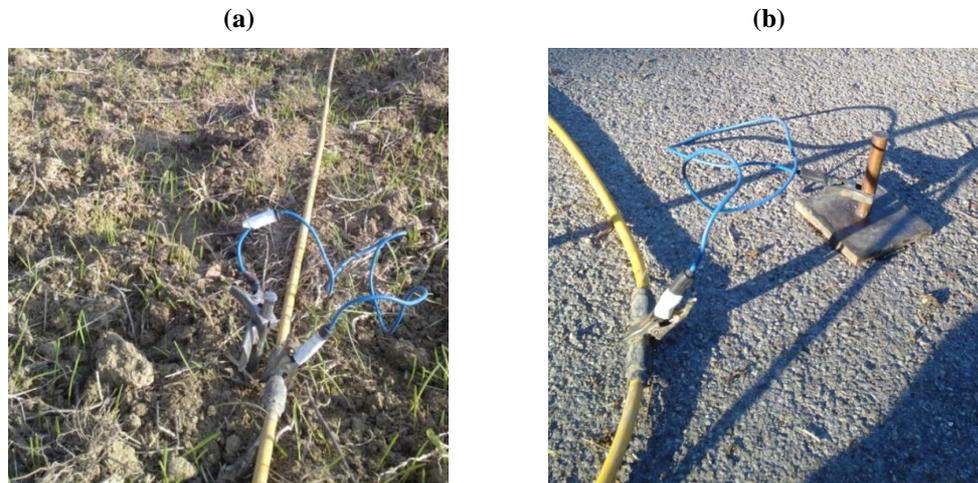
Per ciascuna linea tomografica 2D, si sono acquisite 1980 misure quadripolari, per un totale di 9990 misure.

Nei test eseguiti, sono stati utilizzate due tipologie di elettrodi:

- elettrodi in acciaio di tipo puntuale “a picchetto”, per le linee L1 e L2 e in parte per la linea L3 (Fig. 3.1a);
- elettrodi in rame di tipo areale “a piastra” (Fig. 3.1b), a base quadrata di 10 cm di lato, in alcuni punti della linea L3 a diretto contatto con asfalto e sottobase cementata. Detti elettrodi, posti a contatto con la pavimentazione tramite gel conduttivo, permettono tanto l'immissione di corrente (con resistenze di contatto, nel caso in esame, dell'ordine di alcuni k $\Omega$  quanto la misurazione del potenziale elettrico.



**“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale**

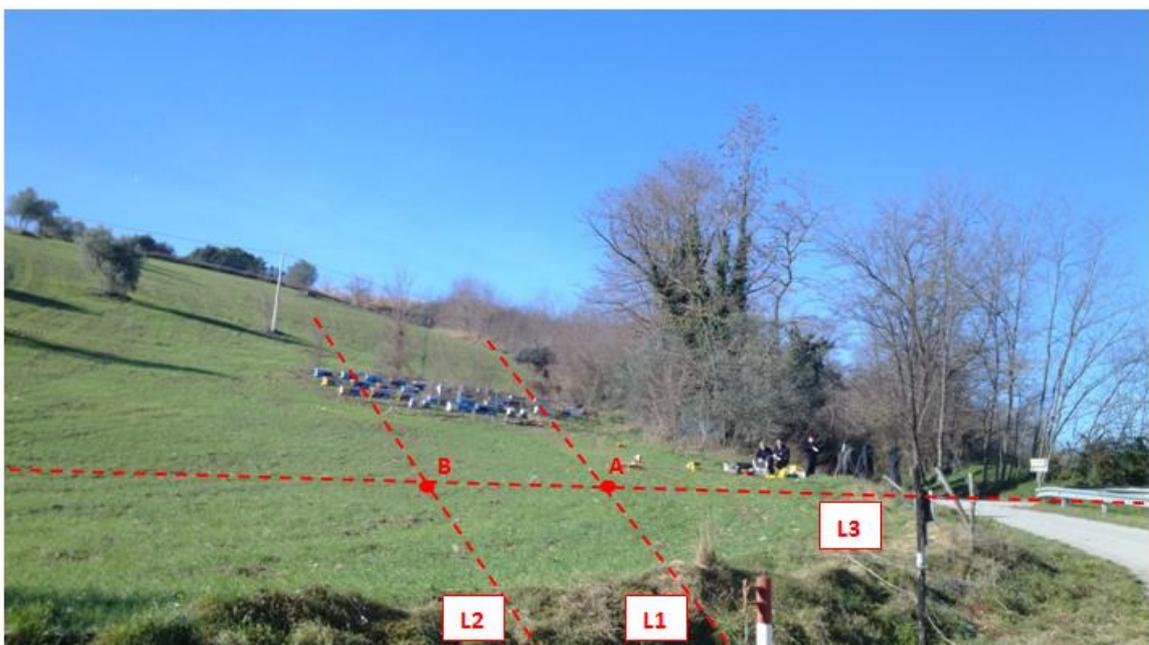


**Figura 3.1** - (a) Dettaglio degli elettrodi “a picchetto” (b) Dettaglio degli elettrodi “a piastra”

Tale sistema permette di eseguire le indagini in maniera completamente non invasiva e consente un rapido posizionamento degli elettrodi nel corso delle indagini.

3.1.2. Ubicazione e geometria del rilievo

Le indagini conoscitive oggetto della presente relazione sono ubicate lungo i tre allineamenti mostrati in Fig. 3.2.



**Figura 3.2** - Ubicazione delle indagini elettriche lungo i tre allineamenti principali (L1, L2, L3)

*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*

In particolare, i rilievi sono stati eseguiti per mezzo di n. 5 linee di 48 elettrodi ciascuno con interdistanza variabile da 2 a 3 m in funzione delle lunghezze massime disponibili nell'area. Le caratteristiche e le geometrie di acquisizione delle prove sono riportate in Tab. 2.1.

Linea	Allineamento	Geometria	Lunghezza stesa (m)	Profondità max investigata (m dal p.c. posto a quota variabile)
1	L1	48 elettrodi spaziati 3.0 m	142 (traslata di +24 m rispetto all'origine della linea 2)	22
2	L1	96 elettrodi spaziati 2.0 m (roll--along)	190	35
3	L1	48 elettrodi spaziati 3.0 m	142 (traslata di -30 m rispetto all'origine della linea 2)	35
4	L2	48 elettrodi spaziati 3.0 m	142	35
5	L3	48 elettrodi spaziati 2.0 m	94	22

*Tabella 2.1 – Geometria del rilievo effettuato*

La scelta di concentrare 3 profili lungo l'allineamento L1 è dovuta alla vicinanza dello stesso alla zona di costruzione del diaframma a tenuta idraulica, riportato in rosso in Fig. 1 e alla conseguente volontà di infittire il numero di dati per avere una ricostruzione affidabile.

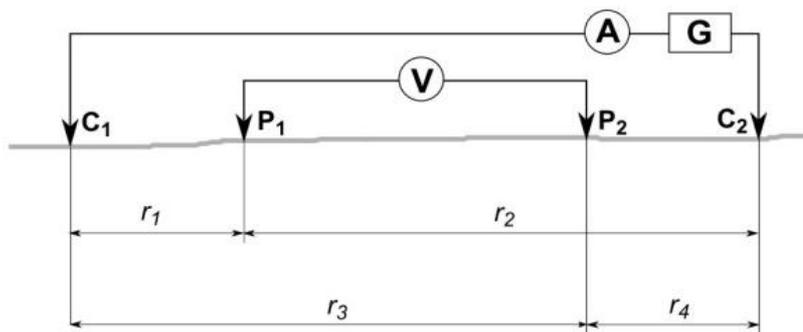


### 3.2. ANALISI E INTERPRETAZIONE DATI

#### 3.2.1. Termini e definizioni

Con il termine generale di metodi a resistività si intende una classe di metodologie geofisiche il cui scopo è la determinazione della distribuzione della resistività elettrica nel sottosuolo, a partire da misure eseguite sulla superficie o in appositi fori attrezzati.

Tali tecniche richiedono la misura della differenza di potenziale elettrico in diversi punti della superficie del terreno, a seguito dell'immissione di corrente elettrica continua attraverso opportuni elettrodi. Il dispositivo base per l'esecuzione di un rilievo geoelettrico è quello del quadripolo elettrico, del tipo rappresentato in Fig. 3.3, in cui si utilizzano due elettrodi per l'immissione di corrente ( $C_1$  e  $C_2$ ) e due per la misura della differenza di potenziale ( $P_1$  e  $P_2$ ).



**Figura 3.3** – Dispositivo quadripolare generico.  $C_1$  e  $C_2$ : elettrodi di corrente.  $P_1$  e  $P_2$ : elettrodi di potenziale.  $V$ : voltmetro.  $A$ : amperometro.  $G$ : generatore.

La grandezza fisica ricavata dalle misure sperimentali ottenute dal singolo quadripolo è la resistività apparente  $\rho_a$ , definita come (Koefoed 1979, Telford et al. 1990) :

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$$

Dove:  $K$  è la costante geometrica del quadripolo, la quale dipende dalla posizione reciproca degli elettrodi (e quindi da  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ ,  $r_4$ ),  $\Delta V$  è la differenza di potenziale misurata ai capi degli elettrodi di potenziale  $P_1$  e  $P_2$ , infine  $I$  è la corrente immessa tramite gli elettrodi  $C_1$  e  $C_2$  (Fig. 3.3).

Si è introdotto il concetto di resistività apparente poiché, nel caso in cui vengano a mancare le condizioni di omogeneità ed isotropia dei mezzi investigati - il che avviene sempre quando viene investigato un semispazio eterogeneo come il sottosuolo - la resistività misurata non corrisponde alla resistività reale, ma fornisce un valore “apparente”, cioè rappresentativo della disomogenea distribuzione di resistività del sottosuolo all’interno del volume investigato dal campo elettrico.

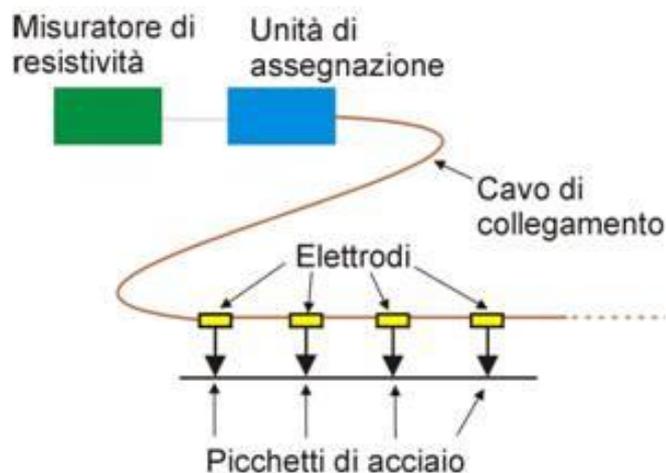


*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*

Il dispositivo caratterizzato da soli quattro elettrodi può essere utilizzato mantenendo fisso il centro ed allargando simmetricamente gli elettrodi secondo progressioni prestabilite per costruire dei profili di resistività apparente, dando luogo alla consolidata tecnica dei Sondaggi Elettrici Verticali o SEV (Koefoed 1979, Telford et al. 1990), i quali sono però in grado di restituire unicamente modelli monodimensionali del sottosuolo. Alternativamente, nei Sondaggi Elettrici Orizzontali (SEO) il centro del quadripolo può essere spostato mantenendo fissa la distanza tra gli elettrodi, per evidenziare eventuali variazioni laterali di resistività ad una certa profondità.

La tomografia Elettrica a Resistività (ERT) viene eseguita per valutare la distribuzione 2D o 3D della resistività nel sottosuolo. In pratica, si utilizza una strumentazione multi-elettrodo (solitamente a 48 elettrodi) in grado di eseguire automaticamente misure di resistività apparente secondo sequenze definite dall'utente, con gli elettrodi che vengono disposti sul terreno secondo geometrie personalizzabili di volta in volta in base al tipo di indagine. In Fig. 3.4 è riportato uno schema concettuale di tale tipo di strumentazione.

A titolo di esempio, in Fig. 3.5 è riportata una sequenza automatica di acquisizione per la misurazione di una sezione di resistività apparente, utilizzando un sistema a 28 elettrodi equispaziati e una configurazione quadripolare del tipo dipolo-dipolo.

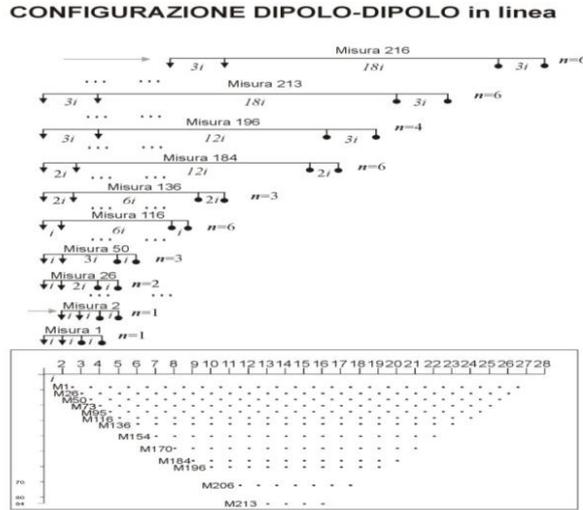


**Figura 2.4.** Schema concettuale di un sistema multi-elettrodo per misure di resistività apparente

Pertanto, è oggi possibile acquisire con relativa facilità dei set di dati multi-dimensionali (2D, 3D ma anche 4D nel caso di monitoraggio ripetuto nel tempo) i quali possono essere interpretati per costruire modelli a più dimensioni della resistività del sottosuolo.



**“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale**



**Figura 2.5.** Sequenza automatica di misura e relativa sezione di resistività apparente

**3.2.2. Inversione dei dati**

I dati sperimentali di resistività apparente devono essere interpretati per ricostruire una stima quantitativa della distribuzione di resistività nel sottosuolo (2D o 3D a seconda della tipologia del rilievo). Tale processo interpretativo viene definito in geofisica con il termine *inversione* (Menke 1989, Tarantola 2005), con cui si indica l'intera sequenza di operazioni attraverso le quali, da un insieme di dati misurati in campagna, viene ricostruito un modello fisico del sottosuolo, in questo caso di resistività elettrica (Fig. 3.6).



“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale

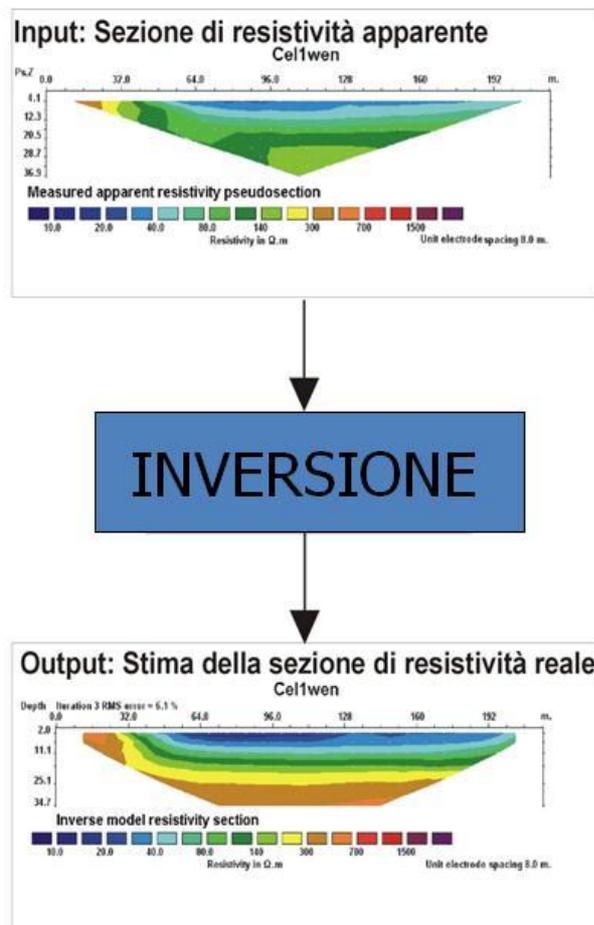


Figura 3.6 . Inversione di dati di resistività apparente

Essendo il sottosuolo un sistema ad infiniti gradi di libertà, esso viene rappresentato per via discreta tramite opportuna griglia (mesh) e quindi con un insieme finito di parametri.

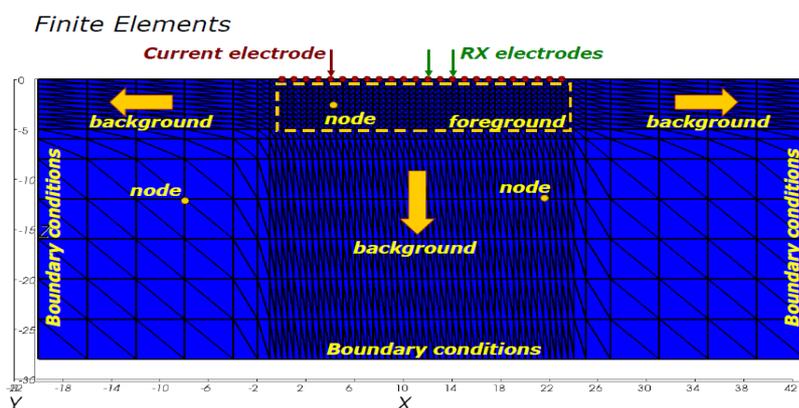
Poiché le misure sperimentali sono sempre contaminate da errore, la soluzione del problema inverso non è univoca ed esiste una vasta letteratura sulla scelta degli opportuni algoritmi di inversione in relazione alla complessità della modellazione, all'utilizzo di funzioni obiettivo composite per guidare la scelta dei modelli inversi, alla stima dell'incertezza dei parametri della soluzione etc. (vedi ad es. Tarantola 2005, Menke 1989, Sen e Stoffa 1995).

In estrema sintesi, il processo numerico d'inversione consiste nel risolvere un problema di ottimizzazione. La funzione obiettivo da minimizzare considera sempre lo scarto tra i dati misurati ed i dati teorici, calcolati a partire dal modello di sottosuolo al corrente stato di avanzamento del processo di inversione (soluzione corrente).

