

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO

U.O. GEOLOGIA, GESTIONE TERRE E BONIFICHE

PROGETTO DEFINITIVO

RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO

INDAGINI GEOFISICHE

PROSPEZIONI SISMICHE Loc. Calatabiano-Alcantara-Lacco

Rapporto tecnico

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

RS2S 00 D 69 IG GE0005 003 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorità
A	Emissione Esecutiva	C. Corno	magg. 2017	F. Romano	magg. 2017	P. Carlesimo	gen. 2018	ITALFERR S.p.A. Dott. Geologo Francesco MARCOLESE UO GEOLOGIA, GESTIONE TERRE E BONIFICHE Ordine Geologi Lazio n. 79 S

INDICE

1	PREMESSA	3
1.1	ESEMPI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	4
2	PROSPEZIONI ELETTROMAGNETICHE	5
2.1	METODOLOGIA.....	6
2.2	PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEL SISTEMA	6
2.4	ONDA TRASMESSA ED ONDA RICEVUTA.....	7
2.5	ACQUISIZIONE DATI	7
	MAPPE ELETTROMAGNETICHE DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA	8
3	INDAGINI SISMICHE MASW / RE.MI.	15
3.1	MASW / RE.MI. – RIFERIMENTO NORMATIVO (<i>NTC 2008 DM 14/01/2008</i>)	15
3.2	STENDIMENTI SISMICI CON METODO “MASW” E “RE.MI.” CENNI METODOLOGICI	16
3.3	MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA “MASW” E “RE.MI.”	18
3.4	ELABORAZIONE DATI	18
3.5	DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA DELL’ATTIVITÀ DI REGISTRAZIONE	19
	ALLEGATO 1 SPETTRI, CURVE DI DISPERSIONE PROFILI DI VELOCITÀ ONDE VS.....	20
4	PROSPEZIONE SISMICA.....	26
4.1	CENNI TEORICI	27
4.2	ACQUISIZIONE DATI	28
4.3	ELABORAZIONE DATI	28
4.4	ANALISI DEI RISULTATI	30
4.4.1	<i>Località Calatabiano – Profili L1e, L2, L1d, L1c, L1b, L3, L1a</i>	30
4.4.2	<i>Località Alcantara – Profili L4a, L4b</i>	35
4.4.3	<i>Località Lacco – Profili L5c, L5a, L5b</i>	37

1 PREMESSA

A seguito dell'Ordine n. 100032025 di attivazione n. 16 su A.Q. n. 200000990 del 15/01/2016, sono state eseguite specifici stendimenti geofisici nelle aree interessate dalla progettazione definitiva del Raddoppio Fiumefreddo-Giampileri.

Le indagini geofisiche di tipo sismico si sono sviluppate in tre località denominate Calatabiano, Alcantara e Lacco, mentre le indagini elettromagnetiche sono state effettuate in tre siti lungo il tracciato in progetto.

Nella Fig. 1 sono ubicate territorialmente le attività svolte: i rettangoli rossi individuano le aree nelle quali sono state effettuate le indagini di tipo sismico, mentre i simboli rossi quadrati localizzano le zone nelle quali sono state eseguite le indagini finalizzate alla ricerca di masse metalliche.

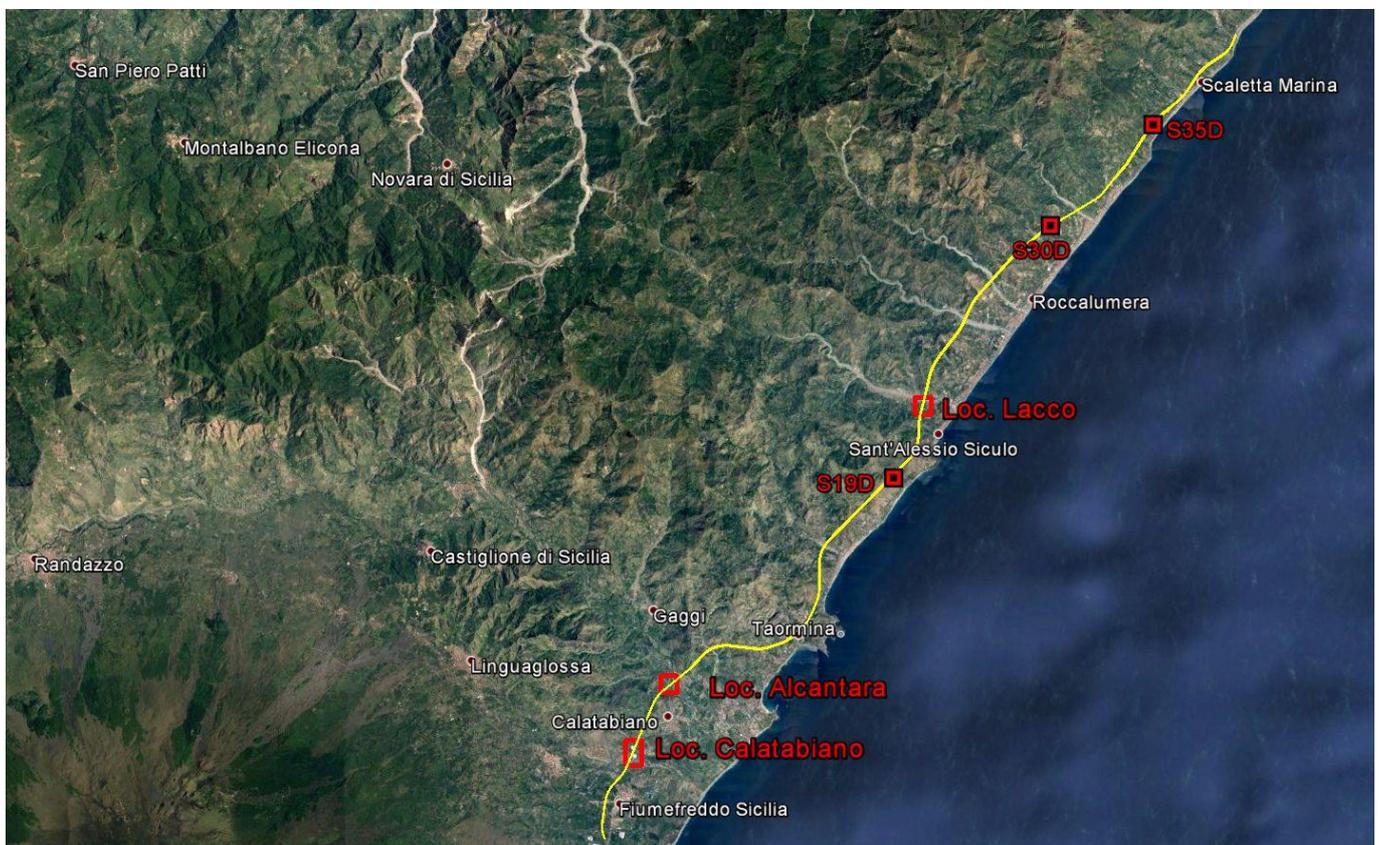


Fig. 1 - Inquadramento Territoriale Aree Indagini

L'attività si è articolata in differenti metodologie geofisiche strutturate in:

- Analisi elettromagnetiche per l'identificazione di eventuali anomalie metalliche in corrispondenza della piazzola di perforazione di tre (3) sondaggi denominati: **S19D**, **S30D** e **S35D**.
- N. 5 prove sismiche di tipo MASW / Re.Mi., denominate **R1**, **R2**, **R3**, **R4** e **R5**, finalizzate alla definizione dei valori di V_{S30} e classificazione della categoria dei suoli, con stendimenti di 24 geofoni intervallati ogni 5.0/2.50m; le cui ubicazioni planimetriche sono riportate negli allegati PROGR. **003** (prove **R4** e **R5**) e PROGR. **004** (prove **R1**, **R2** e **R3**)

- N. 12 Profili Sismici a rifrazione in onde P e S elaborati con metodo tomografico, distribuiti nelle località Calatabiano, Alcantara e Lacco secondo il seguente schema

Calatabiano	L1a, L1b, L1c , L1d, L1e, L2, L3
Alcantara	L4a, L4b
Lacco	L5a, L5b, L5c

con stendimenti variabili da 24 a 96 geofoni, posizionati ad intervalli regolari di 2.50/5.00m, ubicati planimetricamente in scala 1:2500 negli allegati PROGR. **002**, PROGR. **003**, PROGR. **004**.

Di seguito vengono descritte le singole attività svolte e relativa interpretazione dei dati geofisici acquisiti unitamente agli allegati di riferimento e specifica documentazione fotografica.

1.1 Esempi delle attività svolte



Fig. 2 – Piazzole di sondaggio



Fig. 3 –Energizzazione Prove Sismiche

2 PROSPEZIONI ELETTROMAGNETICHE

Al fine di valutare la presenza di eventuali anomalie metalliche in corrispondenza di punti d'indagine, denominati: **S19D**, **S30D** e **S35D**, sono stati eseguiti specifici controlli elettromagnetici con magliatura 1x1 metro, per un totale di superficie indagata di circa 300 mq.

Le misure elettromagnetiche, che hanno permesso di misurare la conducibilità del terreno espressa in millimhos/m, sono state effettuate con registratore GEONICS EM31 con coil da 3,66 metri e con GEONICS EM38 con coil da 1,00 metro. Per ogni punto sono stati acquisiti dati “in fase” e “in quadratura di fase” valutando sia la conducibilità elettrica che la suscettività magnetica.

I dati registrati sono stati elaborati arealmente e sintetizzati in specifiche mappe in scala 1:250 / 1:1000 sovrapposte alla foto aerea del 2014 estratte dal Geoportale di Bolzano.

Gli elaborati sono allegati nel capitolo:

“MAPPE ELETTROMAGNETICHE/DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA”.

La Fig. 4 riporta l'ubicazione geografica delle sette piazzole di sondaggio che sono state analizzate con metodologia elettromagnetica

Per ulteriore controllo le aree sono state ispezionate anche con specifico cerca servizi VOLTA T16 per localizzazione di sottoservizi.

Nelle aree indagate è stato lasciato un contrassegno (picchetto con nastro colorato) per indicare l'ubicazione del punto di sondaggio.

L'attività svolta è di seguito fotograficamente documentata.

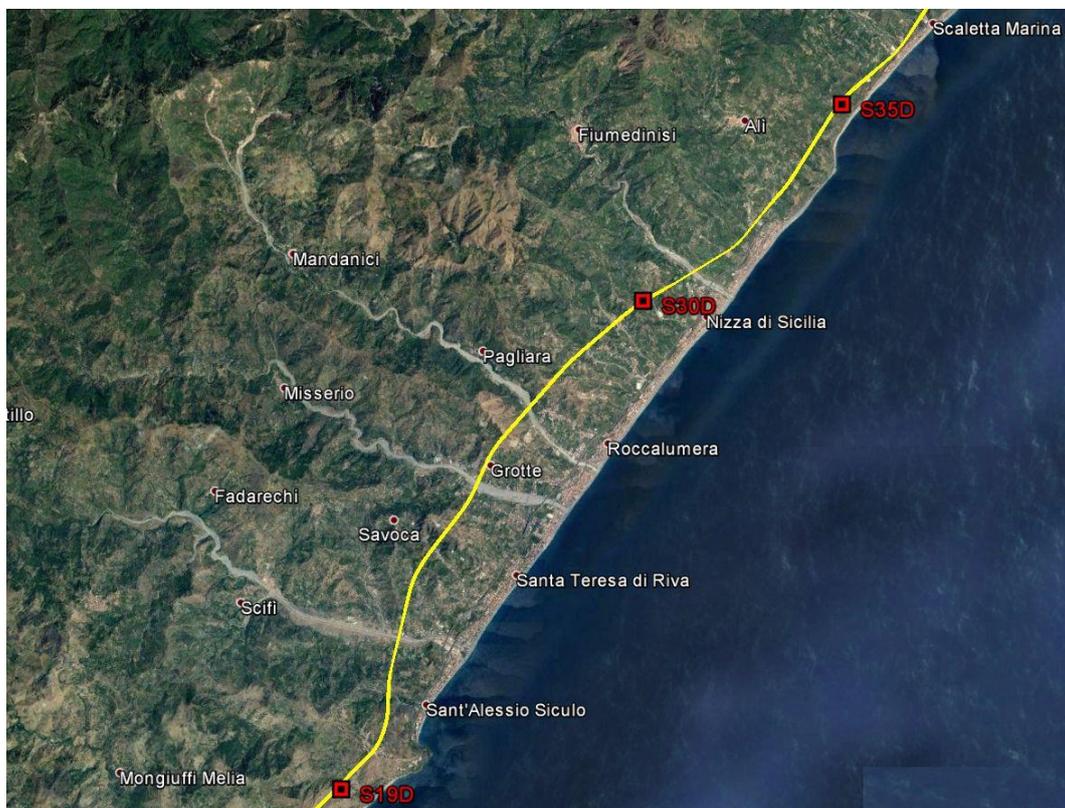


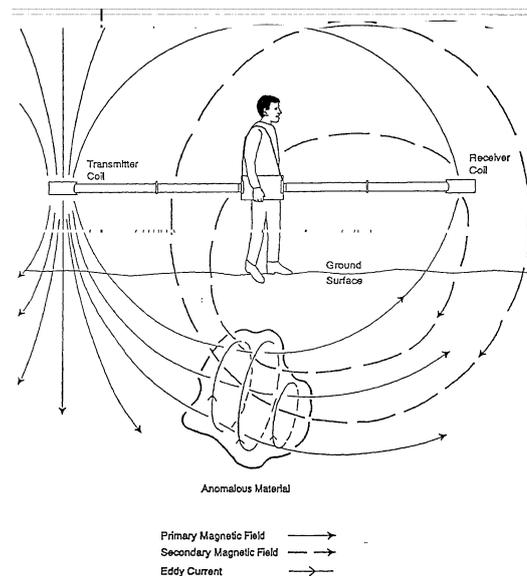
Fig. 4 – Ubicazione delle piazzole di sondaggio (simboli rossi), oggetto delle indagini elettromagnetiche

2.1 Metodologia

Il rilievo elettromagnetico rappresenta attualmente una delle tecniche di prospezione più risolutive per le indagini non distruttive finalizzate alla ricerca di materiali inquinanti, quali: rifiuti, melme, ecc. e per la localizzazione di oggetti metallici (fusti, tubature, ecc.) sepolti nel sottosuolo.

Con il rilievo elettromagnetico, infatti, non avendo la necessità di creare contatti fisici di elettrodi con il terreno, può essere realizzata un'esplorazione veloce e nello stesso tempo dettagliata e specifica anche in vaste aree. In tal modo è possibile ottenere, con una prospezione sistematica a maglie regolari, uno "screening" accurato del sottosuolo, con la capacità di individuare e delimitare con precisione i trend e gli andamenti degli elementi strutturali presenti.

Lo strumento d'acquisizione è costituito da un sistema ad induzione elettromagnetica "low induction number" a frequenza di 9,8 KHz "GEONICS EM31" e di 14,5 KHz "GEONICS EM38". Portatile alimentato a batterie, è costituito da due sensori: un trasmettitore e un ricevitore, posizionati a distanza fissa di 3,66 / 1,00 metri su un supporto rigido solidale all'apparecchiatura (v. illustrazione sotto).



