

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



U.O. GEOLOGIA TECNICA, DELL'AMBIENTE E DEL TERRITORIO

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA

**POTENZIAMENTO ED ELETTRIFICAZIONE DELLA LINEA BARLETTA –
CANOSA DI PUGLIA**

RELAZIONE

REPORT INDAGINI GEOFISICHE INTEGRATIVE

SCALA:

-

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

I A 6 C 0 0 F 6 9 I G G E 0 0 0 1 0 0 1 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	D. Roverselli <i>D. Roverselli</i>	Novembre 2020	F. Paolucci <i>Dott. Francesco Paolucci</i>	Novembre 2020	T. Paoletti	Novembre 2020	M. Comedini Novembre 2020



File: IA6C00F69IGGE0001001A

n. Elab.:

INDICE

1	PREMESSA GENERALE	4
2	INQUADRAMENTO TERRITORIALE.....	5
2.1	REPORT FOTOGRAFICO ATTIVITÀ SVOLTE.....	9
3	RILIEVI TOMOGRAFICI ELETTRICI.....	11
3.1	ANALISI DEI DATI.....	13
3.1.1	<i>EL1 – Loc. Canne della Battaglia (progr. tracciato km 10+623).....</i>	<i>13</i>
3.1.2	<i>EL2 – Loc. Canosa di Puglia (progr. tracciato da km 23+887 a km 24+100).....</i>	<i>14</i>
4	PROSPEZIONI SISMICHE A RIFRAZIONE	16
4.1	ANALISI DEI RISULTATI	18
4.1.1	<i>Sezione sismica S1 – Loc. Canne della Battaglia (progr. tracciato km 10+624)</i>	<i>18</i>
4.1.2	<i>Sezione sismica S2 – Loc. Canne della Battaglia (progr. tracciato da km 10+850 a km 10+516).....</i>	<i>20</i>
4.1.3	<i>Sezione sismica S3 – Loc. Canne della Battaglia (progr. tracciato km 10+797)</i>	<i>21</i>
4.1.4	<i>Sezione sismica S4 – Loc. Canne della Battaglia (progr. tracciato km 10+737)</i>	<i>22</i>
4.1.5	<i>Sezione sismica S5-6 – Loc. Canosa di Puglia (progr. tracciato da km 23+600 a 24+078).....</i>	<i>23</i>
4.1.6	<i>Sezione sismica S7 – Loc. Canosa di Puglia (progr. tracciato km 22+907).....</i>	<i>24</i>
5	INDAGINI SISMICHE M.A.S.W. 2D/ RE.MI.....	26
5.1	MODALITÀ ESECUTIVE DELL'INDAGINE	27
5.2	ANALISI DEI DATI.....	29
5.2.1	<i>Sezione sismica M2D_1 – Loc. Canne della Battaglia (progr. tracciato km 10+624).....</i>	<i>29</i>
5.2.2	<i>Sezione sismica M2D_2 – Loc. Canne della Battaglia (progr. tracciato da km 10+850 a km 10+516).....</i>	<i>30</i>
5.2.3	<i>Sezione sismica M2D_3 – Loc. Canne della Battaglia (progr. tracciato km 10+797).....</i>	<i>31</i>
5.2.4	<i>Sezione sismica M2D_4 – Loc. Canne della Battaglia (progr. tracciato km 10+737).....</i>	<i>33</i>
5.2.5	<i>Sezione sismica M2D_5-6 – Loc. Canosa di Puglia (progr. tracciato da km 23+600 a 24+078).....</i>	<i>35</i>
5.2.6	<i>Sezione sismica M2D_7 – Loc. Canosa di Puglia (progr. tracciato km 22+907)</i>	<i>36</i>
	APPENDICE 1 NOTE TECNICHE – RILIEVO TOMOGRAFICO ELETTRICO	37

REPORT INDAGINI GEOFISICHE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IA6C	00	F 69 IG	GE 00 01 001	A	3 di 51

APPENDICE 2 NOTE TECNICHE – RILIEVO SISMICO A RIFRAZIONE	42
APPENDICE 3 NOTE TECNICHE – RILIEVO SISMICO M.A.S.W. 2D/ RE.MI.	47
6 BIBLIOGRAFIA.....	51

1 PREMESSA GENERALE

Il report sintetizza i risultati delle prospezioni geofisiche integrative eseguite a supporto del PFTE Elettificazione Barletta – Canosa e Opera anticipata Fermata Ospedale.

Nel dettaglio le indagini geofisiche sono state eseguite in n. 3 settori della linea ferroviaria Barletta – Canosa di Puglia, in posizione sia trasversale che longitudinale ad essa a seconda delle condizioni logistiche dei luoghi.

In Fig. 1 si riportano i settori coperti dalle indagini geofisiche rispetto l’andamento del tracciato della linea ferroviaria Barletta – Canosa di Puglia.



Fig. 1 – Ubicazione indagini. Settori coperti dalle indagini geofisiche (cerchi gialli) rispetto al tracciato della linea ferroviaria Barletta – Canosa di Puglia (linea blu).

In coda al rapporto sono inserite le seguenti appendici:

- **APPENDICE 1** – “Note tecniche – Rilievo tomografico elettrico”;
- **APPENDICE 2** – “Note tecniche – Rilievo sismico a rifrazione”;
- **APPENDICE 3** – “Note tecniche – Rilievo sismico M.A.S.W. 2D/Re.Mi.”.

Costituiscono parte integrante del presente rapporto i seguenti elaborati:

- **PROGR. 001** – “Report indagini geofisiche”;
- **PROGR. 002** – “Planimetria indagini eseguite – Loc. Canne della Battaglia e Canosa di Puglia” – Scala 1:1.500;
- **PROGR. 003** – “Sezioni tomografiche sismiche a rifrazione, M.A.S.W. 2D/Re.Mi. e geoelettriche – Loc. Canne della Battaglia” – Scala 1:500;
- **PROGR. 004** – “Sezioni tomografiche sismiche a rifrazione, M.A.S.W. 2D/Re.Mi. e geoelettriche – Loc. Canosa di Puglia” – Scala 1:500.

2 INQUADRAMENTO TERRITORIALE

Le ubicazioni dei profili sono inserite nell'elaborato grafico **PROGR. 002** – “Planimetria indagini eseguite - ...” a scala 1:1.500 su base cartografica CTR e negli estratti da Fig. 2 a Fig. 5.

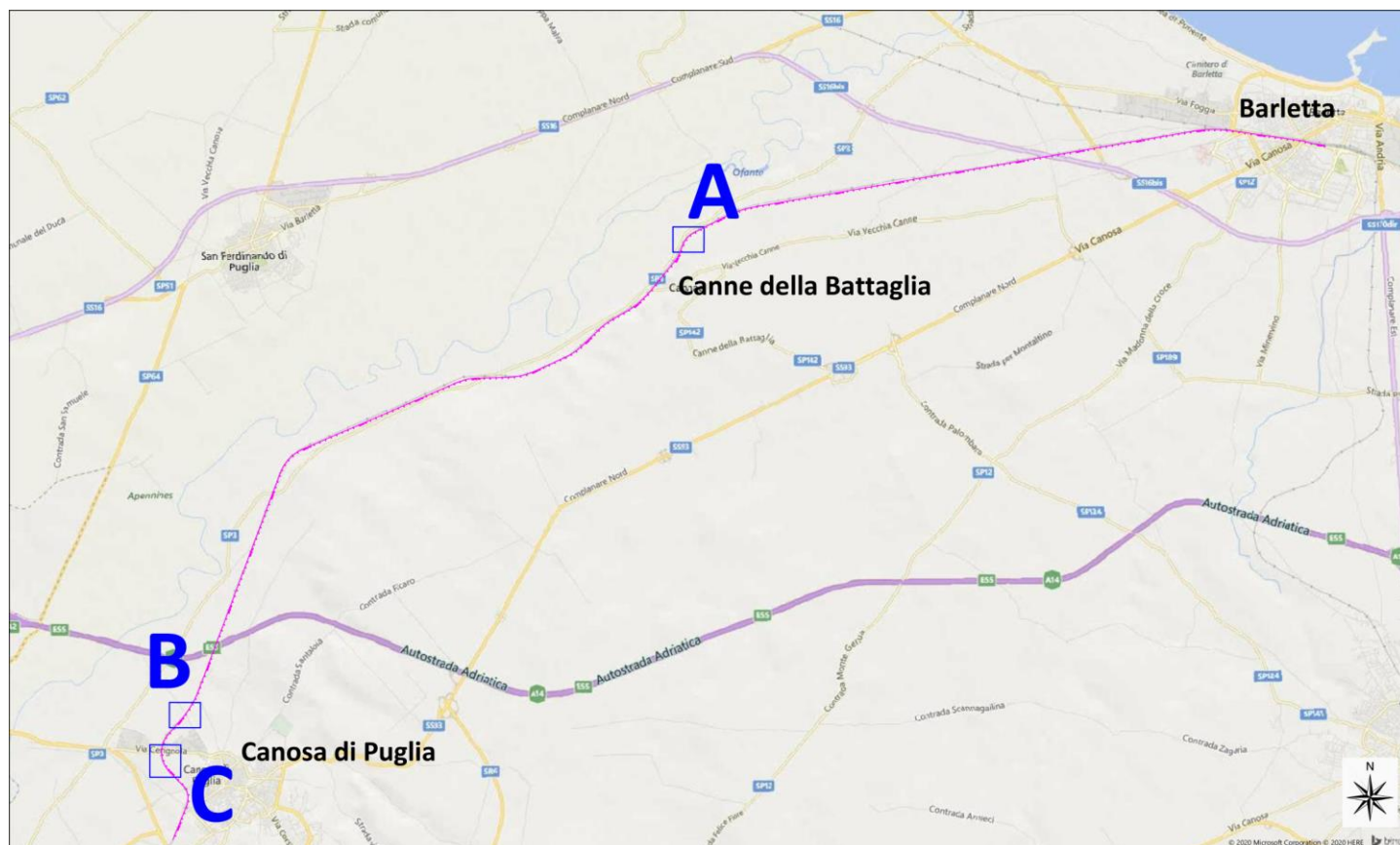


Fig. 2 – Quadro di unione dei settori indagati (da A a C) rispetto al tracciato ferroviario Barletta – Canosa di Puglia.

- Settore **A**: dalla pk km 10+516 alla pk km 10+850 – Loc. Canne della Battaglia;
- Settore **B**: pk km 22+907 – Loc. Canosa di Puglia;
- Settore **C**: dalla pk km 23+600 alla pk km 24+100 – Loc. Canosa di Puglia.

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

- **N. 2 Rilievi Tomografici Elettrici in acquisizione 2D**, denominati **EL1** e **EL2**; i profili sono stati costituiti da n. 72 elettrodi con passo regolare ogni 3.0 m, pari a uno sviluppo lineare di 213.0 m ciascuno; i profili sono ubicati nell'elaborato PROGR. 002 a scala 1:1.500 e negli estratti delle Fig. 3 e Fig. 5;
- **N. 6 prospezioni sismiche a rifrazione con registrazione in onde P** per l'elaborazione di profili interpretativi in termini di velocità sismiche, denominati **S1, S2, S3, S4, S5-6 e S7**; gli stendimenti sono stati costituiti da un numero variabile di geofoni posizionati ad intervalli regolari di 2.0 m. Nel dettaglio:
 - Profilo S1: sviluppo lineare di 178.0 m e n. 90 geofoni complessivi;
 - Profilo S2: sviluppo lineare di 334.0 m e n. 168 geofoni complessivi;
 - Profilo S3: sviluppo lineare di 166.0 m e n. 84 geofoni complessivi;
 - Profilo S4: sviluppo lineare di 142.0 m e n. 72 geofoni complessivi;
 - Profilo S5-6: sviluppo lineare di 478.0 m e n. 240 geofoni complessivi;
 - Profilo S7: sviluppo lineare di 382.0 m e n.192 geofoni complessivi.

L'ubicazione degli stendimenti è visibile nell' elaborato PROGR. 002 a scala 1:1.500 e negli estratti da Fig. 3 a Fig. 5.

- N. 6 stendimenti sismici con acquisizione prove di tipo M.A.S.W. 2D/Re.Mi., denominate con sigla **M2D_1**, **M2D_2**, **M2D_3**, **M2D_4**, **M2D_5-6** e **M2D_7**, registrate lungo i medesimi profili delle prove sismiche a rifrazione mediante l'utilizzo di un "land streamer" con 24 geofoni intervallati a 2 m, spostando la catena di registrazione di 4.0 metri ad ogni energizzazione e calcolando il profilo Vs per ognuna delle acquisizioni. Le singole indagini sismiche M.A.S.W., sono state infine utilizzate per la ricostruzione di una sezione 2D in termini di velocità delle onde S. Abbinare alle singole acquisizioni M.A.S.W. sono state registrate prove sismiche passive di tipo Re.Mi. finalizzate a verificare l'andamento delle velocità delle onde S anche a profondità maggiori di quelle indagabili con il solo metodo M.A.S.W..

Gli intervalli dei profili, corrispondenti alle sezioni 2d ottenute, sono situate nell' elaborato PROGR. 002 a scala 1:1.500 e negli estratti da Fig. 3 a Fig. 5.

L'adeguata localizzazione plano-altimetrica delle indagini è stata realizzata tramite un dettagliato rilievo topografico con strumentazione GPS "Trimble R2" dotata di "GNSS Receiver" e di "TSC3 Controller".

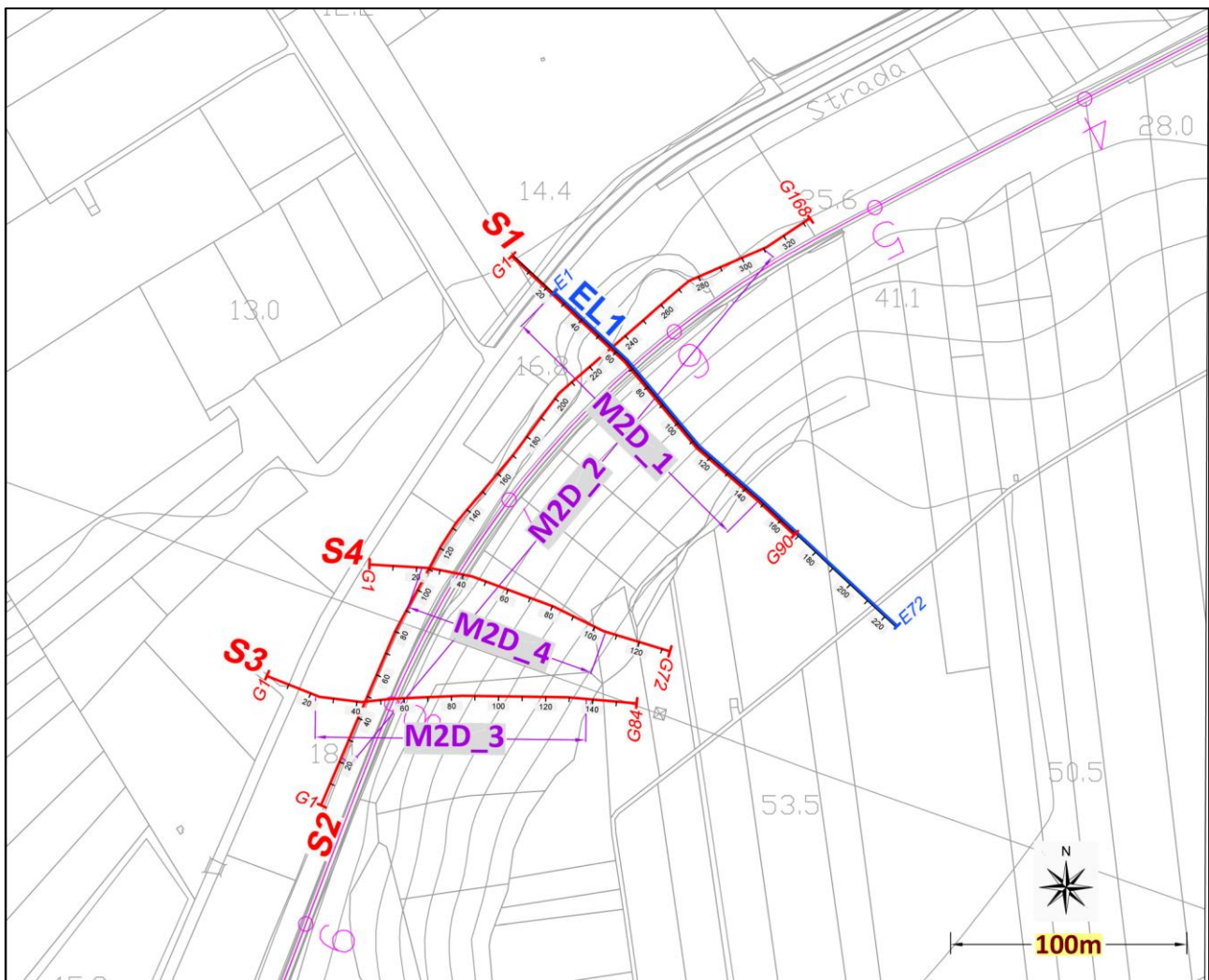


Fig. 3 – Estratto ubicazione indagini geofisiche – Settore A: Località Canne della Battaglia (da km 10+516 a km 10+850).

