

**REPORT TECNICO
INDAGINI GEOFISICHE
(MASW-SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P-
GEOELETRICA)**

*Nuovo impianto per la produzione di energia da fonte eolica
nel comune di Sassari e Porto Torres (SS)*

| | | | | |
|------------------------|------------------------|--------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| N° Tavola R1 | Scala Disegno varie | Data 15/02/2021 | Data Aggiornamento -- | Redatto: A.Carcangiu D.Succu |
|------------------------|------------------------|--------------------|-----------------------------|------------------------------------|

| | | |
|--------------------------------------|-------------------------|-----------|
| Oggetto: RELAZIONE TECNICA | Scala Plottaggio 1.1 | CTB -- |
|--------------------------------------|-------------------------|-----------|

Committente:

Queequeg Renewables Ltd.
Unit 3.21
1110 Great West Road
TW80G - LONDON

Cantiere: Località Sa Corredda Comune di
Sassari (SS)



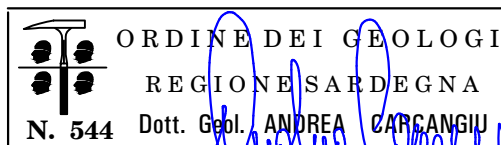
GEOSERVICE

GEOSERVICE S.r.l.

Sede: Casa Spadaccino - Loc. Su loi, km 13+400, SS 195
Sulcitana, 09012 Torre degli Ulivi Capoterra (CA)
Sede legale: Via D. Cimarosa, 22 - 09050 Villa San Pietro (CA)
Capitale Sociale: € 20.000,00
Tel. 3474032606; Fax: 1782206528;
P.IVA/C.F.: 03008730925 - R.E.A.: 239536 di Cagliari
mail: info@geoservicesardegna.com;
PEC: geoservice.sas@pec.it
www.geoservicesardegna.com
L'Amministratore

Il Direttore Tecnico

Dott. Geol. Andrea Carcangiu



Collaboratore

Dott. Geol. Daniele Succu

Sommario

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | PREMESSA | 2 |
| 2 | PROGRAMMA DELLE INDAGINI SVOLTE..... | 3 |
| 3 | RILIEVO TOPOGRAFICO | 3 |
| 4 | INDAGINI SISMICHE: MASW | 8 |
| 4.1 | Tecnica e parametri utilizzati | 8 |
| 4.2 | Strumentazione utilizzata..... | 9 |
| 4.3 | Elaborazione dei dati..... | 9 |
| 4.4 | CATEGORIE DI SOTTOSUOLO - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018)..... | 11 |
| 4.5 | VALORI DI VELOCITÀ DELLE ONDE P ED S PER I PRINCIPALI LITOTIPI..... | 13 |
| 4.6 | DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DI DEFORMAZIONE E DI RESISTENZA AL TAGLIO DALLE INDAGINI SISMICHE | 14 |
| 4.7 | MASW: RISULTATI | 16 |
| 4.7.1 | MASW M1 (WTG012) | 16 |
| 4.7.2 | MASW M2 (WTG006) | 18 |
| 4.7.3 | MASW M3 (WTG005) | 20 |
| 4.7.4 | MASW M4 (WTG001) | 22 |
| 5 | SISMICA A RIFRAZIONE..... | 24 |
| 5.1 | Strumentazione utilizzata..... | 24 |
| 5.2 | Elaborazione dei dati..... | 25 |
| 5.3 | Valutazione della escavabilità delle rocce..... | 27 |
| 6 | TOMOGRAFIA ELETTRICA | 29 |
| 6.1 | Programma delle indagini svolte..... | 29 |
| 6.2 | Metodologia impiegata, strumentazione e software..... | 29 |
| 6.2.1 | Tecnica e parametri utilizzati | 29 |
| 6.2.2 | Geometria delle acquisizioni | 30 |
| 6.2.3 | Strumentazionee attrezzatura utilizzata | 30 |
| 6.2.4 | Elaborazione dei dati e software..... | 31 |
| 6.3 | Valori di resistività di letteratura..... | 32 |
| 7 | ELABORAZIONI E RISULTATI DELLA SISMICA A RIFRAZIONE E TOMOGRAFIA ELETTRICA | 34 |
| 7.1.1 | WTG012 - Rifrazione R1e Tomografia elettrica T1 | 34 |
| 7.1.2 | WTG006 - Rifrazione R2 e Tomografia elettrica T2 | 36 |
| 7.1.3 | WTG005- Rifrazione R3 e Tomografia elettrica T3 | 38 |
| 7.1.4 | WTG001- Rifrazione R4 e Tomografia elettrica T4 | 40 |
| 8 | INDICAZIONI PER LA DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI GEOMECCANICI..... | 42 |
| 9 | CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE | 43 |

1 PREMESSA

La presente relazione descrive le attività delle indagini geofisiche realizzate nell'ambito del progetto: "Nuovo impianto per la produzione di energia da fonte eolica nel comune di Sassari e Porto Torres (SS)".

Le prospezioni geofisiche sono state realizzate impiegando la metodologia sismica e geoelettrica, seguono le specifiche e le caratteristiche delle metodologie impiegate:

1. L'indagine sismica con tecnica MASW (Multichannel Analysis of SurfaceWaves) è una tecnica di indagine non invasiva, che attraverso la definizione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , è in grado di ricostruire una sismo-stratigrafia atta a permettere la definizione della categoria di suolo ai sensi del DM 17/01/2018.
2. L'indagine sismica a rifrazione con acquisizione ed elaborazione tomografica in onde longitudinali (P) permette di ricostruire l'andamento stratigrafico, nel senso di spessori elastomogenei, andando a stimare lo stato di addensamento e/o fratturazione del terreno investigato. E' molto utile anche per classificare la cosiddetta "rippabilità" degli ammassi rocciosi e per ottenere per via indiretta una classificazione dell'ammasso roccioso.
3. La tomografia elettrica è una tecnica geofisica che restituisce, del sottosuolo investigato, l'immagine 2D della distribuzione della resistività elettrica. Trova le sue migliori applicazioni in situazioni complesse, dove può manifestare tutto il suo elevato potere risolutivo, sia laterale che verticale.

A supporto della progettazione geotecnica e strutturale, tramite le MASW sono stati determinati sulla base di correlazioni bibliografiche i parametri elastici dinamici derivati dalle indagini sismiche e il modulo statico di deformazione.

Come richiesto dalla committenza sono stati realizzati in totalen° 4 stendimenti di MASW, n°4 stendimenti di sismica a rifrazione in onde P e n° 4 stendimenti di geoelettrica.

Fanno parte integrante della presente relazione i seguenti allegati:

- Tavola 1. Planimetria generale ubicazione indagini – scala 1:25.000
- Tavole 2-3-4-5. Planimetria di dettaglio ubicazione indagini geofisiche – scala 1:1.000
- Allegato 1.MASW: Sismogramma acquisiti- spettri velocità di fase/frequenza - Curve di dispersione
- Allegato 2. Sismica a rifrazione: dromocrone osservate e calcolate e raggi sismici
- Allegato 3. Documentazione fotografica indagini geofisiche.

2 PROGRAMMA DELLE INDAGINI SVOLTE

Le prospezioni geofisiche sono state articolate secondo il seguente programma, realizzato in data 25, 26, 27 Gennaio 2021:

1. In data 25, 26, 27 Gennaio 2021 esecuzione di n°4 stendimenti di geoelettrica, sismica con tecnica MASW e rifrazione in onde P. Le basi sismiche MASW ricadono lungo il medesimo allineamento delle rifrazioni così come le tomografie elettriche che hanno il medesimo centro ma sono solo leggermente più lunghe.
2. Rilievo topografico tramite GPS differenziale STONEX S70G (geofoni, punti di shot, elettrodi /picchetti) e restituzione dei profili altimetrici da impiegare nelle sezioni di tomografia elettrica e sismica.
3. Elaborazione dei dati tramite analisi delle prospezioni acquisite in campagna, applicazione filtri, e restituzione grafica delle sezioni sismiche con l'impiego di software specialistici.

L'ubicazione generale è riportata nella **Tavola 1** mentre quella di dettaglio nelle **Tavole 2,3,4, e 5**.

Nella seguente tabella si riporta il quadro riassuntivo delle indagini svolte, con le sigle identificative, la direzione di esecuzione (da geofono o elettrodo iniziale a quello finale) e la loro lunghezza complessiva.

Tabella 1. Quadro riassuntivo delle indagini svolte

| Stendimento | Aerogeneratore | Orientamento | Lunghezza(m) |
|--------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|
| R/M1 | (WTG012) | NW- SE | 69,0 |
| R/M 2 | (WTG006) | SSW- NNE | 69,0 |
| R/M 3 | (WTG005) | SSW- NNE | 69,0 |
| R/M 4 | (WTG001) | SW-NE | 69,0 |
| T1 | (WTG012) | NW- SE | 93,0 |
| T2 | (WTG006) | SSW- NNE | 93,0 |
| T3 | (WTG005) | SSW- NNE | 93,0 |
| T4 | (WTG001) | SW-NE | 93,0 |

3 RILIEVO TOPOGRAFICO

Di seguito si riportano i dati del rilievo topografico in termini di coordinate Gauss Boaga e quote assolute in m.s.l.m e relative in m da p.c. eseguito tramite GPS differenziale Stonex S70G di ciascun geofono e shot/energizzazione degli stendimenti di sismica a rifrazione in onde P. Si precisa che i valori altimetrici dei seguenti profili, con l'aggiunta delle quote degli elettrodi iniziali e finali, sono stati utilizzati anche per l'elaborazione delle tomografie elettriche in quanto sono stati eseguiti lungo lo stesso profilo.

Legenda:

G1: Nome Geofono;

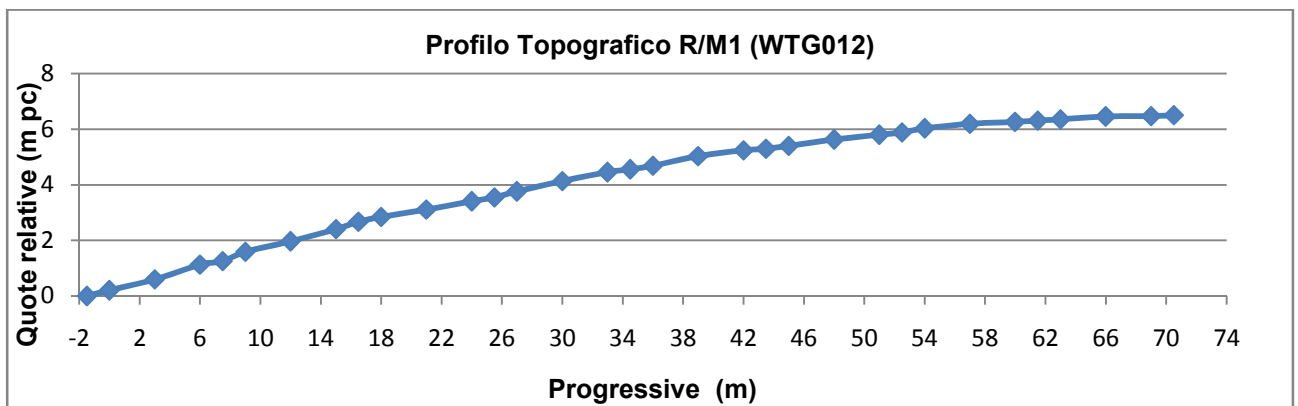
S1: Nome Shot/energizzazione

Est/Nord: Longitudine e Latitudine, Coordinate Gauss Boaga

QA-QR: Quote altimetriche assolute (m.s.l.m) e relative in (m.p.c)

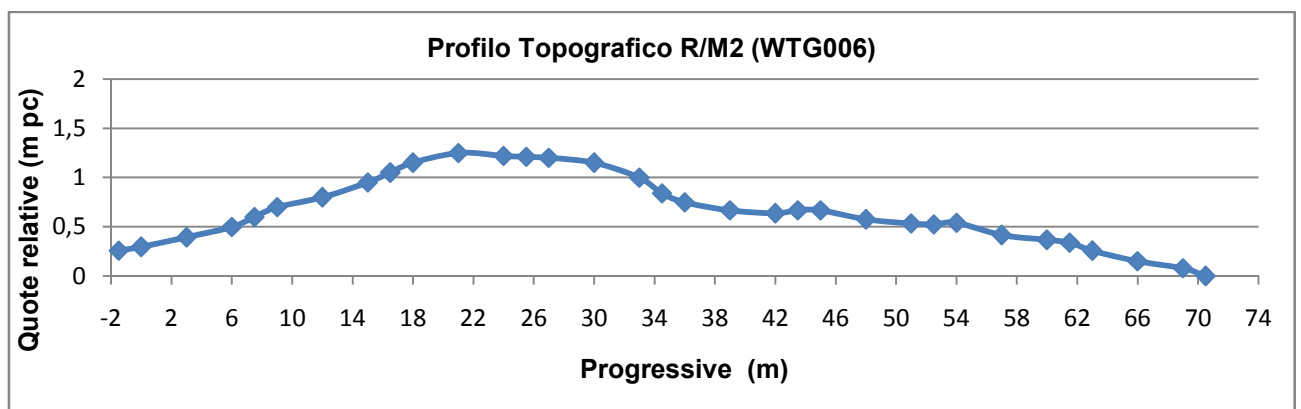
| Nome punto | Progressive (m) | Est (Longitudine) | Nord (Latitudine) | QA: Quota assoluta (m.s.l.m) | QR: Quota Relativa (m.p.c) |
|------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------------------|----------------------------|
| S1 | -1,5 | 1441611 | 4513716 | 237,518 | 0 |
| G1 | 0 | 1441612 | 4513715 | 237,723 | 0,205 |
| G2 | 3 | 1441615 | 4513714 | 238,119 | 0,601 |
| G3 | 6 | 1441617 | 4513712 | 238,647 | 1,129 |
| S2 | 7,5 | 1441619 | 4513712 | 238,774 | 1,256 |
| G4 | 9 | 1441620 | 4513711 | 239,113 | 1,595 |
| G5 | 12 | 1441623 | 4513710 | 239,485 | 1,967 |
| G6 | 15 | 1441626 | 4513709 | 239,926 | 2,408 |
| S3 | 16,5 | 1441627 | 4513708 | 240,189 | 2,671 |
| G7 | 18 | 1441628 | 4513708 | 240,367 | 2,849 |
| G8 | 21 | 1441631 | 4513706 | 240,628 | 3,11 |
| G9 | 24 | 1441634 | 4513705 | 240,923 | 3,405 |
| S4 | 25,5 | 1441635 | 4513705 | 241,067 | 3,549 |
| G10 | 27 | 1441637 | 4513704 | 241,28 | 3,762 |
| G11 | 30 | 1441639 | 4513703 | 241,653 | 4,135 |
| G12 | 33 | 1441642 | 4513702 | 241,971 | 4,453 |
| S5 | 34,5 | 1441644 | 4513702 | 242,073 | 4,555 |
| G13 | 36 | 1441645 | 4513702 | 242,206 | 4,688 |
| G14 | 39 | 1441648 | 4513700 | 242,554 | 5,036 |
| G15 | 42 | 1441651 | 4513699 | 242,754 | 5,236 |
| S6 | 43,5 | 1441652 | 4513699 | 242,818 | 5,3 |
| G16 | 45 | 1441653 | 4513698 | 242,916 | 5,398 |
| G17 | 48 | 1441656 | 4513697 | 243,142 | 5,624 |
| G18 | 51 | 1441659 | 4513696 | 243,317 | 5,799 |
| S7 | 52,5 | 1441660 | 4513696 | 243,402 | 5,884 |
| G19 | 54 | 1441662 | 4513695 | 243,545 | 6,027 |
| G20 | 57 | 1441665 | 4513694 | 243,716 | 6,198 |
| G21 | 60 | 1441667 | 4513693 | 243,784 | 6,266 |
| S8 | 61,5 | 1441669 | 4513693 | 243,827 | 6,309 |
| G22 | 63 | 1441670 | 4513692 | 243,875 | 6,357 |
| G23 | 66 | 1441673 | 4513691 | 243,97 | 6,452 |
| G24 | 69 | 1441676 | 4513690 | 243,989 | 6,471 |
| S9 | 70,5 | 1441677 | 4513690 | 244,021 | 6,503 |

Profilo topografico R/M1



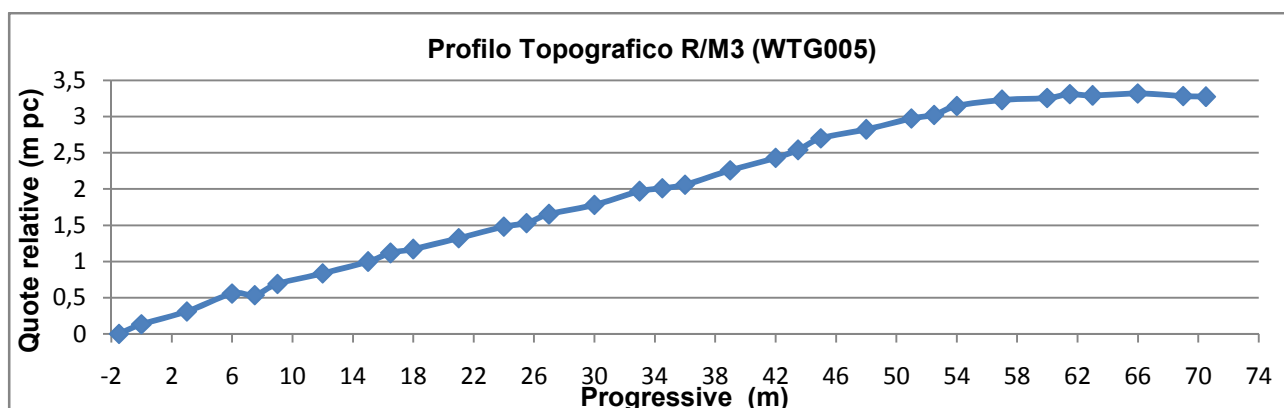
| Nome punto | Progressive (m) | Est (Longitudine) | Nord (Latitudine) | Quota assoluta (m.s.l.m) | Quota Relativa (m.p.c) |
|------------|-----------------|-------------------|-------------------|--------------------------|------------------------|
| S1 | -1,5 | 1440097 | 4516204 | 164,959 | 0,258 |
| G1 | 0 | 1440098 | 4516206 | 164,997 | 0,296 |
| G2 | 3 | 1440099 | 4516208 | 165,094 | 0,393 |
| G3 | 6 | 1440101 | 4516211 | 165,059 | 0,5 |
| S2 | 7,5 | 1440101 | 4516212 | 165,76 | 0,6 |
| G4 | 9 | 1440102 | 4516214 | 165,849 | 0,7 |
| G5 | 12 | 1440103 | 4516216 | 165,86 | 0,8 |
| G6 | 15 | 1440104 | 4516219 | 165,93 | 0,95 |
| S3 | 16,5 | 1440105 | 4516221 | 165,963 | 1,05 |
| G7 | 18 | 1440105 | 4516222 | 166,008 | 1,15 |
| G8 | 21 | 1440107 | 4516225 | 166,089 | 1,25 |
| G9 | 24 | 1440108 | 4516227 | 166,129 | 1,22 |
| S4 | 25,5 | 1440108 | 4516229 | 166,088 | 1,21 |
| G10 | 27 | 1440109 | 4516230 | 166,144 | 1,2 |
| G11 | 30 | 1440110 | 4516233 | 165,817 | 1,15 |
| G12 | 33 | 1440112 | 4516236 | 165,449 | 1 |
| S5 | 34,5 | 1440112 | 4516237 | 165,357 | 0,84 |
| G13 | 36 | 1440113 | 4516238 | 165,389 | 0,75 |
| G14 | 39 | 1440114 | 4516241 | 165,368 | 0,667 |
| G15 | 42 | 1440116 | 4516244 | 165,338 | 0,637 |
| S6 | 43,5 | 1440116 | 4516245 | 165,369 | 0,668 |
| G16 | 45 | 1440117 | 4516247 | 165,369 | 0,668 |
| G17 | 48 | 1440118 | 4516249 | 165,276 | 0,575 |
| G18 | 51 | 1440119 | 4516252 | 165,235 | 0,534 |
| S7 | 52,5 | 1440120 | 4516253 | 165,227 | 0,526 |
| G19 | 54 | 1440120 | 4516255 | 165,243 | 0,542 |
| G20 | 57 | 1440122 | 4516257 | 165,117 | 0,416 |
| G21 | 60 | 1440123 | 4516260 | 165,069 | 0,368 |
| S8 | 61,5 | 1440124 | 4516261 | 165,04 | 0,339 |
| G22 | 63 | 1440124 | 4516263 | 164,958 | 0,257 |
| G23 | 66 | 1440126 | 4516265 | 164,852 | 0,151 |
| G24 | 69 | 1440127 | 4516268 | 164,781 | 0,08 |
| S9 | 70,5 | 1440128 | 4516270 | 164,701 | 0 |

Profilo topografico R/M2



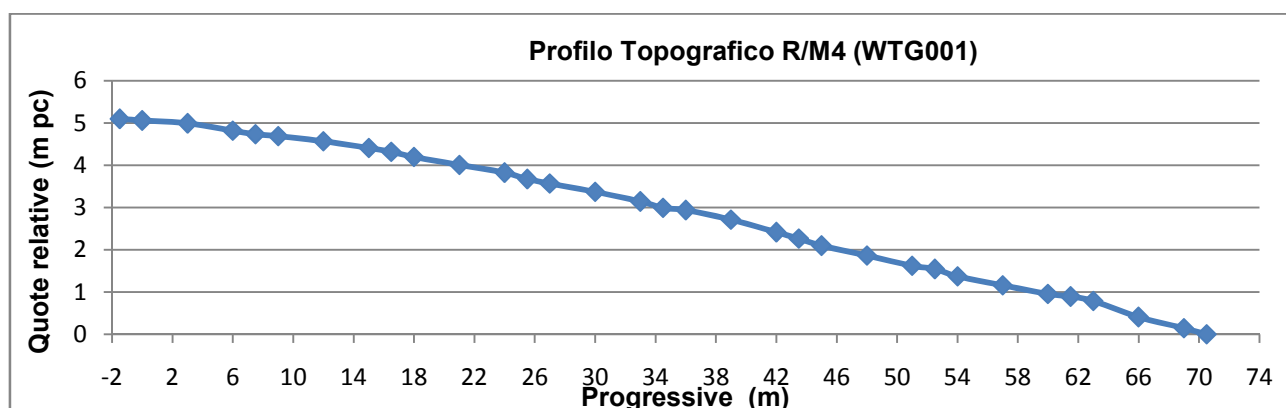
| Nome punto | Progressive (m) | Est (Longitudine) | Nord (Latitudine) | Quota assoluta (m.s.l.m) | Quota Relativa (m.p.c) |
|------------|-----------------|-------------------|-------------------|--------------------------|------------------------|
| S1 | -1,5 | 1439594 | 4515436 | 168,462 | 0 |
| G1 | 0 | 1439594 | 4515437 | 168,596 | 0,134 |
| G2 | 3 | 1439595 | 4515440 | 168,773 | 0,311 |
| G3 | 6 | 1439596 | 4515443 | 169,019 | 0,557 |
| S2 | 7,5 | 1439596 | 4515444 | 168,998 | 0,536 |
| G4 | 9 | 1439596 | 4515446 | 169,152 | 0,69 |
| G5 | 12 | 1439597 | 4515449 | 169,299 | 0,837 |
| G6 | 15 | 1439598 | 4515451 | 169,459 | 0,997 |
| S3 | 16,5 | 1439599 | 4515453 | 169,578 | 1,116 |
| G7 | 18 | 1439599 | 4515454 | 169,631 | 1,169 |
| G8 | 21 | 1439600 | 4515457 | 169,784 | 1,322 |
| G9 | 24 | 1439600 | 4515460 | 169,942 | 1,48 |
| S4 | 25,5 | 1439601 | 4515462 | 169,99 | 1,528 |
| G10 | 27 | 1439601 | 4515463 | 170,113 | 1,651 |
| G11 | 30 | 1439602 | 4515466 | 170,243 | 1,781 |
| G12 | 33 | 1439603 | 4515469 | 170,43 | 1,968 |
| S5 | 34,5 | 1439603 | 4515470 | 170,472 | 2,01 |
| G13 | 36 | 1439603 | 4515472 | 170,522 | 2,06 |
| G14 | 39 | 1439604 | 4515475 | 170,72 | 2,258 |
| G15 | 42 | 1439605 | 4515478 | 170,893 | 2,431 |
| S6 | 43,5 | 1439605 | 4515479 | 171,001 | 2,539 |
| G16 | 45 | 1439606 | 4515481 | 171,161 | 2,699 |
| G17 | 48 | 1439606 | 4515484 | 171,283 | 2,821 |
| G18 | 51 | 1439607 | 4515486 | 171,435 | 2,973 |
| S7 | 52,5 | 1439607 | 4515488 | 171,485 | 3,023 |
| G19 | 54 | 1439608 | 4515489 | 171,609 | 3,147 |
| G20 | 57 | 1439609 | 4515492 | 171,69 | 3,228 |
| G21 | 60 | 1439609 | 4515495 | 171,717 | 3,255 |
| S8 | 61,5 | 1439610 | 4515497 | 171,77 | 3,308 |
| G22 | 63 | 1439610 | 4515498 | 171,751 | 3,289 |
| G23 | 66 | 1439611 | 4515501 | 171,78 | 3,318 |
| G24 | 69 | 1439612 | 4515504 | 171,744 | 3,282 |
| S9 | 70,5 | 1439612 | 4515505 | 171,733 | 3,271 |

Profilo topografico R/M3



| Nome punto | Progressive (m) | Est (Longitudine) | Nord (Latitudine) | Quota assoluta (m.s.l.m) | Quota Relativa (m.p.c) |
|------------|-----------------|-------------------|-------------------|--------------------------|------------------------|
| S1 | -1,5 | 1438216 | 4511512 | 285,961 | 5,093 |
| G1 | 0 | 1438217 | 4511513 | 285,923 | 5,055 |
| G2 | 3 | 1438219 | 4511516 | 285,855 | 4,987 |
| G3 | 6 | 1438221 | 4511518 | 285,686 | 4,818 |
| S2 | 7,5 | 1438222 | 4511519 | 285,602 | 4,734 |
| G4 | 9 | 1438223 | 4511520 | 285,556 | 4,688 |
| G5 | 12 | 1438225 | 4511522 | 285,437 | 4,569 |
| G6 | 15 | 1438227 | 4511525 | 285,278 | 4,41 |
| S3 | 16,5 | 1438228 | 4511526 | 285,184 | 4,316 |
| G7 | 18 | 1438229 | 4511527 | 285,063 | 4,195 |
| G8 | 21 | 1438230 | 4511529 | 284,874 | 4,006 |
| G9 | 24 | 1438232 | 4511532 | 284,689 | 3,821 |
| S4 | 25,5 | 1438233 | 4511533 | 284,539 | 3,671 |
| G10 | 27 | 1438234 | 4511534 | 284,434 | 3,566 |
| G11 | 30 | 1438236 | 4511536 | 284,237 | 3,369 |
| G12 | 33 | 1438238 | 4511538 | 284,009 | 3,141 |
| S5 | 34,5 | 1438239 | 4511540 | 283,86 | 2,992 |
| G13 | 36 | 1438240 | 4511541 | 283,804 | 2,936 |
| G14 | 39 | 1438242 | 4511543 | 283,582 | 2,714 |
| G15 | 42 | 1438244 | 4511545 | 283,28 | 2,412 |
| S6 | 43,5 | 1438245 | 4511546 | 283,133 | 2,265 |
| G16 | 45 | 1438246 | 4511547 | 282,963 | 2,095 |
| G17 | 48 | 1438248 | 4511550 | 282,731 | 1,863 |
| G18 | 51 | 1438250 | 4511552 | 282,491 | 1,623 |
| S7 | 52,5 | 1438251 | 4511553 | 282,411 | 1,543 |
| G19 | 54 | 1438252 | 4511554 | 282,24 | 1,372 |
| G20 | 57 | 1438254 | 4511556 | 282,03 | 1,162 |
| G21 | 60 | 1438255 | 4511559 | 281,824 | 0,956 |
| S8 | 61,5 | 1438256 | 4511560 | 281,76 | 0,892 |
| G22 | 63 | 1438257 | 4511561 | 281,656 | 0,788 |
| G23 | 66 | 1438259 | 4511564 | 281,276 | 0,408 |
| G24 | 69 | 1438261 | 4511566 | 281,013 | 0,145 |
| S9 | 70,5 | 1438262 | 4511567 | 280,868 | 0 |

