

Dr. Geol. Massimo Compagnoni

*Studio di Geologia Applicata Ambientale e Territoriale
Via G. Randaccio, 21 - 25128 Brescia - tel/fax 0303702821 e-mail info@geo3studio.it*

CARATTERIZZAZIONE GEOFISICA DEL SITO DI VIA MOLINARA snc

COMUNE DI DESIO (MI)



Il Consulente tecnico

Dr. Geol. Massimo Compagnoni

I Collaboratori

Dr. Geol. Daniela Chiarini

Dr. Geol. Alberto Peruzzini

Brescia, 24 Novembre 2008

INDICE

1. PREMESSA.....	2
2. PROGRAMMA DELLE INDAGINI.....	2
3. INQUADRAMENTO DELL'AREA.....	3
4. METODOLOGIA E CARATTERISTICHE DEL PIANO DI INDAGINE	6
4.1. INDAGINE SISMICA	6
4.1.1. <i>Strumentazione utilizzata</i>	6
4.1.2. <i>Indagine di sismica a rifrazione: metodologia ed acquisizione</i>	7
4.1.3. <i>Indagine MASW: metodologia ed acquisizione</i>	11
4.2. INDAGINE GEOELETTRICA	12
4.2.1. <i>Strumentazione utilizzata</i>	13
4.2.2. <i>Misure di resistività: metodologia ed acquisizione</i>	13
4.3. INDAGINE ELETTROMAGNETICA	19
4.3.1. <i>Strumentazione utilizzata</i>	19
4.3.2. <i>Misure elettromagnetiche: metodologia ed acquisizione</i>	20
4.4. RECIPROCI RAPPORTI GEOMETRICI TRA LE DIVERSE LINEE DI INDAGINE E CORREZIONE TOPOGRAFICA	20
5. RISULTATI DEL PIANO D'INDAGINE.....	21
5.1. INDAGINE SISMICA	21
5.2. INDAGINE GEOELETTRICA	36
5.3. INDAGINE ELETTROMAGNETICA	45
6. INTERPRETAZIONE INCROCIATA DEI RISULTATI	51
7. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	59

ALLEGATI

1. Ubicazione del piano d'indagine su cartografia aereofotogrammetrica – scala 1:1000
2. Reciproci rapporti geometrici tra le diverse linee di indagine
3. Stratigrafia e prova DPSH rappresentative del sito
4. Indagine sismica: sismogrammi multishots ed alcuni sismogrammi di singoli shot dei 6 stendimenti sismici
5. Indagine elettrica: acquisizione di campagna dei valori di resistività apparente
6. Indagine elettromagnetica: valori di acquisizione
7. Mappa della conducibilità superficiale – scala 1:500
8. Mappa delle isopache dei terreni rimaneggiati – scala 1:500

Documento di nomina n. 2107/08 rgnr mod 21 della Procura della Repubblica – Tribunale di Monza

Brescia, 24 novembre 2008

1. Premessa

Su incarico della Polizia Provinciale di Milano e per conto della Procura della Repubblica presso il Tribunale di Monza (Pubblico Ministero Dott. Giordano Baggio sost.) è stata eseguita una campagna di indagine geofisica nell'area oggetto di sequestro preventivo, avvenuto il 21 marzo 2008, sita nel Comune di Desio in Via Molinara snc (foglio catastale 29 particelle 80 e 101).

Attualmente l'area è classificata ad uso seminativo ed è stata recentemente oggetto di attività di scavo e movimentazione terra, associata al conferimento di materiale di natura imprecisata: nel documento di nomina, di cui si allega copia (Fasc. nr. 2107/08 R.G.N.R. mod. 21), si riporta a riguardo del sito in oggetto a pag. 2 “.....ove è stata realizzata una vera e propria discarica abusiva di rifiuti pericolosi e non pericolosi”; le analisi di campioni raccolti nel corso della prima ispezione locale eseguita nel mese di giugno 2008 hanno confermato il conferimento nell'area di rifiuti pericolosi e non pericolosi. Dalle attività di indagine svolte in tale occasione, a causa delle condizioni del sito, si è reso necessario procedere ad una indagine preliminare di carattere geofisico, in grado di guidare la programmazione delle successive indagini dirette volte all'accertamento dell'effettiva “presenza, quantità e qualità” del materiale conferito e seppellito nell'area.

L'indagine geofisica oggetto dell'incarico (Rif. Fasc. nr. 2107/08 R.G.N.R. mod. 21) ha come obiettivo la risposta al seguente quesito posto dal PM: *“accerti e ricostruisca in relazione all'area sita in Desio via Molinara snc, identificata al catasto terreni foglio 29 particelle 80 e 101 rispettivamente di superficie 94 ha e 56 ha classificati ad uso seminativo di proprietà di Cannarozzo Massimiliano l'andamento dell'interfaccia tra depositi di terreni naturali e depositi di riporto presenti nel sottosuolo in modo da consentire l'identificazione di eventuali materiali classificabili come rifiuti e la loro ubicazione”*.

2. Programma delle indagini

Al fine di rispondere al quesito sopra riportato si è proceduto:

- alla consultazione di tutto il materiale tecnico reso disponibile dalla Polizia Provinciale di Milano riguardante il reperimento delle prove che hanno portato al sequestro dell'area,
- alla consultazione dello Studio della Componente Geologica, Idrogeologica e Sismica del Comune di Desio redatto ai sensi dei criteri ed indirizzi regionali in attuazione all'art.57 L.R. 12/2005 redatto in data settembre 2008 dal Dott. Geol. A. Sbrana,
- al sopralluogo del sito oggetto d'indagine, in cui sono state valutate le condizioni del sito, modificate le ipotesi d'indagine avanzate in sede di preventivo ed individuate le traiettorie di

indagine già disponibili e quelle da realizzare tramite escavatore, compatibilmente con l'ovvia necessità di ridurre il più possibile l'attività di movimentazione terra,

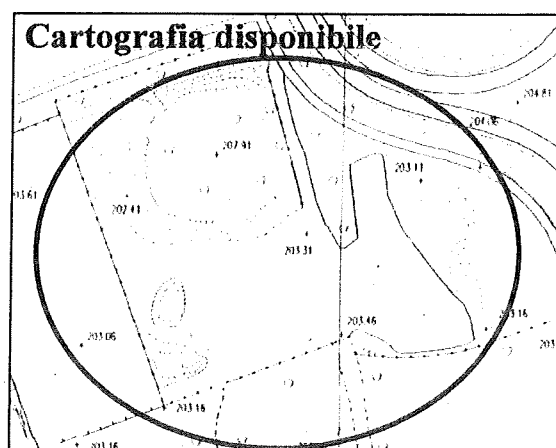
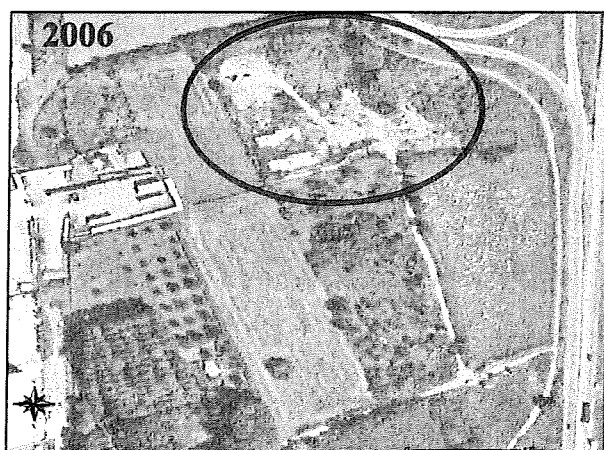
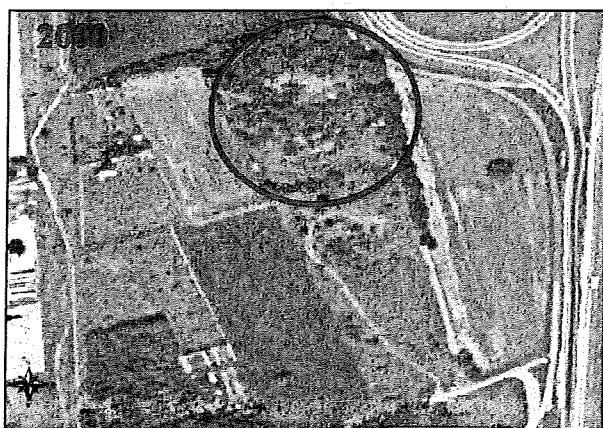
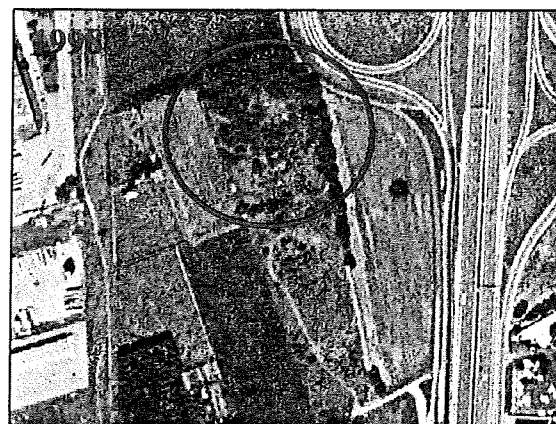
- all'esecuzione di n. 2 indagini di sismica a rifrazione combinata con indagine masw e n. 1 indagine elettrica di resistività all'esterno dell'area d'indagine, finalizzate alla caratterizzazione sismica e resistiva dell'area indisturbata,
- all'esecuzione di n. 4 indagini di sismica a rifrazione e n. 8 indagini elettriche di resistività diversamente orientate, compatibilmente con le possibilità logistiche del sito, finalizzate alla caratterizzazione sismica e resistiva dell'area oggetto di attività illecite,
- all'esecuzione di n. 7 linee di scansione elettromagnetica superficiale, finalizzate all'individuazione di possibili anomalie elettromagnetiche nei primi 2-3 m di profondità, attività resa necessaria dopo la consultazione dei documenti tecnici riguardanti il sequestro del sito,
- all'esecuzione di n. 6 scavi esplorativi a mezzo di escavatore, finalizzati alla verifica della natura di alcune principali anomalie geofisiche riscontrate nel sito.

3. Inquadramento dell'area

Dal punto di vista geografico l'area si colloca nel foglio B5c4 - LISSONE della cartografia tecnica regionale a scala 1:10000; nel catasto terreni essa si colloca nel foglio 29 particelle 80 e 101 rispettivamente di superficie 94 ha e 56 ha classificate ad uso seminativo e di proprietà di Cannarozzo Massimiliano. Per l'area è disponibile la cartografia aereofotogrammetrica comunale a scala 1:2000 (anno 2006), che è stata usata come base cartografica di riferimento per il presente studio, in mancanza di un rilievo topografico di dettaglio a scala adeguata.

Non essendo possibile definire con certezza una data di inizio delle attività illecite eseguite nel sito, certamente anteriori al primo gennaio 2008 dai dati raccolti dalla Polizia Provinciale di Milano, si riportano di seguito gli estratti relativi al sito in oggetto della cartografia CTR e di fotografie aeree disponibili per alcuni anni compresi nel periodo di tempo 1994-2006; tale rassegna mostra qualitativamente l'evoluzione dell'attività esercitata nel sito di studio e può rappresentare elemento preliminare per una ricerca storica di dettaglio:



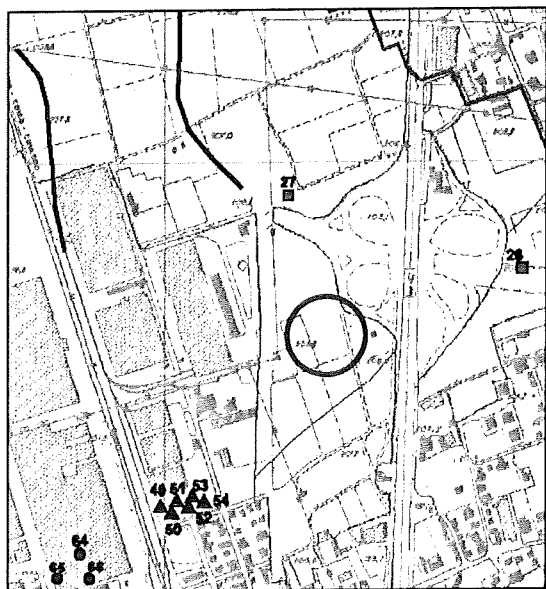


Dal punto di vista geologico il comune di Desio poggia su depositi di origine alluvionale composti da ghiaie ben gradate con intercalazioni di sabbia o limo; questi depositi ghiaiosi, nella parte sud-ovest del comune, tendono a diventare poco gradati, ma a mantenere le stesse caratteristiche.

La successione litostratigrafica dell'area comunale si compone di tre serie sedimentarie, costituite, procedendo dall'alto verso il basso, da depositi fluvioglaciali, da depositi lacustri e da depositi marini.

I terreni più superficiali formano la litozona “ghiaioso-sabbiosa”, costituita da ghiaie e sabbie medio-fini, ad alta permeabilità, con locali lenti di conglomerato ben cementato e lenti di ghiaia sabbiosa con abbondante matrice limoso-argillosa e con orizzonti da decimetrici a metrici di limi sabbiosi e limi argillosi; nel complesso rappresentano il primo acquifero sede della falda di tipo freatico, con direzione di flusso prevalentemente N-S e gradiente idraulico sostanzialmente costante pari a 0.75-0.80% e con soggiacenza, in tutta la fascia di territorio per il periodo 1998-2007, dell'ordine dei 40 metri dal piano campagna.

Dall'osservazione di dati stratigrafici e geotecnici disponibili nello Studio della Componente Geologica, Idrogeologica e Sismica del Comune di Desio sono state estratte una prova penetrometrica dinamica (n. 51, distante circa 500 m dal sito) e una stratigrafia di sondaggio eseguita a carotaggio continuo fino a 30 m (n. 66, distante circa 750 m dal sito) ritenute rappresentative del sito d'indagine.



Nell'estratto cartografico seguente (carta dell'inquadramento geolitologico e geomorfologico – Tavola A1 Studio della Componente Geologica, Idrogeologica e Sismica del Comune di Desio) sono riportate le prove geotecniche disponibili più vicine al sito investigato: in giallo sono rappresentati i depositi ghiaiosi ben gradati con sabbia, mentre con le linee continue verdi scure sono indicati i paleoalvei.

In allegato n. 3 sono riportate la stratigrafia e la prova penetrometrica dinamica DPSH scelte come rappresentative dell'area.

L'indagine eseguita nel presente studio combina tre diverse tecniche geofisiche, tutte tecniche di indagine totalmente indirette, che forniscono una visione del sottosuolo in termini di variazione del parametro fisico misurato, ma che necessitano di una forte componente interpretativa e che pertanto richiedono, per la taratura, una successiva verifica puntuale diretta.

Per rendere l'indagine il più possibile trasparente nel paragrafo 4 vengono illustrati, per ciascuna tecnica d'indagine utilizzata, il principio fisico su cui essa si fonda, l'attrezzatura utilizzata e le configurazioni geometriche adottate nello studio; nel paragrafo 5 vengono presentati i risultati ottenuti in termini di sezioni bidimensionali, eventualmente approfondibili con materiale presente negli allegati n. 3, 4 e 5; nel paragrafo 6 vengono riportate le combinazioni incrociate dei risultati e le scelte interpretative eseguite.

4. Metodologia e caratteristiche del piano di indagine

4.1. Indagine sismica

Per quanto riguarda l'indagine sismica si sono eseguiti:

- 2 stendimenti sismici a rifrazione con onde di volume longitudinali P (ST1 e ST2) combinati ad analisi spettrale delle onde di superficie (Rayleigh) con tecnica MASW all'esterno dell'area di indagine al fine di caratterizzare, dal punto di vista sismico, la situazione naturale considerata indisturbata,
- 4 stendimenti sismici a rifrazione con onde di volume longitudinali P (ST3, ST4, ST5 e ST6), diversamente incrociati, all'interno del sito di indagine al fine di valutare preliminarmente le geometrie sepolte.

Di seguito si riportano le caratteristiche principali della strumentazione utilizzata, alcuni cenni teorici dei metodi geofisici sismici utilizzati e il tipo di elaborazione ed interpretazione adottato nello studio.

4.1.1. Strumentazione utilizzata

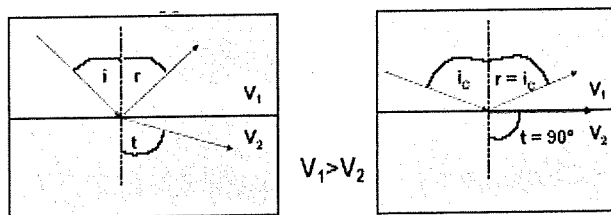
L'attrezzatura e la strumentazione utilizzata è costituita da:

- un sistema di energizzazione per le onde P: la sorgente è costituita da una mazza del peso di 10 Kg battente verticalmente su piastra circolare in acciaio del diametro di 25 cm posta direttamente sul p.c. per la generazione prevalentemente di onde P e secondariamente di onde SV, in grado di generare onde elastiche ad alta frequenza ricche di energia, con forme d'onda ripetibili e direzionali;
- un sistema di ricezione: costituito da 24+24 geofoni verticali monocomponente del tipo elettromagnetico a bobina mobile a massa sospesa (peso della massa 12.2 gr) con frequenza propria 10 Hz (rifrazione) e 4.5 Hz (masw), ovvero dei trasduttori di velocità in grado di tradurre in segnale elettrico la velocità con cui il suolo si sposta al passaggio delle onde sismiche longitudinali e trasversali prodotte da una specifica sorgente;
- sistema di acquisizione dati: con memoria dinamica a 24 bit composto da 12 dataloggers a 2 canali ciascuno per un totale di 24 canali, cavo sismico telemetrico di 130 m, MOM power con interfaccia USB 1.1 24 V, notebook PC Windows XP con software Panel Acquisition a 24 canali; il sistema è in grado di convertire in digitale e registrare su memoria il segnale proveniente da ciascun canale dal sistema di ricezione; la conversione A/D avviene già dal primo metro di cavo; il sistema permette pertanto di eliminare molte fonti di disturbo dovute al trasferimento del segnale lungo centinaia di metri di cavo sismico ed è inoltre dotato di un sistema di filtraggio in tempo reale, da un hardware complesso, che comporta un anello di regolazione con diversi passaggi di digital signal processing;

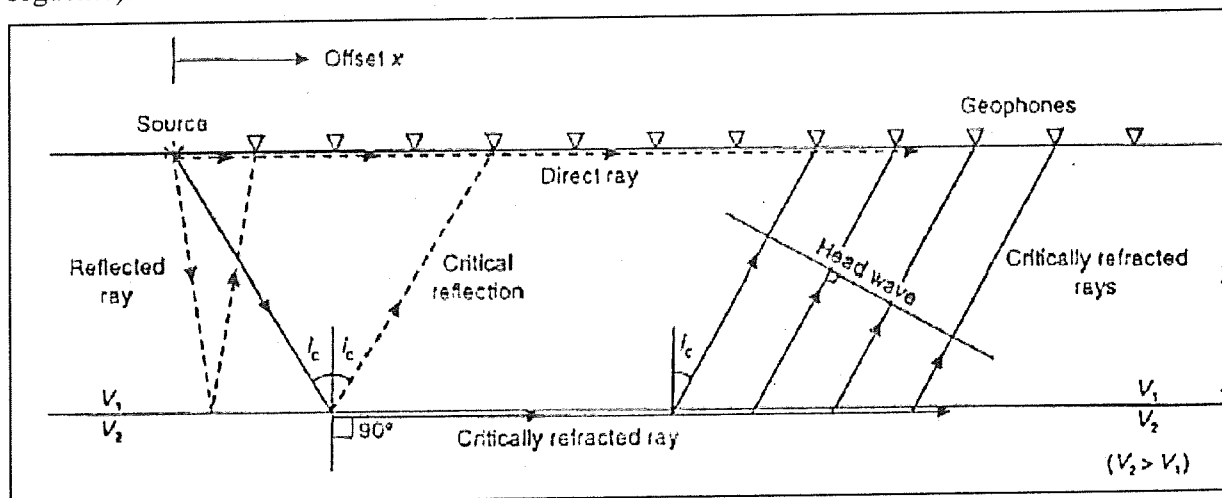
- un sistema di trigger: consiste in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui il grave colpisce la base di battuta, consentendo ad un condensatore di scaricare la carica precedentemente immagazzinata e di produrre un impulso che viene inviato a un sensore collegato al sistema di acquisizione dati; in questo modo è possibile individuare e visualizzare l'esatto istante in cui la sorgente viene attivata e fissare l'inizio della registrazione.