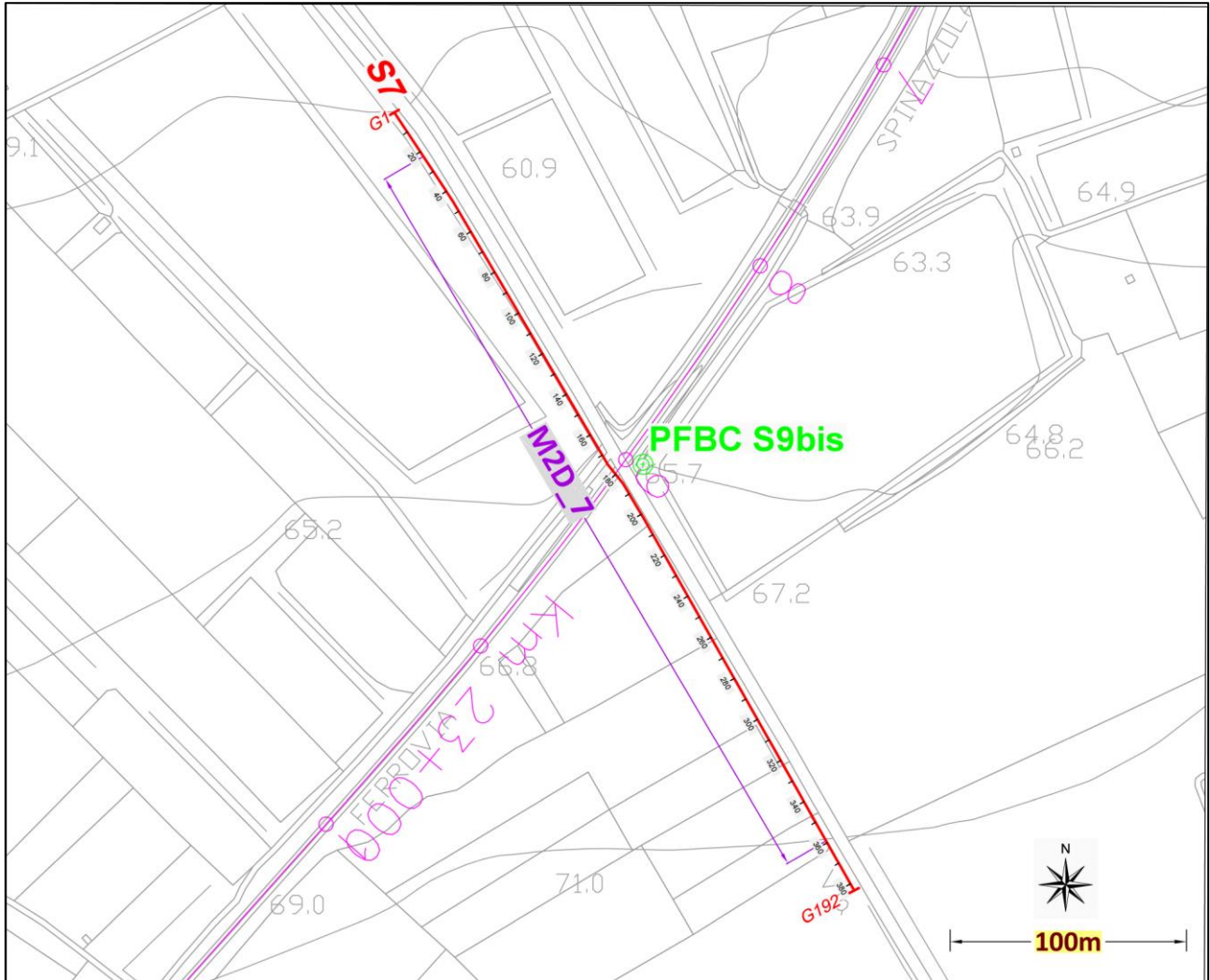


Fig. 4 - Estratto ubicazione indagini geofisiche – Settore B: Località Canosa di Puglia (km 22+907). In verde il sondaggio a carotaggio continuo (PFBC S9bis).

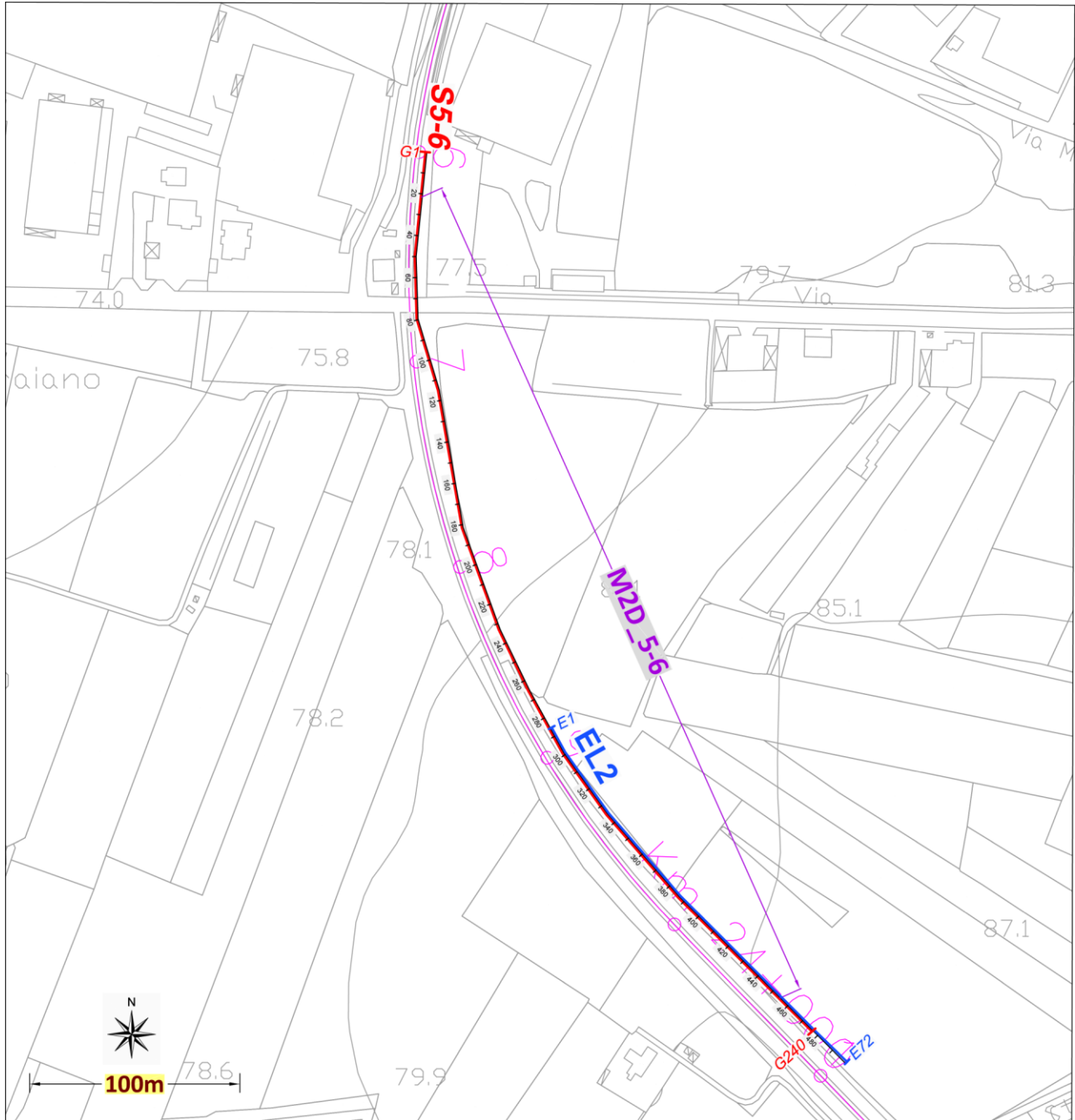


Fig. 5 - Estratto ubicazione indagini geofisiche – Settore C: Località Canosa di Puglia (da km 23+600 a 24+100).

Di seguito vengono descritte le singole attività svolte con le relative interpretazioni dei dati geofisici acquisiti e specifica documentazione fotografica.

2.1 Report fotografico attività svolte

INDAGINE TOMOGRAFICA ELETTRICA – *Stendimenti elettrodi (a sinistra) e fase di registrazione (a destra).*



INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE – *Stendimento geofonico (a sinistra) ed energizzazione (a destra).*



INDAGINE SISMICA M.A.S.W. 2D/Re.Mi. – *Predisposizione layout sismico (a sinistra) ed energizzazione (a destra).*



RILIEVO TOPOGRAFICO – *Fase del rilievo (a sinistra) e particolare della strumentazione a destra).*



3 RILIEVI TOMOGRAFICI ELETTRICI

I profili tomografici elettrici, denominati **EL1** e **EL2**, sono stati acquisiti mediante il posizionamento di n. 72 elettrodi con spaziatura di 3.0 m pari ad uno sviluppo lineare di 213.0 m ciascuno; le ubicazioni planimetriche sono riportate nell'elaborato grafico **PROGR. 002** a scala 1:1.500.

Le Fig. 6 e Fig. 7 visualizzano le ubicazioni planimetriche dei profili tomografici elettrici su foto aerea.

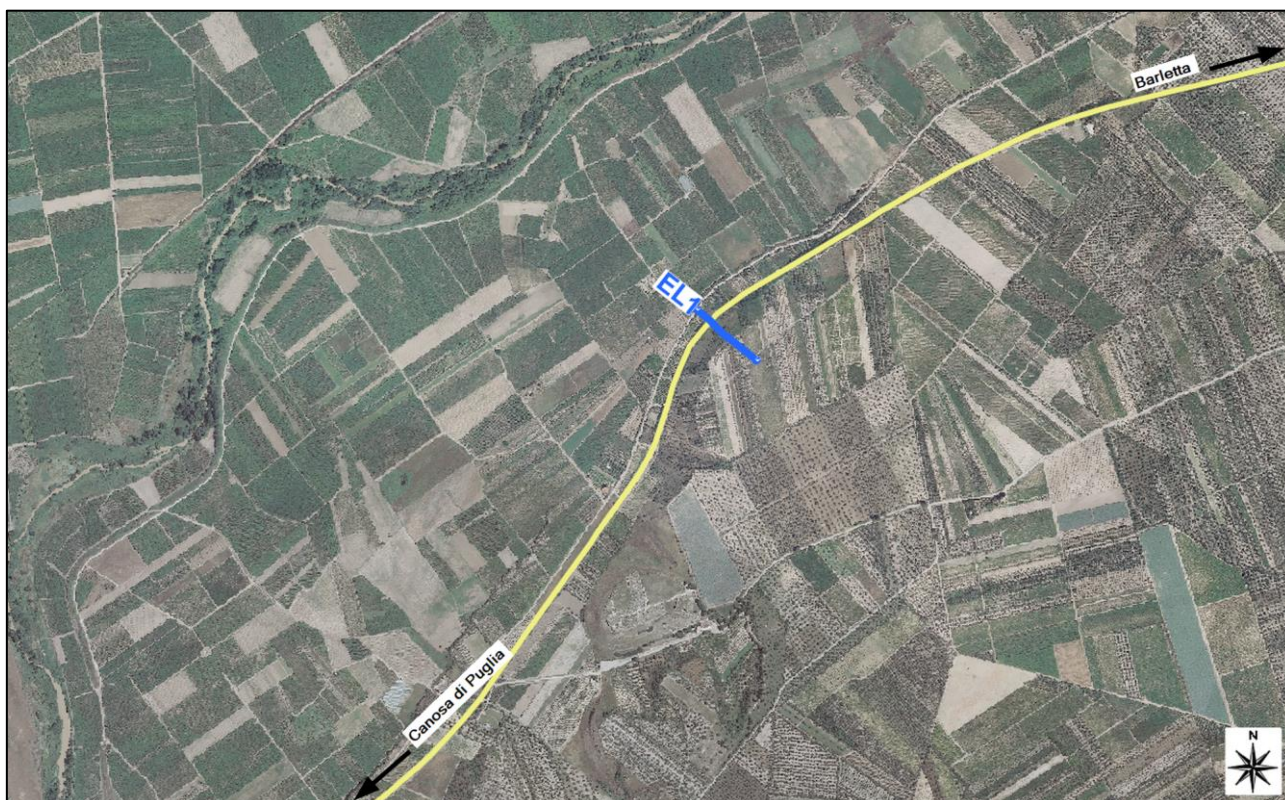


Fig. 6 - Ubicazione del profilo tomografico elettrico rispetto l'andamento della linea ferroviaria Barletta – Canosa (in giallo) – Zona Canne della Battaglia.



Fig. 7 - Ubicazione del profilo tomografico elettrico rispetto l'andamento della linea ferroviaria Barletta – Canosa (in giallo) – Zona Canosa di Puglia.

In Tabella 1 si riassumono le caratteristiche del layout di acquisizione dei profili tomografici elettrici 2D e la loro ubicazione rispetto le progressive chilometriche della linea ferroviaria Barletta - Canosa.

Codifica	Località	Progressive tracciato (km)	Numero elettrodi	Spaziatura interelettrodica (m)	Estensione lineare (m)
EL1	Loc. Canne della Battaglia	km 10 + 623	72	3	213
EL2	Loc. Canosa di Puglia	da km 23 + 887 a km 24+ 100	72	3	213
			Totale (m)		426

Tabella 1 – Sintesi delle caratteristiche dei layout di acquisizione dei profili tomografici elettrici 2D e ubicazione rispetto le progressive del tracciato ferroviario.

La configurazione elettrodica utilizzata per i rilievi tomografici elettrici è stata la Schlumberger.

Per l'acquisizione dei dati è stato usato un georesistivimetro del tipo AMBROGEO MANGUSTA SYSTEM MC 96/E.

La successiva elaborazione dei dati è avvenuta attraverso l'utilizzo dei software RES2DINV 4.9, RES2DMOD e GOLDEN SOFTWARE – SURFER.

3.1 Analisi dei dati

Le procedure di lavoro descritte hanno consentito di acquisire dati di un elevato livello qualitativo e pertanto il successivo processo d'inversione per l'elaborazione delle sezioni finali, ha raggiunto livelli minimi di scostamento tra dati acquisiti e modello teorico.

Le sezioni allegate nelle PROGR. **003** e **004** a scala 1:500 e negli estratti in formato ridotto di Fig. 10 e Fig. 12, mostrano tramite le diverse gradazioni di colore la distribuzione dei valori di resistività elettrica e definiscono il miglior modello bidimensionale calcolato, consentendo di evidenziare la presenza di differenti unità geofisiche ed i reciproci rapporti stratigrafici.

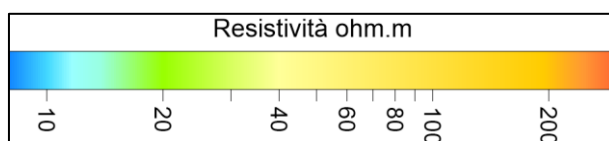


Fig. 8 – Scala colorimetrica dei valori di resistività elettrica.

In base ai valori di resistività registrati, con riferimento ai litotipi geologici presenti nella zona, è possibile differenziare tre principali unità elettrostratigrafiche:

- Unità **altamente resistive** ($\rho > 200$ ohm.m - colore rosso), riferibili a materiali grossolani prevalenti tipo ghiaie, ciottoli e locali blocchi litoidi;
- Unità da **mediamente resistive a resistive** ($40 < \rho < 200$ ohm.m - colore giallo/arancione) rappresentative di materiali a granulometria medio-grossolana prevalente, rientranti nel campo dei limi e delle sabbie-ghiaiose;
- Unità da **basso resistive a conduttive** ($\rho < 40$ ohm.m - colore verde/azzurro/blu), riferibili a materiali prevalentemente medio-fini tipo limosi e argillosi.

Le progressive metriche dei profili e delle sezioni prodotte, sono riferite a quelle degli attigui profili sismici a rifrazione.

3.1.1 EL1 – Loc. Canne della Battaglia (progr. tracciato km 10+623)



Fig. 9 – Estratto dell'ubicazione su foto aerea del profilo tomografico elettrico EL1.

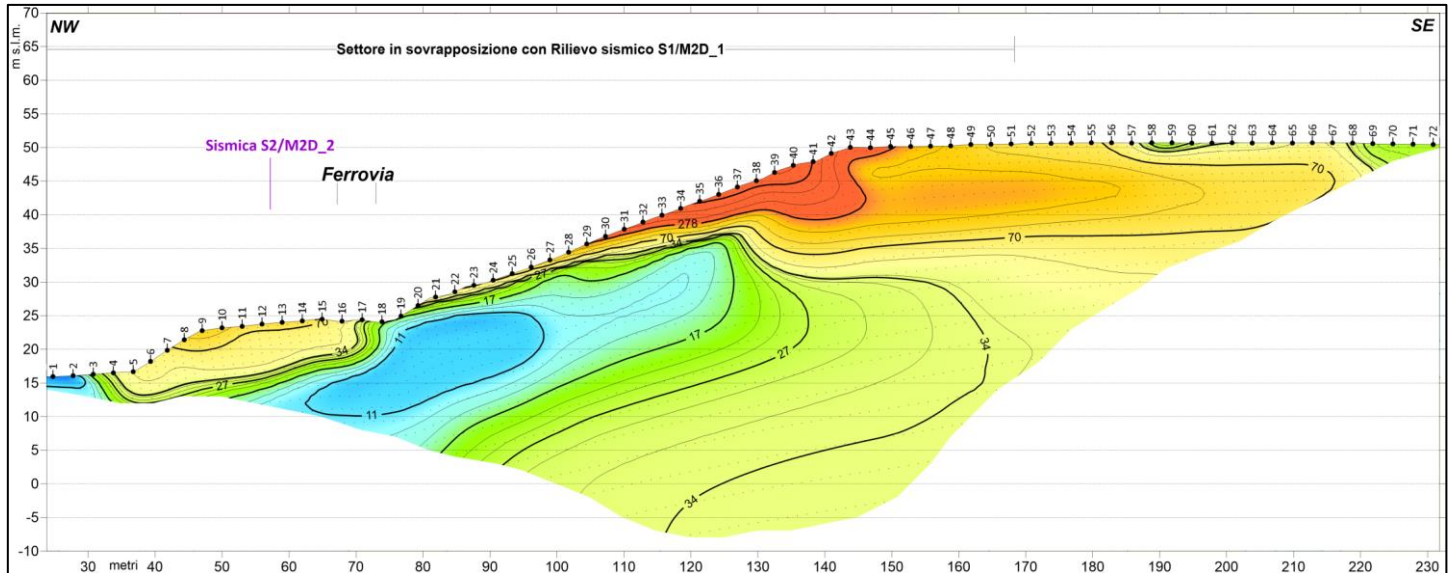


Fig. 10 – Sezione tomografica elettrica EL1.

L'elaborazione tomografica dei dati di resistività acquisiti evidenzia una serie elettrostratigrafica piuttosto discontinua ed eterogenea lungo tutto il settore indagato.

Dall'inizio del tratto indagato sino alla progr. 160.0 m, i valori di resistività elettrica si mantengono complessivamente inferiori a 40 ohm.m fino a 10 ohm.m (colore verde – azzurro) rappresentativi di materiali con litologie medio - fini prevalenti (argille, limi-sabbiosi). Solamente la porzione superficiale compresa tra le progr. 35.0 e 70.0 m (primi 7.0 – 8.0 m) è caratterizzata da un lieve incremento dei valori che raggiungono i 70 ohm.m, riferibili ad un locale incremento della granulometria dei materiali (sabbie prevalenti).