Tale funzione può essere anche composita (costituita da più termini) e cioè considerare delle caratteristiche aggiuntive che siano “desiderabili” per il modello del sottosuolo ed al

*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*

contempo esprimibili in termini matematici (ad esempio uniformità del modello, dimensione del modello etc.). Per far convergere il problema inverso, cioè individuare la soluzione ottimale in base ai dati sperimentali e alla funzione obiettivo, durante il procedimento numerico bisogna risolvere spesso il problema della modellazione diretta (problema diretto). Nel caso della tomografia elettrica, il problema diretto (modellazione diretta) consiste nel calcolare il potenziale elettrico per ogni singolo punto dominio discretizzato del terreno (mesh). Per fare questo va risolta l'equazione di Poisson per via numerica (Dey and Morrison 1979a, 1979b). A titolo di esempio, nella Fig. 3.7 è riportata la maglia di discretizzazione agli elementi finiti in una situazione tipo in una vista 2D. Il livello di dettaglio della ricostruzione dipende da fattori intrinseci del metodo (come la risoluzione teorica e la sensibilità dei parametri del modello rispetto ai dati) e da fattori che dipendono dalle caratteristiche del sito (rumore ambientale, resistività delle formazioni presenti nel sottosuolo etc.).



**Figura 3.7.** Esempio di mesh di discretizzazione 2D.

La discretizzazione in mesh con cui si rappresenta il sottosuolo deve tenere conto di questi parametri per evitare un numero sproporzionato di incognite nel processo di inversione, il quale non possa essere “risolto” dal set di misure sperimentali durante il processo d’inversione. Tale limite di dettaglio (Sasaki 1992) può assumersi come circa pari alla metà della distanza elettrodoica.

Per l’elaborazione dei risultati si sono utilizzate due tipologie di software:

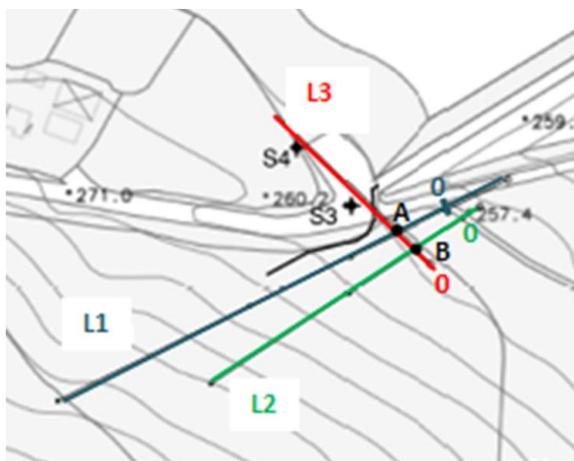
- RES2DINV<sup>®</sup> (Loke and Barker, 1996), software commerciale largamente utilizzato nella pratica geofisica corrente;
- VEMI - Versatile algorithm for Electrical data Modelling and Inversion (De Donno and Cardarelli, 2015), software in Matlab<sup>®</sup> realizzato dall’Area di Geofisica – Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell’Università di Roma “La Sapienza”;



*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*

I modelli risultanti dall’applicazione dei due software hanno restituito risultati molto simili tra loro, con differenze trascurabili in termini di errore e di caratteristiche del modello finale ricostruito. Pertanto nel seguito si riporteranno i soli risultati ottenuti tramite il software VEMI, per ragioni di sintesi. L’affidabilità del modello finale è stata valutata in termini di scarto quadratico medio (RMSE o  $\sigma_t$ ).

Per maggior chiarezza espositiva si riporteranno i risultati divisi per allineamento, mostrando poi all’interno di ogni allineamento le singole linee elettriche. Si riporta in Fig. 3.8 l’ubicazione delle linee elettriche su CTR 1:10000, con l’indicazione del punto convenzionale di origine dell’asse delle ascisse (0) per ogni allineamento.



**Figura 3.8.** Ubicazione linee elettriche su carta CRT 1:10000.

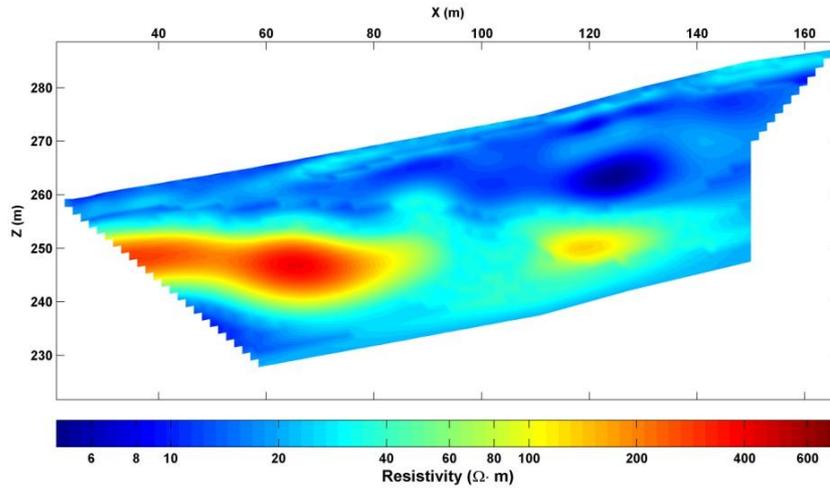
Le cinque linee elettriche mostrate nel seguito hanno restituito errori molto limitati (max 5%) a conferma della qualità dei dati acquisiti e conseguentemente dell’elevata affidabilità dei modelli di sottosuolo ricostruiti.

### 3.3. ALLINEAMENTO L1 (linee 1-3)

L’allineamento L1 è formato da 3 linee elettriche sovrapposte, al fine di migliorare la risoluzione e contemporaneamente fornire una profondità di investigazione sufficiente elevata per individuare il substrato marnoso. I modelli di resistività ottenuti con software VEMI sono riportati in Figg. 3.9, 3.10 e 3.11.

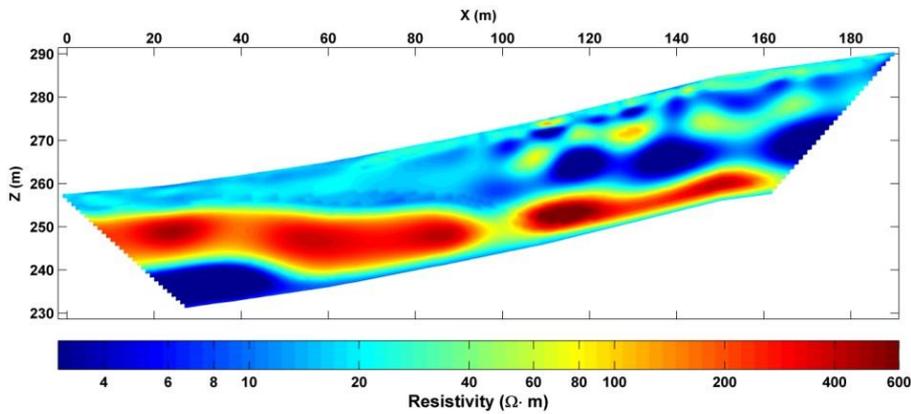


“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale



ITER: 5  
RMSE (%): 0.97

**Figura 3.9.** Modello di resistività della linea 1 relativa all'allineamento L1 (progressive 24-166 m rispetto all'origine dell'allineamento indicata in Fig. 3.8)

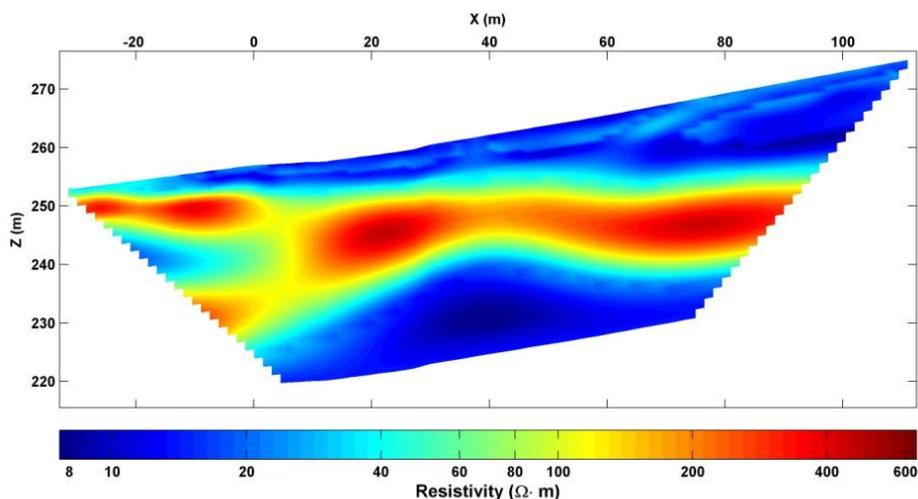


ITER: 5  
RMSE (%): 5.02

**Figura 3.10.** Modello di resistività della linea 2 relativa all'allineamento L1 (progressive 0-190 m rispetto all'origine dell'allineamento indicata in Fig. 3.8)



“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale



ITER: 3

RMSE (%): 2.43

**Figura 3.11.** Modello di resistività della linea 3 relativa all'allineamento L1 (progressive -30-112 m rispetto all'origine dell'allineamento indicata in Fig. 3.8)

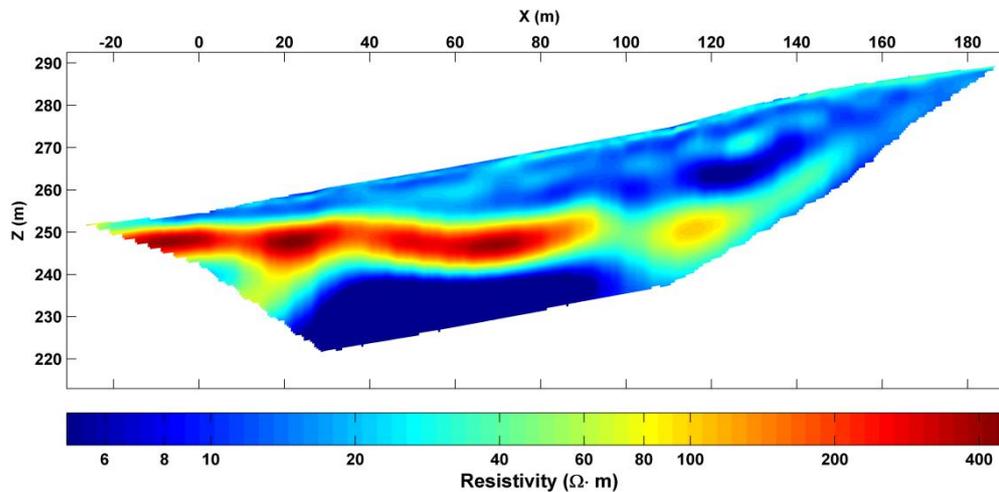
Nelle 3 linee, che investigano lo stesso allineamento a partire da punti di origine diversi, si possono distinguere 3 strati a differente comportamento:

- area a bassa resistività (colore blu in Figg. 3.9-3.11) superficiale, a quote comprese tra 290 e 250 m s.l.m.m. ca., relativa a formazioni alluvionali recenti a carattere prevalentemente limoso e argilloso;
- area ad alta resistività (colore rosso in Figg. 3.9-3.11) intermedia, a quote comprese tra 235 e 250 m s.l.m.m. ca., relativa a formazioni alluvionali antiche a carattere prevalentemente sabbioso e ghiaioso;
- area a bassa resistività (colore blu in Figg. 3.9-3.11) profonda, a quote inferiori a 235 m s.l.m.m. ca., relativa al flysch marnoso presente in situ.

Tramite l'inversione congiunta dei dati delle tre linee si è giunti ad un modello di resistività rappresentativo dell'allineamento 1, mostrato in Fig. 3.12, avente una lunghezza di 220 m e una profondità massima di 35 dal piano campagna.



*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*



ITER: 4  
RMSE (%): 5.08

*Figura 3.12. Modello di resistività complessivo dell'allineamento L1.*

Si nota come venga confermata la stratificazione in tre aree distinte relative ai tre maggiori litotipi presenti nella zona in esame. Inoltre:

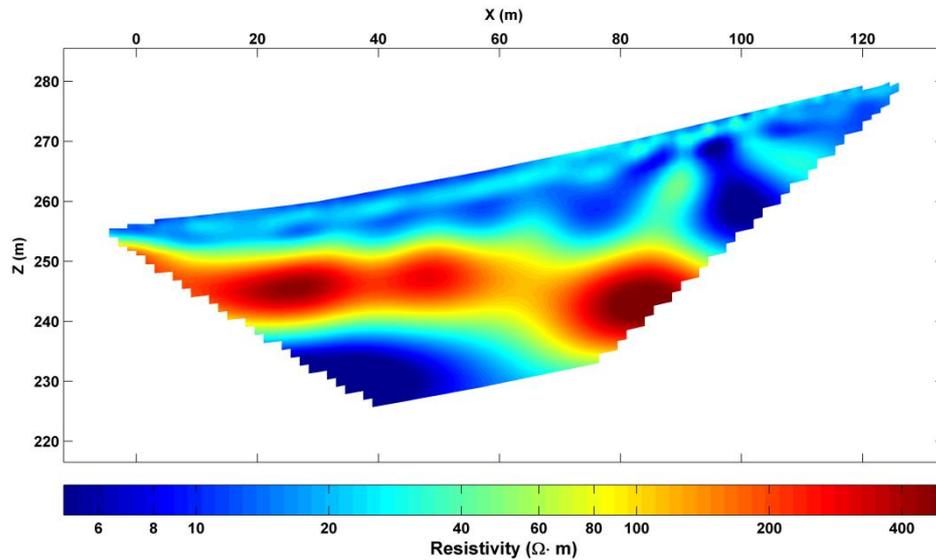
- il tetto dello strato ad alta resistività, associabile alla presenza delle alluvioni antiche si trova ad una quota circa costante di circa 250 m s.l.m.m. e ha uno spessore di circa 8-10 m, che si assottiglia nella parte terminale dell'allineamento ( $x > 100$  m);
- pertanto il flysch marnoso si trova a profondità sempre maggiori dal piano campagna allontanandosi dalla diga.

### 3.4. ALLINEAMENTO L2(linea 4)

La linea 4, relativa all'allineamento L2 aveva lo scopo principale di verificare se il modello ricavato sull'allineamento principale L1, fosse continuo all'interno dell'area in esame e non legato a variazioni locali. Il modello di resistività, riportato in Fig. 3.13 conferma il modello a 3 strati visto in precedenza e anche la geometria degli stessi, in cui il tetto dello strato ghiaioso si mantiene ad una quota costante di circa 250 m s.l.m.m e lo spessore dello stesso è di circa 8-10 m. Al di sopra permangono le zone a bassa resistività legate alle alluvioni recenti mentre in profondità ( $z < 235-240$  m s.l.m.m.) è visibile lo strato conduttivo relativo al flysch marnoso.



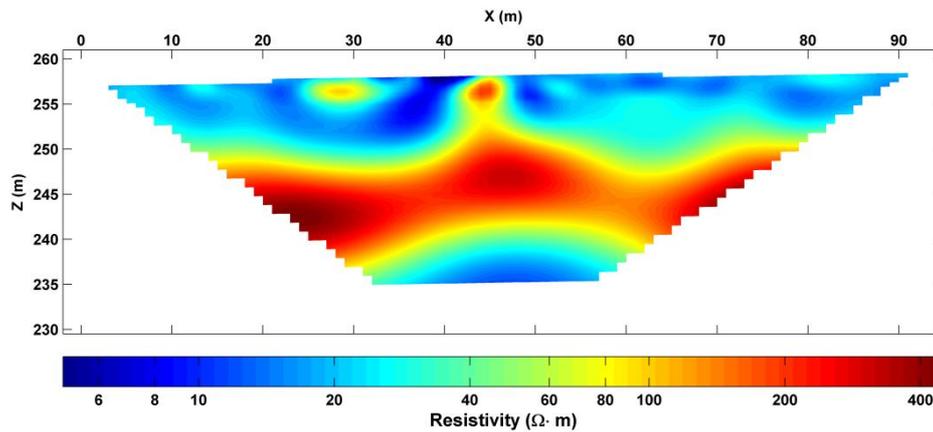
*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*



**Figura 3.13.** Modello di resistività della linea 4 relativa all'allineamento L2.

3.5. ALLINEAMENTO L3(linea 5)

La linea 5, relativa all'allineamento L3, investiga le zone immediatamente a contatto con il corpo diga e quindi importante per caratterizzare la zona in cui il diaframma dovrebbe collegarsi alla diga stessa. Il modello di resistività, riportato in Fig. 3.14 conferma le evidenze degli allineamenti precedenti, sia per quanto riguarda il tetto dello strato ghiaioso, che lo spessore dello stesso che per la profondità del flysch marnoso.



ITER: 5  
RMSE (%): 3.77

**Figura 3.14.** Modello di resistività della linea 5 relativa all'allineamento L3.



*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*

---

*3.6. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE*

Le indagini elettriche effettuate hanno mostrato una stratificazione del sottosuolo, costituente la spalla destra della diga, in tre macro-strati (conduttivo-resistivo-conduttivo), coincidenti con i tre maggiori litotipi presenti in zona, ovvero (dalla superficie in profondità): alluvioni recenti a carattere limo-argilloso (strato conduttivo esteso fino a una quota di circa 250-255 m s.l.m.m. ca.), alluvioni antiche a carattere ghiaio-sabbioso (fino a 240 m s.l.m.m. ca.) e flysch marnoso a quote minori. All'interno dello strato più superficiale limo-argilloso è possibile notare a tratti la presenza di formazioni leggermente più resistive dovute probabilmente alla presenza di una percentuale non trascurabile di sabbia.

I modelli di sottosuolo ricostruiti sono caratterizzati da un elevato grado di affidabilità, testimoniato da valori dello scarto quadratico medio (RMSE) limitati (< 5%).



