

PROG. N° 3186

Comune di



Torino

PROGETTO PRELIMINARE

REALIZZAZIONE COLLETTORE MEDIANO ZONA SUD-OVEST AREA METROPOLITANA

INTERVENTO RISANAMENTO COLLETTORE ZONA SUD

RAPPORTO INTERPRETATIVO DELLE INDAGINI

Società Metropolitana Acque Torino S.p.A.

Sede legale: Corso XI Febbraio, 14 - 10152 Torino TO - I

tel. +39 011 4645.111 - fax. +39 011 4365.575

E-mail: info@smatorino.it Sito web: www.smatorino.it

il Direttore Generale

Dott. Ing. Marco Acri

						documento n°:
3						dt04
2						
1						
0	Emissione	Febbraio 2013	CITIEMME	VAUDANO	ACRI	
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDAZIONE	VERIFICA	APPROVAZIONE	

Progettista: Ing. Giorgio Vaudano

Collaboratori: A. Follis

Risorse Idriche S.p.A. - Società del gruppo SMAT

Sede legale: C.so XI Febbraio, 14 - 10152 Torino

Tel. +39 011 4645.1250 / 1251 - fax : +39 011 4645.1252

Capitale Sociale € 1.241.760,00 € i.v.

Codice fiscale-Partita IVA e Registro delle imprese di Torino: 06087720014

E-mail: info@risorseidricheto.it



file:

ATO3 3186

PROGETTO

RI0304

ID R.I.

TMED-PRE-dt04.pdf

documento

CONSULENTI:



**COMPAGNIA TORINESE
MONITORAGGI Srl**

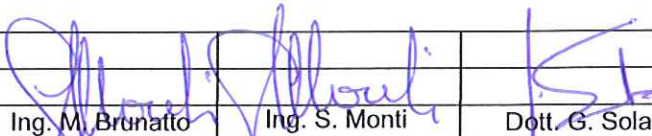
senza autorizzazione il presente documento non può essere riprodotto o ceduto

REGIONE PIEMONTE
PROVINCIA DI TORINO
COMUNE DI TORINO

INDAGINE GEOFISICA SISMICA PER LA CARATTERIZZAZIONE
STRATIGRAFICA
COLLETTORE TORINO SUD - OVEST



RAPPORTO INTERPRETATIVO DELL'INDAGINE

ELABORATO N° GF	ALLEGATO N° --	CODICE 12027\GF-ig-lab	 COMPAGNIA TORINESE MONITORAGGI Srl		
COMMITTENTE  SMAT S.p.A. Corso XI Febbraio, 14 10152 TORINO					
2 1 0	SETTEMBRE 2012	Edizione	Ing. M. Brunatto	Ing. S. Monti	Dott. G. Sola
REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO



REGIONE PIEMONTE
PROVINCIA DI TORINO
COMUNE DI TORINO

INDAGINE GEOFISICA SISMICA PER LA CARATTERIZZAZIONE
STRATIGRAFICA
COLLETTORE TORINO SUD – OVEST

Rapporto interpretativo dell'indagine

Settembre 2012

SOMMARIO

1	PREMESSA	2
2	OBIETTIVI E INDAGINI ESEGUITE	2
3	STRUMENTAZIONE E MODALITÀ DI ACQUISIZIONE.....	5
4	ELABORAZIONE DEI DATI SWM	7
4.1	Inversione Monte Carlo e definizione del modello di riferimento	10
4.2	Inversione spazialmente vincolata.....	12
5	INTERPRETAZIONE GEOFISICA.....	14
6	CONCLUSIONI.....	15
7	PROVE PER ONDE SUPERFICIALI – Nota tecnica.....	16
7.1	Metodologia applicata al sito oggetto di analisi.....	16
7.2	Stima della curva di dispersione e QC	17
7.3	Strategia di inversione.....	17
7.3.1	Modello iniziale	18
7.3.2	Inversione Monte Carlo (MCI)	18
7.3.3	Inversione spazialmente vincolata (SCI).....	19
8	BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE	21
9	ELENCO TAVOLE ALLEGATE	22
	ALLEGATI	23

1 PREMESSA

La presente relazione tecnica descrive le modalità operative adottate in fase di acquisizione, le procedure di elaborazione dei dati e l'interpretazione geofisica della caratterizzazione sismica di sito eseguita in comune di Torino, principalmente lungo le vie Artom, Onorato Vigliani, Duino e in Comune di Moncalieri lungo Via Fratelli Rosselli come da planimetria in Tav.01.

L'indagine è stata eseguita nelle date 4-5-6 Settembre 2012.

2 OBIETTIVI E INDAGINI ESEGUITE

La campagna di indagine è finalizzata alla caratterizzazione stratigrafica di aree su cui sarà realizzato il collettore mediano della zona Sud-Ovest della città di Torino, secondo progetto e specifiche SMAT. Nello specifico, è stata eseguita una campagna di indagini geofisiche con esecuzione di prove per onde superficiali (SWM - Surface Waves Method). La tecnica di indagine ha previsto l'acquisizione e l'elaborazione di numerosi profili verticali di velocità di propagazione delle onde di taglio (S).

I punti di acquisizione sono stati disposti come da progetto concordato con SMAT, lungo il tragitto del collettore, con distanza reciproca tra i punti di circa 60 m. Sono stati acquisiti complessivamente n. 64 profili.

L'elevato numero di profili da acquisire ha richiesto l'impiego di un land-streamer sismico, trascinato da automezzo.

L'ubicazione plano-altimetrica di ogni profilo di Vs è stata acquisita con strumentazione GPS in modo da referenziare i punti di misura con accuratezza centimetrica.

La tecnica di trattamento dei dati SWM prevede l'inversione simultanea con tecnica SCI (Spatially Constrained Inversion) che vincola reciprocamente tutti i profili di Vs e restituisce un modello pseudo-3D, non interpolato, delle velocità di propagazione delle onde S.

Il risultato dell'elaborazione è una distribuzione 3D delle velocità di propagazione delle onde S, rappresentabile tramite sezioni bidimensionali, mappe tridimensionali o isosuperficie.

Le tabelle seguenti riportano sinteticamente parametri di acquisizione e descrizione delle indagini eseguite. Si rimanda al capitolo 7 per gli approfondimenti relativi alla tecnica di indagine e alla procedura di elaborazione utilizzata. Le figure seguenti mostrano la strumentazione impiegata e alcune fasi dell'acquisizione.

Tabella 1. Schema riassuntivo dell'indagine SWM.

Lunghezza land streamer [m]	58.75
Spaziatura geofoni [m]	1.25
Canali [numero]	48
Tempo di campionamento [μ s]	250
Finestra di campionamento [s]	2
Orientazione stendimenti	direzione longitudinale alla strada
Punti di acquisizione [n]	64

I dati e i risultati dell'elaborazione sono rappresentati in forma grafica, mediante sezioni in cui il parametro di interesse è visualizzato tramite scala di colori, in un sistema di coordinate cartesiane.



Figura 1 – Land streamer trascinato da automezzo.



Figura 2 – Dettaglio del land streamer, attrezzato con geofoni ad asse verticale SENSOR SM-6/U-B da 4.5 Hz.

L'indagine per onde superficiali ha permesso la realizzazione dei seguenti tipi di grafico:

- Spettro f-k: è il grafico ottenuto dalla conversione del sismogramma (tempo-spazio) in frequenza-numero d'onda tramite trasformata di Fourier. Evidenzia i massimi spettrali associabili alle onde di Rayleigh.
- Curva di dispersione: è la curva associata ai massimi dello spettro f-k. Costituisce il dato sperimentale utilizzato nel processo di inversione.
- Pseudosezione: tutte le curve di dispersione relative al modo fondamentale sono rappresentate nel dominio LMP- $\lambda/2.5$ (Line MidPoint vs lunghezza d'onda/2.5).
- Sezione di velocità: output del processo di inversione spazialmente vincolata delle curve di dispersione e contiene i profili di velocità disposti secondo sezioni. Ogni profilo di velocità contiene i valori di velocità di propagazione delle onde elastiche di taglio nel sottosuolo; i profili di velocità sono ubicati al centro di ogni stendimento.

3 STRUMENTAZIONE E MODALITÀ DI ACQUISIZIONE

La strumentazione utilizzata per l'acquisizione dei dati è la seguente:

- Sismografo GEODE (Geometrics) costituito da due moduli a 24 canali controllati tramite laptop, per un totale di 48 canali disponibili; l'intervallo di campionamento è selezionabile tra 20 μ s e 16 ms; la durata dell'acquisizione è funzione della frequenza di campionamento con il limite di 64000 campioni per canale; la dinamica del convertitore analogico/digitale è di 24 bit (Figura 3).
- Land-streamer sismico modello G1.25, 48 canali passo 1.25 m, attrezzato con geofoni ad asse verticale SENSOR SM-6/U-B con frequenza propria di 4.5 Hz (lunghezza complessiva 58.75 m),
- Sorgente impulsiva: mazza da 4 kg su piastra di ripartizione in pvc, dotata di trigger elettrico per contatto.



Figura 3 – Sismografo Geometrics Geode (un modulo).

I dati sono stati acquisiti secondo progetto, trascinando il land streamer lungo l'asse stradale.

La fase di acquisizione prevede l'utilizzo di una sorgente (impulsiva o controllata) tramite la quale è creata una perturbazione che si propaga lungo la superficie libera ed è rilevata da uno o più ricevitori (di norma geofoni verticali a bassa frequenza) posti lungo dispositivi lineari sul piano campagna. La sorgente è posta a un estremo dello stendimento. Gli obiettivi dell'acquisizione sono fornire dati sulla propagazione di onde superficiali in una banda di frequenza più ampia possibile poiché ciò consente di ottenere informazioni sulle proprietà degli strati profondi, che influenzano le componenti a bassa



frequenza, e di risolvere con adeguata risoluzione gli strati più superficiali, che influenzano in maniera significativa soprattutto le componenti ad alta frequenza. Questo implica la scelta di corretti parametri di acquisizione (nello spazio e nel tempo) per garantire una corretta risoluzione spettrale in fase di elaborazione.

Per avere una buona accuratezza di posizionamento sia orizzontale sia verticale i punti di misura sono stati georeferenziati mediante l'utilizzo di un ricevitore doppia frequenza GPS/GLONASS modello Topcon Hyper Pro, in modalità RTK (Real Time Kinematic). Le correzioni differenziali in tempo reale sono state acquisite con collegamento EDGE via telefono cellulare alla rete locale di stazioni permanenti. La possibilità di effettuare misure di fase del segnale GPS con due o più ricevitori allo stesso istante temporale (epoche), conoscendo le effemeridi dei satelliti e tracciando almeno sei satelliti contemporaneamente, permette di eliminare gli errori dovuti agli orologi interni dei ricevitori e agli effetti della ionosfera, ottenendo un'accuratezza centimetrica o sub-centimetrica sul posizionamento spaziale delle misure.