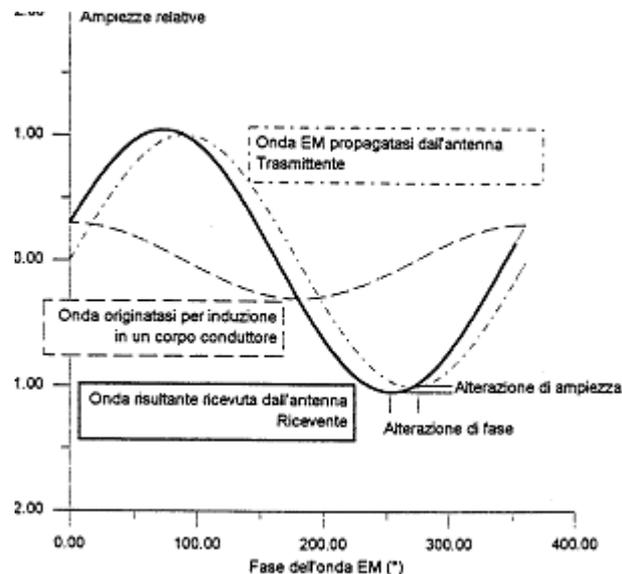
2.2 Principio di funzionamento del sistema

Il sistema utilizzato sfrutta il fenomeno fisico dell'induzione elettromagnetica che si verifica nei corpi conduttori di elettricità quando un'onda elettromagnetica (EM), propagandosi nello spazio, attraversa tal corpo.

In particolare, si può determinare la presenza del corpo conduttore nel sottosuolo eseguendo misure in superficie con vari dispositivi; quello in questione opera secondo lo schema seguente:

- un apparato trasmittente (Tx) invia nello spazio circostante, tramite un'antenna alloggiata ad una estremità del dispositivo di misura, un segnale a frequenza costante e di ampiezza grossomodo uniforme;
- un apparato ricevente (Rx) posto all'altra estremità del dispositivo (3,66 per EM31 - 1,00 m per EM38) riceve:
 1. il segnale EM propagatosi nell'aria;
 2. un segnale di riferimento direttamente dall'antenna trasmittente

Il segnale ricevuto tramite l'antenna risulterà, in assenza di conduttori nella zona circostante gli apparati, perfettamente in fase ed attenuato per la quantità dipendente dalla distanza, rispetto a quello trasmesso direttamente; nella realtà, invece, i fenomeni di induzione nei terreni conduttivi presenti nel sottosuolo provocano una maggiore alterazione del segnale ricevuto (vedi seguente diagramma).



2.4 Onda trasmessa ed onda ricevuta

L'analisi dell'alterazione del segnale porta alla determinazione della conducibilità apparente dello spazio circostante che, nelle esplorazioni di superficie, si può riferire al sottosuolo della zona in esame, in quanto il semispazio sopra la superficie è praticamente isolante. Questo fatto viene spiegato con il fenomeno dell'induzione elettromagnetica che produce una circolazione di corrente secondo spire virtuali che tendono a concentrarsi nelle zone a maggiore conducibilità e, pertanto, producono una maggiore alterazione del segnale all'antenna ricevente.

Il valore risultante viene convenzionalmente riferito al sottosuolo nel punto di stazione, tuttavia è necessario tener presente che il risultato è dipendente anche dalla posizione reciproca del Trasmettitore e del Ricevitore e dalla forma dell'oggetto anomalo. Infatti, mentre nel caso di situazioni di anomalie molto estese la variazione reciproca delle posizioni dei due apparati non comporta variazioni significative dei risultati delle misure, nel caso di anomalie molto ristrette (dimensioni inferiori al dispositivo) e sviluppate secondo una direzione preferenziale, i valori possono essere molto differenti tra un caso e l'altro. Anche al variare dell'angolo tra la linea del dispositivo e la linea di allungamento dell'oggetto anomalo si hanno notevoli variazioni del valore misurato; quindi è opportuno valutare i risultati non solo in base all'entità dei valori, ma anche in funzione delle dimensioni e delle caratteristiche delle situazioni anomale.

2.5 Acquisizione dati

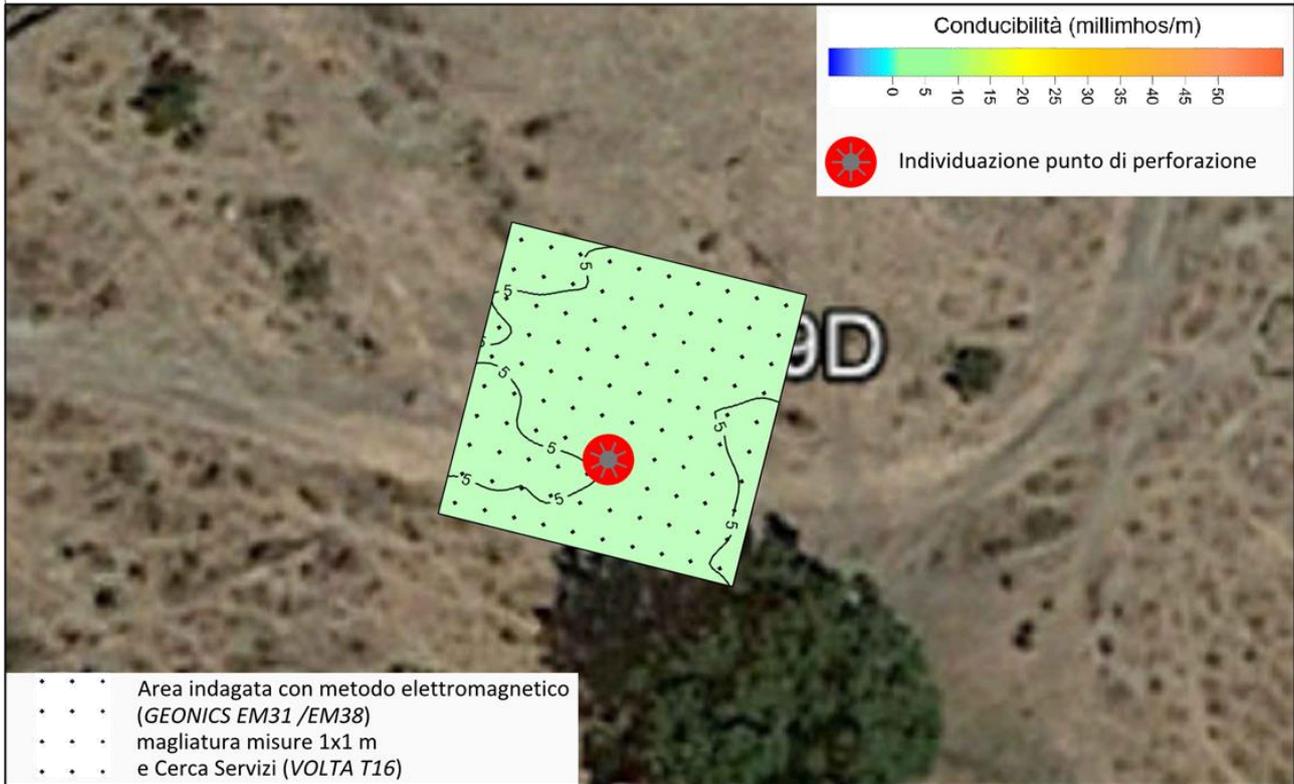
Il dispositivo ricevente rileva sia la componente in fase che in quadratura di fase del campo secondario (indotto) rispetto a quello primario. Dai valori in "quadratura di fase" si risale automaticamente ai valori di conducibilità elettrica (misurata in millimhos/metro). Le misure sono visualizzate analogicamente sul display dell'apparecchiatura e memorizzate in un "datalogger" collegato allo strumento.

I dati registrati, riversati su calcolatore e opportunamente elaborati, al fine di evidenziare la distribuzione e la geometria delle eventuali anomalie.

MAPPE ELETTROMAGNETICHE
DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

PIAZZOLE SONDAGGIO
S19D, S30D e S35D

Rilievo elettromagnetico Piazzola Sondaggio **S19D**



- dettaglio - scala 1:250



- inquadramento area - scala 1:1000

Documentazione Fotografica Piazzola Sondaggio **S19D**



Panoramica



Rilievo EM31



Rilievo EM38



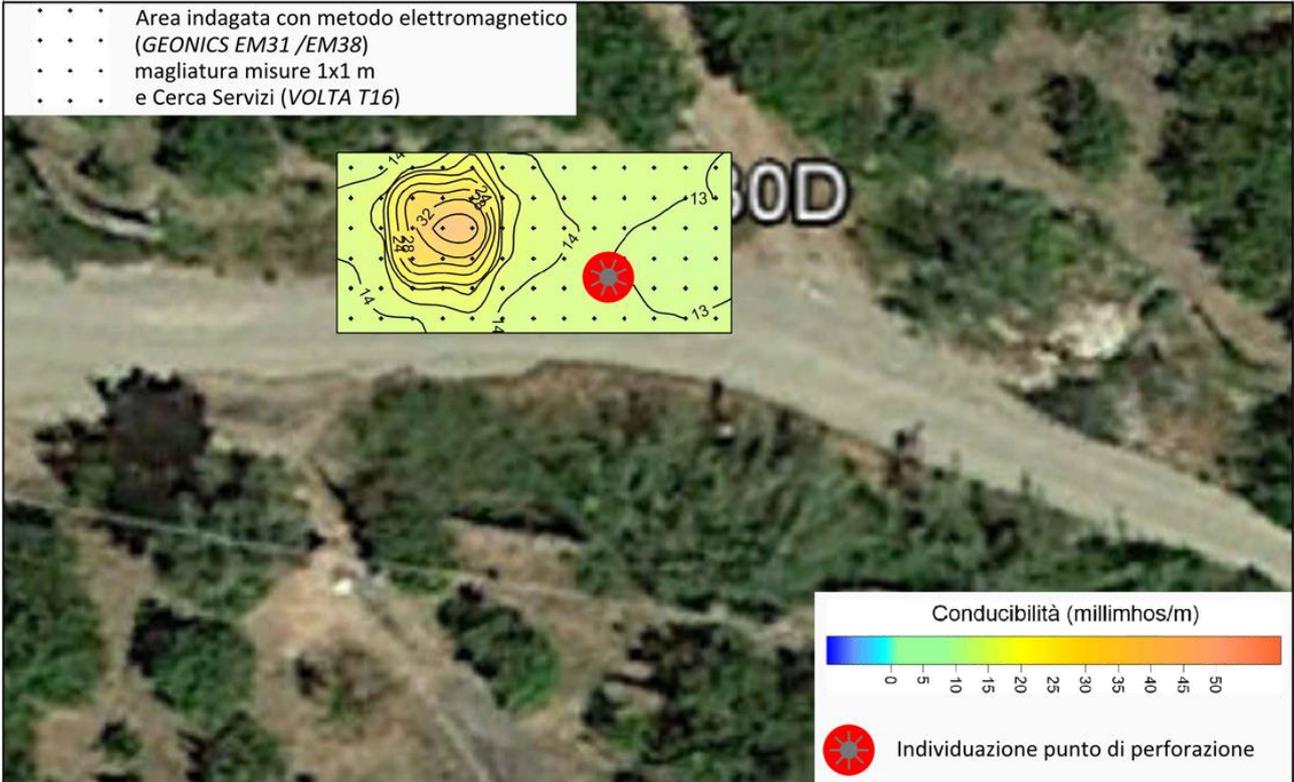
Rilievo VOLTA T16



Picchetto punto perforazione

Rilievo elettromagnetico Piazzola Sondaggio **S30D**

- • • Area indagata con metodo elettromagnetico (GEONICS EM31 /EM38)
- • • magliatura misure 1x1 m e Cerca Servizi (VOLTA T16)



- dettaglio - scala 1:250



- inquadramento area - scala 1:1000

Documentazione Fotografica Piazzola Sondaggio **S30D**



Panoramica



Rilievo EM31



Rilievo EM38



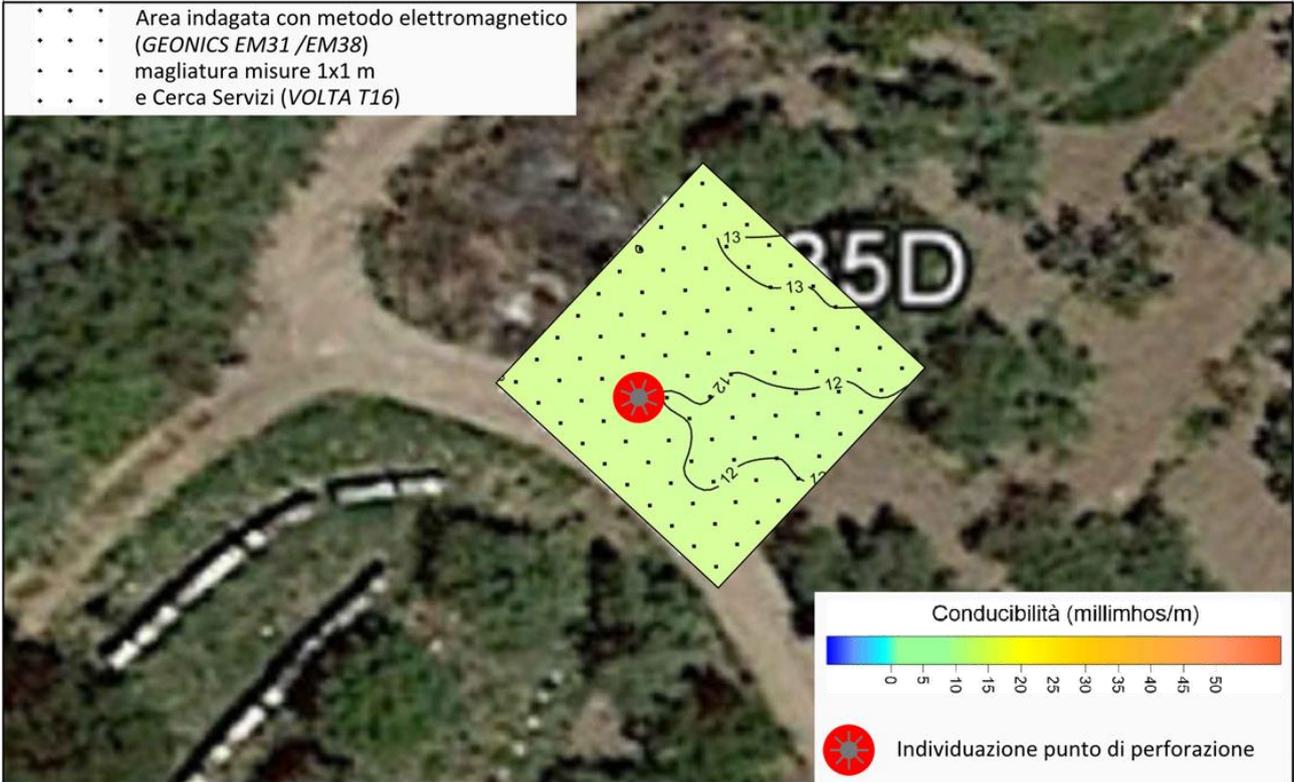
Rilievo VOLTA T16



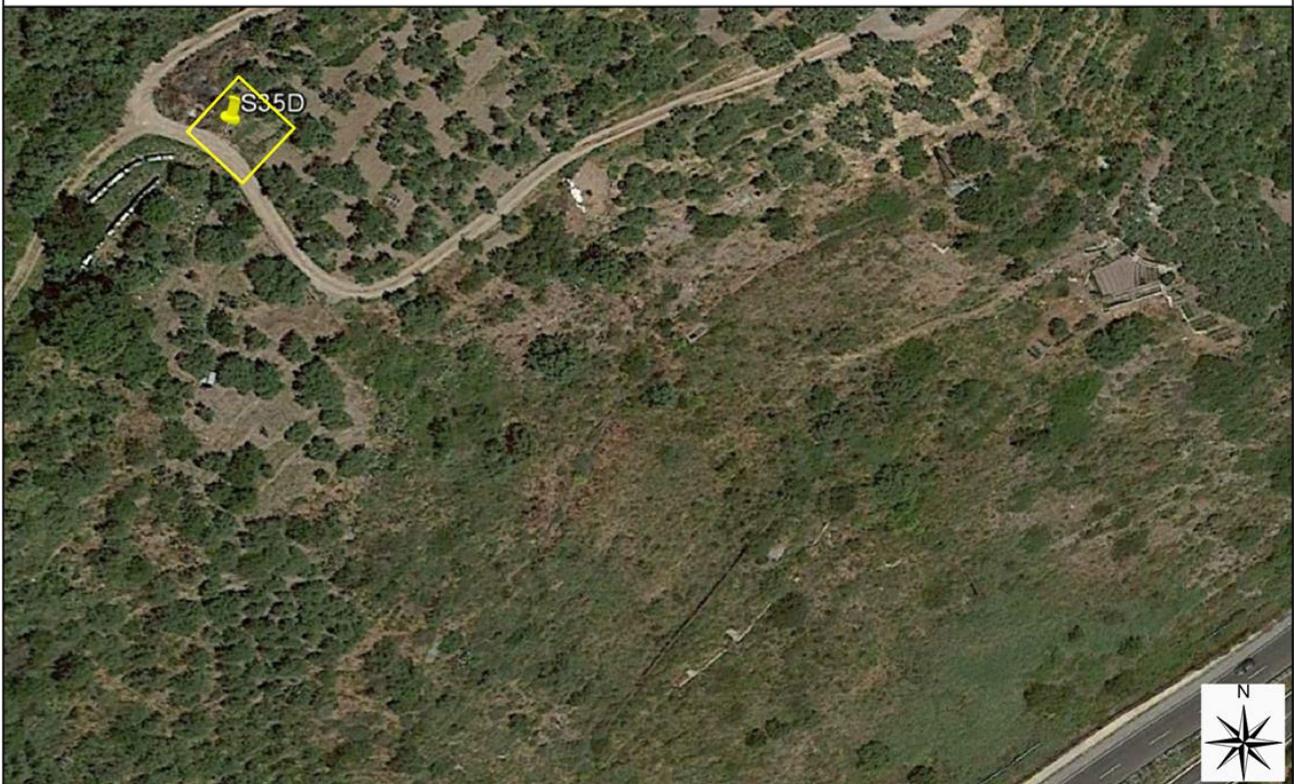
Picchetto punto perforazione

Rilievo elettromagnetico Piazzola Sondaggio **S35D**

- • • Area indagata con metodo elettromagnetico
- • • (GEONICS EM31 /EM38)
- • • magliatura misure 1x1 m
- • • e Cerca Servizi (VOLTA T16)