4.1.2. Indagine di sismica a rifrazione: metodologia ed acquisizione

Il metodo sismico a rifrazione si basa sul concetto della bi-rifrazione delle onde elastiche a seguito del fronte d'onda conico. Data una sorgente di onde elastiche e uno stendimento di geofoni lungo un profilo giungeranno in superficie ai geofoni onde dirette, onde riflesse ed onde coniche o bi-rifratte (head wave): le onde analizzate sono quelle birifratte cioè quelle che giungono sulla superficie di separazione con un angolo d'incidenza critico (secondo la legge di Snell) e che quindi vengono rifratte con un angolo di 90° propagandosi parallelamente alla superficie rifrangente e venendo nuovamente rifratte verso la superficie con lo stesso angolo di incidenza.



Disponendo una serie di ricevitori lungo la superficie libera del suolo e generando onde elastiche da una sorgente puntiforme l'onda riflessa arriverà sempre dopo le altre, mentre fino ad una certa distanza dalla sorgente arriverà prima l'onda diretta poi, quando l'onda birifratta avrà percorso sufficiente distanza alla velocità V_2 , essa arriverà prima della diretta (come riportato nella figura seguente).



Se riportiamo in un semplice grafico x-y per ogni distanza di ciascun ricevitore il tempo di arrivo del primo impulso letto sui sismogrammi i punti si dispongono in una serie di allineamenti, di cui il

primo passante per l'origine: ciascuna linea è detta dromocrona ed è rappresentativa della velocità di propagazione delle onde elastiche nel mezzo posto al di sopra di un rifrattore (una superficie di separazione più o meno netta tra due materiali a comportamento elastico diverso).

L'intersezione tra due dromocrone è detto punto di ginocchio e rappresenta il punto in cui arrivano contemporaneamente le onde rifratte da due rifrattori adiacenti o, se consideriamo le prime due dromocrone, le onde dirette e le onde rifratte dal primo rifrattore: in un'indagine di sismica a rifrazione sarà possibile individuare un numero di punti di ginocchio pari al numero di rifrattori investigati. Pertanto più è profondo il rifrattore più è distante dalla sorgente il rispettivo punto di ginocchio: da ciò si deduce che gli impulsi rifratti possono essere ricevuti solo a partire da una certa distanza proporzionale alla profondità del rifrattore e che quindi la profondità totale di indagine è legata alla lunghezza dello stendimento di ricevitori.

Tramite semplici relazioni trigonometriche è possibile, note le velocità di propagazione delle onde elastiche nei diversi strati omogenei del sottosuolo, conoscere gli spessori di ciascuno di essi.

I principali limiti della tecnica di sismica a rifrazione risiedono nell'impossibilità teorica di rilevare successioni stratigrafiche composte da strati a velocità decrescente con la profondità, in tal caso lo strato o gli strati non possono essere messi in evidenza dalle onde rifratte in quanto l'energia incidente, al contatto fra la sommità dello strato e la base dello strato sovrastante a più alta velocità, subisce una flessione verso il basso e non può venire di conseguenza rifratta: tale situazione è nota come "orizzonte muto" e porta, oltre all'inconveniente di non considerare la presenza di uno strato a comportamento diverso nel sottosuolo, alla sovrastima dello spessore dello strato sovrastante l'inversione di velocità.

Altra limitazione consiste nella presenza di uno strato a velocità intermedia ma di ridotto spessore; anche in questo caso l'orizzonte non produce alcun cambiamento di pendenza sulle dromocrone, e non è quindi sismicamente rilevabile. E' noto infatti che per essere visto uno strato deve poter essere campionato da almeno 2 geofoni e, se questo non avviene, lo strato è come se non esistesse e non se ne può valutare né velocità né spessore: tale fenomeno è noto come "orizzonte nascosto".

Se gli strati sono poco potenti con velocità crescente con la profondità (come normalmente avviene nei terreni non consolidati), i percorsi delle onde saranno curvi, con concavità rivolta verso l'alto ed anche la corrispondente dromocrona sarà una curva.

Sebbene nei casi reali si abbia a che fare con depositi stratificati, spesso fittamente e in maniera poco definita, con un'alternanza di strati caratterizzati da rigidità anche molto differenti (con inevitabili problemi di riflessione e rifrazione delle onde in corrispondenza delle superfici di discontinuità e/o di fratture), si assume che l'effetto delle onde dirette, in termini di ampiezza delle vibrazioni, sia predominante rispetto a quello delle onde indirette, tanto da potere trascurare queste

ultime e considerare il mezzo, limitatamente all'area comprendente la sorgente e il ricevitore, come mezzo omogeneo, isotropo e non confinato, pur ben conoscendo i limiti di tale approssimazione.

I contrasti di proprietà possono essere legati a cause stratigrafiche, strutturali, idrogeologiche; il modello interpretativo del mezzo investigato è di tipo elastico, omogeneo, continuo ed isotropo, mentre la profondità totale di indagine è legata alla lunghezza dello stendimento di ricevitori.

L'interpretazione dei segnali rilevati e la conseguente stima del profilo di velocità delle onde P è articolata nelle seguenti fasi fondamentali:

- Individuazione dei primi arrivi attraverso l'osservazione dei sismogrammi e l'operazione di picking, previa elaborazione dei segnali ed operazioni di filtraggio anche consecutivo con diverse tipologie di filtro digitale;
- Ricostruzione delle dromocrone in P e scelta del modello di sottosuolo da utilizzare nell'interpretazione;
- Linearizzazione delle dromocrone e calcolo delle velocità di propagazione delle onde elastiche analizzate e dei relativi tempi di intercetta;
- Ricostruzione del modello del sottosuolo con calcolo della profondità di ciascun strato omogeneo, continuo ed isotropo tramite il metodo del tempo di intercetta applicabile a ciascun punto di scoppio (metodo a griglia shot-point); questo metodo è applicabile in situazioni litostratigrafiche approssimabili a modelli stratificati a strati piani orizzontali e/o inclinati.

Per le analisi interpretative è stato utilizzato il software WinSism versione 10 – Seismic Refraction Processing Software (2004) della W-GeoSoft, associato ad altri software autocostruiti.

L'indagine in ciascun sito è consistita in uno stendimento singolo di sismica a rifrazione di lunghezza variabile in funzione delle disponibilità logistiche, lungo il quale sono stati disposti alternativamente e collegati in serie 24 geofoni monocomponente (verticali ed orizzontali) del tipo elettromagnetico a bobina mobile, con distanza intergeofonica variabile in relazione alla lunghezza totale disponibile: il collegamento dei ricevitori avviene attraverso un cavo telemetrico su cui sono disposti 12 gruppi data loggers in grado di convertire il segnale elettrico proveniente dai geofoni in segnale digitale già dal primo metro di cavo: il sistema permette pertanto di eliminare molte fonti di disturbo dovute al trasferimento del segnale lungo centinaia di metri di cavo sismico ed è inoltre dotato di un sistema di filtraggio in tempo reale, da un hardware complesso, che comporta un anello di regolazione con diversi passaggi di digital signal processing.

E' stata adottata una configurazione a 5 shots per gli stendimenti eseguiti all'esterno dell'area e una configurazione a 7 e 9 shots per gli stendimenti eseguiti all'interno, così organizzati:

configurazione a 5 shots:

- 2 end-shots esterni allo stendimento di geofoni posti ad una distanza dagli estremi pari all'interdistanza geofonica (S1 e S5)
- 2 intermedi posti rispettivamente tra il 6° e il 7° geofono e tra il 18° e 19° geofono (S2 e S4)
- 1 centrale tra il 12° e il 13° geofono (S3)

configurazione a 7 shots:

- 2 offsets esterni allo stendimento di geofoni posti ad una distanza massima dagli estremi compatibilmente con le condizioni logistiche dell'area (S1 e S7)
- 2 end-shots esterni allo stendimento di geofoni posti ad una distanza dagli estremi pari all'interdistanza geofonica (S2 e S6)
- 2 intermedi posti rispettivamente tra il 6° e il 7° geofono e tra il 18° e 19° geofono (S3 e S5)
- 1 centrale tra il 12° e il 13° geofono (S4)

configurazione a 9 shots:

- 2 offsets esterni allo stendimento di geofoni posti ad una distanza massima dagli estremi compatibilmente con le condizioni logistiche dell'area (S1 e S9)
- 2 end-shots esterni allo stendimento di geofoni posti ad una distanza dagli estremi pari all'interdistanza geofonica (S2 e S8)
- 4 intermedi posti rispettivamente tra il 6° e il 7° geofono (S3), tra il 9° e il 10° (S4), tra il 15° e il 16° (S6) e tra il 18° e 19° geofono (S7)
- 1 centrale tra il 12° e il 13° geofono (S5)

Di seguito si riportano in modo sintetico i parametri configurazionali (spaziali e temporali) dell'acquisizione in onde P per ciascun stendimento sismico:

PARAMETRI CONFIGURAZIONALI SISMICA A RIFRAZIONE						
	ST1	ST2	ST3	ST4	ST5	ST6
Ambito rispetto al sito	Esterno	Esterno	Interno	Interno	Interno	Interno
Orientazione	SSE-NNW	SSE-NNW	ESE-WNW	SE-NW	NNE-SSW	ENE-WSW
Numero Geofoni (-)	24					
Lunghezza stendimento compresi offsets (m)	-	-	120	91	89	89
Distanza offsets dagli estremi (m)	-	-	14	11	10	10
Lunghezza stendimento compresi end-shots (m)	100	100	100	75	75	75
Lunghezza stendimento ricevitori (m)	92	92	92	69	69	69
Distanza intergeofonica (m)	4	4	4	3	3	3
Numero punti di energizzazione (shots)	5	5	7	7	9	9
Distanza shots interni (m)	24	24	24	18	9	9
Durata acquisizione (ms)	256					
Intervallo di campionamento (ms)	0.250					
Numero di campioni per traccia (-)	1024					
Massima frequenza campionabile (kHz)	2					

4.1.3. Indagine MASW: metodologia ed acquisizione

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che permette di individuare il profilo di velocità delle onde di taglio V_s , sulla base della misura delle onde superficiali eseguita in corrispondenza di diversi sensori (geofoni nel caso specifico) posti sulla superficie del suolo. Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive (fenomeno della dispersione geometrica), cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980) o detto in maniera equivalente la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione. La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.

Il metodo di indagine MASW utilizzato è di tipo attivo in quanto le onde superficiali sono generate in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con mazza battente parallelamente all'array) e misurate da uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5-10Hz e 70-100Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30m-50m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente.

I fondamenti teorici del metodo MASW fanno riferimento ad un semispazio stratificato con strati paralleli e orizzontali, quindi una limitazione alla sua applicabilità potrebbe essere rappresentata dalla presenza di pendenze significative superiori a 20°, sia della topografia sia delle diverse discontinuità elastiche.

La metodologia utilizzata consiste in tre fasi:

- calcolo della curva di dispersione sperimentale dal campo di moto acquisito nel dominio spazio-tempo lungo lo stendimento, energizzando alternativamente ai due estremi dello stendimento;
- calcolo della curva di dispersione apparente numerica mediante il metodo Roma (2001)
- calcolo della curva di dispersione effettiva numerica mediante il metodo Lai-Rix (1998)
- individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_{sv} , modificando opportunamente lo spessore h , le velocità delle onde di taglio V_{sv} e di compressione V_p (o in alternativa il coefficiente di Poisson ν), la densità di massa ρ degli strati che costituiscono il modello del suolo, fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la curva di dispersione

sperimentale e la curva di dispersione numerica corrispondente al modello di suolo assegnato; l'affidabilità del profilo di velocità V_s trovato durante il processo di inversione è valutata tramite la definizione dell'errore relativo tra le due curve.

L'elaborazione è stata eseguita tramite il software MASW (V. Roma, 2007) associato ad altri software autocostruiti.

L'acquisizione è stata eseguita in combinazione con l'indagine di sismica a rifrazione per i due stendimenti eseguito all'esterno dell'area, posizionando i 24 geofoni da 4.5 Hz lungo il tratto iniziale dello stendimento di sismica a rifrazione, secondo la seguente configurazione spaziale e temporale:

PARAMETRI CONFIGURAZIONALI MASW	
Lunghezza stendimento ricevitori (m)	23
Numero Geofoni (-)	24
Distanza intergeofonica (m)	1
Numero punti di energizzazione per estremo (-)	1
Off-sets sorgenti (da ciascun estremo) (m)	5
Durata acquisizione (ms)	4096
Intervallo di campionamento (ms)	2
Numero di campioni per traccia (-)	2048
Massima frequenza campionabile (Hz)	250

Per valutare la validità delle ipotesi di monodimensionalità (strati piani e paralleli) sono state eseguite acquisizioni coniugate: il modello 1D medio ottenuto dal successivo processo di inversione è da ritenere indicativo e necessario ad integrare i dati geofisici sismici raccolti dall'indagine di sismica a rifrazione in onde longitudinali, al fine di predisporre un modello geofisico sismico valido per il sito naturale indisturbato.

4.2. Indagine geoelettrica

Per quanto riguarda l'indagine geoelettrica si sono eseguite 9 linee elettriche di lunghezza diversa in funzione delle condizioni logistiche del sito, di cui:

- 1 linea all'esterno dell'area di indagine (E01) in coincidenza dello stendimento sismico ST2, al fine di caratterizzare, in termini di resistività, la situazione naturale considerata indisturbata,
- 8 linee all'interno dell'area di indagine, diversamente incrociate, al fine di valutare preliminarmente le geometrie sepolte; in particolare la linea elettrica E02 coincide con lo stendimento sismico ST3, la linea E03 con lo stendimento ST4, la linea E04 con lo stendimento ST5 e la linea elettrica E07 con lo stendimento sismico ST6, mentre le restanti linee elettriche (E05, E06, E08 e E09) completano la copertura dell'area compatibilmente con le condizioni logistiche del sito.

Di seguito si riportano le caratteristiche principali della strumentazione utilizzata, alcuni cenni teorici dei metodi geofisici elettrici utilizzati e il tipo di elaborazione ed interpretazione adottato nello studio.

4.2.1. Strumentazione utilizzata

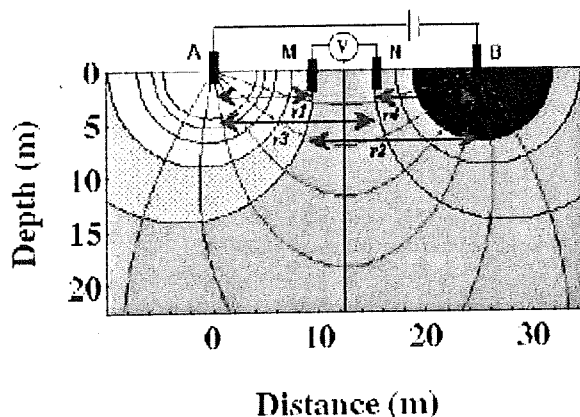
La strumentazione e l'attrezzatura utilizzata è rappresentato da un georesistivimetro-elettrotomografo digitale tipo Mangusta TMG 255E di produzione Ambrogeo e costituito da:

- centralina hardware di controllo che acquisisce i segnali di corrente e di potenziale su una scheda digitale 4 canali CCUBED-DATAQ/CF2 a 24 bit montata su interfaccia PCMCIA del PC portatile e connessa in I/O alla centralina stessa; il convertitore A/D lavora in modalità differenziale con 2 canali dedicati alla misura di potenziale e di corrente e 2 canali dedicati al controllo dello switch di energizzazione; il ciclo di misura è costituito da 5 subcicli ed ha una durata minima di 8 s che garantisce un errore nella misura di resistenza inferiore al 1% (verificata con test di laboratorio);
- computer portatile di gestione del processo di misura, dotato di alloggiamento PCMCIA o FLASH CARD, 2 porte seriali o USB con convertitore seriale, scheda di rete ed inverter per l'utilizzo in campagna; il sistema di gestione della centralina è sviluppato in sistema DELPHI-Borland per piattaforma MS-Windows; l'interfaccia grafica consente la restituzione preliminare del tomogramma di resistività apparente e il salvataggio dei dati su disco fisso;
- unità periferiche costituite da 48 elettrodi collegati tra loro da cavo tomografico a 8 poli di diametro 8 mm e connessi alla centralina di controllo; gli elettrodi sono gestiti da interfaccia utente con protocollo RS232;
- modulo esterno PASI per l'energizzazione: nell'indagine è stata adottata un'energizzazione uguale per tutte le 9 linee elettriche caratterizzata da una corrente di 300 V e 300 mA.

4.2.2. Misure di resistività: metodologia ed acquisizione

Il metodo di misura della resistività consiste nel indurre nel sottosuolo la circolazione di corrente elettrica mediante l'infissione nel terreno di elettrodi e l'applicazione ad essi di una tensione elettrica e nel rilevarne le variazioni della resistenza elettrica. La corrente circolante nel sottosuolo tra due elettrodi infissi nel terreno percorre una serie di traiettorie curvilinee che si estendono in profondità e lateralmente, ma che si concentrano maggiormente vicino alla superficie del terreno e in prossimità degli elettrodi. La misura della differenza di potenziale non viene effettuata all'estremità degli *elettrodi di corrente* (A e B), in quanto in essi esiste una grande resistenza aggiuntiva e quindi una differenza di potenziale, non nota, tra ogni elettrodo ed il terreno, definita resistenza di contatto.

La misura della differenza di potenziale esistente nel terreno si effettua tra due altri elettrodi definiti pertanto *elettrodi di potenziale* (M e N), per i quali esiste una differenza di potenziale trascurabile con il terreno, dato che tra essi vi circola una corrente trascurabile, resa tale dalle specifiche caratteristiche elettriche progettuali del misuratore di resistività utilizzato per la misura stessa della d.d.p. tra gli elettrodi



In questo modo, applicando una tensione agli elettrodi di corrente, misurando l'intensità di corrente (I) circolante nel terreno tra gli elettrodi di corrente (dell'ordine dei milliampere o meno) e misurando la differenza di potenziale esistente tra gli elettrodi di potenziale (comprese nell'ordine dei volt e millivolt) è possibile ricavare il valore della resistività, che rappresenta una proprietà intrinseca di un materiale uniforme. La resistività elettrica è una caratteristica fisica del materiale costituente il corpo e non dipende dalle sue dimensioni.