## 4. INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE

### 4.1. MODALITÀ DI ESECUZIONE DELLA PROVA

#### 4.1.1. Strumentazione

La campagna di indagine sismica a rifrazione è stata effettuata dal 1 al 4 febbraio 2016. L’attrezzatura utilizzata durante lo svolgimento della campagna di indagini sismiche a rifrazione comprende per ogni linea una sorgente sismica di tipo a cannoncino MINIBANG (Fig. 4.1), con proiettili calibro 8 industriali, e n.48 ricevitori a velocità (geofoni) verticali da 4.5 Hz. Sia la sorgente che i ricevitori sono collegati ad n.2 sismografi digitali Geode della Geometrics, ciascuno da 24 canali, necessari per l’elaborazione del segnale ed interfaccia ad un portatile.



**Figura 4.1.** *Sorgente sismica di tipo a cannoncino MINIBANG*

La registrazione dell’istante di scoppio è stata effettuata ad apertura di circuito, collegando i due estremi di un cavo bipolare in fondo alla canna del fucile, come mostrato in Fig. 4.2. Il circuito viene interrotto nel momento in cui il proiettile è espulso da fucile.

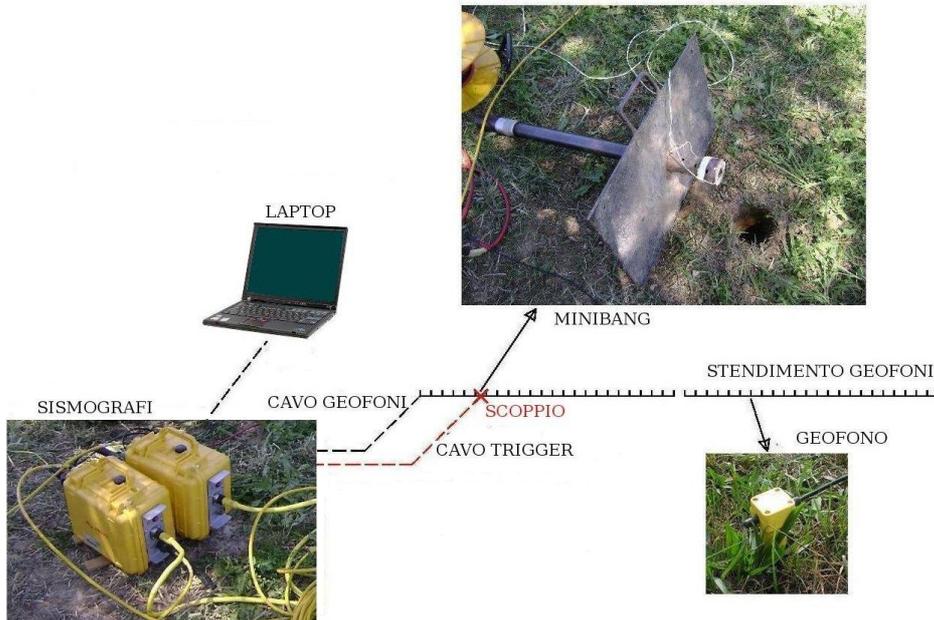


**Figura 4.2.** *Trigger ad apertura di circuito nel caso di cannoncino sismico*

I geofoni sono stati posizionati sulla superficie del terreno e collegati tramite cavi multipolari ai sismografi per l’elaborazione del segnale acquisito. Uno schema esemplificativo della strumentazione utilizzata è riportato in Fig.4.3.



**“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale**



**Figura 4.3.** Strumentazione di campagna della prova sismica a rifrazione.

4.1.2. Ubicazione e geometria del rilievo

Le indagini conoscitive oggetto della presente relazione sono ubicate lungo i tre allineamenti già visti in precedenza (Fig. 4.4)



**Figura 4.4 -** Ubicazione delle indagini sismiche lungo i tre allineamenti principali (L1, L2, L3)



*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*

In particolare, i rilievi sono stati eseguiti per mezzo di n. 5 linee di 48 geofoni ciascuno con interdistanza di 2 m ciascuno. Le caratteristiche e le geometrie di acquisizione delle prove sono riportate in Tab. 4.1.

<b>Linea</b>	<b>Allineamento</b>	<b>Geometria</b>	<b>Lunghezza stesa (m)</b>	<b>Profondità max investigata (m dal p.c. posto a quota variabile)</b>
L1A	L1	48 geofoni spazati 2.0 m	94 m	20
L1B	L1	48 geofoni spazati 2.0 m	94 m	20
L2A	L2	48 geofoni spazati 2.0 m	94 m	20
L2B	L2	48 geofoni spazati 2.0 m	94 m	20
L3	L3	48 geofoni spazati 2.0 m	94 m	20

*Tabella 4.1 – Geometria del rilievo effettuato*

#### 4.2. ANALISI E INTERPRETAZIONE DATI

##### 4.2.1. Termini e definizioni

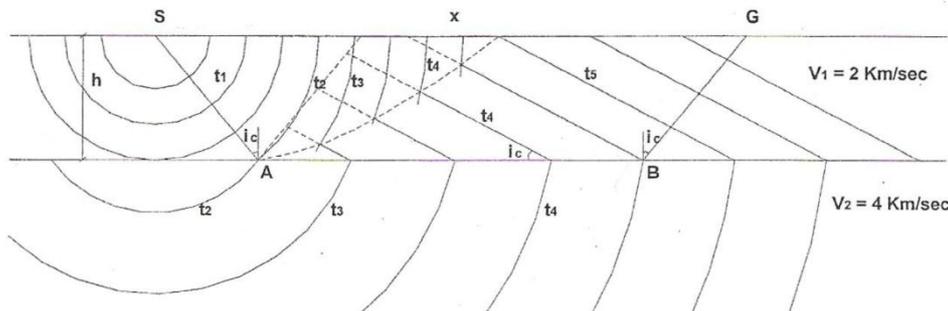
Le prospezioni sismiche sono metodi di indagine geofisica basati sullo studio della propagazione delle onde sismiche, in funzione delle caratteristiche elastiche dei terreni attraversati della perturbazione.

Le onde sismiche viaggiano nel sottosuolo a differente velocità attraverso i diversi litotipi e subiscono sulle superfici di discontinuità geologica tra strati differenti, fenomeni di riflessione, rifrazione e diffrazione (Thomson 1950). La velocità di propagazione dell'onda sismica, può inoltre mutare anche nell'ambito di uno stesso litotipo per variazioni di compattazione, fratturazione, porosità, contenuto d'acqua ecc.



*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*

In particolare il metodo sismico a rifrazione è un tipo di prospezione che si basa sulla registrazione del tempo che le onde sismiche impiegano perché la perturbazione elastica, indotta nel sottosuolo da una determinata sorgente di energia (S), giunga agli apparecchi di ricezione (geofoni - G) percorrendo lo strato superficiale (generalmente meno rigido) e gli strati più profondi (generalmente più rigidi). Uno schema esemplificativo dell'indagine è riportato in Fig. 4.5.

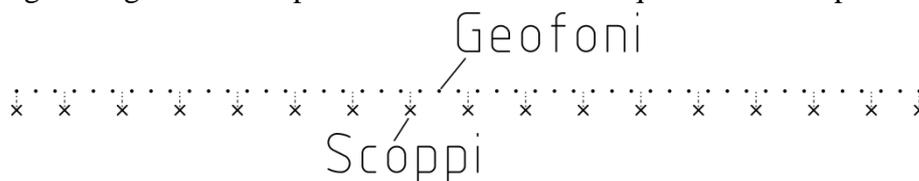


**Figura 4.5.** Fronte d'onda birifratto nel caso di due strati piani e paralleli a velocità costante

L'apparecchiatura necessaria per le prospezioni sismiche a rifrazione è costituita da una sorgente puntiforme e da una serie di geofoni (generalmente multipli di 12) che vengono spaziatamente regolarmente lungo un determinato allineamento che rappresenta il profilo da indagare, entrambi collegati ad un sismografo che registra l'istante di partenza della perturbazione ed i tempi di arrivo delle onde a ciascun geofono. La lunghezza dello stendimento dipende dalla profondità richiesta per l'indagine, mentre l'interdistanza geofonica dalla risoluzione desiderata. In un'indagine a rifrazione "classica" viene eseguito un numero di scoppi minimo pari a 5, in corrispondenza del primo e ultimo geofono della stesa al centro della linea e con un certo "offset" (distanza) dal primo e dall'ultimo geofono.

Per avere una ricostruzione bidimensionale di tipo tomografico della realtà in esame (simile a quanto visto in precedenza per le indagini elettriche) con un buon grado di risoluzione, occorre invece effettuare un numero di scoppi sufficientemente elevato in modo da avere una densità di informazione elevata per poter apprezzare anche minime variazioni del parametro in esame (in questo caso la velocità delle onde sismiche) lungo la linea d'indagine.

Pertanto solitamente si eseguono numerosi scoppi lungo la linea, in ragione di uno scoppio ogni 2-4 geofoni. Ciò porta ad uno schema di acquisizione del tipo raffigurato in Fig. 4.6.



**Figura 4.6.** Acquisizione sismica a rifrazione per ricostruzione tomografica del sottosuolo.



#### 4.2.2. Interpretazione delle dromocrone

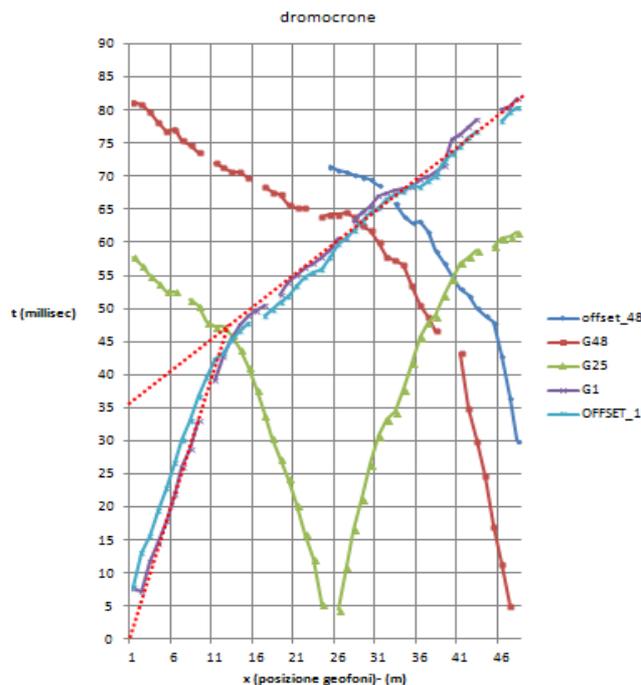
Una volta acquisiti i dati, la prima operazione per l'interpretazione degli stessi è costituita dalla lettura dei tempi di primo arrivo delle onde sismiche ai geofoni per ciascuno scoppio effettuato (operazione detta di “picking”).

I dati relativi a tutti i tempi di primo arrivo letti a ciascun geofono per ogni scoppio sono poi assemblati in un grafico detto "dromocrona".

La dromocrona è un grafico che ha in ordinata il tempo di primo arrivo, espresso in millisecondi, ed in ascissa lo spazio, cioè la posizione dei geofoni, espresso in metri. Questo grafico permette di individuare in prima approssimazione il numero di strati indagati nel sottosuolo, la velocità media che ognuno di questi strati possiede ed il loro spessore, informazioni queste che permettono appunto di definire un primo modello di sottosuolo. Il numero di strati è pari al numero di spezzate a differente pendenza individuabili sulle dromocrone, la velocità dello strato  $V$  corrisponde al coefficiente angolare della rispettiva spezzata, infine lo spessore  $h$  dello strato si calcola invertendo la seguente formula a partire dall'intercetta  $I$  della spezzata sull'asse delle ordinate:

$$I_n = 2 \sum_{k=1}^{n-1} \frac{h_k \cos \Theta_{k,n}}{V_k}, \text{ in cui } \Theta \text{ è l'angolo d'incidenza critico (Legge di Snell).}$$

Un esempio di dromocrone calcolate per i 5 scoppi "classici" è riportato in Fig. 4.7, in cui con linea puntinata sono indicate le due rette interpolanti due strati a differente velocità, il più superficiale di velocità circa pari a 0.3 km/s e spessore circa pari a 7 m e il più profondo di velocità circa intorno a 1.5 km/sec.



**Figura 4.7.** Esempio di dromocrona.



---

*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*

---

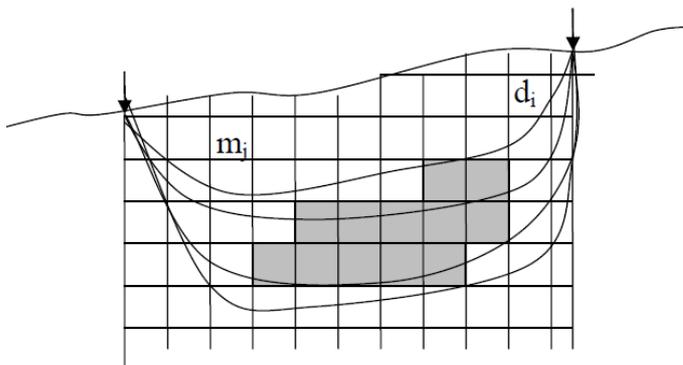
A partire da questa elaborazione è possibile ricavare un modello di sottosuolo a strati piani da cui partire per effettuare poi l'elaborazione di tipo tomografico.

#### 4.2.3. Inversione dei dati

Le registrazioni sismiche di tipo tomografico vengono elaborate, analogamente al caso dell'elettrica, mediante un processo d'inversione dei dati per la ricostruzione di un modello del sottosuolo avente come parametro la velocità delle onde di compressione (o onde P).

Nelle indagini di tomografia sismica l'ipotesi di raggi rettilinei spesso non descrive in maniera realistica il fenomeno della propagazione sismica: infatti, se nell'area indagata si riscontra un'ampia variazione relativa di velocità (maggiore del 15 – 20%), tale ipotesi non è più accettabile (Dines e Lytle 1979).

In tali condizioni ai geofoni giungono, oltre alle onde dirette di trasmissione, anche onde riflesse e rifratte: ciò può comportare che, per il principio di Fermat, il primo arrivo non corrisponda necessariamente ad un raggio diretto e rettilineo come supposto nell'approccio a raggi rettilinei. Per superare tali limitazioni, è stato sviluppato un approccio detto "ray-tracing" (a raggi curvilinei), modellizzando i percorsi sismici con curvature dovute alle variazioni di velocità incontrate. Il metodo del ray-tracing consiste dunque nella ricerca del percorso effettivo del raggio sismico, seguendo il principio di Fermat secondo il quale un'onda, per arrivare da un punto A ad un punto B, non segue il percorso più breve, ma quello di minor tempo necessario (minor energia spesa).



**Figura 4.8.** Schematizzazione del sottosuolo in un modello discreto

E' necessario innanzitutto operare una discretizzazione del dominio: il terreno viene suddiviso in celle rettangolari (Fig. 4.8), di passo anche variabile, all'interno di ognuna delle quali si considera costante il valore del parametro incognito da definire, ovvero della velocità dell'onda.

Si ipotizza, come primo tentativo che il sottosuolo sia stratificato secondo uno schema a strati piano-paralleli dedotto dalle dromocroni. Quindi si calcolano tramite il metodo LTI (Linear Traveltime Interpolation) (Asakawa, Kawanaka, 1993) e modificato da (Cardarelli e Cerreto,



*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*

2002) i tempi di percorrenza  $t_i^{calc}$  e i percorsi teorici che l'onda sismica seguirebbe se il sottosuolo fosse effettivamente stratificato in questo modo.

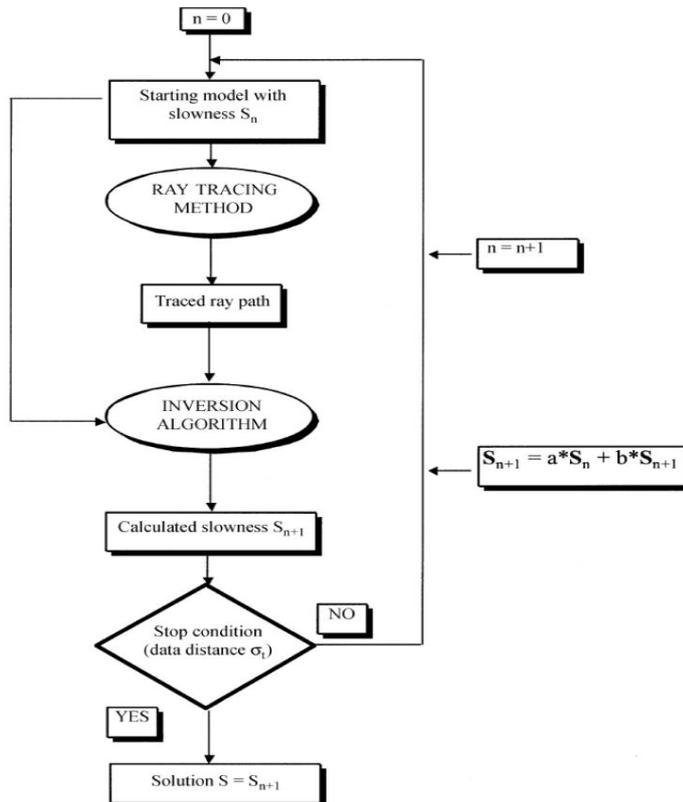
A questo punto, attraverso l'algoritmo di inversione basato sul Gradiente Biconiugato (Cardarelli e De Nardis 2001) si ottengono i valori di velocità aggiornati e si ricavano i nuovi tempi di percorrenza a partire dal nuovo modello.

Confrontando tali informazioni con i tempi misurati in campagna  $t_i^{obs}$ , si stima lo scarto quadratico medio:

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_i^{calc} - t_i^{obs})^2}{N}}$$

con N pari al numero totale dei percorsi.

Il processo iterativo che ne consegue è basato su successivi aggiornamenti del modello di velocità, rappresentato in Fig. 4.9, e viene interrotto quando viene raggiunto un valore dello scarto quadratico medio  $\sigma_t$  reputato accettabile. Conseguentemente il modello di velocità ottenuto all'ultima iterazione è quindi il modello di sottosuolo desiderato.



**Figura 4.9.** Diagramma a blocchi comprendente gli algoritmi di ray-tracing e di inversione (Cardarelli e Cerreto, 2002)



*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*

L'elaborazione dei dati di tomografia sismica a rifrazione avviene praticamente attraverso il software TOMOGUI (Cardarelli e Cerreto, 2002) realizzato in ambiente Fortran dall'Area di Geofisica – Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università di Roma “La Sapienza”.