- dettaglio - scala 1:250



- inquadramento area - scala 1:1000

Documentazione Fotografica Piazzola Sondaggio **S35D**



Panoramica



Rilievo EM31



Rilievo EM38



Rilievo VOLTA T16



Picchetto punto perforazione

3 INDAGINI SISMICHE MASW / RE.MI.

Per la definizione dei valori di V_{S30} , classificazione della categoria dei suoli e ricostruzione stratigrafica sono state eseguite sette (5) prove sismiche di tipo MASW/Re.Mi., sviluppate con stendimenti di 24 geofoni intervallati ogni 5.0/2.5m a sigla **R1**, **R2**, **R3** (Loc. Lacco), **R4** e **R5** (Loc. Alcantara).

Per le modalità di elaborazione dei dati vedi il paragrafo 3.3 *Modalità esecutive della prova “MASW” e “Re.Mi.”*

L’ubicazione delle prove è riportata sull’aerofotogrammetrico fornito dalla Committenza negli allegati PROGR. **003** e **004** e sinteticamente su foto aerea estratta da Google Earth in Fig. 5.



Fig. 5 - Ubicazione Prove Sismiche MASW / Re.Mi.

Per l’ubicazione di dettaglio su foto aerea delle prove sismiche fare riferimento all’**allegato 1** “SPETTRI, CURVE DI DISPERSIONE e LOG VELOCITÀ ONDE V_s Masw / Re.Mi.”.

3.1 MASW / RE.MI. – riferimento normativo (NTC 2008 DM 14/01/2008)

La nuova normativa “Norme tecniche per le costruzioni” afferma che ai fini della definizione della azione sismica di progetto (punto 3.2.2), deve essere valutata l’influenza delle condizioni litologiche e morfologiche locali sulle caratteristiche del moto del suolo in superficie, mediante studi specifici di risposta sismica locale.

In mancanza di tali studi si può utilizzare la classificazione dei terreni descritta di seguito. La classificazione deve riguardare i terreni compresi tra il piano di imposta delle fondazioni degli edifici ed un substrato rigido di riferimento, (bedrock) ovvero quelli presenti ad una profondità commisurata all’estensione ed all’importanza dell’opera.

La classificazione può essere basata sulla stima dei valori della velocità media delle onde sismiche di taglio VS ovvero sul numero medio di colpi NSPT ottenuti in una prova penetrometrica dinamica ovvero sulla coesione non drenata media cu. In base alle grandezze sopra definite si identificano le seguenti le categorie del suolo di fondazione:

- A** – *Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi* caratterizzati da valori di V_{S30} superiori a 800 m/s, comprendenti eventuali livelli di alterazione superficiale con spessore massimo pari a 3m.
- B** – *Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti*, con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{S30} compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero resistenza penetrometrica NSPT > 50, o coesione non drenata Cu > 250 kPa).
- C** – *Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate, o di argille di media consistenza*, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di V_{S30} compresi tra 180 e 360 m/s ($15 < NSPT < 50$, $70 < Cu < 250$ kPa).
- D** – *Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti*, caratterizzati da valori di $V_{S30} < 180$ m/s ($NSPT < 15$, $Cu < 70$ kPa).
- E** – *Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali*, con valori di V_{S30} simili a quelli dei tipi C o D e spessore compreso tra 5 e 20 m, giacenti su di un substrato di materiale più rigido con $V_{S30} > 800$ m/s.

A queste cinque categorie principali si aggiungono altre due categorie per le quali sono richiesti studi speciali per la definizione dell'azione sismica da considerare:

- S1** - Depositi costituiti da, o che includono, uno strato spesso almeno 10 m di argille/limi di bassa consistenza, con elevato indice di plasticità ($PI > 40$) e contenuto di acqua, caratterizzati da valori di $V_{S30} < 100$ m/s ($10 < cu < 20$ kPa).
- S2** - Depositi di terreni soggetti a liquefazione, argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di terreno non classificabile nei tipi precedenti

La classificazione è effettuata sulla base del parametro V_{S30} che rappresenta la velocità delle onde di taglio S riferita a 30 m di profondità e calcolata con l'espressione:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}}$$

dove h_i e V_i indicano lo spessore (in m) e la velocità delle onde di taglio (per deformazioni di taglio $g < 10^{-6}$) dello strato i-esimo, per un totale di N strati presenti nei 30m superiori.

3.2 Stendimenti sismici con metodo “MASW” e “Re.Mi.” cenni metodologici

Il rilievo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) e Re.Mi. (Refraction Microtremor) sono tecniche di indagine non invasiva (non è necessario eseguire perforazioni o scavi), che individuano il profilo di velocità delle onde di taglio verticali Vs, basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del suolo.

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidezza della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde.

In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, 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. Il metodo di indagine MASW si distingue in metodo attivo e metodo passivo (Zywicki, D.J.1999) o in una combinazione di entrambi.

Nel metodo attivo, utilizzato nell'indagine, le onde superficiali generate in un punto sulla superficie del suolo sono misurate da uno stendimento lineare di sensori.

Nel metodo passivo lo stendimento dei sensori può essere sia lineare, sia circolare e si misura il rumore ambientale di fondo esistente. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5Hz e 70Hz, quindi dà informazioni sulla parte più superficiale del suolo, sui primi 30m-50m, in funzione della rigidità del suolo. Il metodo passivo in genere consente di tracciare una velocità di fase apparente sperimentale compresa tra 0 Hz e 10Hz, quindi dà informazioni sugli strati più profondi del suolo, generalmente al di sotto dei 50m, in funzione della rigidità del suolo.

L'elaborazione dei dati con il metodo MASW prevede tre fasi di lavoro:

1. la prima fase prevede il calcolo della velocità di fase (o curva di dispersione) apparente sperimentale,
2. la seconda fase consiste nel calcolare la velocità di fase apparente numerica,
3. la terza ed ultima fase consiste nell'individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , modificando opportunamente lo spessore h , le velocità delle onde di taglio V_s e di compressione V_p (o in maniera alternativa alle velocità V_p è possibile assegnare il coefficiente di Poisson), la densità di massa degli strati che costituiscono il modello del suolo, fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale e la velocità di fase (o curva di dispersione) numerica corrispondente al modello di suolo assegnato.

Il modello di suolo e quindi il profilo di velocità delle onde di taglio verticali possono essere individuati con procedura manuale o con procedura automatica o con una combinazione delle due. Generalmente si assegnano il numero di strati del modello, il coefficiente di Poisson, la densità di massa ρ e si variano lo spessore h e la velocità V_s degli strati.

Nella procedura manuale l'utente assegna per tentativi diversi valori delle velocità V_s e degli spessori h , cercando di avvicinare la curva di dispersione numerica alla curva di dispersione sperimentale. Nella procedura automatica la ricerca del profilo di velocità ottimale è affidata ad un algoritmo di ricerca globale o locale che cerca di minimizzare l'errore tra la curva sperimentale e la curva numerica. In genere quando l'errore relativo, tra curva sperimentale e curva numerica è compresa tra il 5% e il 10% si ha un soddisfacente accordo tra le due curve e il profilo di velocità delle onde di taglio V_s e quindi il tipo di suolo sismico conseguente rappresentano una soluzione valida da un punto di vista ingegneristico.

La tecnica di prospezione "Refraction Microtremor" (Re.Mi), utilizzata nell'ambito di questo progetto, capovolge il concetto comune del parametro "segnale-disturbo", per il quale tradizionalmente il primo (segnale) ha necessità di essere rilevato in condizioni favorevoli quindi in assenza o scarsità di rumore. Viceversa, in presenza di forte rumore di fondo (es. ambiente urbano), le tradizionali rilevazioni sismiche hanno sempre trovato una condizione di difficile applicazione a causa della difficoltà di discriminare il segnale dal rumore.

Con questa nuova tecnica, il disturbo, il "noise" ambientale diventa il segnale utilizzato per la caratterizzazione sismica. Sono i microtremori (rumore di fondo generato dal traffico stradale, ferroviario e comunque il rumore presente costantemente in ambito urbanizzato) a costituire la sorgente di energia utile allo scopo.

Numerose sperimentazioni hanno consentito di appurare che le registrazioni del rumore di fondo ambientale, effettuate con uno stendimento sismico normalmente utilizzato per la sismica a rifrazione, possono essere utilizzate, con opportune procedure di acquisizione e elaborazione, per stimare la velocità delle onde di taglio (V_s) fino a profondità che possono essere superiori a 100m. La metodologia d'indagine più applicata per la determinazione del profilo verticale di velocità delle onde di taglio V_s , è stata proposta e sperimentata da J.N.Louie del Seismological Laboratory and Dept. of Geological Sciences dell'Università del Nevada, ed è basata su due aspetti fondamentali:

- uno pratico, rappresentato dal fatto che alcuni sistemi di acquisizione di sismica a rifrazione (con dinamica a 24bit) sono in grado di registrare onde di superficie con frequenze fino a 2 Hz per intervalli di tempo sufficientemente lunghi (almeno 10 sec);
- uno teorico, sulla base del quale una semplice trasformata bidimensionale (p-f) slowness-frequency della registrazione di un rumore di fondo (microtremor) è in grado di separare le onde di Rayleigh (onde di superficie) da altri tipi di onde che compongono il sismogramma, rendendo possibile il riconoscimento delle vere velocità di fase dalle velocità apparenti.

3.3 Modalità esecutive della prova “MASW” e “Re.Mi.”

In considerazione delle particolari condizioni logistiche locali, per poter definire con una discreta certezza il dato medio di V_{S30} , si è proceduto ad acquisire sia profili sismici di tipo “MASW” sia “Re.Mi.”. In **Ann.2** si riportano le registrazioni / spettri delle prove MASW.

L'acquisizione dei dati per la definizione della V_s è stata realizzata tramite la registrazione del rumore ambientale, impiegando geofoni da 4.5Hz, ed un acquisitore digitale a 24 canali della Geometrics tipo “Geode” con dinamica a 24bit.

3.4 Elaborazione dati

I dati della prova “MASW” sono stati elaborati con il software “WinMasw – Eliosoft”.



Per la metodologia “Re.Mi.” per l'elaborazione dei dati si è utilizzato il pacchetto software SeisOpt Re.Mi. 5.0 prodotto dalla Optim Software LLC.



Come prima fase è stata eseguita un'analisi spettrale del sismogramma che ha consentito di elaborare una immagine della distribuzione del segnale di velocità sismica in funzione delle diverse frequenze che lo compongono. Da tale elaborazione è stata estrapolata la curva di attenuazione del segnale caratteristico e in funzione del suo andamento (curva di dispersione) si è risaliti alla stratigrafia sismica in termini di velocità delle onde di taglio (V_s).

Il risultato finale dell'elaborazione è consistito, quindi, nella rappresentazione grafica del profilo di velocità.

La velocità delle onde di taglio, essendo legata alle caratteristiche dello scheletro del materiale, costituisce un parametro di grande rilevanza per la definizione delle caratteristiche geomeccaniche dei materiali. Risulta evidente che a velocità elevate corrispondono materiali con buone caratteristiche geomeccaniche, viceversa a bassi valori corrispondono materiali con scadenti caratteristiche geotecniche.

La tabella allegata sintetizza i valori di V_{S30} calcolati e conseguente categoria di suolo sismico:

Località	Sigla Prova	V_{S30} (m/s)	Categoria suolo
Lacco	R1	370	B
	R2	353	C
	R3	343	C
Alcantara	R4	504	B
	R5	446	B

3.5 Documentazione fotografica dell'attività di registrazione



Fig. 6 - Energizzazione Prova MASW



Fig. 7 - Attrezzatura di registrazione

ALLEGATO 1

SPETTRI, CURVE DI DISPERSIONE PROFILI DI VELOCITÀ ONDE V_s

Prove MASW / Re.Mi.