La resistività delle rocce e dei terreni dipende soprattutto dalla salinità dell'acqua che contengono e dalla percentuale di argilla presente: tanto maggiore sarà il contenuto d'acqua e più alta la sua salinità, tanto minore sarà la sua resistività elettrica.

Per uno stesso litotipo il valore di resistività dipende prevalentemente dalla porosità dell'aggregato, dal grado di saturazione e dalla conduttività del fluido circolante, ecc. Anche in questo caso è stato dimostrato che la presenza di soluzioni mineralizzate circolanti altera in misura notevole la resistività apparente dei terreni e dei litotipi perché queste soluzioni risultano generalmente più conduttive (se si tratta di percolati oleosi) o più resistenti (nel caso di derivati di idrocarburi) rispetto all'acqua dolce.

Non è possibile classificare le rocce e i terreni in funzione della resistività, ma si possono solamente dare dei valori indicativi. Questo significa che una determinata struttura sarà rilevata solo come misura della differenza tra la resistività attribuibile alla struttura e quella del terreno.

Per evitare l'eventualità che l'accumulo di ioni in prossimità degli elettrodi possa influenzare le misure si inverte costantemente, con frequenza di più volte al secondo, il flusso di corrente tra gli elettrodi in modo da favorire la dispersione degli ioni stessi.

Nel caso del sottosuolo reale, costituito dall'alternanza di strati di materiale avente resistività diversa, il valore del rapporto tra d.d.p. ed I , misurato tenendo gli elettrodi ad una certa distanza, fornisce un valore di *resistività apparente*, in quanto riferito ad un terreno uniforme con lo stesso rapporto $\Delta V/I$ e stessa distanza tra gli elettrodi.

Conoscendo il tipo di schieramento di elettrodi adottato nell'indagine è possibile, tramite opportuno fattore correttivo geometrico, mantenere la resistività apparente costante al variare della distanza tra gli elettrodi: aumentando tale distanza la resistività apparente cambia in funzione della variazione di resistività del terreno con la profondità, in quanto la corrente attraversa strati più profondi del sottosuolo.

Nel caso di terreno uniforme solo il 30% circa della corrente penetra ad una profondità pari alla distanza massima tra gli elettrodi di corrente e quindi la profondità di indagine è proporzionale alla lunghezza dell'allineamento di elettrodi utilizzato nell'indagine e alla differenza di resistività degli strati incontrati: la vasta gamma delle strutture elettriche presenti nella realtà impedisce di fissare semplici regole per il calcolo della profondità massima d'indagine; inoltre la penetrazione può essere limitata anche quando i valori di d.d.p. diventano troppo piccoli e quindi difficili da misurare con precisione, perchè le distanze tra gli elettrodi sono troppo grandi o i materiali presenti in profondità troppo poco resistivi (poco migliora l'aumento della corrente o la media tra diverse misure).

Per quanto riguarda il percorso della corrente in un materiale stratificato, la presenza di interfacce elettriche genera fenomeni di rifrazione delle linee di corrente, i cui angoli sono in relazione alla tangente (per cui non vale la legge di Snell) e la traiettoria dei raggi si allontana dalla verticale passando da materiale più resistivo a materiale più conduttivo.

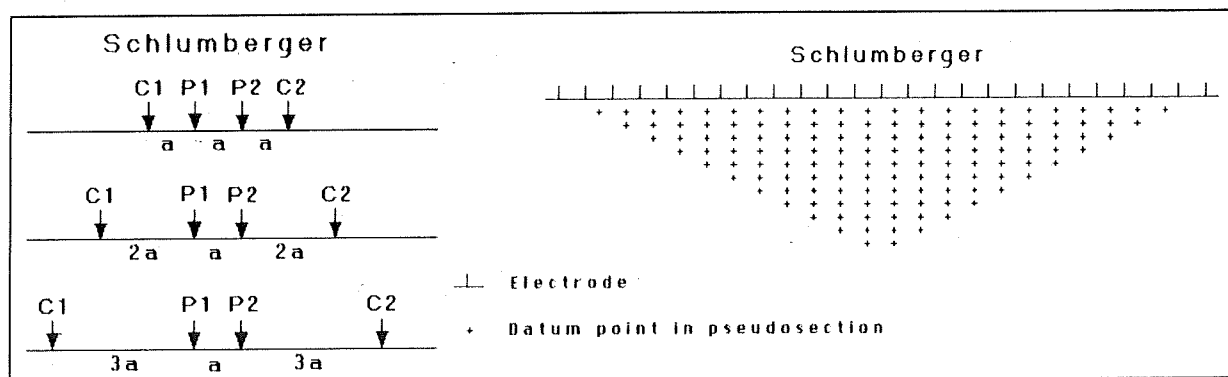
L'elaborazione dei dati avviene costruendo le curve di resistività apparente su grafico logaritmico, graficando in ascissa la distanza degli elettrodi ed in ordinata la resistività apparente misurata: tali curve contengono informazioni sulla stratificazione elettrica del sottosuolo in quanto la variazione della resistività apparente è influenzata dalla successione delle resistività effettive dei singoli strati; ogni passaggio da concavità a convessità e viceversa ed ogni sbalzo evidenti nella curva di resistività apparente indica la presenza di uno strato diverso, mentre è possibile che alcuni strati non vengano visti in quanto non contrastano a sufficienza con quelli adiacenti. Quando uno strato, oltre all'insufficiente contrasto di resistività, presenta uno spessore tale per cui, in relazione alla sua profondità, non risulta visibile, viene definito "soppresso".

L'ipotesi di base è la presenza di strati orizzontali uniformi verticalmente e lateralmente; eseguendo profili elettrici affiancati (SEO) ed in espansione (SEV) è possibile studiarne le variazioni verticali e laterali e quindi è possibile ovviare alla limitazione dell'orizzontalità ed uniformità dei modelli

interpretativi, sebbene permanga l'ipotesi di uniformità verticale e laterale all'interno del singolo elettrostrato.

Nell'indagine è stato adottato il metodo della tomografia elettrica di superficie (TES), che consiste nell'acquisire un numero elevato di misure elettriche su un discreto numero di elettrodi; in particolare, lungo ciascuna linea elettrica, sono stati disposti 48 elettrodi equispaziati collegati alla centralina di controllo, in grado di automatizzare l'espansione della distanza degli elettrodi di corrente e la traslazione laterale dello schieramento. Si è scelto di utilizzare uno schieramento di elettrodi in configurazione Schlumberger, che consiste nel fissare una distanza costante tra gli elettrodi di potenziale, disposti simmetricamente rispetto al centro dell'allineamento, e di compiere le misure allontanando progressivamente e simmetricamente gli elettrodi di corrente.

L'acquisizione avviene fissando la posizione di uno degli elettrodi di corrente e traslando sequenzialmente l'altro elettrodo di corrente e la coppia di elettrodi di potenziale, i quali sono posti ad una distanza fissa pari alla interdistanza tra gli elettrodi, e mantenendo la simmetria dello schieramento. In questo modo si ottengono misure di resistività apparente (ottenute come media tra i due valori di resistività misurati invertendo il flusso di corrente) disposte lungo diagonalì affiancate, il cui insieme definisce un triangolo rovesciato.



I tempi di acquisizione aumentano enormemente nel caso si acquisiscano tutte le possibili combinazioni tra i 48 elettrodi: durante un'indagine elettrica si tende a scegliere un numero di combinazioni inferiore al numero massimo possibile (dell'ordine del migliaio), al fine di limitare gli alti tempi di acquisizione, non giustificati dal fatto che le misure più profonde, in corrispondenza del vertice apicale del triangolo rovesciato di acquisizione, presentano una precisione gradualmente decrescente con la profondità.

Pertanto, a seconda delle finalità d'indagine, si tende ad ottimizzare il numero di sequenze di acquisizione in funzione dell'attendibilità delle misure ottenibili e della profondità di investigazione massima richiesta, evitando di acquisire in prossimità della profondità massima possibile, legata alla lunghezza dello schieramento di elettrodi e corrispondente ad un'unica misura al vertice del triangolo rovescio posta sulla verticale al centro della linea elettrica.

Tale disposizione di misure definisce una pseudosezione in quanto le profondità sono piuttosto arbitrarie e la variazione di resistività al suo interno non è precisa (in allegato n. 5 si riportano le pseudosezioni di ciascuna linea elettrica). Poiché le pseudosezioni della resistività apparente possono essere compromesse da strutture a piccola scala poste vicino alla superficie, che giacciono vicino alla linea di misura, comportando delle complicazioni nell'interpretazione, è indispensabile garantire un ottimo contatto tra picchetto e terreno, bagnando il terreno stesso con acqua più o meno salata.

La ricostruzione tomografica è stata effettuata mediante l'applicazione del Metodo degli Elementi Finiti, discretizzando il terreno al di sotto degli elettrodi in un numero finito di maglie o celle, ciascuna di resistività omogenea ed incognita. La forma degli elementi è generalmente quadrata o rettangolare e le dimensioni sono determinate in base alla distanza tra gli elettrodi (solitamente pari a metà della spaziatura tra due elettrodi contigui). I valori di resistività da determinare sono quindi quelli che caratterizzano ciascun elemento della maglia; la loro determinazione avviene tramite l'applicazione di un algoritmo iterativo di inversione, che modifica progressivamente il valore della resistività di ciascun elemento (fissato arbitrariamente all'inizio del processo) in modo da minimizzare gli errori tra i potenziali calcolati e quelli misurati agli elettrodi. Il problema della determinazione della resistività di ciascun elemento non è lineare; è quindi possibile che l'errore da minimizzare possieda molti minimi locali e che, definita una soglia di errore nei dati sperimentali, esista di conseguenza più di una soluzione. Al fine di individuare il minimo assoluto (quello che contiene la soluzione più prossima alla realtà) si utilizzano generalmente altre metodologie con lo scopo di fissare il campo di variazione della resistività degli elementi finiti.

Per le analisi è stato adottato il software di calcolo RES2DINV, programma 2D di Electrical Imaging Surveys sviluppato da M.H.Loke, che utilizza la procedura di inversione basata sul metodo dello smorzamento forzato dei minimi quadrati (de Groot-Hedlin e Constable, 1990; Sasaki 1992). Viene inoltre usato un perfezionamento del metodo dei minimi quadrati basato sulla tecnica sviluppata da Loke e Baker (1996). Questa tecnica è 10 volte più veloce del metodo convenzionale dei minimi quadrati per grossi quantitativi di dati e richiede l'utilizzo di meno memoria. In questo programma è possibile usare anche il metodo convenzionale Gauss – Newton, che risulta molto più lento rispetto al precedente, ma in zone con contrasti di resistività superiori a 10:1, fornisce risultati decisamente migliori. Una terza opzione è fornita dall'utilizzazione del metodo Gauss – Newton per le prime due iterazioni e, successivamente, per le restanti iterazioni, il metodo sviluppato da Loke e Baker. In molti casi questa combinazione fornisce il migliore compromesso.

Il modello 2-D utilizzato dal codice di calcolo suddivide il sottosuolo in un numero di blocchi

rettangolari, ne determina per ciascuno la resistività, assemblando i valori in una pseudosezione della resistività apparente che dovrà essere in accordo con le misure reali.

Per la disposizione Schlumberger, utilizzata nell'indagine, lo spessore del primo orizzonte di blocchi è fissato in 0.5 volte la spaziatura degli elettrodi, mentre lo spessore di ogni altro orizzonte successivo viene normalmente aumentato del 10%-25%. Il metodo ottimizzato, in generale, cerca di ridurre la differenza tra i valori della resistività apparente misurata e quella calcolata, adattando la resistività dei blocchi del modello ed utilizzando come misura di questa differenza lo scarto quadratico medio (RMS). Il ciclo iterativo si ferma accettando il modello di inversione che presenta il valore di errore RMS più piccolo possibile, anche se a volte tale modello può presentare variazioni non realistiche nei valori di resistività non coerenti con il modello geologico dell'area.

L'elaborazione fornisce una sezione 2D di resistività reale o effettiva, che tiene in considerazione i cambiamenti orizzontali e verticali della resistività del sottosuolo, rappresentandoli con metodo in contour line.

Di seguito si riportano alcune caratteristiche delle 9 linee elettriche acquisite:

Linea	Orientazione	Distanza elettrodi (m)	Lunghezza tot. (m)	Prof. max investigata (m)
E01	NNW-SSE	2.0	94.0	18.0
E02	ESE-WNW	2.5	117.5	13.0
E03	SE-NW	2.0	94.0	14.0
E04	SSW-NNE	2.0	94.0	14.0
E05	SE-NW	1.5	70.5	10.0
E06	SSE-NNW	1.0	47.0	8.0
E07	ENE-WSW	3.0	141.0	17.0
E08	SSE-NNW	1.5	70.5	13.0
E09	SSE-NNW	1.0	47.0	7.0

Si ricorda che la scelta delle caratteristiche di lunghezza totale ed interdistanza tra gli elettrodi di ciascuna linea elettrica è stata dettata dalle condizioni logistiche del sito: inoltre la particolarità dei materiali attraversati dal campo elettrico non ha permesso di investigare profondità elevate, limitando le profondità di indagine ad un massimo di 18 m dal piano campagna attuale.

4.3. Indagine elettromagnetica

Per quanto riguarda l'indagine elettromagnetica sono state eseguite due tipologie di misure:

- acquisizione lungo n. 7 transetti di misura, concentrati nel settore SW del sito di indagine e caratterizzati da lunghezza variabile, nell'ambito dei quali sono state percorse da 2 a 3 linee di scansione, acquisendo secondo una griglia a passo 2x2 m;
- acquisizioni sparse all'interno dell'area di indagine eseguite lungo le tracce delle linee elettriche e in corrispondenza di alcuni cumuli di materiale sciolto, quali quelli presenti nel settore N, poco investigato con le indagini sismiche ed elettriche, in quanto logisticamente non accessibile con escavatore per la realizzazione delle necessarie piste di accesso.

Di seguito si riportano le caratteristiche principali della strumentazione utilizzata, alcuni cenni teorici dei metodi geofisici elettromagnetici utilizzati e il tipo di elaborazione ed interpretazione adottato nello studio.

4.3.1. Strumentazione utilizzata

La strumentazione e l'attrezzatura utilizzata è lo strumento EM31 della Geonics, ovvero un sistema ad induzione elettromagnetica (low induction number) a frequenza di 9.8 kHz, di tipo portatile alimentato a batterie, avente una coppia di sensori posizionati a distanza fissa di 3.66 m su un apposito supporto rigido collegato all'apparecchiatura.

Lo strumento utilizzato appartiene ai sistemi mobili trasmettente/ricevente noti col nome di Slingram, che presentano trasmettitore e ricevitore collegati da un cavo, mantenuti a distanza costante e mossi assieme lungo una traversa.

La profondità di indagine è legata intrinsecamente al sistema di misura ovvero alla distanza esistente tra la bobina trasmettente e la bobina ricevente, alla corrente del trasmettitore e alla sua frequenza: maggiore distanza, maggiore corrente e minore frequenza permettono di investigare maggiori profondità. Altro fattore che condiziona la penetrazione del metodo è la presenza di terreno superficiale molto conduttivo.

Le caratteristiche tecniche dello strumento utilizzato garantiscono profondità di indagine comprese tra i 2 e i 4 m, a seconda della conducibilità del terreno investigato; inoltre le misure rilevate sono da considerare medie sulla colonna verticale di terreno investigato.

4.3.2. Misure elettromagnetiche: metodologia ed acquisizione

Il metodo permette di investigare i primi 2-4 metri di sottosuolo e di localizzare in particolare la posizione di materiali di natura metallica.

Il metodo si basa sulla misura dell'induzione elettromagnetica attraverso il seguente principio fisico: con una bobina alimentata con corrente alternata si produce un campo magnetico (campo primario) che inverte la sua direzione con regolarità ed uniformità (con una certa frequenza variabile da centinaia a decine di migliaia di Hz), propagandosi sia sopra sia sotto il terreno ed inducendovi di conseguenza una corrente alternata, di intensità direttamente proporzionale alla conducibilità del terreno attraversato, disposta secondo anelli circolari. Tali anelli di corrente elettrica sono in grado di produrre un campo magnetico alternato (campo secondario), proporzionale al valore della corrente stessa. Il campo secondario può essere rilevato tramite una bobina ricevente sotto forma di un segnale di uscita in tensione e quindi fornire informazioni sulla natura del terreno attraversato e sull'eventuale presenza di oggetti metallici. Infatti il campo magnetico rilevato dalla bobina ricevente è l'insieme del campo magnetico primario proveniente dal trasmettitore (che viene annullato) e dal campo magnetico secondario prodotto dal terreno e dall'eventuale oggetto bersaglio in esso contenuto. L'annullamento del campo primario avviene fornendo, tramite cavo di collegamento trasmettente/ricevente, una corrente alla bobina di ricezione tale da neutralizzare perfettamente la corrente indotta (l'esattezza della neutralizzazione è garantita solo se vengono mantenute costanti distanza ed orientamento delle due bobine). Del campo magnetico secondario, provocato dalla corrente elettrica indotta dallo strumento, sono rilevabili due componenti: quella in "quadratura di fase" con il campo primario e quella "in fase" con esso. Le variazioni di conducibilità del terreno vengono lette sotto forma di segnale elettrico (di tipo analogico) direttamente sul pannello di controllo della strumentazione ed espresse in mmho/m o mS/m. La strumentazione è calibrata per leggere un valore reale di conducibilità nel caso in cui il terreno attraversato sia costituito da materiale omogeneo, mentre nel caso in cui il sottosuolo sia stratificato, con ciascun strato caratterizzato da differente conducibilità, lo strumento misurerà un valore intermedio entro i 2-4 m di profondità investigata.

4.4. Reciproci rapporti geometrici tra le diverse linee di indagine e correzione topografica

In allegato n. 2 sono riportati i reciproci rapporti esistenti tra le linee sismiche, le linee elettriche e le linee di scansione elettromagnetica. Per tenere in conto le limitate variazioni topografiche presenti nell'ambito della stessa linea di indagine, in assenza di un rilievo topografico di dettaglio, sono state approssimativamente stimate in campagna le variazioni di quota esistenti tra i diversi sensori: tali variazioni di quota sono considerate relative alla singola linea di indagine e non sono da intendersi in senso assoluto.