Dopo la progr. 160.0 m e i primi 10.0/15.0 m di spessore dopo la progr. 125.0 m, sono caratterizzati da un passaggio a valori complessivamente superiori a 50 ohm.m (colore giallo – arancione) fino localmente superare i 250 ohm.m (colore rosso), associabili a materiali a granulometria da intermedia (sabbie -limose) a grossolana (ciottoli e locali blocchi litoidi).

3.1.2 EL2 – Loc. Canosa di Puglia (progr. tracciato da km 23+887 a km 24+100)



Fig. 11 – Estratto dell'ubicazione su foto aerea del profilo tomografico elettrico EL2.

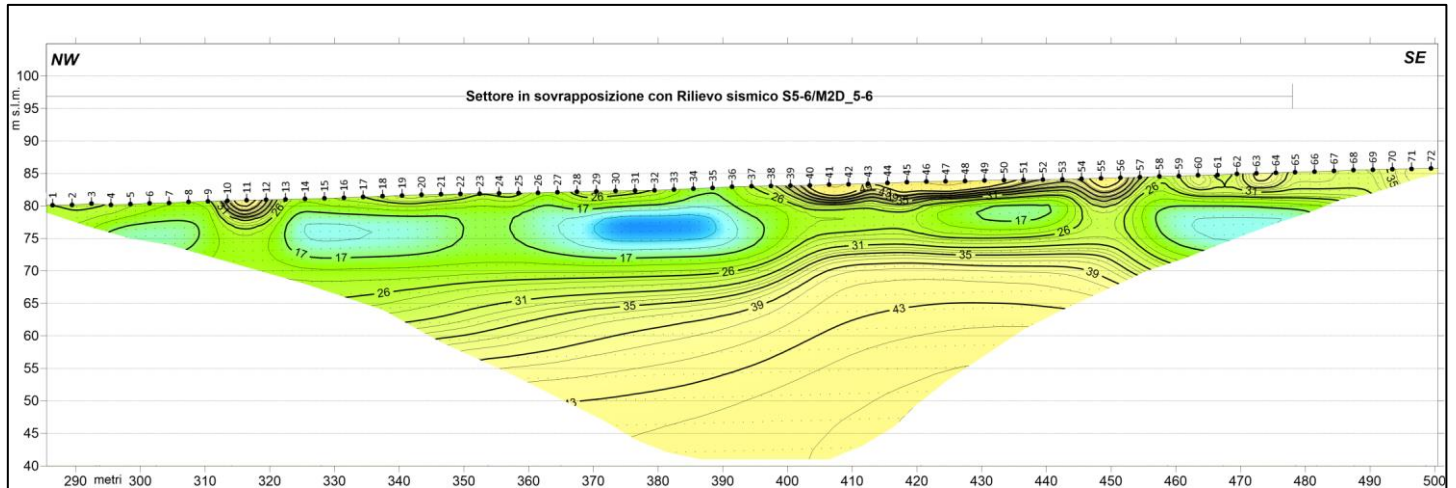


Fig. 12 – Sezione tomografica elettrica EL2.

L’elaborazione tomografica dei dati di resistività acquisiti evidenzia una serie elettrostratigrafica estesa in modo continuo e regolare lungo tutto il settore indagato. I valori di resistività elettrica si mantengono costantemente inferiori a 70 ohm.m per spessori dell’ordine di almeno 40.0m.

Nel dettaglio si differenziano almeno due unità geofisiche:

- **Unità superficiale basso resistiva/conduittiva:** caratterizzata da valori di resistività elettrica inferiori a 35 ohm.m (colore verde) fino localmente a valori minimi prossimi a 10.0/15.0 ohm.m (colore azzurro/blu), riferibili a materiali medio-fini prevalenti (argille – limi sabbiosi). L’unità presenta uno spessore medio di 15.0m fino alla progr. 390.0 m, per poi progressivamente rastremarsi sino a circa 10.0 m nei restanti settori;
- **Unità mediamente resistiva di fondo:** definita da un graduale incremento dei valori di resistività elettrica fino a valori massimi prossimi a 70 ohm.m (colore giallo), associabili a materiali con litologie intermedie prevalenti (sabbie) più o meno cementate.

4 PROSPEZIONI SISMICHE A RIFRAZIONE

Sono state eseguite n. 6 prospezioni sismiche a rifrazione con registrazione delle velocità delle onde sismiche **P** (onde di compressione), denominate **S1, S2, S3, S4, S5-6** e **S7**.

L'ubicazione planimetrica è riportata nell'elaborato grafico **PROGR. 002** a scala 1:1.500.

I n. 6 profili sismici a rifrazione sono stati costituiti da un numero variabile di geofoni posizionati ad intervalli regolari di 2.0 m. Nel dettaglio per ognuno dei profili sono stati eseguiti diversi stendimenti geofonici con tratti sovrapposti di n.24 geofoni in modo da indagare omogeneamente il sottosuolo raggiungibile dall'analisi (es. in Fig. 13).

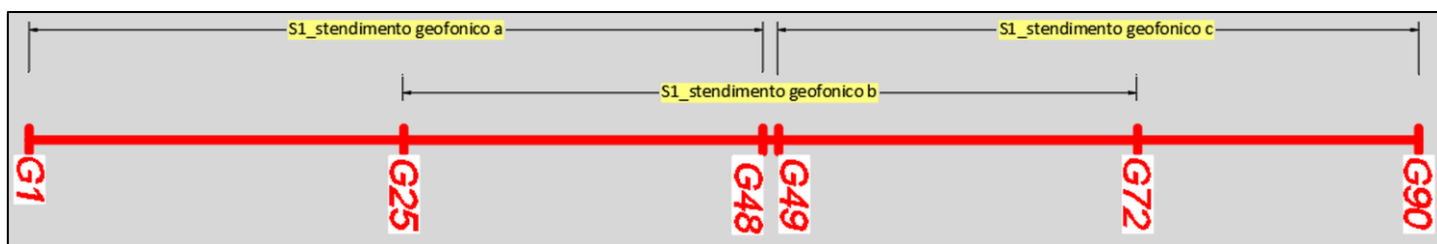


Fig. 13 – Estratto esemplificativo di layout di acquisizione per i profili sismici a rifrazione, in particolare è rappresentato quello relativo al profilo sismico S1.

La tabella seguente sintetizza, per ogni singolo profilo, le caratteristiche dei layout di acquisizione e la loro ubicazione rispetto alle progressive chilometriche del tracciato ferroviario Barletta – Canosa di Puglia.

Codifica	Località	Progressive tracciato (km)	Codifica singoli stendimenti/n°geofoni	Numero complessivo geofoni	Estensione lineare (m)
S1	Loc. Canne della Battaglia	km 10+624	a/ 48 geofoni	90	178
			b/48 geofoni		
			c/42 geofoni		
S2	Loc. Canne della Battaglia	da km 10+850 a km 10+516	a/ 48 geofoni	168	334
			b/ 48 geofoni		
			c/ 48 geofoni		
			d/ 48 geofoni		
			e/ 48 geofoni		
			f/ 48 geofoni		
S3	Loc. Canne della Battaglia	km 10+797	a/ 48 geofoni	84	166
			b/ 48 geofoni		
			c/36 geofoni		
S4	Loc. Canne della Battaglia	km 10+737	a/48 geofoni	72	142
			b/48 geofoni		
S5-6	Loc. Canosa di Puglia	da km 23+600 a km 24+078	a/ 48 geofoni	240	478
			b/48 geofoni		
			c/48 geofoni		
			d/48 geofoni		
			e/48 geofoni		
			f/48 geofoni		
			g/48 geofoni		
			h/48 geofoni		
			i/48 geofoni		
S7	Loc. Canosa di Puglia	km 22+907	a/48 geofoni	192	382
			b/48 geofoni		
			c/48 geofoni		
			d/48 geofoni		
			e/48 geofoni		
			f/48 geofoni		
			g/48 geofoni		
				Totale (m)	1298

Tabella 2 – Sintesi delle caratteristiche dei layout di acquisizione dei profili sismici a rifrazione e ubicazione rispetto alle progressive del tracciato ferroviario.

La Fig. 14 sintetizza le ubicazioni delle stese sismiche su foto aerea.



Fig. 14 - Ubicazione territoriale delle indagini sismiche a rifrazione in onde P rispetto alla linea ferroviaria Barletta – Canosa (in giallo) – Zona Canne della Battaglia (sopra) e Zona Canosa di Puglia (sotto).

4.1 Analisi dei risultati

Le sezioni sismiche a rifrazione ottenute e allegate nelle **PROGR. 003** e **PROGR.004** in scala 1:500 e in formato ridotto negli estratti delle Fig. 17, Fig. 19, Fig. 21, Fig. 23, Fig. 26 e Fig. 28 hanno permesso di ricostruire i rapporti stratigrafici tra unità geofisiche differenziate sulla base delle velocità sismiche; la Fig. 15 mostra la scala colorimetrica utilizzata.

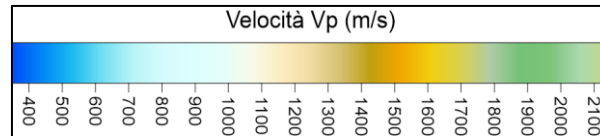


Fig. 15 – Scala colorimetrica di velocita Vp.

Inoltre per quanto concerne le sezioni sismiche acquisite in località Canne della Battaglia (S1, S2, S3 e S4), vengono visualizzate in modalità 3D attraverso il pacchetto software EVS (Earth Volumetric Studio) della C Tech. Il risultato di tale elaborazione viene riportato nell’elaborato grafico **PROGR. 003** e nella Fig. 24.

4.1.1 Sezione sismica S1 – Loc. Canne della Battaglia (progr. tracciato km 10+624)

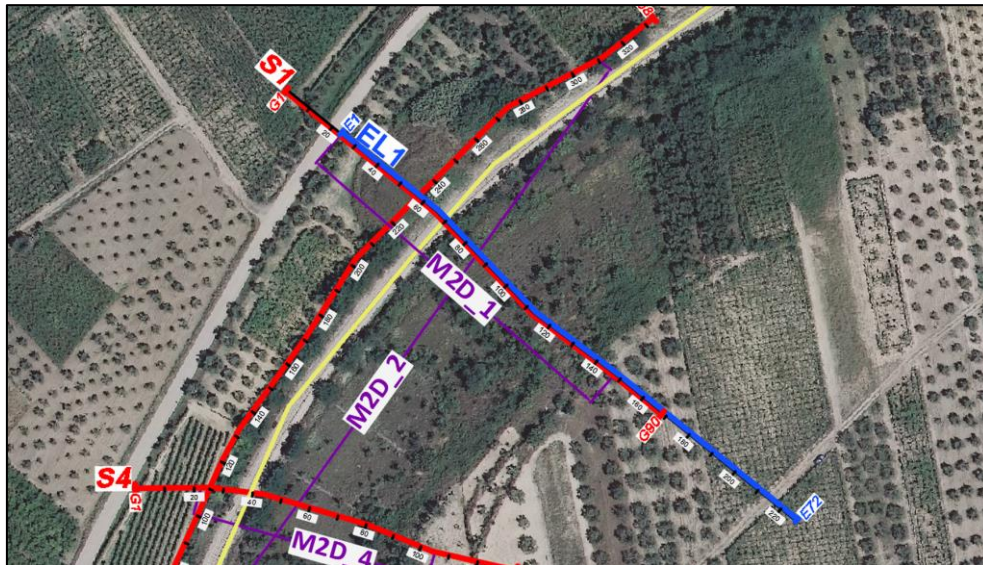


Fig. 16 – Estratto dell’ubicazione su foto aerea del profilo sismico a rifrazione S1.

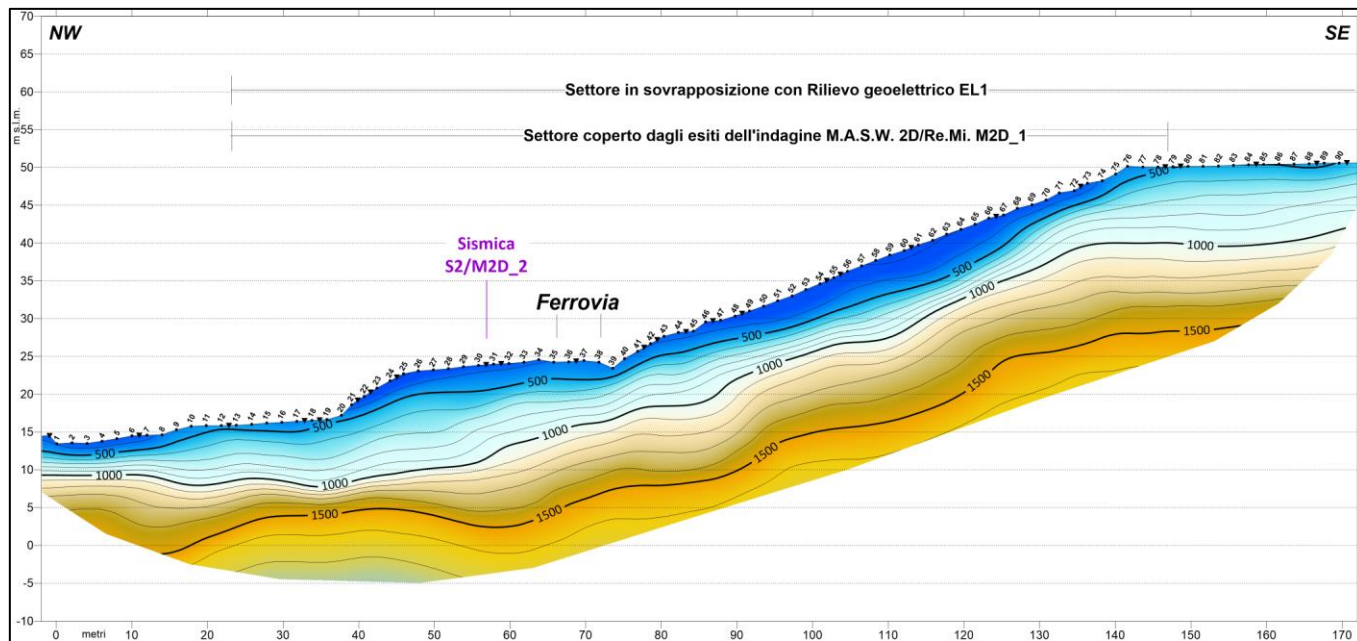


Fig. 17 – Sezione sismica a rifrazione S1.

Si definisce un'unità superficiale per spessori medi di 7.0/8.0 m con valori di velocità V_p dapprima < 500 m/s (colore blu) che incrementano fino a 1000 m/s (colore azzurro), riferibili a materiali a grado di addensamento da scarso (< 500 m/s) a moderato ($500 < V_p < 1000$ m/s). L'unità presenta spessore minimo di circa 5.0 m dalla progr. 0.0 m sino alla progr. 15.0 m, mentre raggiunge lo spessore massimo nel tratto finale della sezione, dopo la progr. 140.0, ove si attesta sino ad una profondità di circa -10.0 m dal p.c..

Al di sotto si differenzia un'unità inferiore, ove le velocità incrementano superando i 1000 m/s sino a 1500 m/s (colore marrone), sino a raggiungere i 1600 – 1700 m/s alla base della sezione (colore arancione – verde chiaro), indicative di materiali da mediamente addensati ($1000 < V_p < 1500$ m/s) ad addensati ($V_p > 1500$ m/s).

4.1.2 Sezione sismica S2 – Loc. Canne della Battaglia (progr. tracciato da km 10+850 a km 10+516)

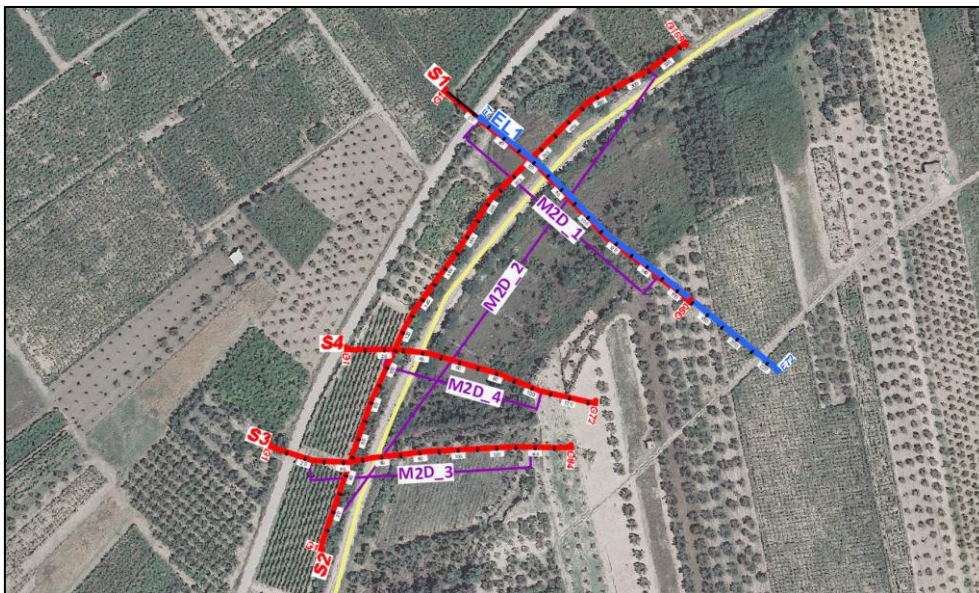


Fig. 18 – Estratto dell'ubicazione su foto aerea del profilo sismico a rifrazione S2.

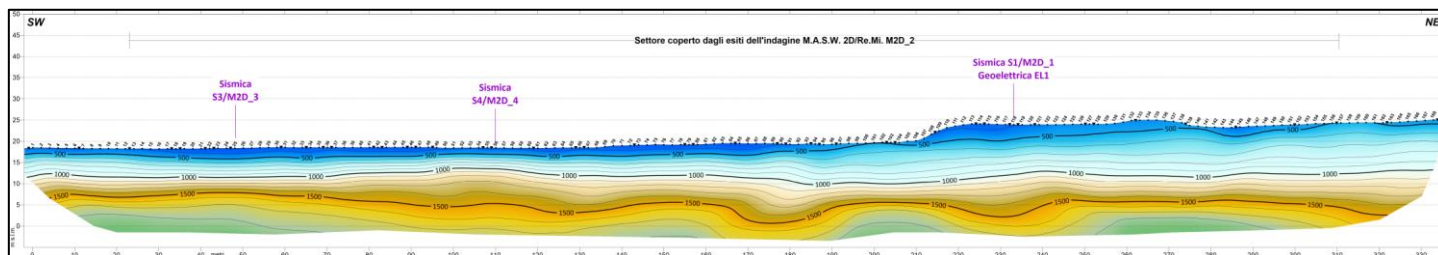


Fig. 19 - Sezione sismica a rifrazione S2.