R1

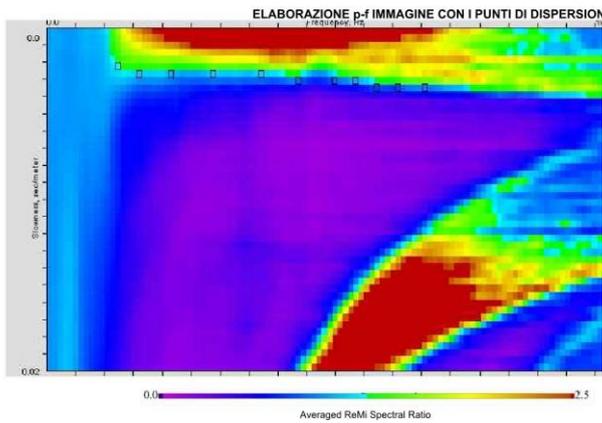
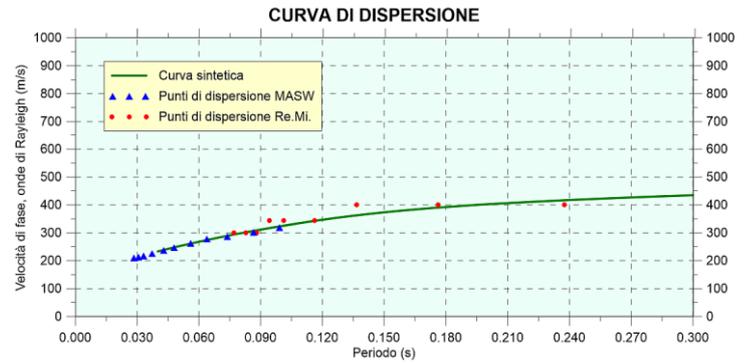
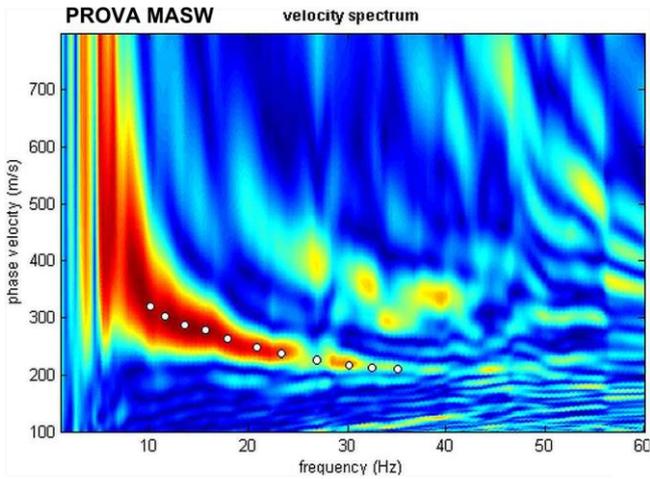
R2

R3

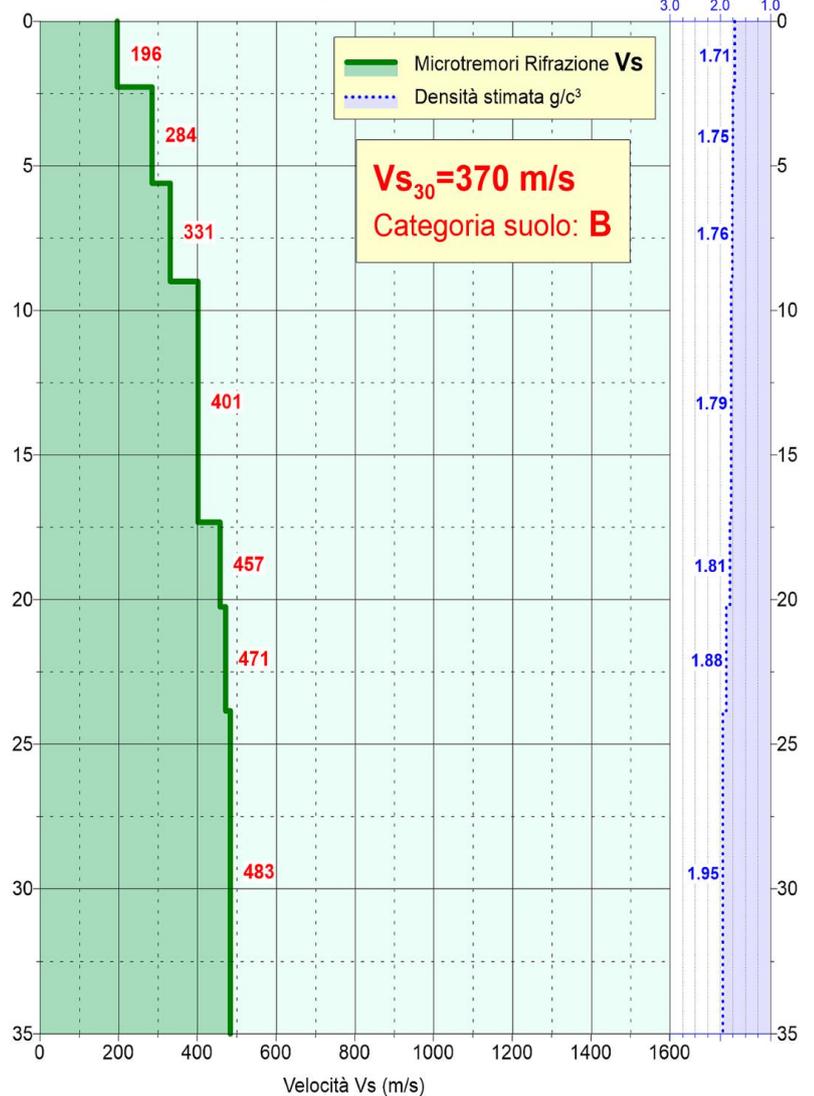
R4

R5

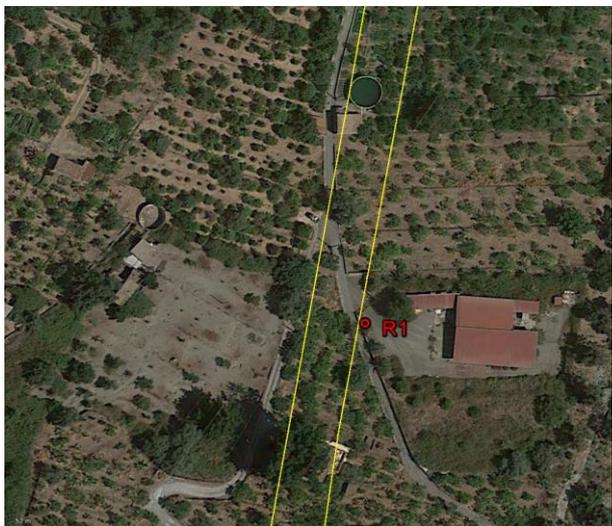
Prova Masw/Re.Mi. – R1 - Lacco



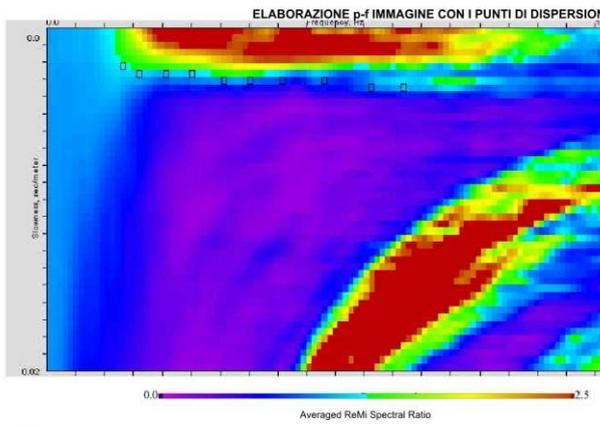
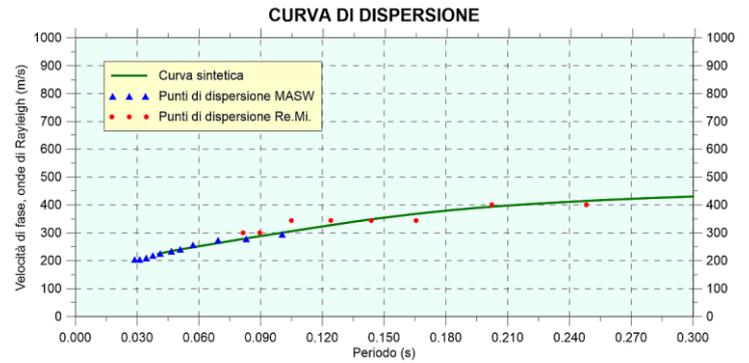
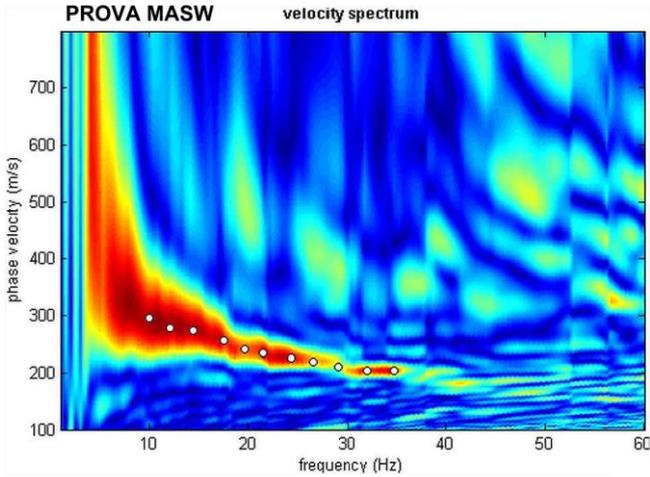
PROFILO VELOCITÀ Vs



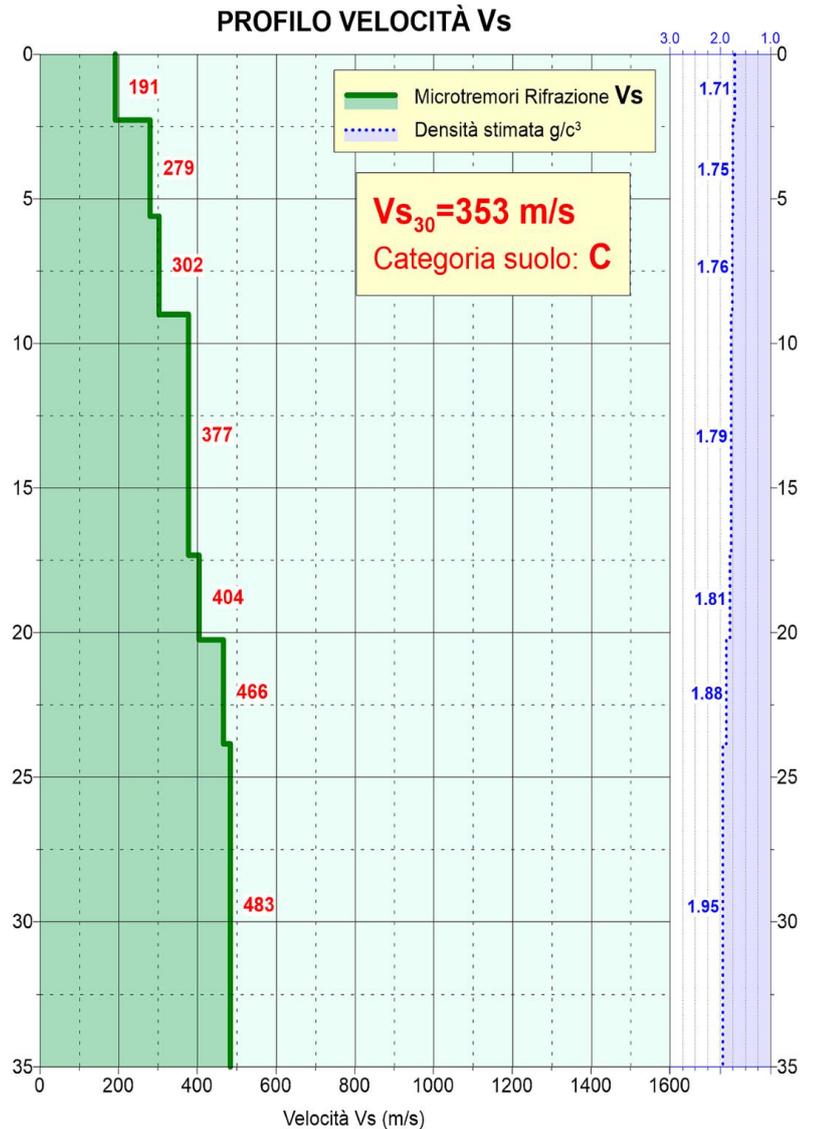
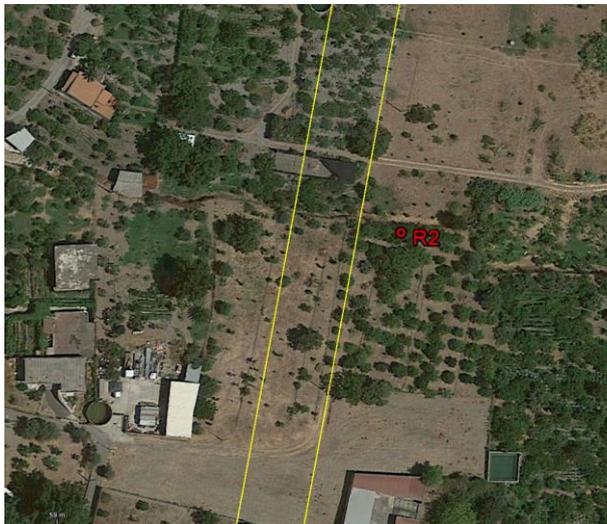
Ubicazione prova



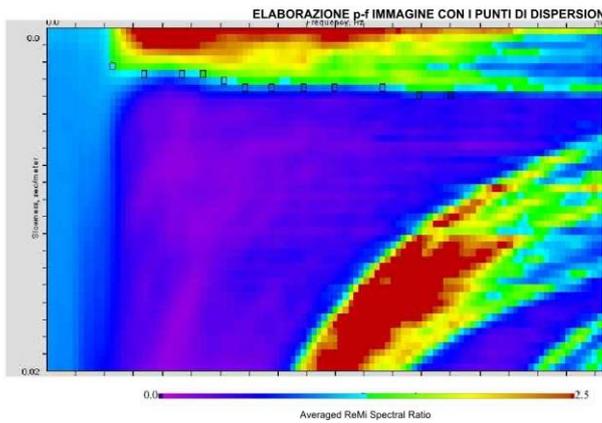
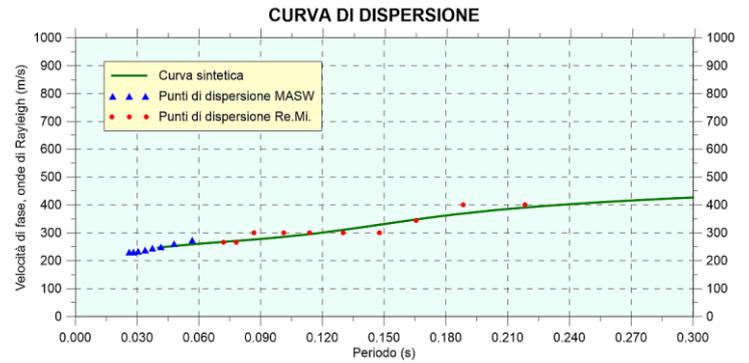
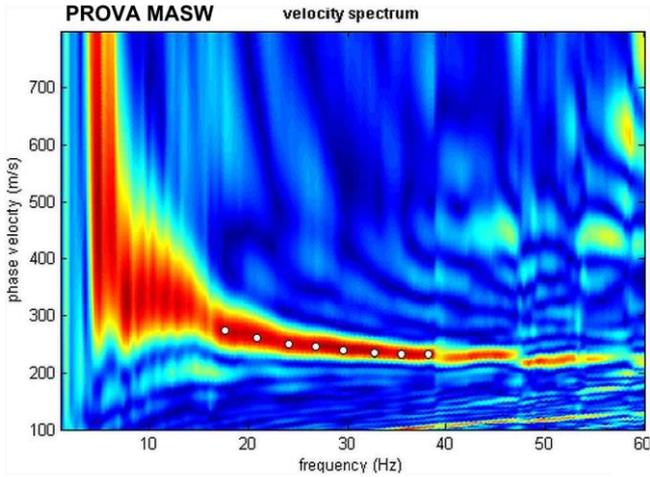
Prova Masw/Re.Mi. – R2 - Lacco