Profilo topografico R/M4

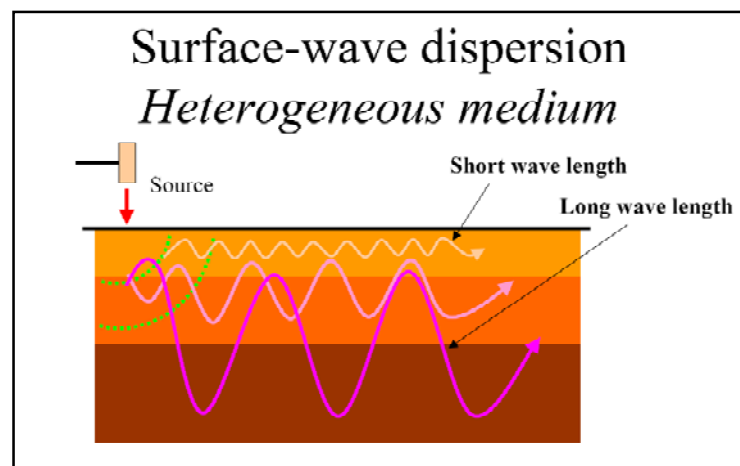


4 INDAGINI SISMICHE: MASW

4.1 Tecnica e parametri utilizzati

“Il metodo MASW (Multichannel Analysis of SurfaceWaves) è una tecnica di indagine non invasiva, 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 (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 rigidità 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 del suolo.” (da *Caratterizzazione sismica dei suoli con il metodo MASW (Multichannel Analysis of SurfaceWaves – V. Roma 2006)*). L'indagine svolta ha visto l'applicazione di tecnica M.A.S.W. di tipo attivo, ossia misura del comportamento dei terreni a seguito di un'energizzazione.



da SAGEEP2003

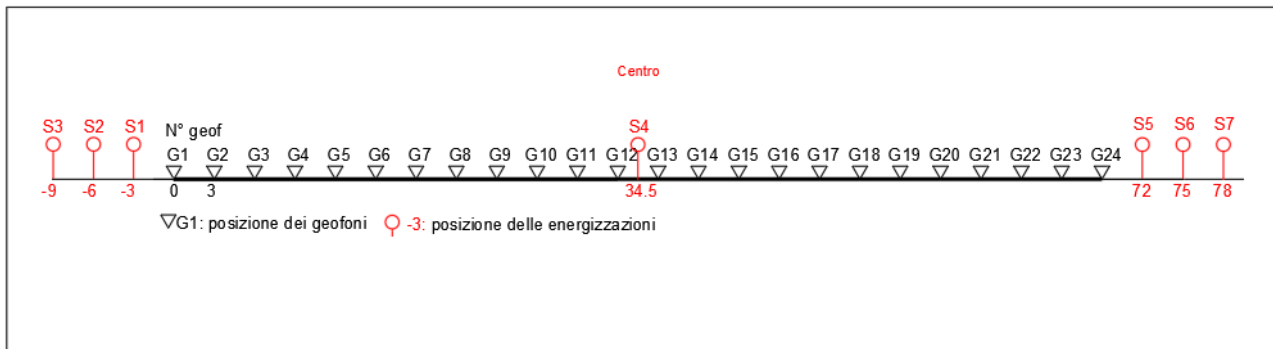
L'indagine si sviluppa mediante la materializzazione sul terreno di una linea retta mediante la posa di una fettuccia metrica. A seguire vengono posizionati i geofoni intervallati ad una distanza pari a 3,0m in funzione anche della disponibilità di spazio. Esternamente alla stesa geofonica, da ora base sismica, a distanza di interesse che può essere pari ad un multiplo della distanza intergeofonica ma anche variabile (in funzione delle disponibilità di cantiere), sia in andata (ovvero in prossimità del geofono 1) che al ritorno (ovvero all'ultimo geofono posizionato sulla base sismica), vengono svolte delle energizzazioni mediante massa battente pari a Kg 10,0. Nel caso in esame, sono state svolte le energizzazioni in “andata” e in “ritorno” con distanza dal geofono 1 e dal geofono 24 crescente e pari a multipli della distanza intergeofonica (v. schema).

Il metodo risulta efficace se la base sismica è ubicata su piano a pendenza costante e per una stratificazione piano parallela al piano topografico. Al fine di svolgere al meglio la campagna geofisica M.A.S.W., è utile che lo sviluppo lineare della base sismica sia limitata in lunghezza secondo i siti.

La maggior profondità di caratterizzazione raggiunta è legata alla minor frequenza registrata. Come già indicato nella figura, una frequenza alta caratterizza gli strati superficiali. La registrazione delle frequenze minori è destinata ai geofoni più lontani dalla sorgente.

Il numero di geofoni utile all'esecuzione ottimale di un'indagine M.A.S.W. è risultato, per il cantiere svolto, di 24 geofoni dei quali sono state utilizzate tutte le tracce. Il tempo dell'acquisizione è stato definito tra 1.00 e 2.00 secondi.

Schema 1. Schema geometrico di acquisizione dei dati per gli stendimenti di lunghezza L=69,0 m



4.2 **Strumentazione utilizzata**

Per l'esecuzione del cantiere d'interesse, ci siamo avvalsi di una strumentazione di acquisizione DoReMi, prodotto dalla SARA electronicinstruments, 24bit con frequenza di campionamento 1000 Hz per ognuno dei canali registrati, ciascuno attrezzato con geofoni verticali SARA electronics con frequenza propria di 4.5 Hz. Per l'energizzazione ci siamo avvalsi di mazza battente da 10 kg impattante su piastra di battuta in duralluminio, diametro 18 cm, spessore 4 cm, peso 2 kg.

4.3 **Elaborazione dei dati**

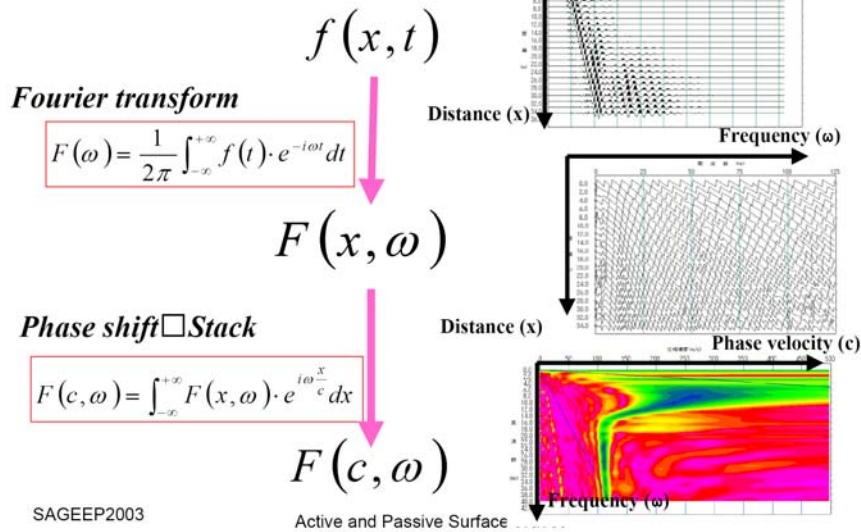
Il metodo interpretativo della M.A.S.W. si compone dei seguenti passaggi di analisi dei segnali acquisiti:

- individuazione della variazione del segnale acquisito nel tempo
- analisi di Fourier con definizione dei contenuti spettrali acquisiti nei segnali
- stacking dello spostamento di fase con definizione delle velocità di rotazione retrograda compatibile con il campo di frequenza definita.

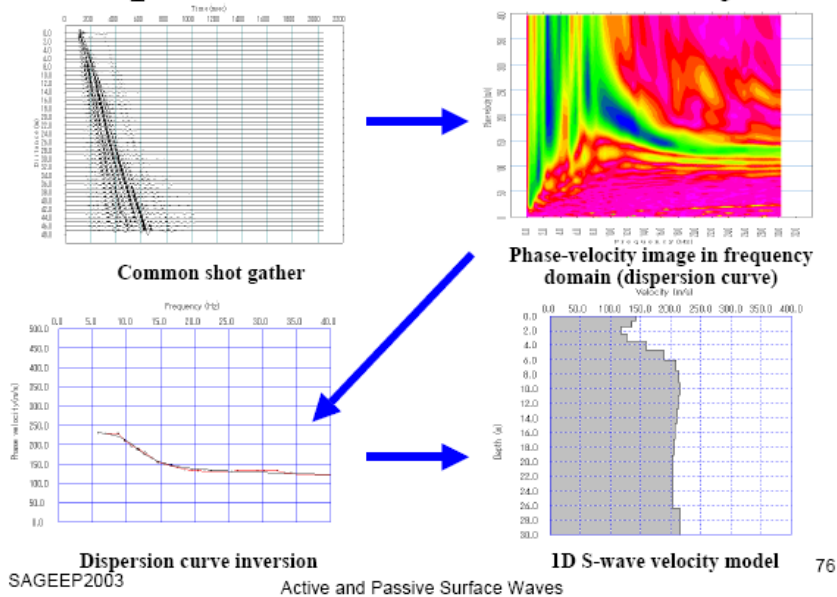
A posteriori dell'analisi matematica del segnale acquisito, definito un modello stratigrafico compatibile con la geologia locale, si provvede all'inversione della curva di dispersione ottenendo la sismo-stratigrafia.

A seguire è indicato il procedimento di elaborazione che ha prodotto il profilo di velocità grazie all'impiego del software ZondST2D.

τ -p transform in Frequency domain (MASW)



Dispersion curve and its analysis



4.4 CATEGORIE DI SOTTOSUOLO - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018)

Le "Norme Tecniche per le Costruzioni" – Decreto del 19/01/2018 definiscono le regole per progettare l'opera sia in zona sismica che in zona non sismica.

Per la valutazione delle azioni sismiche di progetto deve essere valutata l'influenza delle condizioni litologiche e morfologiche locali sulle caratteristiche del moto nel suolo superficiale.

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, l'effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi, da eseguire con le modalità indicate nel § 7.11.3 del citato Decreto. In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II del suddetto decreto, si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, V_S . I valori dei parametri meccanici necessari per le analisi di risposta sismica locale o delle velocità V_S per l'approccio semplificato costituiscono parte integrante della caratterizzazione geotecnica dei terreni compresi nel volume significativo, di cui al § 6.2.2 del Decreto.

I valori di V_S sono ottenuti mediante specifiche prove, tra le quali le MASW costituiscono la metodologia maggiormente adoperata.

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{S,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

con:

h_i spessore dell'*i*-esimo strato;

$V_{S,i}$ velocità delle onde di taglio nell'*i*-esimo strato;

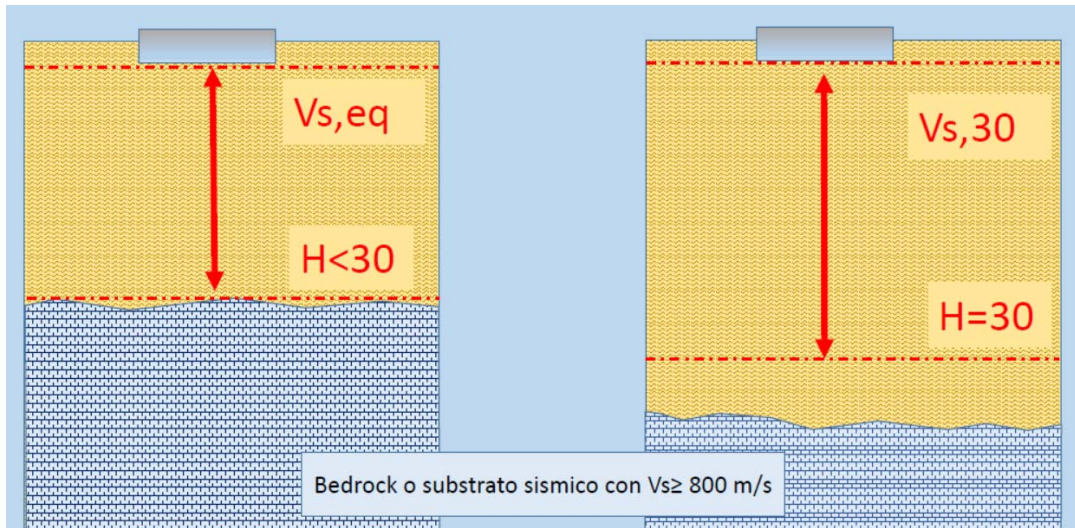
N numero di strati;

H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_S non inferiore a 800 m/s.

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato H è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera. Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della fondazione (v. schema seguente).

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{S,eq}$ è definita dal parametro $V_{S,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Schema di Calcolo delle $V_{s,eq}$ e delle $V_{s,30}$



Le categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato sono definite in Tab. 3.2.II.

Per queste cinque categorie di sottosuolo, le azioni sismiche sono definibili come descritto al § 3.2.3 delle NTC 2018. Per qualsiasi condizione di sottosuolo non classificabile nelle categorie precedenti, è necessario predisporre specifiche analisi di risposta locale per la definizione delle azioni sismiche.

Tabella 3.2.II. Categorie di sottosuolo (Fonte NTC 2018)

| Categoria | Descrizione |
|-----------|--|
| A | <i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m. |
| B | <i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s. |
| C | <i>Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s. |
| D | <i>Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s. |
| E | <i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m. |

4.5 VALORI DI VELOCITÀ DELLE ONDE P ED S PER I PRINCIPALI LITOTIPI

Nella seguente tabella si riportano i valori di velocità delle onde P ed S dei principali litotipi riferibili anche al contesto geologico in esame (Fonte: Hearey e Brooks 1991, Bala et al 2005, Corrao e Coco 2006, bibliografia specialistica reperibile in rete).

| Litotipi | Vp [m/s] min-max | Vs [m/s] min-max |
|--|---------------------|---------------------|
| TERRENI E ACQUA | | |
| Alluvioni | 400 - 2000 | 200 - 800 |
| Sabbia asciutta | 200 - 1000 | 80 - 400 |
| Sabbia satura (in funzione anche del grado di saturazione) | 600 - 2300 | 250 - 450 |
| Sabbia siltosa | 600 - 1900 | 200 - 600 |
| Sabbia e ghiaia | 300 - 1800 | 300 - 600 |
| Limo | 650 - 1250 | 240 - 480 |
| Argilla | 1000 - 2500 | 300 - 600 |
| Argilla sabbiosa | 600 - 2500 | 200 - 450 |
| Acqua | 1450 - 1500 | 0 |
| ROCCE SEDIMENTARIE | | |
| Argillite | 2100 - 4400 | 550 - 2100 |
| Arenaria | 1500 - 6000 | 950 - 3100 |
| Arenaria fratturate | 800 - 2100 | 360 - 950 |
| Calcere | 2000 - 7000 | 1000 - 3300 |
| Calcere fratturato | 750 - 1500 | 330 - 1000 |
| Calcarenite | 1400 - 4400 | 800 - 2500 |
| Calcarenite fratturata | 600 - 1300 | 330 - 800 |
| Marna | 1500 - 4500 | 600 - 1.500 |
| ROCCE IGNEE | | |
| Basalto | 1800 - 5000 | 1000 - 3000 |
| Basalto fratturato | 950 - 1350 | 480 - 700 |
| Granitoidi | 1600 - 5000 | 900 - 3000 |
| Granitoidi fratturati | 1000 - 1750 | 500 - 900 |
| Piroclastite coerente | 750 - 2500 | 350 - 1100 |
| Piroclastite incoerente | 350 - 1000 | 160 - 450 |

In particolare si ricorda che le velocità delle onde P misurate per terreni perfettamente saturi ($S_r = 100\%$) dipendono talora in maniera decisiva dalle vibrazioni trasmesse dal fluido interstiziale e non dallo scheletro solido del materiale e perciò tale valore può non essere rappresentativo delle proprietà meccaniche del materiale in questione. Invece le velocità delle onde S sono caratteristiche delle vibrazioni trasmesse prevalentemente dal solo scheletro solido e perciò rappresentative delle proprietà meccaniche del terreno. Ne consegue che per alcuni terreni al di sotto della falda le uniche onde in grado di fornire informazioni precise sulla rigidità del terreno sono quelle di taglio (S).

4.6 DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DI DEFORMAZIONE E DI RESISTENZA AL TAGLIO DALLE INDAGINI SISMICHE

Di seguito si indicano le correlazioni bibliografiche che possono essere utilizzate per il calcolo dei parametri di deformazione dinamici calcolati tramite correlazione bibliografica dei parametri di input V_p , V_s e densità per ciascun sismostrato definito dalle indagini geofisiche.

$$\text{Coefficiente di Poisson } \nu = \frac{V_p^2 - 2 V_s^2}{2 (V_p^2 - V_s^2)}$$

$$\text{Modulo di Young dinamico } E_d = \gamma V_s^2 [(3V_p^2 - 4 V_s^2)/(V_p^2 - V_s^2)]$$

$$\text{Modulo di taglio (rigidità) } G_0 = \gamma V_s^2$$

$$\text{Modulo di comprimibilità o di Bulk } K = \gamma (V_p^2 - 4/3 V_s^2)$$

Determinazione del modulo di Young statico E_s

Per la determinazione del modulo di Young statico E_s dal modulo dinamico E_{din} si può applicare la nota relazione proposta da Rzhevsky e Novik (1971) valida per i moduli misurati in MPa o Kg/cm²:

$$E_{stat} = \frac{E_{din} - 0.97}{8.3}$$

Per gli ammassi rocciosi la bibliografia specialistica suggerisce di applicare un coefficiente pari a 0,8-1,0 per la roccia integra e un coefficiente via via più basso per quelle fratturate in relazione al grado di fratturazione.

$$E_{stat} = E_{din} \times (0.3/1.0)$$

Si sottolinea tuttavia come i valori ottenuti con la suddetta formulazione sia un modulo di elasticità e quindi non può essere utilizzato per determinare ad esempio cedimenti di fondazione quando il carico delle fondazioni da luogo a elevate deformazioni (superiori al limite di elasticità) poiché in quei casi la componente plastica è predominante su quella elastica.

Correlazioni con N_{spt} e parametri geotecnici

Nella letteratura specializzata sono ormai reperibili moltissime correlazioni tra il numero di colpi (N_{spt}) del Penetrometro Standard e la velocità delle onde di taglio (V_s). Le principali correlazioni sono di tipo esponenziale, con $N_{spt} = (V_s / \alpha)^\beta$ con i coefficienti α e β variabili in funzione del tipo di terreno. Si ricorda che il numero di colpi di cui si parla è quello necessario per far avanzare di 30 cm nel terreno la punta del campionatore Raymond standard.

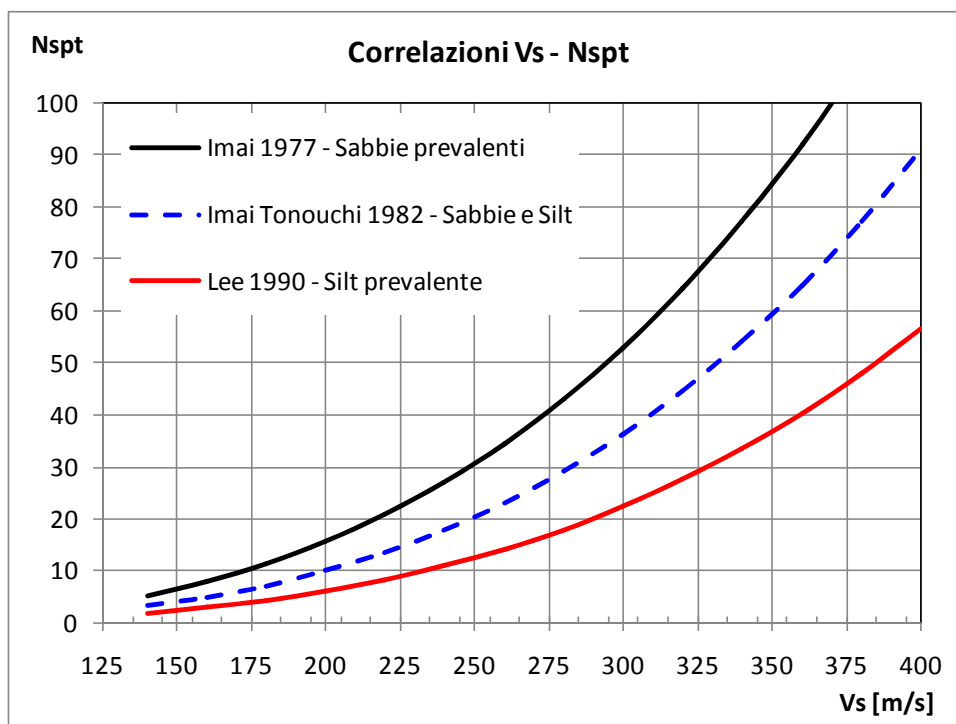
A tale scopo si illustrano le correlazioni proposte da Imai 1977, Imai e Tonuchi (1982) e Lee (1990) valide per tre differenti tipologie di terreni che caratterizzano in genere tutti i terreni:

$$N_{SPT} = \left(\frac{V_s}{80,6} \right)^{3,021} \text{ valida per i terreni prevalentemente sabbiosi - Imai (1977)}$$

$$N_{SPT} = \left(\frac{V_s}{97,0} \right)^{3,184} \text{ valida per i terreni misti sabbioso-siltosi - Imai e Tonuchi (1982)}$$

$$N_{SPT} = \left(\frac{V_s}{114,43} \right)^{3,226} \text{ valida per terreni prevalentemente fini/siltosi - Lee (1990)}$$

Dove: N_{spt} = numero di colpi del Penetrometro Standard e V_s = Velocità delle onde di taglio



Noto il valore di Nspt si calcolano i seguenti parametri geotecnici dei terreni:

| Parametri geotecnici | Metodologie – Relazioni |
|---|---|
| Resistenza al taglio φ | <p><u>Terreni sabbiosi</u> Entro i 6 m di profondità- Peck-Hanson&Thornburn, $\varphi = 0,28 Nspt + 27,2$ Oltre i 6 m di profondità- Japanese National Railway, $\varphi = 0,30 Nspt + 27$</p> <p><u>Terreni: sabbie fini o limose</u> $\varphi = \sqrt{15Nspt + 15}$</p> |
| Modulo di deformazione E (o di Young) | <p>Schmertmann (valido per sabbie e terreni prevalentemente sabbiosi) $E(Kg/cm^2) = 2B Nspt$ dove B=4 (sabbia fine), B=6 (sabbia media), B=10 (sabbia grossolana)</p> <p>D'Appolonia et Alii. (valido per sabbia+ghiaia e sabbie sovraconsolidate) $E (Kg/cm2) = 7,71 Nspt + 191$ (ghiaia + sabbia)</p> <p>Tornaghi(valido per sabbia + ghiaia) $E (MPa) = B \sqrt{Nspt}$ (B=7 MPa)</p> |

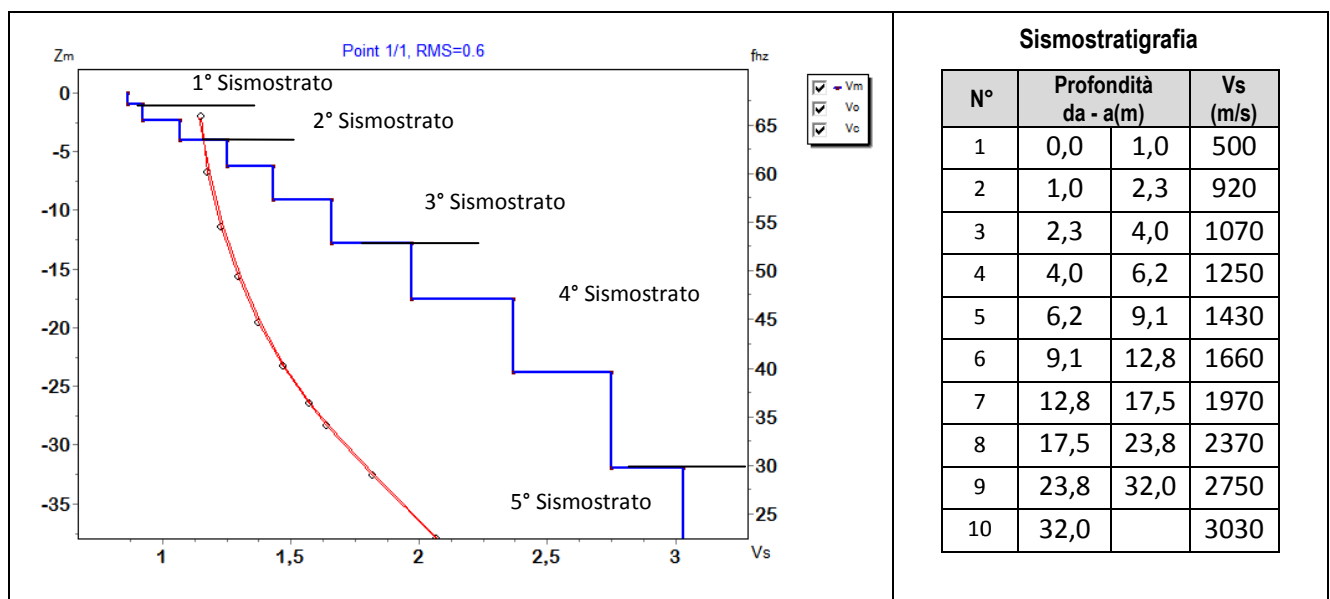
4.7 MASW: RISULTATI

4.7.1 MASW M1 (WTG012)

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento M1, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio Vs.

| Profondità [m sotto il pc] | Descrizione |
|----------------------------|---|
| 0 – 1,0 | 1° sismostrato con Vs di 500m/s , Terremolto addensate |
| 1,0– 4,0 | 2° sismostrato con Vs tra 920 e 1070 m/s , Substrato roccioso fratturato |
| 4,0– 12,8 | 3° sismostrato con Vs tra 1250 e 1660 m/s , Substrato roccioso debolmente fratturato |
| 12,8– 32,0 | 4° sismostrato con Vs tra 1970 e 2750m/s , Substrato roccioso sano |
| >32,0 | 5° sismostrato con Vs di 3030m/s , Substrato roccioso sano |

MASW M1 - PROFILO Vs



La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

con:

h_i spessore dell'*i*-esimo strato;

$V_{s,i}$ velocità delle onde di taglio nell'*i*-esimo strato;

N numero di strati;

H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato **1,0 m** ($V_s > 800$ m/s), che dà luogo ad una Categoria A di sottosuolo, ossia:

Categoria A: Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.

Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Nella **tabella 4** si illustrano i parametri di deformazione dinamici medi calcolati tramite correlazione bibliografica dei parametri di input Vs, e Vp e densità (da bibliografia/correlazione) per ciascun sismostrato definito dalle indagini eseguite.

Tabella 4. Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

| Sismostrato | Prof/zona | CT* | Densità γ | Vp | Vs | Coefficiente di Poisson ν | Modulo di Young dinamico Ed | Modulo di Young statico Ed | Modulo di taglio G_0 | Modulo di comprimibilità o di Bulk - K |
|-------------|-----------|-----|----------------------|-------|-------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------|--|
| | | | [Kg/m ³] | [m/s] | [m/s] | | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| 1 | 0,0-1,0 | 10% | 1.900 | 1.000 | 500 | 0,33 | 1.265 | 127 | 471 | 1.265 |
| 2 | 1,0-4,0 | 10% | 2.000 | 1.990 | 995 | 0,33 | 5.276 | 528 | 1.981 | 5.276 |
| 3 | 4,0-12,8 | 15% | 2.100 | 2.910 | 1.455 | 0,33 | 11.856 | 1.778 | 4.442 | 11.856 |
| 4 | 12,8-32,0 | 20% | 2.200 | 4.720 | 2.360 | 0,33 | 32.676 | 6.535 | 12.249 | 32.676 |
| 5 | >32,0 | 40% | 2.300 | 6.060 | 3.030 | 0,33 | 56.311 | 22.524 | 21.114 | 56.311 |

Indicazioni per la determinazione di Nspt e parametri geotecnici

Sulla base delle correlazioni fornite nei precedenti paragrafi è possibile stimare una correlazione tra Vs e Nspt, i parametri di resistenza al taglio e di deformazione. Nel caso in esame trattandosi di materiali a granulometria grossolana si consiglia di impiegare la correlazione di Imai (1977) di seguito indicata.

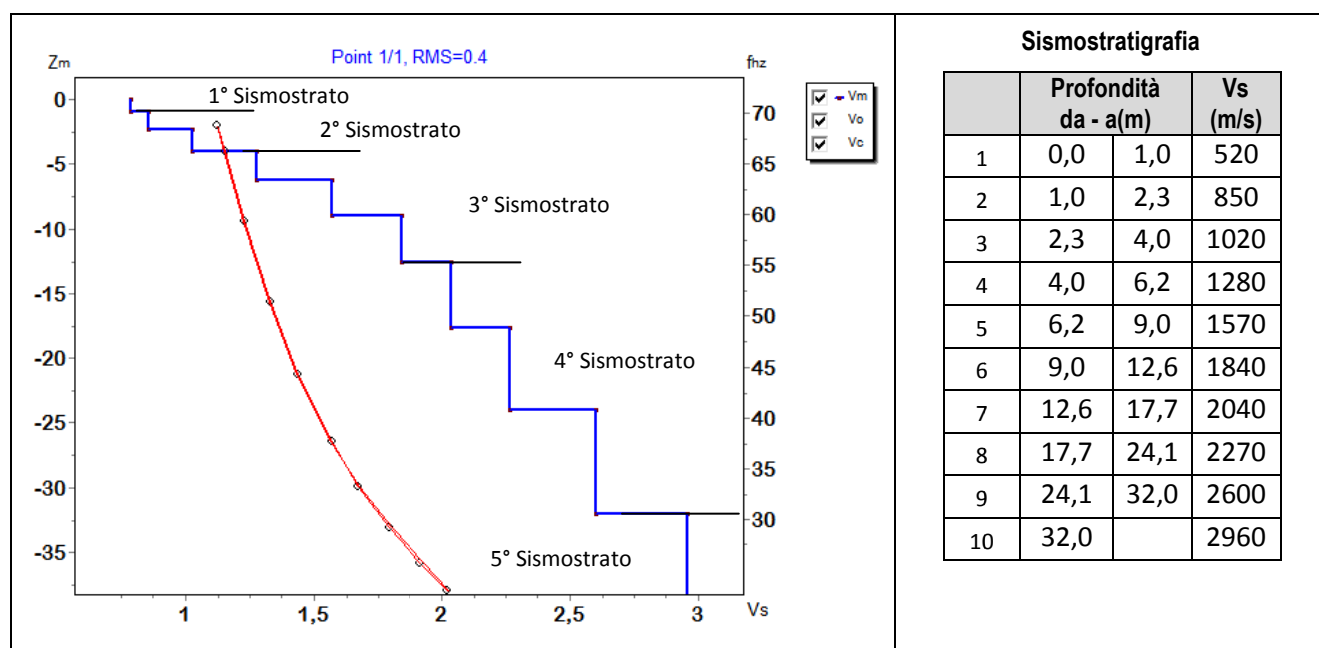
$$N_{SPT} = \left(\frac{V_s}{80,6} \right)^{3,021} \text{ valida per i terreni prevalentemente sabbiosi - Imai (1977)}$$

4.7.2 MASW M2 (WTG006)

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento M2, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio Vs.

| Profondità [m sotto il pc] | Descrizione |
|----------------------------|--|
| 0,0 – 1,0 | 1° sismostrato con Vs di 520m/s , Terremolto addensate |
| 1,0 – 4,0 | 2° sismostrato con Vs tra 850 e 1020 m/s , Substrato roccioso fratturato |
| 4,0 – 12,6 | 3° sismostrato con Vs tra 1280e 1840 m/s Substrato roccioso debolmente fratturato |
| 12,6– 32,0 | 4° sismostrato con Vs tra 2040 e 2600 m/s , Substrato roccioso sano |
| >32,0 | 5° sismostrato con Vs di 2960m/s , Substrato roccioso sano |

MASW M2 - PROFILO Vs



La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

con:

h_i spessore dell'*i*-esimo strato;

$V_{s,i}$ velocità delle onde di taglio nell'*i*-esimo strato;

N numero di strati;

H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato **1,0 m** ($V_s > 800$ m/s), che dà luogo ad una Categoria A di sottosuolo, ossia:

Categoria A: Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.

Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Nella **tabella 5** si illustrano i parametri di deformazione dinamici medi calcolati tramite correlazione bibliografica dei parametri di input V_s , e V_p e densità (da bibliografia/correlazione) per ciascun sismostrato definito dalle indagini eseguite.

Tabella 5. Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

| Sismostrato | Prof/zona | CT* | Densità γ | V_p | V_s | Coefficiente di Poisson ν | Modulo di Young dinamico E_d | Modulo di Young statico E_d | Modulo di taglio G_0 | Modulo di comprimibilità o di Bulk - K |
|-------------|-----------|-----|----------------------|-------|-------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------|--|
| | | | [Kg/m ³] | [m/s] | [m/s] | | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| 1 | 0,0-1,0 | 10% | 1.900 | 1.040 | 520 | 0,33 | 1.373 | 137 | 510 | 1.373 |
| 2 | 1,0-4,0 | 10% | 2.000 | 1.870 | 935 | 0,33 | 4.658 | 466 | 1.746 | 4.658 |
| 3 | 4,0-12,6 | 15% | 2.100 | 3.120 | 1.560 | 0,33 | 13.631 | 2.045 | 5.109 | 13.631 |
| 4 | 12,6-32,0 | 20% | 2.200 | 4.640 | 2.320 | 0,33 | 31.578 | 6.316 | 11.837 | 31.578 |
| 5 | >32,0 | 40% | 2.300 | 5.920 | 2.960 | 0,33 | 53.741 | 21.497 | 20.153 | 53.741 |

Indicazioni per la determinazione di N_{spt} e parametri geotecnici

Sulla base delle correlazioni fornite nei precedenti paragrafi è possibile stimare una correlazione tra V_s e N_{spt} , i parametri di resistenza al taglio e di deformazione. Nel caso in esame trattandosi di materiali a granulometria grossolana si consiglia di impiegare la correlazione di Imai (1977) di seguito indicata.

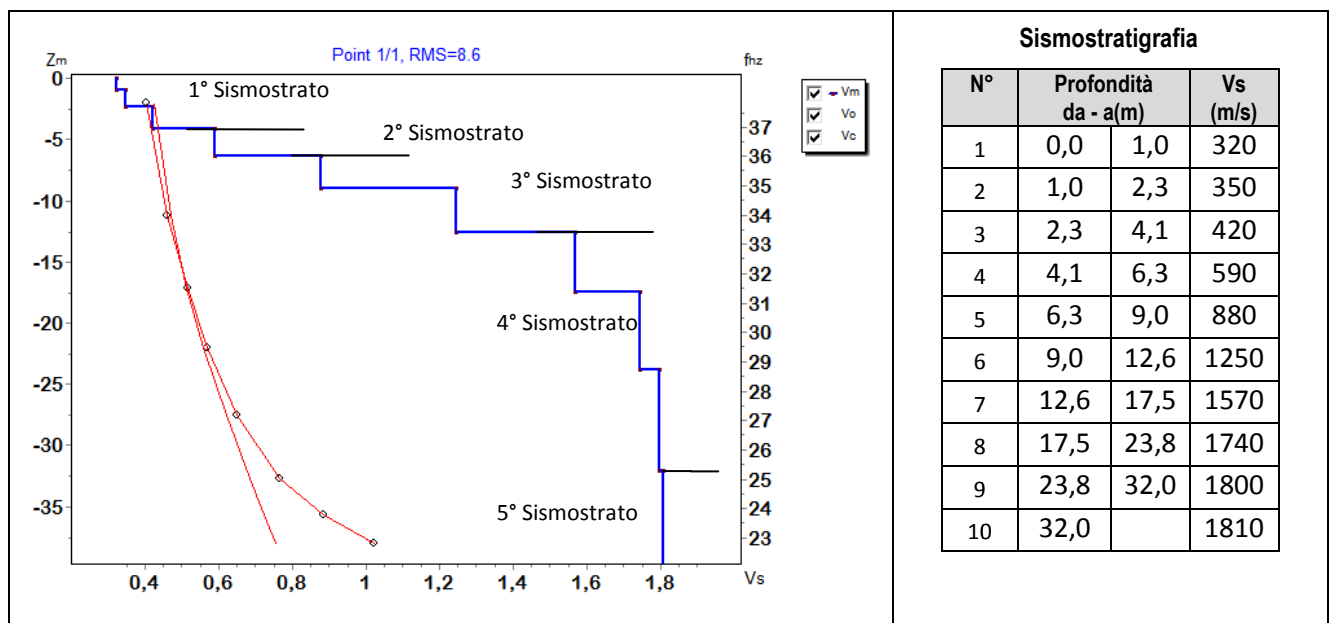
$$N_{SPT} = \left(\frac{V_s}{80,6} \right)^{3,021} \text{ valida per i terreni prevalentemente sabbiosi - Imai (1977)}$$

4.7.3 MASW M3 (WTG005)

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento M3, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio Vs.

| Profondità [m sotto il pc] | Descrizione |
|----------------------------|--|
| 0 – 4,1 | 1° sismostrato con Vs tra 320 e 420 m/s , Terremediamente addensate |
| 4,1– 6,3 | 2° sismostrato con Vs di 590 m/s , Roccia intensamente fratturata |
| 6,3– 12,6 | 3° sismostrato con Vs tra 880 e 1250m/s Substrato roccioso fratturato |
| 12,6– 32,0 | 4° sismostrato con Vs tra 1570 e 1800m/s , Substrato roccioso debolmente fratturato |
| >32,0 | 5° sismostrato con Vs di 1810m/s , Substrato roccioso sano |

MASW M3 - PROFILO Vs (Vs eq da p.c= 425 m/s)



La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, Vs,eq (in m/s), definita dall'espressione

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

con:

h_i spessore dell'*i*-esimo strato;

$V_{S,i}$ velocità delle onde di taglio nell'*i*-esimo strato;

N numero di strati;

H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato **6,3 m** ($V_s > 800$ m/s).

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **6,3 m** di profondità dal p.c. è pari a: **$V_s eq = 6,3/0,01481 = 425$ m/s** che dà luogo ad una categoria B, ossia:

Categoria B: Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Nella **tabella 6** si illustrano i parametri di deformazione dinamici medi calcolati tramite correlazione bibliografica dei parametri di input Vs, e Vp e densità (da bibliografia/correlazione) per ciascun sismostrato definito dalle indagini eseguite.

Tabella 6. Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

| Sismostrato | Prof/zona | CT* | Densità γ | Vp | Vs | Coefficiente di Poisson ν | Modulo di Young dinamico Ed | Modulo di Young statico Ed | Modulo di taglio G_0 | Modulo di comprimibilità o di Bulk - K |
|-------------|-----------|-----|----------------------|-------|-------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------|--|
| | | | [Kg/m ³] | [m/s] | [m/s] | | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| 1 | 0,0-4,1 | 10% | 1.800 | 740 | 370 | 0,33 | 657 | 66 | 245 | 657 |
| 2 | 4,1-6,3 | 10% | 1.900 | 1.180 | 590 | 0,33 | 1.765 | 177 | 657 | 1.765 |
| 3 | 6,3-12,6 | 15% | 2.000 | 2.130 | 1.065 | 0,33 | 6.051 | 908 | 2.265 | 6.051 |
| 4 | 12,6-32,0 | 20% | 2.100 | 3.370 | 1.685 | 0,33 | 15.897 | 3.179 | 5.963 | 15.897 |
| 5 | >32,0 | 40% | 2.200 | 3.620 | 1.810 | 0,33 | 19.221 | 7.689 | 7.208 | 19.221 |

Indicazioni per la determinazione di Nspt e parametri geotecnici

Sulla base delle correlazioni fornite nei precedenti paragrafi è possibile stimare una correlazione tra Vs e Nspt, i parametri di resistenza al taglio e di deformazione. Nel caso in esame trattandosi di materiali a granulometria grossolana si consiglia di impiegare la correlazione di Imai (1977) di seguito indicata.

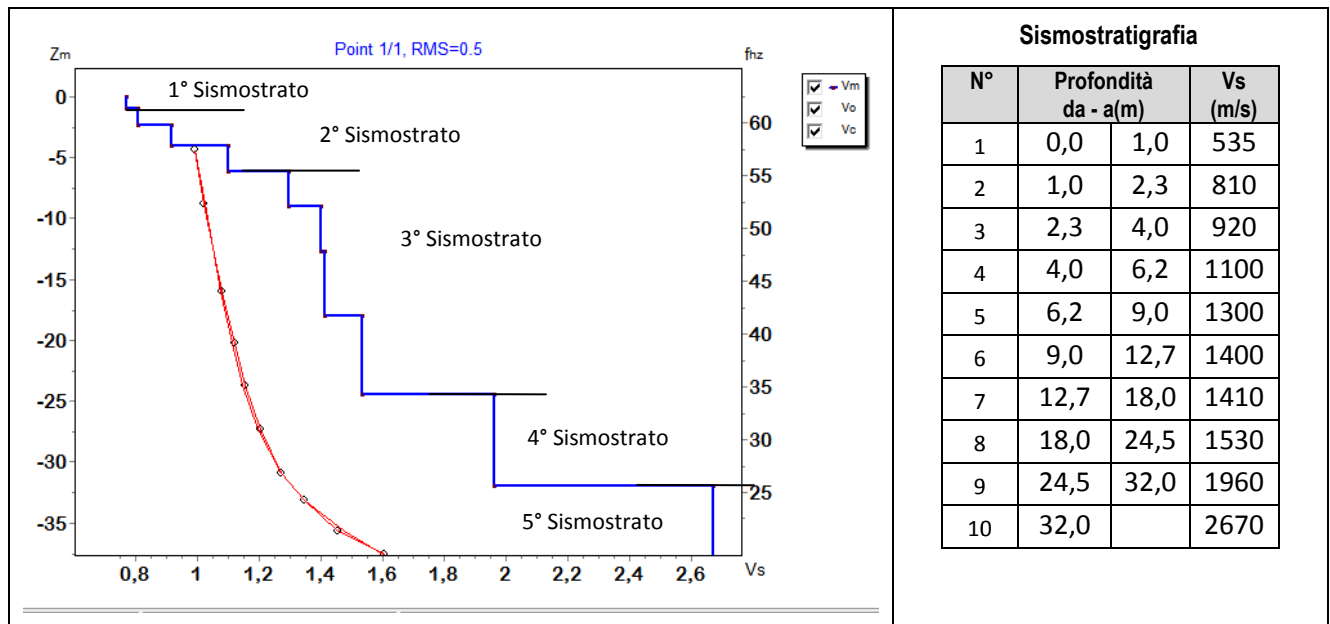
$$N_{SPT} = \left(\frac{V_s}{80,6} \right)^{3,021} \text{ valida per i terreni prevalentemente sabbiosi - Imai (1977)}$$

4.7.4 MASW M4 (WTG001)

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento M4, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio Vs.

| Profondità [m sotto il pc] | Descrizione |
|----------------------------|---|
| 0,0 – 1,0 | 1° sismostrato con Vs di 535m/s , Terremoltoaddensate |
| 1,0– 6,2 | 2° sismostrato con Vs tra 810e1100 m/s , Substrato roccioso fratturato |
| 6,2– 24,5 | 3° sismostrato con Vs tra 1300 e1530m/s Substrato debolmentefratturato |
| 24,5– 32,0 | 4° sismostrato con Vs di 1960m/s , Substrato roccioso sano |
| >32,0 | 5° sismostrato con Vs di 2670m/s , Substrato roccioso sano |

MASW M4 - PROFILO Vs



La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, Vs,eq (in m/s), definita dall'espressione

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

con:

h_i spessore dell'*i*-esimo strato;

$V_{S,i}$ velocità delle onde di taglio nell'*i*-esimo strato;

N numero di strati;

H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato **1,0 m** ($V_s > 800$ m/s), che dà luogo ad una Categoria A di sottosuolo, ossia:

Categoria A: Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.

Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Nella **tabella 6** si illustrano i parametri di deformazione dinamici medi calcolati tramite correlazione bibliografica dei parametri di input V_s , e V_p e densità (da bibliografia/correlazione) per ciascun sismostrato definito dalle indagini eseguite.

Tabella 6. Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

| Sismostrato | Prof/zona | CT* | Densità γ | V_p | V_s | Coefficiente di Poisson ν | Modulo di Young dinamico E_d | Modulo di Young statico E_d | Modulo di taglio G_0 | Modulo di comprimibilità o di Bulk - K |
|-------------|-----------|-----|----------------------|-------|-------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------|--|
| | | | [Kg/m ³] | [m/s] | [m/s] | | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| 1 | 0,0-1,0 | 10% | 1.900 | 1.070 | 535 | 0,33 | 1.451 | 145 | 539 | 1.451 |
| 2 | 1,0-6,2 | 10% | 2.000 | 1.910 | 955 | 0,33 | 4.864 | 486 | 1.824 | 4.864 |
| 3 | 6,2-24,5 | 15% | 2.100 | 2.830 | 1.415 | 0,33 | 11.209 | 1.681 | 4.207 | 11.209 |
| 4 | 24,5-32,0 | 20% | 2.200 | 3.920 | 1.960 | 0,33 | 22.536 | 4.507 | 8.453 | 22.536 |
| 5 | >32,0 | 40% | 2.300 | 5.340 | 2.670 | 0,33 | 43.729 | 17.491 | 16.397 | 43.729 |

Indicazioni per la determinazione di N_{spt} e parametri geotecnici

Sulla base delle correlazioni fornite nei precedenti paragrafi è possibile stimare una correlazione tra V_s e N_{spt} , i parametri di resistenza al taglio e di deformazione. Nel caso in esame trattandosi di materiali a granulometria grossolana si consiglia di impiegare la correlazione di Imai (1977) di seguito indicata.

$$N_{SPT} = \left(\frac{V_s}{80,6} \right)^{3,021} \text{ valida per i terreni prevalentemente sabbiosi - Imai (1977)}$$

5 SISMICA A RIFRAZIONE

In ambito d'indagine indirette l'esplorazione geofisica di sismica a rifrazione in onde P risulta tra le metodologie più affermate e meglio sperimentate. Il metodo si basa sugli effetti di rifrazione del segnale sismico in corrispondenza dell'interfaccia tra un mezzo soprastante a velocità sismica minore rispetto ad uno strato sottostante al primo con velocità sismica inferiore.

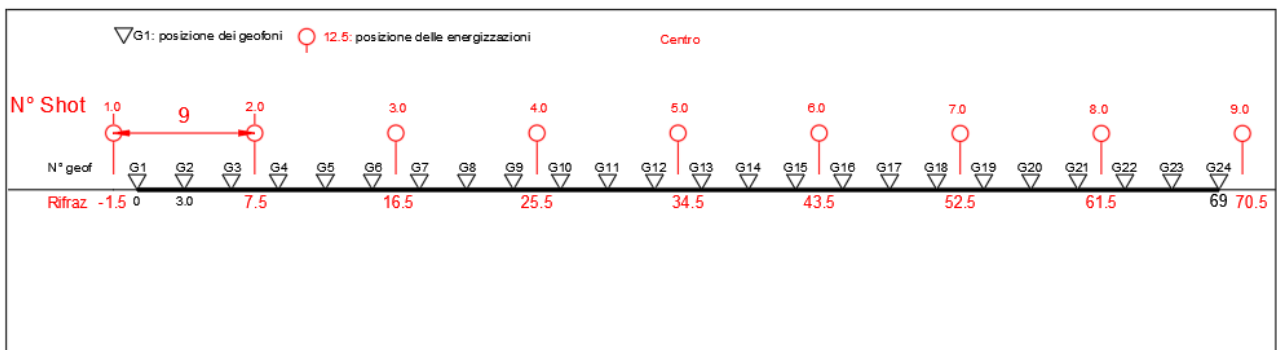
La tecnica di prospezione sismica a rifrazione consiste nella misura dei tempi di primo arrivo delle onde sismiche generate in un punto in superficie (punto di energizzazione/sparo), in corrispondenza di una molteplicità di ricevitori (geofoni) disposti allineati sulla superficie topografica.

Varie metodologie di interpretazione si sono susseguite nel tempo, passando dalle valutazioni di spessori e velocità in funzione del tempo all'intercetta fino a giungere alle più classiche interpretazioni mediante il General Reciprocal Method di Palmer '72.

Lo studio della propagazione delle onde sismiche consente di valutare le proprietà fisico - meccaniche dei terreni e il grado di addensamento e/o la compattezza dei materiali da queste attraversati. Le profondità raggiunte sono al massimo la metà della distanza compresa tra lo shot esterno e l'ultimo geofono della stesa sismica sviluppata. È comunque generalmente considerato che la profondità esplorata non superi 1/3 dello sviluppo geometrico sopradescritto. La capacità risolutiva in termini di spessore degli strati sismici viene ad essere valutato in circa il 25/30% della distanza geofonica.

Nel caso in esame, in funzione della lunghezza degli stendimenti sono state eseguite 9 energizzazioni-shot rispettivamente per tutti gli stendimenti, al fine di meglio descrivere la geometria degli orizzonti rifrattori lungo l'intera base sismica come meglio specificato nello schema di seguito rappresentato.

Schema delle acquisizioni di sismica a rifrazione in onde P



Schema 2: Stendimento di sismica a rifrazione in onde P con 24geofoni,interdistanza di 3,0 m, lunghezza complessiva 69,0 m

5.1 Strumentazione utilizzata

Per l'indagine eseguita è stata impiegata una strumentazione di acquisizione modello DoReMi a 24 bit, prodotto dalla SARA electronicsinstruments, con frequenza di campionamento 5000 Hz per ognuno dei canali registrati, ciascuno attrezzato con geofoni verticali e orizzontali della SARA electronics con frequenza propria di 10 Hz. Il numero di canali è risultato pari a n° 24 per tutti gli stendimenti.

Per l'energizzazione delle onde P ci siamo avvalsi di una mazza battente da 10 kg impattante verticalmente su piastra di battuta in duralluminio, diametro 18 cm, spessore 4 cm, peso 2 kg.

La quota relativa di ciascun geofono-shot è stata rilevata tramite GPS differenziale STONEX S70G in modo da poter ricostruire la morfologia del terreno e utilizzarla in fase di elaborazione dei dati acquisiti.

5.2 Elaborazione dei dati

I dati delle prospezioni sono costituiti dalla geometria d'acquisizione (posizioni e quote relative dei punti scoppio e dei geofoni) e dai tempi di primo arrivo delle onde elastiche di compressione (onde P), determinati manualmente sulle registrazioni riprodotte a schermo (picking dei primi arrivi).

La qualità dei dati è risultata nel complesso buona e il picking è stato realizzato facilmente per tutte le basi sismiche. Nelle figure che seguono si riportano alcune schermate delle operazioni eseguite.

L'inversione dei dati è stata eseguita secondo i criteri della tomografia sismica, mediante apposito software specialistico basato su tecniche di ottimizzazione non lineare. La sovrapposizione tra dromocrone sperimentali e calcolate ha portato a valori ottimi con valori dell'RMS<5%.

In particolare, l'elaborazione dei dati di sismica a rifrazione è stata eseguita secondo il metodo tomografico impiegando il software Rayfract4.01, che parte da un modello iniziale generato con la tecnica Deltat-V. Successivamente viene effettuata l'inversione iterativa del modello con la tecnica WET (WavepathEikonalTraveltime tomography processing) che analizza la propagazione dei vari fronti d'onda generati nei punti di tiro fino ad ogni geofono.