5. Risultati del piano d'indagine

Nei paragrafi seguenti sono riportati i risultati dell'indagine geofisica combinata:

5.1. Indagine sismica

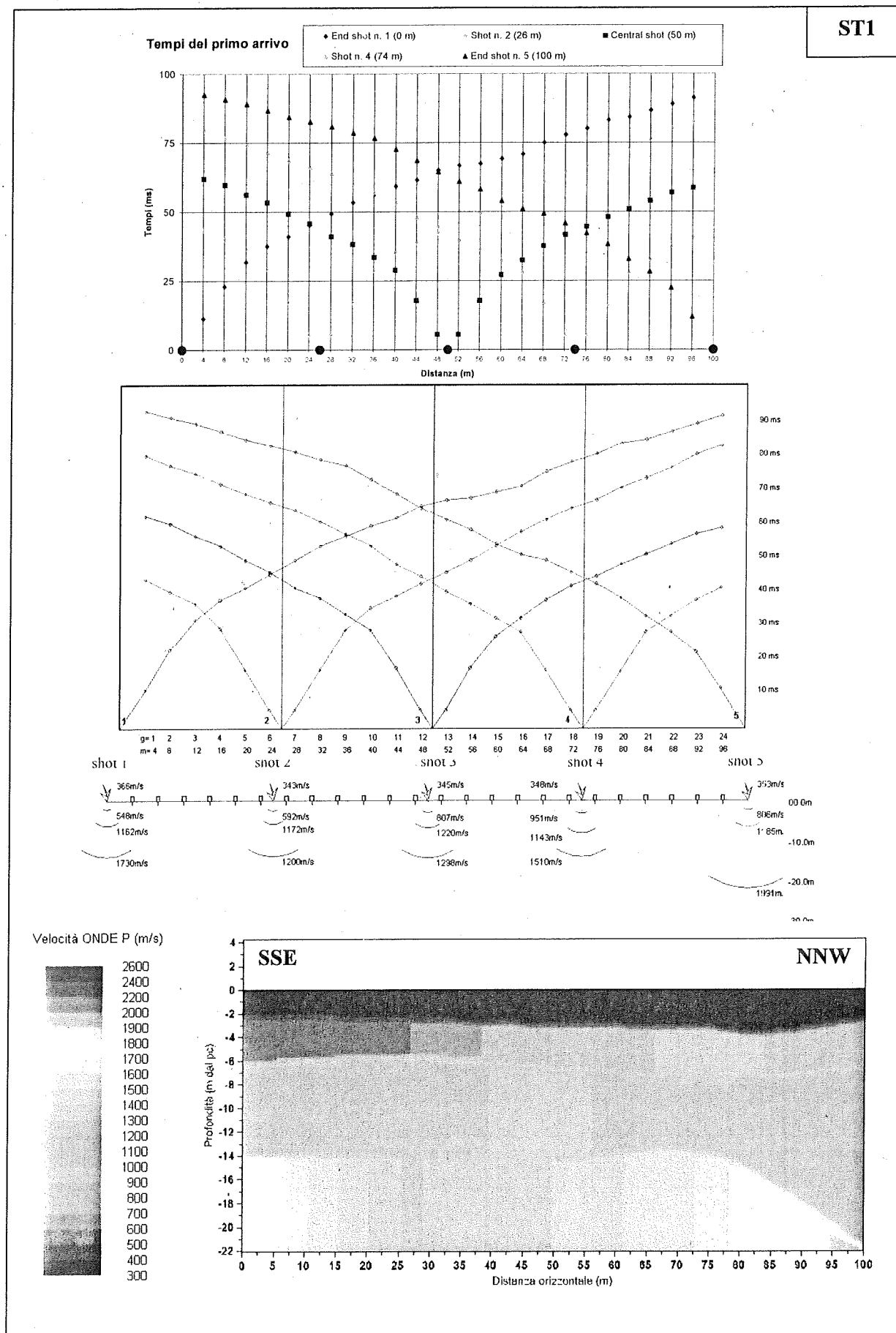
Di seguito si riportano per ciascun stendimento sismico:

- i tempi di primo arrivo individuati su ciascun ricevitore per ciascun punto di scoppio,
- il grafico distanza-tempo da cui si individuano le dromocrone e tramite linearizzazione si individuano i principali rifrattori al di sotto di ciascun shot,
- l'elaborazione dei dati eseguita scegliendo il modello interpretativo più opportuno in termini di numero di strati ed applicando il metodo di interpretazione con il tempo di intercetta, computando la profondità dei rifrattori in corrispondenza dei soli punti di scoppio (shot-point),
- la sezione geofisica interpretativa in onde P rappresentata con la tecnica di campitura cromatica;
- i risultati dell'indagine MASW per i soli stendimenti ST1 e ST2; eseguiti all'esterno dell'area oggetto di studio.

In allegato n. 4 sono riportati a titolo indicativo alcuni sismogrammi di acquisizione.

STENDIMENTO ST1:

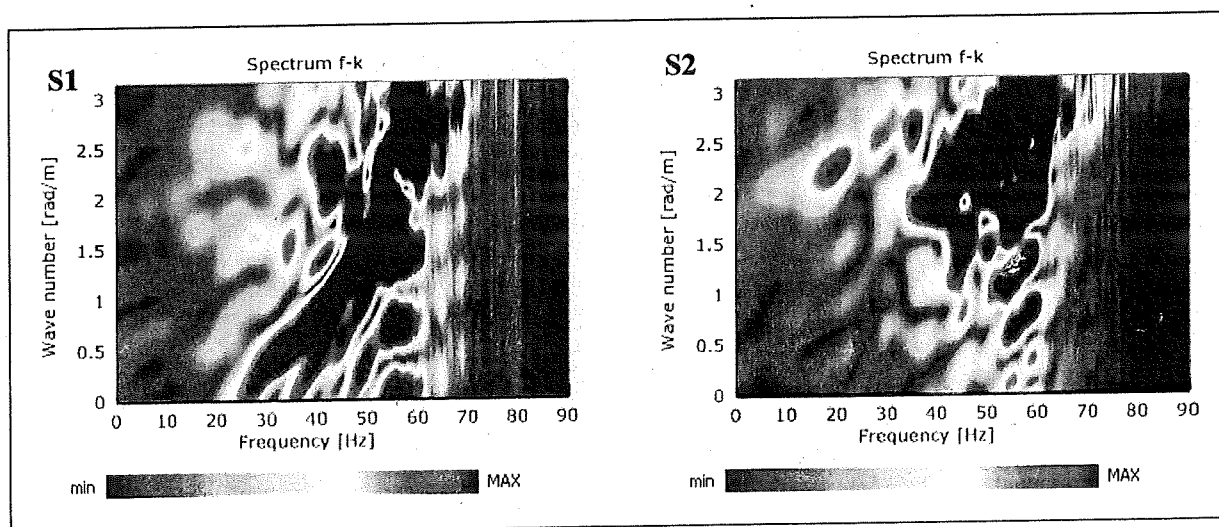
N° shot			1	2	3	4	5
Distanza relativa (m)			0.0	26.0	50.0	74.0	100.0
Quota relativa (m)			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Geofono	Distanza relativa (m)	Quota relativa (m)	Tempi del primo arrivo per ciascun shot (ms)				
			1	2	3	4	5
1	4	0.0	11.30	43.50	62.09	79.69	92.50
2	8	0.0	23.00	40.00	59.79	76.69	90.80
3	12	0.0	31.79	36.50	56.29	74.40	89.00
4	16	0.0	37.59	29.39	53.40	71.50	86.69
5	20	0.0	41.09	17.20	49.29	68.59	84.30
6	24	0.0	45.20	5.50	45.79	66.19	82.59
7	28	0.0	49.29	5.50	41.09	63.90	80.80
8	32	0.0	53.40	17.20	38.20	60.40	78.50
9	36	0.0	56.29	28.89	33.50	56.90	76.69
10	40	0.0	59.20	35.29	28.88	53.40	72.69
11	44	0.0	61.59	38.79	17.79	48.09	68.58
12	48	0.0	65.09	42.29	5.50	44.60	64.50
13	52	0.0	66.80	45.79	5.50	40.00	61.00
14	56	0.0	67.40	49.29	17.79	36.50	58.09
15	60	0.0	69.19	53.40	27.10	32.40	54.00
16	64	0.0	70.90	57.50	32.40	28.30	51.00
17	68	0.0	75.00	61.00	37.59	17.20	49.29
18	72	0.0	77.90	64.50	41.70	5.50	45.79
19	76	0.0	80.20	66.80	44.59	5.50	42.29
20	80	0.0	83.20	70.30	48.09	16.60	38.20
21	84	0.0	84.30	73.19	51.00	28.29	32.90
22	88	0.0	86.70	76.19	54.00	32.90	28.29
23	92	0.0	89.00	80.19	56.90	37.59	22.39
24	96	0.0	91.30	82.59	58.59	41.09	11.89

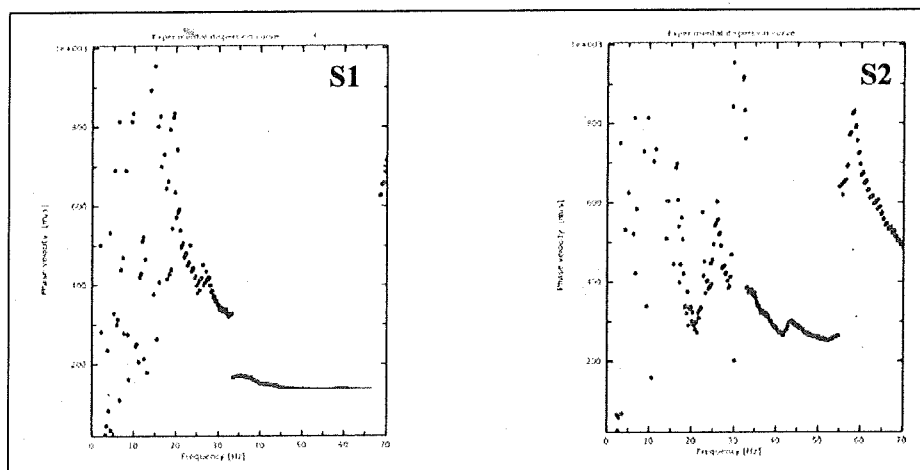


Nella sezione ST1 in onde P si evidenziano 2 rifrattori principali continui ed un terzo rifratte più profondo discontinuo:

- il primo rifratte è posto alla profondità variabile da 2.0 a 3.0 m dal piano campagna attuale e separa il sismostrato superficiale aerato caratterizzato da valori di V_P compresi tra 340 e 370 m/s da quello sottostante con V_P compresi tra 550 e 950 m/s (in particolare nel settore SSE il valore è compreso tra 550-600 m/s, mentre nel settore centrale e nel settore NNW il valore è compreso tra 800-950 m/s);
- il secondo rifratte è posto alla profondità variabile da 6.0 a 8.0 m dal pc e separa il secondo sismostrato dal terzo sismostrato caratterizzato da valori di V_P molto omogenei e compresi tra 1100 e 1200 m/s;
- il terzo rifratte è discontinuo, essendo stato rilevato in corrispondenza dei soli punti di energizzazione S1, S4 e S5 ed è posto alla profondità variabile da 14.0 m (nelle energizzazioni S1 e S4) a 22.0 m dal pc (nell'energizzazione S5): tale rifratte separa il terzo sismostrato dal quarto sismostrato caratterizzato da valori di V_P compresi tra 1500 e 2000 m/s.

Dalle acquisizioni MASW coniugate è stato determinato sia lo spettro f-k sia la curva di dispersione sperimentale apparente: il confronto mostra differenze non trascurabili legate alla presenza di variazioni nella geometria e nelle caratteristiche elastiche dei materiali presenti ai due estremi dell'array sismico masw.



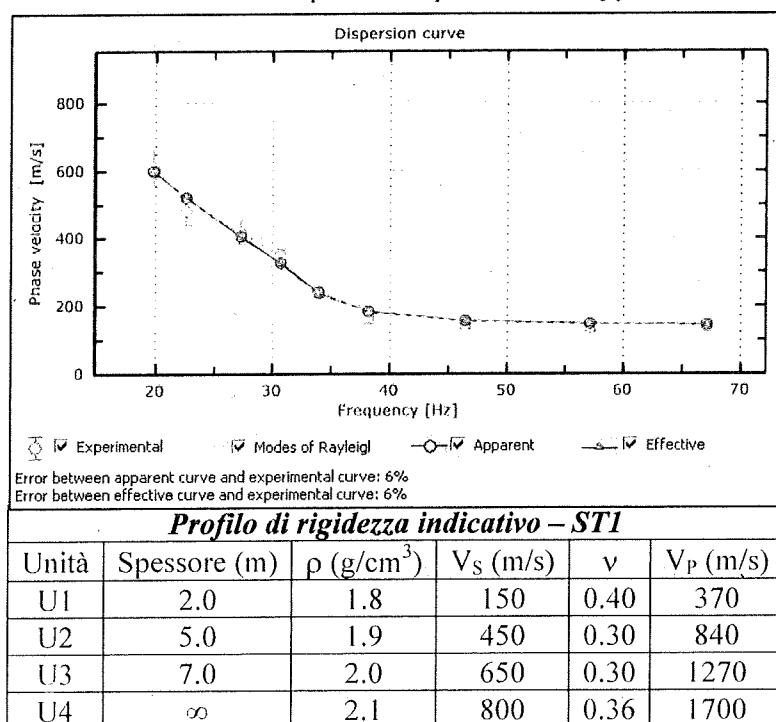


In particolare si rileva una forte discrepanza nel tratto compreso tra le frequenze di 40 e 70 Hz e nel tratto compreso tra i 10 e 20 Hz.

Tali differenze si traducono in una bassissima attendibilità dei risultati ottenuti dal processo di inversione, risultati che comunque possono essere considerati indicativi e quindi validi, in via preliminare, per la caratterizzazione della rigidità del sito.

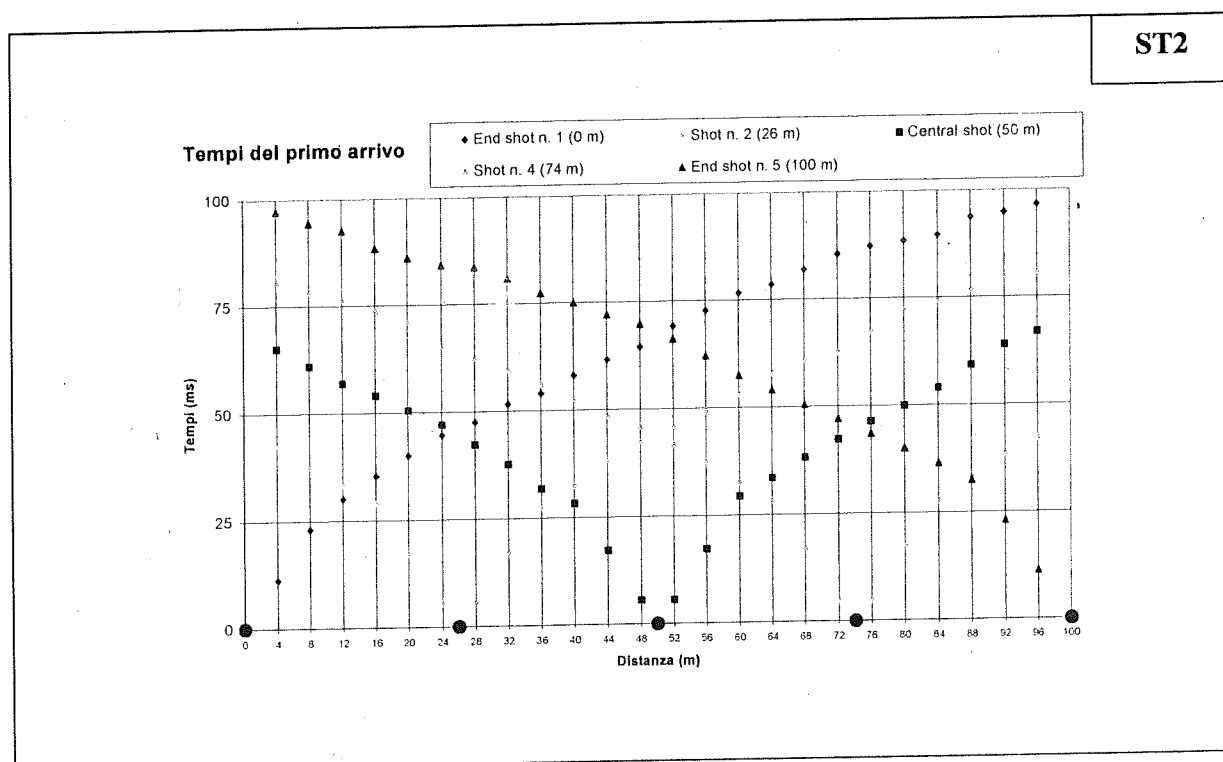
Si è proceduto pertanto alla valutazione di coerenza del segnale acquisito nell'estremo S1 (la cui curva presenta una maggiore definizione) su ciascun ricevitore per determinare la minima frequenza affidabile (20Hz), a cui è legata la massima profondità di indagine.

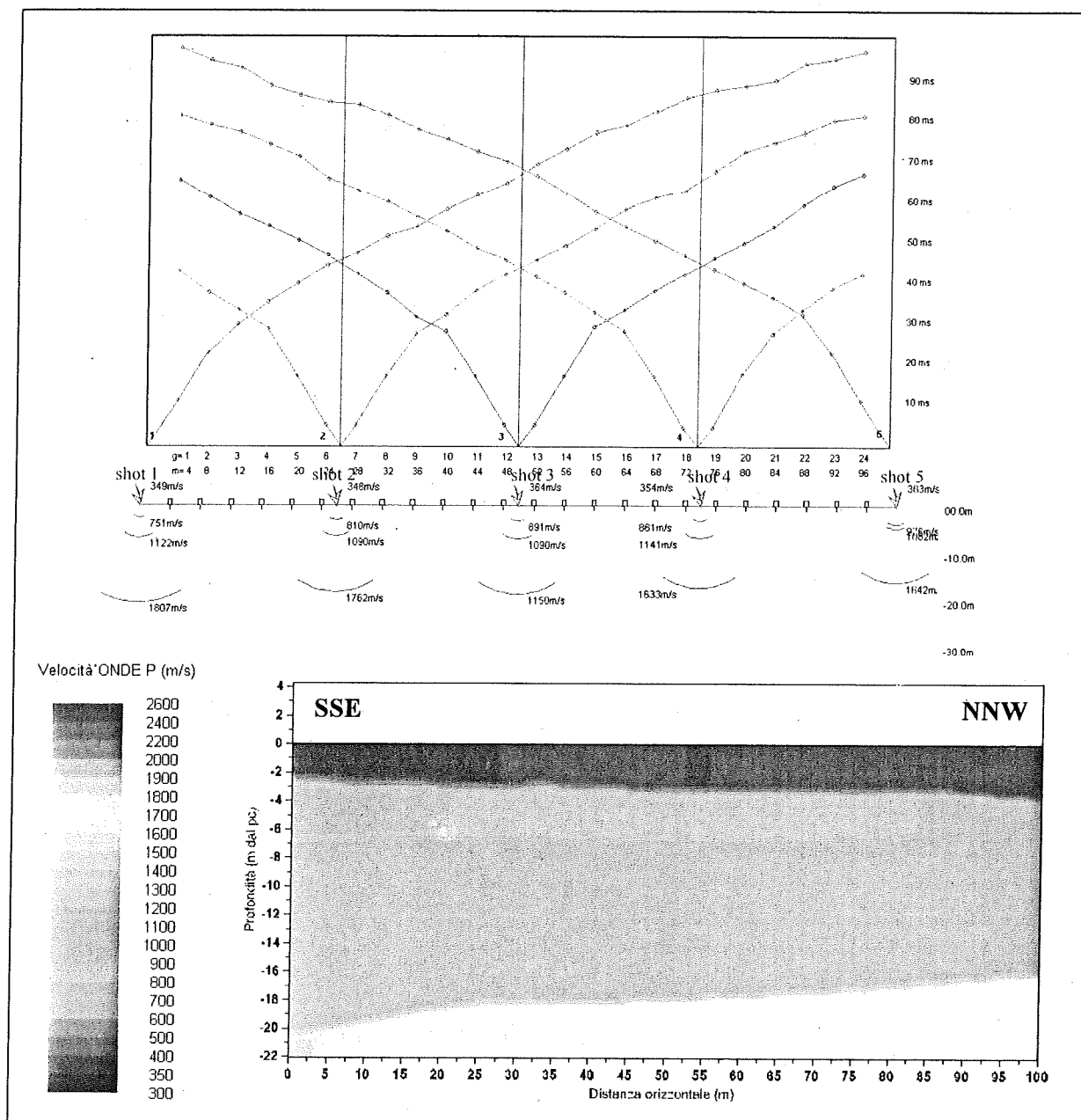
Il processo di inversione è stato vincolato al modello in onde P individuato dalla sismica a rifrazione, accettando soluzioni con un errore medio inferiore o uguale al 6% sul fitting della curva di dispersione numerica con la curva di dispersione sperimentale apparente:



STENDIMENTO ST2:

N° shot			1	2	3	4	5
Distanza relativa (m)			0.0	26.0	50.0	74.0	100.0
Quota relativa (m)			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Geofono	Distanza relativa (m)	Quota relativa (m)	Tempi del primo arrivo per ciascun shot (ms)				
			1	2	3	4	5
1	4	0.0	11.30	42.90	65.09	80.80	97.19
2	8	0.0	23.00	37.59	61.00	78.50	94.30
3	12	0.0	30.00	33.50	56.90	76.69	92.50
4	16	0.0	35.29	28.87	54.00	73.80	88.40
5	20	0.0	40.00	17.20	50.50	70.90	86.09
6	24	0.0	44.59	5.50	47.00	65.59	84.30
7	28	0.0	47.50	5.50	42.29	62.70	83.69
8	32	0.0	51.59	17.20	37.59	59.79	80.80
9	36	0.0	54.00	27.70	31.79	56.29	77.30
10	40	0.0	58.09	32.40	28.29	52.79	75.00
11	44	0.0	61.59	38.20	17.20	48.70	72.09
12	48	0.0	64.50	42.29	5.50	45.79	69.69
13	52	0.0	69.19	45.79	5.50	41.70	66.19
14	56	0.0	72.69	49.29	17.20	37.59	62.09
15	60	0.0	76.69	53.40	29.37	32.90	57.50
16	64	0.0	78.50	58.09	33.50	28.29	54.00
17	68	0.0	82.00	61.00	38.20	17.20	50.50
18	72	0.0	85.50	62.70	42.29	4.90	47.00
19	76	0.0	87.30	67.40	46.40	4.90	43.50
20	80	0.0	88.40	72.09	49.90	17.79	40.00
21	84	0.0	89.59	74.40	54.00	27.70	36.50
22	88	0.0	93.69	76.69	59.20	33.50	32.40
23	92	0.0	94.80	79.69	63.90	38.79	23.00
24	96	0.0	96.59	80.80	66.80	42.29	11.30

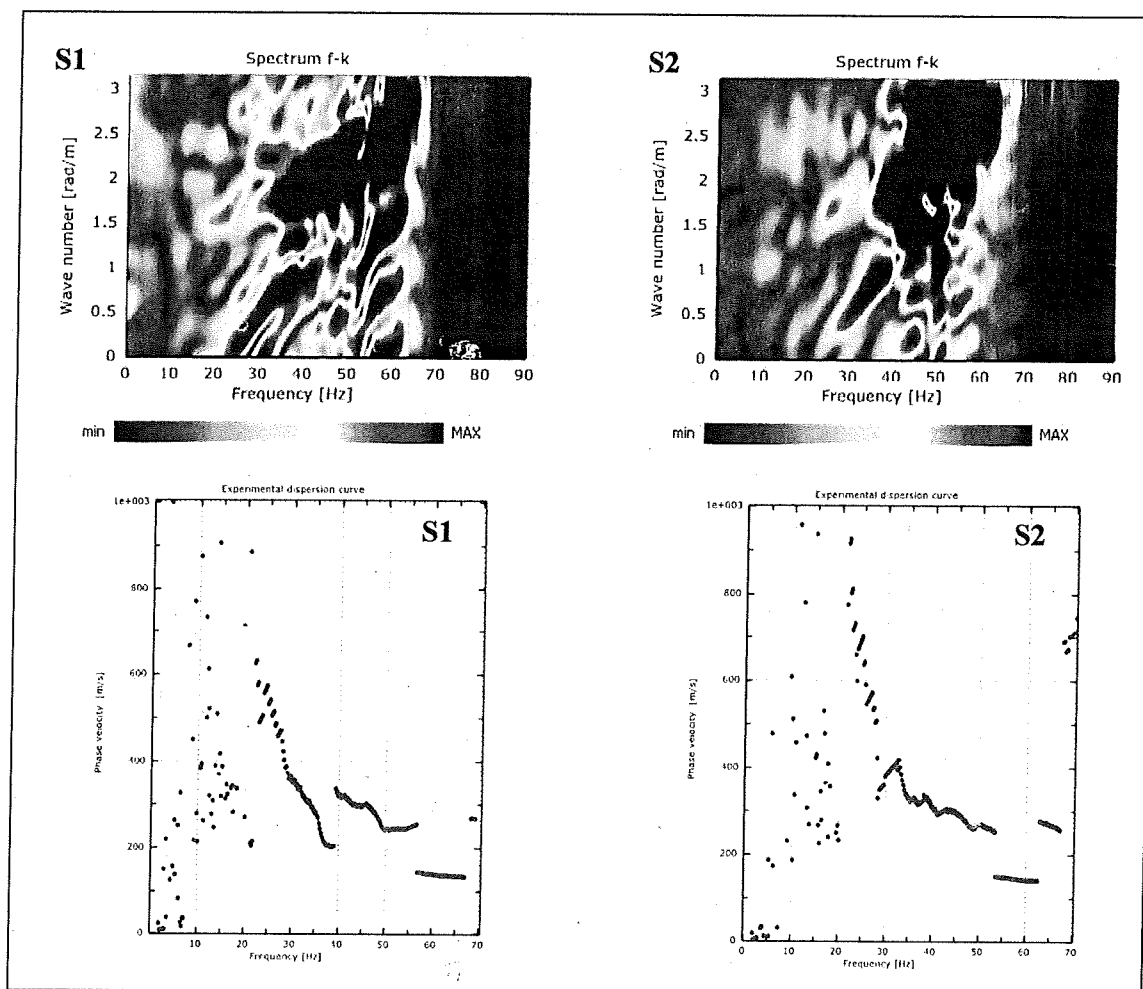




Nella sezione ST2 in onde P si evidenziano 3 rifrattori principali continui:

- il primo rifrattore è posto alla profondità variabile da 2.5 a 4.0 m dal piano campagna attuale e separa il sismostrato superficiale aerato caratterizzato da valori di V_P compresi tra 340 e 360 m/s da quello sottostante con V_P compresi tra 750 e 950 m/s;
- il secondo rifrattore è posto alla profondità variabile da 5.0 a 7.0 m dal pc e separa il secondo sismostrato dal terzo sismostrato caratterizzato da valori di V_P molto omogenei e compresi tra 1050 e 1150 m/s;
- il terzo rifrattore è posto alla profondità variabile da 16.0 m a 20.0 m dal pc e separa il terzo sismostrato dal quarto sismostrato caratterizzato da valori di V_P compresi tra 1600 e 1800 m/s.

Dalle acquisizioni MASW coniugate è stato determinato sia lo spettro f-k sia la curva di dispersione sperimentale apparente: il confronto mostra alcune differenze trascurabili legate alla presenza di variazioni nella geometria dei materiali presenti ai due estremi dell'array sismico masw.

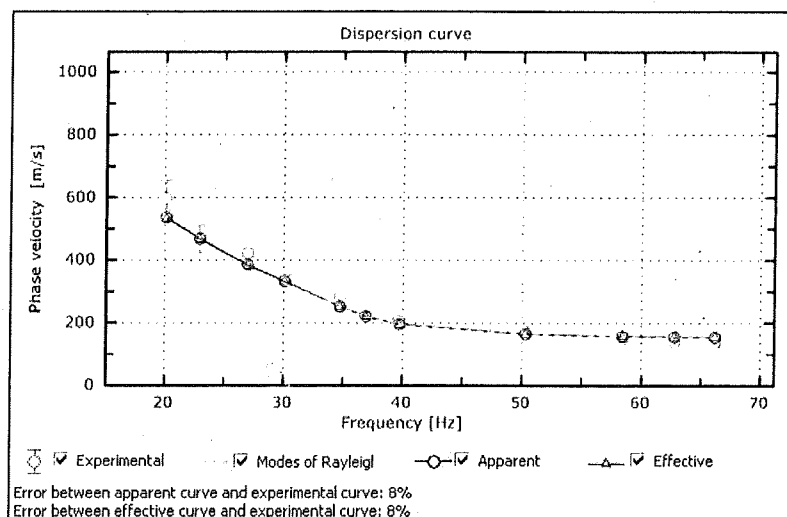


In particolare si rileva una forte discrepanza nel tratto compreso tra le frequenze di 30 e 40 Hz.

Tali differenze compromettono in parte l'attendibilità dei risultati ottenuti dal processo di inversione, risultati che comunque possono essere considerati rappresentativi del sito e quindi validi per la caratterizzazione della rigidità del sito stesso.

Si è proceduto pertanto alla valutazione di coerenza del segnale acquisito nell'estremo S2 (la cui curva presenta una maggiore regolarità) su ciascun ricevitore per determinare la minima frequenza affidabile (20Hz), a cui è legata la massima profondità di indagine.

Il processo di inversione è stato vincolato al modello in onde P individuato dalla sismica a rifrazione, accettando soluzioni con un errore medio inferiore o uguale al 8% sul fitting della curva di dispersione numerica con la curva di dispersione sperimentale apparente:



Profilo di rigidità indicativo – ST2

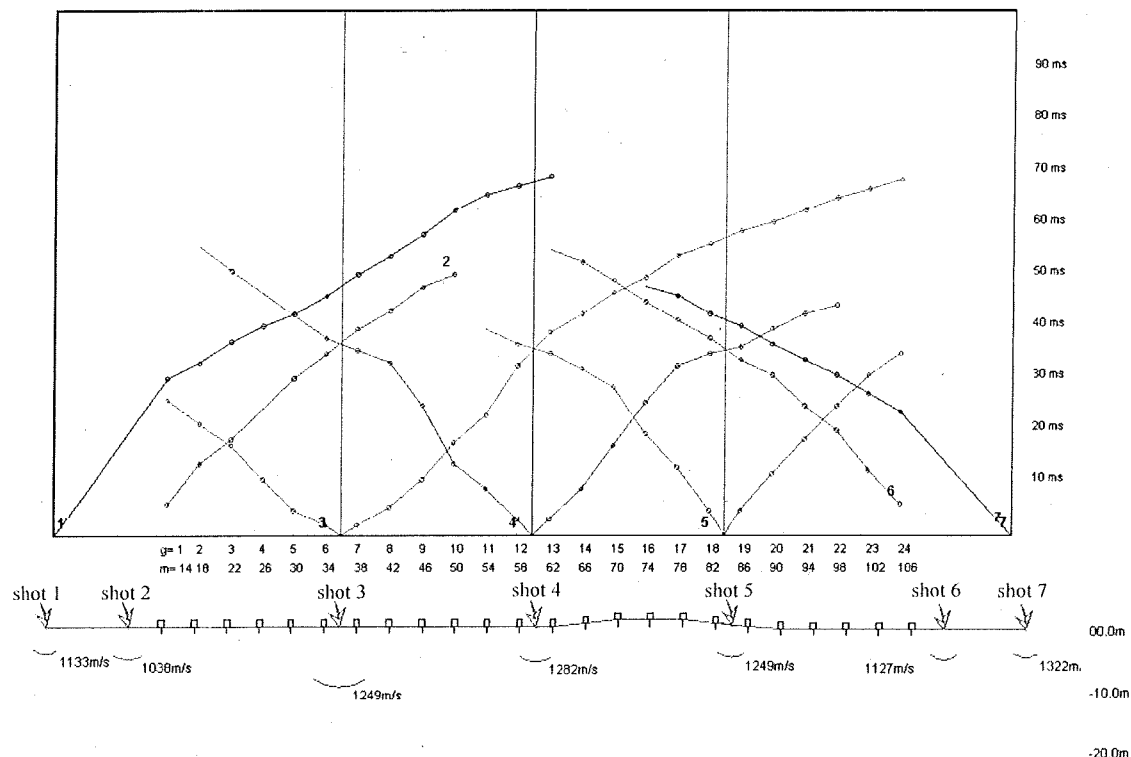
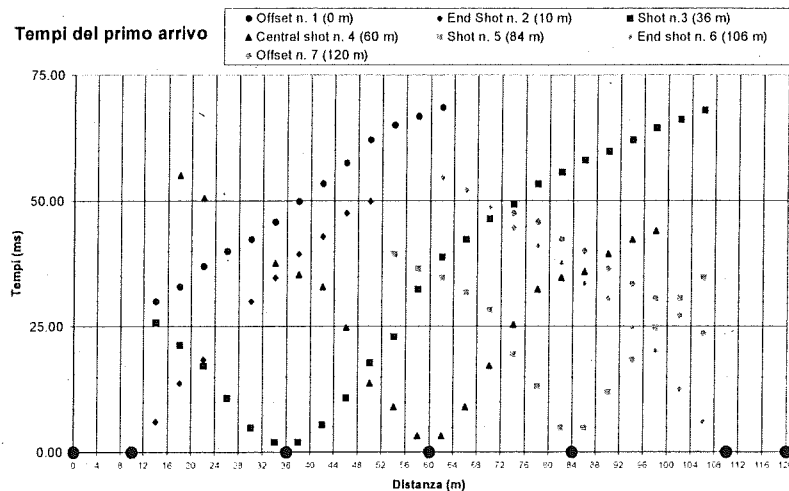
Unità	Spessore (m)	ρ (g/cm ³)	V_s (m/s)	ν	V_p (m/s)
U1	2.0	1.8	160	0.4	390
U2	5.0	1.9	400	0.3	748
U3a	4.0	2.0	680	0.3	1270
U3b	3.0	1.9	450-500	0.4	1100-1225
U4	∞	2.1	900	0.3	1680

STENDIMENTO ST3:

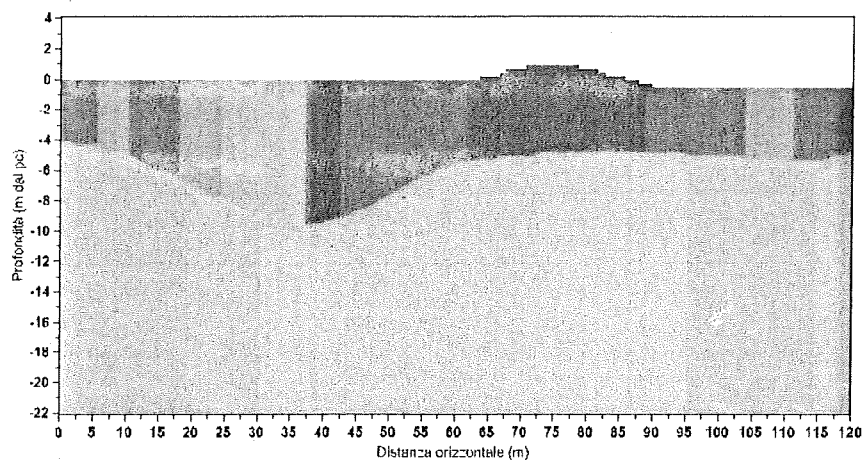
N° shot			1	2	3	4	5	6	7
Distanza (m)			0.0	10.0	36.0	60.0	84.0	110.0	120.0
Quota (m slm)			0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	-0.50	-0.50
Geofono	Distanza (m)	Quota (m slm)	Tempi del primo arrivo per ciascun shot (ms)						
			1	2	3	4	5	6	7
1	14	0.00	30.00	6.09	25.89	-	-	-	-
2	18	0.00	32.90	13.70	21.29	55.09	-	-	-
3	22	0.00	37.00	18.40	17.20	50.50	-	-	-
4	26	0.00	40.00	-	10.80	-	-	-	-
5	30	0.00	42.29	30.00	4.90	-	-	-	-
6	34	0.00	45.79	34.70	2.00	37.60	-	-	-
7	38	0.00	49.90	39.40	2.00	35.30	-	-	-
8	42	0.00	53.40	42.90	5.50	32.90	-	-	-
9	46	0.00	57.50	47.50	10.80	24.80	-	-	-
10	50	0.00	62.09	49.90	17.79	13.68	-	-	-
11	54	0.00	65.08	-	23.00	9.00	39.40	-	-
12	58	0.00	66.80	-	32.40	3.20	36.50	-	-
13	62	0.00	68.58	-	38.79	3.20	34.70	54.59	-
14	66	0.50	-	-	42.29	9.00	31.79	52.20	-
15	70	1.00	-	-	46.40	17.20	28.29	48.70	-
16	74	1.00	-	-	49.29	25.37	19.50	44.59	47.50
17	78	1.00	-	-	53.40	32.40	13.10	41.09	45.79
18	82	0.50	-	-	55.70	34.70	4.90	37.59	42.29
19	86	0.00	-	-	58.09	35.90	4.90	33.50	40.00
20	90	-0.40	-	-	59.79	39.40	11.89	30.60	36.50
21	94	-0.50	-	-	62.09	42.29	18.37	24.79	33.50
22	98	-0.50	-	-	64.50	44.00	24.79	20.10	30.60
23	102	-0.50	-	-	66.19	-	30.60	12.50	27.10
24	106	-0.50	-	-	68.00	-	34.70	6.09	23.60

ST3

Tempi del primo arrivo



Velocità ONDE P (m/s)



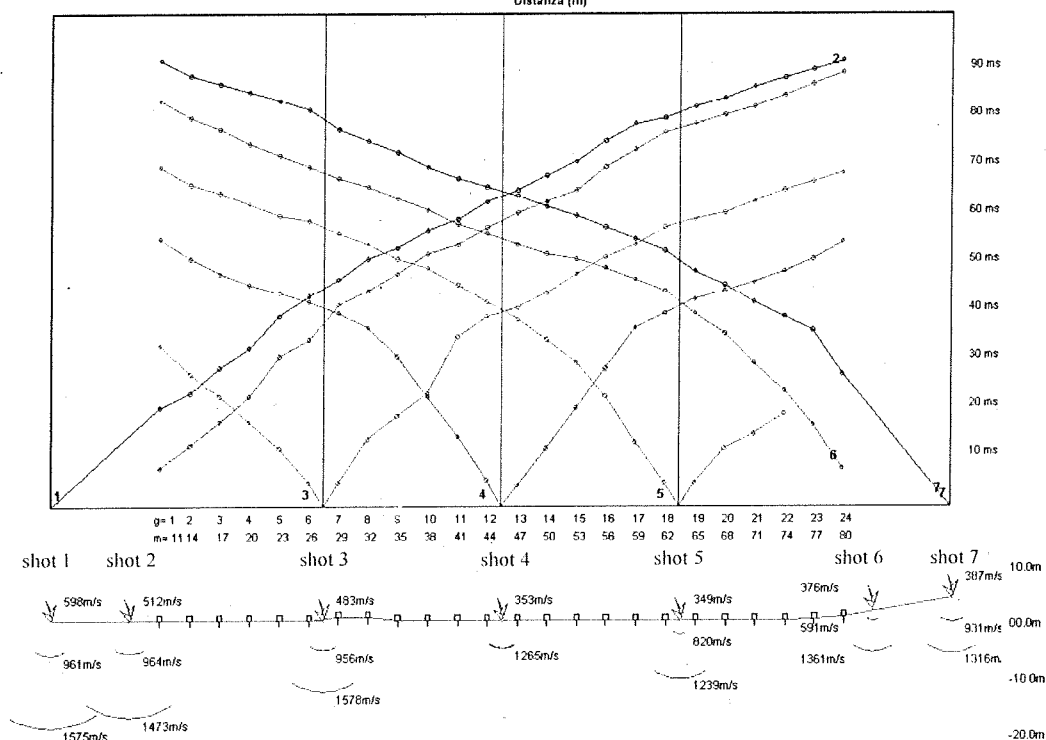
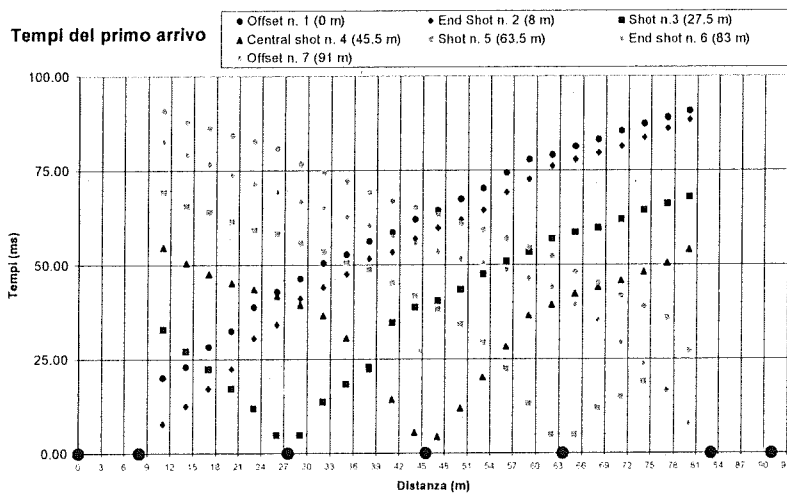
Nella sezione ST3 in onde P si evidenzia 1 rifrattore principale posto alla profondità variabile da 4.0 a 10.0 m dal piano campagna attuale, che separa il sismostrato superficiale caratterizzato da valori di V_p molto variabili e compresi tra 460 e 790 m/s da quello sottostante con V_p compresi tra 1000 e 1300 m/s. In corrispondenza degli shots n. 1 e n. 3 è stata rilevata la presenza a profondità variabili tra 17 e 19 m dal pc di un secondo rifrattore molto discontinuo, che separa il secondo rifrattore dal terzo con V_p dell'ordine dei 1900-2200 m/s.