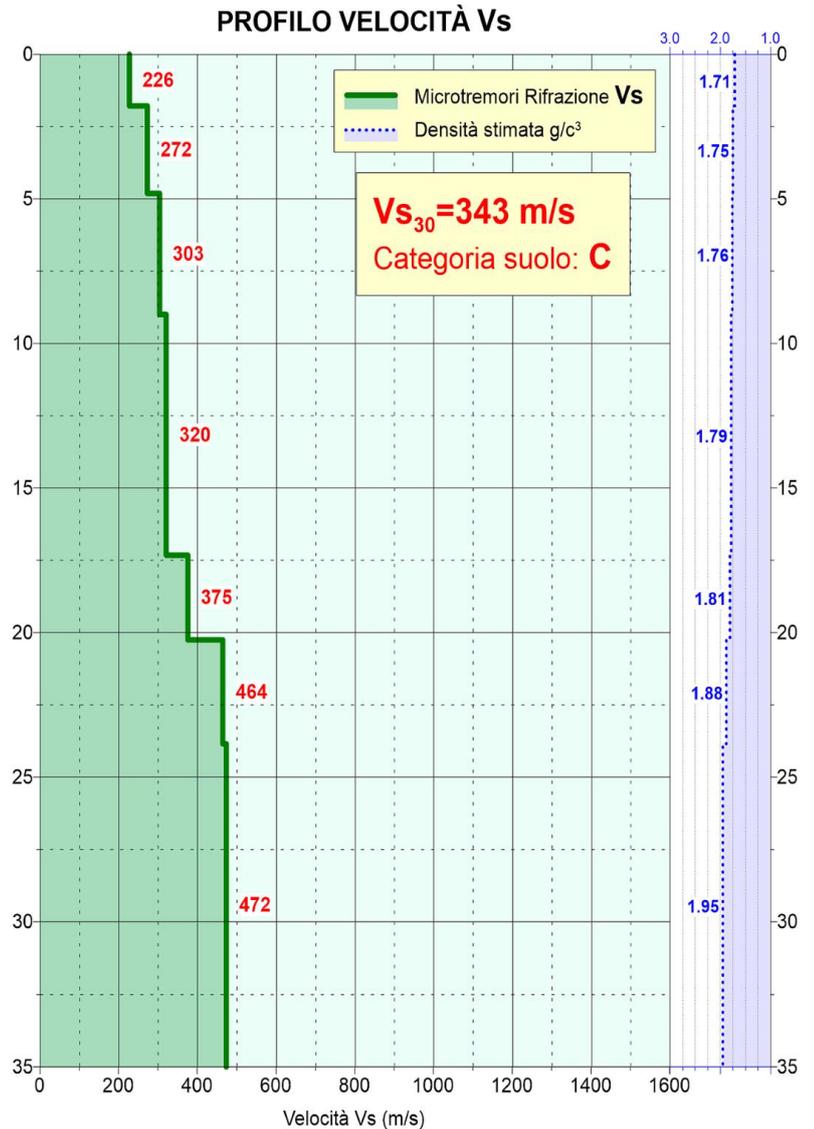
Ubicazione prova



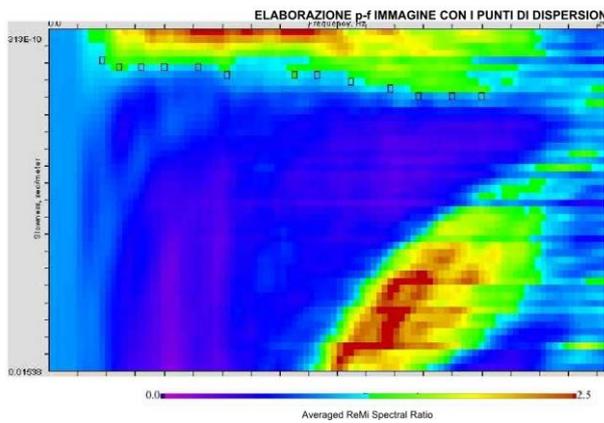
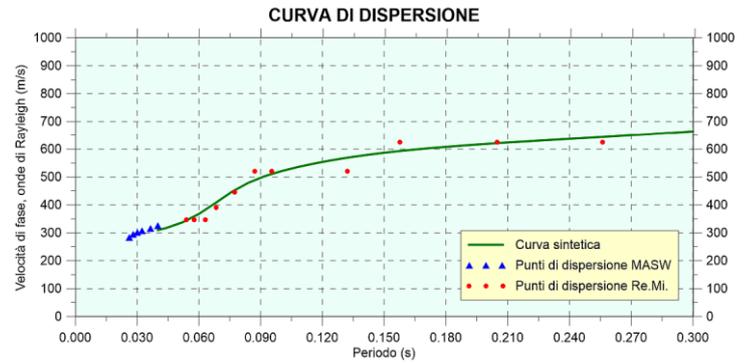
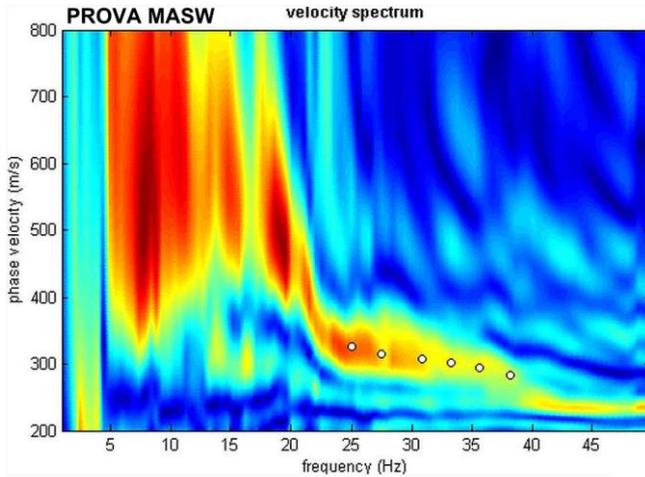
Prova Masw/Re.Mi. – R3 - Lacco



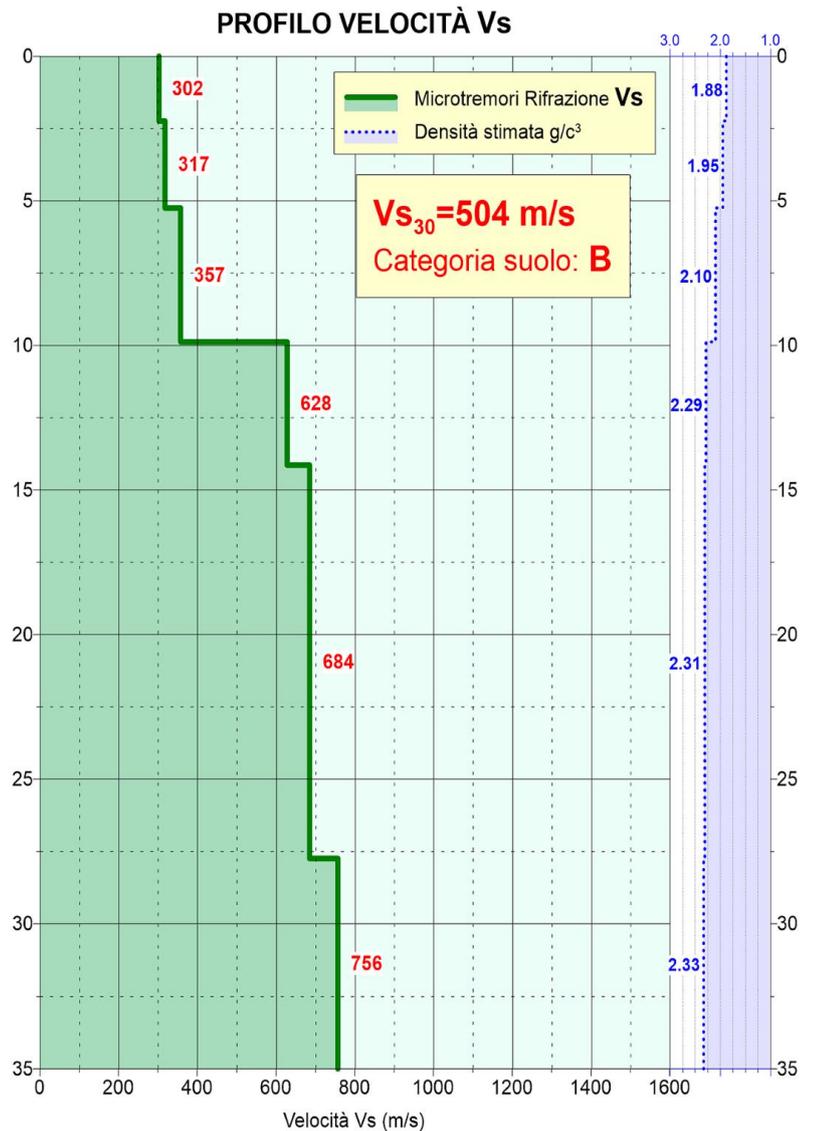
Ubicazione prova



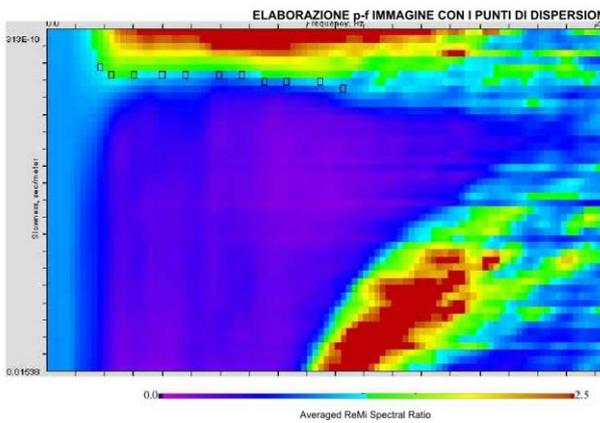
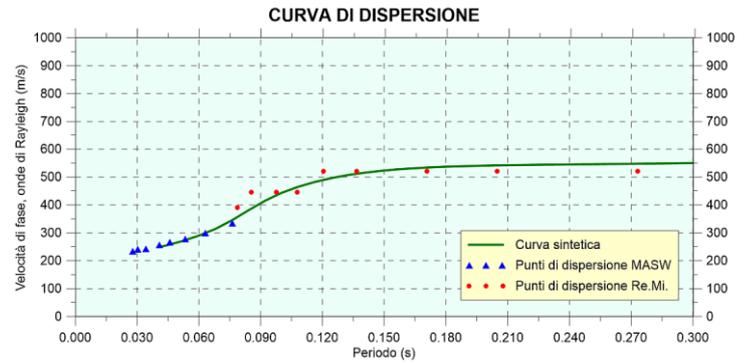
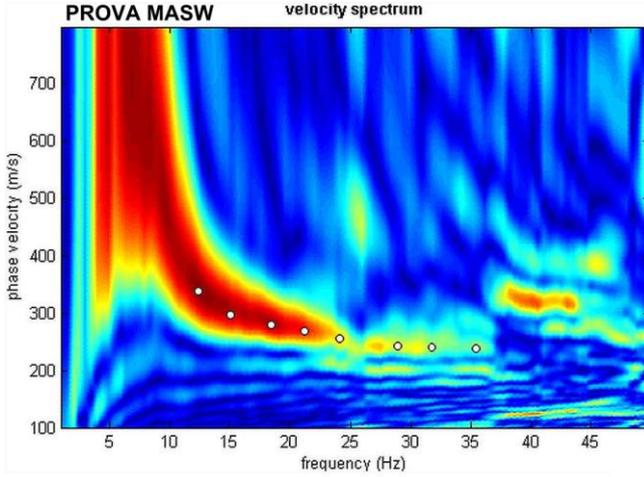
Prova Masw/Re.Mi. – R4 - Alcantara



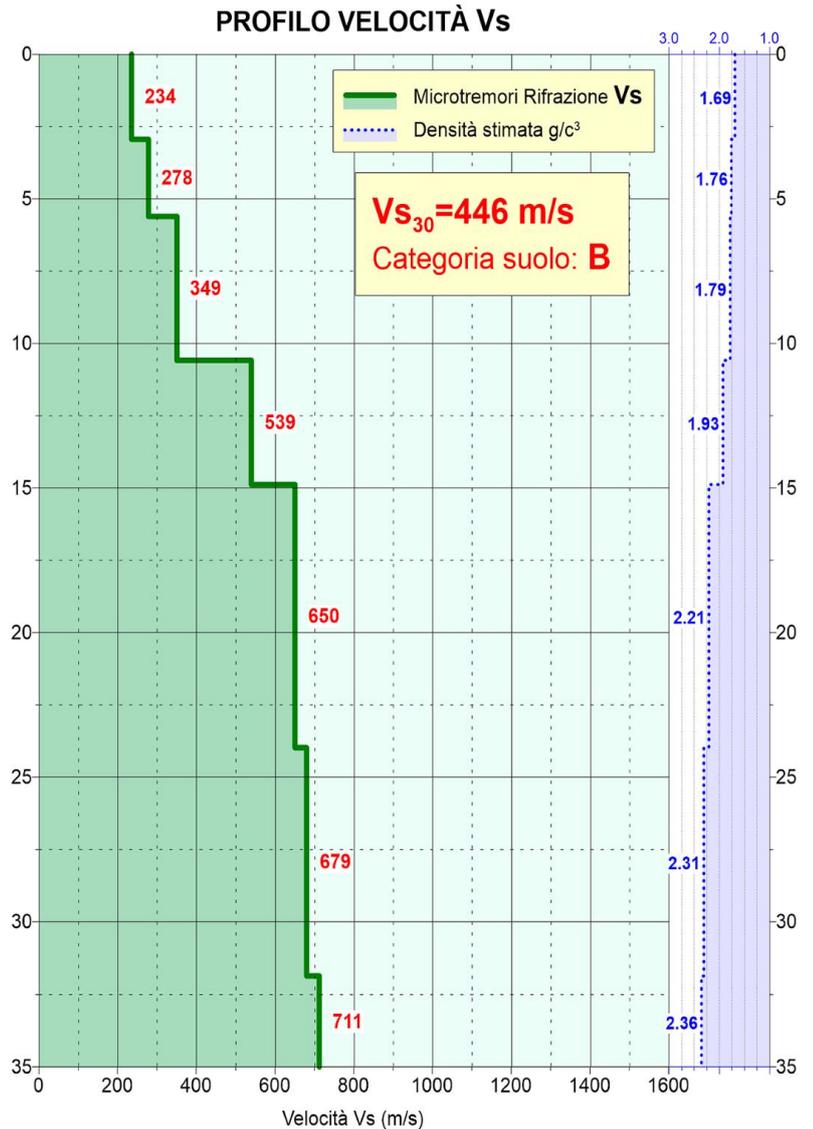
Ubicazione prova



Prova Masw/Re.Mi. – R5 - Alcantara



Ubicazione prova



4 PROSPEZIONE SISMICA

La prospezione sismica A RIFRAZIONE è stata finalizzata alla ricostruzione sismostratigrafica con determinazione delle velocità delle onde sismiche **P** (onde di compressione) e **S** (onde di taglio) dei litotipi lungo il tracciato in progetto nelle località di Calatabiano, Alcantara e Lacco (Fig. 8).



Fig. 8 - Inquadramento Indagini Sismiche a rifrazione

Nella totalità sono stati realizzati n.12 profili sismici a rifrazione eseguiti nelle aree sopra citate.

I profili sono costituiti da allineamenti di varia lunghezza da 24 a 96 geofoni intervallati a passo regolare di 2.5/5.0 m. L'ubicazione dei profili sismici è riportata in scala 1.2500 negli specifici allegati di rappresentazione dell'elaborazione tomografica delle sezioni sismiche, suddivisi per località (Fig. 9).

L'indagine sismica a rifrazione si è sviluppata per un totale di 2122.5 ml, in dettaglio 1242.5 ml in località Calatabiano (**P e S**), 415.0 ml ad Alcantara (**P e S**) e 465.0 ml a Lacco (**P**).

Nella tabella successiva (Fig. 9) sono sintetizzate per ogni singola acquisizione la località, il numero di geofoni, la spaziatura intergeofonica, lunghezza del profilo e numero progressivo elaborato.