Il posizionamento dei punti ha un'accuratezza media di 0.03 m (sia planare sia verticale) nel sistema di riferimento WGS84 (World Geodetic System 1984). Si indicano negli elaborati le coordinate piane (UTM – Universal Transverse Mercator coordinate system). Le quote indicate sono altezze ortometriche. Il valore di traslazione rigida da applicare alle quote ellissoidiche misurate è stato ottenuto con apposito software.

4 ELABORAZIONE DEI DATI SWM

L'elaborazione e l'inversione dei dati è stata effettuata utilizzando il software GIADA.

Il dataset acquisito è composto da 64 sismogrammi. Ciascuna registrazione contiene 48 tracce con spaziatura di 1.25 m.

A titolo di esempio, si mostra il sismogramma del profilo n. 19 in Figura 4, in cui si nota un contenuto di buona qualità di onde di Rayleigh.

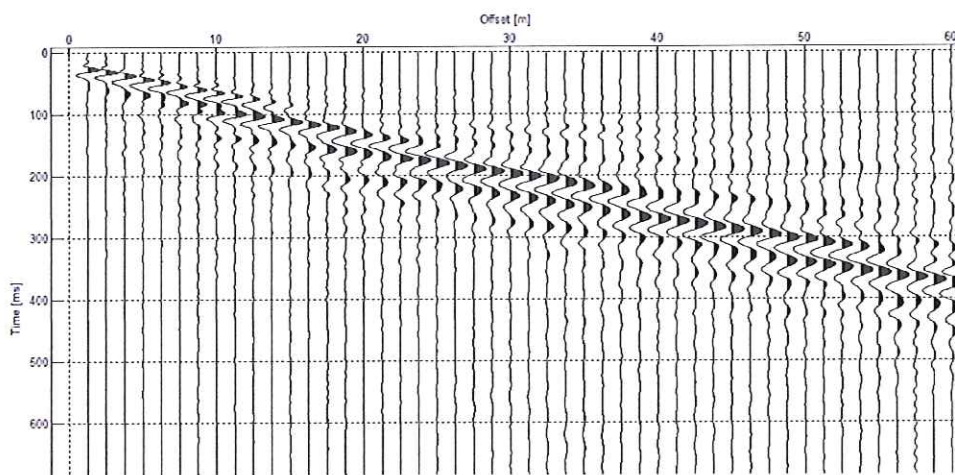


Figura 4 – Sismogramma del profilo n. 19 con spaziatura dei sensori di 1.25 m.

L'applicazione della trasformata f-k sul sismogramma di Figura 4 permette di identificare i massimi di energia che corrispondono agli eventi a maggiore energia del sismogramma (Figura 5).

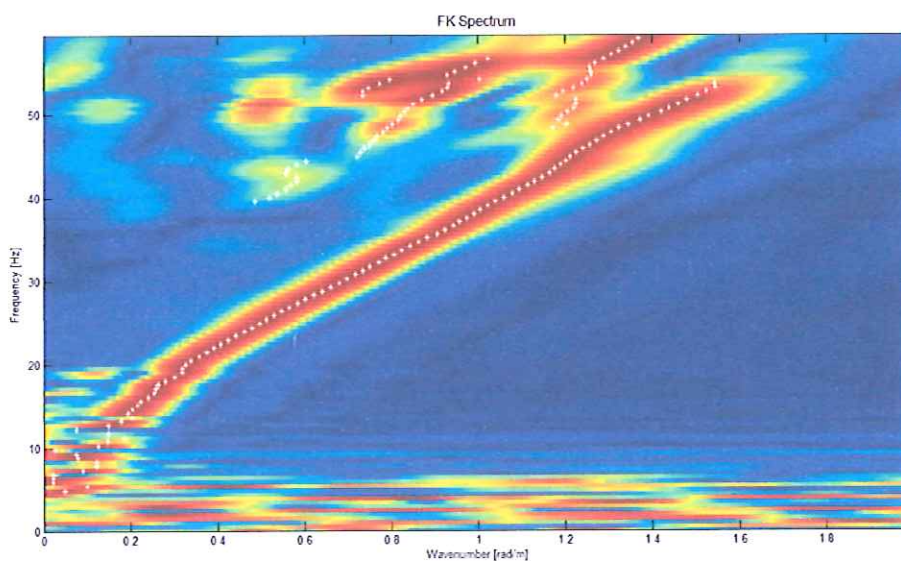


Figura 5 – Identificazione dei massimi dello spettro f-k.

Identificati i massimi, si eliminano gli outlier in entrambi i domini f-k e f-v (Figura 6). L'ultimo passo dell'elaborazione consiste nel selezionare, tra i massimi, quelli corrispondenti al modo fondamentale delle onde di Rayleigh (Figura 7), che saranno usati nel processo di inversione per costruire il modello di velocità delle onde di taglio.

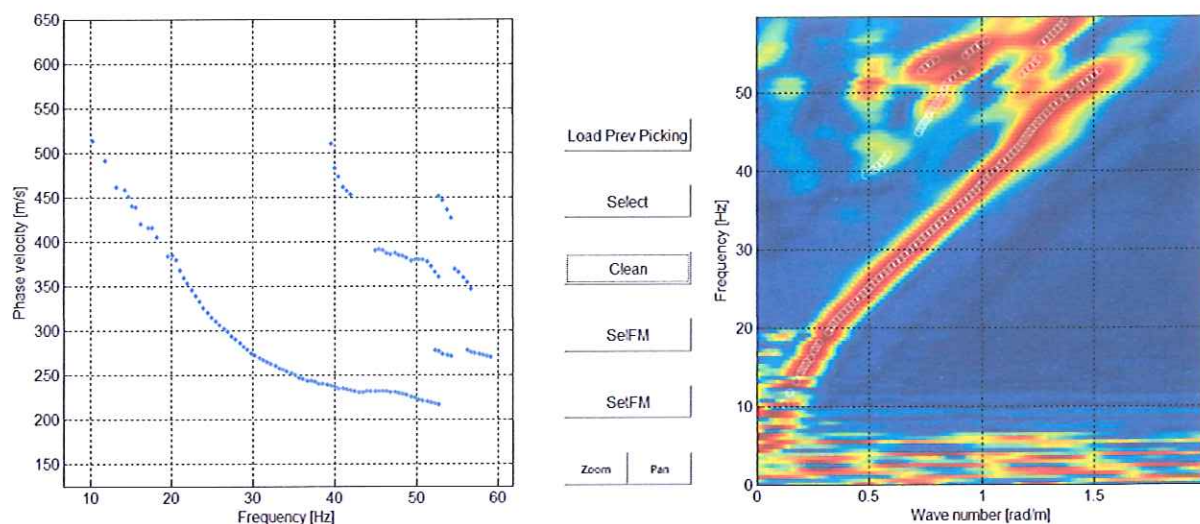


Figura 6 – Pulizia dei massimi spettrali.

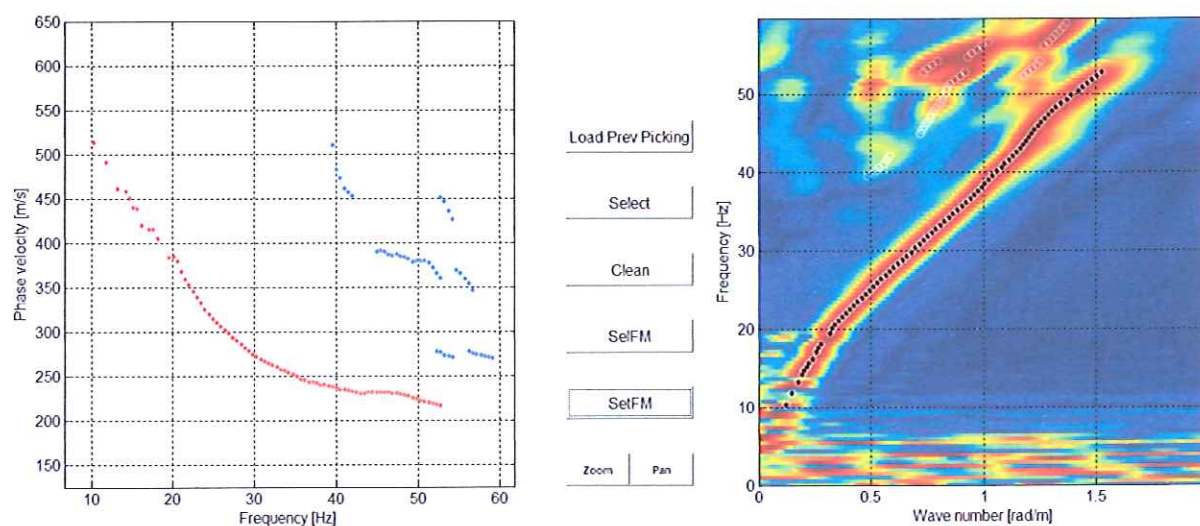


Figura 7 – Selezione del modo fondamentale tra i massimi spettrali.

In Figura 8 si mostrano tutti i modi fondamentali delle curve di dispersione delle onde di Rayleigh stimate. La loro qualità è adeguata per il successivo processo di inversione in un ampio intervallo di frequenze (6-60 Hz).