Si definisce un'unità superficiale caratterizzata da valori di velocità $V_p < 1000$ m/s (colore blu-azzurro) con spessore prossimo a 6.0 m fino alla progr. 160.0 m, per poi progressivamente incrementare sino ad un massimo di 12.0/13.0 oltre la progr 210.0 m. Tale unità è riferibile a materiali da scarsamente addensati ($V_p < 500$ m/s – colore blu) a moderatamente addensati ($500 < V_p < 1000$ m/s – colore azzurro).

Al di sotto si differenzia l'unità inferiore costituita da valori di V_p compresi tra 1000 e 1800 m/s (colore marrone – arancione) indicativi di un progressivo incremento di addensamento dei materiali, alla base della sezione infatti raggiungono i 1700 m/s/1800 m/s (colore verde chiaro) associabili alle porzioni più addensate dell'intera sequenza.

4.1.3 Sezione sismica S3 – Loc. Canne della Battaglia (progr. tracciato km 10+797)

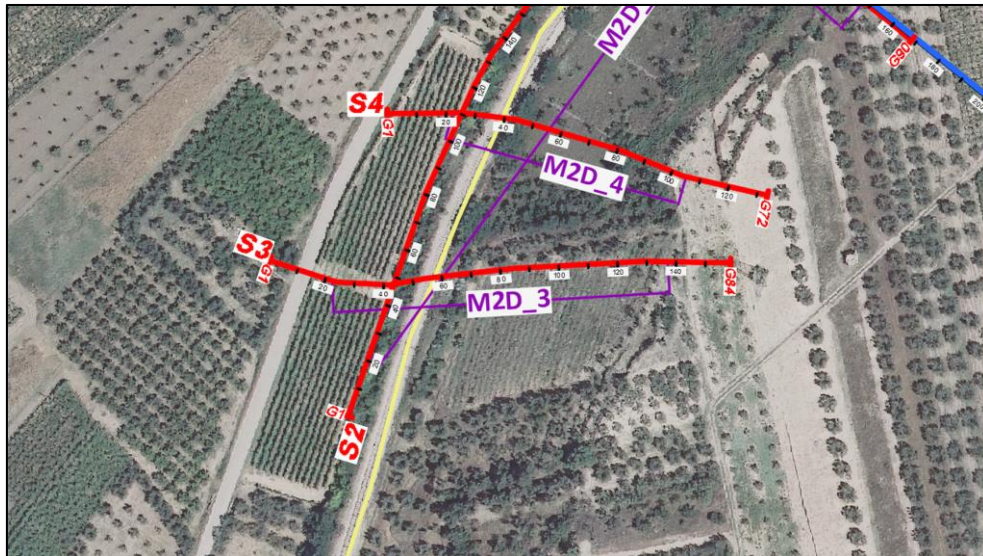


Fig. 20 – Estratto dell'ubicazione su foto aerea del profilo sismico a rifrazione S3.

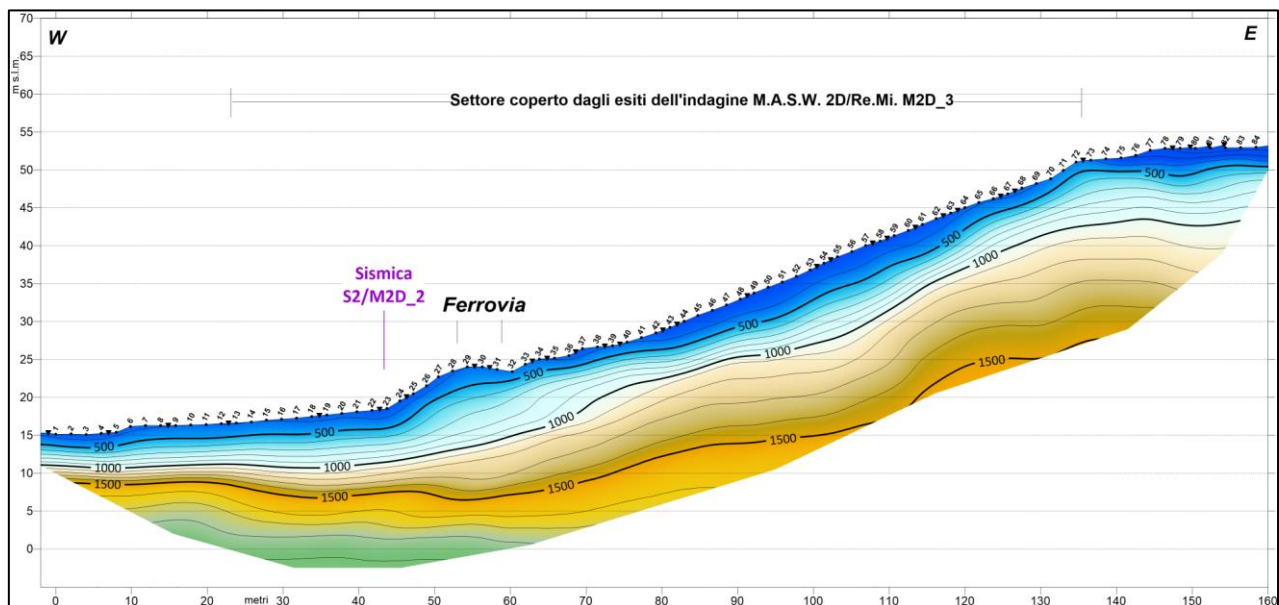
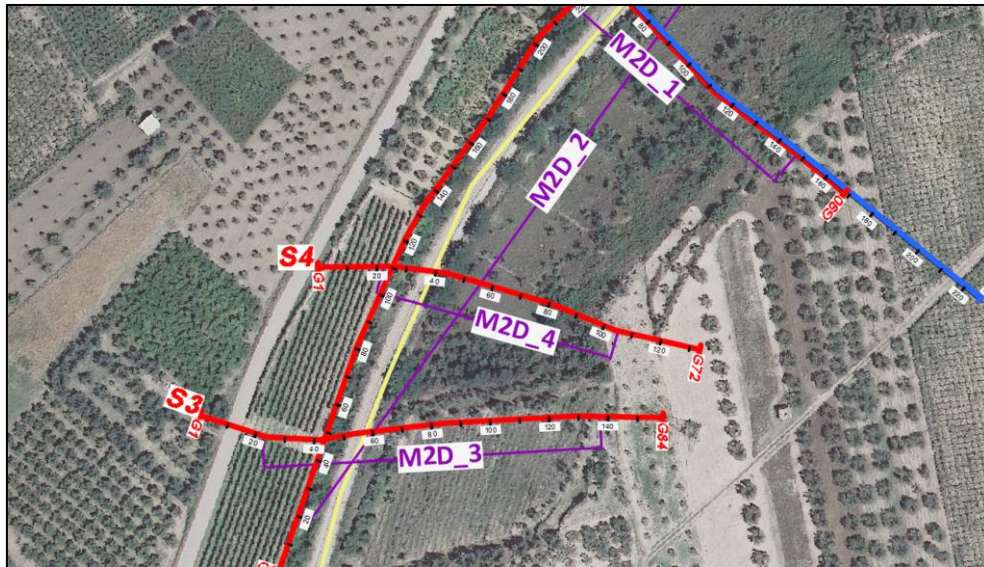


Fig. 21 - Sezione sismica a rifrazione S3.

Si definisce un'unità superficiale caratterizzata da valori di velocità V_p dapprima inferiori a 500 m/s (colore blu) e in profondità raggiungono i 1000 m/s (colore azzurro), indicativi di materiali a grado di addensamento da scarso ($V_p < 500$ m/s) a moderato ($500 < V_p < 1000$ m/s). L'unità presenta spessore variabile mediamente da 6.0/7.0 m dalla progr. 0.0 m alla progr. 40.0 m, per poi progressivamente incrementare nei restanti settori attestandosi su valori prossimi a 8.0/10.0 m.

Al di sotto si differenzia una seconda unità sismica, costituita da valori di V_p superiori a 1000 m/s fino a 1500 m/s (colore marrone), in profondità superano i 1500 m/s (colore arancione) raggiungendo, in particolare tra le progr. 10.0 m e 70.0 m, i 1900 m/s (colore verde chiaro) indicativi di materiali da mediamente addensati ($1000 < V_p < 1500$ m/s) ad addensati ($V_p > 1500$ m/s).

4.1.4 Sezione sismica S4 – Loc. Canne della Battaglia (progr. tracciato km 10+737)



Per una visione d'insieme dei modelli descritti è stata elaborata una rappresentazione 3D, visibile in Fig. 24.

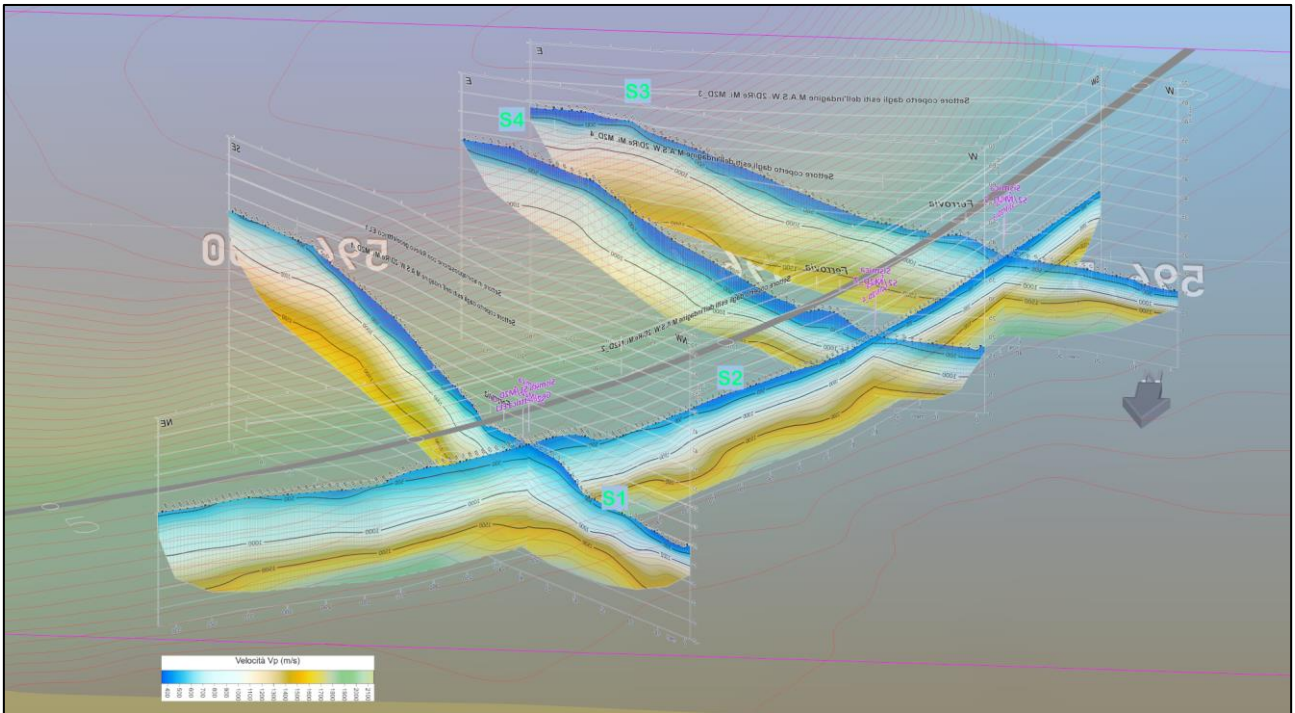


Fig. 24 - Vista 3D da Nord delle sezioni sismiche S1, S2, S3 e S4 in onde P, con indicato l'andamento della linea ferroviaria Barletta – Canosa di Puglia (in grigio).

4.1.5 Sezione sismica S5-6 – Loc. Canosa di Puglia (progr. tracciato da km 23+600 a 24+078)

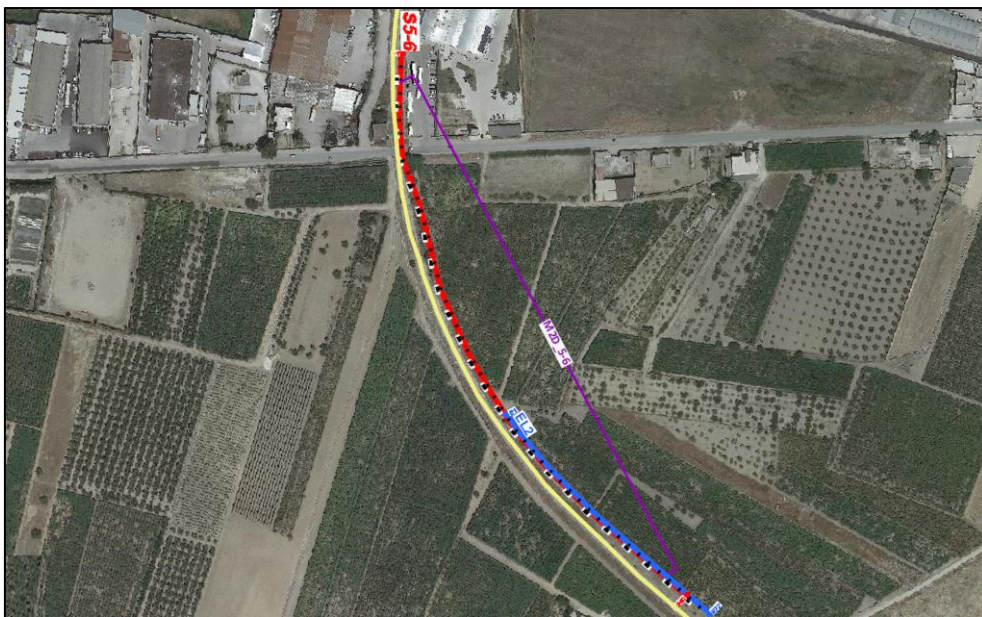


Fig. 25 – Estratto dell'ubicazione su foto aerea del profilo sismico a rifrazione S5-6.

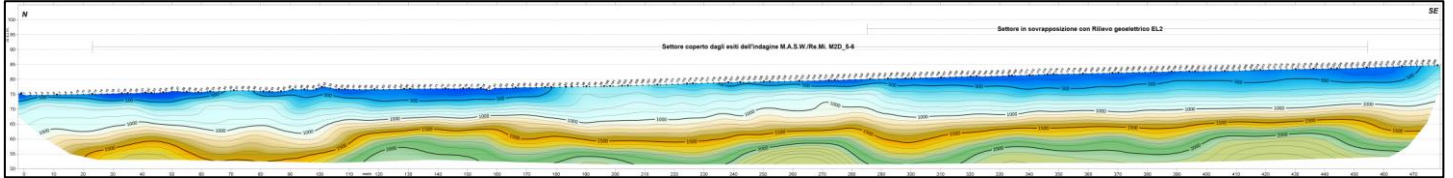


Fig. 26 - Sezione sismica a rifrazione S5-6.

Si definisce un'unità superficiale per spessori medi di 10.0/12.0 m caratterizzata dapprima da valori di velocità $V_p < 500$ m/s (colore blu) che incrementano fino a 1000 m/s (colore azzurro), riferibili a materiali da scarsamente addensati a moderatamente addensati.

Al di sotto, si differenzia l'unità intermedia per spessori variabili prossimi a 10.0 m nel settore settentrionale sino alla progr. 100.0 m, per poi progressivamente rastremarsi sino a mediamente 7.0/8.0 m. L'unità è caratterizzata da velocità comprese tra 1000 e 1800 m/s, associabili a materiali da mediamente addensati ($1000 < V_p < 1500$ m/s – colore marrone) ad addensati ($1500 < V_p < 1800$ m/s – colore arancione).

Oltre -20.0 m dal p.c., si ritrova l'unità di fondo costituita da valori di $V_p > 1800$ m/s (colore verde) sino ad oltrepassare localmente i 2000 m/s, associabili a materiali molto addensati/consistenti.

4.1.6 Sezione sismica S7 – Loc. Canosa di Puglia (progr. tracciato km 22+907)

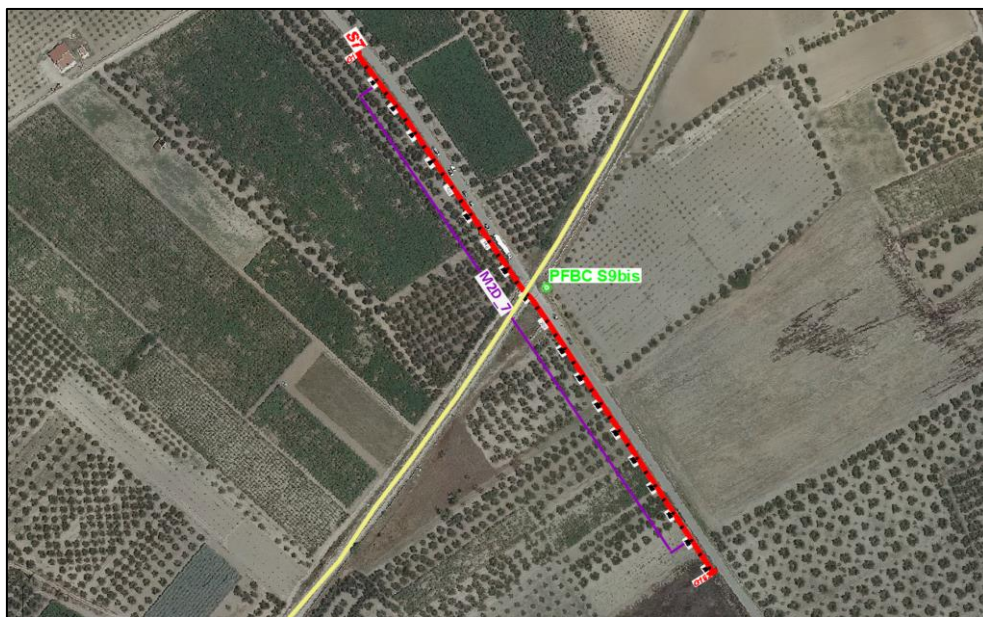


Fig. 27 - Estratto dell'ubicazione su foto aerea del profilo sismico a rifrazione S7.