Finestra	Profilo (registrazione)	N. Geofoni x spaziatura in m	Lunghezza (m)	Elaborato in scala 1:500
Calatabiano	L1a (P e S)	96 x 2.5	237.5	002
	L1b (P e S)	96 x 2.5	357.5	
	L1c (P e S)	48 x 2.5	117.5	
	L1d (P e S)	72 x 2.5	177.5	
	L1e (P e S)	48 x 2.5	117.5	
	L2 (P e S)	96 x 2.5	237.5	
	L3 (P e S)	48 x 2.5	117.5	
Alcantara	L4a (P e S)	96 x 2.5	237.5	003
	L4b (P e S)	72 x 2.5	237.5	
Lacco	L5a (P)	24 x 5.0	115.0	004
	L5b (P)	48 x 5.0	235.0	
	L5c (P)	24 x 5.0	115.0	

Fig. 9 – Tabella riassuntiva Indagini Sismiche a Rifrazione

4.1 Cenni teorici

Il metodo sismico a rifrazione si basa sulla misura dei tempi di percorso delle onde sismiche di volume (**P e S**) dirette e rifratte che, partendo in un istante noto da una sorgente artificiale di posizione nota, arrivano ai diversi geofoni (sensori collocati a distanze note dalla sorgente). Le onde dirette sono quelle che si propagano direttamente dalla sorgente ai geofoni, senza scendere in profondità, invece, le onde rifratte sono quelle che, dopo essere penetrate in profondità nel sottosuolo, incontrano un rifratte (superficie di aumento brusco della velocità di propagazione) e vengono da esso trasmesse in superficie (a causa del fenomeno dell'incidenza critica dei raggi sismici).

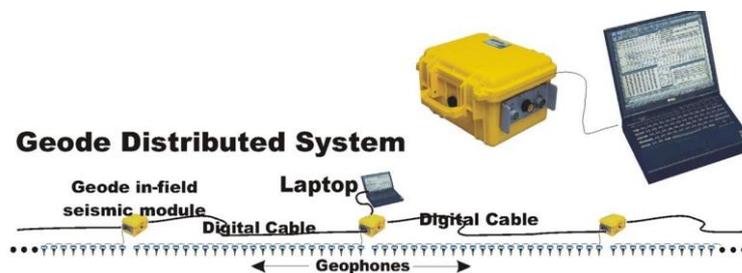
Pertanto, i dati ricavati da tale tipo di indagine consentono la definizione di un modello bidimensionale del sottosuolo. Utilizzando le distanze tra il punto di scoppio e i vari geofoni e i tempi di arrivo del segnale sismico, si ricavano delle curve tempo-distanza (dromocrone), dalle dromocrone dei primi arrivi (curve che rappresentano la variazione del tempo di percorso in funzione della distanza sorgente - geofono) si risale al modello di velocità sismica del sottosuolo, fino alla base del rifratte più profondo individuato (poiché i raggi sismici che scendono a profondità superiori non ritornano in superficie nei punti in cui sono collocati i geofoni).

4.2 Acquisizione dati

Negli stendimenti sono stati utilizzati geofoni “Geospace” con frequenza propria di 14 Hz per registrazioni V_p e di 10 Hz per registrazioni V_s , posizionati ad una distanza intergeofonica di 2.5/5.0m.

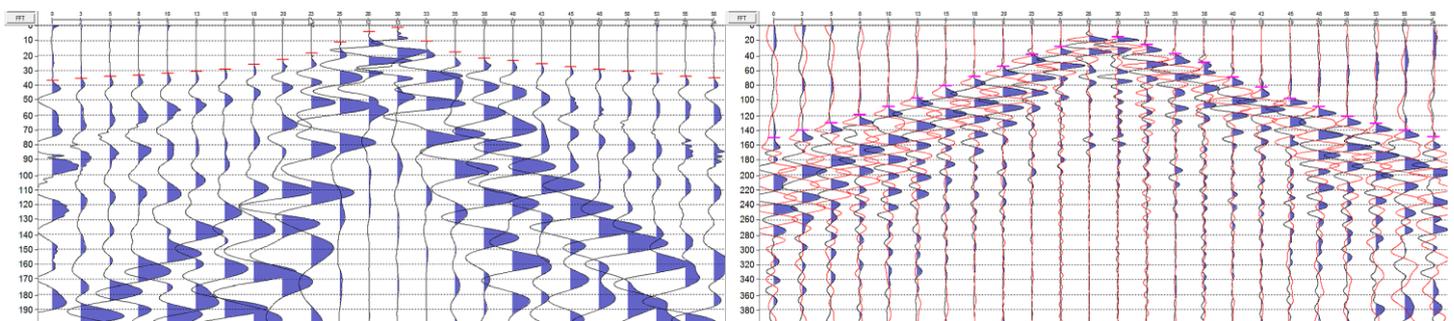
In punti predefiniti del profilo, nello specifico ogni 3 geofoni, sono stati creati artificialmente degli impulsi elastici mediante l'utilizzo di una massa battente da 8.0 Kg; per ogni punto di energizzazione, per migliorare il rapporto segnale-rumore, sono state sommate diverse battute. Il “time-break”, tempo zero di inizio registrazione, è stato fissato attraverso l’apertura di un circuito elettrico posizionato sulla massa battente.

La registrazione dei sismogrammi è stata effettuata mediante 2 sismografi digitali mod. “Geode” della Geometrics a 24 canali



Il tempo di acquisizione è stato di 1 secondo, con un passo di campionamento di 0.125 ms.

Di seguito un esempio di sismogramma con il picking dei primi arrivi delle onde **P** e delle onde **S**.



Esempio registrazione onde P

*Esempio registrazione onde S
(sismogramma con sovrapposizione della battuta SIN e DES)*

4.3 Elaborazione dati

Tramite software dedicato, sono stati letti i tempi di “primo arrivo” degli impulsi sismici ai vari geofoni (raggi diretti e rifratti) e ricostruiti i relativi diagrammi spazio-tempo (Fig. 10).

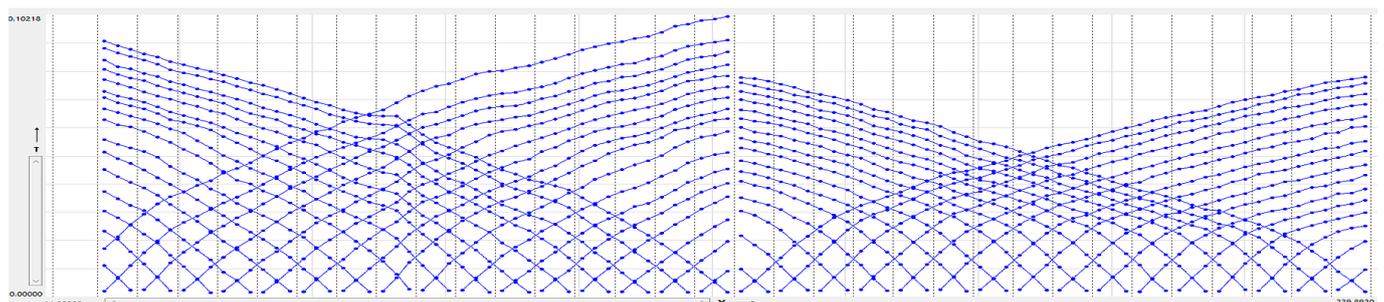
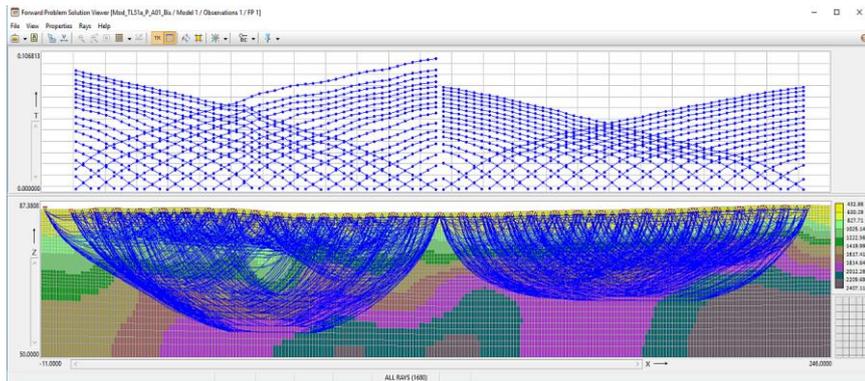


Fig. 10 - Esempio Dromocrone

Le dromocrone sono state interpretate applicando algoritmi di calcolo basati sul metodo “time delay” di Hawkins e sul metodo “delle intercette”. I risultati di tale interpretazione hanno consentito la caratterizzazione in termini di velocità sismica dei materiali costituenti il sottosuolo dell’area indagata e la ricostruzione geometrica delle unità sismiche caratterizzanti il sottosuolo stesso.

Lo schema di velocità ottenuto è quindi stato utilizzato come modello iniziale per l’elaborazione tomografica. Il programma di inversione tomografica utilizzato è “XTomo-LM3” di Xgeo. La tecnica



tomografica analizza e ricostruisce, tramite i tempi di primo arrivo, i percorsi dei raggi sismici grazie ad un algoritmo di “ray-tracing”.

La sezione indagata viene suddivisa in celle di dimensioni regolari in modo che ogni elemento sia attraversato dai molteplici raggi sismici, compresi tra i punti di sparò e i punti di ricezione.

La prima fase di “processing” prevede il calcolo, a partire da un semplice modello

iniziale, di un modello “diretto”, mentre la successiva inversione è basata su un algoritmo di ottimizzazione e regolarizzazione.

La routine di “inversione” bidimensionale attraverso l’assegnazione di una velocità teorica ad ogni singola cella, per iterazioni successive, ne calcola la velocità “reale”. Le iterazioni vengono ripetute fino al raggiungimento del minor scarto possibile tra i valori di velocità teorica e calcolata.

Il risultato finale dell’elaborazione consiste in una sezione di velocità sismica nella quale ad ogni cella è stato assegnato un valore di velocità. Tali valori vengono infine elaborati graficamente tramite apposite “routine” di “gridding” e “countouring”. A differenza delle sezioni elaborate con il metodo delle intercette, queste sezioni non presentano una distinzione in unità sismiche caratterizzate da precisi valori di velocità sismica, ma da una variazione continua della velocità stessa, risultando particolarmente efficace nella individuazione delle variazioni laterali e/o con maggior gradiente di velocità sismica presenti lungo le sezioni.

4.4 Analisi dei risultati

Le sezioni sismiche a rifrazione hanno permesso di ricostruire i rapporti stratigrafici fra le differenti unità sismiche elaborate sulla base delle differenti velocità sismiche. Vengono di seguito esaminati i singoli profili suddivisi per località.

4.4.1 Località Calatabiano – Profili L1e, L2, L1d, L1c, L1b, L3, L1a

Gli stendimenti geofisici (V_p e V_s) si sviluppano sia longitudinalmente al tracciato in progetto (da Sud verso Nord **L1e, L1d, L1c, L1b, L1a**) che trasversalmente direzione W-E (**L2, L3**), come sintetizzato in Fig. 12. I profili sono stati acquisiti con una spaziatura intergeofonica di 2.50m. Nell'allegato PROGR **002** le sezioni sono rappresentate in scala 1:500. Le scale colorimetriche velocità V_p / V_s utilizzate sono mostrate in Fig. 11.



Fig. 11 – Loc. Calatabiano - Scala colorimetrica Velocità V_p e V_s Sezioni Tomografiche Sismiche

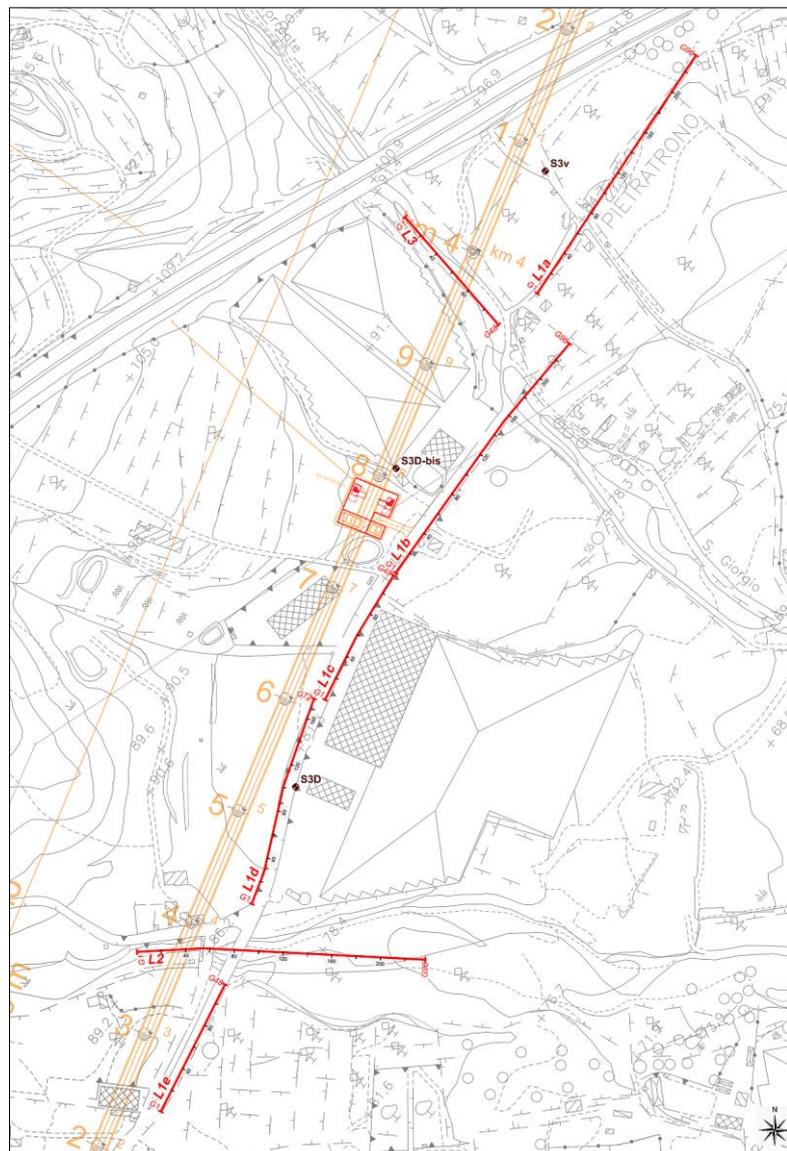
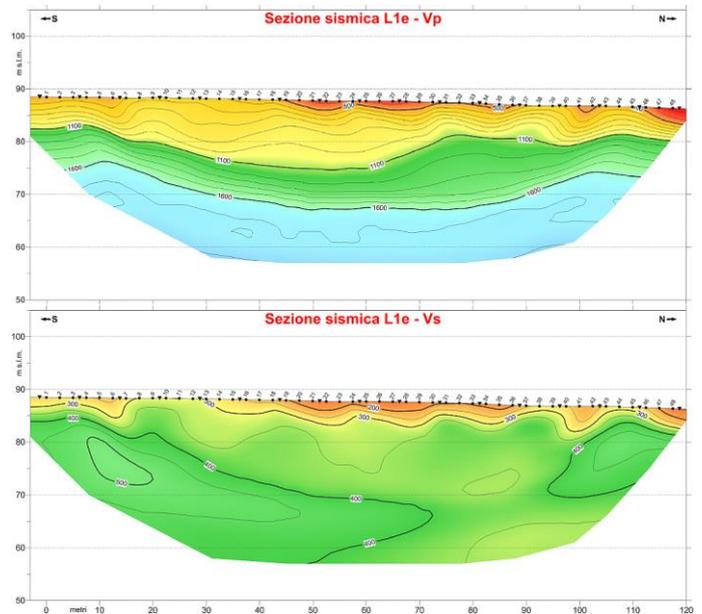