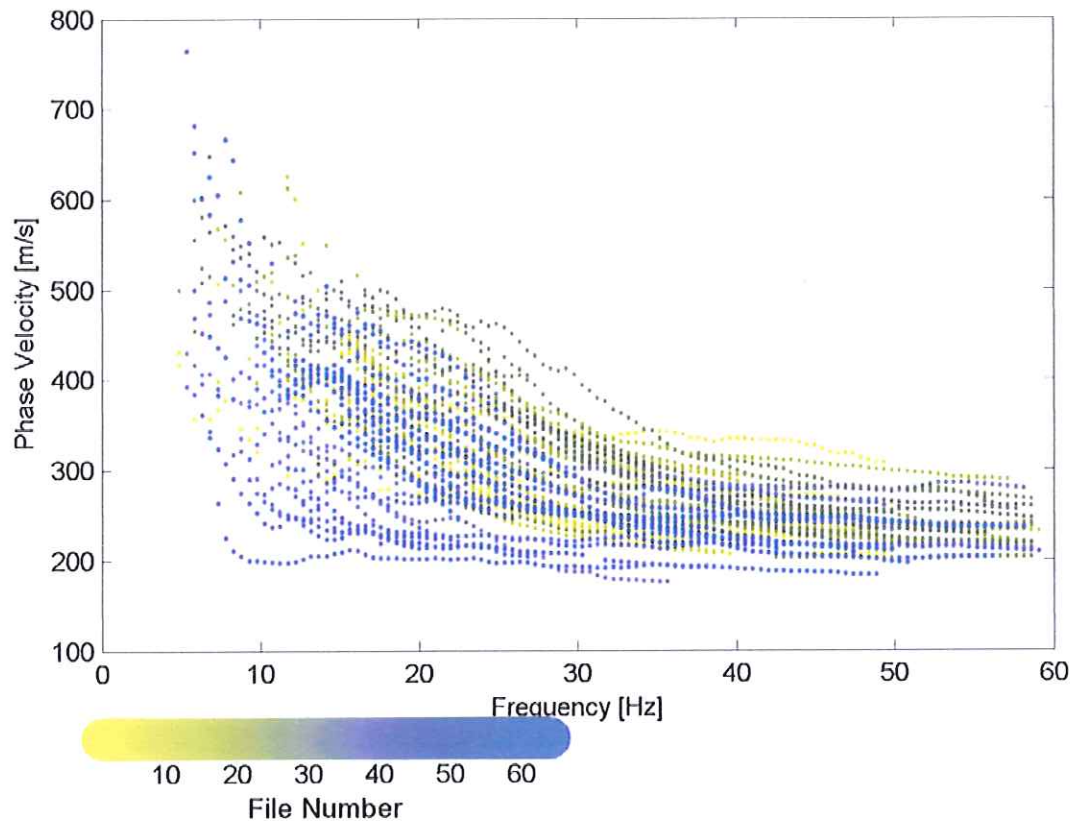


Figura 8 – Modi fondamentali delle curve di dispersione estratte da tutte le linee sismiche.

I modi fondamentali delle curve di dispersione possono essere mostrati nel dominio LMP (Line Mid Point)- $\lambda/2.5$ (Figura 9) per un'analisi preliminare delle profondità di indagine. I colori in Figura 9 rappresentano la velocità di propagazione delle onde S per ogni lunghezza d'onda.

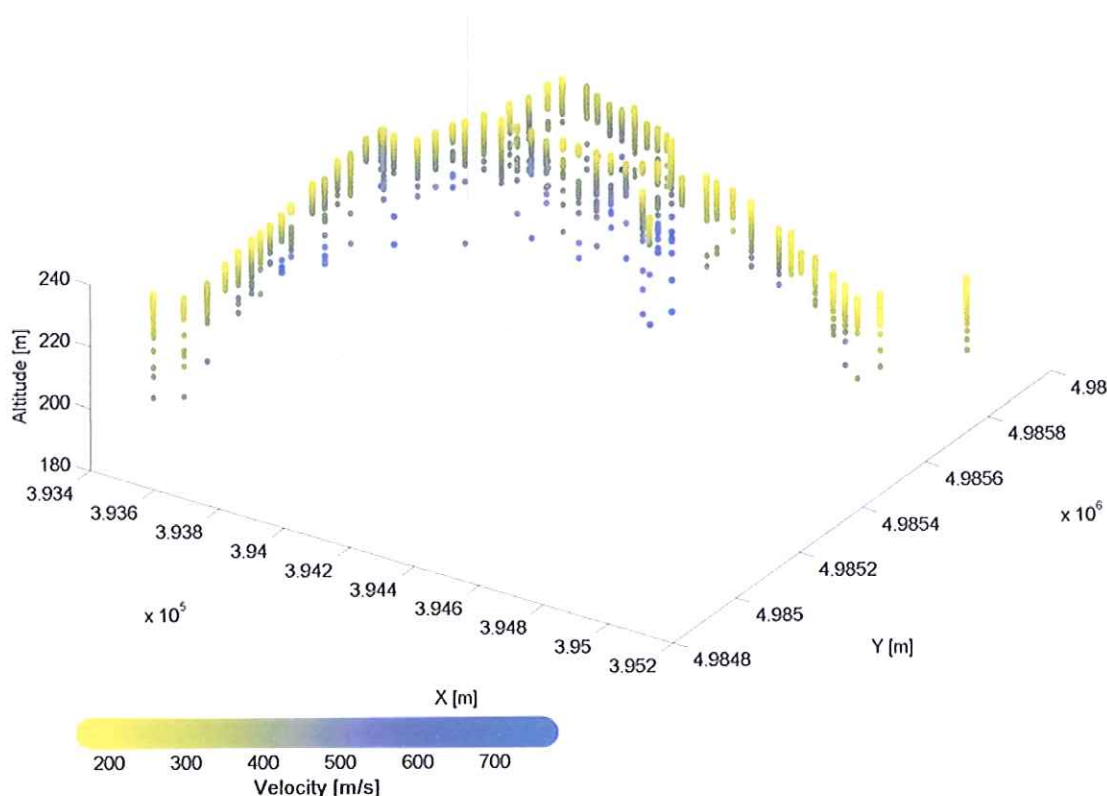


Figura 9 – Modi fondamentali delle curve di dispersione estratte da tutte le linee sismiche trasformate nel dominio LMP- $\lambda/2.5$.

Questa rappresentazione mostra come il contenuto di informazioni sia sufficiente a costruire un modello di velocità delle onde di taglio adeguato fino alla profondità di circa 30 m.

4.1 Inversione Monte Carlo e definizione del modello di riferimento

L'inversione Monte Carlo (MCI) è stata effettuata utilizzando le informazioni litostratigrafiche desunte dai sondaggi geognostici S1, S2, S3, S7, S8, S9, S10, S11, S14, S15, S16 sulla base delle quali sono stati definiti anche i vincoli di elaborazione, secondo lo schema descritto nel capitolo 7.

Lo spazio dei parametri di modello è uniformemente campionato (Figura 10) con 10000 campioni generati in modo casuale. Il modo fondamentale delle curve di dispersione associato a ciascun modello 1D di velocità delle onde S è scalato e confrontato con tutti i modi fondamentali stimati. In questo modo è possibile avere una mappa (modelli selezionati dal test di Fisher) della soluzione per ogni LMP e configurare un modello iniziale di velocità consistente per la successiva fase di inversione spazialmente vincolata.

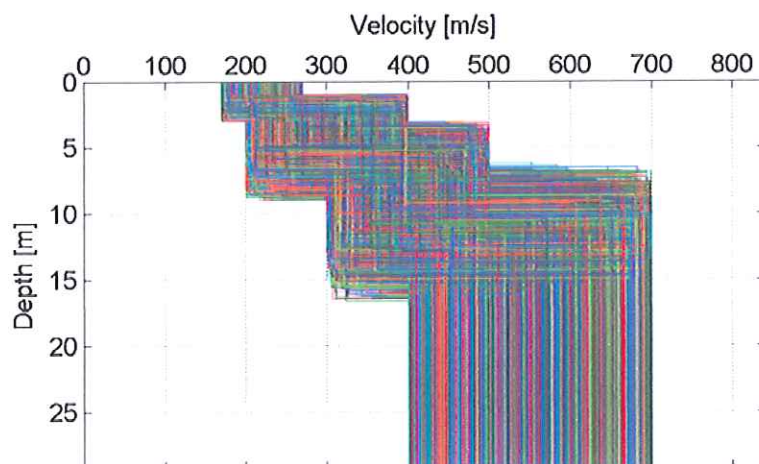


Figura 10 – Campionamento dello spazio dei parametri di modello.

La scelta può essere fatta selezionando automaticamente il modello best fitting o definendo manualmente le regioni a più alta densità di probabilità (Figura 11). Le incertezze sulle curve sperimentali sono definite pari a un valore del 5% della velocità di propagazione delle onde di Rayleigh in accordo a quanto consigliato in letteratura (Wisèn e Christiansen, 2005).

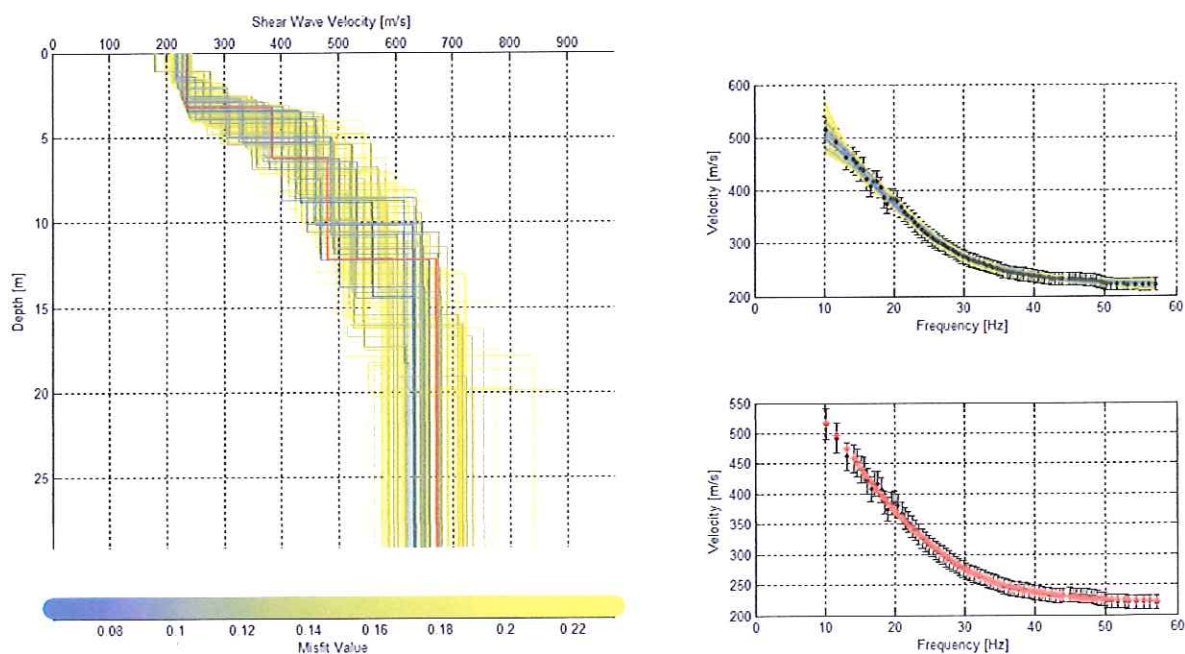


Figura 11 – Soluzione della curva di dispersione stimata per il profilo n. 2. I modelli blu della parte sinistra rappresentano i modelli con misfit minore, con la loro relativa curva di dispersione (parte superiore destra). Gli asterischi rossi nella parte bassa a destra corrispondono al modello con misfit minore.

In Tabella 2 si mostrano i valori del modello iniziale di velocità, calcolato come media di ciascun parametro di modello dell'inversione Monte Carlo dell'intero dataset. Le colonne "STD" riportano le deviazioni standard dei parametri di spessore e velocità di ciascuno strato.