Per maggior chiarezza espositiva si riporteranno i risultati divisi per allineamento, mostrando poi all'interno di ogni allineamento le singole linee sismiche. Si riporta in Fig. 4.10 l'ubicazione delle linee sismiche su cartografia CTR 1:10000.



**Figura 4.10.** Ubicazione linee sismiche a rifrazione su carta CRT 1:10000.

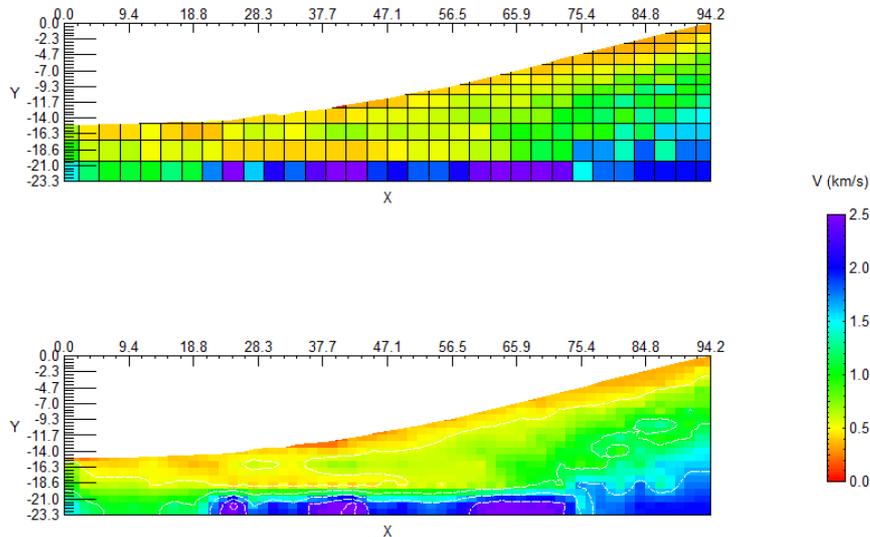
L'errore massimo dei modelli mostrati di seguito per le cinque linee, espresso in termini di scarto quadratico medio è di circa 2.5 ms (pari a circa il 10.5%) a conferma anche in questo caso dell'affidabilità delle ricostruzioni geofisiche.

**4.3. ALLINEAMENTO L1 (linee 1A e 1B)**

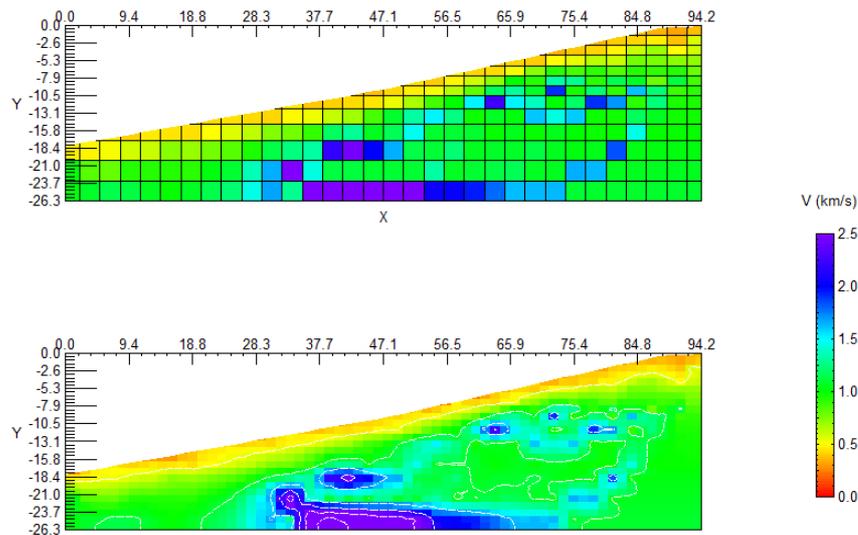
Il modello di velocità delle onde di compressione della linea L1A, relativa alla parte bassa dell'allineamento L1, è mostrato in Fig. 4.11.

Nel modello mostrato si notano tre strati a differenti velocità: il primo, molto superficiale, con velocità non superiori a 0.5 km/s e spessore di circa 2-3 m (rosso), il secondo con velocità si circa 1 km/s che raggiunge i 13 m circa di profondità (verde) ed il terzo con velocità di circa 2-2.5 km/s e profondità da 6 a 18 m dal p.c. (blu - fondo modello).

“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale



**Figura 4.11.** Modello di velocità delle onde P relativo alla linea L1A. Le quote sono normalizzate in funzione della massima quota raggiunta dall'indagine (ca. 270 m s.l.m.m.)



**Figura 4.12.** Modello di velocità delle onde P relativo alla linea L1B. Le quote sono normalizzate in funzione della massima quota raggiunta dall'indagine (ca. 282 m s.l.m.m.)

Una simile stratificazione è mostrata anche in Fig. 4.12 ove è raffigurato il modello di velocità della linea L1B, situata a quote più elevate.

Dal confronto con il rispettivo modello di resistività (Fig. 3.12 prima parte), relativo all'allineamento L1, si nota che:

- lo strato a bassa velocità ( $< 500$  m/s) è relativo ad una coltre superficiale di terreno maggiormente areato, a carattere limoso;

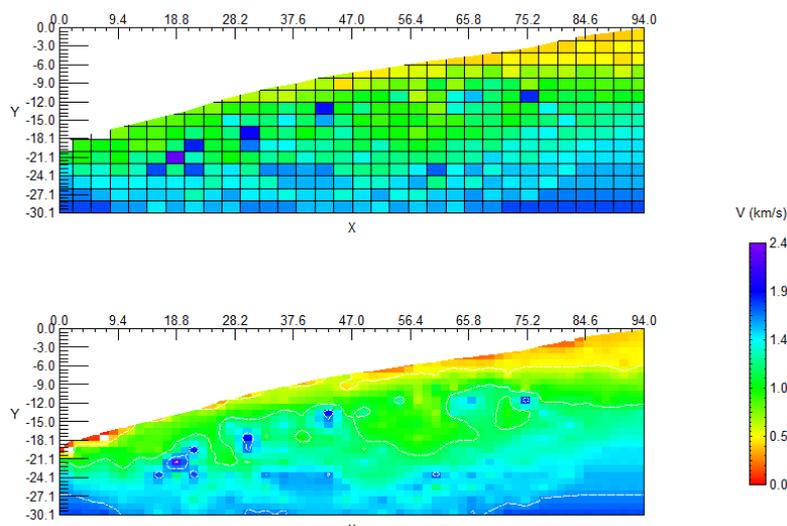


*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*

- lo strato intermedio a velocità di ca.500-1000 m/s corrisponde alle alluvioni recenti limo-argillose aventi bassa resistività in Fig. 3.12;
- lo strato ad alta velocità di Figg. 4.11 e 4.12 ( $> 1500$  m/s) è da relazionarsi allo strato sabbio-ghiaioso ad alta resistività di Fig. 3.12 essendo le quote del tetto dei due strati assolutamente comparabili (ca. 250 s.l.m.m.).
- l'identificazione del flysch marnoso non è risultata fattibile tramite tale tecnica.
- in alcuni punti si notano valori alti di velocità (colore blu) anche a quote più elevate, forse dovuti ad una facies più sabbiosa, all'interno della formazione limo-argillosa, come visto in precedenza per le indagini elettriche;
- infine, anche in questo caso, lo strato ad alta velocità relativo alle ghiaie sembra esaurirsi alla fine della linea L1B (Fig. 4.12), a testimonianza dell'assottigliamento di tale strato a quote elevate.

*4.4. ALLINEAMENTO L2 (linee 2A e 2B)*

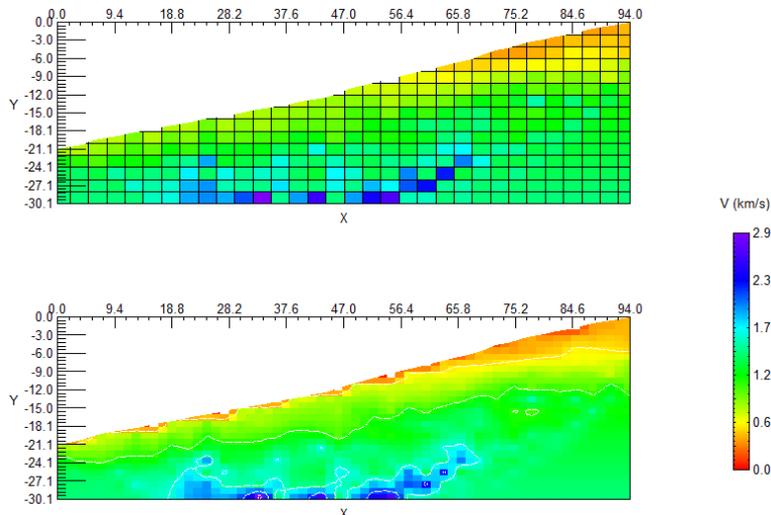
Il modello di velocità delle onde di compressione della linea L2A, relativa alla parte bassa dell'allineamento L2, è mostrato in Fig. 4.13, mentre il corrispondente modello relativo alla linea L2B è raffigurato in Fig. 4.14.



**Figura 4.13.** Modello di velocità delle onde P relativo alla linea L2A. Le quote sono normalizzate in funzione della massima quota raggiunta dall'indagine (ca. 270 m s.l.m.m.)



**“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale**

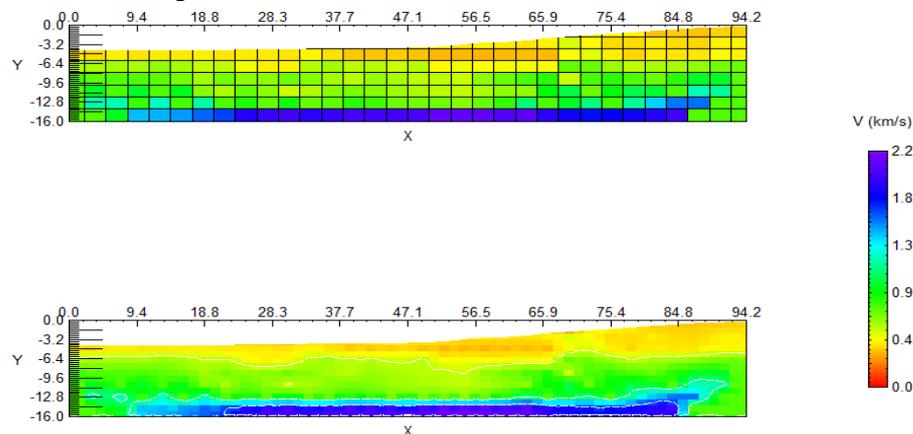


**Figura 4.14.** Modello di velocità delle onde P relativo alla linea L2B. Le quote sono normalizzate in funzione della massima quota raggiunta dall'indagine (ca. 282 m s.l.m.m.)

Anche in questo caso si notano i due macro strati visti in precedenza, corrispondenti alle due tipologie di alluvioni, con spessori e andamenti simili. Pertanto viene confermato, come già accaduto nel caso delle indagini elettriche, che questa stratificazione ha una continuità laterale nella direzione perpendicolare alle sezioni mostrate, e non è quindi il risultato di effetti locali, ma rappresenta l'effettivo andamento delle formazioni nella zona della spalla destra della diga.

**4.5. ALLINEAMENTO L3 (linea 3)**

Anche la linea 3 relativa all'allineamento L3 in Fig.4.10, conferma le considerazioni precedenti. Infatti il modello finale riportato in Fig. 4.15 configura 2 strati (verde, media velocità; blu, alta velocità) con l'aggiunta di uno strato areato più superficiale (colore rosso) non continuo però sull'intera linea.



**Figura 4.15.** Modello di velocità delle onde P relativo alla linea L3. Le quote sono normalizzate in funzione della massima quota raggiunta dall'indagine (ca. 262 m s.l.m.m.)



*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*

---

*4.6. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE*

Come già visto per le indagini elettriche, anche le indagini sismiche a rifrazione hanno restituito modelli affidabili, con errori limitati (ca. 10%) e una stratificazione in accordo ai modelli resistività si per quanto riguarda lo spessore che l'andamento delle formazioni nella zona in esame. In particolare sono state individuate le due formazioni alluvionali, caratterizzate da velocità di circa 500-1000 m/s (alluvioni recenti) e maggiore di 1500 m/s (alluvioni recenti), in cui l'interfaccia tra le due formazioni è collocata a ca. 250-255 m s.l.m.m., mentre la formazione marnoso-arenacea non è stata individuata con questa tipologia di metodo.

Alla luce dei risultati delle indagini superficiali sono stati programmati e posizionati i 3 fori di sondaggio da eseguirsi sia per la validazione delle profondità e dell'andamento laterale delle formazioni presenti, sia per la caratterizzazione delle stesse ai fini sismici, tramite il calcolo del valore della velocità equivalente delle onde di taglio nei primi 30 m di sottosuolo (VS30), come da Normativa vigente.



## **5. INDAGINE DOWNHOLE**

### *5.1. FORI DI SONDAGGIO ED OPERAZIONI ACCESSORIE*

I sondaggi geognostici e le operazioni preliminari necessarie per la loro preparazione ai fini dell'indagine down-hole, sono eseguite a cura dell'impresa GEO s.r.l. di Arpino (FR), che ha fornito per ogni sito il rapporto tecnico di caratterizzazione stratigrafica redatto dall'impresa esecutrice dei sondaggi.

Per motivi di rappresentazione grafica, nella presente relazione si potrà fare ricorso a stratigrafie semplificate, che in nessun modo sono sostitutive delle stratigrafie complete, ma hanno il solo scopo di una migliore leggibilità ai fini del confronto delle stratigrafie con i risultati delle prove downhole.

A seguito della perforazione, i fori di sondaggio sono stati opportunamente attrezzati con tubo di rivestimento in PVC di diametro interno pari a 80 mm, ed è stata eseguita la cementazione dell'intercapedine foro-tubo, in modo da garantire la continuità del contatto terreno-tubazione su tutta la verticale di sondaggio.

Una volta terminate le operazioni di rivestimento e cementazione, l'interno dei tubi è stato lavato con acqua pulita e lasciato pieno d'acqua. Al fine di garantire una completa ed ottimale cementazione, la prova geofisica è stata eseguita oltre 20 giorni dalla fine delle operazioni di posa del rivestimento. Ciascun foro di sondaggio, attrezzato nel modo anzidetto, è stato protetto da un pozzetto in cemento, chiuso e reso inamovibile.

Preliminarmente a ciascuna prova downhole, il foro di sondaggio è stato svuotato completamente dall'acqua presente, ai fini di massimizzare l'ampiezza in ricezione dell'onda SH generata in superficie.

La campagna di indagine downhole è stata effettuata dal 15 al 17 novembre 2016.

### *5.2. MODALITÀ DI ESECUZIONE DELLA PROVA*

In questa sezione, si forniscono sinteticamente le caratteristiche della strumentazione utilizzata, nonché la geometria e i parametri di acquisizione impiegati per il rilievo downhole.

#### *5.2.1. Strumentazione*

La strumentazione utilizzata è costituita da tre componenti principali: la sorgente, i ricevitori e l'acquisitore digitale (sismografo).

Le caratteristiche delle sorgenti da impiegare sono principalmente legate al tipo di perturbazione sismica che si vuole generare. Generalmente, è necessario impiegare tipologie differenti a seconda che si vogliano generare principalmente onde P (longitudinali) o onde S (onde di taglio).

Per la generazione prevalente di onde SH si è impiegata una sorgente in alluminio costruita dall'Area di Geofisica del DICEA con fondi di Ateneo della “Sapienza”.



*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*

---

Tale sorgente (Fig. 5.1) permette la generazione di onde SH tramite l’impatto di una massa battente su una piastra di battuta sub verticale. La reversibilità del verso di battuta consente di eseguire una lettura dell’onda S per opposizione di fase sul sismogramma. Per quanto riguarda le onde P, esse vengono ricavate da una prova che impiega battute verticali su piastra metallica (Fig. 5.2).

Per l’acquisizione e la registrazione dei dati si è impiegato il sismografo digitale a 24 canali ES-3000 Geode<sup>®</sup> di Geometrics Inc., con intervallo di campionamento minimo pari a 31  $\mu$ s e massimo numero di campioni registrabili pari a 16.384.

Il sismografo si interfaccia con un laptop su cui è possibile visualizzare in tempo reale il dato acquisito e nello stesso tempo monitorare il livello del rumore ambientale.

Completa la strumentazione il Geofono tridirezionale BHG-2 Geostuff<sup>®</sup> (Frequenza nominale 14 Hz), il quale viene ancorato alla parete del foro tramite meccanismo di serraggio elettrico in metallo, controllato tramite un’unità remota. Tale geofono a tre componenti è dotato di bussola per l’orientamento in foro.



**Figura 5.1** Sorgente a impatto per la generazione di onde SH.



**Figura 5.2.** Generazione di onde P tramite colpo vibrato in verticale su piastra metallica.



*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*

---

### 5.2.2. Misure preliminari ed impostazione dei parametri di acquisizione

Preliminarmente all’installazione della strumentazione, è necessario procedere alla calibrazione delle bussole per l’orientazione del geofono da foro BGH2.

Quando viene utilizzata la sorgente in alluminio per la generazione delle onde SH, per massimizzare la generazione delle onde SH si dispone la sorgente in maniera tale che l’asse di simmetria passante per le due piastre di battuta della sorgente sia perpendicolare alla congiungente tra il foro e la sorgente (Fig. 5.3a).

A seguito di alcune misure preliminari, sono stati selezionati i parametri di acquisizione (mantenuti costanti per tutti e quattro i downhole) riportati in Tab. 5.1.