Il modello stratigrafico ottenuto come insieme di elementi caratterizzati da una specifica velocità viene quindi rappresentato mediante il contour a linee di isovelocità. La colorazione dei vari elementi secondo una scala cromatica riferita a specifici intervalli di velocità facilita l'immediata visione dei risultati

Figura 1: Sismogramma shot a 70,5 m di R1

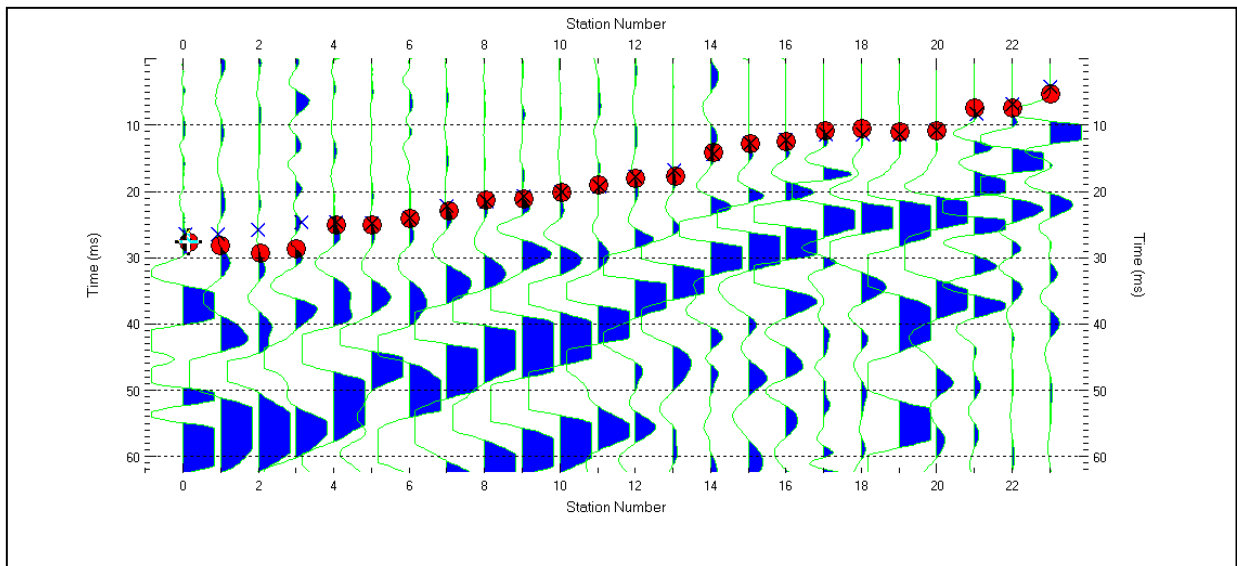


Figura 2: Sismogramma shot a 43,5 m di R2

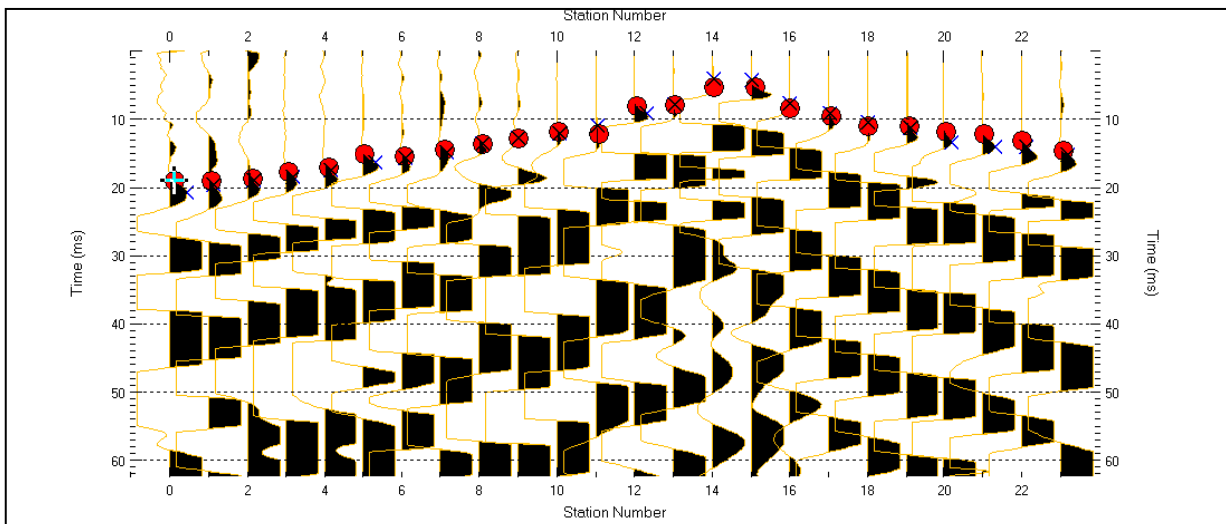


Figura 3: Sismogramma shot a 70,0 m di R3

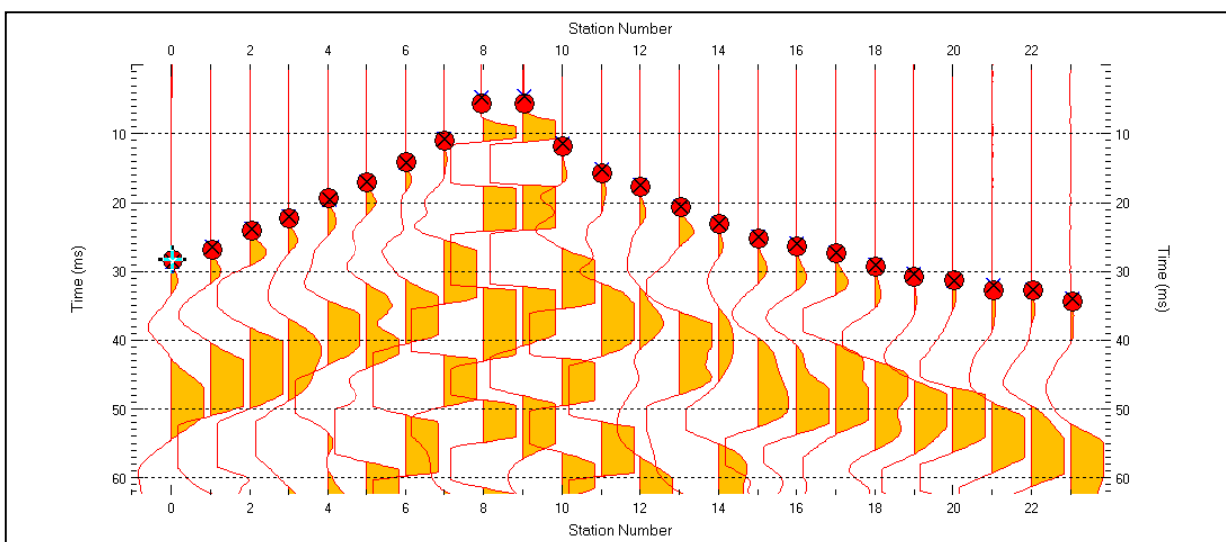
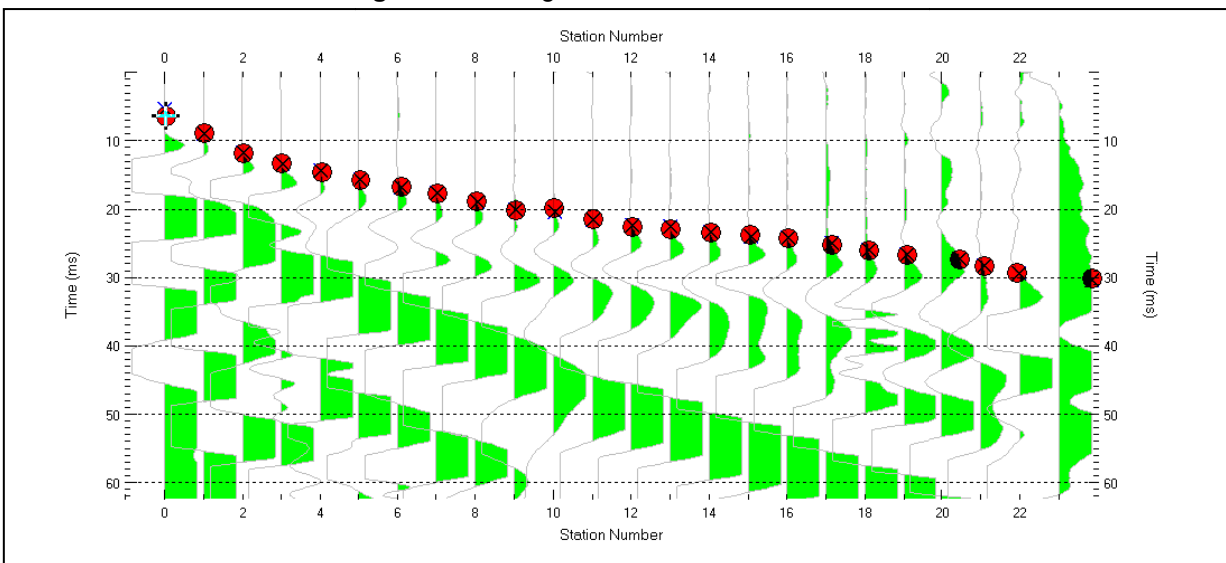


Figura 4: Sismogramma shot a 41,0 m di R4



5.3 Valutazione della escavabilità delle rocce

Per escavabilità o *rippabilità* si intende la facilità con cui un terreno o una roccia possono essere scavati meccanicamente e dipende, secondo la letteratura tecnica, da diversi fattori della roccia quali la resistenza a compressione monoassiale, il grado di fratturazione, la spaziatura delle discontinuità, la velocità di propagazione delle onde sismiche, le caratteristiche delle discontinuità (apertura, continuità, grado di alterazione... etc) nonché dalle caratteristiche proprie dei mezzi di scavo.

Il *ripping* è di solito eseguito da un mezzo meccanico (dozer) opportunamente attrezzato e le sue dimensioni sono determinate dalla durezza e compattezza dei materiali da abbattere. La roccia che risulterebbe troppo difficile per essere strappata a causa della mancanza di superfici interne di debolezza, viene generalmente frammentata con altri metodi (tra cui l'uso del martello demolitore e l'uso dell'esplosivo) e per questo definita "roccia da mina".

In genere, la rippabilità può essere desunta direttamente dal valore della velocità delle onde sismiche superficiali misurate in sito attraverso la prospezione sismica a rifrazione (onde P, longitudinali). Tale metodo risulta forse il più speditivo ed esaustivo poiché indirettamente tiene conto anche dei altri fattori e caratteristiche della roccia sopraccitati.

In letteratura sono disponibili numerosi studi volti a correlare la velocità delle onde sismiche con le caratteristiche di scavabilità e rippabilità degli ammassi rocciosi. Il più conosciuto è quello sintetizzato nella tabella riportata nel "*Handbook of Ripping*"¹ della Caterpillar che però generalmente risulta eccessivamente "ottimista", nel senso che, ad esempio, ammassi rocciosi con velocità sino a 2200 m/s sono definiti *rippabili*, quando in realtà richiedono l'uso di martello demolitore.

Una ricerca approfondita nella letteratura internazionale, ha permesso di rintracciare correlazioni alternative che, nella pratica risultano più realistiche, soprattutto considerate le attrezzature normalmente utilizzate nelle nostre zone. Esse sono riportate nelle tabelle seguenti e sono quelle utilizzate per le valutazioni successive, permettendo la divisione degli ammassi rocciosi presenti nelle aree indagate nelle seguenti classi:

- A. $V_p < 600$ m/s: ammasso roccioso scavabile;
- B. $600 < V_p < 1000$ m/s: ammasso facilmente rippabile;
- C. $1000 < V_p < 1400$ m/s: ammasso rippabile con difficoltà;
- D. $V_p > 1400$ m/s: ammasso non rippabile (indispensabile l'uso di martello demolitore).

A titolo esaustivo si riportano anche la correlazione utilizzata dal **California Department of Transportation**, che risulta *leggermente più ottimista in termini di scavabilità*:

| Velocity (m/s) | Rippability |
|----------------|---|
| < 1050 | <i>Easily Ripped</i> |
| 1050 – 1500 | <i>Moderately Difficult</i> |
| 1500 – 2000 | <i>Difficult Ripping / Light Blasting</i> |
| > 2000 | <i>Blasting Required</i> |

¹twelfth edition - February 2000 - Caterpillar inc- Peoria , Illinois

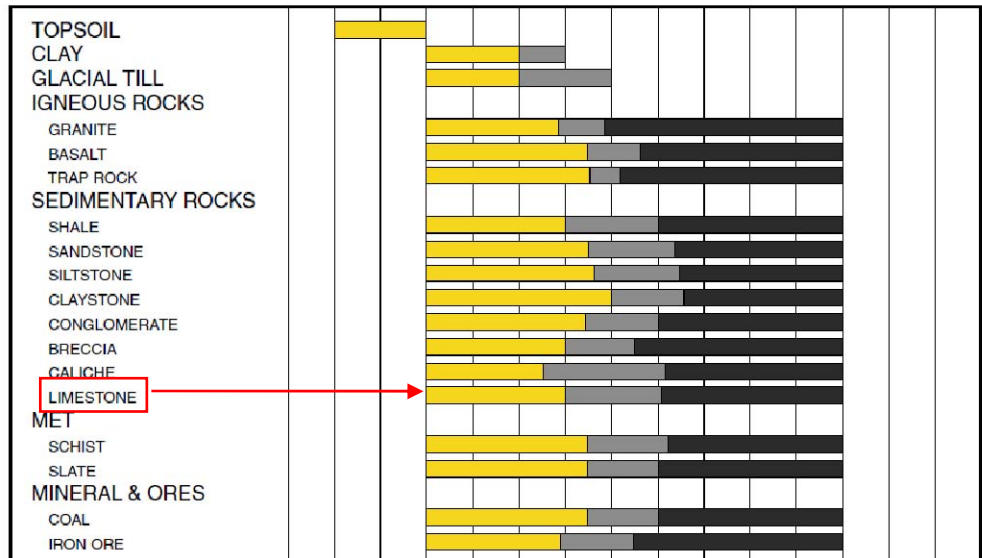
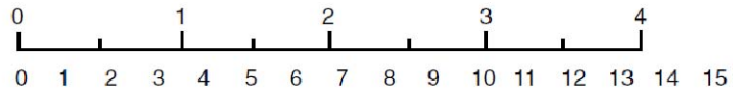
nonché la correlazione edita dalla **Caterpillar** valida per la macchina operatrice D8 Ripper e relativa a varie tipologie di roccia. L'esame del grafico mostra che nel caso in esame (v. "limestone") per velocità oltre 2300m/s il mezzo meccanico D8 non è più sufficiente e sarà necessario, un mezzo meccanico più grande (D9 o D10) o l'utilizzo di altri metodi di abbattimento quali la demolizione meccanica, l'uso di micro-cariche o in estrema ipotesi, se le strutture esistenti lo permettono, l'uso dell'esplosivo.

D8R Ripper Performance

- Multi or Single Shank No. 8 Series D Ripper
- Estimated by Seismic Wave Velocities

- RIPPABLE
- MARGINAL
- NON-RIPPABLE

Seismic Velocity
Meters Per Second x 1000
Feet Per Second x 1000



6 TOMOGRAFIA ELETTRICA

6.1 Programma delle indagini svolte

Nell'area oggetto d'indagine, in data 25-26-27 gennaio 2021 sono stati realizzati n° 4 stendimenti di tomografia elettrica. L'ubicazione degli stendimenti è indicata nelle planimetrie delle **Tavole 2 e 3**, mentre nella tabella 2 si riportano le principali caratteristiche geometriche.

Tabella 2. Caratteristiche geometriche degli stendimenti di tomografia elettrica

| N° stendimento | Aerogeneratore | N° picchetti/elettrodi | Interdistanza elettrodoica [m] | Lunghezza totale [m] | Massima Profondità di indagine [m pc] |
|----------------|----------------|------------------------|--------------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| T1 | WTG012 | 32 | 3,0 | 93,0 | |
| T2 | WTG006 | 32 | 3,0 | 93,0 | |
| T3 | WTG005 | 32 | 3,0 | 93,0 | |
| T4 | WTG001 | 32 | 3,0 | 93,0 | |

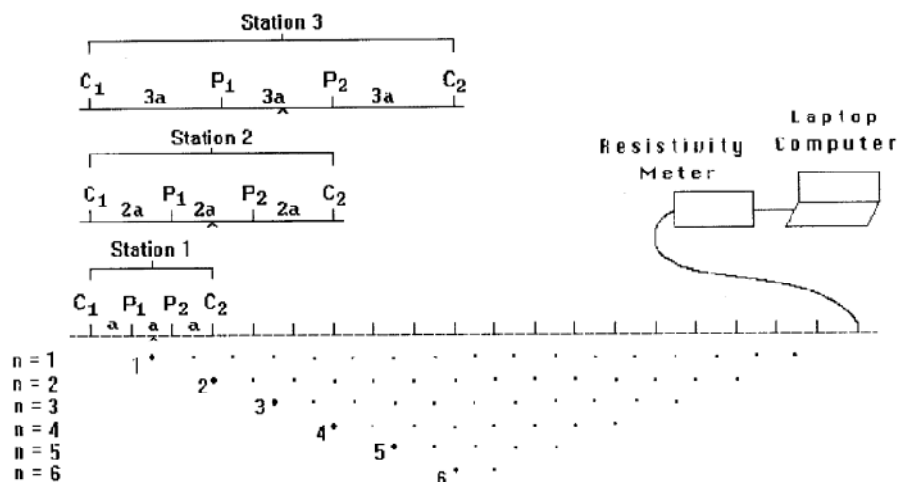
6.2 Metodologia impiegata, strumentazione e software

6.2.1 Tecnica e parametri utilizzati

La scopo dei metodi geofisici è quello di ottenere informazioni sulla natura e struttura del sottosuolo attraverso una serie di misure opportunamente effettuate in superficie. Il metodo utilizzato in questa indagine ricade fra i metodi geoelettrici "attivi", cioè quelli che utilizzano correnti elettriche artificialmente immesse nel terreno, con l'intento di misurare la resistività apparente degli strati attraversati dalla corrente elettrica.

La tecnica tomografica si compone di uno stendimento costituito nel caso specifico da un massimo di 48 elettrodi posti ad un'interdistanza costante l'uno dall'altro, che vengono gestiti automaticamente dallo strumento di misura e commutati alternativamente come elettrodi di corrente e di misura di differenza di potenziale (d.d.p.).

La metodologia permette l'acquisizione di una considerevole quantità di dati sulla resistività "apparente", rappresentativi sia delle variazioni laterali, che verticali lungo il profilo così da generare una Tomografia Elettrica lungo una linea sul terreno.



L'utilizzo appropriato dei programmi d'inversione consente l'elaborazione delle sezioni di resistività in grado di riprodurre accuratamente le variazioni del parametro fisico. La resistività rappresenta una proprietà fisica molto importante, poiché dipende da vari fattori quali, la natura dei terreni e delle rocce, la saturazione dell'acqua, la porosità della roccia, e tutte le anomalie locali generate da strutture localizzate come cavità, corpi di discarica, tracce di dispersione d'inquinanti, etc..

La **profondità d'esplorazione** è variabile secondo il dispositivo e della risoluzione richiesta; mediamente è pari a circa 1/5 della lunghezza dello stendimento.

6.2.2 Geometria delle acquisizioni

Per ciascun stendimento sono state impiegate tre geometrie di acquisizione, come di seguito specificato:

- Quadripolo di Wenner
- Quadripolo di Wenner Schlumberger
- Quadripolo Dipolo-Dipolo

Ogni metodo utilizzato ha delle caratteristiche proprie e come tale tende meglio a rappresentare specifiche strutture presenti nel sottosuolo. In particolare:

- Il quadripolo di Wenner (di seguito W) presenta caratteristiche per il quale risulta maggiormente idoneo nell'investigazione di strutture orizzontali (quali quelle sedimentarie o laviche).
- Il quadripolo di Wenner-Schlumberger (di seguito WS) risulta essere un buon compromesso per l'investigazione sia di strutture orizzontali che verticali (faglie, dicchi, cavità),
- Il quadripolo Dipolo-Dipolo (di seguito DD) è prevalentemente idoneo nell'investigazione di strutture verticale (faglie, dicchi, cavità), mentre risulta essere poco adatto in presenza di strutture orizzontali, quali quelle sedimentarie.

Il W e il WS si distinguono anche per un minore "rumore" delle acquisizioni, ossia una miglior rapporto tra segnale acquisito e disturbo della misura, nonché per una maggiore capacità di investigazione in profondità.

6.2.3 Strumentazionee attrezzatura utilizzata

La strumentazione utilizzata per lo studio è composta dai seguenti dispositivi:

- sistema di misurazione ed acquisizione formato da un georesistivometro completo di unità di energizzazione ed un computer per la gestione automatica delle acquisizioni (apparecchiatura per tomografia elettrica Mod. Polares della PASI) che fornisce la corrente da immettere nel sottosuolo con una tensione in uscita di picco di $\pm 700V$ ed una corrente variabile fra 5 e 2.000 mA.;
- n° 2MUX per la gestione automatica delle acquisizioni in cui gli elettrodi collegati all'unità di acquisizione ed energizzazione sono in grado di funzionare alternativamente come elettrodi di corrente e di potenziale;
- N° 2 cavi per 16 elettrodi *cabla A-B-M-N* con connettore per MUX
- 32 elettrodi in acciaio inox



6.2.4 Elaborazione dei dati e software

L'**elaborazione tomografica** consiste, nella suddivisione dello spazio bidimensionale della sezione in celle secondo uno schema definito con riferimento alla distribuzione e alla dispersione dei dati. Per ognuna delle celle è calcolata la resistività apparente che soddisfi il complesso delle misure eseguite, su questo schema è applicato il metodo d'ottimizzazione dei minimi quadrati modificando il modello di partenza, in maniera iterativa in modo che si riduca la differenza tra i valori di resistività apparente calcolati e quelli effettivamente misurati.

Il **grafico** che ne deriva è una sezione bidimensionale in cui le zone ad uguale resistività sono raffigurate da aree caratterizzate dal medesimo colore. Le tinte blu rappresentano resistività basse, poi si passa a colori che vanno dal verde al giallo e infine al rosso che rappresenta litologie a resistività via via sempre più alte.

Le misure sperimentali sono state elaborate mediante uno specifico programma di interpretazione tomografica denominato "ZONDRES2D". Il programma d'interpretazione tomografica ZONDRES2D elabora un modello bidimensionale di resistività del sottosuolo che soddisfa i valori sperimentali acquisiti con le varie interdistanze dello stendimento.

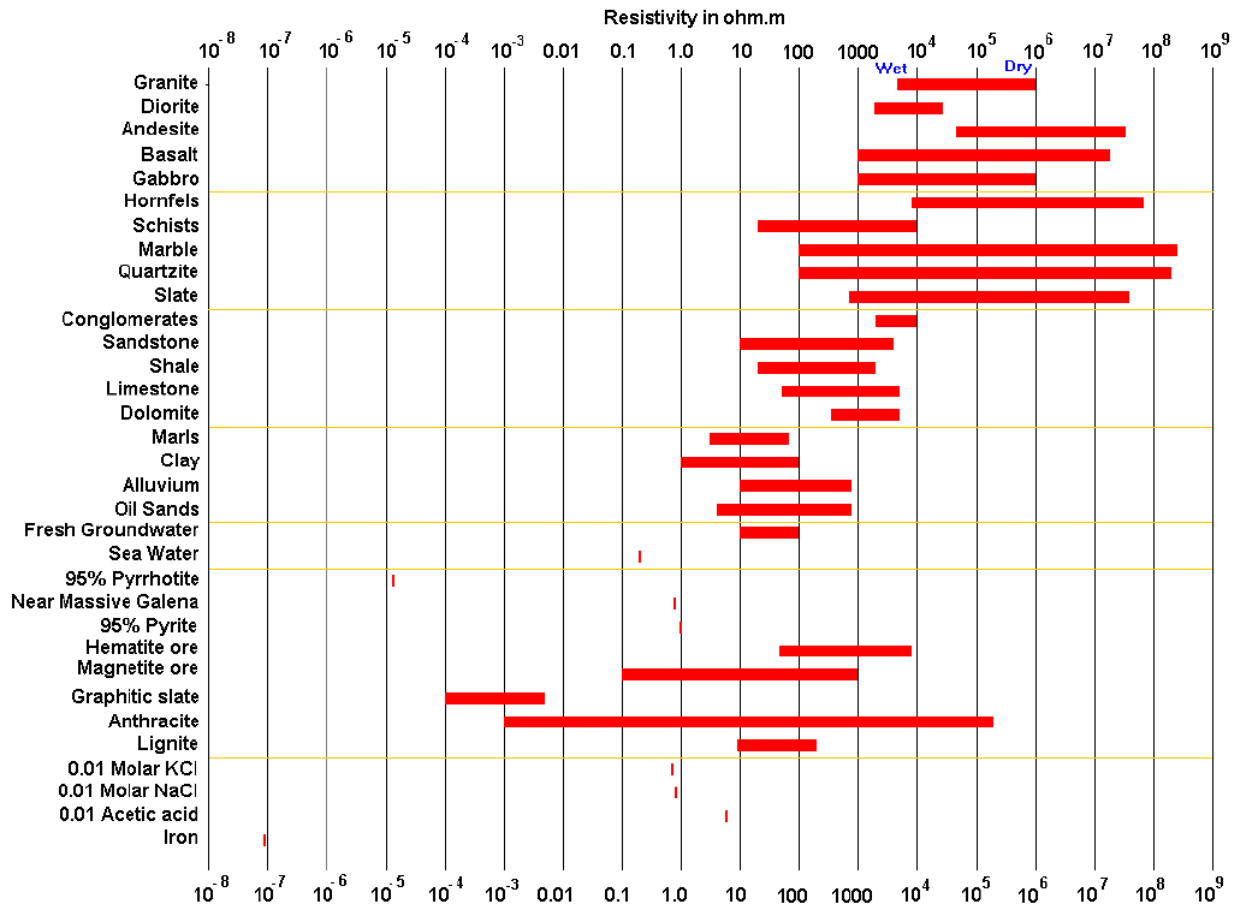
6.3 Valori di resistività di letteratura

La resistività rappresenta una proprietà fisica molto importante poiché dipende da vari fattori quali, la natura dei terreni e delle rocce, la saturazione dell'acqua, la porosità della roccia, e tutte le anomalie locali generate da strutture localizzate come cavità, corpi di discarica, tracce di dispersione d'inquinanti etc.. Nella **tabella 2** e nella **Figura 1** si riporta il range di resistività dei materiali geologici tratta rispettivamente da Telford *et al.* del 1990 e da Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys by Dr. M.H.Loke (1996-2015), utili per un raffronto con i valori misurati lungo le sezioni di resistività.

Tabella 3. Valori di resistività di rocce, terreni e acqua

| Litotipi - terreni | Resistività elettrica (Ohm·m) | |
|-------------------------------|-------------------------------|------------------|
| | Valore minimo | Valore massimo |
| Alluvioni | 10 | 800 |
| Argilla (acqua dolce) | 5 | 15 |
| Argilla (acqua salata) | 1 | 10 |
| Ghiaia, ciottoli e massi | 100 | 500 |
| Limo | 8 | 20 |
| Sabbia asciutta | 80 | 200 |
| Sabbia satura d'acqua dolce | 30 | 50 |
| Sabbia satura d'acqua salata | 10 | 30 |
| Sabbia e olio | 4 | 800 |
| Torba | 8 | 20 |
| | | |
| Litotipi – rocce sedimentarie | Valore minimo | Valore massimo |
| Arenaria | 1 | $6,4 \cdot 10^8$ |
| Argillite | 10 | 800 |
| Calcere poroso | 50 | $5 \cdot 10^3$ |
| Calcere compatto | 10^3 | 10^7 |
| Conglomerato | $2 \cdot 10^3$ | 10^4 |
| Dolomia | 350 | $5 \cdot 10^3$ |
| Duomo salino | 30 | $6 \cdot 10^5$ |
| Marna | 3 | 70 |
| Carbone | 0,70 | 2,0 |
| | | |
| Litotipi – rocce ignee | Valore minimo | Valore massimo |
| Andesite | 150 | $4,5 \cdot 10^4$ |
| Basalto | 10 | $1,3 \cdot 10^7$ |
| Riolite | 100 | $5 \cdot 10^4$ |
| Granito | 300 | 10^6 |
| Tufo | 500 | 10^5 |
| | | |
| | Resistività elettrica (Ohm·m) | |
| Acqua | Valore minimo | Valore massimo |
| Dolce | 7 | 30-50 |
| Salmastra | 0,2 | 0,5 |
| Di mare | - | < 0,2 |
| Salamoia | - | 0,04 |

Figura 1. Valori di resistività di rocce, terreni e minerali



7 ELABORAZIONI E RISULTATI DELLA SISMICA A RIFRAZIONE E TOMOGRAFIA ELETTRICA

Di seguito si riportano i risultati delle elaborazioni di sismica a rifrazione e delle tomografie elettriche. Per ciascun sito indagato i dati sono rappresentati secondo il seguente schema: le sezioni di tomografia elettrica con le 3 geometrie di acquisizione (Wenner , Wenner-Schulmberger, Dipolo-Dipolo) e la sezione di sismica a rifrazione. Su ciascuna sezione si riportano i sismostrati caratterizzati da velocità crescenti e gli eletrostrati nonché le anomalie legate alla possibile presenza di zone maggiormente fratturate e/o cavità.