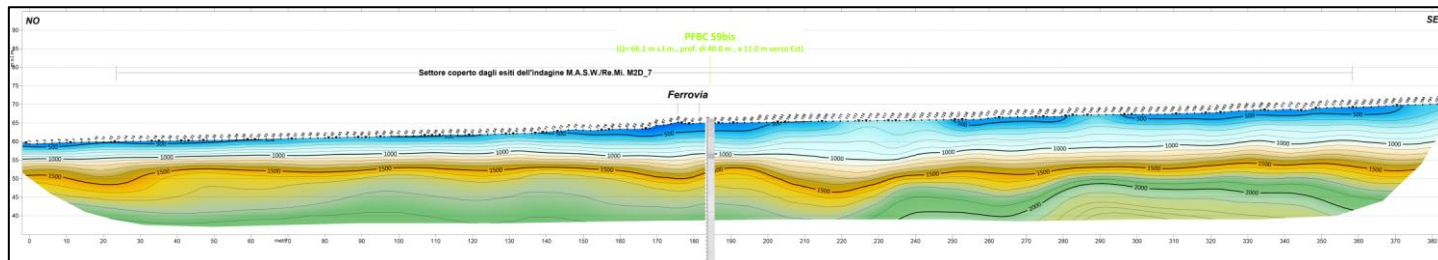


Fig. 28 - Sezione sismica a rifrazione S7.

Si definisce un'unità superficiale caratterizzata da valori di velocità V_p dapprima inferiori a 500 m/s (colore blu) che in profondità raggiungono i 1000 m/s (colore azzurro), indicativi di materiali a grado di addensamento/consistenza da scarso ($V_p < 500$ m/s) a medio ($500 < V_p < 1000$ m/s). L'unità presenta spessore variabile da un minimo di 5.0 fino alla progr. 140.0 m, per poi progressivamente incrementare sino a 9.0/10.0 m nei restanti settori.

Al di sotto si differenzia una seconda unità sismica, costituita da valori di V_p superiori a 1000 m/s fino a 1500 m/s (colore marrone), in profondità superano i 1500 m/s (colore arancione) raggiungendo i 1800 m/s (colore arancione - verde chiaro) indicativi di materiali a buon grado di addensamento/consistenza ($V_p > 1500$ m/s).

Alla base della sezione, a partire da circa -15.0/-20.0 m dal p.c., soprattutto dopo la progr. 220.0 m, si ritrova l'unità di fondo contraddistinta da velocità V_p superiori a 1800 m/s sino a superare localmente i 2000 m/s (colore verde), indicative di materiali consistenti.

5 INDAGINI SISMICHE M.A.S.W. 2D/ Re.Mi.

Per la ricostruzione di sezioni bidimensionali in termini di velocità delle onde S, sono stati eseguiti n. 6 profili sismici con acquisizione prove di tipo M.A.S.W. 2D/ Re.Mi., denominati con sigla **M2D_1**, **M2D_2**, **M2D_3**, **M2D_4**, **M2D_5-6** e **M2D_7**.

In particolare l'ubicazione di tali profili è la medesima di quelli acquisiti con il metodo a rifrazione, gli stessi sono riportati nell'elaborato grafico **PROGR. 002** a scala 1:1.500, con indicato il tratto a cui corrisponde la sezione sismica ottenuta dopo l'elaborazione dei dati.

Le Fig. 29 e Fig. 30 visualizzano su foto aerea, i singoli profili sismici acquisiti e i rispettivi tratti a cui corrispondono le sezioni sismiche ottenute.

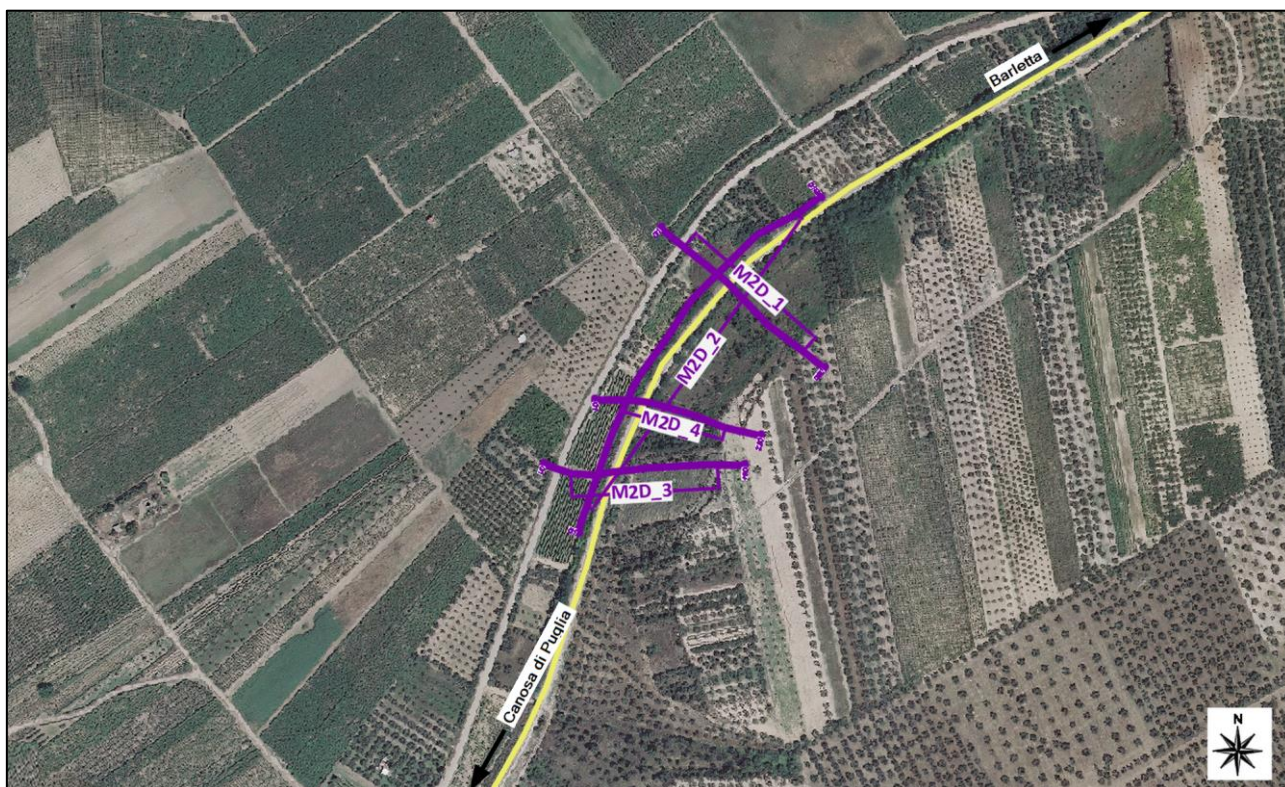


Fig. 29 – Ubicazione territoriale delle prove sismiche di tipo M.A.S.W. / Re.Mi. su foto aerea – Zona Canne della Battaglia.

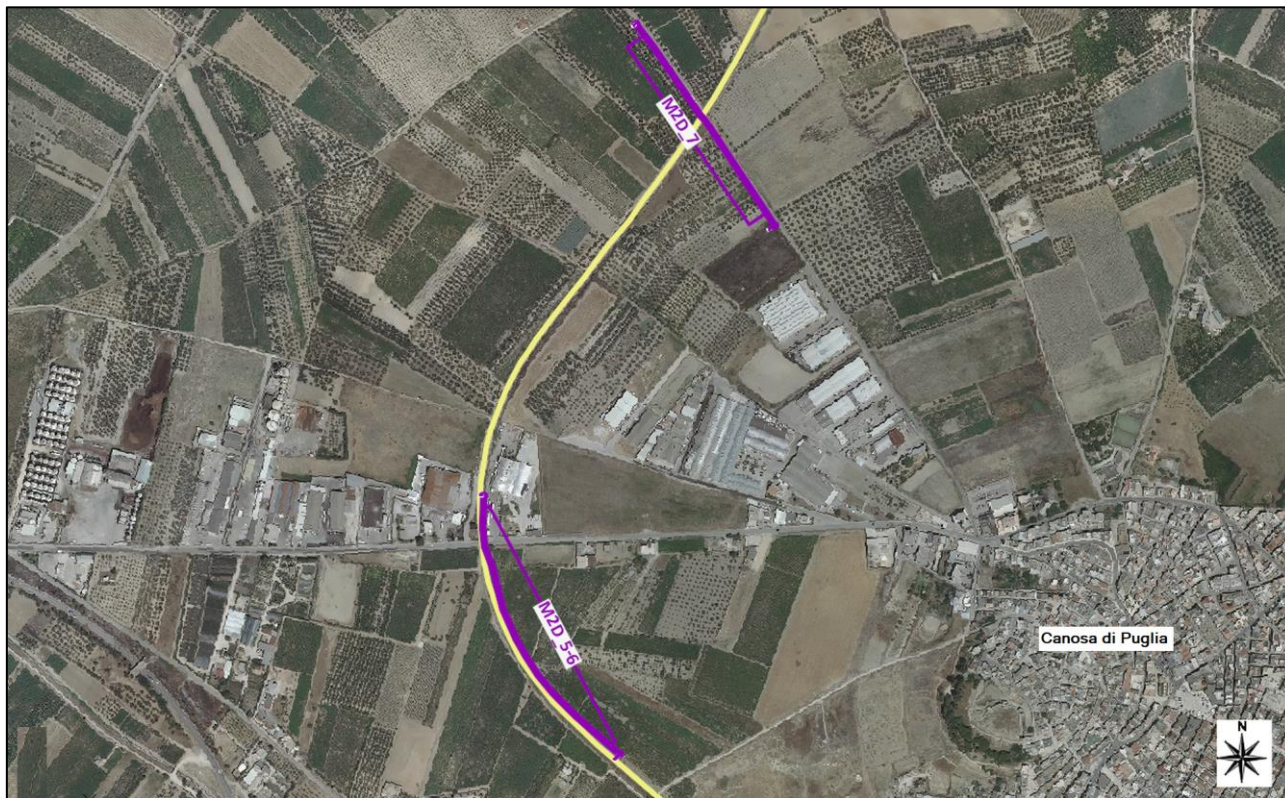


Fig. 30 - Ubicazione territoriale delle prove sismiche di tipo M.A.S.W. / Re.Mi. su foto aerea – Zona Canosa di Puglia.

5.1 Modalità esecutive dell'indagine

La registrazione del segnale sismico è stata eseguita mediante un "land streamer", costituito da n.24 geofoni da 4.5 Hz intervallati di 2.0 m ed un acquisitore digitale a 24 canali della Geometrics tipo "Geode" con dinamica a 24 bit. Nel caso del M.A.S.W. l'energizzazione è avvenuta a 5.0 m dal primo geofono, il sistema costituito dalla catena di geofoni e punto di battuta è stato traslato e shiftato di 4.0 m ad ogni "shot", fino a coprire l'intera lunghezza del profilo (es. in Fig. 31).

In aggiunta al singolo intervallo acquisito secondo la tecnica M.A.S.W. è stata abbinata una registrazione del rumore di fondo (microtremore) con tecnica Re.Mi., allo scopo di verificare l'andamento delle velocità delle onde S anche a profondità maggiori di quelle indagabili con il solo metodo M.A.S.W..

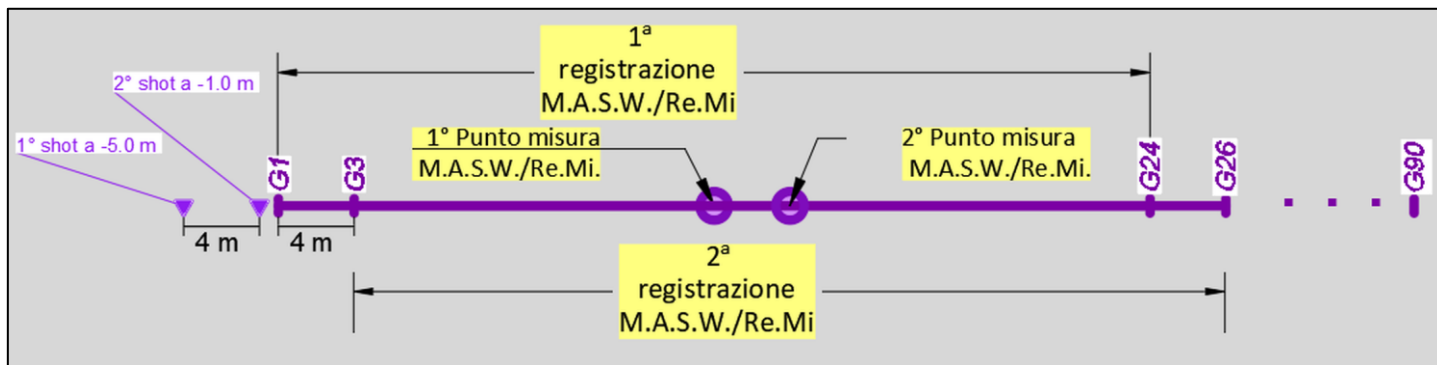


Fig. 31 – Estratto esemplificativo di layout di acquisizione per i profili sismici M.A.S.W. 2D/Re.Mi., in particolare è rappresentato quello relativo al profilo sismico M2D_1.

REPORT INDAGINI GEOFISICHE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IA6C	00	F 69 IG	GE 00 00 001	A	28 di 51

La tabella seguente sintetizza, per ogni singolo profilo, le caratteristiche dei layout di acquisizione con il numero di singoli stendimenti/acquisizioni M.A.S.W./Re.Mi. eseguite per ricostruire una sezione bidimensionale in termini di velocità V_s .

Codifica	Località	Progressive tracciato (km)	Numero singole acquisizioni M.A.S.W./Re.Mi.	Numero complessivo geofoni	Estensione lineare (m)
M2D_1	Loc. Canne della Battaglia	km 10+624	34	90	178
M2D_2	Loc. Canne della Battaglia	da km 10+850 a km 10+516	73	168	334
M2D_3	Loc. Canne della Battaglia	km 10+797	31	84	166
M2D_4	Loc. Canne della Battaglia	km 10+737	25	72	142
M2D_5-6	Loc. Canosa di Puglia	da km 23+600 a km 24+078	109	240	478
M2D_7	Loc. Canosa di Puglia	km 22+907	85	192	382
				Totale (m)	1298

Tabella 3 - Sintesi delle caratteristiche dei layout di acquisizione dei profili sismici M.A.S.W. 2D/Re.Mi., con indicato il numero delle singole acquisizioni eseguite per ricostruire le sezioni bidimensionali in termini di velocità V_s .

5.2 Analisi dei dati

Le sezioni sismiche M.A.S.W./Re.Mi. ottenute e allegate nelle **PROGR. 003** e **PROGR.004** in scala 1:500 e in formato ridotto negli estratti delle Fig. 34, Fig. 36, Fig. 38, Fig. 40, Fig. 43 e Fig. 45 hanno permesso di ricostruire i rapporti stratigrafici tra unità geofisiche differenziate sulla base delle velocità sismiche V_s ; la Fig. 32 mostra la scala colorimetrica utilizzata.

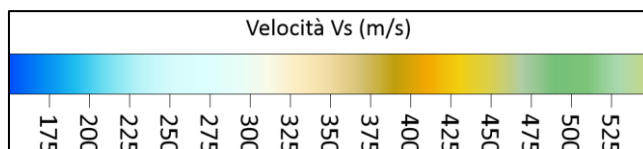


Fig. 32 – Scala colorimetrica di velocità V_s .

Inoltre per quanto concerne le sezioni sismiche acquisite in località Canne della Battaglia (M2D_1, M2D_2, M2D_3 e M2D_4), vengono visualizzate in modalità 3D attraverso il pacchetto software EVS (Earth Volumetric Studio) della C Tech. Il risultato di tale elaborazione viene riportato nell'elaborato grafico **PROGR. 003** e nella Fig. 41.

5.2.1 Sezione sismica M2D_1 – Loc. Canne della Battaglia (progr. tracciato km 10+624)

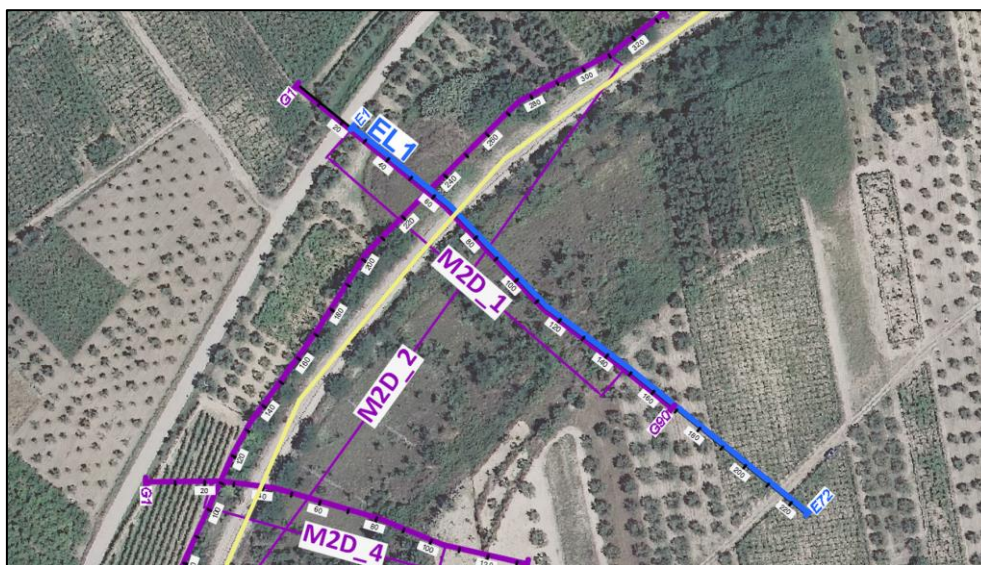


Fig. 33 - Estratto dell'ubicazione su foto aerea del profilo sismico M.A.S.W./Re.Mi. M2D_1 (in viola), con indicato il tratto corrispondente alla sezione sismica ottenuta.