Tabella 2 - Modello iniziale

Strato [numero]	Spessore [m]	STD spessore [m]	Velocità onde S [m/s]	STD velocità [m/s]	Coefficiente di Poisson	Densità [kg/m ³]
1	2.5	0.9	231	35	0.3	1700
2	4.1	1.7	344	98	0.3	1800
3	6.6	2.2	455	106	0.3	1900
Semispaio	∞		597	119	0.3	1900

4.2 Inversione spazialmente vincolata

I modelli iniziali sono stati utilizzati per l'inversione spazialmente vincolata. Sono stati considerati diversi livelli di vincolo per configurare la regolarizzazione del processo di inversione. La configurazione ottimale prevede l'utilizzo di una varianza pari a $100^2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ per quanto riguarda i vincoli laterali (C_p) e una varianza pari a 7^2 m^2 rispetto alla profondità di riferimento (C_h). In Figura 12 si mostrano i residui normalizzati calcolati al termine dell'inversione. Si può notare come quasi tutti i valori stiano al di sotto dell'unità. Questo indica che le curve sintetiche stimate al termine del processo di inversione ricadono nell'incertezza sperimentale (Figura 13).

Negli allegati (da Tavola 2 a Tavola 5) si mostrano i risultati dell'inversione, secondo sezioni pseudo-2D.

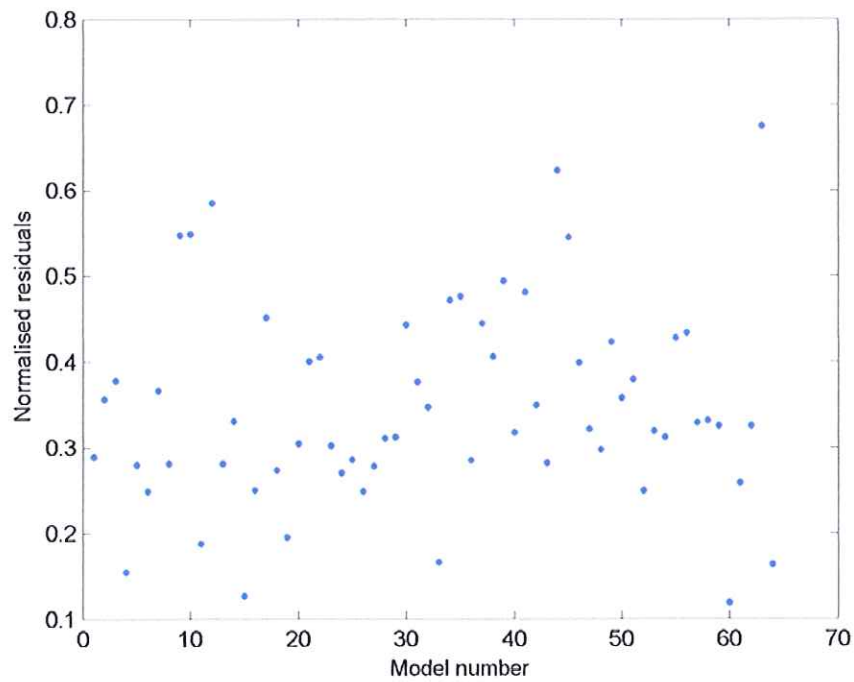


Figura 12 – Residui normalizzati del risultato dell'inversione spazialmente vincolata.

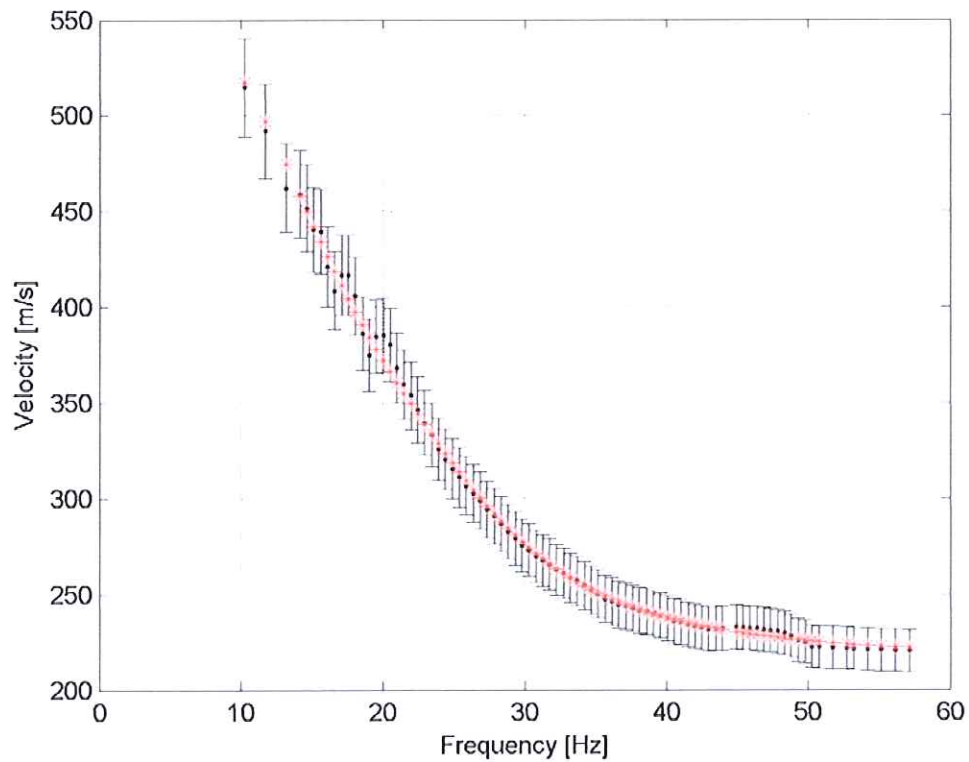


Figura 13 – Profilo n. 2. In nero la curva di dispersione sperimentale con relative incertezze. In rosso la curva stimata a seguito dell'inversione SCI.

5 INTERPRETAZIONE GEOFISICA

Dall'elaborazione pseudo-3D dei 64 profili verticali, sono state estratte 7 sezioni, disposte in direzione S-N (sezioni 1 e 3) e in direzione E-O (sezioni 2, 4, 5, 6, 7).

La Tavola 1 contiene i riferimenti planimetrici dei profili, sia quelli in progetto sia quelli eseguiti durante l'indagine.

Dalla Tavola 2 alla Tavola 5 si mostrano i risultati dell'inversione SCI come profili verticali di velocità delle onde S posizionati al centro dello streamer per ogni punto di energizzazione. Sull'asse y delle figure è indicata la quota.

Dalla Tavola 6 alla Tavola 9 si mostrano i risultati come interpolazione tra i profili di velocità e indicando sull'asse y delle figure la profondità. Tutti i profili sono posizionati dalla profondità 0: la distanza letta sull'asse y è, quindi, relativa al piano campagna. In questa rappresentazione si è limitata la profondità in visualizzazione a 20 m.

Il numero degli strati è stato imposto valutando il minor numero di parametri di modello adeguati a descrivere le curve di dispersione.

I profili mostrano generalmente un aumento dei valori di velocità delle onde S con la profondità. Localmente si hanno alcune inversioni di velocità, con strati più rigidi e compatti sovrastanti strati più soffici: profili 5, 8, 9, 36, 37, da 42 a 45, 49.

Alcune sezioni (1, 4, 5, 7) mostrano evidenti variazioni laterali di velocità.

I primi due strati sono caratterizzati da materiali con valori di velocità bassi, con V_s comprese tra 200 e 300 m/s, fino a una profondità media di 4-5 m. Fanno eccezione alcuni profili, dove i valori di velocità del secondo strato raggiungono valori più alti, fino a 450 m/s: 3, 29, 35, 54, 55.

Il terzo strato è mediamente più veloce, con valori superiori a 400 m/s, a eccezione di alcuni profili: 1, 2, 14, 40, da 43 a 50. Si trova a profondità comprese tra i 4 e i 16 m, con grandi variazioni laterali.

L'ultimo strato ha velocità maggiori di 500 m/s, oltre gli 8 m di profondità.

Le aree dell'indagine caratterizzate da strati più lenti, anche in profondità, sono la parte iniziale della sezione 1 (Tavola 2, Tavola 6) e la sezione 7 (Tavola 5, Tavola 9).

6 CONCLUSIONI

Valutando in modo complessivo i risultati ottenuti sulle varie sezioni e osservando in particolare le tavole da 6 a 9 che riportano in scala cromatica le interpolazioni dei profili di velocità è possibile individuare, a partire dal piano campagna, quattro strati:

1. *Strato superficiale*

- spessore variabile da 1 a circa 4 m (fino a 6/7 m verso Parco Vallere)
- $V_s = 230 \pm 35$ m/s (tipici di materiali di riporto frammisti a limi, suoli...)

2. Strato n.2

- spessore variabile da 1 a 7 m
- $V_s = 300 \pm 60$ m/s (materiali di tipo C: terreni a grana grossa mediamente addensati e/o a grana fina mediamente consistenti)

3. Strato n.3

- spessore variabile da 5 a 16 m
- $V_s = 480 \pm 100$ m/s (terreni tipicamente B con lenti di materiali più fini e/o meno addensati ove riconoscibili per la presenza di inversioni di velocità)
-

4. Semispazio

- ad una profondità variabile lungo le sezioni, da un minimo di circa 12 m da p.c.
- $V_s = 620 \pm 80$ m/s

Si evidenziano tracce di morfologie geologiche sepolte (paleoterrazzi) in probabile accordo con la dinamica deposizionale pleistocenica.

Esistono variazioni laterali di velocità con presenza di inversioni di velocità all'interno degli strati 2 e 3.

Generalmente si nota, pur con presenza di anomalie localizzate lungo le sezioni, una buona definizione dei terreni profondi lungo tutte le tratte esaminate. Si rileva però la presenza di anomalie legate alla geologia locale probabilmente influenzata da attività antropiche nella parte terminale della sezione 7 (verso Parco Vallere) dove sono presenti forti variazioni laterali di velocità e alcune inversioni particolarmente significative.

7 PROVE PER ONDE SUPERFICIALI – Nota tecnica

7.1 Metodologia applicata al sito oggetto di analisi

Il metodo delle onde superficiali attive (SWM – Surface Wave Method) è un metodo di caratterizzazione sismica basato sull'analisi della dispersione geometrica delle onde superficiali. La velocità di propagazione delle onde di Rayleigh in un semispazio elastico, omogeneo e isotropo, è indipendente dalla frequenza e il moto indotto dalla propagazione si smorza rapidamente con la profondità, sino ad estinguersi ad una profondità circa pari ad una lunghezza d'onda. La profondità raggiunta dalla perturbazione dipende dunque dalla lunghezza d'onda e, in mezzi omogenei, a diverse lunghezze d'onda corrisponde un'unica velocità di fase (V_R). In un mezzo verticalmente eterogeneo, costituito cioè da strati aventi proprietà meccaniche differenti, il comportamento delle onde superficiali diventa dispersivo: a frequenze diverse corrispondono diverse velocità di fase. Lunghezze d'onda diverse interessano, infatti, strati diversi ai quali sono associate proprietà meccaniche diverse: ogni lunghezza d'onda (e quindi ogni frequenza) si propaga ad una velocità di fase che dipende dalle caratteristiche degli strati interessati dalla propagazione.