7.1.1 WTG012 - Rifrazione R1e Tomografia elettrica T1

Nella sezione di sismica a rifrazione **R1** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

| Stendimento R1 | ONDE P | |
|--|-----------------------------|------------------------|
| Sismostrati | Profondità da pc (m) | Velocità in m/s |
| A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili) | Da 0,0 a 0,0/1,0 | 400-800 |
| B: Unità delle rocce fratturate(rippabili) | Da 0,0/1,0a 4,0/5,0 | 800-2300 |
| C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (non rippabili) | Da 4,0/5,0 a 18,0 | 2300-5000 |

Dall'esame della sezione si riconoscono 3 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 5000 m/s. Il sismostrato A presenta spessori molto ridotti (massimo 1,0m) e un andamento quasi parallelo al piano campagna. Il sismostrato B (limite dei materiali rippabili) presenta delle variazioni di spessore leggermente superiori al precedente e si rileva fino a profondità comprese tra 4,0 e 5,0 m dal p.c. Il sismostrato C (materiali non rippabili) si osserva invece fino alla profondità di circa 18,0 m di profondità dal p.c m e rappresenta un substrato lapideo non rippabile caratterizzato da velocità alte. Dall'osservazione della sezione tomografica si può notare un aumento abbastanza graduale delle V_p , salvo la presenza di due anomalie legate ad inversioni di velocità tra le progressive 28,0-42,0 e 50,0-60,0 m. Inoltre è possibile identificare due zone con variazioni orizzontali di velocità legate alla presenza di linee di fratturazione principali.

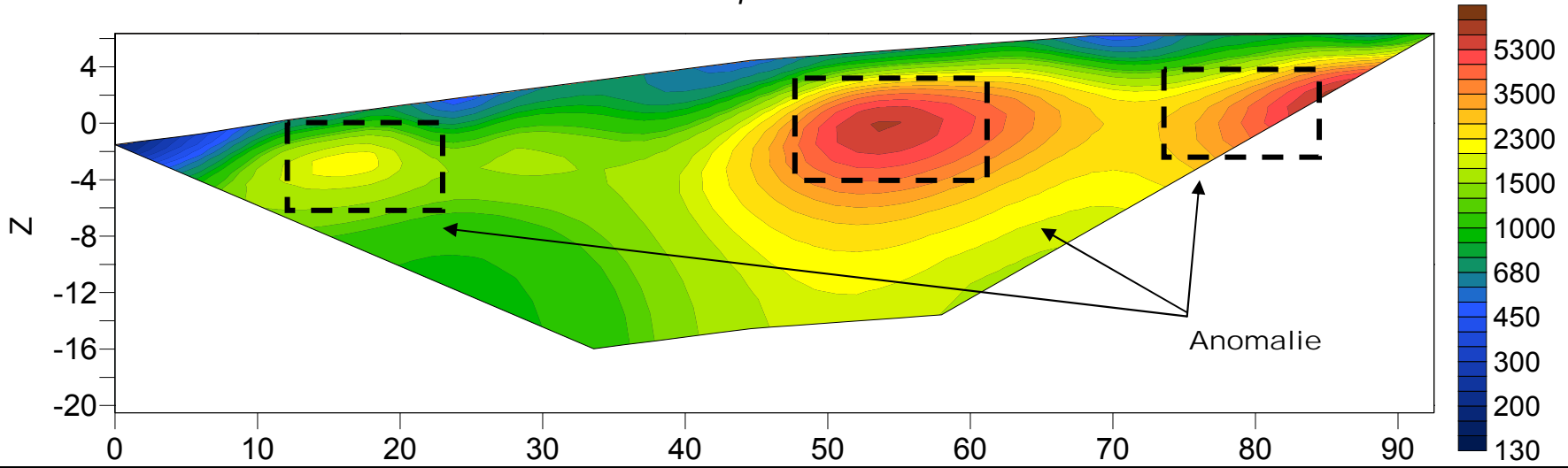
In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 4,0 e 5,0 m dal p.c i terreni risultano non rippabili.

Le sezioni di tomografia elettrica T1 mettono in luce la presenza di due anomalie molto ben definite in termini di elevata resistività tra le progressive 50 e 60 m e tra 75 e 85 m che si correlano molto bene con quelle individuate con la sismica a rifrazione. Una terza anomalia, meno importante si rileva nella parte sinistra delle sezioni anch'essa correlabile con la linea di fratturazione riconosciuta con la rifrazione.

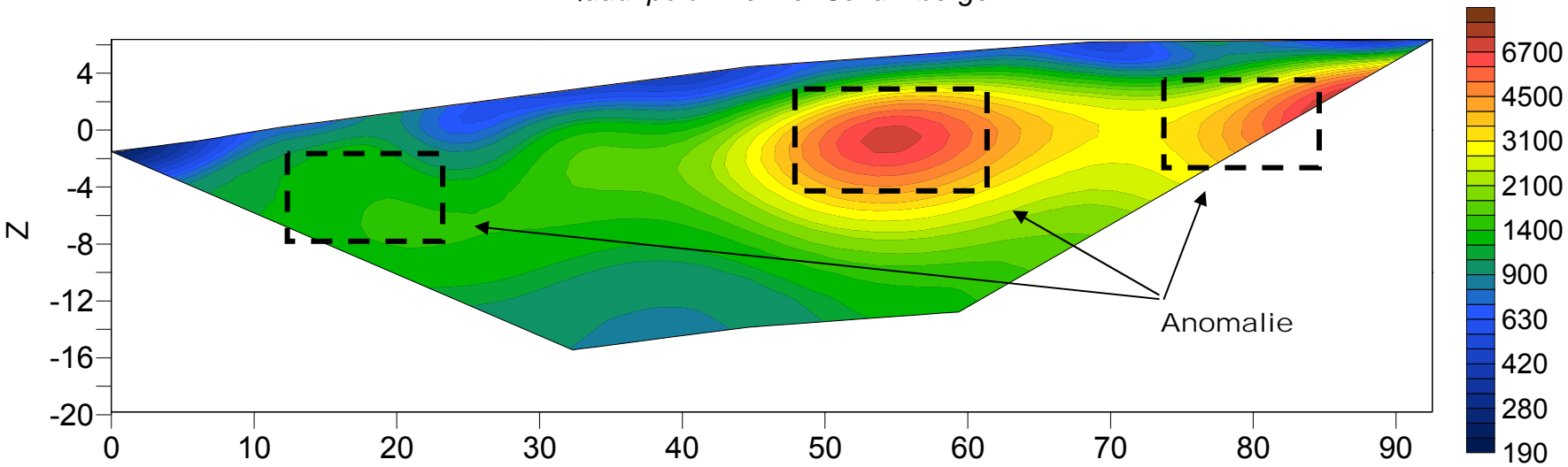
Come appena illustrato le due anomalie della porzione destra delle sezioni sono caratterizzate dalla contestuale presenza di una riduzione di velocità e incremento di resistività. Tale circostanza può essere legata o ad un peggioramento delle caratteristiche fisico meccaniche dell'ammasso roccioso (fratturazione) e/o alla presenza di cavità carsiche. Pertanto in fase esecutiva si consiglia di eseguire un'indagine geognostica di dettaglio tramite la realizzazione di indagini dirette e indirette.

Stendimento di tomografia elettrica: T1-Lungh: 93,0 m - Orientazione: NW-SE
 Scala Grafica - Quota relativa 0,00= 237,518 m slm

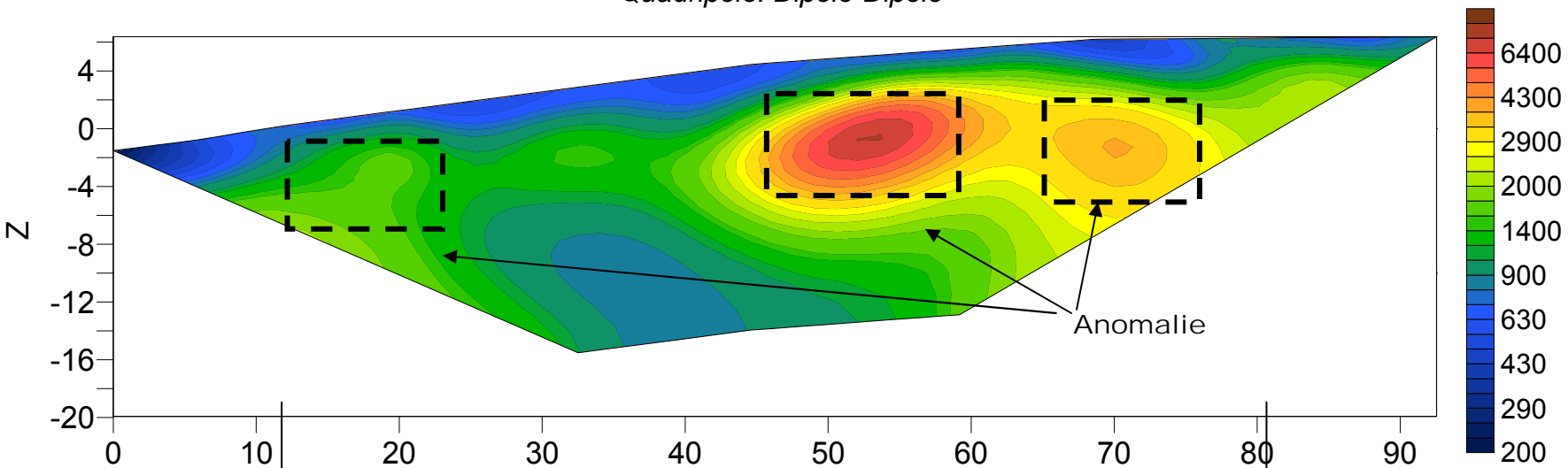
Quadripolo: Wenner



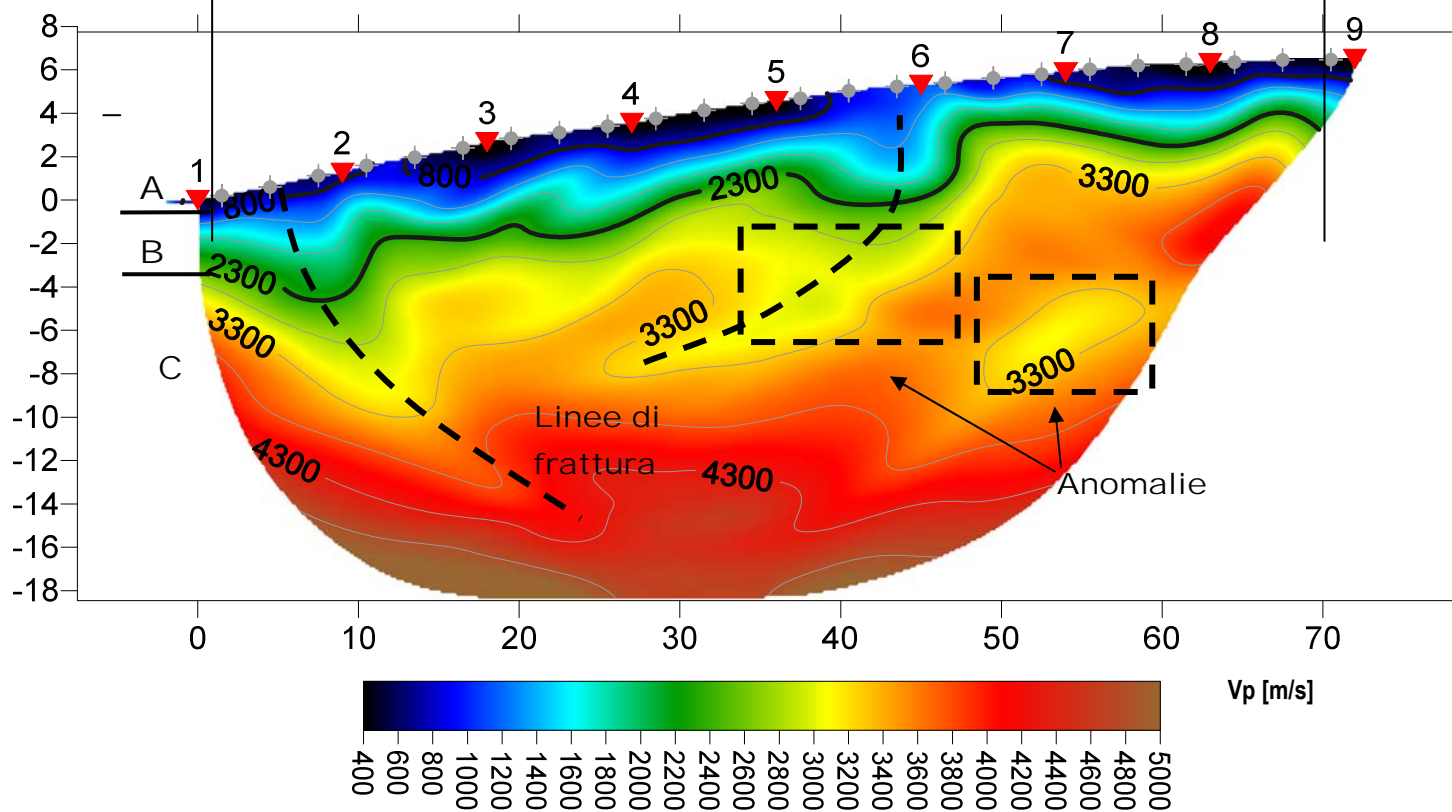
Quadripolo: Wenner-Schulmberger



Quadripolo: Dipolo-Dipolo



Base Sismica R1 - Rifrazione in onde P - Orientazione: NW-SE
 Quota relativa 0,00= 237,518 m slm



7.1.2 WTG006 - Rifrazione R2 e Tomografia elettrica T2

Nella sezione di sismica a rifrazione R2 è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

| Stendimento R2 | ONDE P | |
|--|----------------------|-----------------|
| | Profondità da pc (m) | Velocità in m/s |
| A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili) | Da 0,0 a 1,0 | 400-800 |
| B: Unità delle rocce fratturate (rippabili) | Da 1,0 a 4,0/5,0 | 800-2300 |
| C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (non rippabili) | Da 4,0/5,0 a 26,0 | 2300-5000 |

Dall'esame della sezione R2 si riconoscono 3 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 5000 m/s. L'aumentare delle velocità delle onde P è riconducibile al miglioramento delle caratteristiche fisico-meccaniche dei litotipi presenti nel sottosuolo con la profondità. Le prime 2 unità sismostratigrafiche (A e B) presentano un andamento parallelo al p.c. mentre l'unità C presenta al suo interno delle deboli variazioni. Anche in questa sezione si osserva che si ha un aumento graduale delle Vp con un'anomalia di velocità nella parte sinistra della sezione tra le progressive 3 e 20 m. Infine è possibile identificare nella porzione destra della sezione una linea di frattura preferenziale che a circa 8-10 metri tende a chiudersi.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 4,0 e i 5,0 m dal p.c. i terreni risultano nonrippabili.

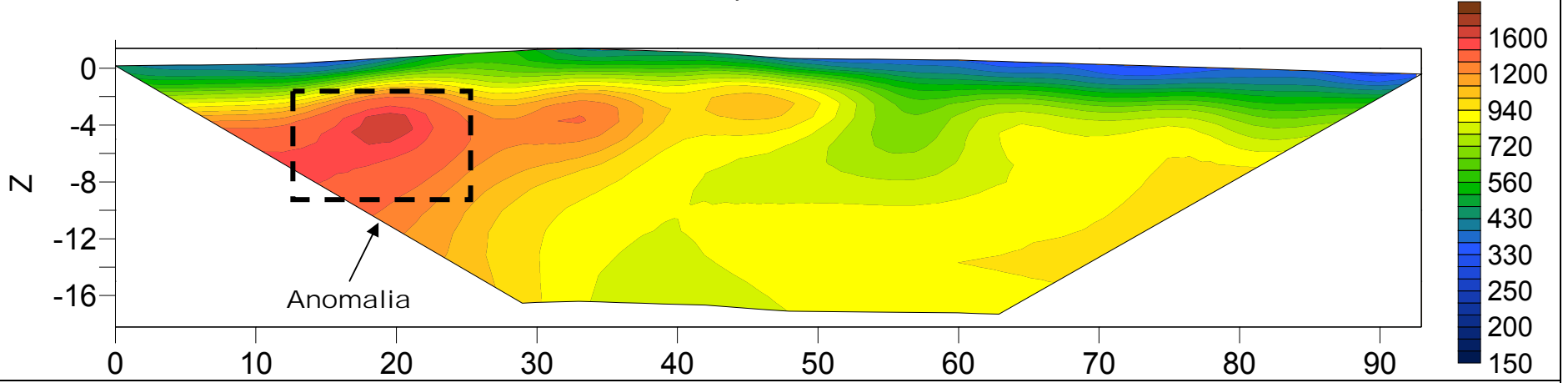
Le sezioni di tomografia elettrica T2 mettono in luce la presenza di un'anomalia ben definita in termini di elevata resistività tra le progressive 10 e 25 m che si correla bene con quella individuata nella sismica a rifrazione.

Come illustrato in precedenza tale anomalia può essere legata o ad un peggioramento delle caratteristiche fisico meccaniche dell'ammasso roccioso (fratturazione) e/o alla presenza di cavità carsiche. Pertanto in fase esecutiva si consiglia di eseguire un'indagine geognostica di dettaglio tramite la realizzazione di indagini dirette e indirette.

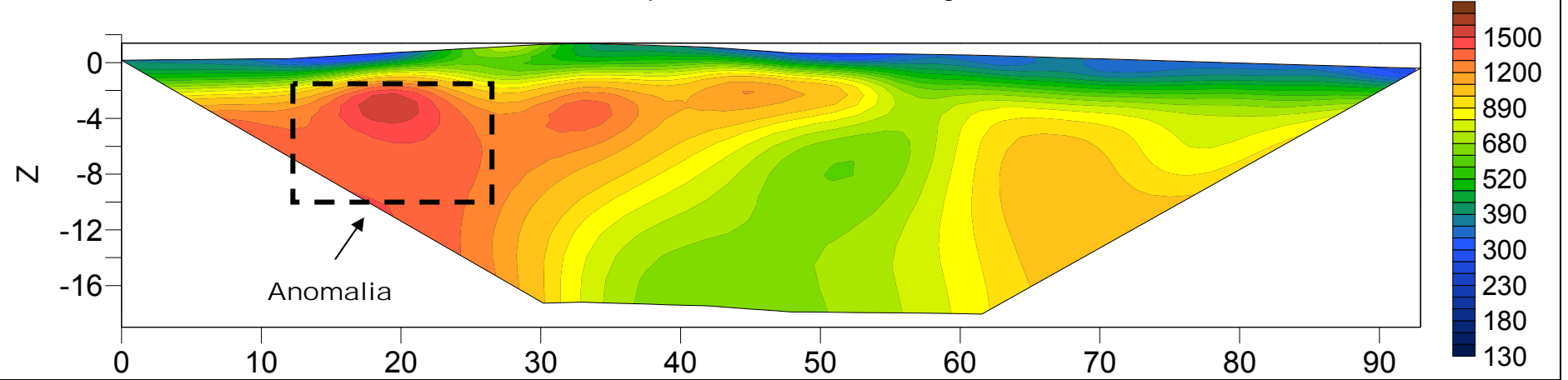
Stendimento di tomografia elettrica: T2-Lungh: 93,0 m - Orientazione: SSW-NNE

Scala Grafica - Quota relativa 0,00= 164,701 m slm

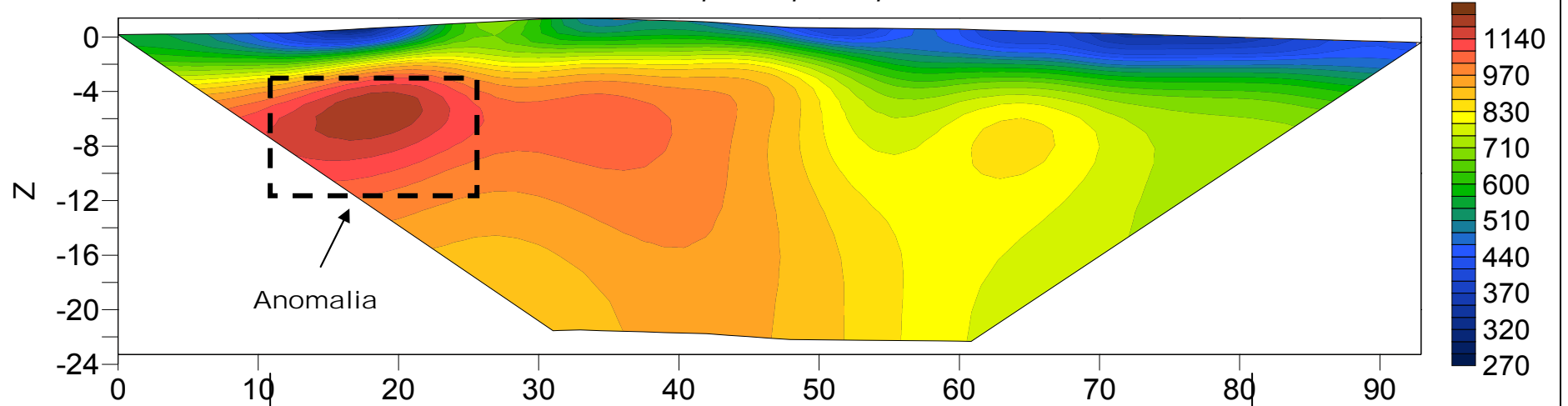
Quadripolo: Wenner



Quadripolo: Wenner-Schulmberger

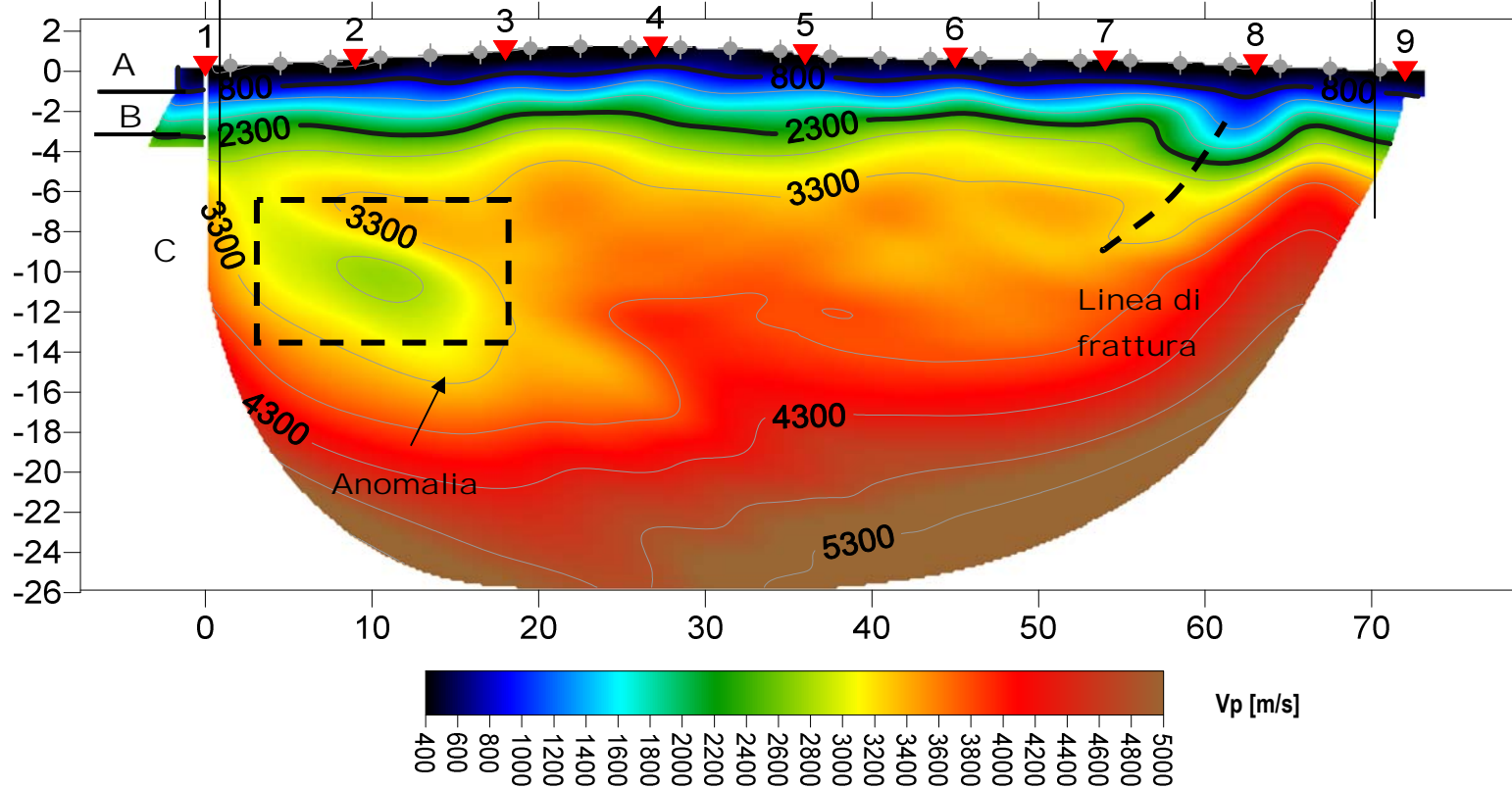


Quadripolo: Dipolo-Dipolo



Base Sismica R2 - Rifrazione in onde P - Orientazione: SSW-NNE

Quota relativa 0,00= 164,701 m slm



7.1.3 WTG005-Rifrazione R3 e Tomografia elettrica T3

Nella **sezione R3** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

| Stendimento R3 Sismostrati | ONDE P | |
|--|------------------------|-----------------|
| | Profondità da pc (m) | Velocità in m/s |
| A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili) | Da 0,0 a 1,5/2,0 | 400-800 |
| B: Unità delle rocce fratturate (rippabili) | Da 1,5/2,0 a 11,0/12,0 | 800-2300 |
| C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (non rippabili) | Da 11,0/12,0 a 21,0 | 2300-5000 |

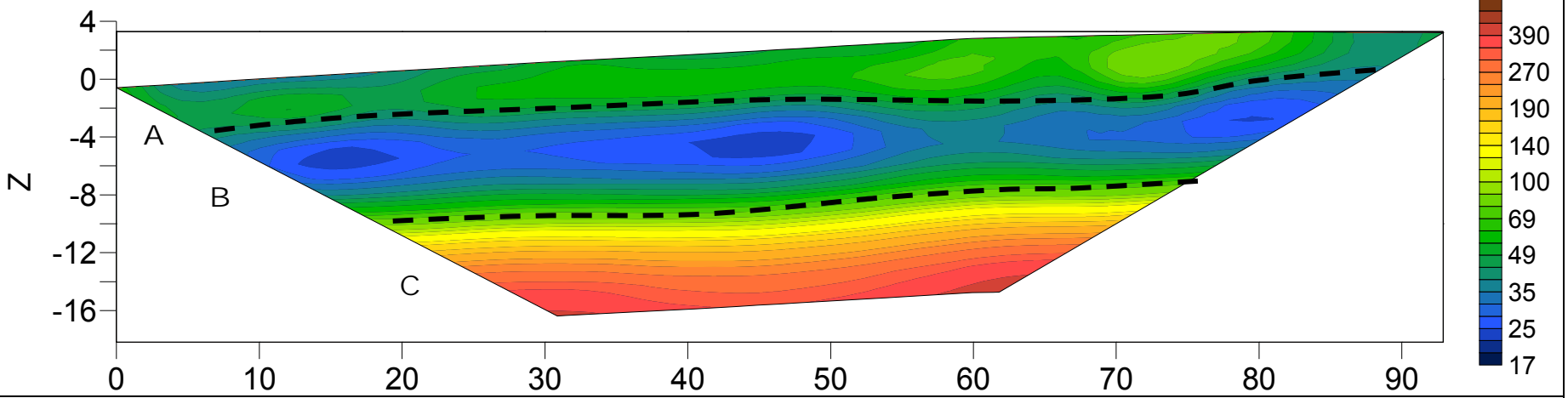
Dall'esame della sezione tomografica R3 si riconoscono 3 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 5000 m/s. L'aumentare delle velocità delle onde P è riconducibile al miglioramento delle caratteristiche fisico-meccaniche dei litotipi presenti nel sottosuolo con la profondità. Anche lungo questa sezione si osserva che le varie unità sismostratigrafiche hanno un andamento piano parallelo con il p.c e leggerissime variazioni di spessore.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 11,0 e 12,0 m dal p.c. i terreni risultano non rippabili.