Fig. 12 – Loc. Calatabiano -Planimetria Indagini Sismiche

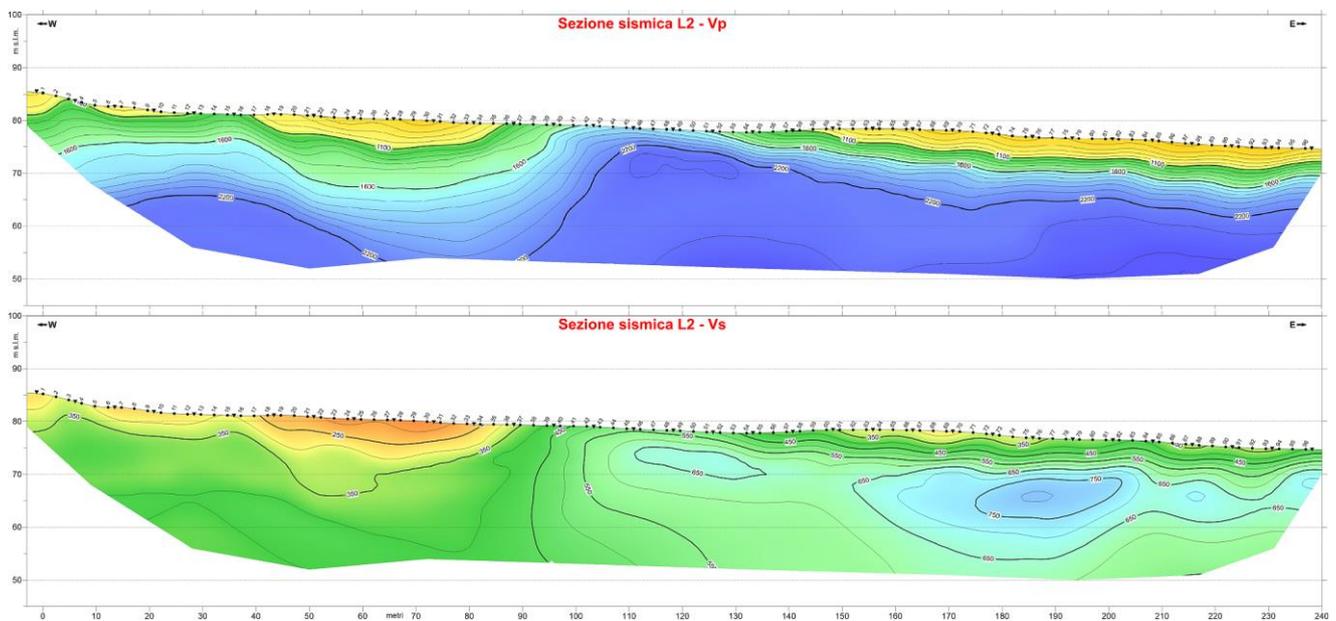
➤ **Profilo L1e (S-N)**

Si evidenziano dei terreni di copertura sabbioso – argillosi con velocità di V_p inferiori a 1400 / 1600 m/s

Il substrato veloce descrive un innalzamento morfologico verso l’inizio profilo (progressive 0-20.00m), ben evidenziato dalle velocità V_s (in subordine dalle V_p)

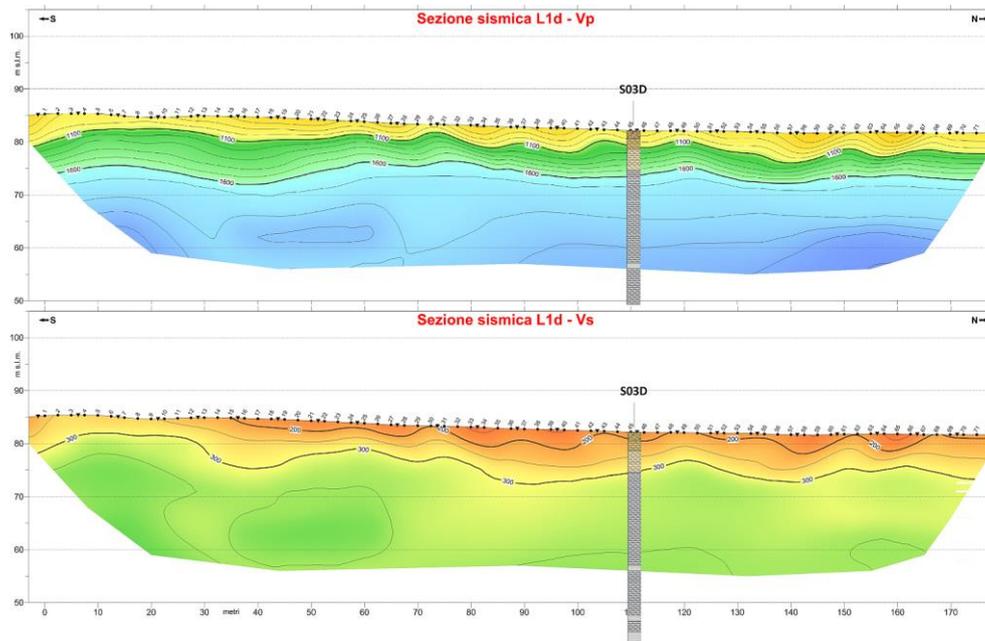


➤ **Profilo L2 (W-E)**



Si manifesta l’andamento del substrato a velocità medio elevate attorno a 2000/2200 m/s definito da una depressione con riempimento di elementi più lenti fra le progressive 50-90.00.

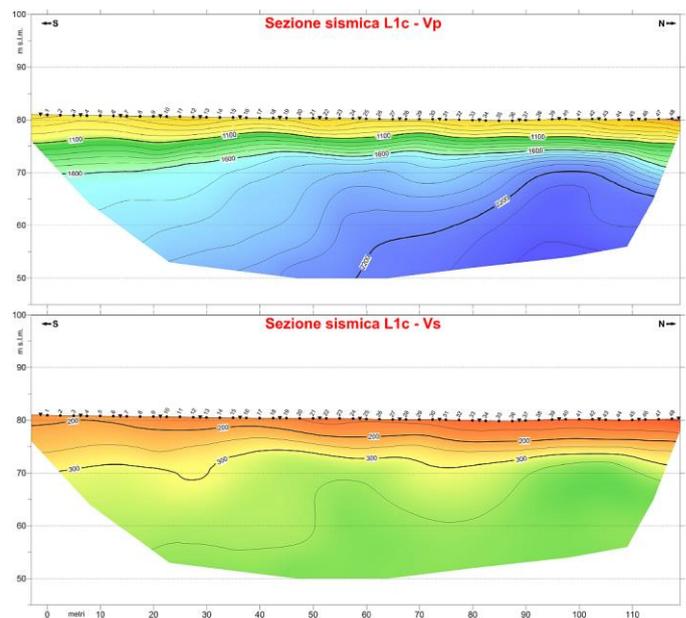
➤ **Profilo L1d (S-N)**



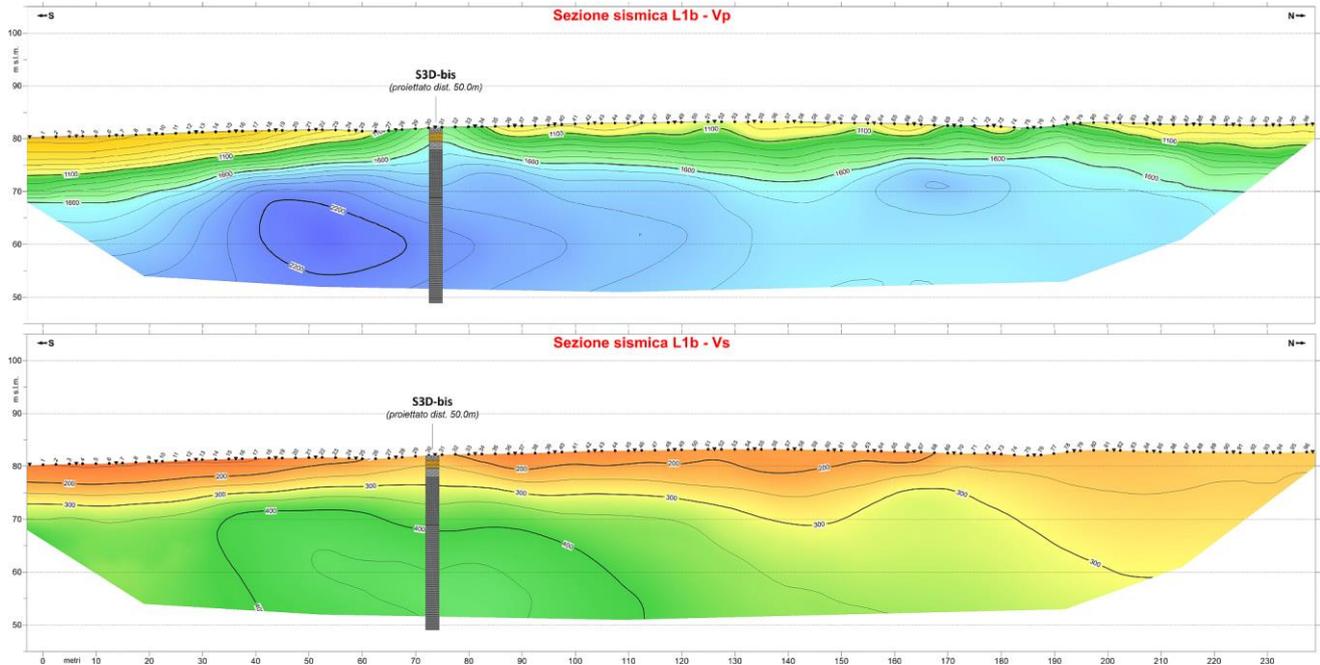
Assai regolare l'andamento dell'unità argillosa di fondo riferibili a valori di V_p superiori a 1500/1600 m/s, localmente si osservano nuclei di addensamento nell'ambito dell'unità stessa

➤ **Profilo L1c (S-N)**

Debole la copertura dei materiali più fini mentre si osserva un incremento di velocità nella porzione settentrionale del profilo (maggiormente evidente con le velocità V_p)



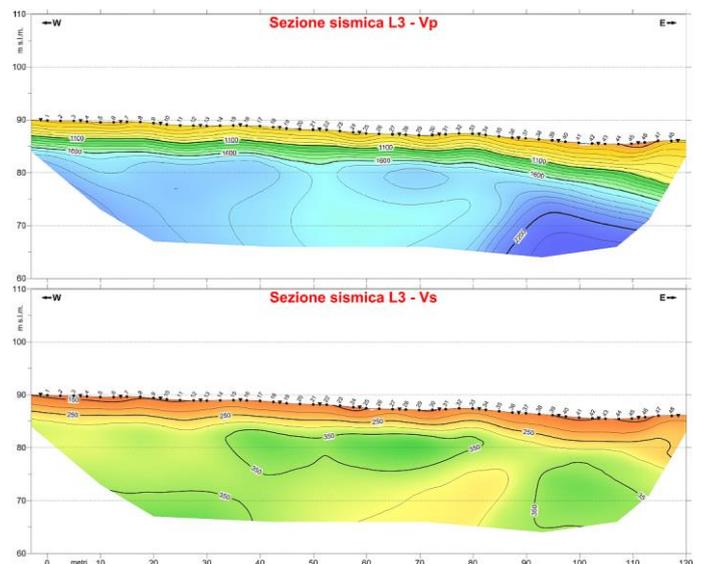
➤ **Profilo L1b (S-N)**



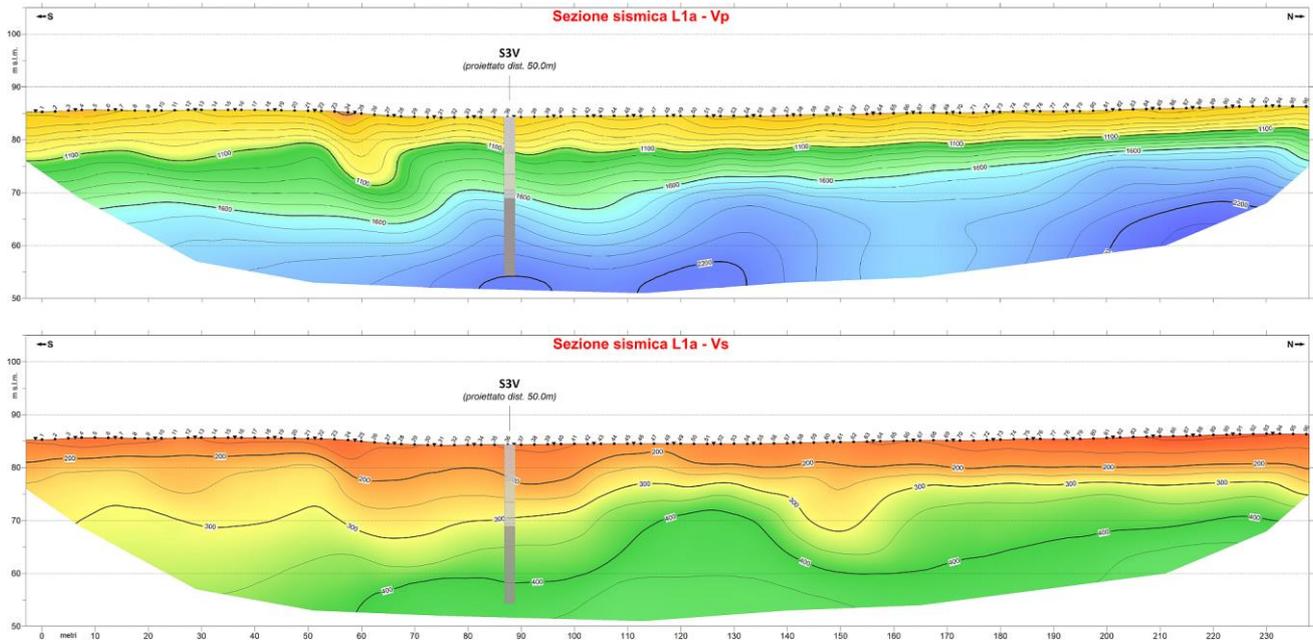
Si evidenzia una debole copertura superficiale sovrastante un'unità di fondo limo-argillosi con velocità V_p superiore a 1600 m/s, nel settore progressive 30-90.00 l'unità di base si addensa con velocità dell'ordine di 2000/2200 m/s.

➤ **Profilo L3 (W-E)**

Il substrato argilloso a velocità superiore a 1600 m/s si posiziona a debole profondità, si osservano localmente nuclei di addensamento, nello specifico nella porzione orientale



➤ **Profilo L1a (S-N)**



La sezione interpretativa descrive un relativo incremento dei materiali di copertura (ghiaie e sabbie) da Nord verso Sud; alla base un'unità argillosa addensata con valori di V_p superiori a 1600 / 1800 m/s, con locali addensamenti in profondità.

4.4.2 Località Alcantara – Profili L4a, L4b

Gli stendimenti geofisici (V_p e V_s) si sviluppano sia longitudinalmente al tracciato in progetto (da Sud verso Nord **L4a**) che trasversalmente direzione W-E (**L4b**), come sintetizzato in Fig. 14. I profili sono stati acquisiti con una spaziatura intergeofonica di 2.50m.

Nell'allegato PROGR **003** le sezioni sono rappresentate in scala 1:500.