Quindi, nel caso di un mezzo eterogeneo, le onde superficiali non hanno una singola velocità, ma diverse velocità di fase in corrispondenza delle diverse frequenze: tale fenomeno, dipendente dalla distribuzione spaziale delle proprietà sismiche del sottosuolo è noto come dispersione geometrica e la relazione che lega la frequenza alla velocità di fase prende il nome di curva di dispersione.

La propagazione delle onde di Rayleigh in un mezzo verticalmente eterogeneo, è un fenomeno multimodale: data una determinata stratigrafia, in corrispondenza di una certa frequenza, possono esistere diverse velocità di propagazione, ad ognuna delle quali corrisponde un modo di vibrazione del sito. Differenti modi di vibrazione possono presentarsi simultaneamente.

Da un punto di vista teorico, per quanto riguarda il modo fondamentale, alle alte frequenze, la velocità di fase coincide con la velocità delle onde di Rayleigh dello strato più superficiale, mentre, alle basse frequenze, l'effetto degli strati più profondi diventa importante e la velocità di fase tende alla velocità di propagazione delle onde di Rayleigh dello strato più profondo come se questo fosse esteso infinitamente in profondità. La curva di dispersione gioca un ruolo centrale nell'utilizzo delle onde di Rayleigh ai fini della caratterizzazione dei terreni; è, infatti, funzione delle caratteristiche di rigidità del mezzo e può essere utilizzata per un processo di inversione avente come obiettivo la stima delle caratteristiche di rigidità stesse.

La procedura di elaborazione, nel caso specifico in cui è stata eseguita una serie di misure spazialmente distribuite, può essere schematizzata come segue:

1. Stima delle curve di dispersione e QC.

2. Definizione di un modello iniziale tramite inversione delle singole curve di dispersione con metodo Monte Carlo (MCI) e utilizzo delle informazioni a priori disponibili (sondaggi).
3. Inversione spazialmente vincolata (Spatially Constrained Inversion - SCI) delle curve di dispersione e restituzione di un modello di velocità pseudo-3D.
4. Analisi dei risultati.

Nelle pagine seguenti, sono sviluppati i singoli punti.

7.2 Stima della curva di dispersione e QC

La fase di elaborazione o *processing* è quella che segue l'acquisizione dei dati grezzi e permette di stimare, a partire dai sismogrammi acquisiti, le caratteristiche dispersive del sito, ovvero la velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza (curva di dispersione sperimentale). I dati derivanti da tutte le posizioni dello streamer vengono trasformati in dominio f-k (frequenza-numero d'onda) tramite una doppia trasformata di Fourier e la curva di dispersione è ricavata con un algoritmo di ricerca dei massimi spettrali ai quali è attribuibile, per l'appunto, la propagazione delle onde di Rayleigh (Tselentis e Delis, 1998). Per ogni frequenza f , il picco spettrale è associato a un determinato valore del numero d'onda k , da cui è possibile ricavare la velocità di fase delle onde di Rayleigh attraverso la relazione:

$$V_R(f) = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{k}$$

Al termine della stima le curve sono rappresentate contemporaneamente in un unico grafico, al fine di individuare eventuali outlier.

7.3 Strategia di inversione

La strategia di inversione può essere riassunta nello schema di Figura 14, simile a quanto proposto da Socco et al. (2009).

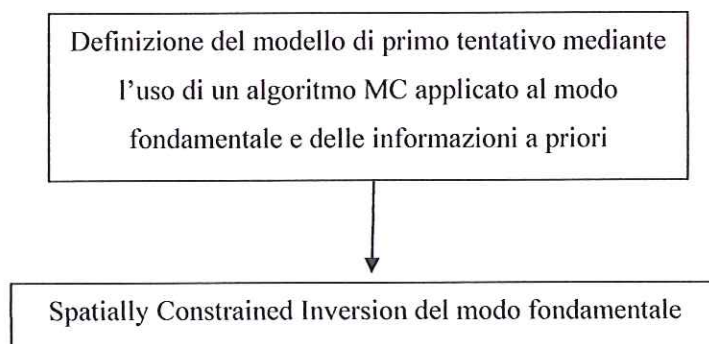


Figura 14 – Strategia di inversione.

I differenti passi partono da una esplorazione global dello spazio dei parametri di modello e si focalizzano sulle regioni del modello ad alta densità di probabilità (basso misfit) tramite successivi raffinamenti tramite la SCI.

La MCI fornisce informazioni globali sul modello di velocità del sito ed è impiegata come inversione preliminare per definire un modello iniziale consistente per la successiva SCI.

Entrambi gli algoritmi di inversione, usando il forward modelling proposto da Haskell – Thomson (Thomson, 1950; Haskell, 1953) e implementato da Herrmann (1996), consentono di stimare la velocità delle onde di taglio Vs e gli spessori degli strati. La densità degli strati e il modulo di Poisson sono assunti a priori, poiché le curve di dispersione sono meno sensibili alle loro variazioni.

7.3.1 Modello iniziale

La definizione del modello iniziale da utilizzare nell'inversione dei dati SWM è avvenuta secondo lo schema seguente:

- Utilizzo del metodo Monte Carlo per la definizione del numero degli strati, degli spessori e delle velocità medie delle onde di taglio (Wisèn et al., 2010).
- Integrazione con le informazioni a priori derivate dai sondaggi.

Il numero degli strati è stato imposto valutando il minor numero di parametri di modello adeguati a descrivere le curve di dispersione, così da avere maggiore sensibilità sulla profondità dell'ultimo strato.

7.3.2 Inversione Monte Carlo (MCI)

Per l'inversione delle curve di dispersione di onde superficiali è stata sviluppata un'innovativa procedura Monte Carlo (Socco and Boiero, 2008). L'algoritmo in oggetto utilizza le proprietà di scala del fenomeno di propagazione delle onde di Rayleigh per esplorare in modo efficiente lo spazio dei parametri di modello, riducendo in questo modo il numero di simulazioni necessarie.

L'analisi elaborata in questo lavoro è stata eseguita utilizzando una funzione di errore che confronta le curve di dispersioni sperimentali con quelle sintetiche tenendo in considerazione anche la dimensionalità del problema (numero di parametri da determinare rispetto ai punti disponibili). La funzione di errore utilizzata è esprimibile dalla seguente relazione:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (V_i - V_e)^2 \sigma_e^{-2}}{m - (2 * n) - 1}$$

dove V_t e V_e rappresentano rispettivamente la velocità di fase teorica e sperimentale, σ_e è l'incertezza sul dato, m è il numero di punti disponibili della curva di dispersione e infine n è il numero di strati del modello considerato.

La funzione di errore è stata quindi calcolata per ogni profilo della popolazione di dati ed è stata utilizzata come criterio per la selezione dei modelli in accordo a un test statistico. Il test statistico adottato è il test di Fisher (Socco and Boiero, 2008) e seleziona tutti i profili che sono considerati equivalenti in funzione di un intervallo di confidenza. I modelli selezionati quindi rappresentano un insieme di possibili soluzioni che sono ugualmente probabili in termini di parametrizzazione e di livello di confidenza scelti.

Socco e Boiero (2008) hanno dimostrato che partendo da diversi modelli di primo tentativo le soluzioni ottenute con inversioni deterministiche ricadono in una regione più ampia di quella ottenibile mediante un'inversione effettuata con metodo Monte Carlo. L'insieme di profili selezionati con il metodo Monte Carlo può quindi essere assunto come una rappresentazione della non unicità della soluzione per lo specifico insieme di misure. Maggiori dettagli sull'algoritmo di calcolo utilizzato per l'inversione sono riportati in Socco and Boiero (2008).

In questo elaborato i risultati dell'inversione Monte Carlo sono riportati utilizzando una rappresentazione basata sulla funzione d'errore. I colori più scuri corrispondono ai modelli le cui curve di dispersione sperimentali hanno gli errori più bassi. Lo stesso colore è quindi stato utilizzato per rappresentare la velocità delle onde di taglio e la rispettiva curva di dispersione associata.

L'inversione Monte Carlo è stata utilizzata, fissato il numero degli strati, per definire le velocità medie degli strati da utilizzare nel modello iniziale.

7.3.3 Inversione spazialmente vincolata (SCI)

L'inversione spazialmente vincolata (Spatially Constrained Inversion – SCI) deriva dall'inversione lateralmente vincolata presentata per la prima volta da Auken and Christiansen (2004) per l'interpretazione di dati di resistività elettrica: è un'inversione deterministica in cui ciascun modello 1D viene collegato ai modelli limitrofi con un vincolo reciproco che consente di ottenere un unico modello pseudo 2D o 3D. I vincoli laterali posso essere considerati come informazioni a priori sulla variabilità geologica dell'area investigata: più è piccola la variabilità attesa del parametro di modello, più è rigido il vincolo. E' inoltre possibile adoperare qualunque informazione a priori disponibile (ad esempio da un sondaggio) per vincolare ulteriormente l'inversione.

La metodologia SCI applicata alle onde superficiali e dataset acquisiti secondo uno schema "walk away" è stata originariamente presentata da Wisén e Christiansen (2005) e successivamente applicata da Socco et al. (2009).

Le curve di dispersione locali sono invertite tramite un algoritmo SCI ai minimi quadrati, basato sull'implementazione data da Auken and Christiansen (2004), che restituisce un risultato pseudo 3D. Il risultato dell'inversione è costruito a partire da un set di modelli 1D, in cui ciascun modello indipendente è collegato ad una curva di dispersione sperimentale. I modelli 1D limitrofi sono tra loro connessi da vincoli laterali che impongono uguaglianza tra i parametri di modello limitrofi e dello stesso tipo. In questo modo, tutte le curve di dispersione sono invertite simultaneamente, minimizzando una funzione obiettivo comune, e il numero di modelli di output è uguale al numero di profili 1D ubicati all'interno dell'area di indagine. La funzione di errore può essere scritta come:

$$\left[(\mathbf{d}_{obs} - \mathbf{g}(\mathbf{m}))^T \mathbf{C}_{obs}^{-1} (\mathbf{d}_{obs} - \mathbf{g}(\mathbf{m})) \right] + \left[(-\mathbf{R} \mathbf{m})^T \mathbf{C}_p^{-1} (-\mathbf{R} \mathbf{m}) \right] + \left[(-\mathbf{P}_h \mathbf{m})^T \mathbf{C}_h^{-1} (-\mathbf{P}_h \mathbf{m}) \right]$$

In questa funzione, i parametri di modello $\mathbf{m}$ sono i profili 1D di Vs. Gli $\mathbf{m}$ sono collegati ai dataset osservati $\mathbf{d}_{obs}$ con la matrice di covarianza associata $\mathbf{C}_{obs}$. $\mathbf{R}$ è la matrice di regolarizzazione laterale per i parametri di modello mentre $\mathbf{P}_h$ è la matrice che lega i parametri di modello ad una superficie conosciuta a priori. L'efficacia delle matrici $\mathbf{R}$ e $\mathbf{P}_h$ dipende dalla forza dei vincoli descritti dalle matrici di covarianza $\mathbf{C}_p$ e $\mathbf{C}_h$ (Auken and Christiansen 2004).