- |   |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>- Intervallo di campionamento: <math>\Delta t = 62.5 \mu s</math></li><li>- Lunghezza della traccia: <math>T_l = 1.024 s</math></li><li>- Filtri in acquisizione: NO</li><li>- Salvataggio: manuale</li><li>- Energizzazione: azionamento manuale</li><li>- Stacking: SI</li><li>- Formato file: SEG2 (Pullan 1990)</li><li>- Acquisizione separata rilievi onde P ed onde S.</li></ul> |
|---|

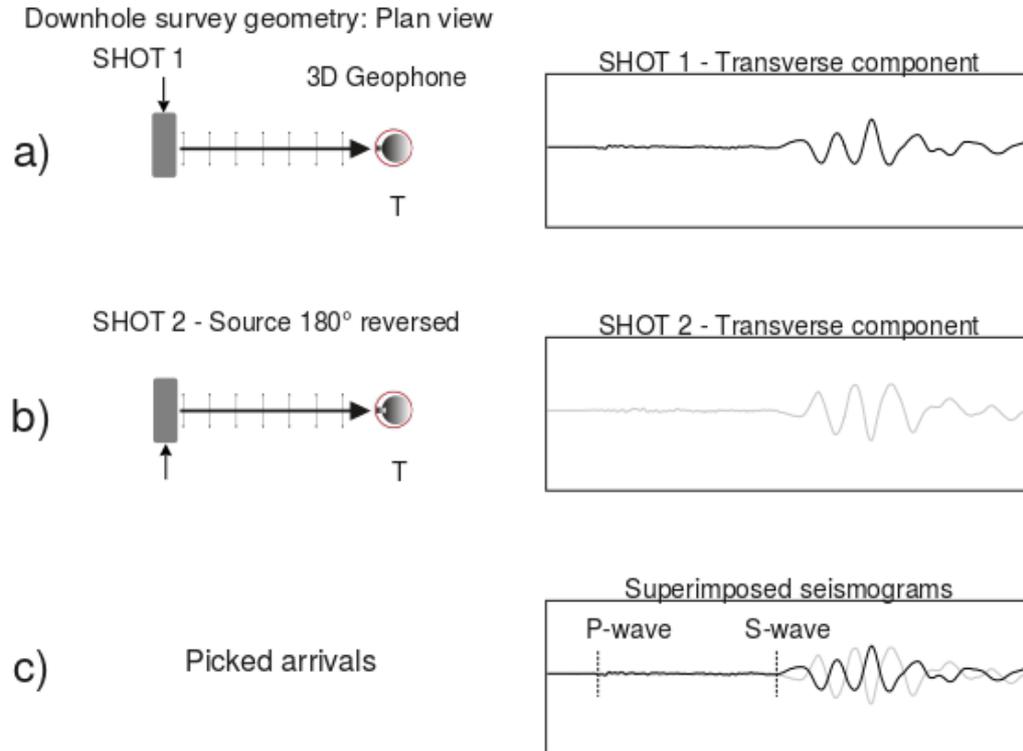
*Tabella 5.1. Parametri di acquisizione indagine downhole.*

### 5.2.3. Geometria del rilievo e modalità d’interpretazione dei risultati

I dati vengono acquisiti posizionando la sorgente ad una distanza fissa dal foro di sondaggio, e spostando successivamente il geofono tridirezionale a diverse profondità. Le stazioni di misura sono poste ad intervalli di un metro lungo la verticale del foro.



“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale



**Figura 5.3:** Identificazione dell'arrivo dell'onda di taglio sul sismogramma relativo alla componente trasversale del geofono da foro. La direzione di battuta è normale alla congiungente i due fori. a) Viene eseguita la prima energizzazione (Shot 1). b) La direzione di battuta viene ruotata di 180° rispetto alla direzione del primo scoppio e viene eseguita una nuova energizzazione. c) Identificazione del tempo di arrivo dell'onda S per opposizione di fase sovrapponendo i sismogrammi registrati per ciascun verso di scoppio (da Cercato et al. 2010, modificato).

Nel caso del rilievo ad onde S, per ogni stazione di misura, si sono eseguite un minimo di due registrazioni, invertendo almeno una volta l'orientazione della sorgente.

Per ciascuna stazione di misura il numero di energizzazioni ripetute (*stacking*) ed il numero di registrazioni è stato scelto sulla base della stima in tempo reale del rapporto segnale-rumore.

In linea di principio, le letture sono da effettuarsi individuando i tempi di primo arrivo dal verso opposto della partenza dell'onda S sulla componente trasversale di sismogrammi registrati alla stessa profondità e relativi alle due direzioni di energizzazione (disposte a 180°), come mostrato in Fig. 5.3. L'interpretazione delle misure viene eseguita ipotizzando una propagazione rettilinea tra sorgente e ricevitore, generalmente considerata valida per le piccole distanze in gioco in un'indagine di questo tipo.



### 5.3. ANALISI E INTERPRETAZIONE DATI

#### 5.3.1. Processing dei sismogrammi

Pur mantenendo la prova downhole la caratteristica di misura sismica semi-diretta, che non dovrebbe dunque richiedere un particolare tipo di processing del segnale, alcune operazioni possono rendersi necessarie ai fini della restituzione dei sismogrammi per l'individuazione dei tempi di arrivo, in particolare dell'onda S.

In primo luogo, tutti i sismogrammi registrati vengono ispezionati visivamente.

Alcune analisi possono essere d'aiuto per le operazioni successive, come il calcolo dello spettro di Ampiezza (*Amplitude Fourier spectrum*) o lo spettro frequenza-tempo (*Gabor spectrum*) al fine di individuare le frequenze caratteristiche dei segnali presenti sul sismogramma, nonché per guidare eventuali operazioni di filtraggio in frequenza.

Nel caso in cui si riconosca la presenza di rumore al di fuori della banda di frequenza del segnale, le tracce sismiche possono essere filtrate.

Nelle indagini oggetto della presente relazione, si è applicato un filtro “taglia alto”, con frequenza di taglio pari a 300 Hz, per eliminare il rumore ad alta frequenza. Altre operazioni accessorie hanno riguardato l'operazione di *muting* della parte iniziale di alcuni sismogrammi, dove era troppo evidente il disturbo elettrico indotto dall'apertura del circuito di registrazione. Nel caso in cui siano presenti più sismogrammi per assegnati profondità e verso di energizzazione, si decide, in dipendenza dal rapporto segnale rumore, se eseguire la somma delle singole registrazioni (*stacking*), ovvero si individua un solo file da utilizzare per la successiva operazione di lettura dei tempi (*picking*).

La prima operazione che è necessario compiere per impostare la fase di *processing* consiste nell'inserimento su ciascun file delle informazioni sulla geometria, quali profondità di sorgente e ricevitore, angolo di scoppio etc.

Si procede quindi ad estrarre, per ogni file, la sola componente d'interesse ai fini del rilievo.

Per indagini ad onde P viene estratta la componente verticale, mentre per le onde S viene generalmente estratta la componente trasversale, sulla quale, data la geometria del rilievo, è massimizzata l'ampiezza in ricezione dell'onda SH generata in superficie.

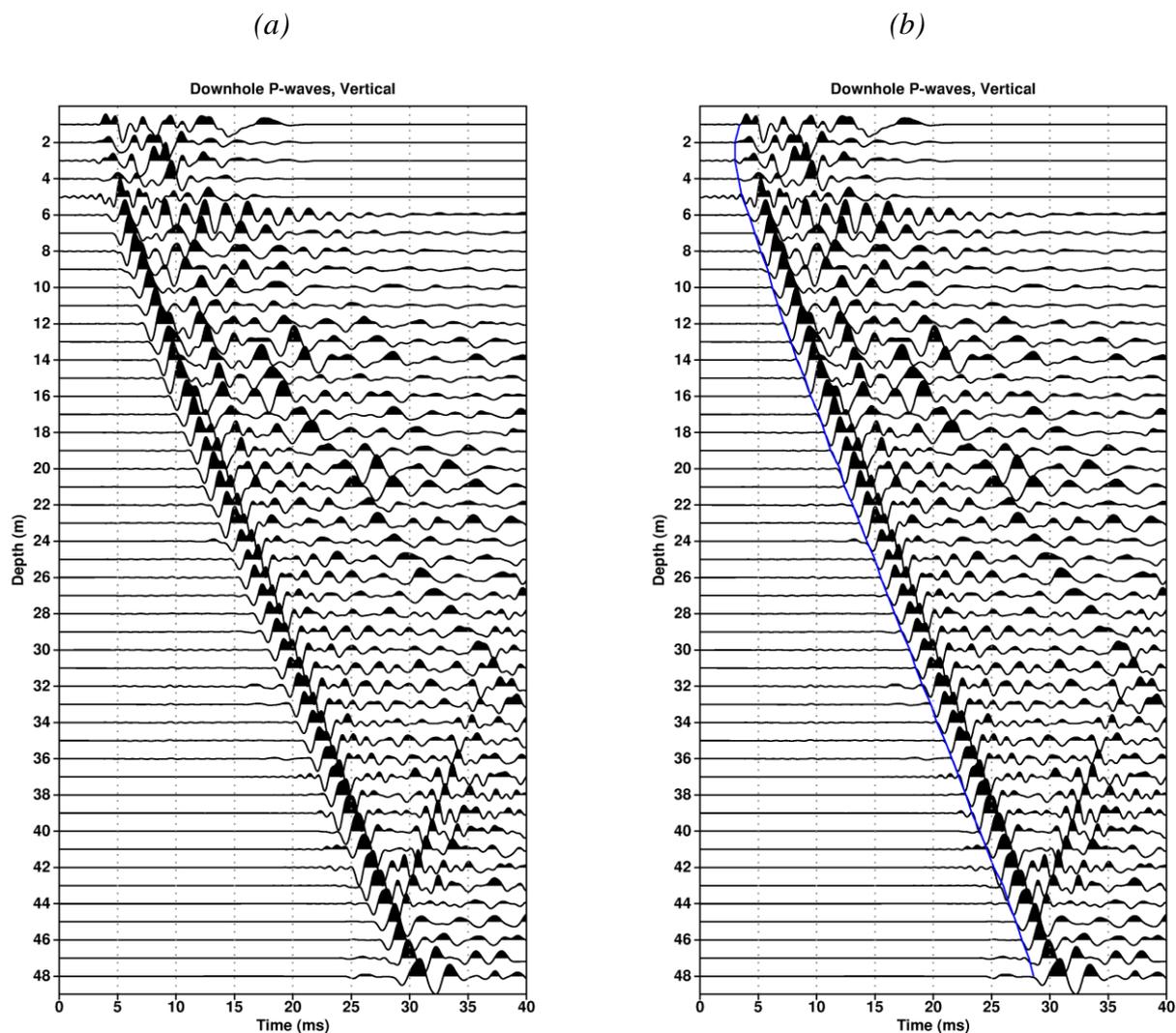
#### 5.3.2. Individuazione dei tempi di arrivo delle onde P e delle onde S

Per ciascun verso di energizzazione, si costruisce un pannello costituito dalla componente d'interesse per tutte le profondità di misura.

Per le onde P si ha a disposizione una traccia per ciascuna profondità. Su ciascuna traccia, il primo arrivo costituisce il tempo individuato per l'arrivo dell'onda P (Fig. 5.4).



“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale



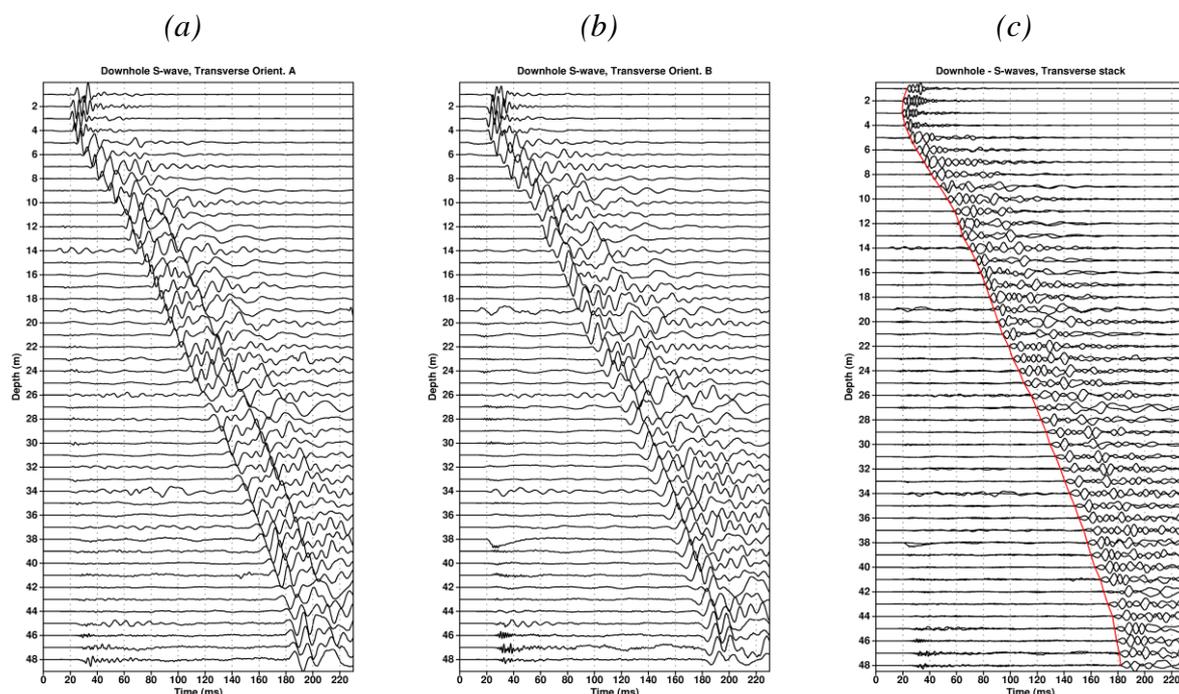
**Figura 5.4:** Esempio di picking dei tempi di arrivo delle onde P. (a) Pannello riportante le registrazioni della componente verticale di un'indagine downhole. (b) Lo stesso pannello riportato in (a), con evidenziati in blu i tempi di arrivo dell'onda P (primi arrivi).

Nei rilievi ad onde S (Fig. 5.5), al termine di questa prima fase il set di dati è costituito da due file sismici, relativi alle due direzioni di energizzazione opposte, riportanti le tracce (trasversali) registrate per ciascuna profondità di misura (ogni metro, lungo la verticale di sondaggio).

Tali file vengono generalmente rappresentati come sovrapposti (Fig. 5.5c) per evidenziare l'arrivo dell'onda S.



**“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale**



**Figura 5.5:** Esempio di picking dei tempi di arrivo delle onde S sulle registrazioni relative alla componente trasversale per le diverse profondità di registrazione di un'indagine downhole. (a) e (b) Pannelli relativi a due versi opposti di energizzazione. (c) Pannello ottenuto dalla sovrapposizione dei pannelli (a) e (b), con evidenziati in rosso i tempi di arrivo dell'onda S, individuati dall'opposizione di fase dei sismogrammi relativi ai due versi di energizzazione.

L'arrivo del segnale viene individuato sulla base delle seguenti osservazioni:

- Presenza di impulsi speculari nelle componenti orizzontali delle registrazioni effettuate con energizzazioni di verso opposto.
- Variazione di frequenza del treno d'onda.

Il picking degli arrivi delle onde S è effettuato manualmente confrontando, per ogni profondità di stazione, le due polarizzazioni opposte dell'onda di taglio SH (realizzate in campagna tramite rotazione relativa della sorgente sismica di 180°).

In caso di problemi di lettura, che rendono difficile l'individuazione del tempo di arrivo, si integra l'analisi con le letture dei primi massimi.

### 5.3.3. Determinazione delle velocità sismiche (P ed S) degli strati

A seguito della determinazione dei tempi di arrivo delle onde (P ed S) sui relativi sismogrammi secondo quanto descritto in precedenza, l'operazione successiva consiste nella cosiddetta “riduzione alla verticale” dei tempi letti.

Difatti, poiché le onde sismiche prodotte dalla sorgente non si propagano esattamente in direzione verticale, a causa dell'offset  $d$  tra sorgente e asse del sondaggio (Fig. 5.6) è



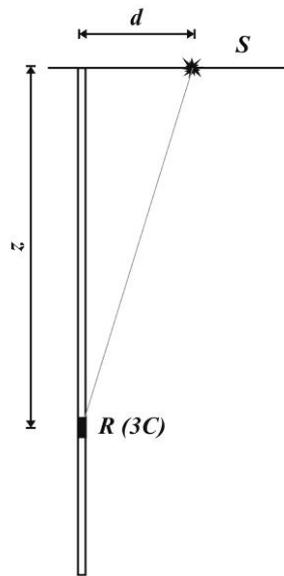
*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*

necessario correggere i tempi di arrivo individuati sul sismogramma per tenere conto dell’inclinazione del percorso effettivo.

Se con  $t_o(z)$  indichiamo il tempo di arrivo di un’onda sismica (P o S) relativamente alla profondità di stazione  $z$ , il tempo corretto  $t_c(z)$  si ottiene tramite la formula:

$$t_c(z) = \frac{z}{\sqrt{z^2 + d^2}} t_o(z) \quad (1)$$

dove  $z$  è la profondità dei ricevitori,  $d$  è l’offset (distanza orizzontale) tra sorgente e foro (Fig. 5.6).



$$t_c(z) = \frac{z}{\sqrt{z^2 + d^2}} t_o(z)$$

**Figura 5.6:** Parametri geometrici e formula per la correzione dei tempi downhole (riduzione alla verticale).

La correzione va applicata a ciascuno dei tempi letti per ottenere le curve profondità-tempi corretti o *dromocrone* (Fig. 5.7). I tratti di dromocrona a pendenza omogenea individuano gli strati a differente velocità o sismostrati.