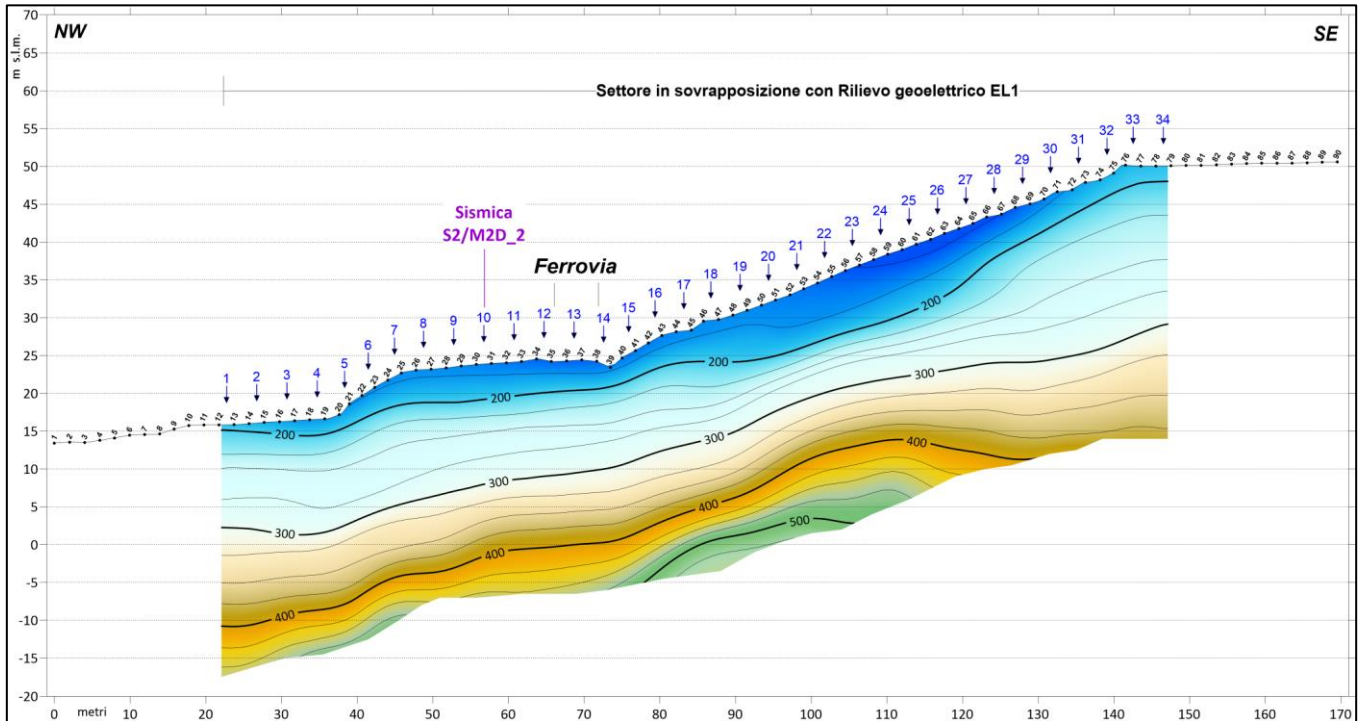


Fig. 34 – Sezione sismica M.A.S.W./Re.Mi. M2D_1.

Si definisce un'unità superficiale per uno spessore medio di 10.0 m caratterizzata da valori di velocità V_s dapprima < 200 m/s (colore blu) che in profondità incrementano fino a valori di 250/300 m/s (colore azzurro), riferibili a materiali a grado di addensamento da scarso (< 200 m/s) a moderato ($200 < V_s < 300$ m/s). L'unità tende ad aumentare il suo spessore nel tratto finale della sezione, dopo la progr. 130.0 m, ove si attesta su valori massimi di 12.0/13.0 m.

Al di sotto si differenzia un'unità inferiore, ove le velocità incrementano superando i 300 m/s sino a 450 m/s (colore marrone - arancione), indicative di materiali da mediamente addensati ($300 < V_s < 400$ m/s) ad addensati ($450 < V_s < 500$ m/s). L'unità presenta spessore di circa 10.0 m.

Alla base della sezione, soprattutto tra le progr. 80.0 e 120.0 m oltre -25.0 m dal p.c., si registra un ulteriore incremento di V_s , che superano i 500 m/s (colore verde), indicative di un graduale passaggio a materiali più compattati.

5.2.2 Sezione sismica M2D_2 – Loc. Canne della Battaglia (progr. tracciato da km 10+850 a km 10+516)

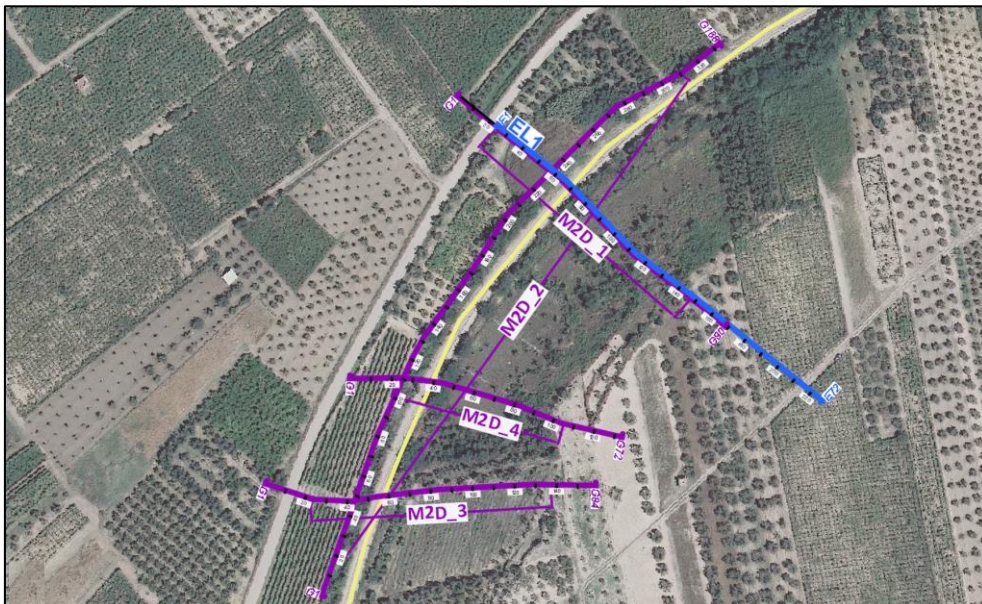


Fig. 35 - Estratto dell'ubicazione su foto aerea del profilo sismico M.A.S.W./Re.Mi. M2D_2 (in viola).

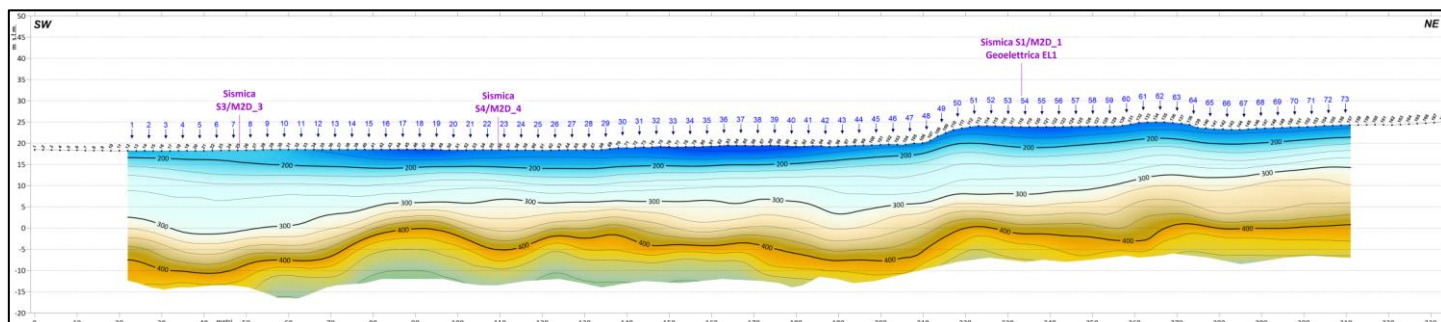


Fig. 36 - Sezione sismica M.A.S.W./Re.Mi. M2D_2.

Si definisce un'unità superficiale caratterizzata da valori di velocità $V_s < 250/300$ m/s (colore blu-azzurro) con spessore piuttosto regolare lungo tutto il tratto indagato, prossimo a 10.0 m. Tale unità è riferibile a materiali da scarsamente addensati ($V_s < 200$ m/s – colore blu) a moderatamente addensati ($200 < V_s < 300$ m/s – colore azzurro).

Al di sotto si differenzia l'unità inferiore costituita da valori di V_s compresi tra 300 e 450 m/s (colore marrone – arancione) indicativi di un progressivo incremento di addensamento dei materiali, il quale si presenta di grado medio-alto alla base della sezione ($V_s = 450- 475$ m/s – colore verde chiaro).

5.2.3 Sezione sismica M2D_3 – Loc. Canne della Battaglia (progr. tracciato km 10+797)

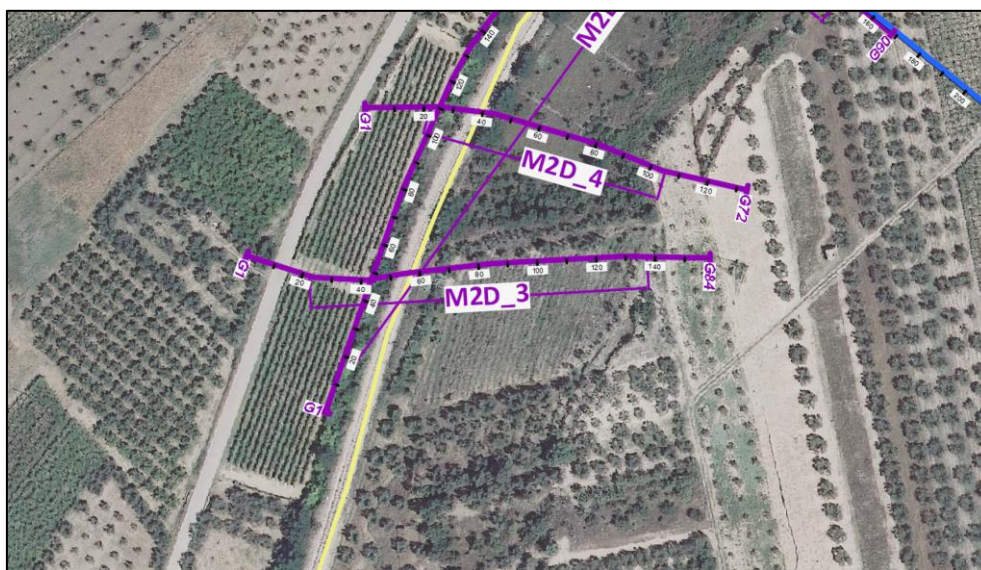


Fig. 37 - Estratto dell'ubicazione su foto aerea del profilo sismico M.A.S.W./Re.Mi. M2D_3 (in viola), con indicato il tratto corrispondente alla sezione sismica ottenuta.

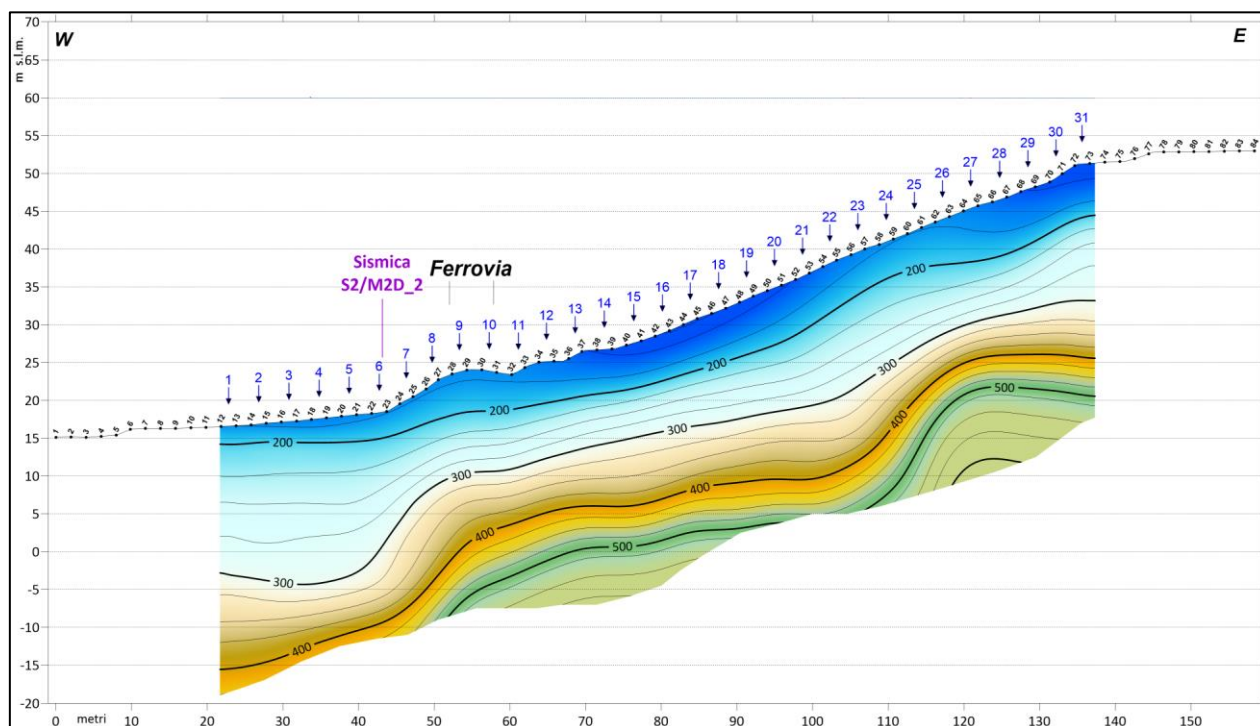


Fig. 38 - Sezione sismica M.A.S.W./Re.Mi. M2D_3.

Si definisce un'unità superficiale caratterizzata da valori di velocità V_s inferiori a 250/300 m/s (colore blu - azzurro), indicativi di materiali a grado di addensamento da scarso ($V_s < 200$ m/s) a moderato ($200 < V_s < 300$ m/s). L'unità presenta spessore medio di 10.0 m, con un incremento nel settore occidentale fino alla progr. 50.0 m ove raggiunge massimo i -13.0 m dal p.c..

Al di sotto si differenzia un'unità intermedia, costituita da valori di V_s compresi tra 300 e 450 m/s (colore marrone - arancione), indicativi di un passaggio a materiali da mediamente addensati ($300 < V_s < 400$ m/s) ad addensati ($400 < V_s < 450$ m/s). tale unità presenta spessore medio prossimo a 10.0 m.

Alla base della sezione, dopo la progr. 50.0 m, si differenzia l'unità di fondo con valori di V_s superiori a 500 m/s fino a raggiungere i 600 m/s (colore verde), associabili a materiali a grado di addensamento elevato.

5.2.4 Sezione sismica M2D_4 – Loc. Canne della Battaglia (progr. tracciato km 10+737)

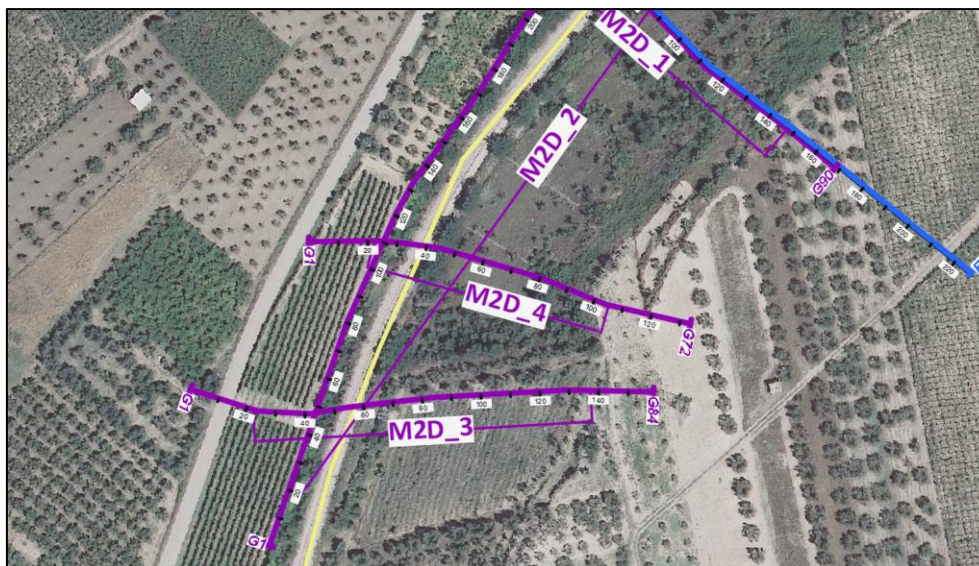


Fig. 39 - Estratto dell'ubicazione su foto aerea del profilo sismico M.A.S.W./Re.Mi. M2D_4 (in viola), con indicato il tratto corrispondente alla sezione sismica ottenuta.

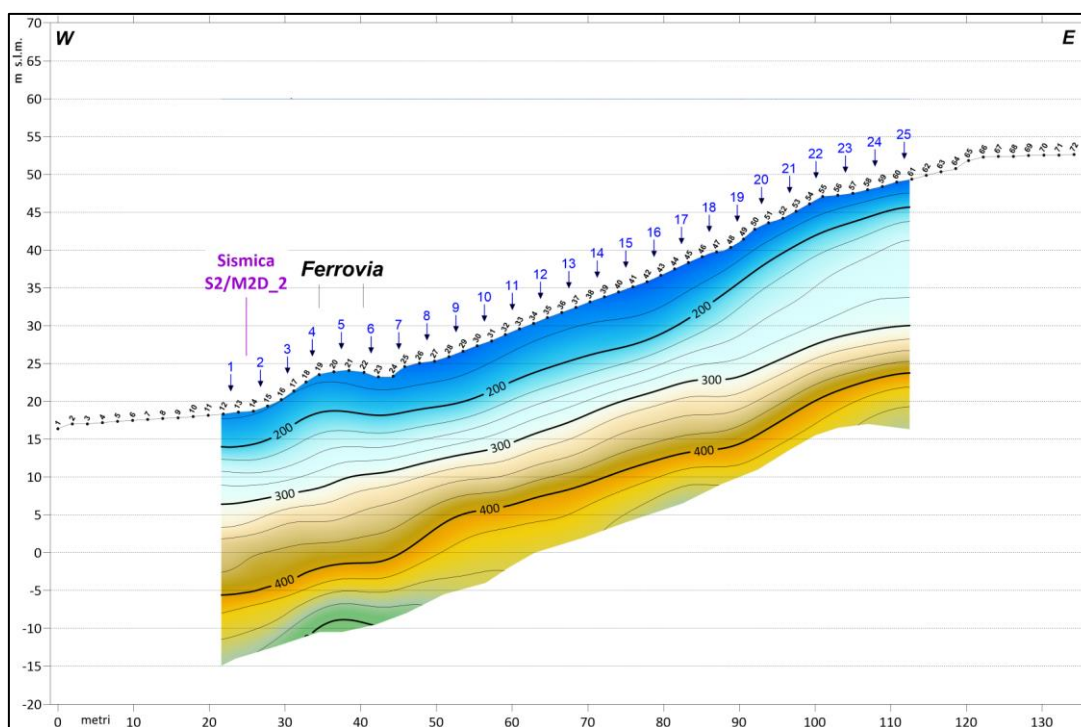


Fig. 40 - Sezione sismica M.A.S.W./Re.Mi. M2D_4.