La risposta diretta $\mathbf{g}(\mathbf{m})$ adopera l'approccio di Haskell (1953) e Thomson (1950), modificato da Dunkin (1965) e implementato da Herrmann (1996) per risolvere il problema diretto per una serie di strati omogenei, elastici e isotropi, assumendo che le curve sperimentali descrivano modi fondamentali.

In questo schema, i vincoli e i dati sono entrambi parte dell'inversione. L'informazione da un modello si trasmette a quelli limitrofi attraverso i vincoli laterali; il risultato è un modello pseudo 3D che varia in modo liscio. Conseguentemente, i modelli di output trovano un equilibrio tra ciò che è imposto dai vincoli, la fisica del fenomeno e i dati. Parametri di modello con scarsa influenza sui dati saranno controllati dai vincoli. La forza dei vincoli può essere regolata in accordo con eventuali informazioni a priori sulla variabilità geologica dell'area.

Al fine di valutare la correttezza dell'intensità del vincolo scelto, si prendono in considerazione i residui normalizzati NR all'ultima iterazione, definiti come:

$$NR = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I \left(\frac{v_{ei} - v_{ti}}{\sigma_{ei}} \right)^2}{I}}$$

dove v_{ei} e v_{ti} sono, rispettivamente le velocità di fase delle curve di dispersione sperimentale e teorica; σ_{ei} è l'incertezza sperimentale; l è il numero di punti. L'utilizzo di vincoli troppo forti comporta un'eccessiva regolarizzazione dei parametri di modello, che a sua volta si traduce in un incremento dei residui normalizzati. Se i residui normalizzati ottenuti da un'inversione non vincolata sono della stessa grandezza di quelli ricavati dall'inversione spazialmente vincolata, significa che il modello stimato descrive ugualmente bene il dato sperimentale (Boiero e Socco, 2010).

8 BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

- Auken, E., and A. V. Christiansen, 2004, Layered and laterally constrained 2D inversion of resistivity data: *Geophysics*, 69, 752–761.
- Boiero, D., and L. V. Socco, 2010, Retrieving lateral variations from surface wave dispersion curves analysis: *Geophysical Prospecting*, 58, doi: 10.1111/j.1365-2478.2010.00877.x.
- Haskell, N., 1953, The dispersion of surface waves on multilayered media: *Bulletin of seismological society of America*, 43, no. 1, 17-34.
- Herrmann, R.B., 1996, Computer programs in seismology: an overview on synthetic seismogram computation: User's manual, StLouis University, Missouri.
- Socco, L.V., and D. Boiero, 2008, Improved Monte Carlo inversion of surface wave data: *Geophysical Prospecting*, 56, 357-371.
- Socco, L.V., D. Boiero, S. Foti, and R. Wisén, 2009, Laterally constrained inversion of ground roll from seismic reflection records: *Geophysics* 74, 6, G35-G45.
- Thomson, W. T, 1950, Transmission of elastic waves through a stratified solid medium: *Journal of Applied Physics*, 21, no. 89.
- Tselentis, G.A., and G. Delis, 1998, Rapid assessment of S-wave profiles from the inversion of multichannel surface wave dispersion data: *Annali di Geofisica*, 41, 1-15.
- Wisén, R., and A. V. Christiansen, 2005, Laterally and mutually constrained inversion of surface wave seismic data and resistivity data: *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 10, 251-262.
- Wisén R., Boiero D., Maraschini M, Socco LV., 2010, Shear Wave Velocity Model from Surface Wave Analysis – A Field Case Example. In: *Proceedings of 72nd EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2010, EAGE (NLD), 72nd EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2010, Barcelona 14 – 17 June 2010.*

9 ELENCO TAVOLE ALLEGATE

Tavola 1: Ubicazione planimetrica dei profili

Tavola 2: Risultati dell'inversione SCI

Sezioni 1 e 2

Tavola 3: Risultati dell'inversione SCI

Sezioni 3 e 4

Tavola 4: Risultati dell'inversione SCI

Sezioni 5 e 6

Tavola 5: Risultati dell'inversione SCI

Sezione 7

Tavola 6: Interpolazione dei profili di velocità con indicazione dei sondaggi

Sezioni 1 e 2

Tavola 7: Interpolazione dei profili di velocità con indicazione dei sondaggi

Sezioni 3 e 4

Tavola 8: Interpolazione dei profili di velocità con indicazione dei sondaggi

Sezioni 5 e 6

Tavola 9: Interpolazione dei profili di velocità con indicazione dei sondaggi

Sezione 7

ALLEGATI

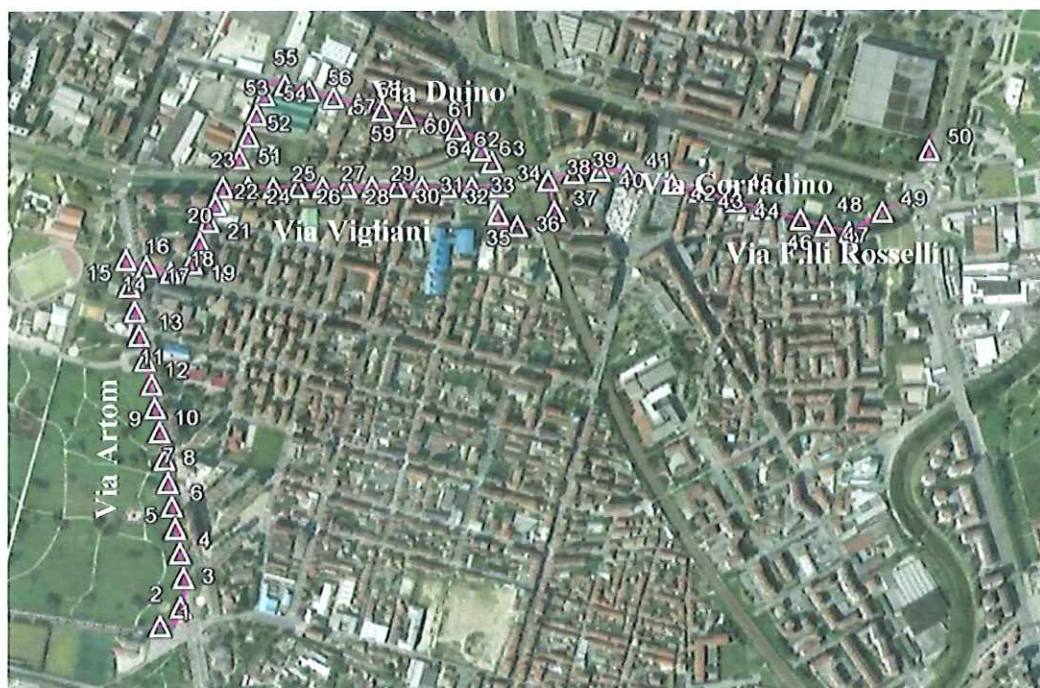


Tavola 1: Ubicazione planimetrica dei profili
In Alto: Indicazione dei punti di rilievo - In basso: Indicazione delle sezioni visualizzate nelle tavole successive.

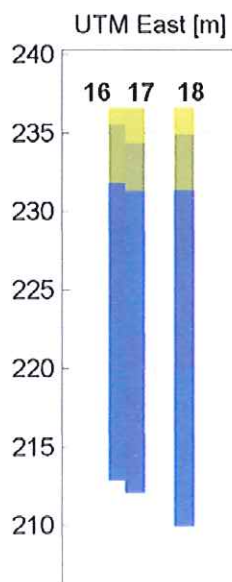
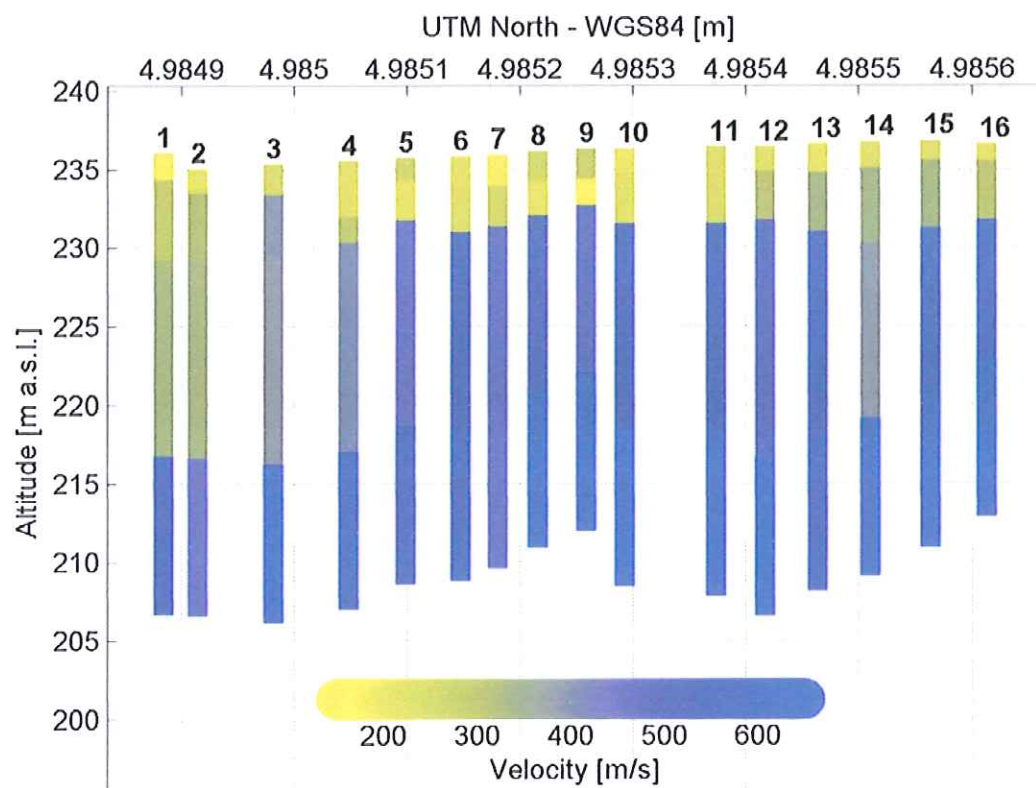