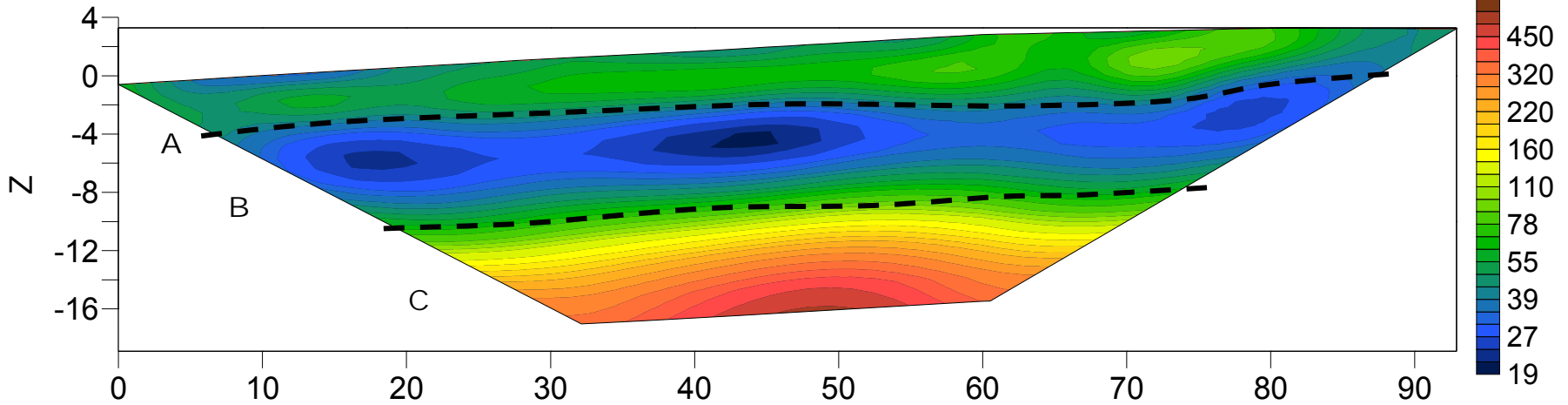
Dalla sezione di tomografia elettrica **T3** è possibile distinguere 3 elettrostrati, il primo (A) ascrivibile alla unità delle terre di copertura, il secondo (B) correlabile con la presenza dell'ammasso roccioso fratturato probabilmente in presenza di falda idrica (v. bassi valori di resistività) e il terzo (C) legato alla presenza del bedrock. Non si rilevano anomalie correlabili a zone caratterizzate da maggiore fratturazione e/o presenza di cavità di origine carsica.

Stendimento di tomografia elettrica: T3-Lungh: 93,0 m - Orientazione: SSW-NNE
 Scala Grafica - Quota relativa 0,00= 168,462 mslm

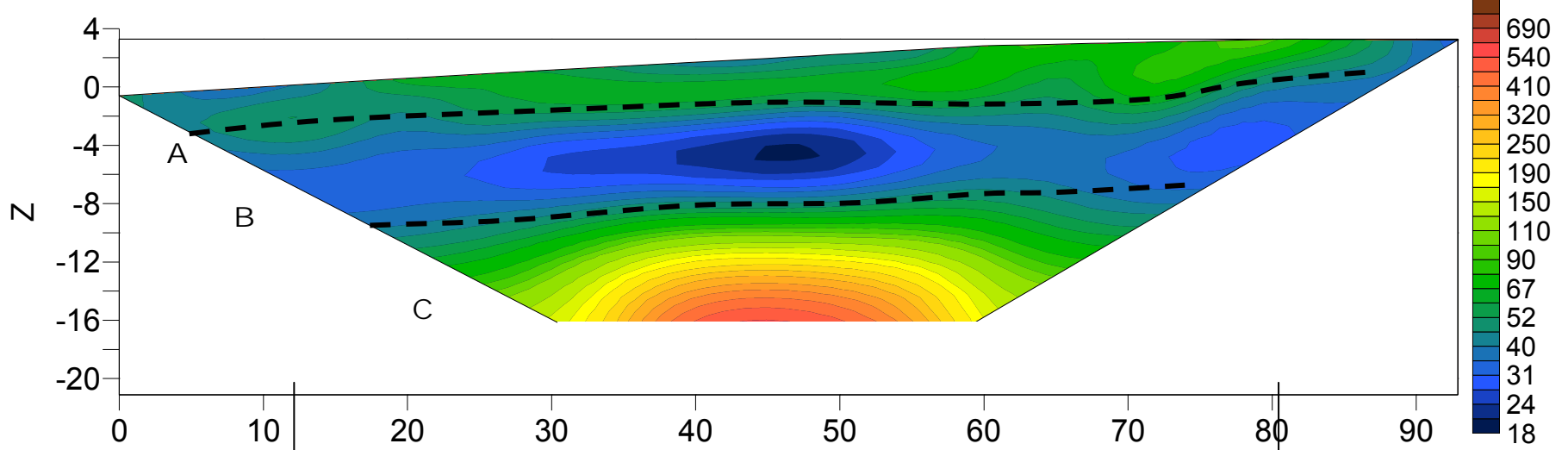
Quadripolo: Wenner



Quadripolo: Wenner-Schulmberger



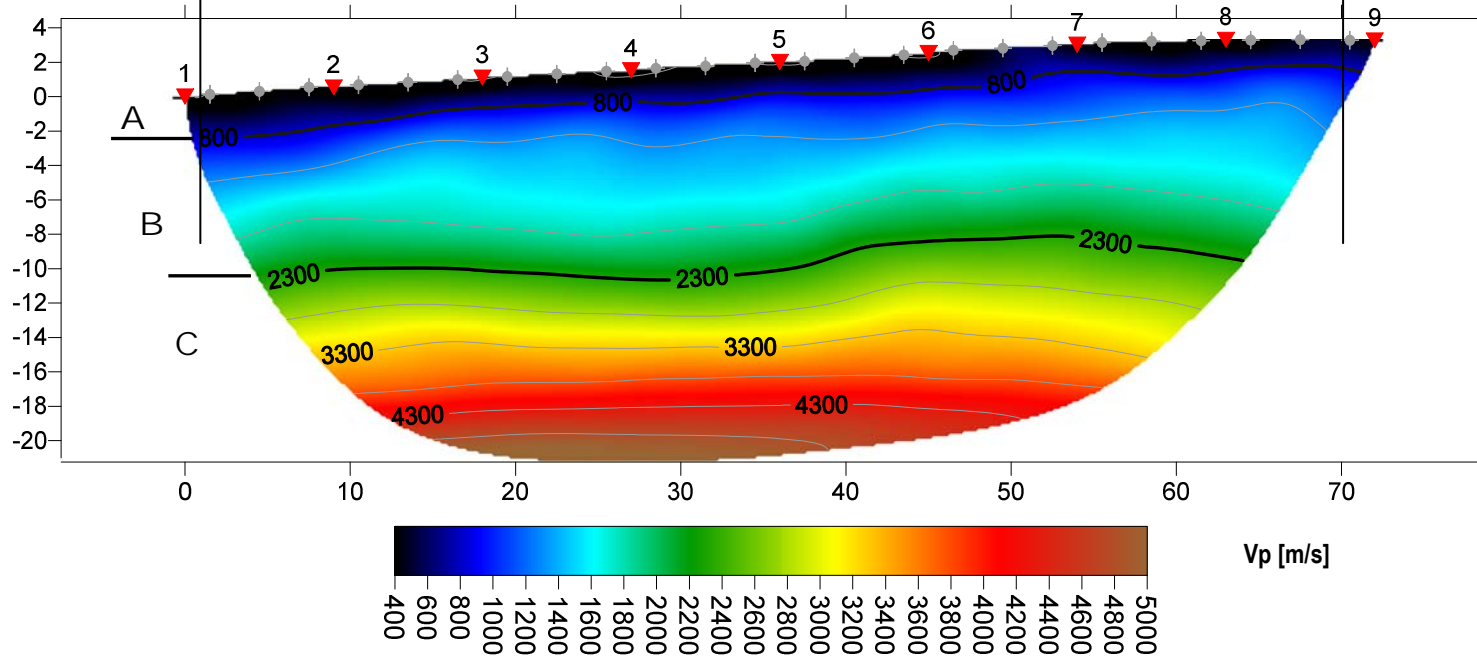
Quadripolo: Dipolo-Dipolo



Base Sismica R3 - Rifrazione in onde P - Orientazione: SSW-NNE

Quota relativa 0,00= 168,462 mslm

R3 (WTG005) RMS error 2.5%=0.61ms 20 WET itr. 50Hz Width 3.0% initial GRADIENT.GRD v. 4.01



7.1.4 WTG001-Rifrazione R4 e Tomografia elettrica T4

Nella **sezione** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

| Stendimento R4 Sismostrati | ONDE P | |
|--|----------------------|-----------------|
| | Profondità da pc (m) | Velocità in m/s |
| A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili) | Da 0,0 a 1,0 | 400-800 |
| B: Unità delle rocce fratturate (rippabili) | Da 1,0 a 4,0/5,0 | 800-2300 |
| C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (non rippabili) | Da 4,0/5,0 a 15,0 | 2300-5000 |

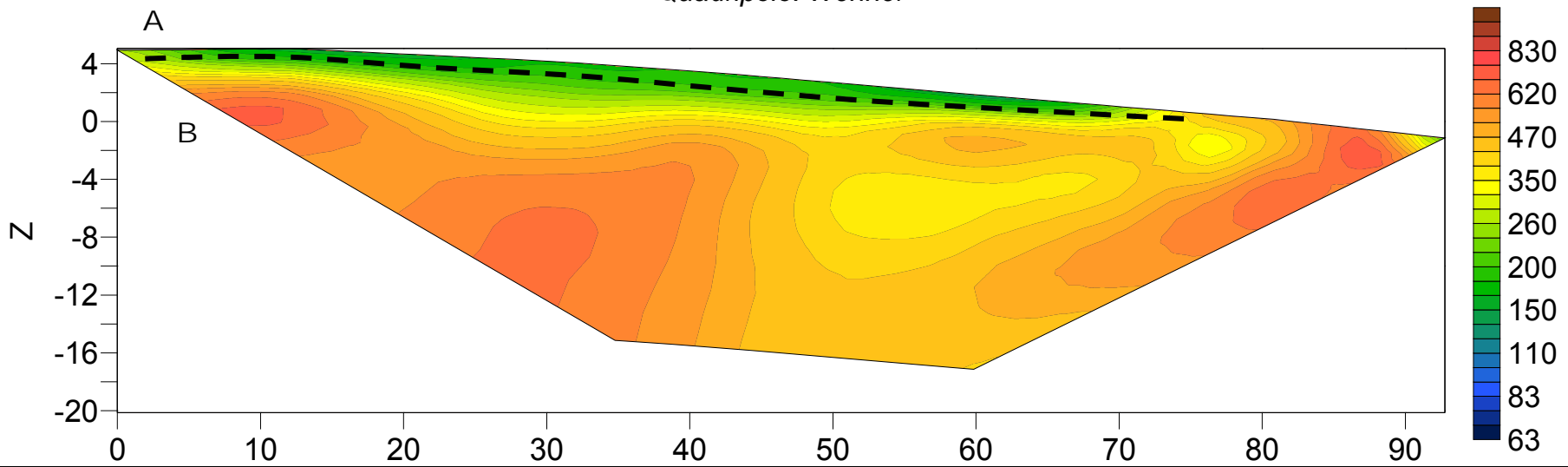
Dall'esame della sezione tomografica R4 si riconoscono 3 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 5000 m/s. L'aumentare delle velocità delle onde P è riconducibile al miglioramento delle caratteristiche fisico-meccaniche dei litotipi presenti nel sottosuolo con la profondità. Anche in questo caso le 3 unità sismostratigrafiche presentano un andamento parallelo al p.c. e piccole variazioni di spessore.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 4,0 e 5,0 m dal p.c. i terreni risultano nonrippabili.

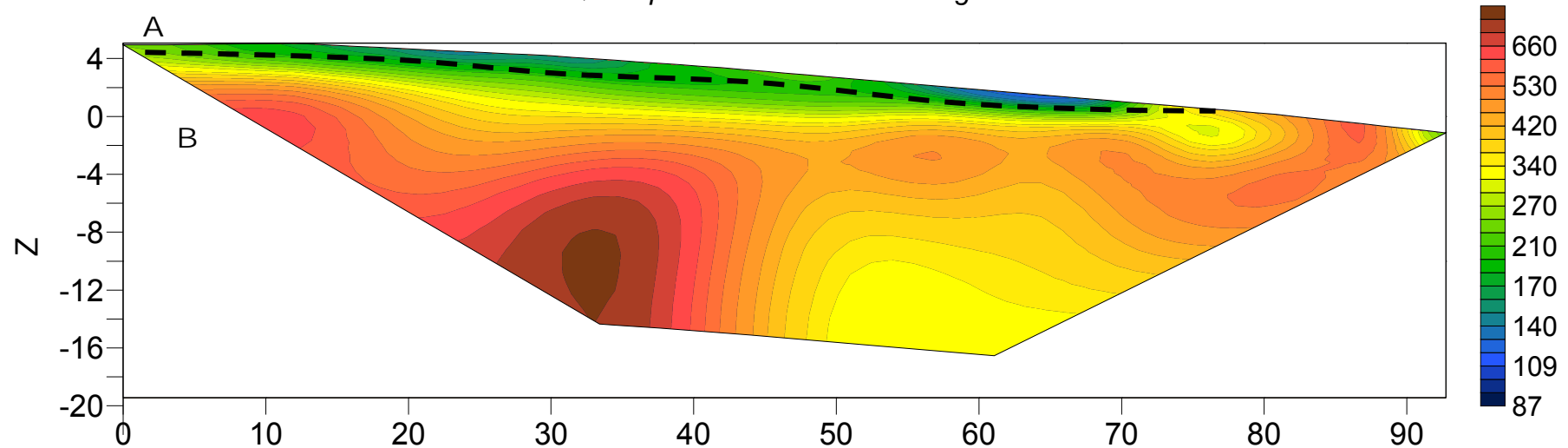
Dalla sezione di tomografia elettrica **T4** è possibile distinguere 2 elettrostrati, il primo (A) ascrivibile alla unità delle terre di copertura, il secondo (B) correlabile con la presenza dell'ammasso roccioso. Non si rilevano anomalie correlabili a zone caratterizzate da maggiore fratturazione e/o presenza di cavità di origine carsica.

Stendimento di tomografia elettrica: T4-Lungh: 93,0 m - Orientazione: SW-NE
 Scala Grafica - Quota relativa 0,00= 280,868 m slm

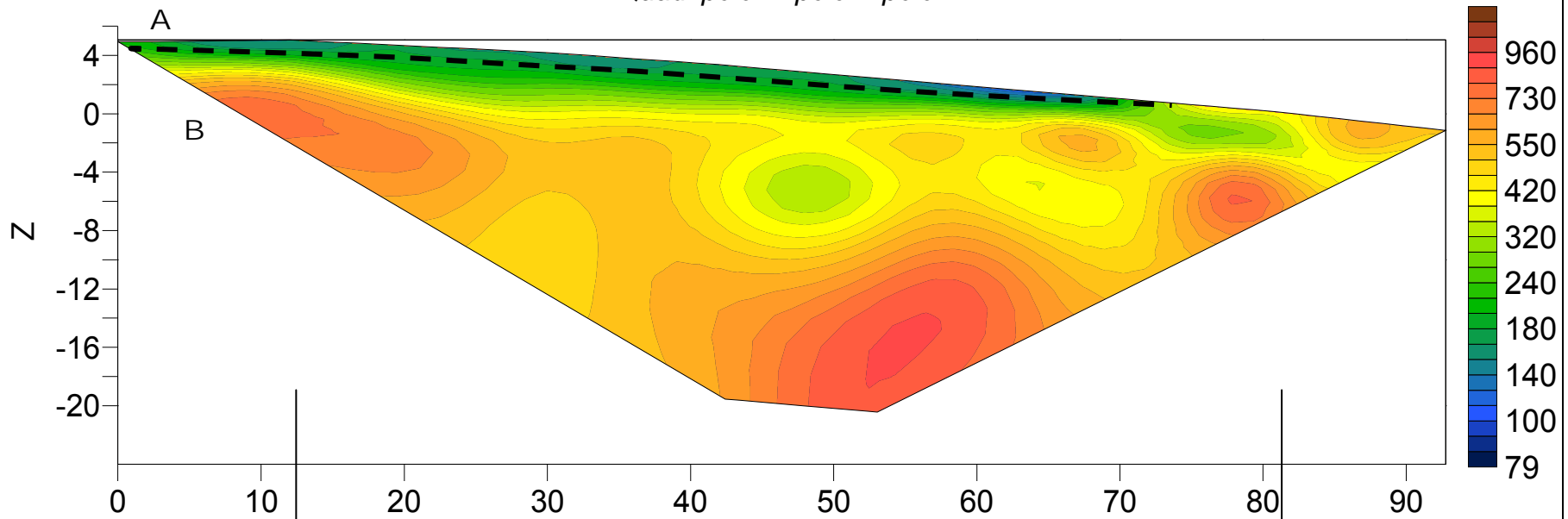
Quadripolo: Wenner



Quadripolo: Wenner-Schulmberger



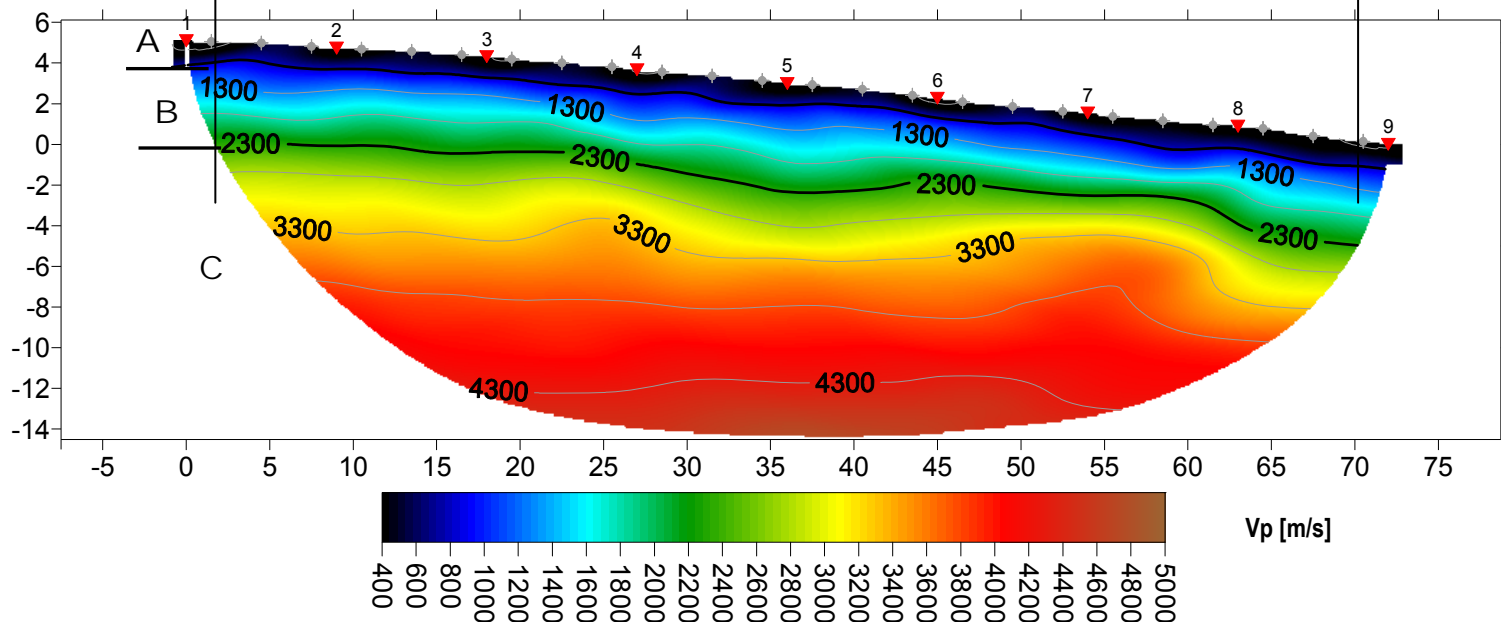
Quadripolo: Dipolo-Dipolo



Base Sismica R4 - Rifrazione in onde P - Orientazione: SW-NE

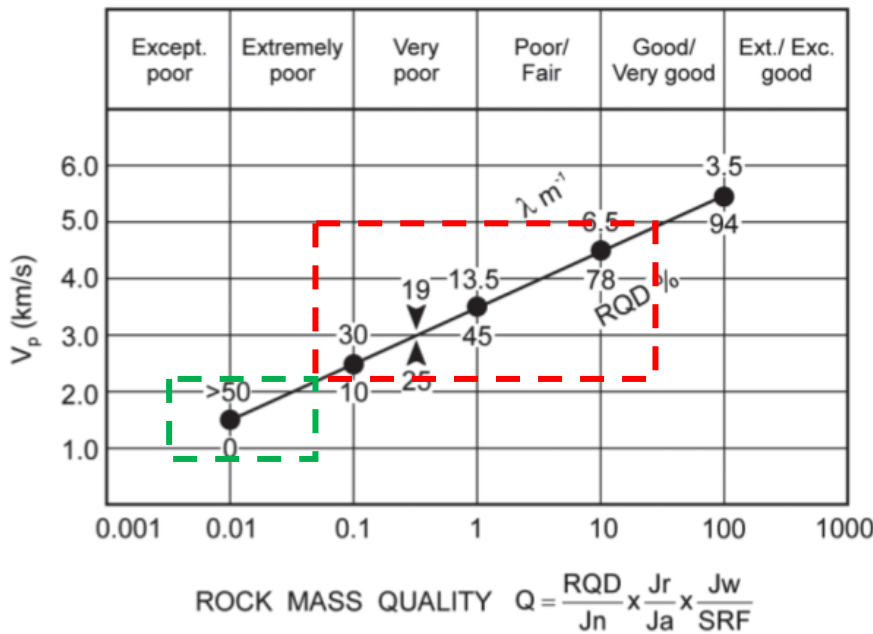
Quota relativa 0,00= 280,868 m slm

R4 (WTG001) RMS error 3.5%=0.58ms 20 WET itr. 50Hz Width 2.5% initial GRADIENT.GRD v. 4.01



8 INDICAZIONI PER LA DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI GEOMECCANICI

Le prospezioni geofisiche possono essere utilizzate in situazioni molto complesse quali gli ammassi metamorfici molto fratturati o in assenza di indagini dirette (v. sondaggi geognostici) per la definizione spaziale di alcuni elementi degli ammassi rocciosi (fratture, RQD, etc). Tra questi quello che potrebbe essere impiegato nel contesto in esame, è quello di N. Barton (2002) – che ha cercato di correlare, attraverso relazioni empiriche, le velocità delle onde P con la qualità della roccia Q e quest’ultima con una serie di parametri meccanici. Il grafico mostra la correlazione tra Vp con RQD e λ (fratture per metro) e il relativo indici di qualità dell’ammasso roccioso di Barton (Q).



Sulla base dei litotipi individuati dai sondaggi si può applicare la correlazione ai sismostrati B e C. Il rettangolo verde indica il settore del sismostrato B, con un RQD compreso tra 0 e 7, un numero di fratture per metro che varia tra 50 e 35 e un indice di qualità Q tra 0,01 e 0,03 (ammasso roccioso estremamente scadente); il rettangolo rosso rappresenta il sismostrato C che ha valori di RQD compresi tra 7 e 60, un numero di fratture per metro compreso tra 35 e 9,0 e un valore dell’indice Q tra 0,03 e 5 (ammasso roccioso da estremamente scadente a scadente/discreto).

Da quanto sopra le 3 unità sismostratigrafiche possono essere classificate come segue:

| Sismostrati | Vp (m/s) | RQD (%) | λ (1/m) | Q |
|--|-----------|---------|---------|-----------|
| B: Unità delle rocce fratturate (rippabili) | 800-2300 | 0-7 | 50-35 | 0.01-0.03 |
| C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (non rippabili) | 2300-5000 | 7-85 | 35-5 | 0.03-30 |

L’indice Q può essere correlato all’indice RMR della classificazione di Bieniawski con la relazione:
 $RMR = 9 \ln Q + 44$;

9 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La prospezione geofisica attraverso l'impiego delle tecniche MASW, sismica a rifrazione in onde Pe tomografia elettrica ha permesso di ricostruire con un buon grado di precisione l'assetto lito-stratigrafico dell'area in esame e dedurre le caratteristiche sismiche. Lungo la verticale indagata si evince la presenza di sismostrati con velocità V_p e V_s in genere crescente con la profondità con andamento e spessori indicati nei precedenti paragrafi.

Per quanto riguarda le MASW, lungo gli stendimenti si evince la presenza di sismostrati con velocità V_s crescente con la profondità sino ad incontrare il bed rock con andamento e spessori indicati nei precedentiparagrafi.La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per i differenti siti di indagine, che si ricorda sarà anche funzione del piano di posa delle fondazioni è riportata nel seguente schema riassuntivo:

| Sigla Stendimento | Profondità substrato [m] | V_{Seq} [m/s] | Categoria sottosuolo (NTC2018) |
|-------------------|--------------------------|-----------------|--------------------------------|
| M1 | 1,0 | >800 | A |
| M2 | 1,0 | >800 | A |
| M3 | 6,3 | 425 | B |
| M4 | 1,0 | >800 | A |

I dati derivati dalla MASW messi in correlazione con le bibliografiche indicate nei precedenti paragrafi hanno permesso di determinare i parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni e per correlazione ottenere una preliminare definizione dei parametri di resistenza al taglio.

L'elaborazione dei dati di sismica a rifrazione e di tomografia elettrica ha permesso di ricostruire l'assesto sismostratigrafico dei terreni. Nei precedenti paragrafi si illustrano i differenti sismostrati individuati dai quali è possibile distinguere i terreni delle coperture dal substrato calcareo. In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 4 e 5 m dal p.c. per R1, R2 e R4 e sino a 11-12 dal p.c.per R3 i terreni risultano non rippabili. In particolare come si osserva anche dalla tabella dei dati MASW e dalle sezioni di sismica a rifrazione il bed rock si incontrerà a profondità maggiori lungo lo stendimento sismicoR3/M3.