“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale

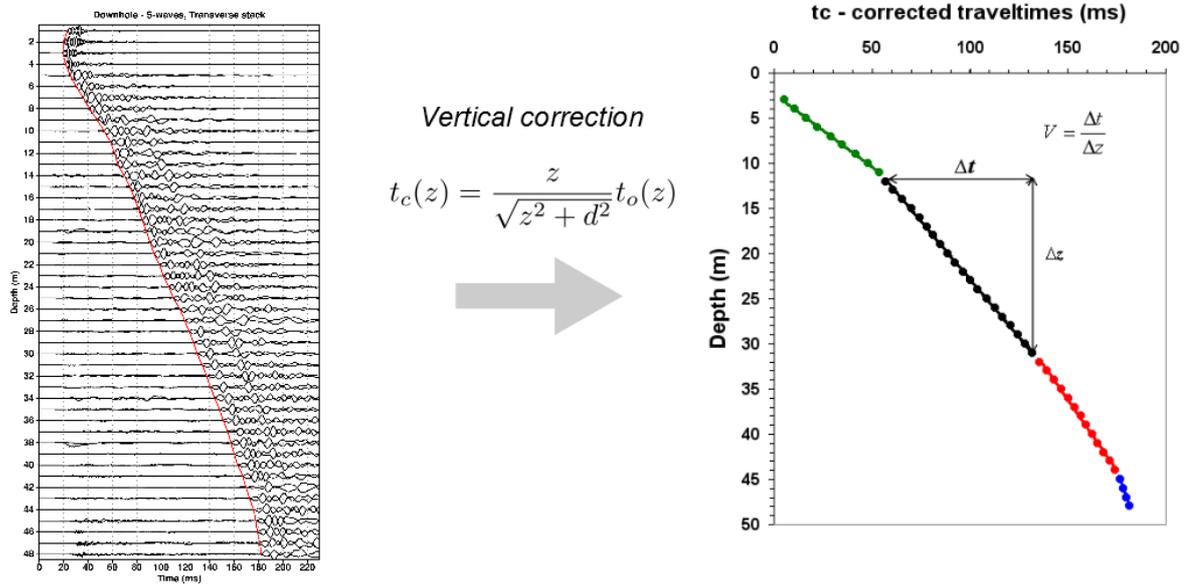


Figura 5.7. Riduzione alla verticale: dai tempi individuati sul sismogramma ai tempi corretti.

Per ciascun sismostrato, si deriva la velocità sismica dalle pendenze delle dromocrone, eventualmente utilizzando una linea di tendenza che interpola i punti relativi ai singoli tratti d’interesse (Fig. 5.8).

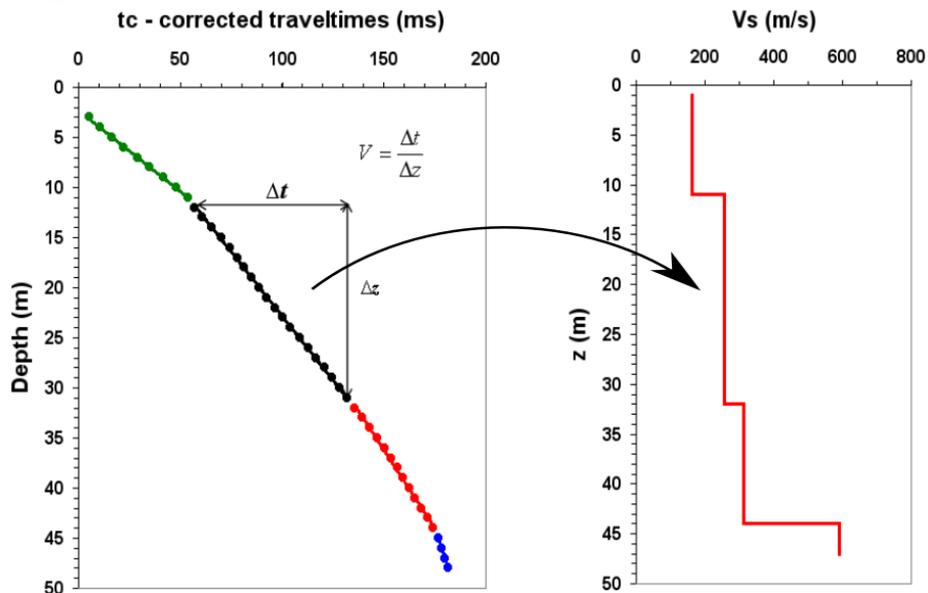


Figura 5.8. Determinazione delle velocità dei singoli sismo strati dalla pendenza delle dromocrone.

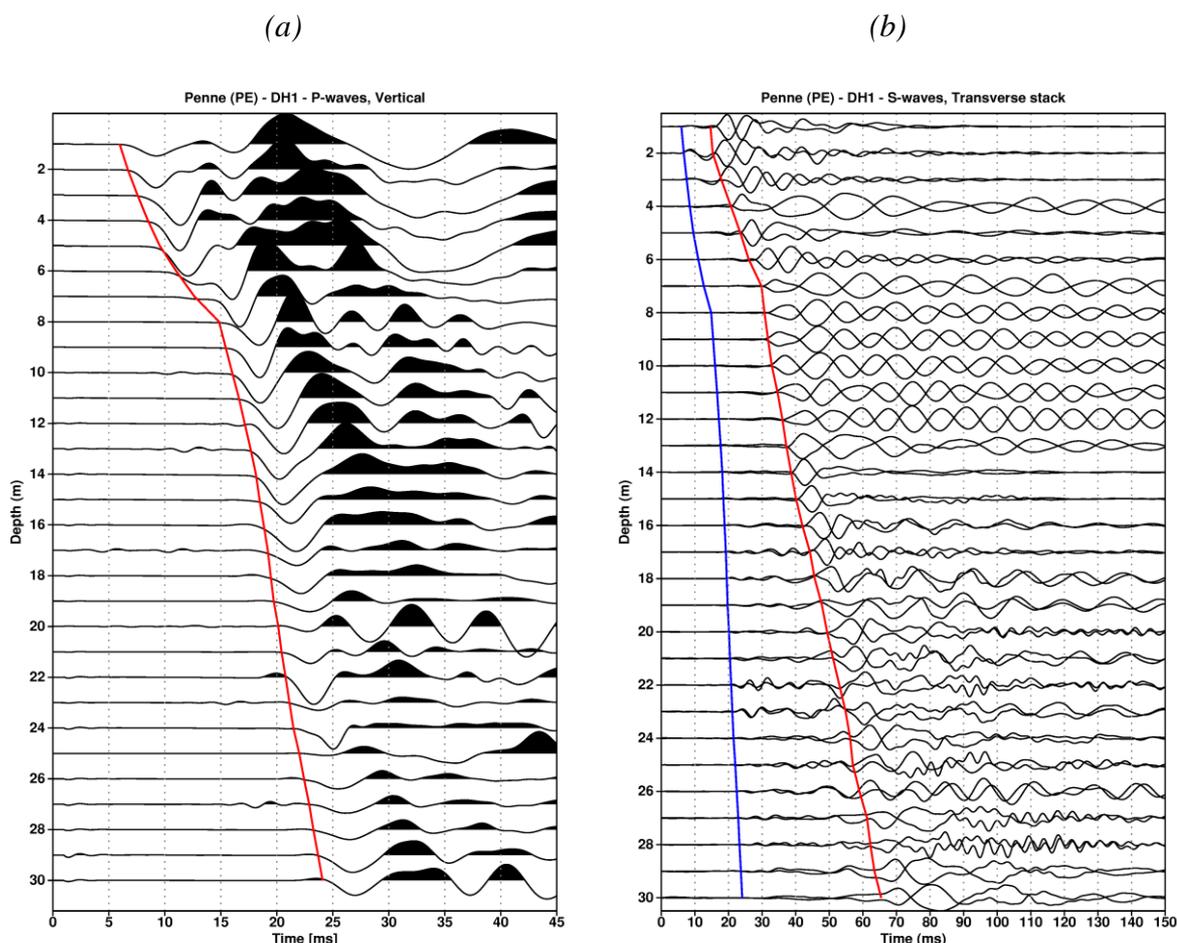
Nei paragrafi successivi, sono riportati i risultati relativi a ciascuna delle prove downhole eseguite nell’ambito della convenzione tra e il DICEA citata nella Premessa.



#### 5.4. SONDAGGIO SG1

Per l’ubicazione del sondaggio SG1 si può fare riferimento alla Fig. 1.1. La stratigrafia completa (in allegato) è stata compilata a cura della società Geo srl di Arpino (FR).

Nella Fig. 5.9, sono riportate le registrazioni eseguite alle diverse profondità, con evidenziati i tempi di arrivo delle onde P ed S, così come risultanti dall’operazione di *picking*.

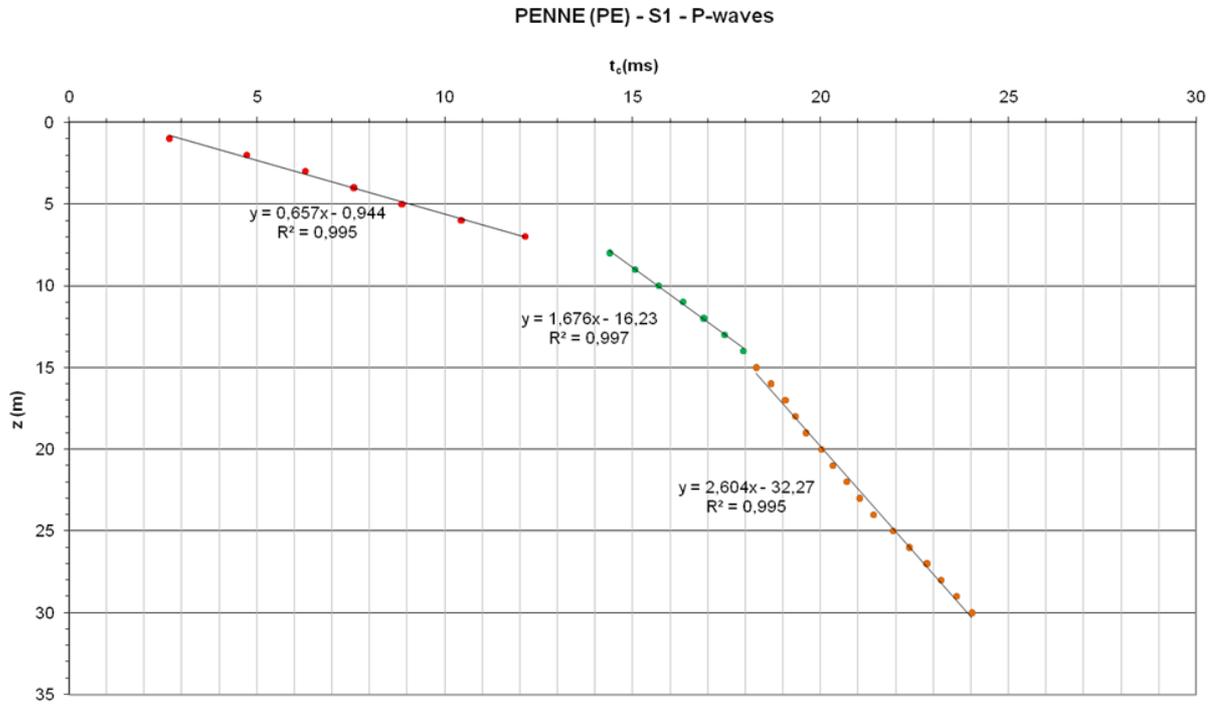


**Figura 5.9:** Penne (PE) –SG1. (a) Onde P, componente verticale. La linea rossa individua i tempi di primo arrivo.(b) Onde S, stacking della componente trasversale relativa ai due versi opposti di energizzazione. La linea rossa individua i tempi di arrivo dell’onda S, mentre la linea blu riporta i tempi di primo arrivo individuati in (a).

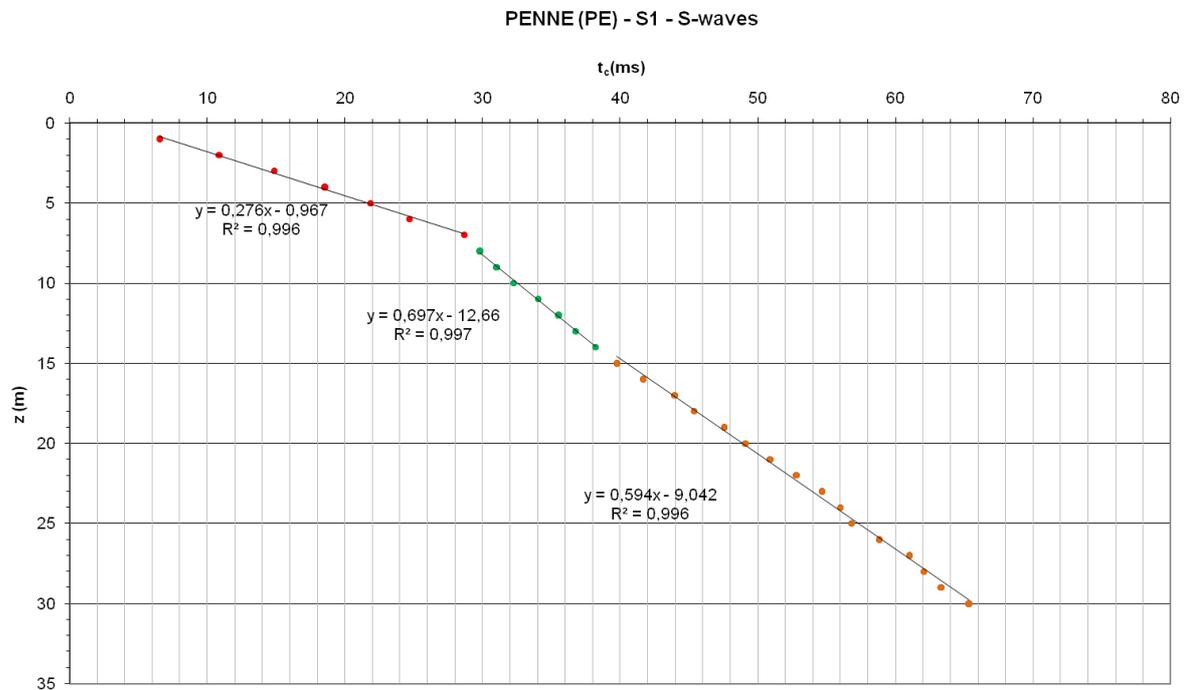
Nelle Figg. 5.10 e 5.11 sono rappresentate le dromocrone dei tempi corretti in funzione della profondità, rispettivamente per le onde P e per le onde S. In tali figure sono evidenziati con colori diversi i tratti a pendenza omogenea, che individuano i singoli sismostrati.



**“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale**



**Figura 5.10.** SG1 - Onde P. Dromocrone e rette di regressione per la stima delle velocità dei singoli sismostrati.



**Figura 5.11.** SG1 - Onde S. Dromocrone e rette di regressione per la stima delle velocità dei singoli sismostrati

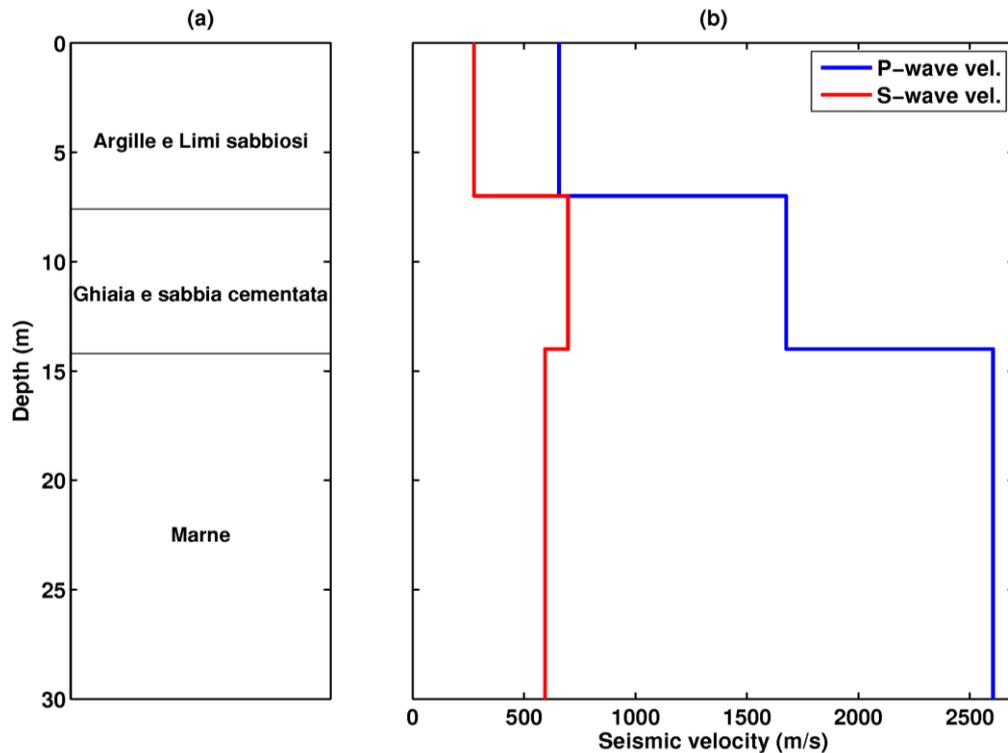


*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*

Il coefficiente angolare della retta interpolante i tempi relativi a ciascuno strato, ottenuta tramite un'operazione di regressione ai minimi quadrati, individua la velocità dello strato. Nella Tab. 5.2 è riportato il modello monodimensionale di velocità ricavato dalla sequenza interpretativa, unitamente ai rapporti tra le velocità delle onde di corpo ed al coefficiente di Poisson  $\nu$ .

<i>Strato</i>	$z_t$ (m)	$z_b$ (m)	$h$ (m)	$V_P$ (m/s)	$V_S$ (m/s)	$V_P / V_S$	$V_S / V_P$	$\nu$
1	0	7	7	657	273	2.38	0,42	0.39
2	7	14	7	1676	697	2.40	0,42	0.40
3	14	30	16	2604	594	4.38	0,23	0.47

**Tabella 5.2.** Penne(PE)- SGI. Modello sismo stratigrafico risultante dall'indagine downhole.  $z_t$  e  $z_b$  sono rispettivamente le profondità del tetto e del letto di ciascuno strato,  $\nu$  è il coefficiente di Poisson.



**Figura 5.12.** Penne (PE) – SGI. (a) Colonna stratigrafica semplificata. (b) Andamento delle velocità con la profondità, come da Tabella 3



*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*

---

L'andamento delle velocità ben si rapporta alle variazioni stratigrafiche (Fig. 5.12).