A partire dal p.c. si differenzia l'unità superficiale, costituita da valori di $V_s < 250/300$ m/s (colore blu azzurro), indicativi di materiali da scarsamente addensati ($V_s < 200$ m/s) a moderatamente addensati ($200 < V_s < 300$ m/s). L'unità presenta spessore costante prossimo a 10.0 m fino alla progr. 90.0 m, per poi progressivamente incrementare sino a -13.0/-14.0 m dal p.c. nei restanti settori.

Al di sotto si registra il passaggio all'unità di fondo con velocità V_s che superano i 300 m/s (colore marrone) sino a 450 m/s (colore marrone – arancione), associabili a litologie da mediamente addensate ad addensate.

Alla base della sezione, specialmente tra le progr. 20.0 m e 50.0 m, si registra un ulteriore incremento dei valori di V_s che superano i 450 m/s raggiungendo i 500 m/s (colore verde), a cui si associano i materiali a maggior grado di addensamento dell'intera sequenza.

Per una visione d'insieme dei modelli descritti è stata elaborata una rappresentazione 3D, visibile in Fig. 41 .

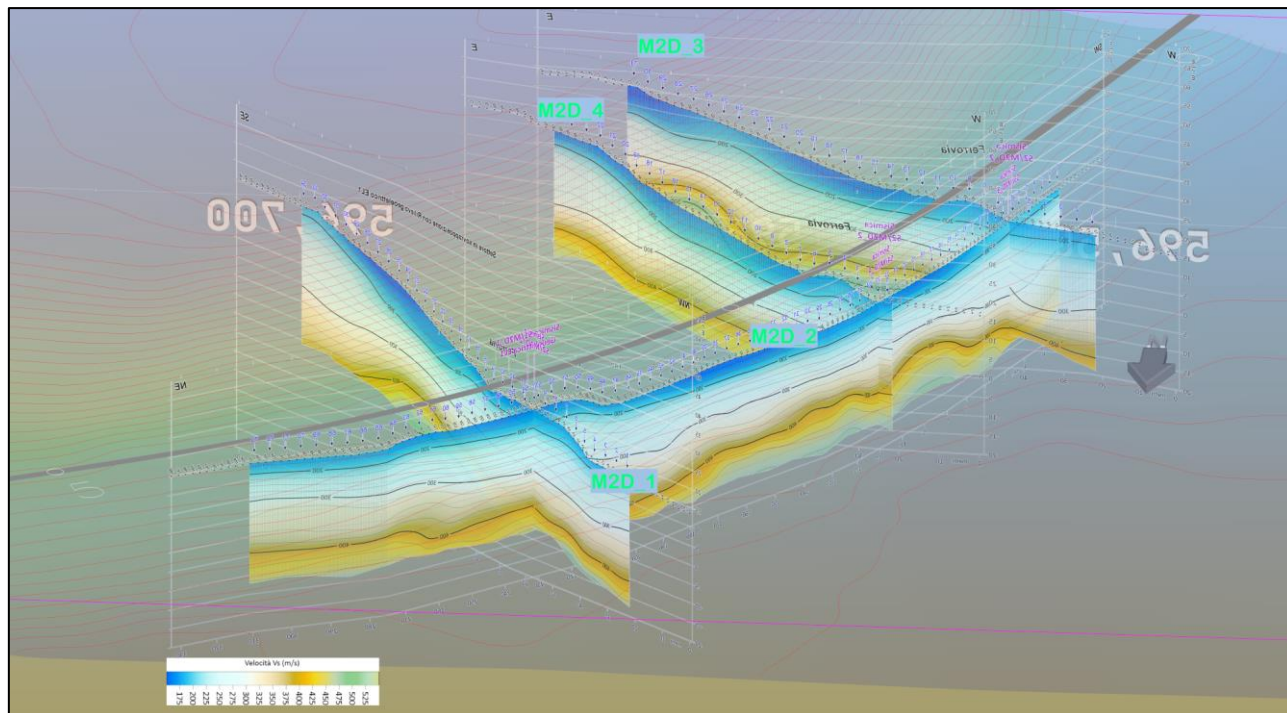


Fig. 41 - Vista 3D da Nord delle sezioni sismiche M2D_1, M2D_2, M2D_3 e M2D_4 in onde S, con indicato l'andamento della linea ferroviaria Barletta – Canosa di Puglia (in grigio).

5.2.5 Sezione sismica M2D_5-6 – Loc. Canosa di Puglia (progr. tracciato da km 23+600 a 24+078)

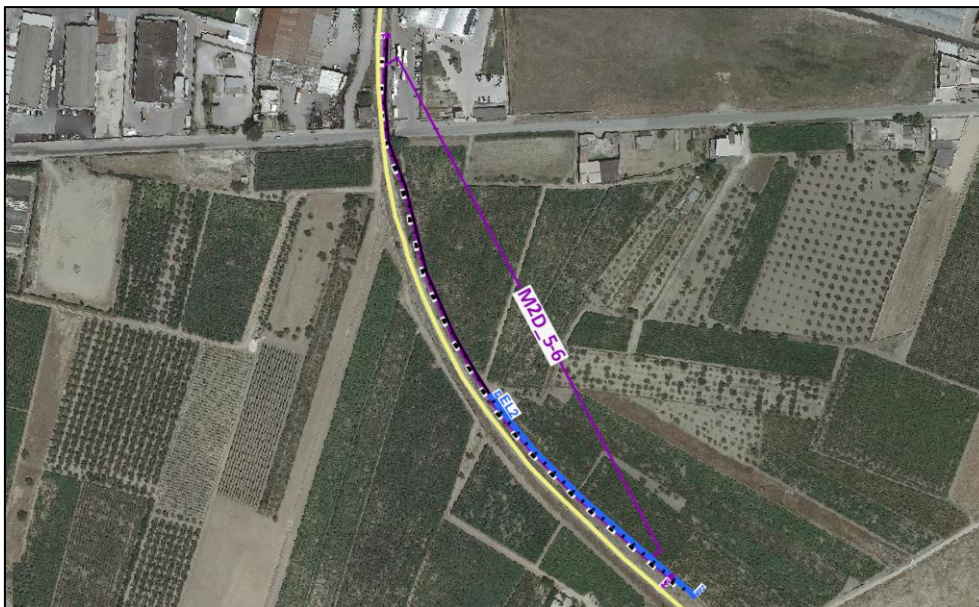


Fig. 42 - Estratto dell'ubicazione su foto aerea del profilo sismico M.A.S.W./Re.Mi. M2D_5-6 (in viola), con indicato il tratto corrispondente alla sezione sismica ottenuta.

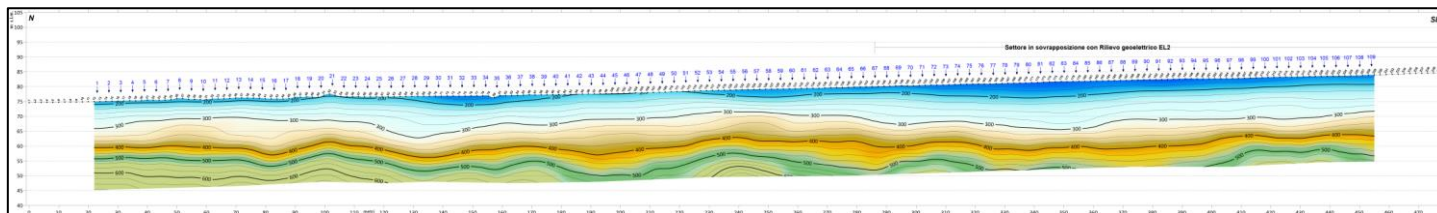


Fig. 43 - Sezione sismica M.A.S.W./Re.Mi. M2D_5-6.

Si definisce un'unità superficiale per spessori medi prossimi a 10.0 m caratterizzata nei primi metri da valori di velocità $V_s < 200$ m/s (colore blu) che incrementano fino a 300 m/s (colore azzurro), riferibili a materiali da scarsamente addensati a moderatamente addensati.

Al di sotto, si differenzia l'unità intermedia per uno spessore medio di 10.0 m. L'unità è caratterizzata da velocità comprese tra 300 e 450 m/s, associabili a materiali da mediamente addensati ($300 < V_s < 400$ m/s – colore marrone) ad addensati ($400 < V_s < 450$ m/s – colore arancione).

Oltre -20.0 m dal p.c., si ritrova l'unità di fondo costituita da valori di $V_s > 500$ m/s (colore verde) sino ad oltrepassare localmente i 600 m/s, associabili a materiali molto addensati/consistenti.

5.2.6 Sezione sismica M2D_7 – Loc. Canosa di Puglia (progr. tracciato km 22+907)

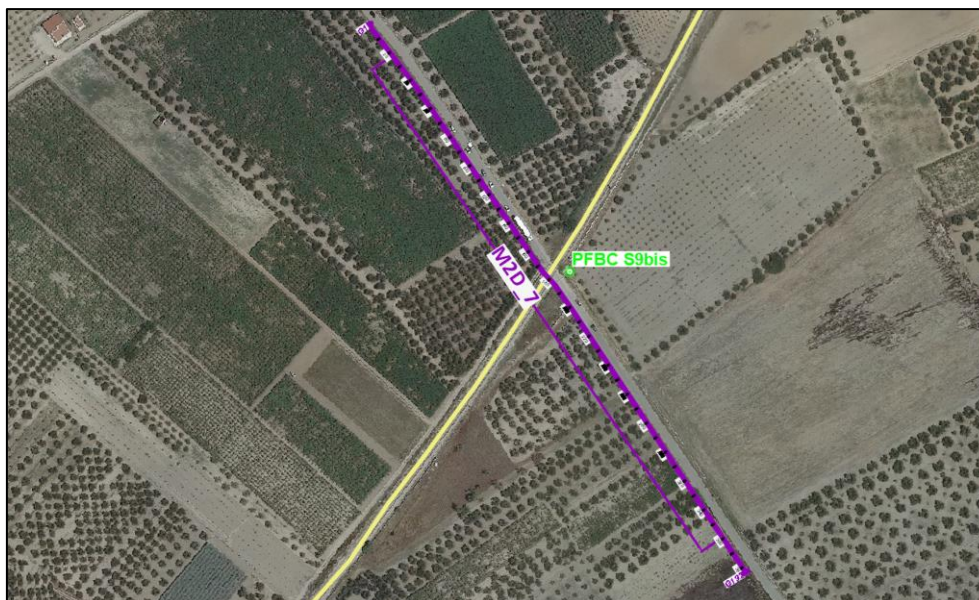


Fig. 44 - Estratto dell'ubicazione su foto aerea del profilo sismico M.A.S.W./Re.Mi. M2D_7 (in viola), con indicato il tratto corrispondente alla sezione sismica ottenuta.

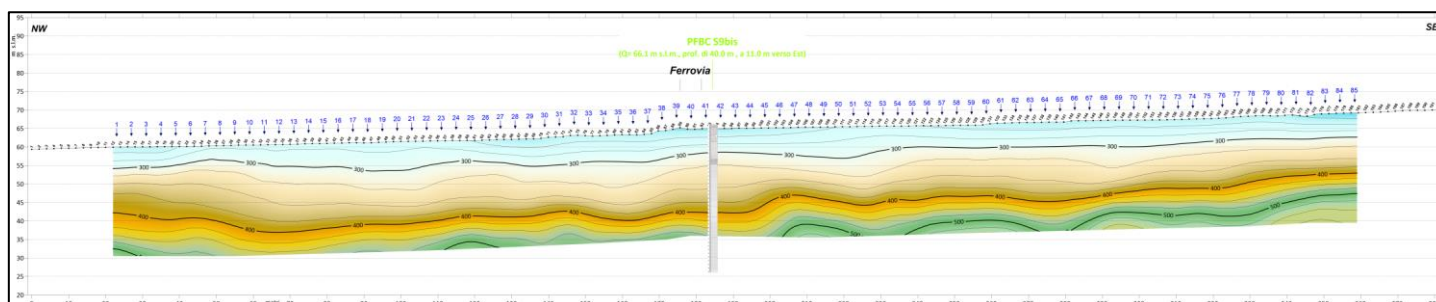


Fig. 45 - Sezione sismica M.A.S.W./Re.Mi. M2D_7.

Si definisce un'unità superficiale caratterizzata da valori di velocità V_s compresi tra 250 e 300 m/s (colore azzurro) indicativi nel complesso di materiali a grado di addensamento/consistenza medio. L'unità presenta spessore prossimo a 5.0 m, ma localmente raggiunge al massimo i 7.0/8.0 m.

Al di sotto si differenzia una seconda unità sismica, costituita da valori di V_s superiori a 300 m/s fino a 450 m/s (colore marrone -arancione), indicativi di materiali a buon grado di addensamento/consistenza ($V_s > 400$ m/s).

Alla base della sezione, a partire da oltre -20.0 m dal p.c., soprattutto dopo la progr. 200.0 m, si ritrova l'unità di fondo contraddistinta da velocità V_s superiori a 450 m/s sino a superare localmente i 500 m/s (colore verde), indicative di materiali consistenti.

APPENDICE 1

Note tecniche – Rilievo tomografico elettrico

- Tomografia elettrica / Metodologia

La metodologia “geoelettrica” rappresenta uno dei metodi geofisici storicamente più utilizzati per la ricostruzione delle strutture presenti nel sottosuolo con particolare riferimento alle tematiche legate alla caratterizzazione delle diverse formazioni geolitologiche.

Gli sviluppi dell’elettronica e delle procedure di acquisizione dati gestite via software, hanno consentito di applicare questa metodologia, un tempo lenta e laboriosa, ai più disparati settori dello studio del sottosuolo con tempistiche e dettaglio un tempo impensabili.

- Cenni teorici

Il parametro di base è la “resistività elettrica”, proprietà fisica che esprime la “resistenza” che i materiali offrono al passaggio della corrente elettrica.

Le misure geoelettriche consentono, valutando le deformazioni del flusso di corrente indotte dalle proprietà fisiche dei materiali, di caratterizzare i materiali stessi e ricostruirne la distribuzione spaziale.

La resistività che caratterizza i materiali costituenti il sottosuolo, è determinata essenzialmente dai seguenti fattori:

- natura litologica (conducibilità intrinseca dei componenti di base);
- porosità e/o fratturazione e quindi forma, dimensione e continuità dei pori;
- percentuale di presenza di fluidi interstiziali (essenzialmente presenza di acqua);
- grado di salinità dell’acqua di saturazione;
- presenza di matrice fine.

- Modalità di misura

La misura del valore di resistività elettrica dei materiali si realizza creando un campo elettrico artificiale nel mezzo oggetto dell’indagine e studiandone la distribuzione nel sottosuolo.

Il dispositivo di misura è costituito quindi da due coppie di elettrodi metallici (quadripolo) infissi sul terreno con geometrie che si differenziano in funzione del tipo di rilievo da realizzare.

$$\begin{array}{c}
 A1 \text{---} \text{---} \text{---} A1 \text{---} M \text{---} O \text{---} N \text{---} B1 \text{---} \text{---} \text{---} B2 \\
 \text{Dispositivo Schlumberger} \\
 A1 \text{---} M1 \text{---} O \text{---} N1 \text{---} B1 \Rightarrow An \text{---} Mn \text{---} O \text{---} Nn \text{---} Bn \\
 \text{Dispositivo Wenner} \\
 A1 \text{---} B1 \text{---} O \text{---} M1 \text{---} N1 \Rightarrow An \text{---} Bn \text{---} O \text{---} Mn \text{---} Nn \\
 \text{Dispositivo Dipolo-Dipolo}
 \end{array}$$

Generalmente i dispositivi utilizzati sono simmetrici rispetto ad un punto centrale O al quale si riferisce il valore misurato.

La coppia (A-B) costituisce il circuito con il quale s’immette corrente nel terreno, la coppia (M-N) è il circuito di misura della differenza di potenziale generata nel terreno stesso dal passaggio della corrente.

Si misurano così le variazioni del campo elettrico, indotte dalle eterogeneità litologiche presenti nel sottosuolo; queste variazioni sono più o meno marcate in funzione del contrasto di resistività elettrica esistente fra mezzi con caratteristiche differenti.

La scelta del dispositivo più opportuno è legata alle condizioni dell’area da indagare, sia in termini strutturali sia di rapporto segnale-rumore (S/N).

L'innovazione fondamentale introdotta nell'acquisizione tomografica è rappresentata dall'utilizzo di strumentazioni digitali "multicanale" in grado di gestire automaticamente un gran numero di elettrodi che riducono largamente i tempi di acquisizione e forniscono la misura della resistività in corrispondenza di un elevato numero di punti costituenti la sezione indagata.

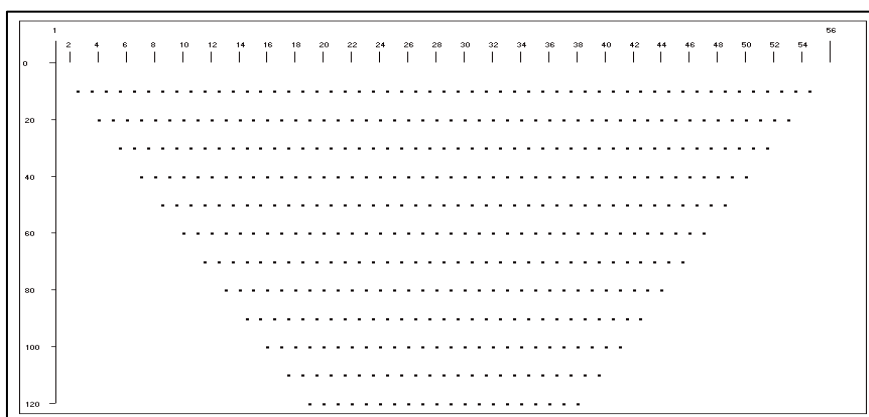


Fig. 46 - Tomografia elettrica – Esempio di distribuzione delle misure.