L'impiego congiunto della tecnica della tomografia elettrica lungo il medesimo allineamento della sismica a rifrazione ha permesso di identificare negli stendimenti T1/R1 e T2 R2 delle anomalie in termini di "elevati valori di resistività" e "inversione di velocità V_p " riconducibili alla presenza di settori caratterizzati da maggiore fratturazione e/o presenza di cavità di origine carsica. Pertanto in fase esecutiva si consiglia di eseguire un'indagine geognostica di dettaglio tramite la realizzazione di indagini dirette e indirette.

Le prospezioni geofisiche in rifrazione sono state utilizzate anche per la definizione spaziale di alcuni elementi degli ammassi rocciosi (fratture, RQD, etc) e per la definizione per l'indice di qualità di Barton Q: si tratta chiaramente di correlazioni da impiegare con le dovute approssimazioni ma comunque utili in determinate situazioni nelle quali dai sondaggi è difficile ottenere dei parametri di caratterizzazione dell'ammasso roccioso.

Villa San Pietro, li 15 febbraio 2021

Collaboratori
Dott. Geol. Daniele Succu

Geoservice S.r.l.
Il Direttore Tecnico
Dott. Geol. Andrea Carcangiu

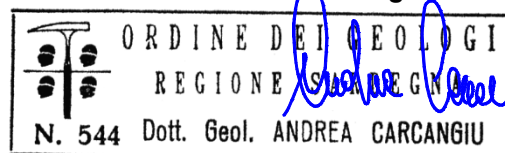


Tavola 1 : INQUADRAMENTO GENERALE DELL'AREA DI INDAGINE

Progetto: Parco eolico Porto Torres (SS) - Località Sa Corredda

Scala 1:25.000

Legenda



○ AREA DI INDAGINE



Tavola 2 : PLANIMETRIA UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE (WTG001)

Progetto: Parco eolico Porto Torres (SS) - Località Sa Corredda

Scala 1:1000

Legenda

Stendimento R/M4 (WTG001) - Lunghezza = 69,0 m

Stendimento T4 (WTG001) - Lunghezza = 93,0 m

 Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono

 Direzione stendimento geoelettrico dal primo all'ultimo elettrodo



R/M 4
(WTG001)

T4
(WTG001)

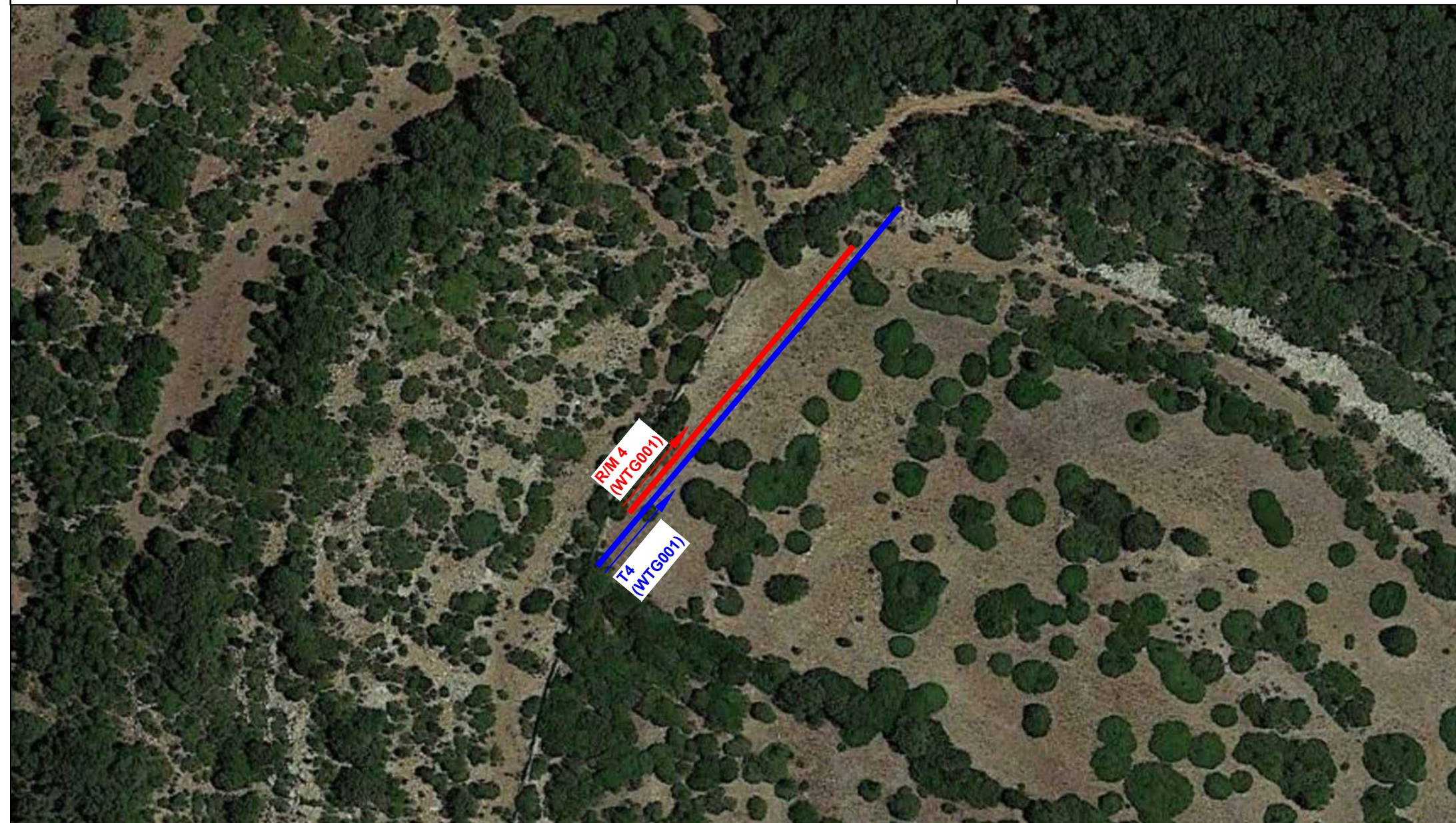


Tavola 3 : PLANIMETRIA UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE (WTG005)

Progetto: Parco eolico Porto Torres (SS) - Località Sa Correda

Scala 1:1000

Legenda

Stendimento R/M3 (WTG005) - Lunghezza = 69,0 m

Stendimento T3 (WTG005) - Lunghezza = 93,0 m

 Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono

 Direzione stendimento geoelettrico dal primo all'ultimo elettrodo

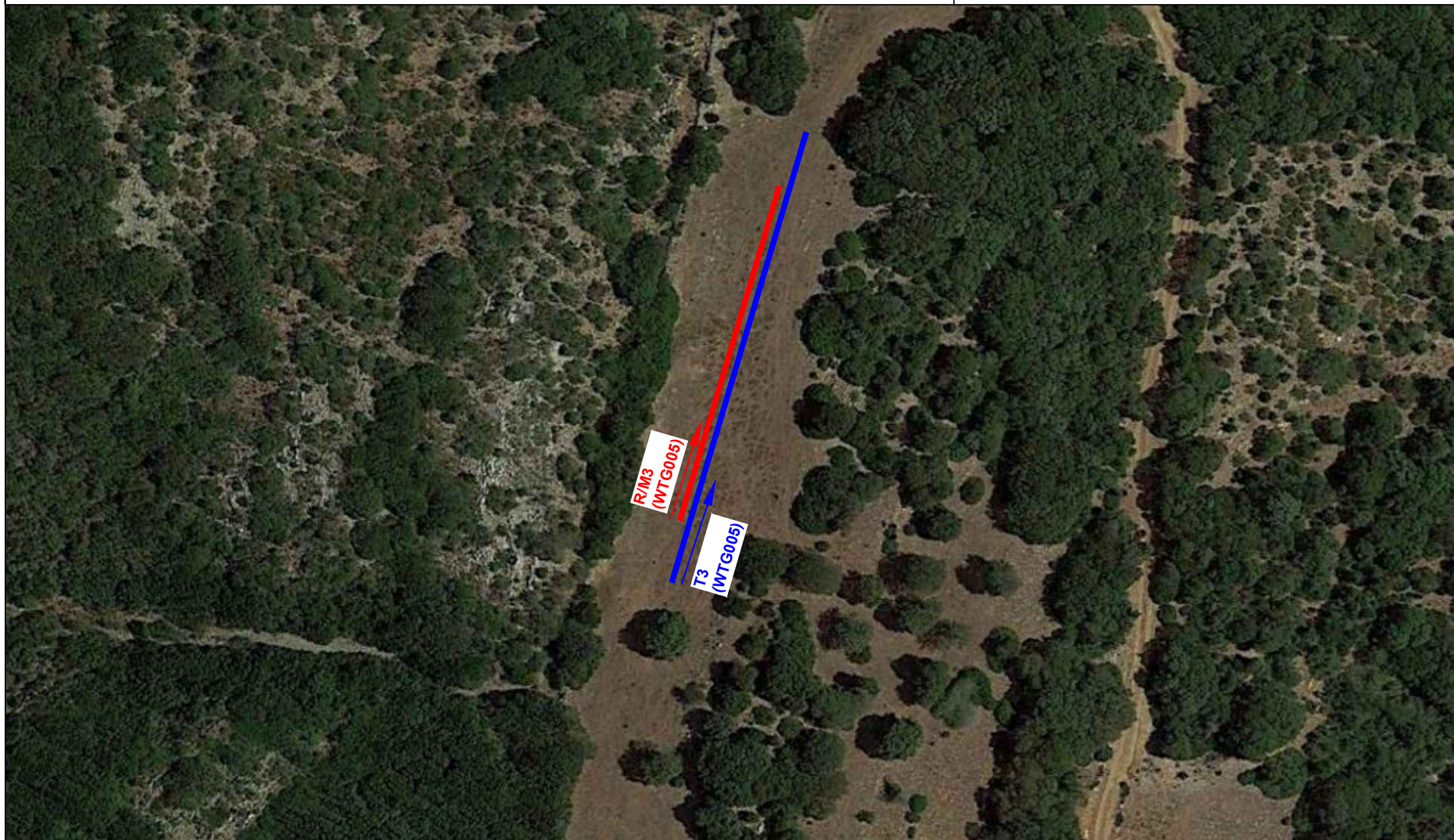


Tavola 4 : PLANIMETRIA UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE (WTG006)

Progetto: Parco eolico Porto Torres (SS) - Località Sa Corredda

Scala 1:1000

Legenda

Stendimento R/M2 (WTG006) - Lunghezza = 69,0 m

Stendimento T2 (WTG006) - Lunghezza = 93,0 m

 Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono

 Direzione stendimento geoelettrico dal primo all'ultimo elettrodo



R/M2
(WTG006)

T2
(WTG006)

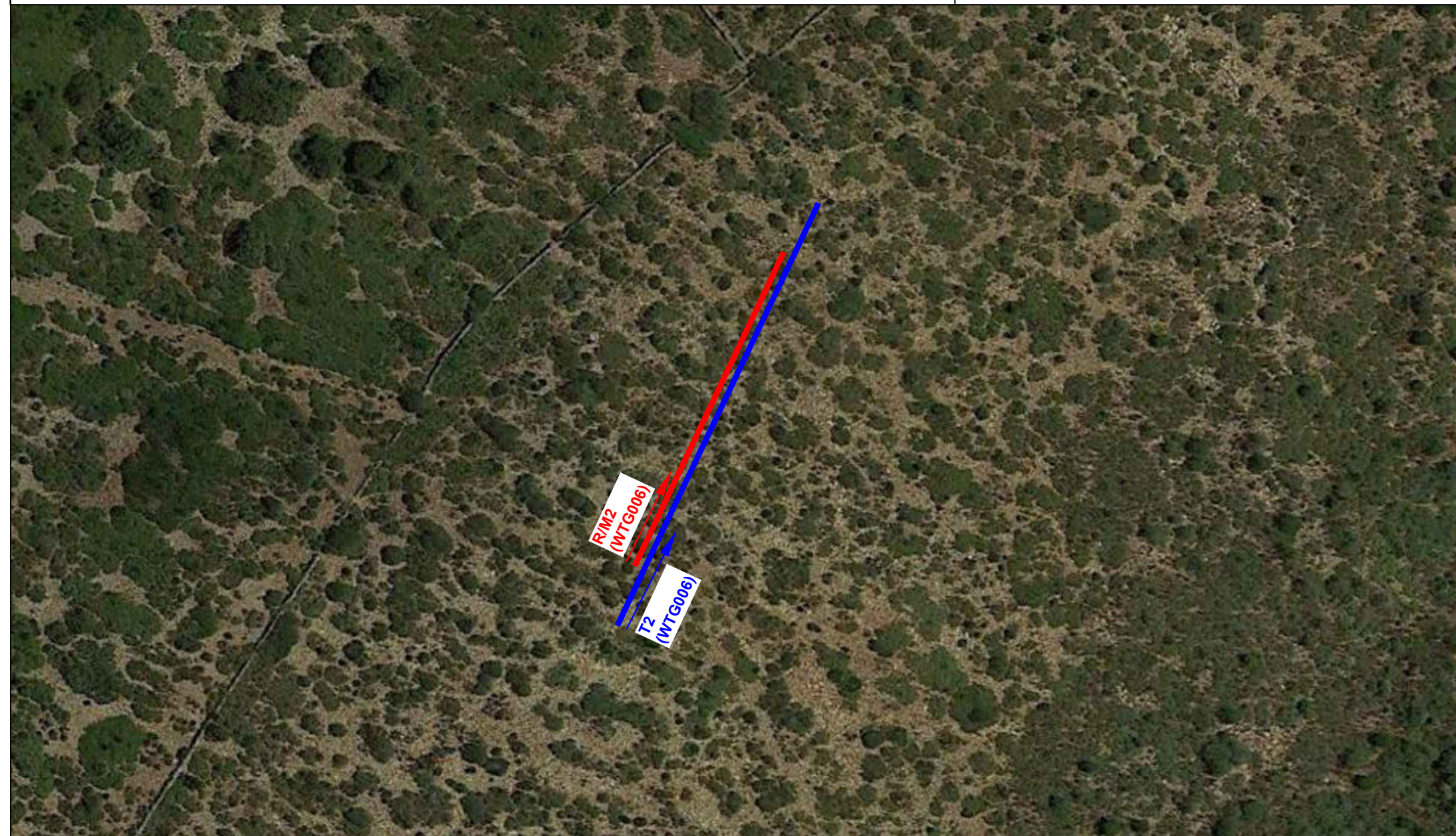


Tavola 5 : PLANIMETRIA UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE (WTG012)

Progetto: Parco eolico Porto Torres (SS) - Località Sa Corredda

Scala 1:1000

Legenda

Stendimento R/M1 (WTG012) - Lunghezza = 69,0 m

Stendimento T1 (WTG012) - Lunghezza = 93,0 m

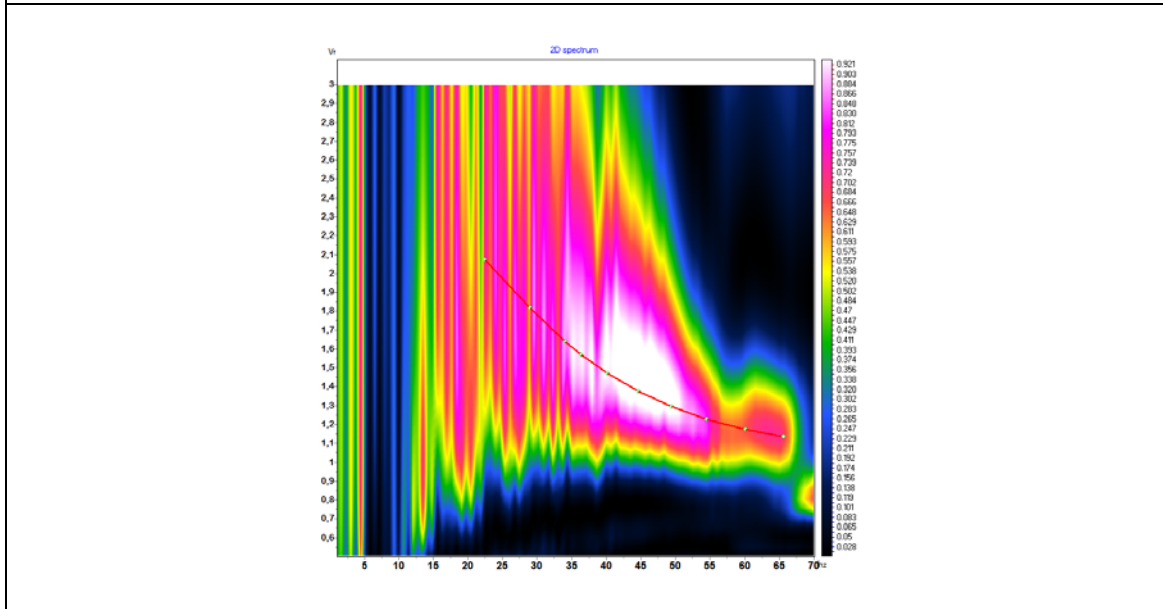
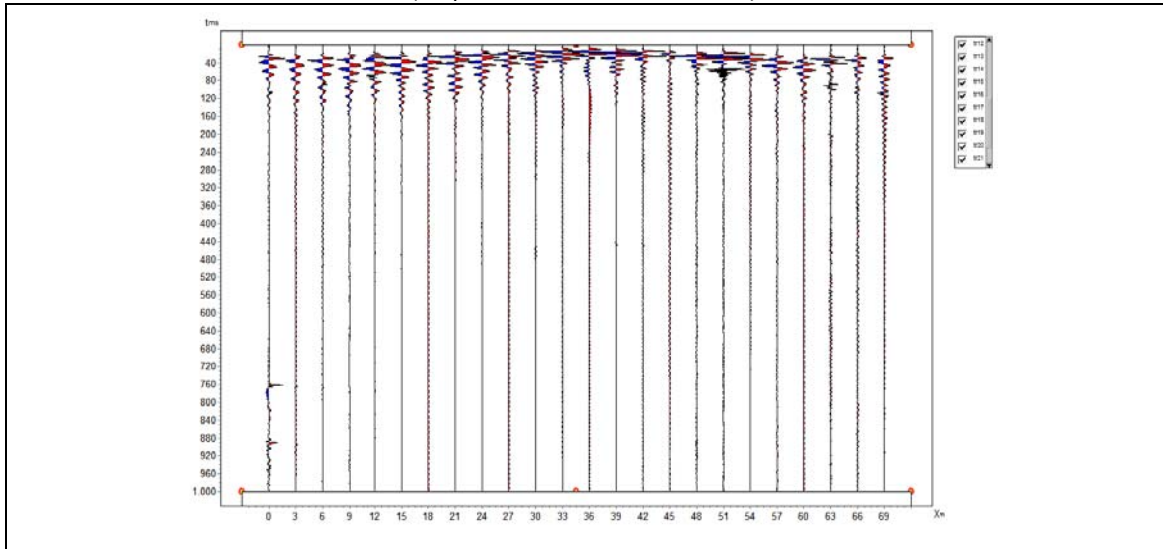
 Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono

 Direzione stendimento geoelettrico dal primo all'ultimo elettrodo

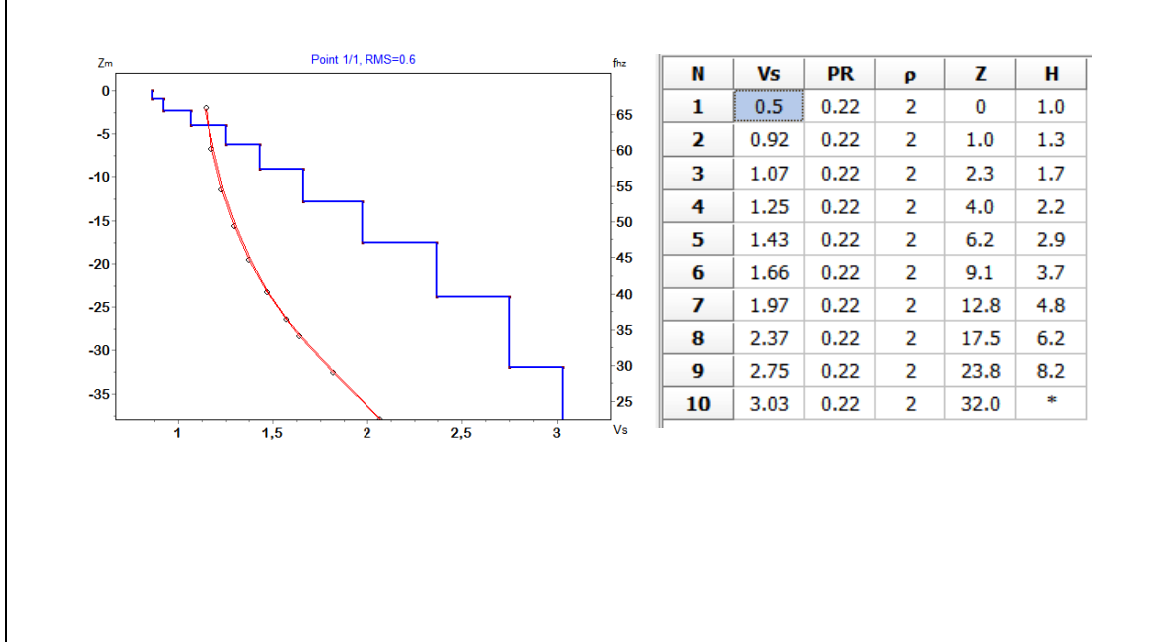


ALLEGATO 1 WTG012-MASW 1

Sismogramma acquisito- Spettro velocità di fase/frequenza
Curva di dispersione sperimentale e calcolata con profilo Vs
(Acquisizione con shot a 34,0 m)

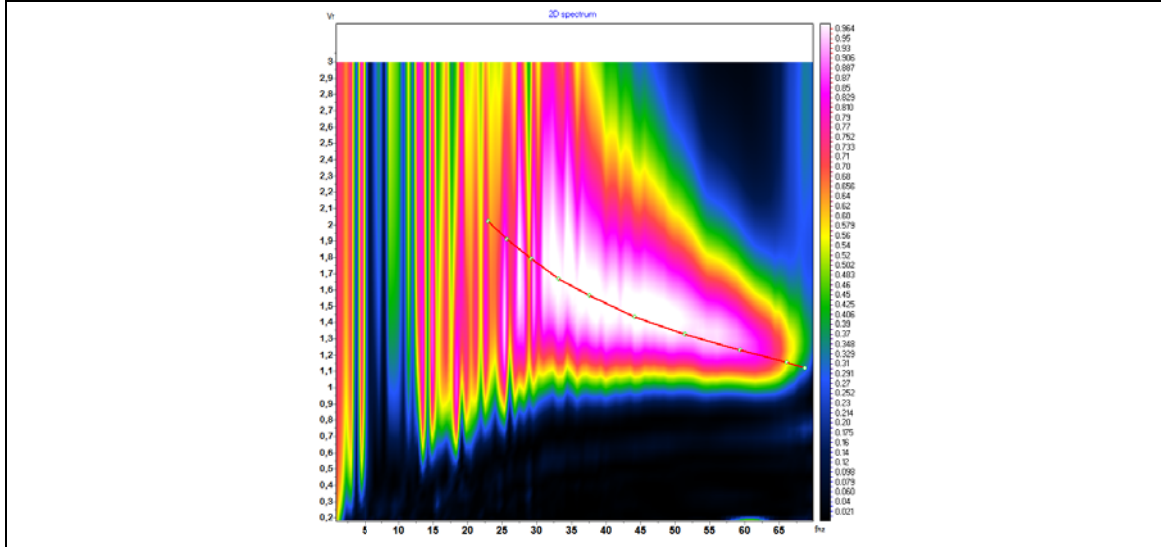
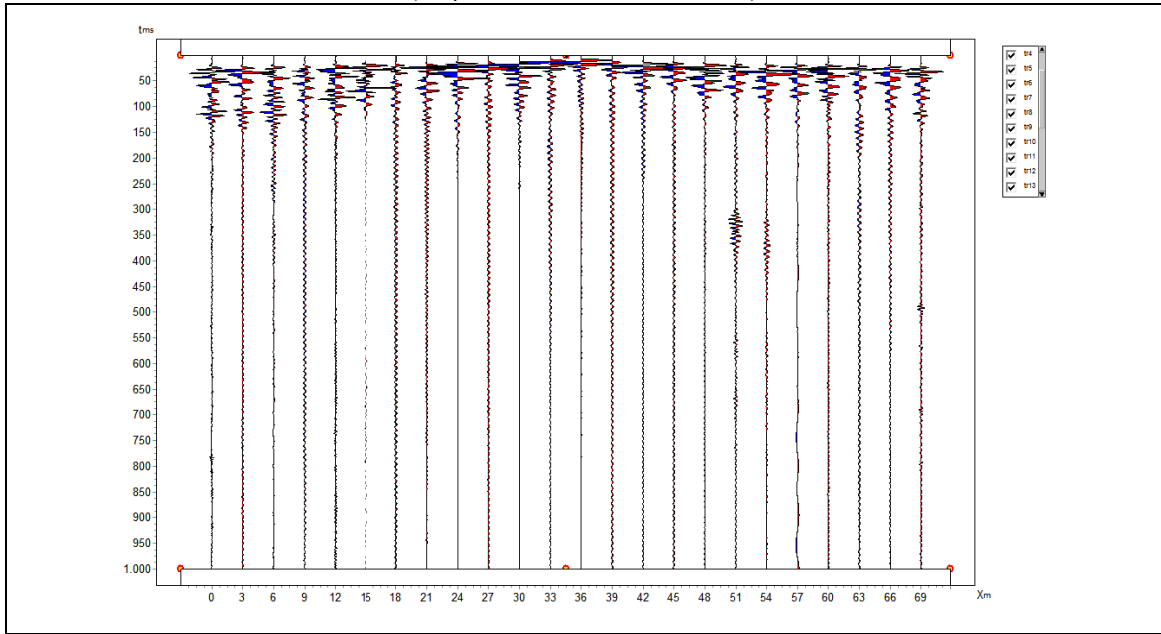


Profilo Vs – Bedrock a 1,0 metri da p.c. - Categoria A

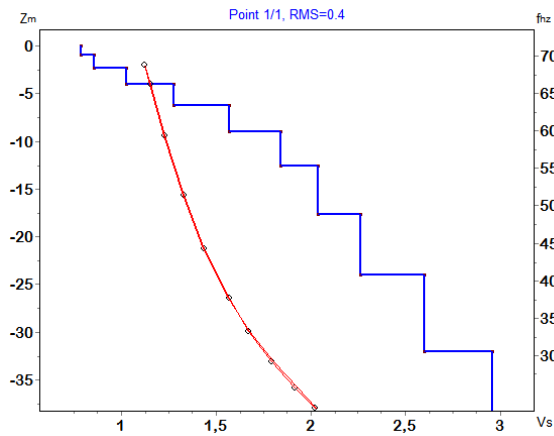


ALLEGATO 1 WTG006 – MASW 2

Sismogramma acquisito- Spettro velocità di fase/frequenza
Curva di dispersione sperimentale e calcolata con profilo Vs
(Acquisizione con shot a 34,0 m)