Si osserva in generale una buona corrispondenza tra litotipi e variazioni di velocità. Le ghiaie e le sabbie cementate intermedie (7.6 – 14.2 m dal p.c.) sono caratterizzate da velocità sismiche dell'ordine dei 700 m/s per le onde S e dei 1700 m/s per le onde P.

Al di sotto di tali ghiaie, la Marna presente mostra una velocità delle onde S dell'ordine dei 600 m/s fino a circa 30 m, con una leggera inversione di velocità rispetto alle ghiaie soprastanti, mentre la velocità delle onde P di tale formazione è dell'ordine dei 2600 m/s.



*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*

5.5. *SONDAGGIO SG2*

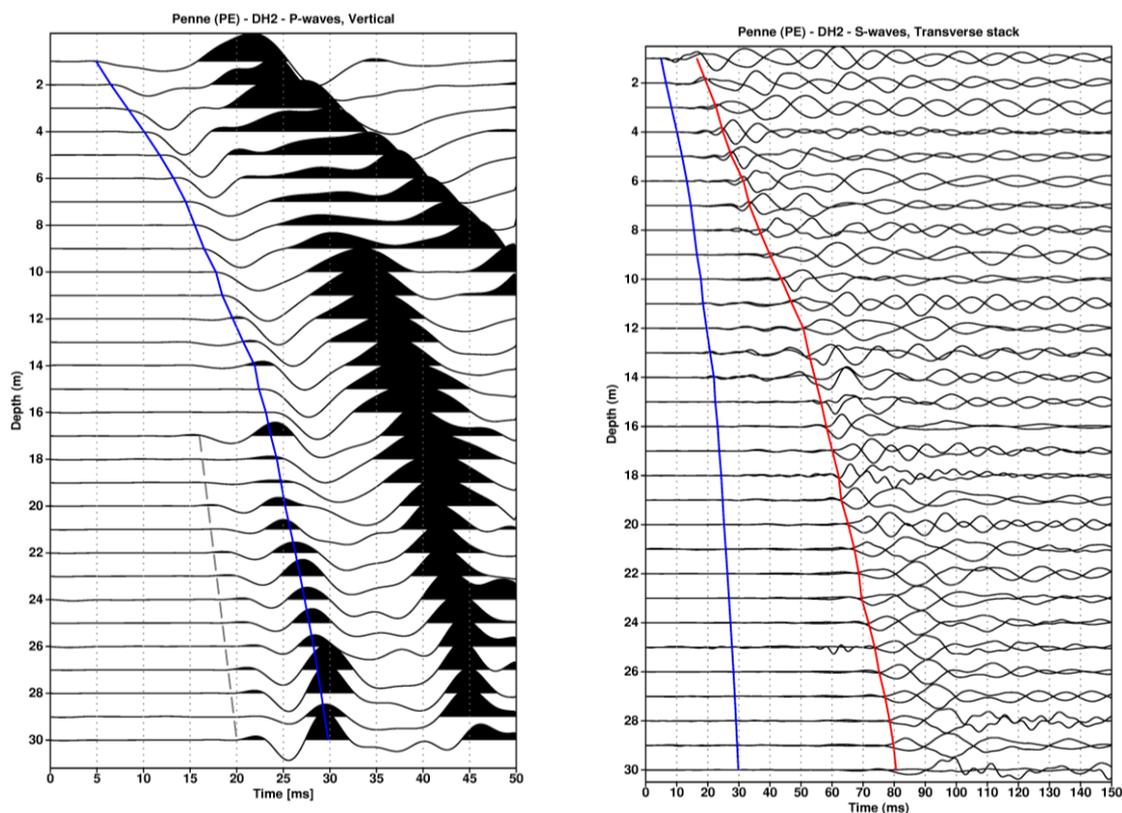
Per l’ubicazione del sondaggio SG2 si può fare riferimento alla Fig. 1.1. La stratigrafia completa (in allegato) è stata compilata a cura della società Geo srl di Arpino (FR).

Nella Fig. 5.13, sono riportate le registrazioni eseguite alle diverse profondità, con evidenziati i tempi di arrivo delle onde P ed S, così come risultanti dall’operazione di *picking*.

In particolare, nella Fig. 5.13.a è evidenziato, assieme ai picking dei tempi di arrivo dell’onda P (blu), con il colore grigio una fase relativa all’onda che ha viaggiato lungo la corona cementata, e non costituisce un’onda sismica che ha viaggiato nel terreno.

(a)

(b)

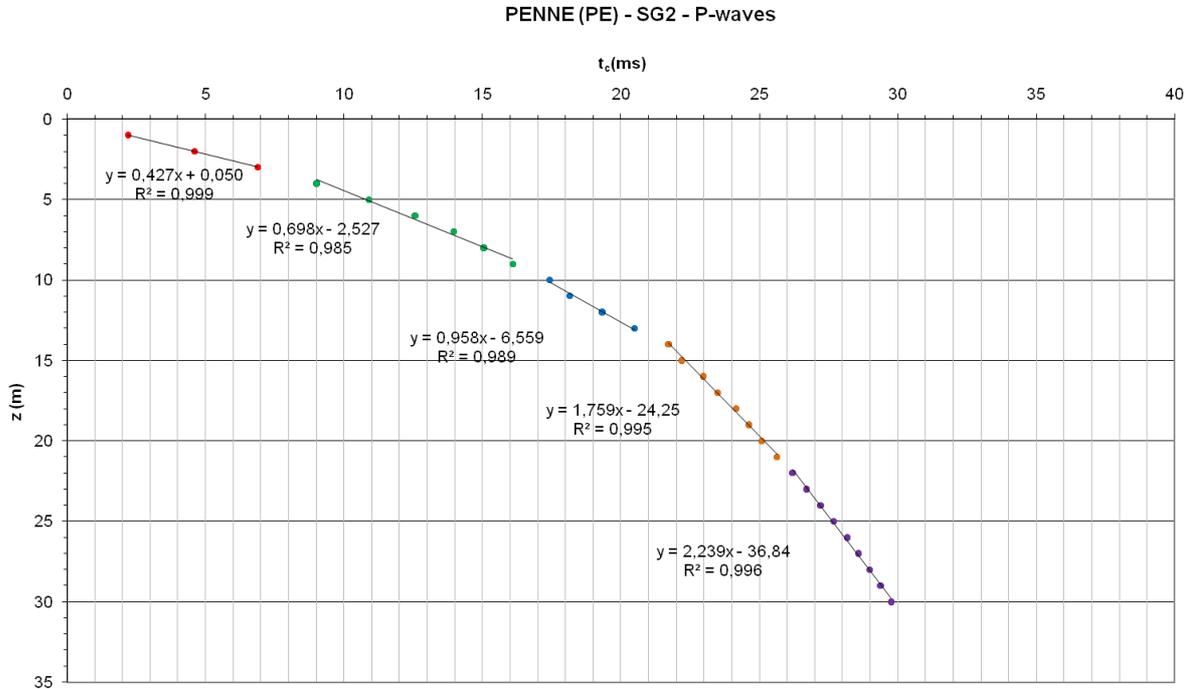


**Figura 5.13:** Penne (PE) –SG2. (a) Onde P, componente verticale. La linea blu individua i tempi di primo arrivo.(b) Onde S, stacking della componente trasversale relativa ai due versi opposti di energizzazione. La linea rossa individua i tempi di arrivo dell’onda S, mentre la linea blu riporta i tempi di primo arrivo individuati in (a).

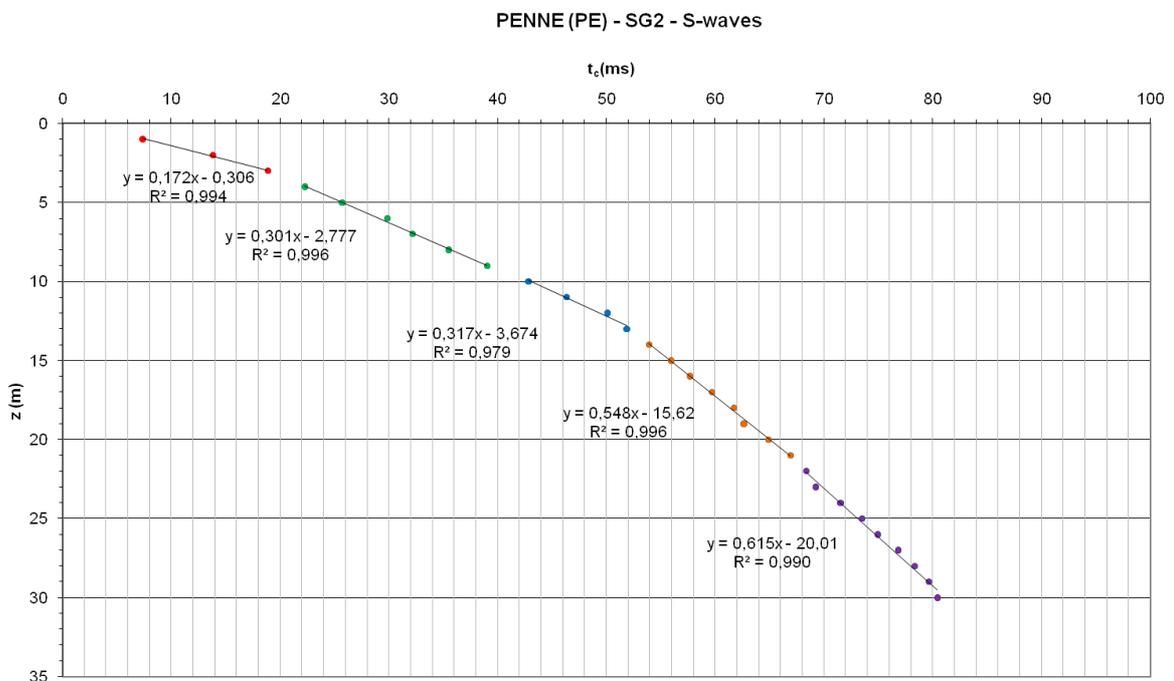
Nelle Figg. 5.14 e 5.15 sono rappresentate le dromocrone dei tempi corretti in funzione della profondità, rispettivamente per le onde P e per le onde S. In tali figure sono evidenziati con colori diversi i tratti a pendenza omogenea, che individuano i singoli sismostrati.



**“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale**



**Figura 5.14.** SG2- Onde P. Dromocrone e rette di regressione per la stima delle velocità dei singoli sismostrati.



**Figura 5.15.** SG2 - Onde S. Dromocrone e rette di regressione per la stima delle velocità dei singoli sismostrati

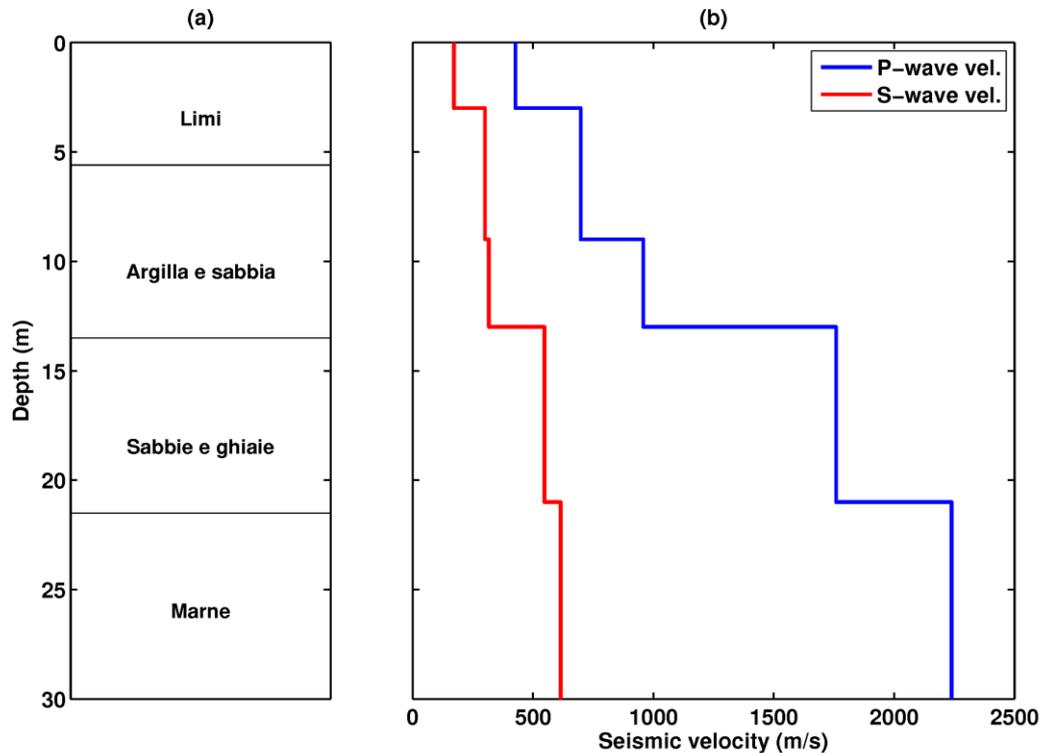


*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*

Il coefficiente angolare della retta interpolante i tempi relativi a ciascuno strato, ottenuta tramite un’operazione di regressione ai minimi quadrati, individua la velocità dello strato. Nella Tab. 5.3 è riportato il modello monodimensionale di velocità ricavato dalla sequenza interpretativa, unitamente ai rapporti tra le velocità delle onde di corpo ed al coefficiente di Poisson  $\nu$ .

<i>Strato</i>	$z_t$ (m)	$z_b$ (m)	$h$ (m)	$V_P$ (m/s)	$V_S$ (m/s)	$V_P / V_S$	$V_S / V_P$	$\nu$
1	0	3	3	427	172	2,48	0,40	0,40
2	3	9	6	698	301	2,32	0,43	0,39
3	9	13	4	958	317	3,02	0,33	0,44
4	13	21	8	1759	548	3,21	0,31	0,45
5	21	30	9	2239	615	3,64	0,27	0,46

**Tabella 5.3.** Modello sismo stratigrafico risultante dall’indagine downhole.  $z_t$  e  $z_b$  sono rispettivamente le profondità del tetto e del letto di ciascuno strato,  $h$  lo spessore dello strato mentre  $\nu$  è il coefficiente di Poisson.



**Figura 5.16.** Penne (PE) – SG2. (a) Colonna stratigrafica semplificata. (b) Andamento delle velocità con la profondità, come da Tabella 3.



*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*

---

L'andamento delle velocità ben si rapporta alle variazioni stratigrafiche (Fig. 5.16).

Si osserva in generale una buona corrispondenza tra litotipi e variazioni di velocità, con un profilo di velocità che è crescente con la profondità sia per le onde P che per le onde S.

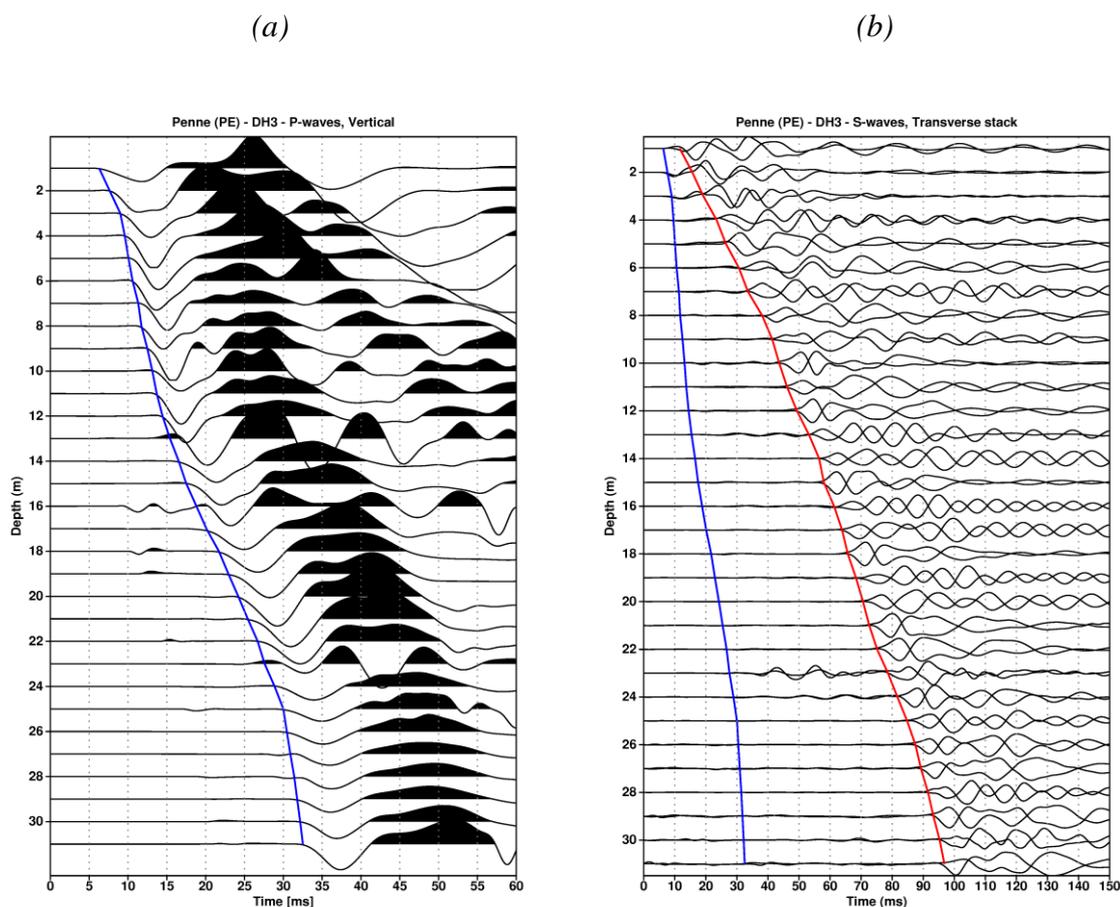
I depositi alluvionali mostrano scarse proprietà di rigidità fino a circa 13 m circa (limi, argille e sabbie), con valori dell'ordine dei 200-300 m/s per le onde S. Lo strato di sabbie e ghiaie compreso evidenziato in stratigrafia dai 13.5 m ai 21 m dal p.c. è caratterizzato da velocità delle onde S dell'ordine dei 550 m/s, leggermente inferiori a quelli delle marne che si riscontrano a partire da 21.5 m di profondità e che sono dell'ordine dei 600 m/s per le onde S.