Grazie all'elevata densità dei punti si rende possibile, nella fase di elaborazione, l'applicazione di potenti algoritmi di "inversione" bidimensionale (2D) ricostruendo con estremo dettaglio, la sezione di resistività "vera", definendo in particolare gli effetti delle "variazioni laterali" e quindi restituendo una rappresentazione finale largamente corrispondente alla situazione reale.

- **Modalità d'intervento**

La capacità della tomografia elettrica di discriminare con grande dettaglio le unità di copertura, le variazioni laterali, nonché le eventuali "inversioni di resistività" (che costituiscono un grande limite per altre metodologie) rappresenta una fondamentale caratteristica del metodo. Gli elettrodi vengono disposti lungo stendimenti sulla superficie topografica, secondo lo schema rappresentato in Fig. 46. In tal caso, la profondità di esplorazione è direttamente proporzionale alla lunghezza dello stendimento, mentre il dettaglio è funzione della distanza elettrodica. Entrambe queste dimensioni rappresentano quindi un aspetto fondamentale per la progettazione dell'intervento. In genere le indagini sono volte all'esplorazione secondo sezioni bidimensionali (2D) ma è possibile intervenire con modalità tridimensionale (3D) sia in acquisizione sia in elaborazione. È inoltre possibile l'elaborazione 3D sulla base di una geometria di acquisizione 2D.

I dati sono acquisiti tramite un georesistivimetro del tipo AMBROGEO MANGUSTA SYSTEM MC 96/E (Fig. 47): in grado di gestire fino a 96 elettrodi singolarmente indirizzabili secondo le diverse configurazioni elettrodiche. Lo strumento è costituito da una Centralina hardware di controllo, da un Laptop che gestisce il processo di misura, da unità periferiche (elettrodi passivi, cavi impermeabili e picchetti metallici) e da moduli esterni di energizzazione.



Fig. 47 – Strumentazione con georesistivimetro del tipo MANGUSTA SISTEM MC 96/E (a sinistra) e particolare di stendimento elettrodo (a destra).

La principale innovazione introdotta dalla strumentazione è rappresentata dalla gestione totalmente automatizzata delle misure che si realizza attraverso l’invio alternato della corrente agli elettrodi e misurata la differenza di potenziale, secondo una sequenza pre-programmata. È quindi possibile l’acquisizione in tempi brevi di un elevato numero di punti.

- Acquisizione dati

L’acquisizione automatica dei dati garantisce, come accennato, un’elevata velocità di esecuzione. In tale situazione per la miglior qualità dei dati è di fondamentale importanza un “layout” ottimale della linea degli elettrodi.

Una volta verificato il layout e iniziata la serie di misure, che procede automaticamente, è possibile proseguire con il successivo layout di elettrodi lungo il profilo che consente di realizzare l’acquisizione in continuo secondo la procedura definita del “roll-along”.



Fig. 48 - Particolare del layout relativo al profilo geoelettrico EL1.

- **Elaborazione dati**

L'elaborazione dei dati segue il seguente schema:

- editing per l'individuazione e rimozione dei valori caratterizzati da un errore elevato (deviazione standard > 2%);
- ricostruzione della sezione di pseudoresistività apparente misurata;
- definizione delle dimensioni della griglia da utilizzare per l'inversione 2D;
- inversione 2D e la ricostruzione della sezione di resistività tramite iterazioni successive condotte sulla base del confronto delle pseudosezioni di resistività misurata e calcolata.

I passi indicati sono sviluppati tramite l'utilizzo dei seguenti pacchetti software:

- **RES2DINV 4.9**

Programma che, dai dati di resistività apparente calcolata e utilizzando la tecnica d'inversione *smoothness-constrained least-squares*, produce un modello bidimensionale di resistenza reale vs profondità. Il programma è completamente automatico ed è stato ottimizzato per essere utilizzato con "data set" di grandi dimensioni acquisiti secondo le configurazioni Wenner, Schlumberger, dipolo-dipolo, polo-polo, polo-dipolo, ecc.

Tramite questo programma è inoltre possibile effettuare le adeguate correzioni topografiche. Unitamente al programma RES2DMOD costituisce un avanzato pacchetto di "inversione" e "modeling" bidimensionale. Il programma seleziona automaticamente i migliori parametri d'inversione per ogni particolare set di dati e comunque i parametri che influenzano il processo d'inversione possono essere modificati dall'utente.

Sono forniti tre differenti variazioni del metodo *least-squares*: uno molto veloce "quasi Newton", uno più lento ma più accurato "Gauss-Newton" e una tecnica ibrida mediamente veloce che include i vantaggi di entrambe i metodi precedenti.

- **GOLDEN SOFTWARE – SURFER**

Software utilizzato per la rappresentazione dei dati acquisiti tramite un processo *contouring* di curve ad isovalore di resistività elettrica.

APPENDICE 2

Note tecniche – Rilievo sismico a rifrazione

- Cenni teorici

Il metodo sismico a rifrazione si basa sulla misura dei tempi di percorso delle onde sismiche di volume (nel caso in esame solo onde **P**) 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 rifratore (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 rifratore più profondo individuato (poiché i raggi sismici che scendono a profondità superiori non ritornano in superficie nei punti in cui sono collocati i geofoni).

- Acquisizione dati

Negli stendimenti sono utilizzati geofoni “Geospace” con frequenza propria di 14 Hz, posizionati nel presente lavoro ad una distanza intergeofonica di 2.0 m.

In punti predefiniti del profilo, nello specifico ogni 6 geofoni, sono 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 sommate diverse battute. Il “time-break”, tempo zero di inizio registrazione, è fissato attraverso l'apertura di un circuito elettrico posizionato sulla massa battente.



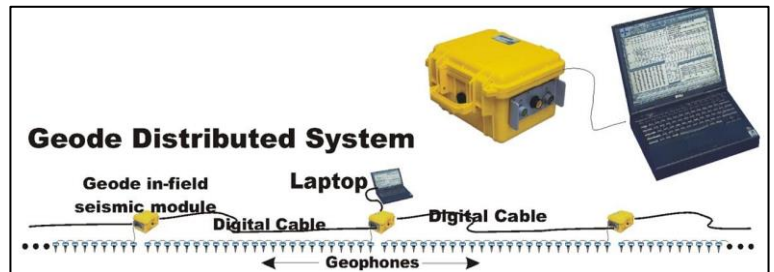
Fig. 49 – Energizzazione in onde P lungo il profilo sismico a rifrazione S5-6.



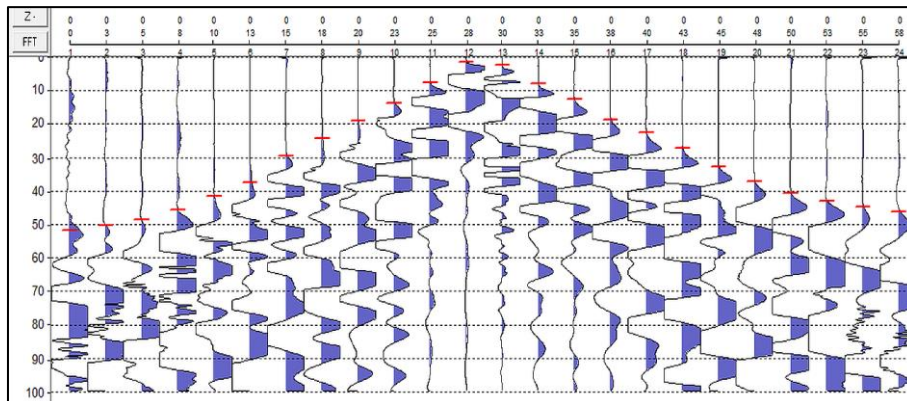
Fig. 50 – Stendimento geofonico relativo al profilo sismico a S7.

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

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



Di seguito un esempio di registrazione sismica utilizzata per il picking dei primi arrivi delle onde **P** tagliata a 0.100 secondi.

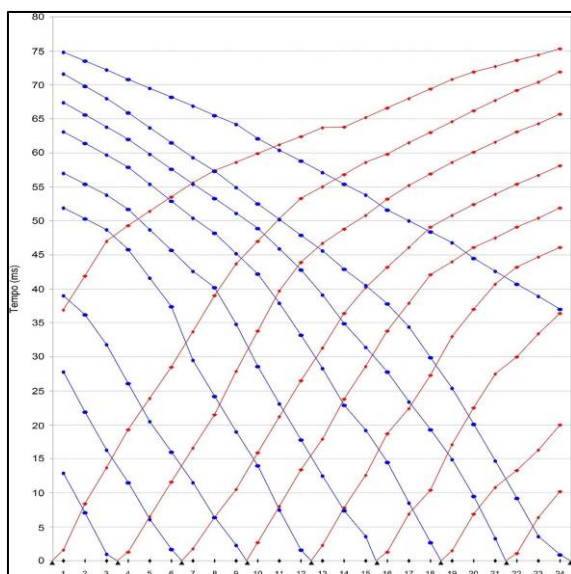


Esempio registrazione onde P.

- Elaborazione dati

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

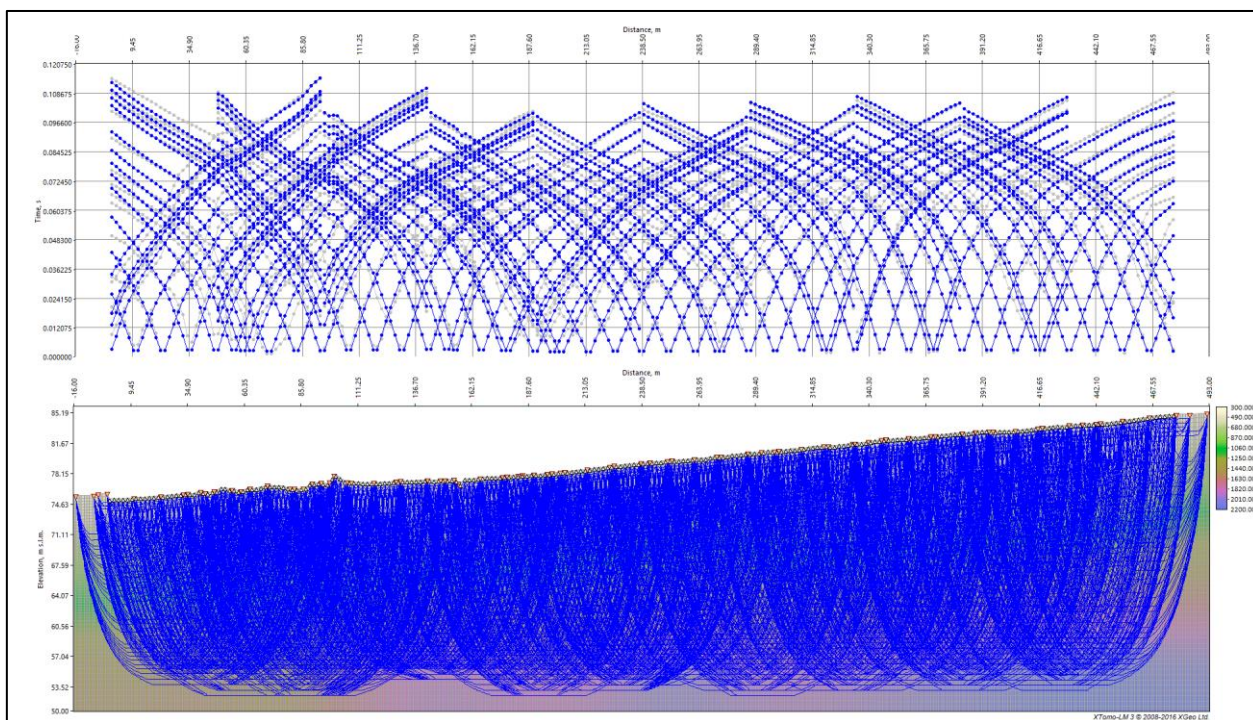
Le dromocrone sono interpretate applicando algoritmi di calcolo basati sul metodo “time delay” di Hawkins e sul metodo “delle intercette”. I risultati di tale interpretazione consentono la caratterizzazione in termini di velocità sismica dei materiali costituenti il sottosuolo delle aree indagate e la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



Esempio Dromocrone Onde P.

Lo schema di velocità ottenuto è quindi utilizzato come modello iniziale per l’elaborazione tomografica. Il programma d’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”, come mostrato nell’ estratto esemplificativo in figura sotto relativamente al profilo sismico S5-6.



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 sparso 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”. 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

APPENDICE 3

Note tecniche – Rilievo sismico M.A.S.W. 2D/ Re.Mi.

- Stendimenti sismici con metodo “M.A.S.W.” e “Re.Mi.”: cenni metodologici

Il metodo M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica d’indagine non invasiva (non è necessario eseguire perforazioni o scavi e ciò limita i costi), che individua il profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , 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 danno informazioni sulla parte più profonda del suolo.

Il metodo d’indagine M.A.S.W. si distingue in metodo attivo e metodo passivo (Zywicki, D.J.1999) o in una combinazione di entrambi.

Nel metodo attivo 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 che 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 5 Hz e 70 Hz, quindi dà informazioni sulla parte più superficiale del suolo, sui primi 30 m-50 m, in funzione della rigidezza del suolo. Il metodo passivo in genere consente di tracciare una velocità di fase apparente sperimentale compresa tra 0 Hz e 10 Hz, quindi dà informazioni sugli strati più profondi del suolo, generalmente al di sotto dei 50 m, in funzione della rigidezza del suolo.

L’elaborazione dei dati con il metodo M.A.S.W. 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.), 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 tecnica, il disturbo (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 ed elaborazione, per stimare la velocità delle onde di taglio (V_s) fino a profondità che possono essere superiori a 100 m. 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 24 bit) 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 (microtremore) 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.

- **Elaborazione dati**

I dati delle prove “M.A.S.W.” e “Re.Mi.” sono stati elaborati con il software “Geogiga Surface Plus 9.3”, pacchetto avanzato per l’elaborazione dei dati delle onde di superficie, in grado di gestire acquisizioni sismiche sia in attivo che in passivo con qualsiasi layout geometrico.

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

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.

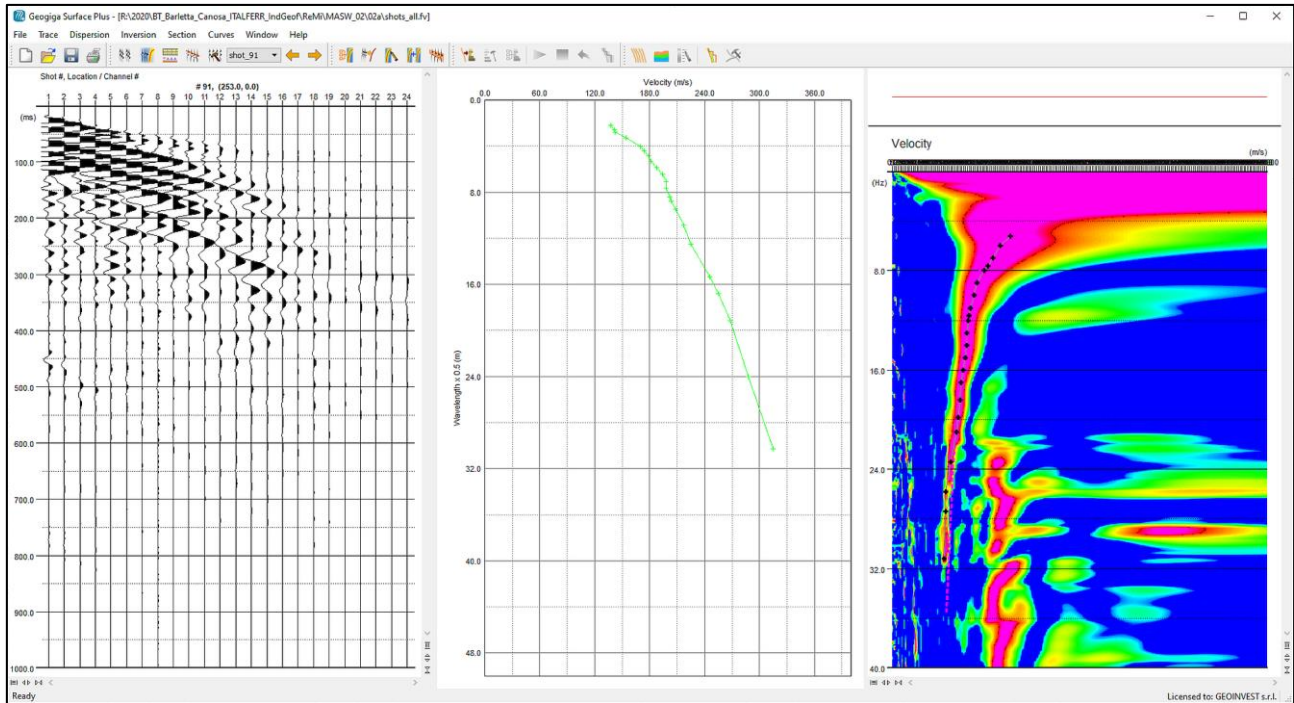


Fig. 51 – Estratto esemplificativo della procedura di elaborazione M.A.S.W. con indicato da sinistra a destra: traccia del segnale registrato, curva di dispersione e relativo spettro medio con picking.

6 BIBLIOGRAFIA

- Achenbach, J.D., *Wave Propagation in Elastic Solids*, 1999.
- AGI Advanced Geosciences Inc., *Sting R1 Instruction Manual*, p.30 mod., 1997.
- AGI Advanced Geosciences Inc., *User's Manual*, p.32 mod., 1997.
- Aki, K., *Correlation study of near earthquake waves*, 1959.
- Aki, K e Richards, P.G., *Quantitative Seismology, Theory and Methods*, 1980.
- Geometrics Inc, Es-3000, *GeodeTM and StrataVisorTM NZ/NZC Operator's Manual*, 2004.
- Zywicki, D.J., *Advanced signal processing methods applied to engineering analysis of seismic surface waves*, 1999.