Nella sezione non è stato rappresentato il secondo, rifrattore a causa del suo carattere marcatamente discontinuo.

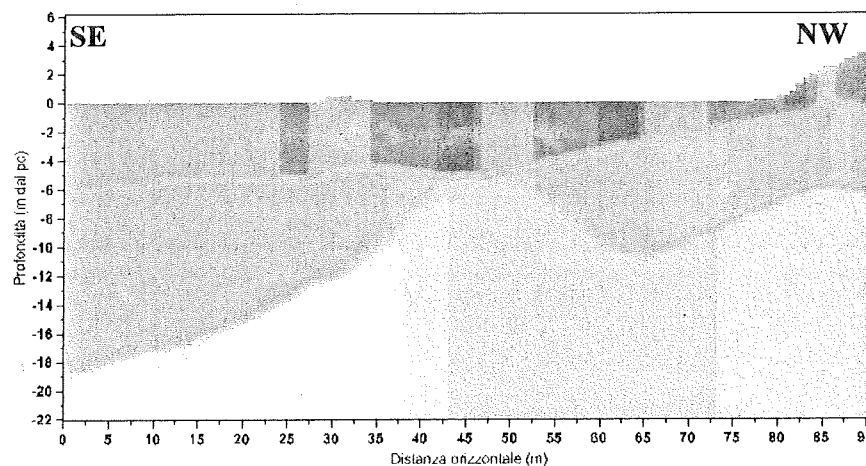
STENDIMENTO ST4:

N° shot			1	2	3	4	5	6	7
Distanza (m)			0.0	8.0	27.5	45.5	63.5	83.0	91.0
Quota (m slm)			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	4.0
Geofono	Distanza (m)	Quota (m slm)	Tempi del primo arrivo per ciascun shot (ms)						
			1	2	3	4	5	6	7
1	11	0.0	7.80	32.90	54.59	69.19	82.58	90.80	7.80
2	14	0.0	12.50	27.10	50.50	65.58	79.08	87.80	12.50
3	17	0.0	17.20	22.37	47.50	63.90	76.69	86.08	17.20
4	20	0.0	22.37	17.20	45.20	61.59	73.80	84.30	22.37
5	23	0.0	30.60	11.89	43.50	59.20	71.50	82.58	30.60
6	26	0.0	34.09	4.90	41.70	58.09	69.19	80.80	34.09
7	29	0.5	41.09	4.90	39.40	55.70	66.80	76.69	41.09
8	32	0.5	44.00	13.68	36.50	53.40	65.08	74.40	44.00
9	35	0.0	47.50	18.37	30.60	50.50	62.70	72.08	47.50
10	38	0.0	51.59	23.00	22.37	48.70	60.40	69.19	51.59
11	41	0.0	53.40	34.70	14.30	45.20	57.50	66.80	53.40
12	44	0.0	56.90	38.79	5.50	41.70	55.70	65.08	56.90
13	47	0.0	59.79	40.50	4.30	38.20	53.40	63.29	59.79
14	50	0.0	62.09	43.50	11.89	34.09	51.59	61.00	62.09
15	53	0.0	64.50	47.50	20.10	29.37	50.50	59.20	64.50
16	56	0.0	69.19	51.00	28.30	22.40	48.70	56.90	69.19
17	59	0.0	72.69	53.40	36.50	13.10	46.40	54.59	72.69
18	62	0.0	76.19	56.90	39.40	4.90	44.00	52.20	76.19
19	65	0.0	77.90	58.59	42.29	4.90	39.40	48.09	77.90
20	68	0.0	79.69	59.79	44.00	11.90	35.29	45.20	79.69
21	71	0.0	81.40	62.09	45.79	14.80	29.37	41.70	81.40
22	74	0.0	83.69	64.50	48.09	18.90	23.60	38.79	83.69
23	77	0.2	86.08	66.19	50.50	-	16.60	35.90	86.08
24	80	0.5	88.40	68.00	54.00	-	7.80	27.10	88.40

ST4



Velocità ONDE P (m/s)

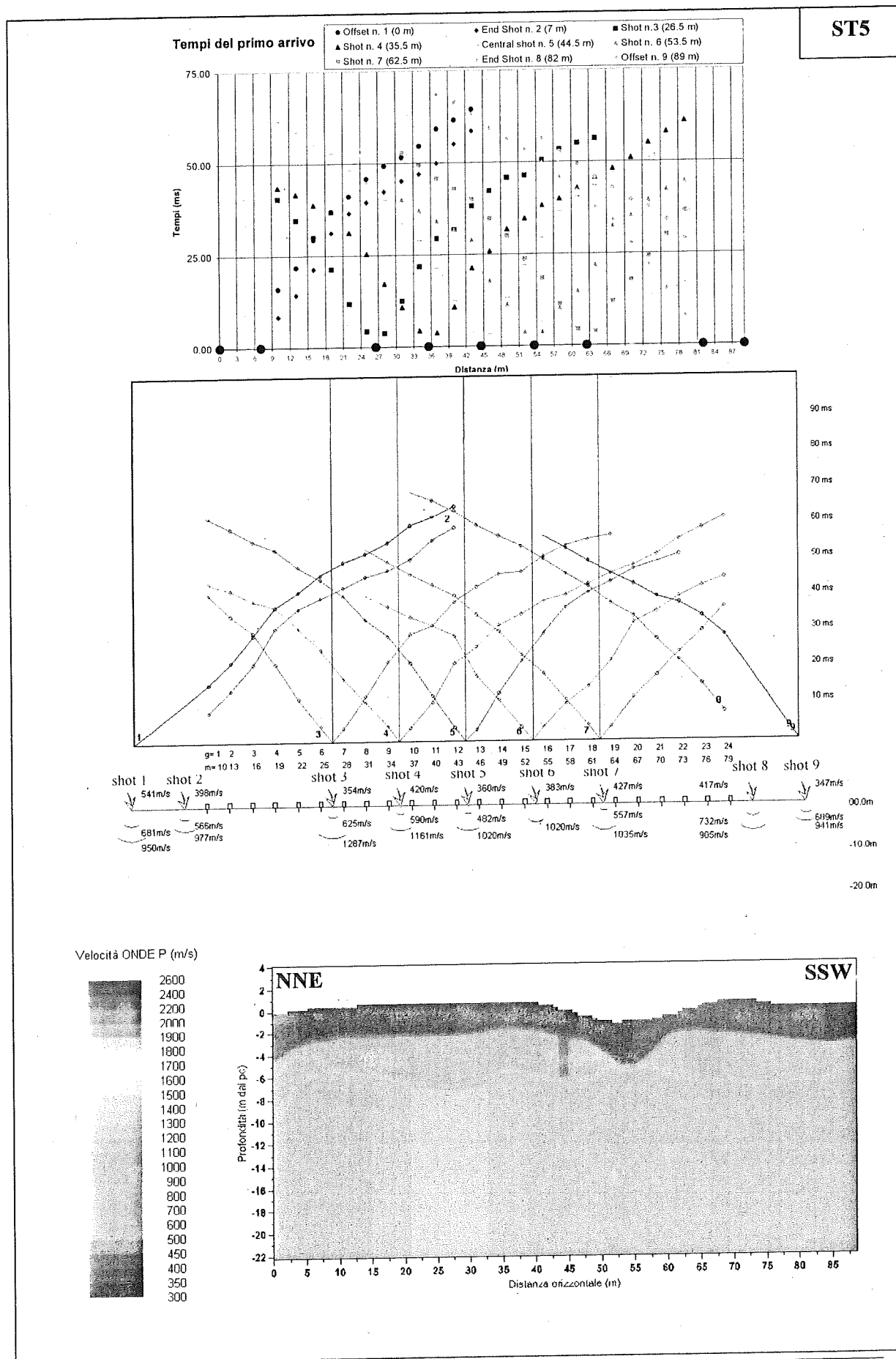


Nella sezione ST4 in onde P si evidenziano 2 rifrattori principali:

- il primo rifrattore è posto alla profondità variabile da 2.0 a 6.0 m dal piano campagna attuale e separa il sismostrato superficiale aerato, caratterizzato da valori di V_p variabili da 360 a 450 m/s nel settore NW a 500-600 m/s nel settore SE, dal sismostrato sottostante caratterizzato da V_p compresi tra 900-1200 m/s; solo nel settore NW il secondo sismostrato presenta velocità più basse dell'ordine dei 600 m/s;
- il secondo rifrattore è piuttosto discontinuo ed è posto alla profondità variabile da 6.0 a 19.0 m dal pc e separa il secondo sismostrato dal terzo sismostrato caratterizzato da valori di V_p compresi tra 1300 e 1600 m/s.

STENDIMENTO ST5:

N° shot			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Distanza (m)			0.0	7.0	26.5	35.5	44.5	53.5	62.5	82.0	89.0
Quota (m slm)			-0.25	0.20	0.50	0.50	-0.25	-1.37	-0.25	0.00	0.00
Geofono	Distanza (m)	Quota (m slm)	Tempi del primo arrivo per ciascun shot (ms)								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	10	0.3	16.00	8.39	40.50	43.50	61.59	-	-	-	-
2	13	0.4	21.87	14.30	34.70	41.70	58.59	-	-	-	-
3	16	0.5	29.37	21.29	30.00	38.79	55.09	-	-	-	-
4	19	0.5	37.00	31.20	21.29	37.00	52.79	-	-	-	-
5	22	0.5	41.09	36.50	11.89	31.20	48.09	-	-	-	-
6	25	0.5	45.79	39.40	4.30	25.37	44.59	-	-	-	-
7	28	0.5	49.29	42.29	3.76	17.20	40.00	-	-	-	-
8	31	0.5	51.59	45.20	12.50	10.80	33.50	40.00	52.79	-	-
9	34	0.5	54.59	47.00	21.87	4.30	28.87	37.00	49.29	-	-
10	37	0.5	59.20	49.90	29.37	3.77	21.29	34.09	45.79	68.58	-
11	40	0.5	61.59	55.09	31.79	10.80	12.50	31.79	42.90	66.19	-
12	43	0.0	64.50	58.59	38.20	21.29	3.77	28.87	40.00	63.29	-
13	46	-0.5	-	-	42.29	25.87	3.20	17.79	34.70	59.20	-
14	49	-1.0	-	-	45.79	31.79	13.10	11.30	30.00	56.29	-
15	52	-1.5	-	-	46.40	34.70	21.87	3.77	23.60	53.40	-
16	55	-1.2	-	-	50.50	38.20	29.37	3.76	18.37	49.90	56.29
17	58	-1.0	-	-	53.40	40.00	36.50	10.18	11.30	45.79	52.79
18	61	-0.5	-	-	55.09	42.90	40.50	14.80	4.30	42.29	49.29
19	64	0.0	-	-	56.29	45.79	43.50	21.87	3.76	37.59	45.79
20	67	0.5	-	-	-	48.09	47.00	32.40	11.89	34.09	42.90
21	70	0.5	-	-	-	51.00	0.00	35.29	17.79	27.70	39.40
22	73	0.5	-	-	-	55.09	51.00	39.40	24.20	21.87	37.59
23	76	0.0	-	-	-	58.09	-	42.29	30.00	15.39	34.09
24	79	0.0	-	-	-	61.00	-	44.59	36.50	7.80	28.87

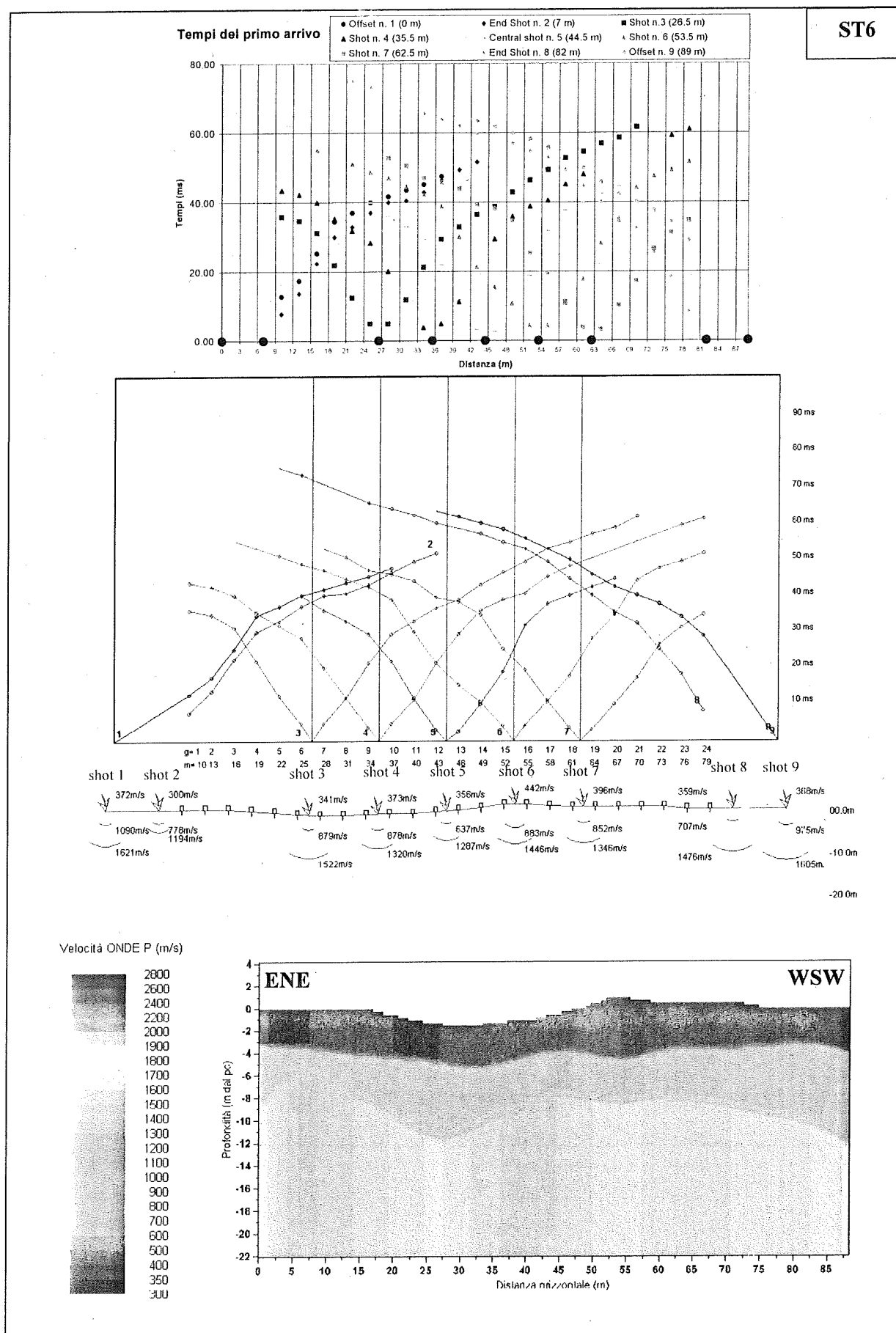


Nella sezione ST5 in onde P si evidenziano 2 rifrattori principali:

- il primo rifrattore è posto alla profondità variabile da 1.5 a 4.5 m dal piano campagna attuale e separa il sismostrato superficiale aerato, caratterizzato da valori di V_P variabili da 340 a 440 m/s dal sismostrato sottostante caratterizzato da V_P compresi tra 480-730 m/s; solo nel settore NNE, in corrispondenza del punto di energizzazione S1, il secondo sismostrato presenta valori di V_P più alti dell'ordine degli 800-900 m/s, simili a quelli del terzo sismostrato; in corrispondenza del punto di energizzazione S6 il secondo sismostrato è praticamente assente;
- il secondo rifrattore è posto alla profondità variabile da 4.0 a 10.0 m dal pc e separa il secondo sismostrato dal terzo sismostrato caratterizzato da valori di V_P compresi tra 900 e 1300 m/s.