Tavola 2: Risultati dell'inversione SCI
Sezioni 1 e 2

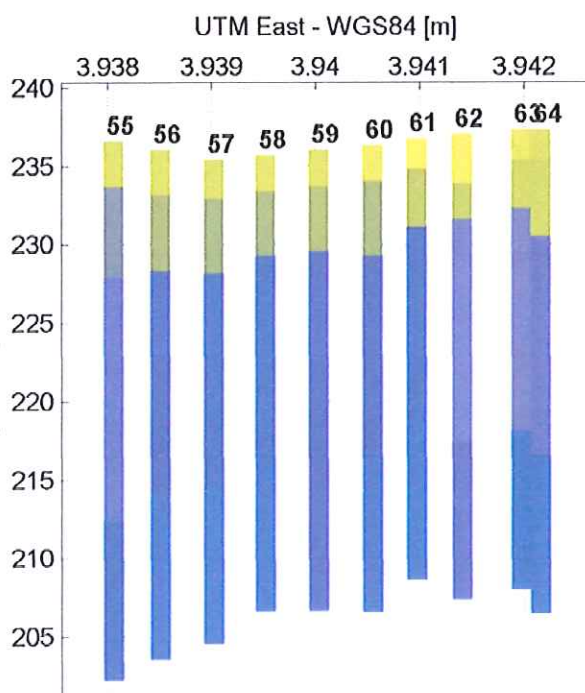
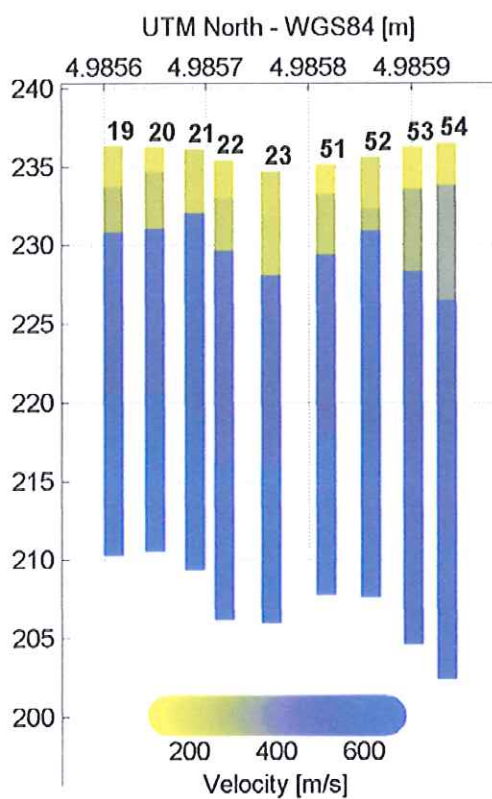


Tavola 3: Risultati dell'inversione SCI
Sezioni 3 e 4

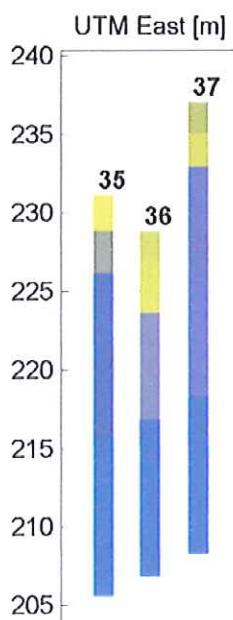
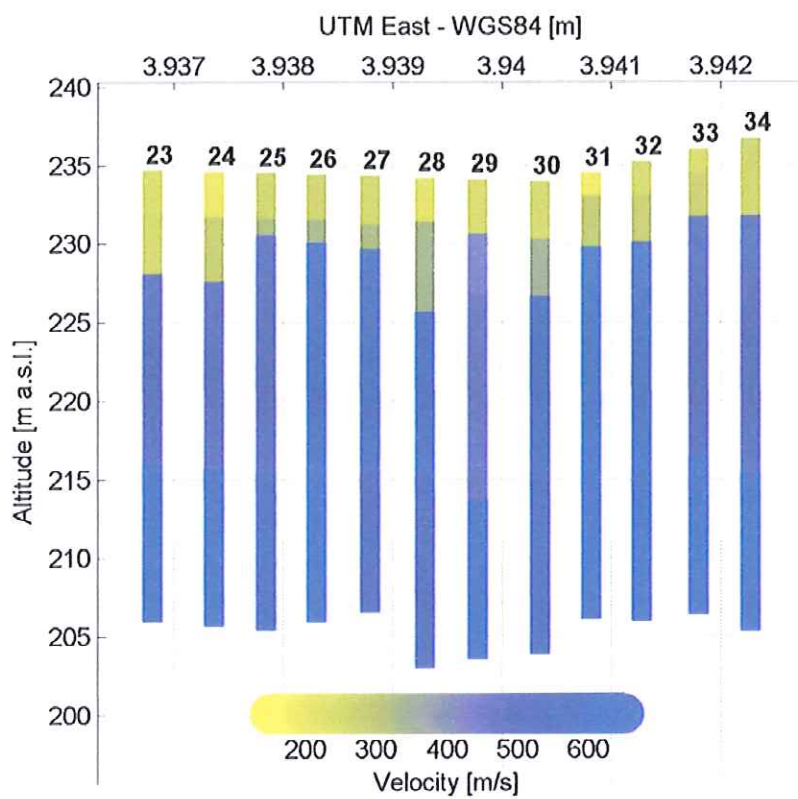