### 5.6. SONDAGGIO SG3

Per l’ubicazione del sondaggio SG3 si può fare riferimento alla Fig. 1.1. La stratigrafia completa (in allegato) è stata compilata a cura della società Geo srl di Arpino (FR).

Nella Fig. 5.17, sono riportate le registrazioni eseguite alle diverse profondità, con evidenziati i tempi di arrivo delle onde P ed S, così come risultanti dall’operazione di *picking*.

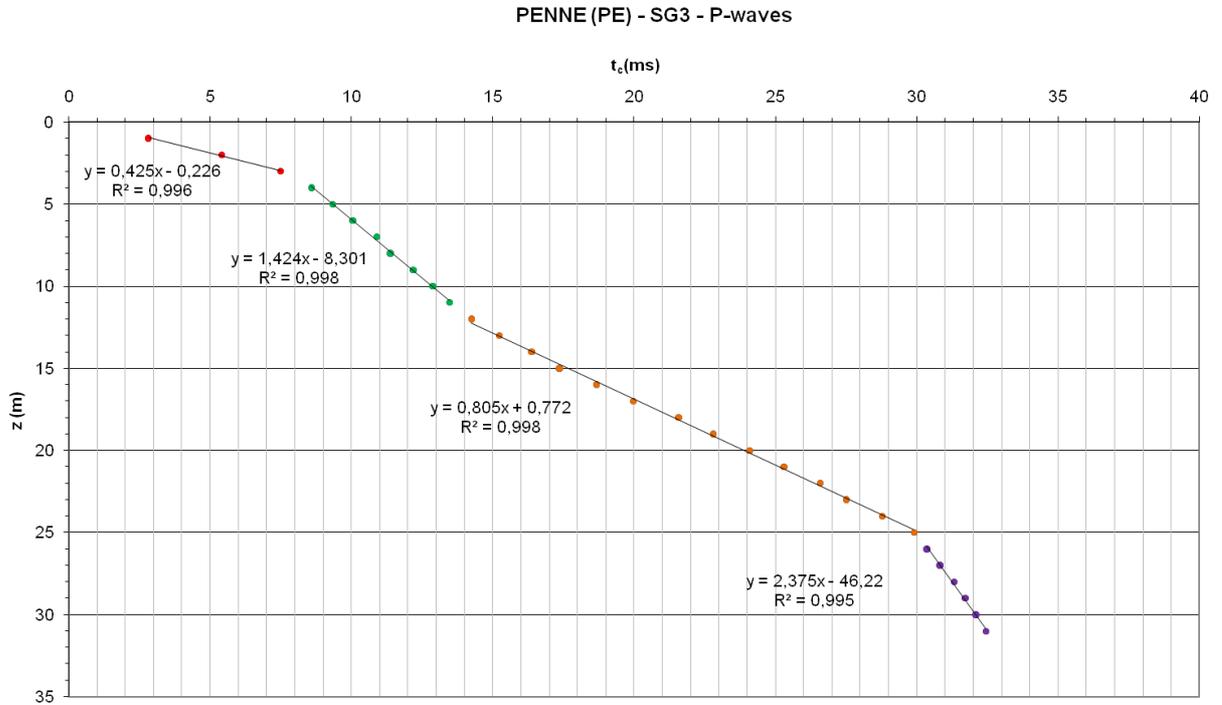


**Figura 5.17:** Penne (PE) –SG3. (a) Onde P, componente verticale. La linea blu individua i tempi di primo arrivo.(b) Onde S, stacking della componente trasversale relativa ai due versi opposti di energizzazione. La linea rossa individua i tempi di arrivo dell’onda S, mentre la linea blu riporta i tempi di primo arrivo individuati in (a).

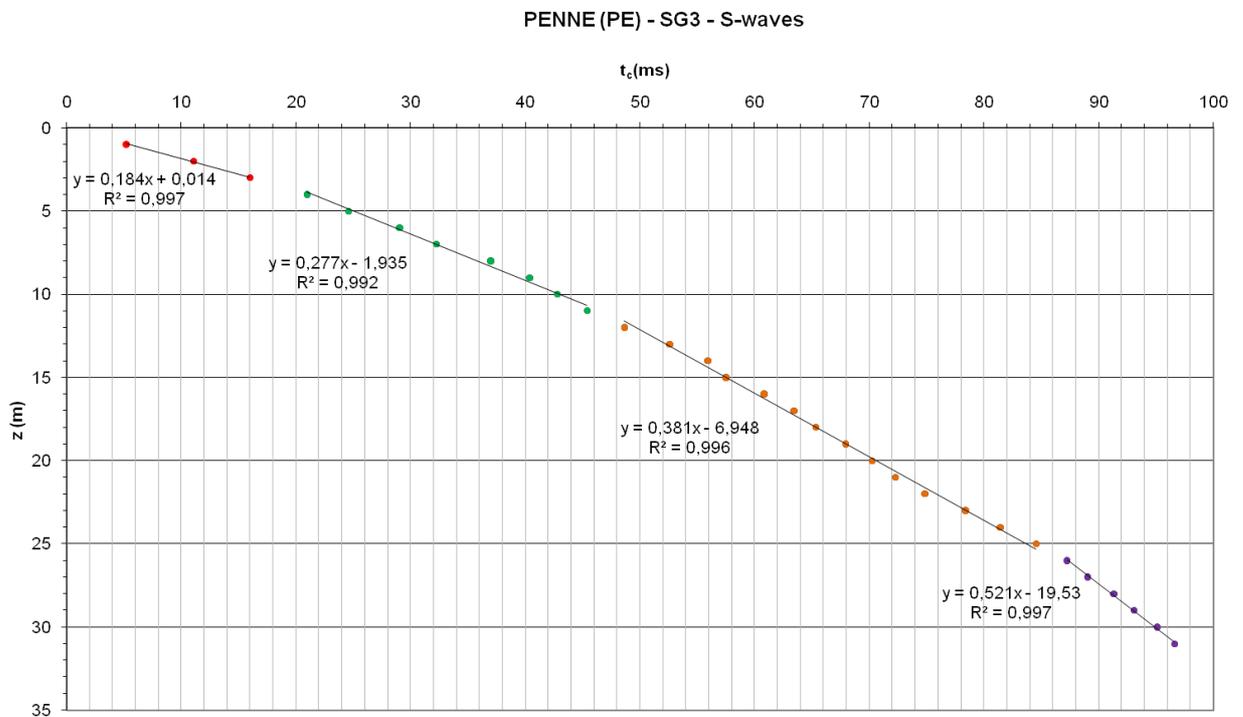
Nelle Figg. 5.18 e 5.19 sono rappresentate le dromocrone dei tempi corretti in funzione della profondità, rispettivamente per le onde P e per le onde S. In tali figure sono evidenziati con colori diversi i tratti a pendenza omogenea, che individuano i singoli sismostrati.



**“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale**



**Figura 5.18.** SG3 - Onde P. Dromocrone e rette di regressione per la stima delle velocità dei singoli sismostrati.



**Figura 5.19.** SG3 - Onde S. Dromocrone e rette di regressione per la stima delle velocità dei singoli sismostrati

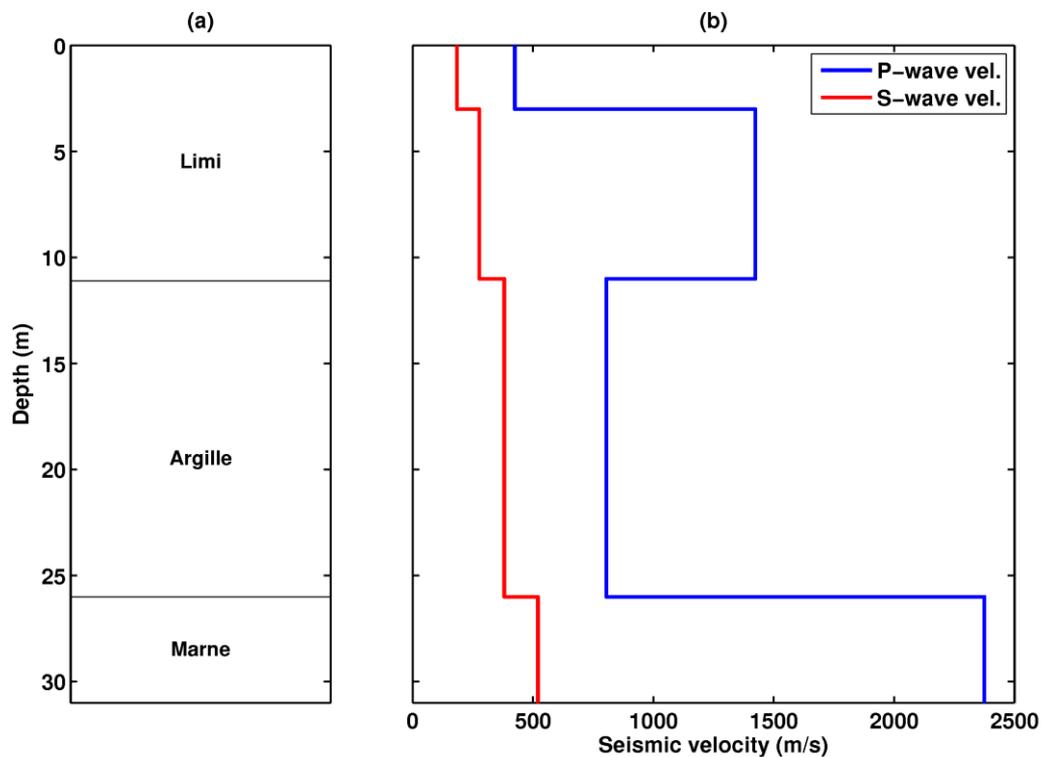


*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*

Il coefficiente angolare della retta interpolante i tempi relativi a ciascuno strato, ottenuta tramite un’operazione di regressione ai minimi quadrati, individua la velocità dello strato. Nella Tab. 5.4 è riportato il modello monodimensionale di velocità ricavato dalla sequenza interpretativa, unitamente ai rapporti tra le velocità delle onde di corpo ed al coefficiente di Poisson  $\nu$ .

<i>Strato</i>	$z_t$ (m)	$z_b$ (m)	$h$ (m)	$V_P$ (m/s)	$V_S$ (m/s)	$V_P / V_S$	$V_S / V_P$	$\nu$
1	0	3	3	425	184	2,31	0,43	0,38
2	3	11	8	1424	277	5,14	0,19	0,48
3	11	26	15	805	381	2,11	0,47	0,36
4	26	31	5	2375	521	4,56	0,22	0,47

**Tabella 5.4.** Penne(PE)- SG3. Modello sismo stratigrafico risultante dall’indagine downhole.  $z_t$  e  $z_b$  sono rispettivamente le profondità del tetto e del letto di ciascuno strato,  $h$  lo spessore dello strato mentre  $\nu$  è il coefficiente di Poisson.



**Figura 5.20.** Penne (PE) – SG3. (a) Colonna stratigrafica semplificata. (b) Andamento delle velocità con la profondità, come da Tabella 3.



*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*

L’andamento delle velocità ben si rapporta alle variazioni stratigrafiche (Fig. 5.20). Si osserva in generale una buona corrispondenza tra litotipi e variazioni di velocità.

Si osserva un’inversione di velocità delle onde P nelle formazioni superficiali. In questo profilo stratigrafico si riscontra una totale assenza di ghiaie e formazioni alluvionali ad elevata impedenza sismica. Le marne di base si incontrano ad una profondità dell’ordine dei 26m dal p.c. e mostrano velocità di propagazione dell’onda sismica in buon accordo con i valori riscontrati negli altri due fori di sondaggio e cioè dell’ordine dei 2400 m/s per le onde P e 520 m/s per le onde S.

**5.7. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE**

I risultati riportati nei paragrafi precedenti costituiscono una caratterizzazione completa delle velocità di propagazione delle onde longitudinali (onde P) e di taglio (onde S) nei tre punti di sondaggio, fino alla profondità prevista di 30 m dal p.c.

Le marne di base hanno evidenziato valori dell’ordine dei 2300-2600 m/s per le onde P e dei 500-600 m/s per le onde S.

Di contro, lo strato ghiaioso e sabbioso compatto, riscontrato nei sondaggi SG1 e SG2 immediatamente sopra le marne e caratterizzato da buone proprietà elastiche, non risulta presente nel sondaggio SG3.

In ottemperanza a quanto richiesto dal T.U. sulle costruzioni (DM 14/01/2008) si riportano nella Tab.10 i valori di VS30 calcolati per i quattro siti oggetto del presente rapporto.

<b>Sondaggio</b>	<b>Sito</b>	<b><math>V_{s,30}</math> (m/s)</b>	<b>Categoria di suolo</b>
SG1	Diga di Penne	479	B
SG2	Diga di Penne	378	B
SG3	Diga di Penne	318	C

**Tabella 5.** Valore di Vs30 e categoria di suolo (DM 14/01/2008) ricavate le tre prove oggetto del presente rapporto.

Le profondità dei tre litotipi principali, identificate lungo i tre fori di sondaggio sono risultate in accordo a quelle individuate tramite le indagini superficiali elettriche e sismiche.



## 6. CONCLUSIONI

In relazione agli obiettivi già indicati nella premessa, alla luce dei risultati emersi dalle indagini superficiali e in foro e della loro interpretazione integrata, secondo quanto descritto nelle precedenti sezioni, si può concludere che il sottosuolo della spalla destra della Diga di Penne risulta essere stratificato in tre formazioni principali, coincidenti con quelle deducibili dalla cartografia geologica di letteratura, aventi le seguenti caratteristiche:

- **Formazione alluvionale limo-argillosa a tratti sabbiosa**, a medio-bassa permeabilità, ritrovata fino a una profondità di circa 250-253 m s.l.m.m, avente bassa resistività (5-20  $\Omega$ m), bassa velocità delle onde di compressione (400-1000 m/s) e delle onde di taglio (170-350 m/s). Al suo interno è possibile ritrovare strati in cui prevalgono maggiormente le frazioni più fini (argille) o quelle più grossolane (limi-sabbiosi);
- **Formazione alluvionale ghiaio-sabbiosa**, ad alta permeabilità, ritrovata a profondità comprese tra 250-253 e 243-246 m s.l.m.m circa, avente alta resistività (100-400  $\Omega$ m), medio-alta velocità delle onde di compressione (1500-1800 m/s) e di taglio (550-700 m/s). Questa formazione si esaurisce poco prima del sondaggio SG3 ed è caratterizzata da un grado di cementazione variabile, riscontrato nei fori SG1 ed SG2.
- **Formazione marnosa di base (flysch marnoso)**, a bassa permeabilità, ritrovata a profondità inferiori a 243-246 m s.l.m.m., avente bassa resistività (< 10  $\Omega$ m), elevata velocità delle onde di compressione (2300-2600 m/s) e medio-alta velocità delle onde di taglio (500-600 m/s). Questa formazione è inoltre caratterizzata da un grado di fratturazione variabile, a tratti intenso, e dalla presenza di interstrati sabbiosi.

Le suddette considerazioni sono state riassunte in una sezione tipo, coincidente con l'allineamento L1, riportata in Allegato 1.

Roma, 07/12/2016

*Il Responsabile Scientifico*

Prof. Ettore Cardarelli



## **7. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI**

Asakawa E. and Kawanaka T. 1993. Seismic ray tracing using linear travelttime interpolation. *Geophysical Prospecting* 41, 99-111.

ASTM D7400-08 Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing. ASTM International, 2008.

Capozza F., Ippolito F. 1964. Relazione geologica sullo sbarramento di Penne sul fiume Tavo.

Capozza F. 1964. Diga di Penne sul F. Tavo - Indagini geognostiche supplementaryE.

Cardarelli, R. de Nardis 2001 *Seismic Refraction, isotropic and anisotropic seismic tomography on an ancient monument* *Geophysical Prospecting* Vol. 49, 2 228,240

Cardarelli E. and Cerreto A. 2002. Ray-tracing in elliptical anisotropic media using the linear travelttime interpolation LTI method applied to travelttime seismic tomography. *Geophysical Prospecting* 50, 55-72.

Cercato M., Cara F., Cardarelli E., Di Filippo G., Di Giulio G and Milana G. 2010. Shear-wave velocity profiling at sites with high stiffness contrasts: a comparison between invasive and non-invasive methods. *Near Surface Geophysics* **8**, 75-94

De Donno G. and Cardarelli E. 2015. A flexible interface for tomographic inversion of real and complex resistivity data in EIDORS. 21th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, 6-10 September, Turin, Italy.

Dey A. and Morrison H.F. 1979. Resistivity modelling for arbitrary shaped two-dimensional structures. *Geophysical Prospecting* 27, 106-136.

Dines K.A. and Lytle R.J. 1979. Computerized geophysical tomography. *Proceedings of the IEEE* 67, 1065-1073.

Edwards L.S. 1977. A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, 42, 1020-1036.

Koefoed O. 1979. *Geosounding Principles 1 : Resistivity sounding measurements*. Elsevier Science Publishing Company, Amsterdam.

Loke M.H. and Barker R.D. 1996a. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.

Loke M.H. and Barker R.D. 1996b. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 44, 499-523.

Menke W. 1984. *Geophysical data analysis : Discrete inverse theory*. Academic Press Inc.



*“Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE)” – Relazione Finale*

---

- Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. 1992. Numerical recipes in Fortran, 2nd edition – Cambridge university press
- Pullan, S. E., 1990, Recommended standard for seismic/radar files in the personal computer environment: *Geophysics* **55**, 1260-1271.
- Reynolds J.M. 1997. An Introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley and Sons.
- Sasaki Y. 1992. Resolution of Resistivity Tomography as inferred by numerical simulation. *Geophysical Prospecting* 40, 453-463.
- Tarantola A. 2005. Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation. SIAM.
- Telford W.M., Geldart L.P. and Sheriff R.E. 1990. Applied Geophysics (second edition). Cambridge University Press.
- Thomson W.T. 1950. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium. *Journal of applied Physics*, 21(2), 89-93.