STENDIMENTO ST6:

N° shot			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Distanza (m)			0.0	7.0	26.5	35.5	44.5	53.5	62.5	82.0	89.0
Quota (m slm)			0.0	0.0	-1.3	-1.2	-0.4	1.0	0.5	0.0	0.0
Geofono	Distanza (m)	Quota (m slm)	Tempi del primo arrivo per ciascun shot (ms)								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	10	0.0	12.80	7.80	35.90	43.50	-	-	-	-	-
2	13	0.0	17.40	13.69	34.70	42.29	-	-	-	-	-
3	16	0.0	25.30	22.39	31.20	40.00	-	55.00	-	-	-
4	19	-0.4	34.50	30.00	21.89	35.29	-	-	-	-	-
5	22	-0.8	37.00	32.90	12.50	31.79	-	51.00	-	75.00	-
6	25	-1.2	40.00	37.00	4.90	28.29	40.00	48.70	-	73.19	-
7	28	-1.5	41.70	40.00	4.90	20.10	35.90	47.00	52.79	-	-
8	31	-1.5	43.50	40.50	11.89	11.89	32.90	44.60	50.50	-	-
9	34	-1.3	45.20	42.90	21.29	3.78	29.38	42.30	47.00	65.59	-
10	37	-1.1	47.50	46.40	29.39	4.90	21.90	38.80	45.79	63.90	-
11	40	-1.0	-	49.29	32.90	11.30	11.89	30.00	44.00	62.09	-
12	43	-0.6	-	51.59	36.50	21.29	3.20	21.29	39.40	59.79	63.29
13	46	-0.2	-	-	38.79	29.38	2.58	15.40	38.20	-	61.59
14	49	0.2	-	-	42.90	35.90	10.19	10.80	34.70	56.90	59.79
15	52	1.0	-	-	46.40	38.79	18.90	4.30	25.39	54.59	58.09
16	55	1.0	-	-	49.29	40.50	31.80	4.30	19.50	52.79	55.70
17	58	0.7	-	-	52.79	45.20	37.60	10.80	11.30	49.29	-
18	61	0.5	-	-	54.59	48.09	40.00	17.80	3.79	44.59	49.90
19	64	0.5	-	-	56.90	-	42.30	28.20	3.20	40.00	45.79
20	67	0.5	-	-	58.59	-	44.60	34.70	10.19	35.29	42.29
21	70	0.5	-	-	61.59	-	-	44.20	17.20	32.40	40.00
22	73	0.5	-	-	-	-	-	47.50	26.50	25.38	37.59
23	76	0.0	-	-	-	59.20	-	49.30	31.20	18.38	34.09
24	79	0.0	-	-	-	61.00	-	51.59	34.70	8.39	28.89



del settore N, probabilmente legate alla presenza di piccoli frammenti metallici quali tondini etc. associati a resti di demolizioni edilizie.

6. Interpretazione incrociata dei risultati

Il piano di indagine condotto all'esterno dell'area ha permesso di caratterizzare, dal punto di vista sismico ed elettrico, la situazione geologica indisturbata del sito oggetto di studio e di ricostruire il modello sismo-resistivo del sottosuolo, che rappresenta il fondamentale riferimento per l'interpretazione dei risultati raccolti all'interno dell'area stessa.

Dai dati geologico-stratigrafici disponibili in aree limitrofe (alcuni sondaggi a carotaggio continuo ed alcune prove penetrometriche DPSH) è stato possibile assegnare alle diverse unità geofisiche, individuate dall'indagine, indicazioni anche di natura litologica.

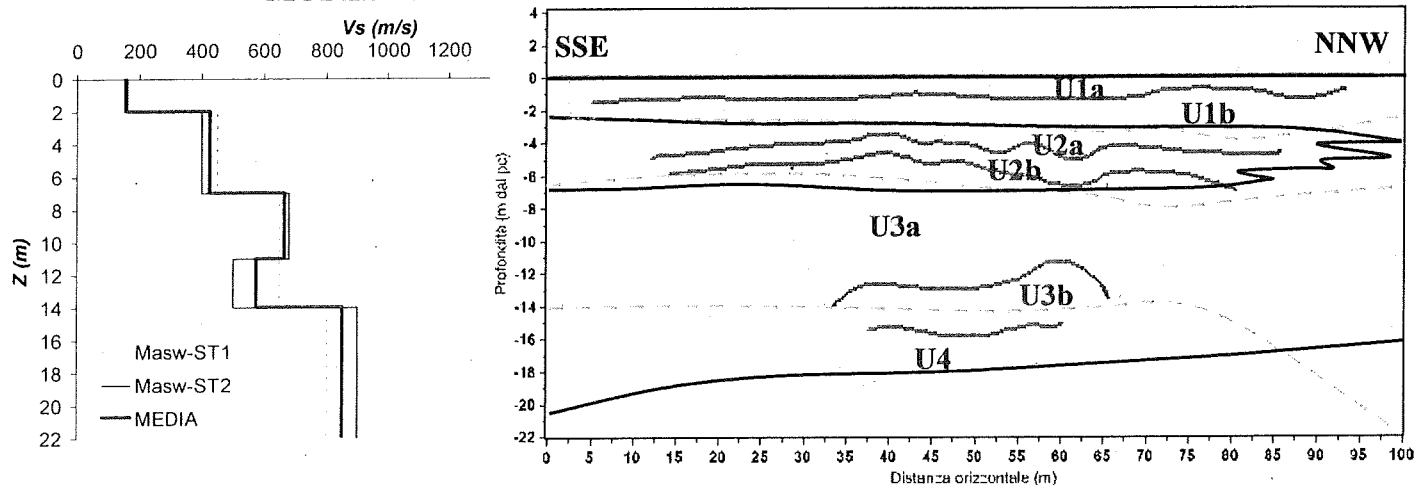
La ricostruzione del modello di riferimento del sottosuolo indisturbato è stata eseguita:

- individuando le interfacce elastiche nella sezione sismica ST2 (linee continue nere), presa come riferimento di base, e sovrapponendo ad esse le interfacce elastiche individuate nella sezione sismica ST1 (linee grigie tratteggiate), al fine di quantificare la variabilità esistente nel sottosuolo entro distanze di 50-100 m in termini di profondità delle interfacce elastiche e loro andamento e proprietà elastiche dei depositi; per la stima dei parametri elastici è stato ipotizzato, sulla base di dati di letteratura, la densità di ciascuna unità sismica, mentre per la definizione del valore della velocità delle onde di taglio ci si è avvalsi dei risultati delle indagini Masw;
- individuando le interfacce di resistività nella sezione elettrica E01 (linee continue blu) rese speculari per sovrapporre il geofono 1 con l'elettrodo 1;
- individuando le interfacce stratigrafiche lungo le stratigrafie di sondaggio disponibili nelle immediate vicinanze dell'area a circa 500-700 m di distanza (riportate in allegato n. 3).

Nell'interpretazione è stata trascurata la presenza dell'andamento molto articolato delle interfacce di resistività, la presenza di chiusure di lenti stratigrafiche tipiche dei depositi alluvionali, la variabilità areale della profondità del letto dello strato più superficiale (U1a); per quanto riguarda l'interfaccia di separazione tra l'unità U3b e l'unità U4 la forte discrepanza esistente tra le sezioni sismiche ST1 e ST2 è legata in parte ad una possibile variabilità geologica areale ed in parte alla sovrastima dello spessore dell'unità soprastante nella sezione ST2, rappresentata dall'insieme di U3a e U3b, in quanto l'U3b rappresenta uno strato muto per la sismica a rifrazione, essendo caratterizzato, molto probabilmente, da velocità di propagazione delle onde sismiche inferiore a quello dello strato soprastante. La presenza di questa inversione di velocità sembra scomparire spostandosi a S di circa 50-100 m, in quanto non rilevata nella sezione ST1, situazione confermata anche dal fatto che in essa l'interfaccia U3b e U4 si rileva a profondità di circa 14 m, coerentemente con i dati di resistività.

Di seguito è riportato lo schema del modello geofisico del sito indisturbato:

MODELLO GEOFISICO STRATIGRAFICO DEL SITO INDISTURBATO



Di seguito si riportano i valori dei parametri rappresentativi del sottosuolo dell'area di indagine:

Unità	Descrizione litologica	Densità (g/cm ³)	V_P (m/s)	V_S (m/s)	ν	Resistività ρ (ohmm)	Elettro strato
U1a	Terreno agrario con matrice limoso-argillosa	1.7-1.8	340-370	150-160	0.38-0.39	200-650	1
U1b	Sabbia asciutta parzialmente pedogenizzata con abbondante scheletro ghiaioso					650-1000	2
U2a	Sabbia asciutta da fine a media con ghiaia e ciottoli ϕ 5 cm	1.9-2.0	550-950	350-450	0.16-0.35	650-1000	
U2b	Limo sabbioso con ghiaia Sabbia e ghiaia media in matrice limosa					200-650	3
U3a	Sabbia e ghiaia grossolana in abbondante matrice limosa e limoso-argillosa con orizzonti decimetrici di limo argilloso con ghiaietto	2.0-2.1	1100-1200	650-680	0.23-0.26	50-200	4
U3b	Sabbia e ghiaia media in matrice limosa	1.9-2.0	900-1100	450-650	0.33-0.37	200-650	5
U4	Ghiaia molto grossa in matrice sabbiosa con ciottoli $\phi > 10$ cm a luoghi localmente cementata	2.1-2.2	1500-2000	800-900	0.30-0.37	650-1000	6

Il modello geofisico riporta, per ciascuna unità, gli intervalli di variabilità assegnati ai parametri V_P e ρ , utilizzati nell'indagine geofisica condotta all'interno dell'area di studio.

La profondità delle diverse interfacce è soggetta a variazioni piuttosto veloci sia verticalmente sia lateralmente: a livello indicativo l'unità U1a si estende dal pc fino ad 1 m, l'unità U1b da 1 a 3 m di profondità, l'unità U2a da 3 a 5 m e l'unità U2b si estende da 5 a 7 m di profondità; l'unità U3a si presenta invece molto variabile con frequenti lenti discontinue di materiale a resistività molto variabile che può superare localmente anche i 650 ohmm nel caso della presenza di depositi parzialmente cementati.

Oltre alle caratteristiche elastiche e di resistività dei materiali viene considerato come elemento di fondamentale supporto all'interpretazione dei risultati dell'indagine la sequenza stratigrafica e i reciproci rapporti tra le diverse unità geofisiche.

In particolare si è considerato come riferimento generale lo strato geofisico che presenta un valore di V_p mediamente dell'ordine dei 1100 m/s (che rappresenta il limite di riferimento con profondità massima, in quanto per il materiale rimaneggiato possono essere possibili valori di V_p compresi nell'intervallo assegnato all'unità U2a e U2b) e un valore di resistività ρ mediamente dell'ordine dei 150-250 ohm/m, ove disponibili entrambi i parametri.

Nei casi in cui sono disponibili solo i dati di resistività si è considerato come riferimento lo strato a resistività maggiore che presenta una certa continuità laterale su cui poggia un materiale eterogeneo, caratterizzato da valori molto bassi di resistività (dell'ordine dei 25-50 ohmm) associati a valori più alti (dell'ordine dei 100-300 ohmm).

Sulla base dei suddetti riferimenti è stata stimata la posizione dell'interfaccia tra terreno rimaneggiato e terreno indisturbato lungo le 8 linee elettriche eseguite all'interno del sito: di seguito si riportano le 8 sezioni interpretative, ove sono rappresentate:

- con linea nera continua l'interfaccia di resistività,
- con tratti blu continui, ove rilevata, l'interfaccia sismica,
- con la linea rossa continua, ove rilevata, l'estensione dell'area con anomalia elettromagnetica superficiale,
- con linee tratteggiate rosse le profondità scelte come riferimento rispetto al piano campagna attuale dell'interfaccia deposito rimaneggiato/deposito naturale e su cui ci si è basati per la ricostruzione della mappa delle isopache dei materiali rimaneggiati (riportata in allegato n. 8).

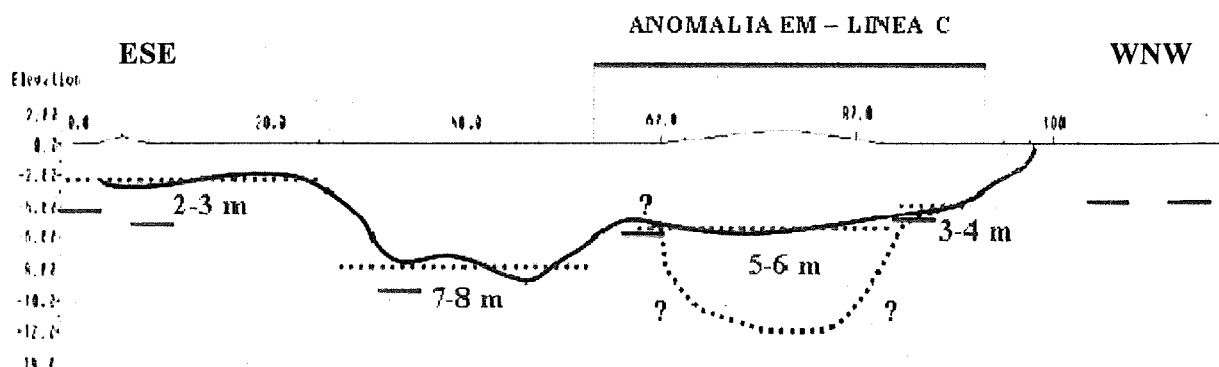
INTERPRETAZIONE LINEA E02-ST3:

Nella sezione E02-ST3 il confronto tra i risultati dell'indagine elettrica e dell'indagine sismica ha permesso di individuare come probabile superficie di contatto tra materiale rimaneggiato e terreno indisturbato l'interfaccia caratterizzata da valori di resistività dell'ordine dei 150 ohmm e da valori di V_p dell'ordine degli 800-1300 m/s: il terreno rimaneggiato è caratterizzato da valori di V_p variabili da un massimo di 650-800 m/s ad un minimo di 400-600 m/s e da valori di resistività dell'ordine dei 100 ohmm con valori minimi di 40-100 ohmm in corrispondenza dell'anomalia elettromagnetica rilevata in superficie.

Nel settore W della sezione si evidenzia una zona totalmente indisturbata in cui il materiale prevalentemente ghiaioso presenta resistività alta (da 400 a 700 ohmm) e valori di V_p compresi tra 600-650 m/s tipici dell'unità sismica generale U2.

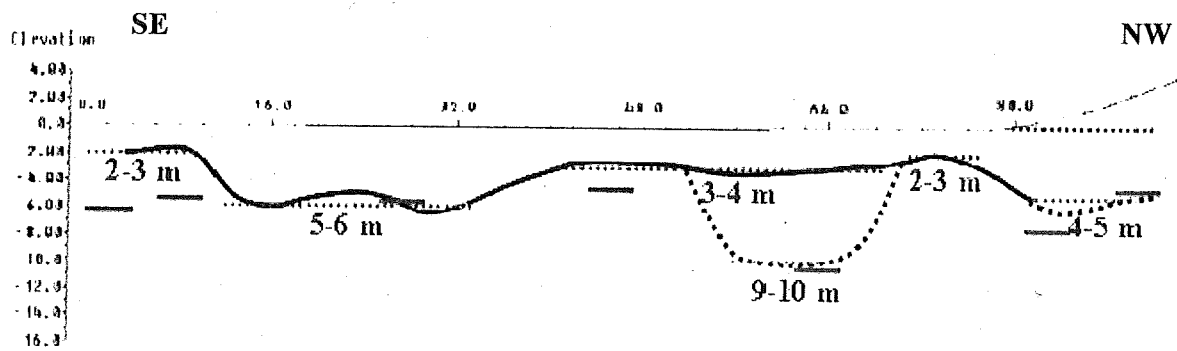
Nel settore E della sezione l'interfaccia riporto/naturale si individua a profondità inferiori a quelle del materiale più addensato con velocità sismiche V_p dell'ordine dei 1100 m/s.

In corrispondenza del settore più conduttivo (compreso tra i 55 m e gli 85 m), coincidente con la leggera anomalia elettromagnetica riscontrata nella linea EM C, si rileva una discrepanza tra i dati elettrici e i dati sismici, mostrando velocità sismiche compatibili con materiali naturali a partire dai 5-6 m di profondità dal pc e resistività molto basse (probabilmente in parte influenzate dalla presenza di materiale metallico sub-superficiale, quale una rete metallica ritrovata a circa 50 cm di profondità e rimossa solo successivamente all'acquisizione): per questo settore sono possibili due interpretazioni, quella più attendibile si basa sull'ipotesi della presenza di materiale naturale a bassa resistività posto al di sotto dei 5-6 m di profondità dal pc e corrispondente all'unità geofisica U3a (elettrostrato 4) del modello geofisico indisturbato di riferimento. L'interpretazione alternativa indica la posizione dell'interfaccia riporto/naturale con linea nera tratteggiata e considera il materiale a bassa resistività presente tra le profondità di 5-6 m e 12 m dal pc come materiale rimaneggiato.



INTERPRETAZIONE LINEA E03-ST4:

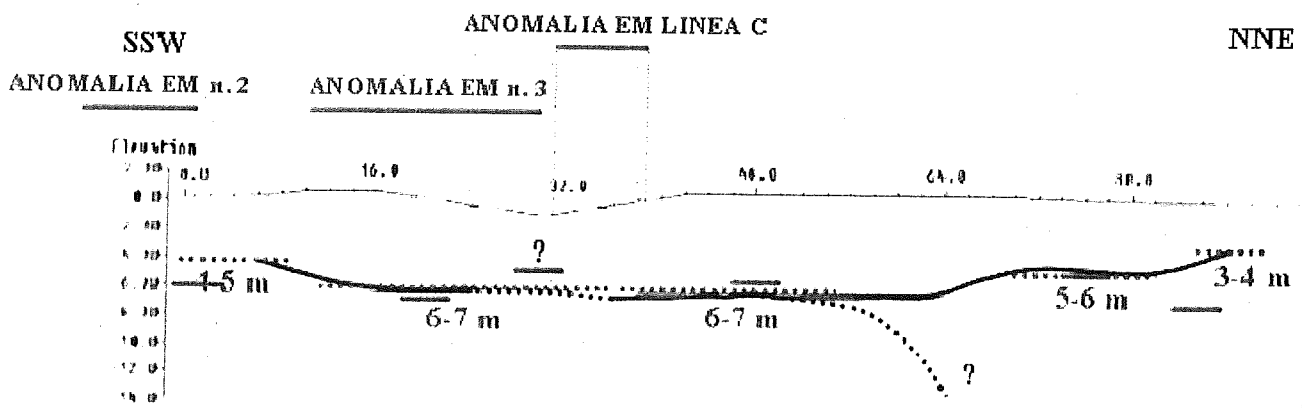
Nella sezione E03-ST4 il confronto tra i risultati dell'indagine elettrica e dell'indagine sismica ha permesso di individuare come probabile superficie di contatto tra materiale rimaneggiato e terreno indisturbato l'interfaccia caratterizzata da valori di resistività dell'ordine dei 150-200 ohmm e da valori di V_p dell'ordine degli 800-1000 m/s: il terreno rimaneggiato è caratterizzato da valori di V_p variabili da un massimo di 700-800 m/s ad un minimo di 300-350 m/s e da valori di resistività variabili da 100-150 ohmm (nel caso di materiale prevalentemente ghiaioso misto a residui plastici fini) a 50-100 ohmm (nel caso di materiale fine prevalentemente limoso quale residuo di lavorazioni edili o di materiale sabbioso ghiaioso con matrice limoso-argillosa).



INTERPRETAZIONE LINEA E04-ST5:

Nella sezione E04-ST5 il confronto tra i risultati dell'indagine elettrica e dell'indagine sismica, opportunamente traslate e ribaltate per renderle tra loro coincidenti, ha permesso di individuare come probabile superficie di contatto tra materiale rimaneggiato e terreno indisturbato l'interfaccia caratterizzata da valori di resistività dell'ordine dei 150-200 ohmm e da valori di V_p dell'ordine degli 800-1300 m/s. In particolare si è considerato come deposito naturale, data la sua estensione laterale e soprattutto il suo sviluppo verticale (fino ad una profondità minima di 14 m dal pc), il materiale ad alta resistività presente, in posizione stratigrafica anomala, nel settore SSW e centrale, il quale scompare bruscamente (linea nera tratteggiata), passando a materiali a bassa resistività assimilabili all'unità geofisica U3a; nel settore NNE invece la situazione è riconducibile al modello geofisico del sito indisturbato, essendo presente a partire da profondità variabili da 5 a 7 m materiale assimilabile all'unità geofisica U3b alternato a materiale assimilabile all'unità geofisica U3a.