Le scale colorimetriche velocità V_p / V_s utilizzate sono mostrate in Fig. 13



Fig. 13 – Loc. Alcantara - Scala colorimetrica Velocità V_p e V_s Sezioni Tomografiche Sismiche

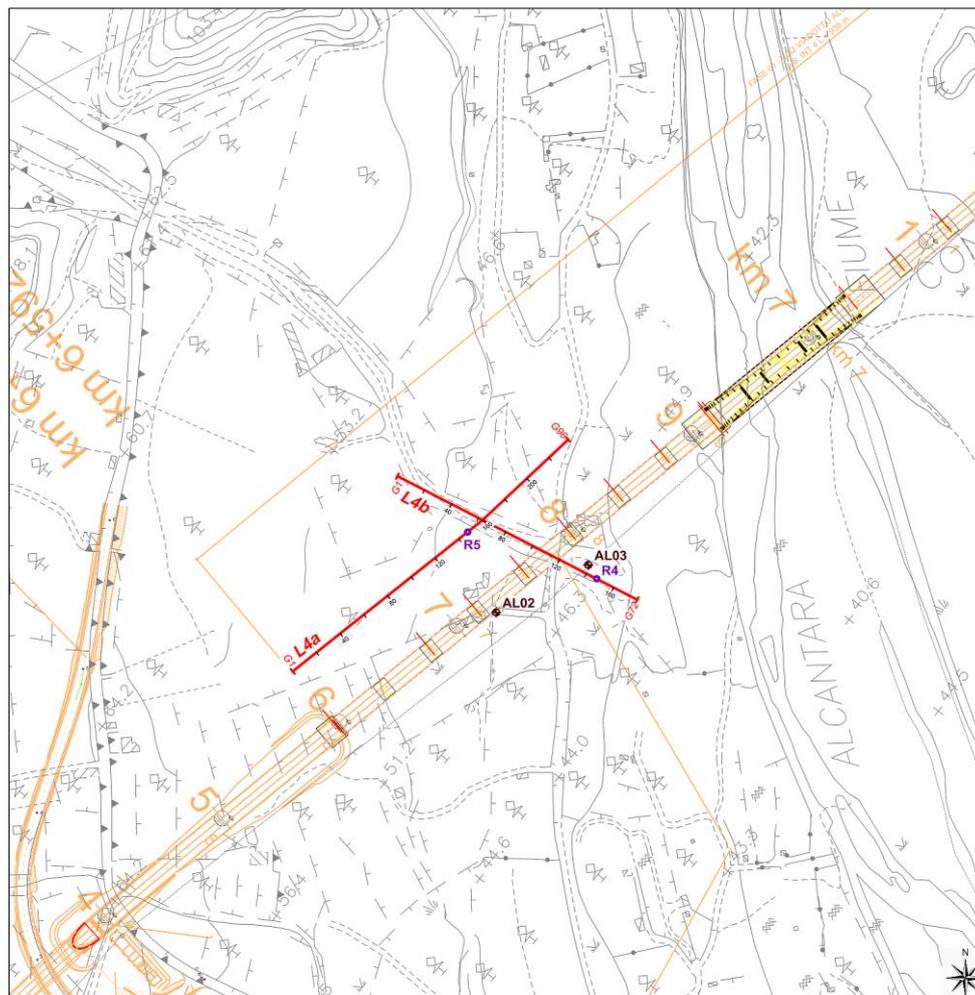
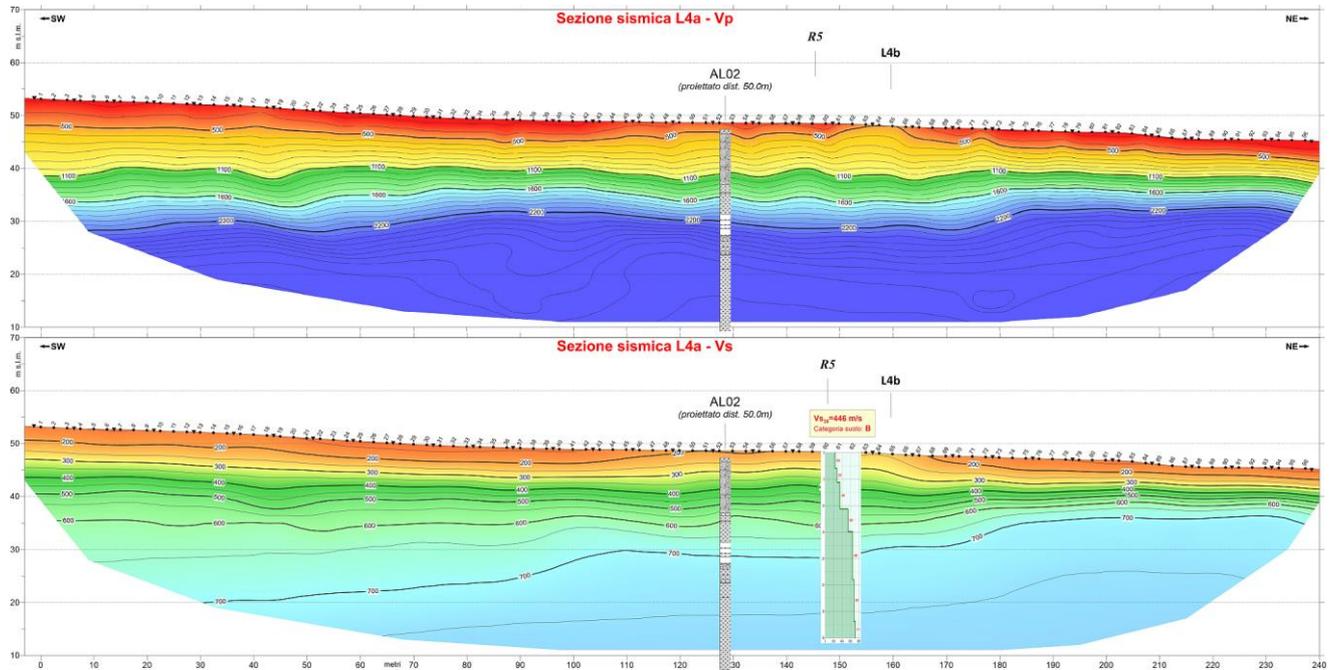


Fig. 14 – Loc. Alcantara -Planimetria Indagini Sismiche

➤ **Profilo L4a (S-N)**

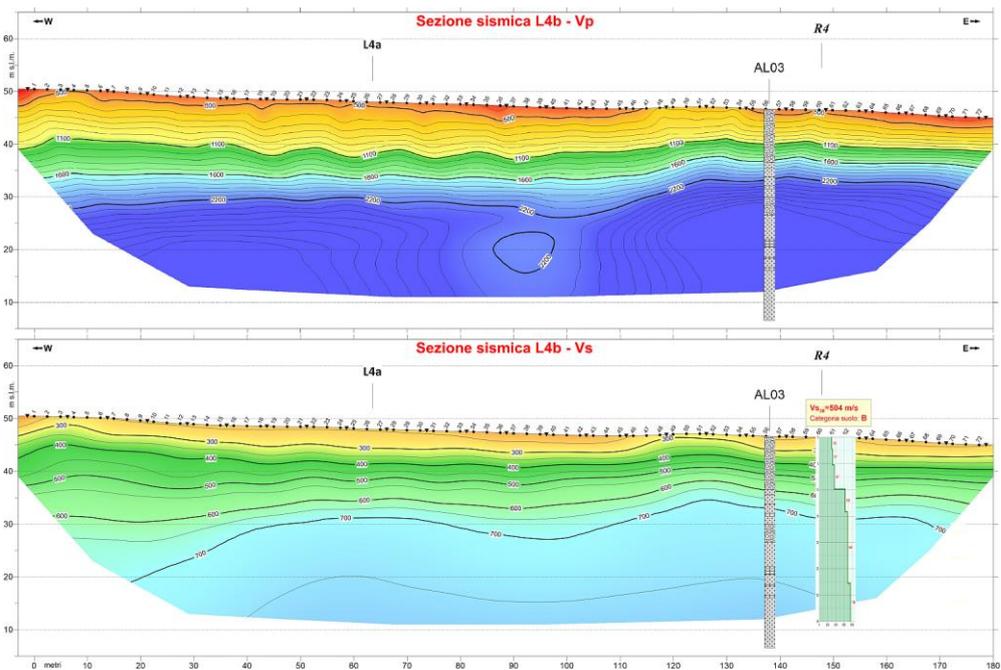


Si descrive un substrato roccioso a media/alta velocità, superiore a 2000/2200 m/s, sottostante una serie di depositi alluvionali ed alla presenza di elementi rocciosi dislocati.

L'integrazione di profili Re.Mi. dell'acquisizione con velocità Vs evidenzia una velocità di riferimento Vs superiore a 650/700 m/s

➤ **Profilo L4a (S-N)**

Il profilo trasversale conferma la serie sopra descritta, con incremento delle velocità in profondità nell'ambito dell'unità roccioso di fondo.



Le velocità Vs delle prove MASW/Re.Mi. definiscono localmente una categoria di suolo **B**.

4.4.3 Località Lacco – Profili L5c, L5a, L5b

Gli stendimenti geofisici (V_p) si sviluppano sia longitudinalmente al tracciato in progetto (da Sud verso Nord L5c, L5b) che trasversalmente direzione W-E (L5a), come sintetizzato in Fig. 16. I profili sono stati acquisiti con una spaziatura intergeofonica di 5.00m con acquisizione velocità V_p .

Nell'allegato PROGR **004** le sezioni sono rappresentate in scala 1:500.

La scala colorimetrica Velocità V_p utilizzata è mostrata in Fig. 15

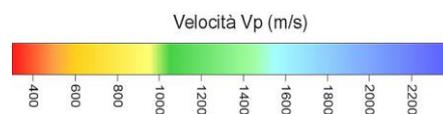


Fig. 15 - Loc. Lacco -Scala colorimetrica Velocità V_p Sezioni Tomografiche Sismiche

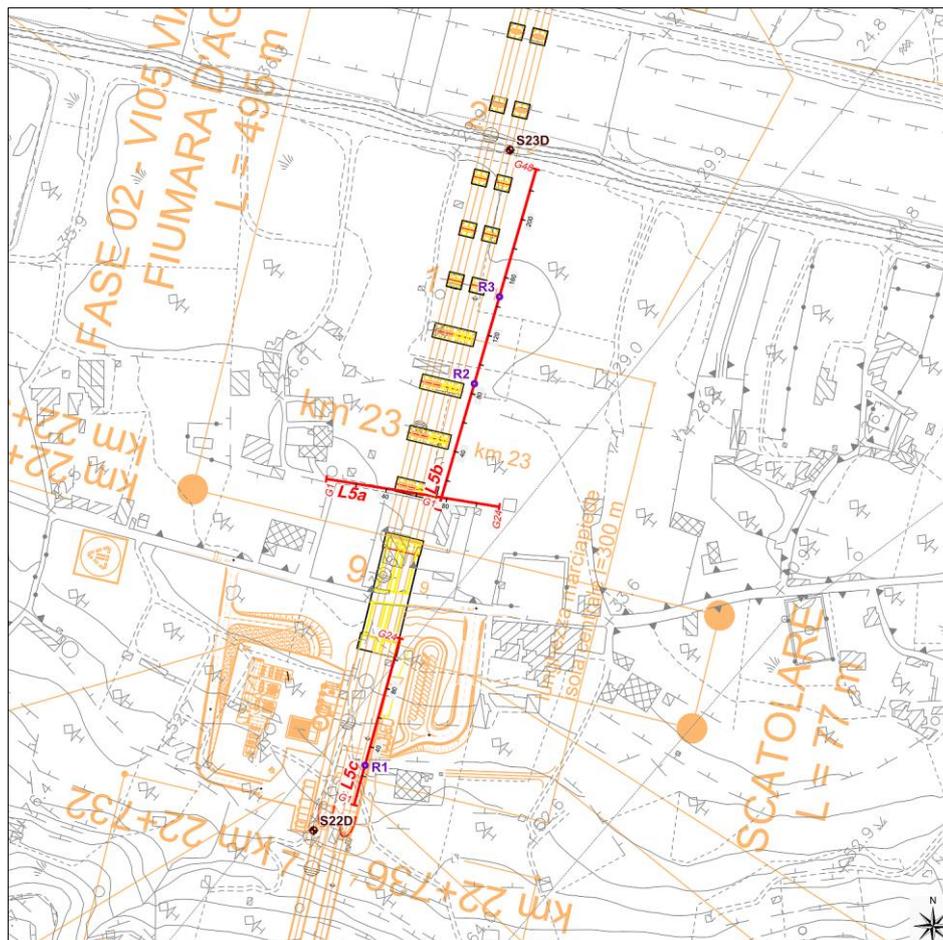
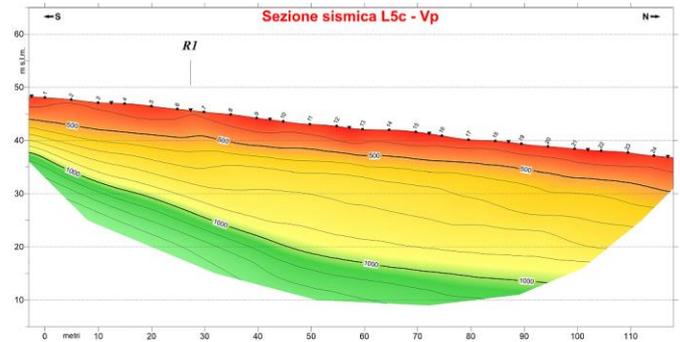


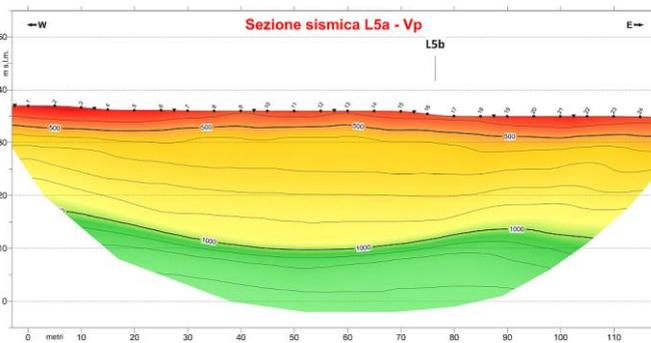
Fig. 16 - Loc. Lacco -Planimetria Indagini Sismiche

➤ **Profilo L5c (S-N)**

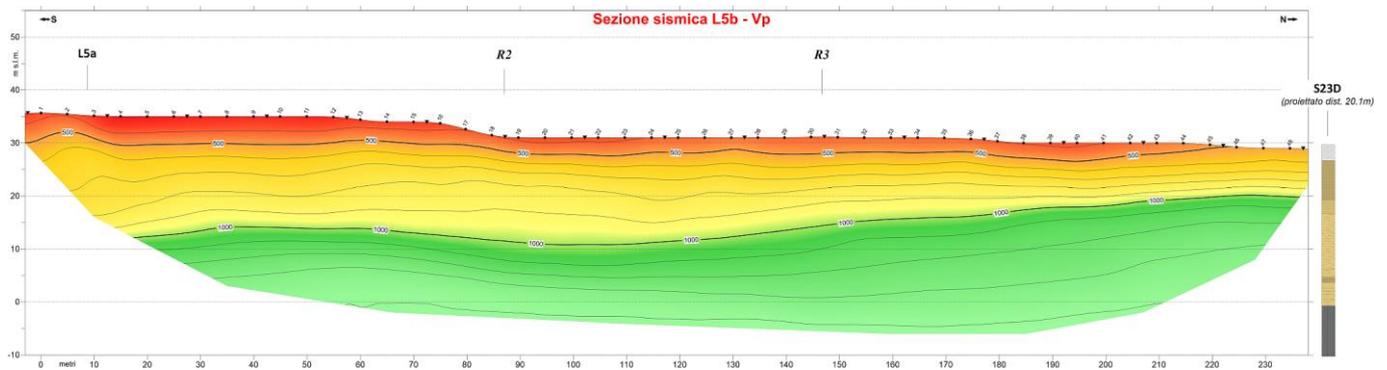
Il profilo **L5C** e **L5B** sono acquisiti lungo il versante sul proposto roccioso (nell'allegato vengono posizionati secondo il profilo altimetrico



➤ **Profilo L5a (W-E)**



➤ **Profilo L5b (S-N)**



I depositi superficiali sabbiosi (a volte ghiaiosi) sono definiti da velocità V_p inferiori ad 800 / 1000 m/s, seguono elementi limo-argillosi con velocità che si incrementano sino a 1500 / 1600 m/s, che presentano spessori dell'ordine di 25/30 metri nella porzione centrale tra i profili **L5C** e **L5d** ed incrocio con **L5a**.

Le verifiche MASW evidenziano l'approssimarsi del substrato roccioso (**R1**) – suolo **B** ed un incremento locale dei depositi di copertura (**R2-R3**) – suolo **C**.