Tavola 4: Risultati dell'inversione SCI
Sezioni 5 e 6

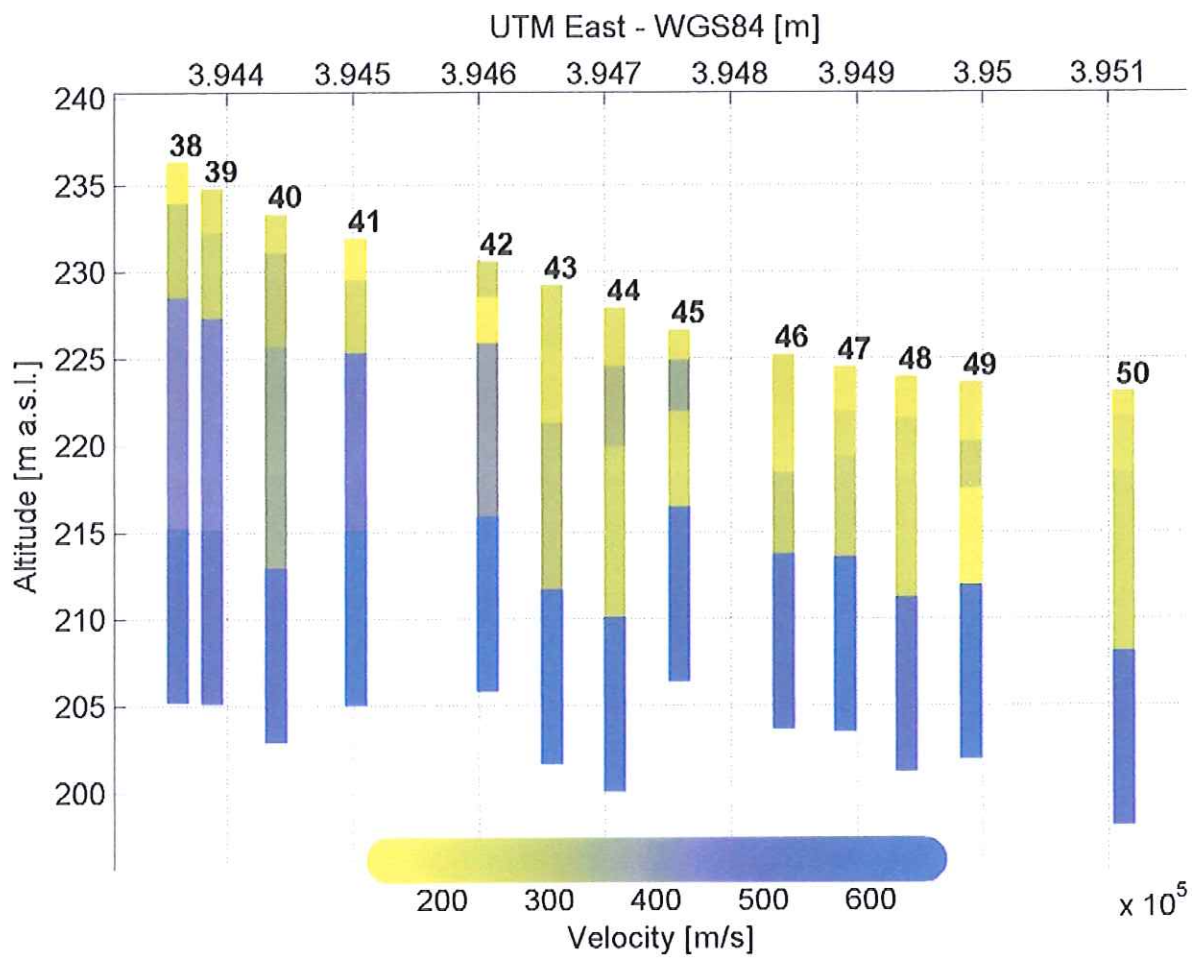


Tavola 5: Risultati dell'inversione SCI
Sezione 7

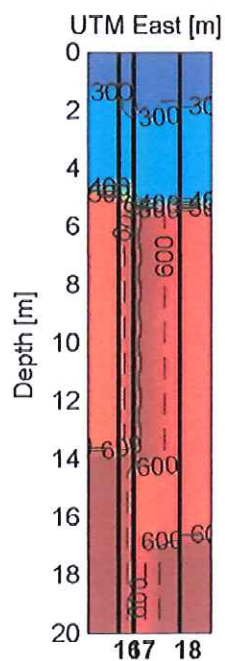
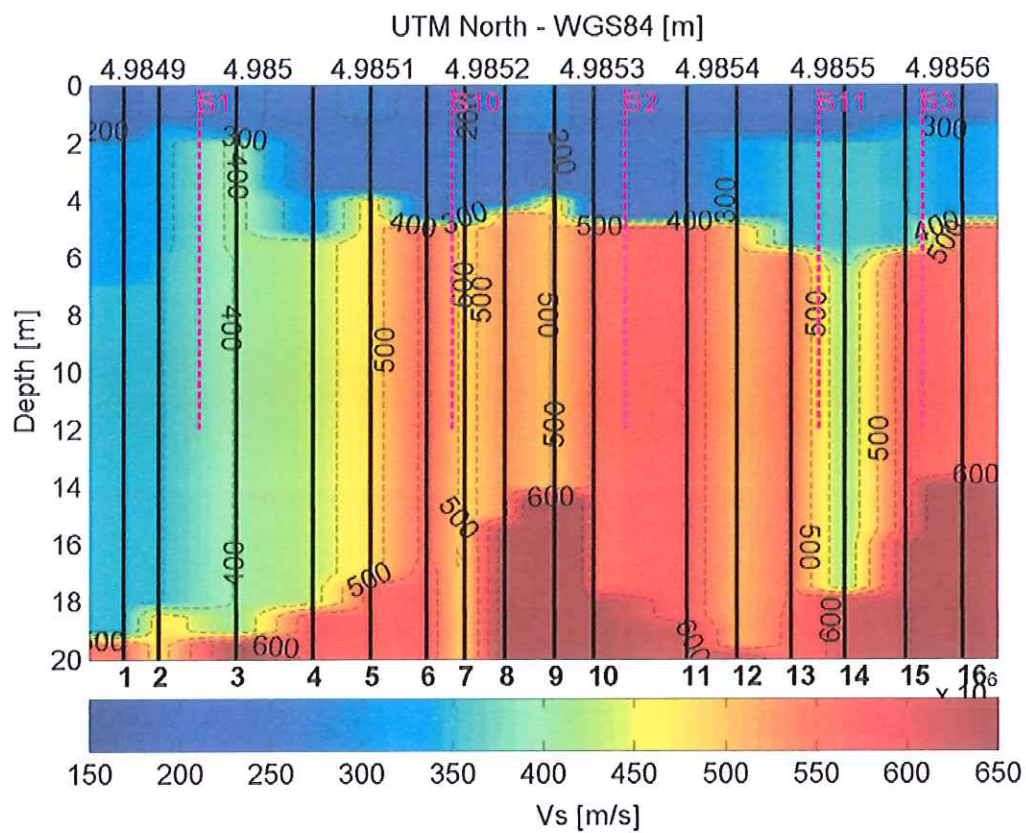


Tavola 6: Interpolazione dei profili di velocità con indicazione dei sondaggi
Sezioni 1 e 2

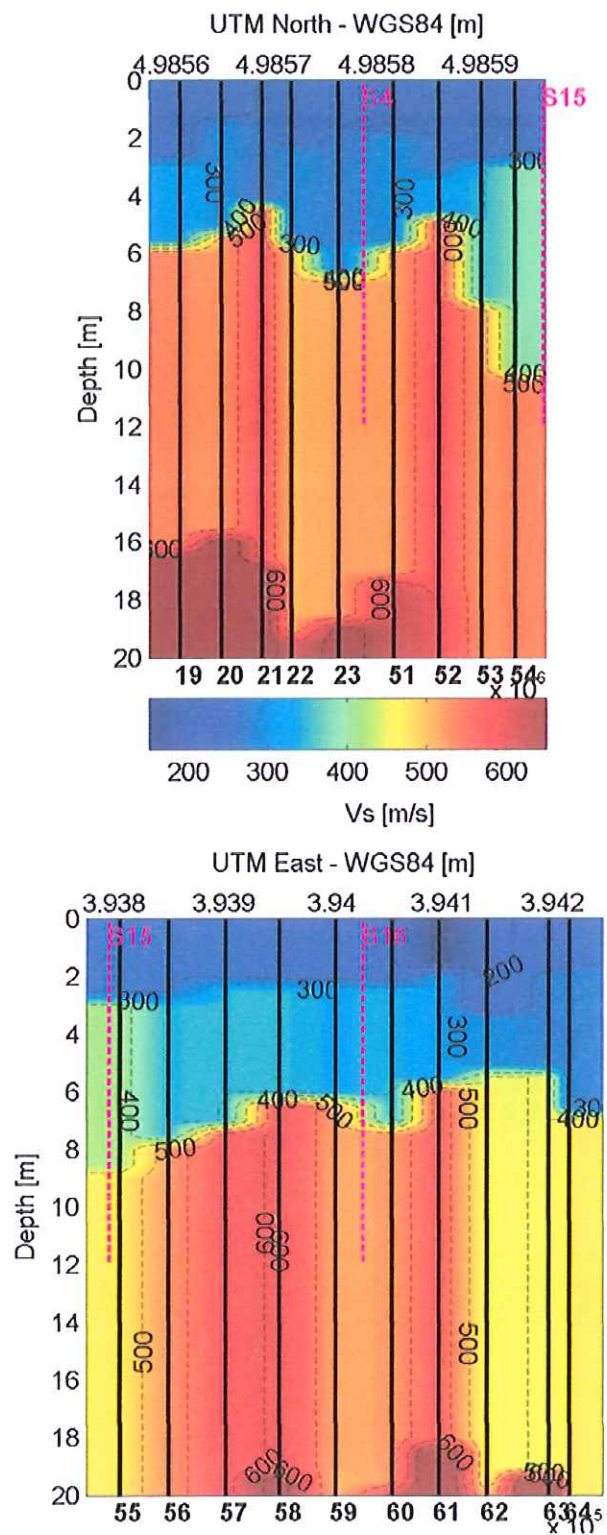


Tavola 7: Interpolazione dei profili di velocità con indicazione dei sondaggi
Sezioni 3 e 4

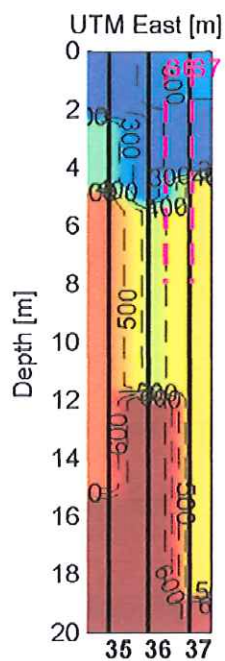
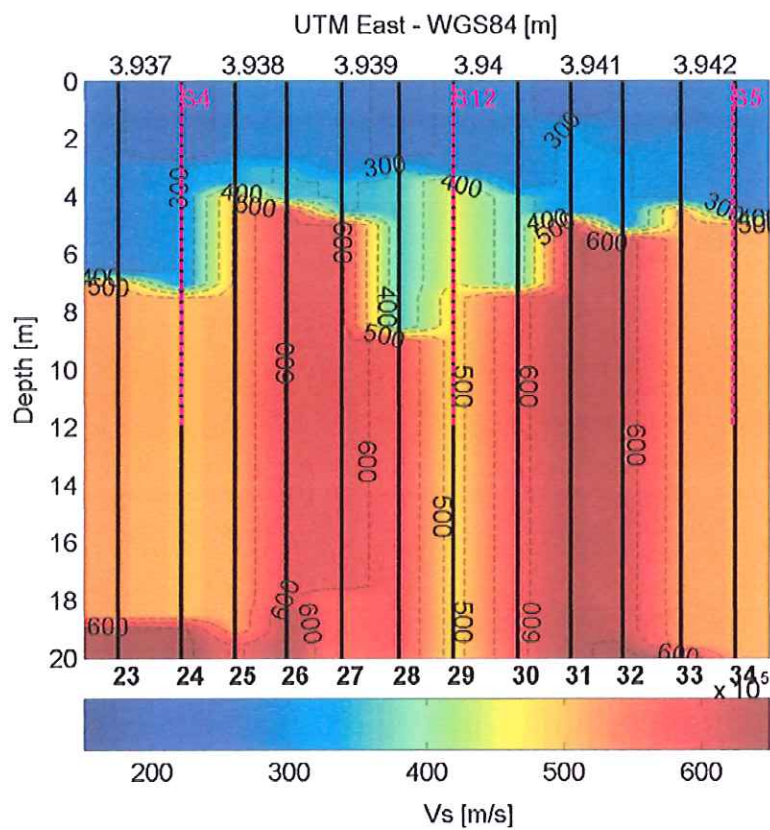


Tavola 8: Interpolazione dei profili di velocità con indicazione dei sondaggi
Sezioni 5 e 6

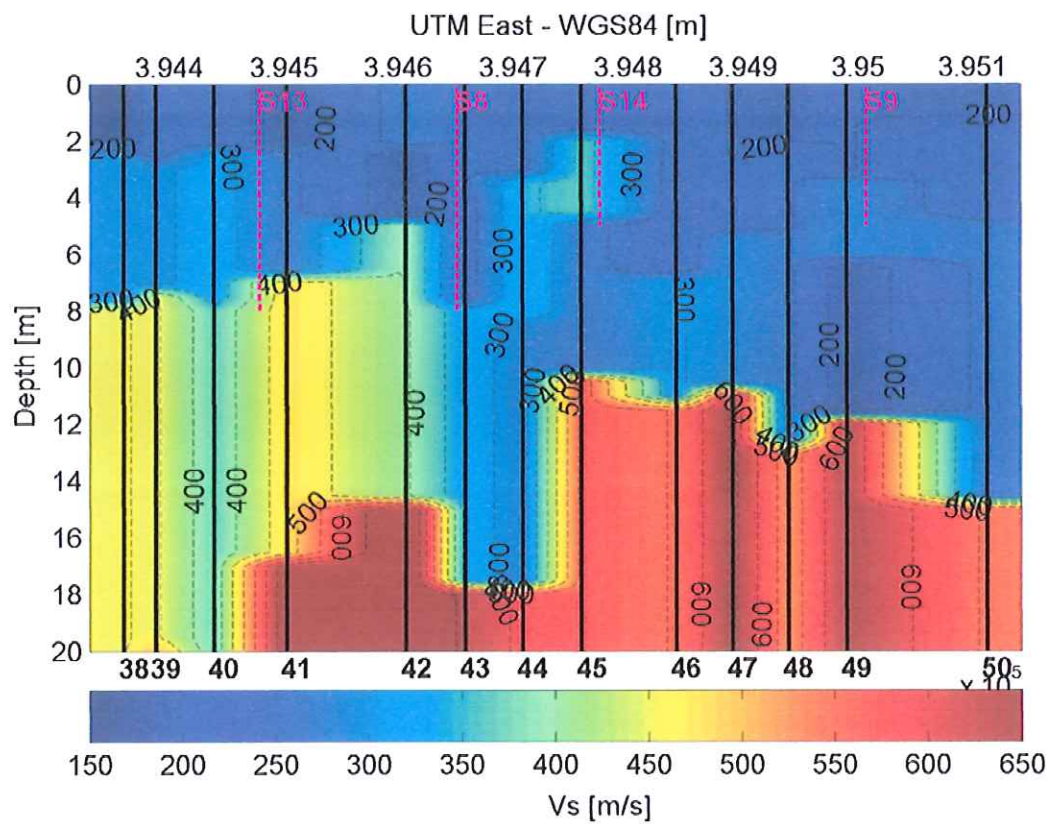


Tavola 9: Interpolazione dei profili di velocità con indicazione dei sondaggi
Sezione 7