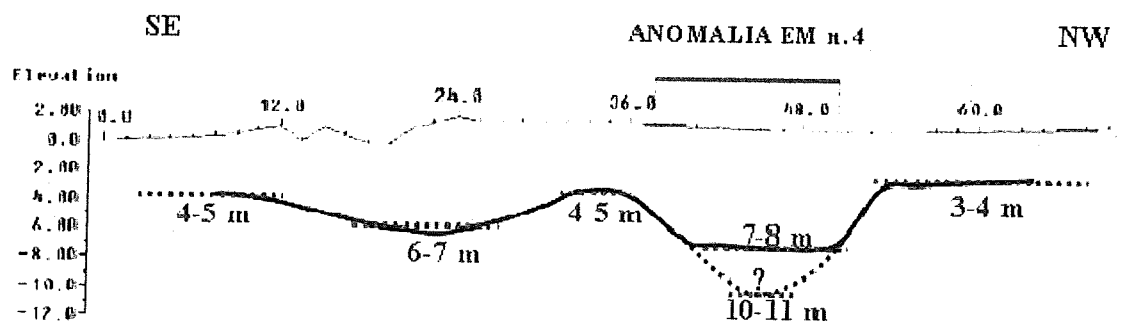
Il terreno rimaneggiato è caratterizzato da valori di V_p variabili da 500 a 800 m/s e da valori di resistività variabili da 100-150 ohmm a 10-50 ohmm; i valori minimi si rilevano nel settore SW in posizioni coerenti con quelle ove sono state rilevate le anomalie elettromagnetiche n. 2 e n. 3.



INTERPRETAZIONE LINEA E05:

Nella sezione E05 l'interpretazione incrociata dei valori di resistività ha permesso di individuare come probabile superficie di contatto tra materiale rimaneggiato e terreno indisturbato l'interfaccia caratterizzata da valori di resistività dell'ordine dei 100-150 ohmm: il terreno rimaneggiato è caratterizzato da valori di resistività variabili da 150-300 ohmm (nel caso di materiale prevalentemente ghiaioso sciolto in corrispondenza dei cumuli di riporto superficiali) a 30-80 ohmm (nel caso di materiale fine prevalentemente limoso misto a materiale conduttivo di natura ignota).

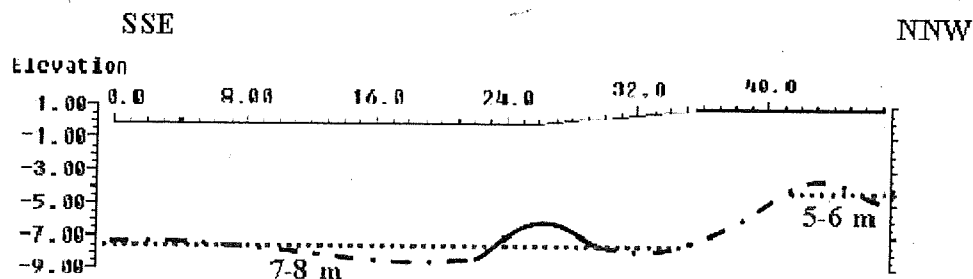
L'interfaccia riporto /naturale presenta una forte ambiguità in corrispondenza degli elettrodi 27-37, a partire dalla brusca interruzione laterale del corpo ad alta resistività riscontrato nel settore SE: tra tali elettrodi il materiale presenta una resistività molto bassa, dell'ordine dei 30-40 ohmm, a partire dai 2-3 m di profondità fino ad oltre i 10-12 m. La difficoltà interpretativa è legata al fatto che a partire da 7-8 m di profondità è possibile, in sito indisturbato, rilevare resistività basse (U3a) analoghe a quelle del materiale rimaneggiato soprastante: per questo motivo la definizione della profondità del terreno naturale in questo settore è affetta da un più ampio intervallo di variabilità. A conferma del fatto che in questo settore i rimaneggiamenti sono stati particolarmente intensi è la coincidenza con l'anomalia elettromagnetica n. 4 che si estende dall'elettrodo 26 all'elettrodo 34.



INTERPRETAZIONE LINEA E06:

Nella sezione E06 l'interpretazione incrociata dei valori di resistività ha permesso di individuare come probabile superficie di contatto tra materiale rimaneggiato e terreno indisturbato l'interfaccia caratterizzata da valori di resistività dell'ordine dei 200 ohmm. La limitata lunghezza della linea elettrica non permette grandi penetrazioni di indagine e pertanto l'interfaccia riporto/naturale è individuabile solo al centro della sezione, ove l'indagine si è spinta a maggiori profondità. Con la linea nera a tratto e punto viene ricostruito l'andamento ipotetico dell'interfaccia, in funzione dei dati di intersezione con altre linee elettriche.

Il terreno rimaneggiato è caratterizzato da valori di resistività variabili da 150-200 ohmm a 40-60 ohmm.



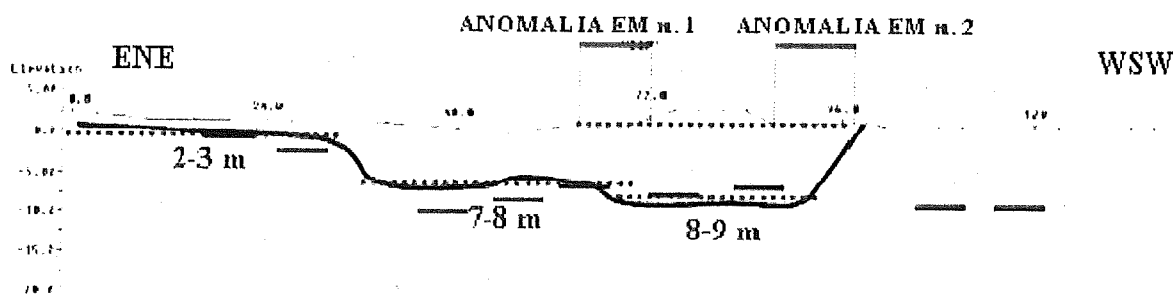
INTERPRETAZIONE LINEA ELETTRICA E07-ST6:

Nella sezione E07-ST6 il confronto tra i risultati dell'indagine elettrica e dell'indagine sismica ha permesso di individuare come probabile superficie di contatto tra materiale rimaneggiato e terreno indisturbato l'interfaccia caratterizzata da valori di resistività dell'ordine dei 200 ohmm e da valori di V_p dell'ordine dei 1000 m/s.

Il terreno rimaneggiato è caratterizzato da valori di V_p variabili da 650 a 850 m/s e da valori di resistività variabili mediamente tra 50 e 150 ohmm con valori massimi di 200 ohmm nel settore ENE (piazzale di ingresso al sito) e con valori minimi inferiori a 25 ohmm nel settore centrale posto al limite di proprietà W.

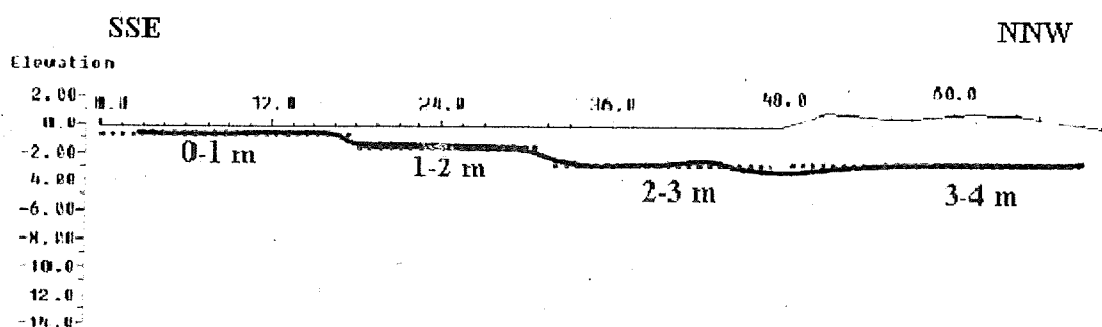
Il tratto compreso tra l'elettrodo 34 e l'elettrodo 48 si colloca in terreno indisturbato e presenta valori di V_p , ad esclusione del primo strato aerato, compresi tra 700 e 1000 m/s (molto simili a quelli del terreno rimaneggiato) e valori di resistività fin dal primo metro di profondità superiori a 400 ohmm. Il tratto compreso tra l'elettrodo 24 e l'elettrodo 34 è invece caratterizzato da materiale a resistività molto bassa che si estende fino a profondità dell'ordine dei 8-10 m. Gli elettrodi dal 24 al 30 sono stati posizionati in corrispondenza di un cumulo di materiale ghiaioso sciolto di riporto, che mostra pertanto una resistività localmente più alta, mentre l'elettrodo 24 è posto marginalmente alla piastra di cemento armato (responsabile, almeno in parte, dell'anomalia elettromagnetica n. 1), segnalandone la presenza con una resistività localmente più alta.

Al di sotto del materiale a minore resistività si rileva un materiale a resistività molto alta dell'ordine dei 600-1000 ohmm, che si assottiglia verso ENE diventando più superficiale. Tale materiale può essere assimilato ragionevolmente al terreno indisturbato (unità geofisica U2a) solo in corrispondenza degli elettrodi 1-12, mentre in corrispondenza degli elettrodi 12-34 tale assegnazione in termini della sola resistività è resa difficile dall'anomala posizione stratigrafica a cui il materiale si trova e dal suo maggior spessore (dell'ordine dei 10 m): i dati sismici però confermano la presenza di materiale mediamente addensato a partire dagli 8-10 m di profondità.



INTERPRETAZIONE LINEA ELETTRICA E08:

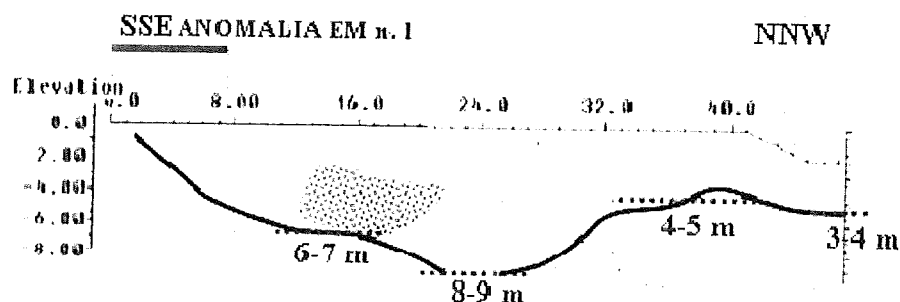
Nella sezione E08 l'interpretazione incrociata dei valori di resistività ha permesso di individuare come probabile superficie di contatto tra materiale rimaneggiato e terreno indisturbato l'interfaccia caratterizzata da valori di resistività dell'ordine dei 200 ohmm: il terreno rimaneggiato è caratterizzato da valori di resistività variabili da 150-250 ohmm (nel caso di materiale prevalentemente ghiaioso sciolto misti a materiale di natura plastica particolarmente concentrato nel settore SSE) a 40-100 ohmm (nel caso di materiale fine prevalentemente limoso).



INTERPRETAZIONE LINEA ELETTRICA E09:

Nella sezione E09 l'interpretazione incrociata dei valori di resistività ha permesso di individuare come probabile superficie di contatto tra materiale rimaneggiato e terreno indisturbato l'interfaccia caratterizzata da valori di resistività dell'ordine dei 100-150 ohmm. La limitata lunghezza della linea elettrica non permette grandi penetrazioni di indagine e pertanto l'interfaccia riporto/naturale è difficilmente individuabile.

Sulla base dei dati di intersezione con altre linee elettriche è stato possibile ricostruire l'interfaccia riporto/naturale ed è stato ipotizzato che il materiale più resistivo (250-500 ohmm) posto a profondità limitate (2-4 m) nel tratto compreso tra l'elettrodo 13 e l'elettrodo 23 (indicato con l'area puntinata grigia) non rappresenti il materiale indisturbato ma un'anomalia elettrica. Il terreno rimaneggiato è caratterizzato da valori di resistività variabili da 100-250 ohmm a 20-60 ohmm (coincidente con il settore più conduttivo rilevato nelle sezioni E04 e E07).



RICOSTRUZIONE AREALE DEL CONTATTO RIPORTO/NATURALE

Sulla base dei risultati delle indagini sismiche ed elettriche e in base alle interpretazioni sopra riportate è stata ricostruita la mappa delle isopache del terreno rimaneggiato presente all'interno del sito di analisi (riportata in allegato n. 8).

Nella mappa, redatta a scala 1:500, sono riportate le profondità della superficie di contatto tra materiali rimaneggiati e terreno naturale, individuata in corrispondenza delle sole aree investigate corrispondenti alle trincee preparate preliminarmente all'interno dell'area.

La mancanza di un rilievo topografico di dettaglio riguardante l'area investigata e il suo immediato intorno ha impedito di quantificare con precisione gli attuali dislivelli presenti, rendendo impossibile riferire le linee di indagine ad un unico sistema di riferimento altimetrico.

Pertanto per l'individuazione della profondità della superficie di contatto riporto/naturale ci si è riferiti al sistema di riferimento altimetrico relativo a ciascuna linea di indagine, cercando di quantificare in modo molto approssimato le irregolarità topografiche esistenti lungo gli stessi.

Per questo motivo i valori di profondità riportati nella mappa delle isopache risultano affetti da una variabilità quantificabile nell'ordine di 1-2 m e legata alle imprecisioni di valutazione della quota assegnata ai diversi sensori di misura.

7. Considerazioni conclusive

I risultati dello studio geofisico condotto nel sito di via Molinara sono riportati in modo sistematico nella presente relazione e sono assemblati nelle due mappe riassuntive riportate negli allegati n. 7 e 8, rispettivamente mappa della conducibilità superficiale e mappa delle isopache dei terreni rimaneggiati.

I due documenti cartografici rispondono al quesito posto dal PM Dott. G. Baggio sost., richiamato in premessa, e saranno direttamente utilizzati dall'Ufficio ARPA competente come riferimento di base su cui programmare ed organizzare le successive attività d'indagine finalizzate all'accertamento della presenza, quantità e qualità dei rifiuti presenti nell'area in oggetto.

Al fine di ottimizzare le successive attività sopra ricordate ed accelerare i tempi richiesti, a conclusione del presente studio, è stata programmata una giornata d'indagine condotta il giorno 21-11-2008 alla presenza del sottoscritto, in qualità di Consulente Tecnico, e del responsabile ARPA, Dr. Geol. Paolo Perfumi: in tale occasione sono stati eseguiti n. 6 scavi esplorativi a mezzo di escavatore (la cui ubicazione è riportata nella planimetria in allegato n. 1), al fine di verificare la natura di alcune evidenti anomalie geofisiche riscontrate durante l'indagine.

In particolare sono stati eseguiti:

- uno scavo (SC1) di profondità massima 5.8 m in corrispondenza dell'anomalia elettromagnetica n. 2 ed in corrispondenza dell'intersezione delle linee sismo-elettriche E04-ST05, E07-ST06 e E09: è stata rilevata, alla profondità di circa 80 cm, la presenza dello spigolo NW della piastra in cemento armato, che si sviluppa verso E e determina l'anomalia elettromagnetica n. 1; la piastra poggia su materiale rimaneggiato prevalentemente fine con abbondanti resti vegetali parzialmente decomposti e frammenti di laterizio ed asfalto (ritrovato 1 pneumatico da camion alla profondità di 4.5 m); le pareti dello scavo presentano locali scavamenti indice di materiale poco addensato; dopo la rottura dello spigolo della piastra è stato prelevato un campione di materiale misto (SC1C1), alla profondità di circa 1.3-1.5 m dall'originario pc;
- uno scavo (SC2) di profondità massima 1.5 m da pc in corrispondenza dell'anomalia elettromagnetica n. 3 e in corrispondenza della linea d'indagine E04-ST5 (tra i 10 e i 20 m di lunghezza della linea a partire dall'estremo SSW): è stata rilevata la presenza di una seconda piastra in cemento armato a partire dalla profondità di 1.5 m dal pc originario (precedente allo scavo), in cui è stata rilevata la presenza di abbondante armatura metallica sia all'interno della piastra sia all'esterno di essa;
- uno scavo (SC3) di profondità massima 5.5 m da pc in corrispondenza dell'anomalia elettromagnetica rilevata lungo la linea di scansione EM C e in corrispondenza dell'intersezione tra le linee di indagine E04-ST5 e E02-ST3: è stato rilevato a profondità di 1.0 m dal pc il limite N della seconda piastra in cemento armato con abbondante armatura sporgente e poggiante su materiale prevalentemente fine con resti di laterizi ed asfalto;
- uno scavo (SC4) di profondità massima 5.4 m da pc in corrispondenza dell'intersezione tra le linee di indagine E04-ST5 e E05: è stata rilevata la presenza di materiale fine limoso-argilloso di colorazione bruno-rossastra nei primi 1-2 m e bruno-nerastra in profondità, in condizioni sature al momento dello scavo e con un buon grado di autosostentamento dei fronti; è stato prelevato un campione rappresentativo (SC4C1) in corrispondenza dei materiali di colorazione bruno-nerastra;
- uno scavo (SC5) di profondità massima 4.5 m da pc in corrispondenza dell'anomalia elettromagnetica n. 4 e in corrispondenza del settore compreso tra gli elettrodi 30 e 34: è stata

rilevata la presenza di abbondanti e voluminosi residui di demolizioni in cls armato nei primi 1-2 m di profondità e di una bombola del gas ad uso domestico forata e schiacciata a profondità di circa 2.5 m da pc; il materiale è prevalentemente di natura sabbiosa con resti vegetali parzialmente decomposti e frequenti residui plastici; i fronti di scavo non si autosostengono e presentano scavarnamenti generalizzati;

- uno scavo (SC6) di profondità limitata in corrispondenza dell'anomalia elettromagnetica n. 1 finalizzato ad accertare la dimensione in larghezza della piastra in cemento armato responsabile dell'anomalia elettromagnetica n. 1 e già parzialmente affiorante al momento dell'indagine.

Le sopracitate informazioni desunte dagli scavi e finalizzate alla verifica della natura di alcune principali anomalie geofisiche presenti nell'area, associate alle informazioni desumibili dallo studio generale, permetteranno all'Ufficio ARPA competente (U.O. Bonifiche – Dipartimento ARPA Milano) di effettuare le relative valutazioni in merito ai precedenti atti riguardanti il sito di via Molinara e di programmare le future attività di indagine che eventualmente si rendessero necessarie.

Il Consulente tecnico

Dr. Geol. Massimo Compagnoni

I Collaboratori

Dr. Geol. Daniela Chiarini

Dr. Geol. Alberto Peruzzini

ALLEGATI

1. Ubicazione del piano d'indagine su cartografia aereofotogrammetrica – scala 1:1000
2. Reciproci rapporti geometrici tra le diverse linee di indagine
3. Stratigrafia e prova DPSH rappresentative del sito
4. Indagine sismica: sismogrammi multishots ed alcuni sismogrammi di singoli shot dei 6 stendimenti sismici
5. Indagine elettrica: acquisizione di campagna dei valori di resistività apparente
6. Indagine elettromagnetica: valori di acquisizione
7. Mappa della conducibilità superficiale – scala 1:500
8. Mappa delle isopache dei terreni rimaneggiati – scala 1:500

Documento di nomina n. 2107/08 rgnr mod 21 della Procura della Repubblica – Tribunale di Monza