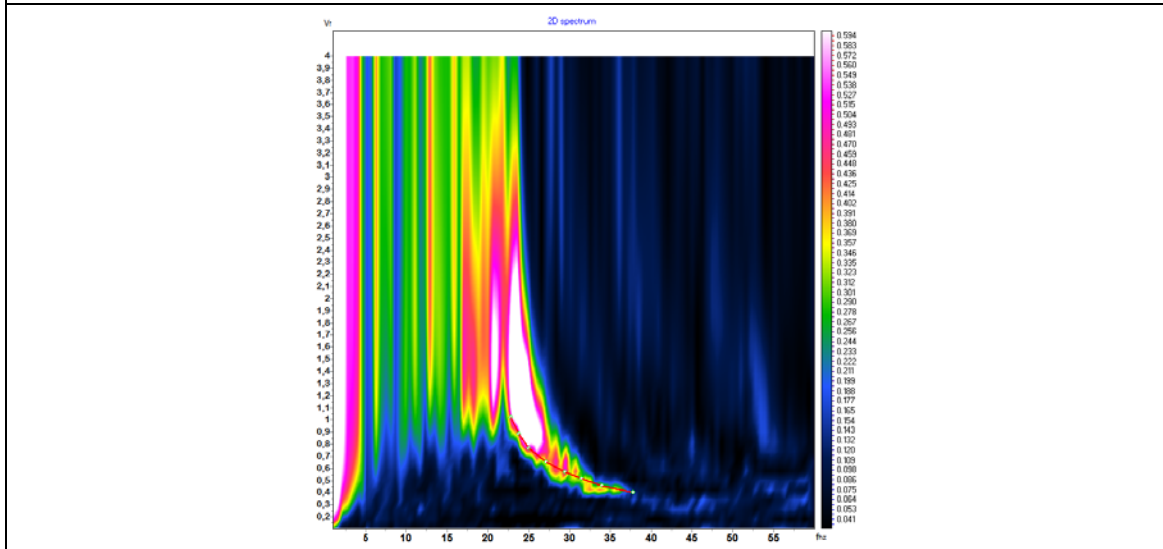
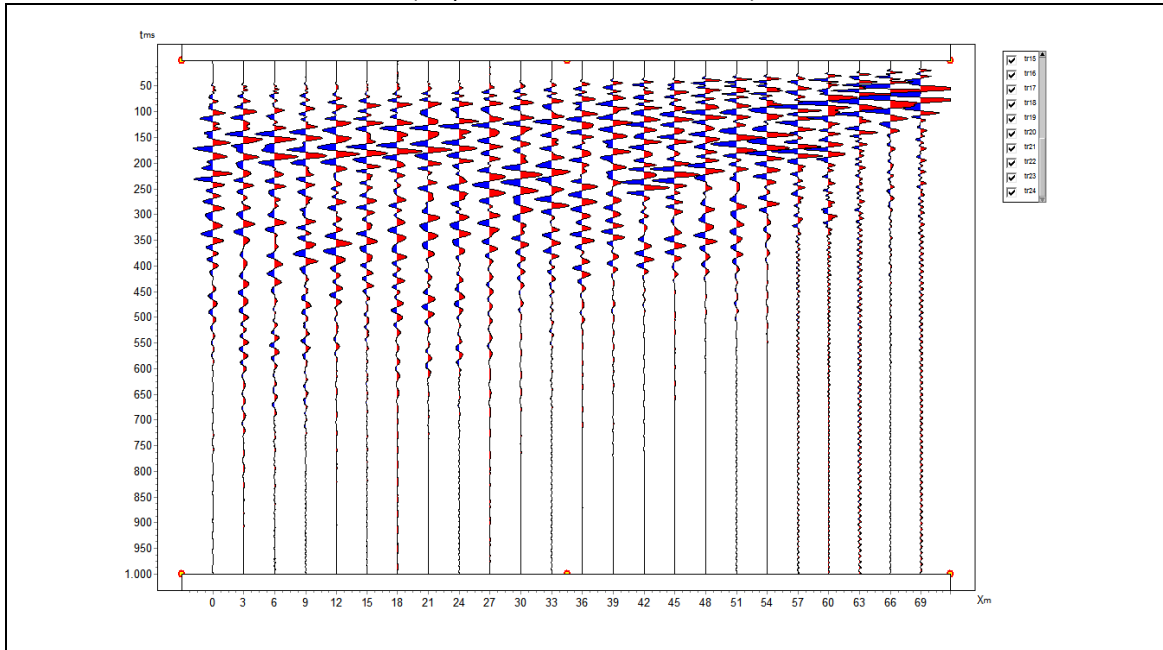
Profilo Vs – Bedrock a 1,0 metri da p.c. - Categoria A



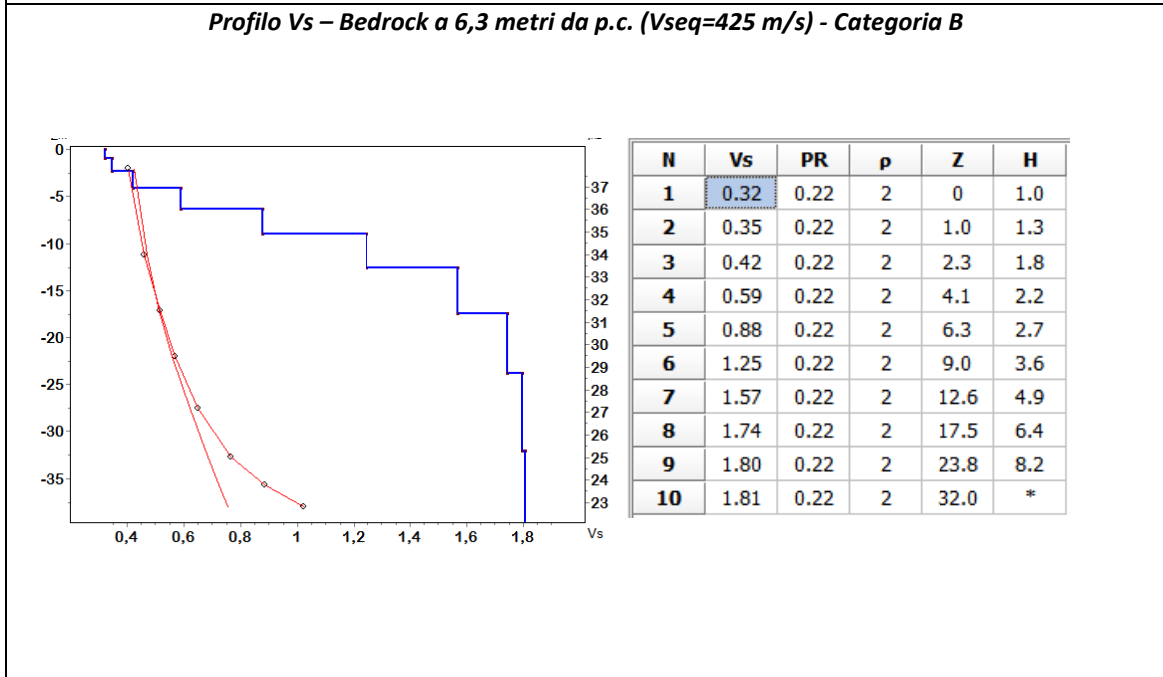
| N | Vs | PR | ρ | Z | H |
|----|------|------|--------|------|-----|
| 1 | 0.52 | 0.22 | 2 | 0 | 1.0 |
| 2 | 0.85 | 0.22 | 2 | 1.0 | 1.3 |
| 3 | 1.02 | 0.22 | 2 | 2.3 | 1.7 |
| 4 | 1.27 | 0.22 | 2 | 4.0 | 2.2 |
| 5 | 1.57 | 0.22 | 2 | 6.2 | 2.8 |
| 6 | 1.84 | 0.22 | 2 | 9.0 | 3.7 |
| 7 | 2.04 | 0.22 | 2 | 12.6 | 5.0 |
| 8 | 2.27 | 0.22 | 2 | 17.7 | 6.4 |
| 9 | 2.60 | 0.22 | 2 | 24.1 | 8.0 |
| 10 | 2.96 | 0.22 | 2 | 32.0 | * |

ALLEGATO 1 WTG005 – MASW 3

Sismogramma acquisito- Spettro velocità di fase/frequenza
Curva di dispersione sperimentale e calcolata con profilo Vs
(Acquisizione con shot a 75,0 m)

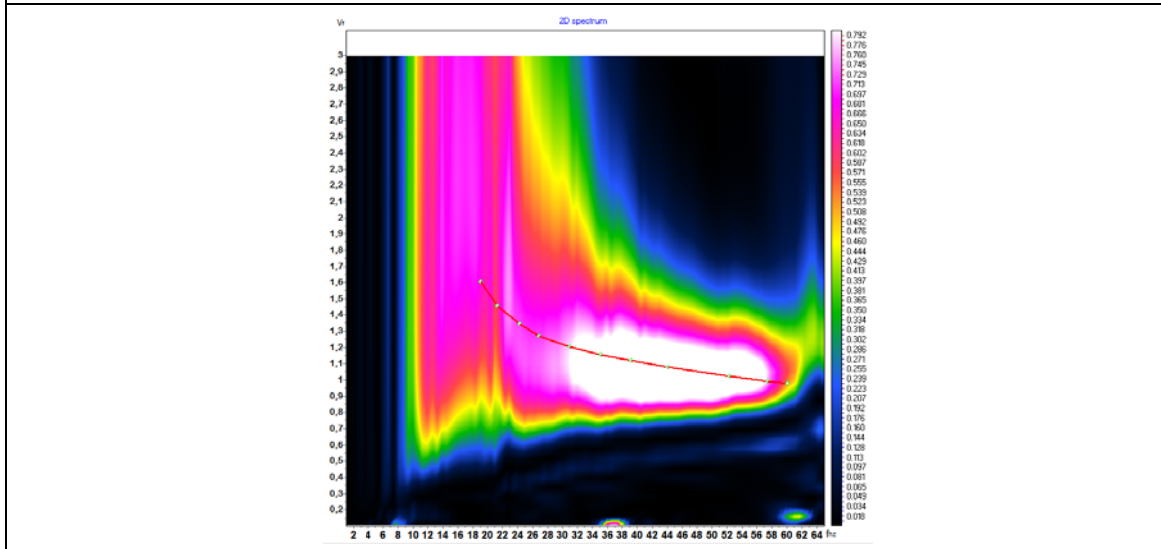
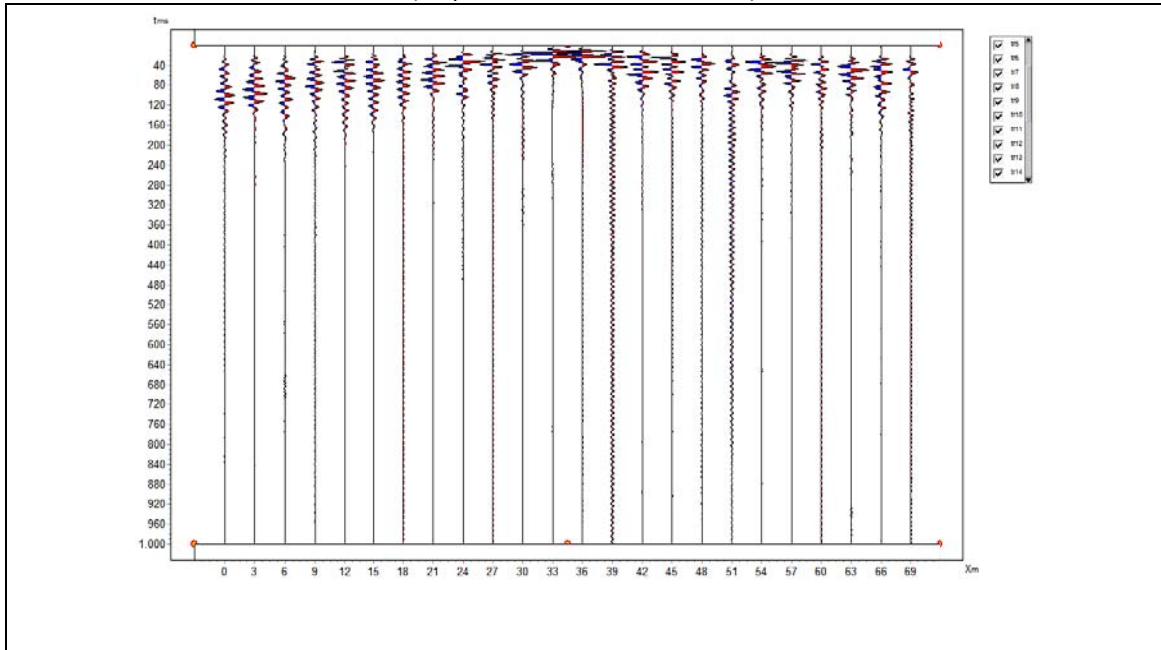


Profilo Vs – Bedrock a 6,3 metri da p.c. (Vseq=425 m/s) - Categoria B

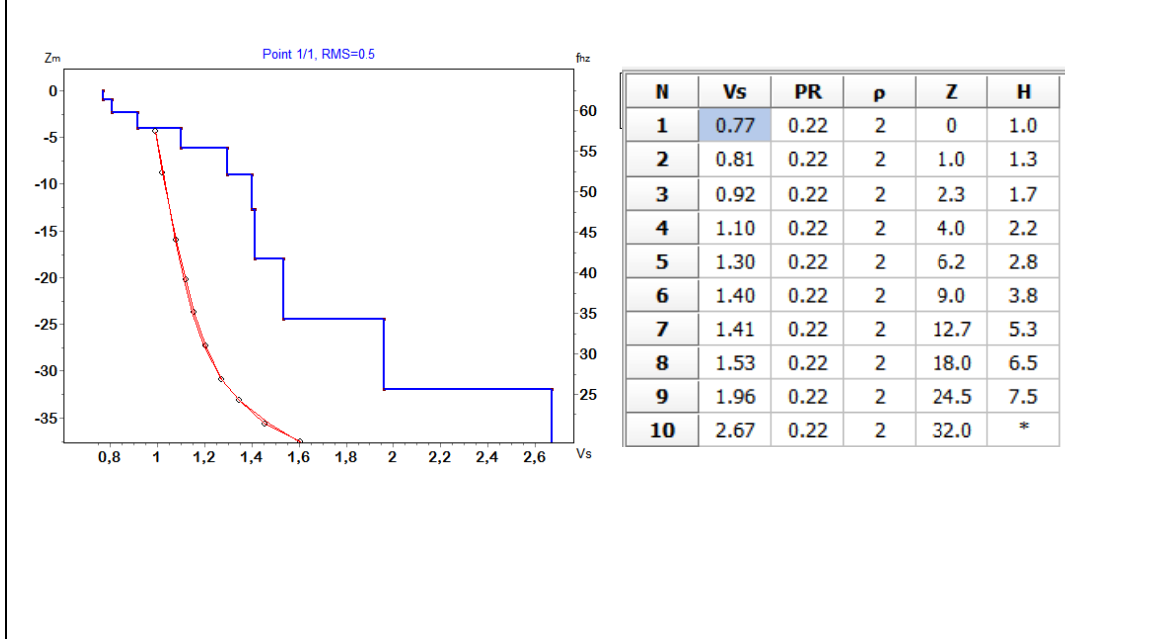


ALLEGATO 1 WTG001 – MASW 4

Sismogramma acquisito- Spettro velocità di fase/frequenza
Curva di dispersione sperimentale e calcolata con profilo Vs
(Acquisizione con shot a 34,0 m)



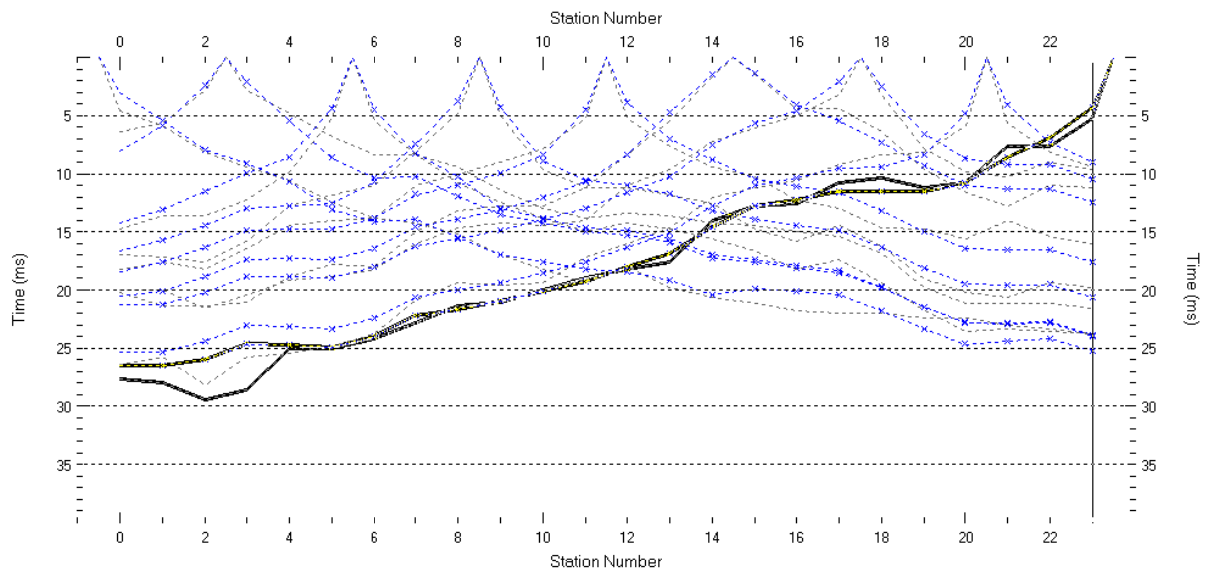
Profilo Vs – Bedrock a 1,0 metri da p.c. - Categoria A



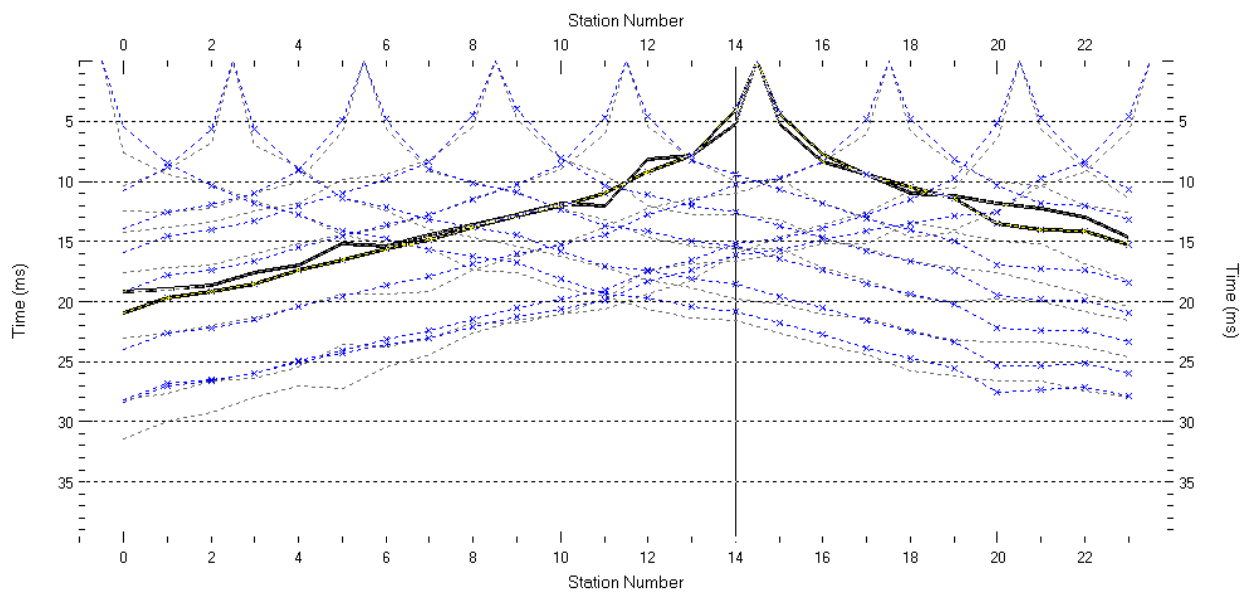
ALLEGATO 2

Sismica a rifrazione - dromocrone osservate e calcolate - grafico raggi sismici

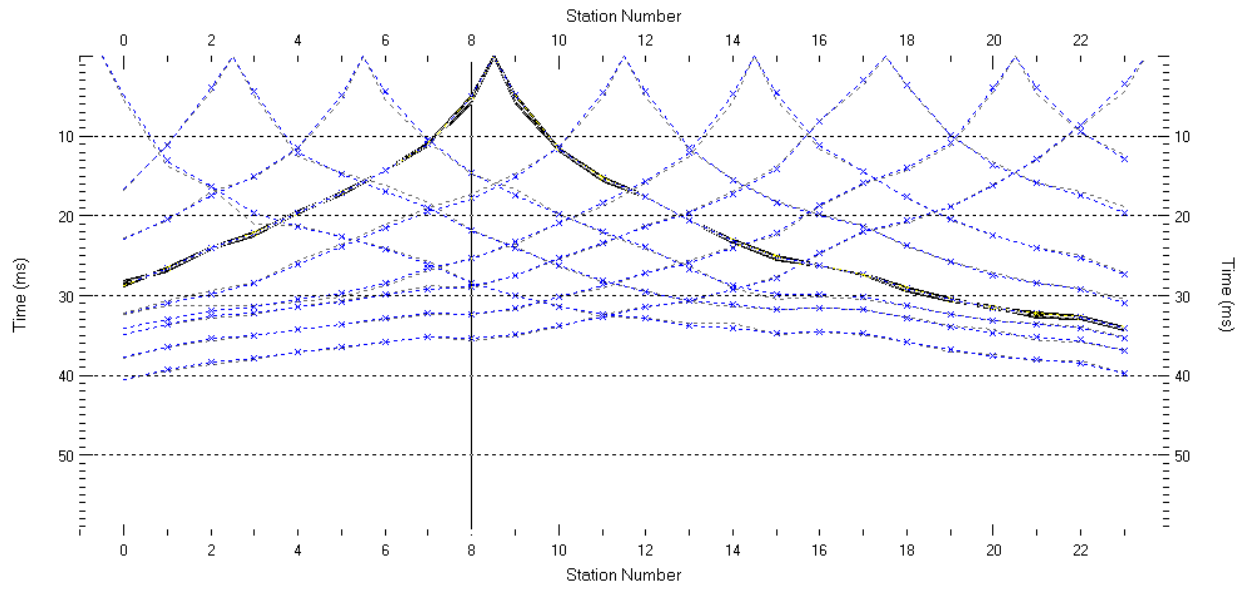
WTG012 - Sismica a rifrazione R1 in onde P - dromocrone osservate e calcolate



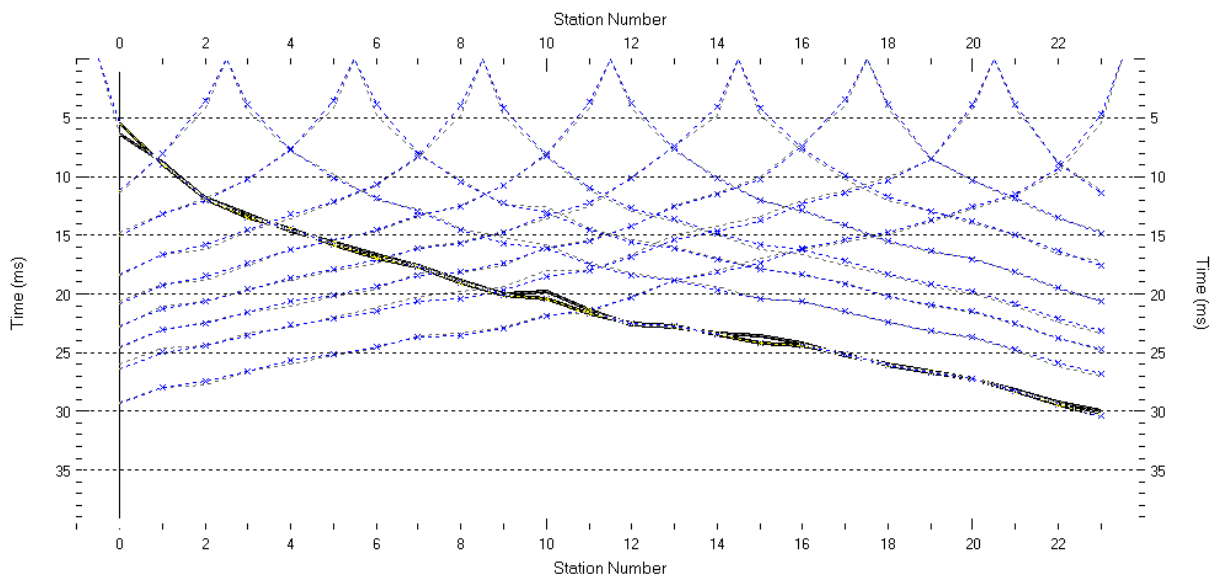
WTG006 - Sismica a rifrazione R2 in onde P - dromocrone osservate e calcolate



WTG005 - Sismica a rifrazione R3 in onde P - dromocrone osservate e calcolate



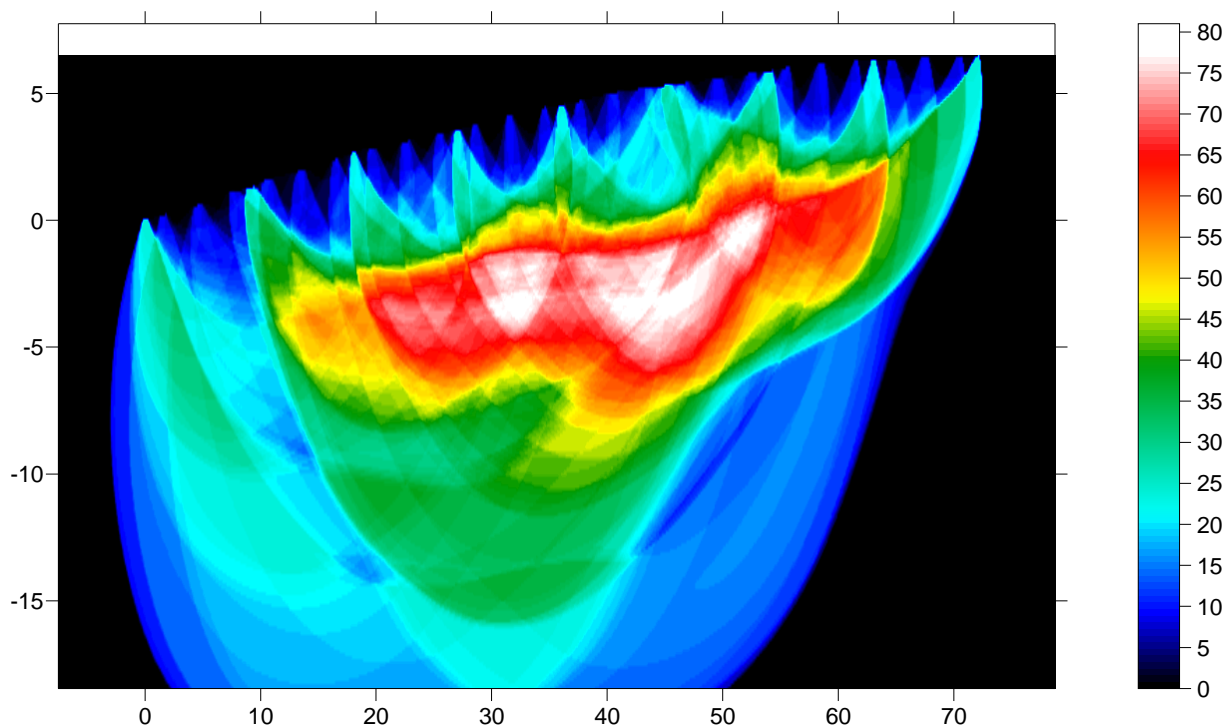
WTG001 - Sismica a rifrazione R4 in onde P - dromocrone osservate e calcolate



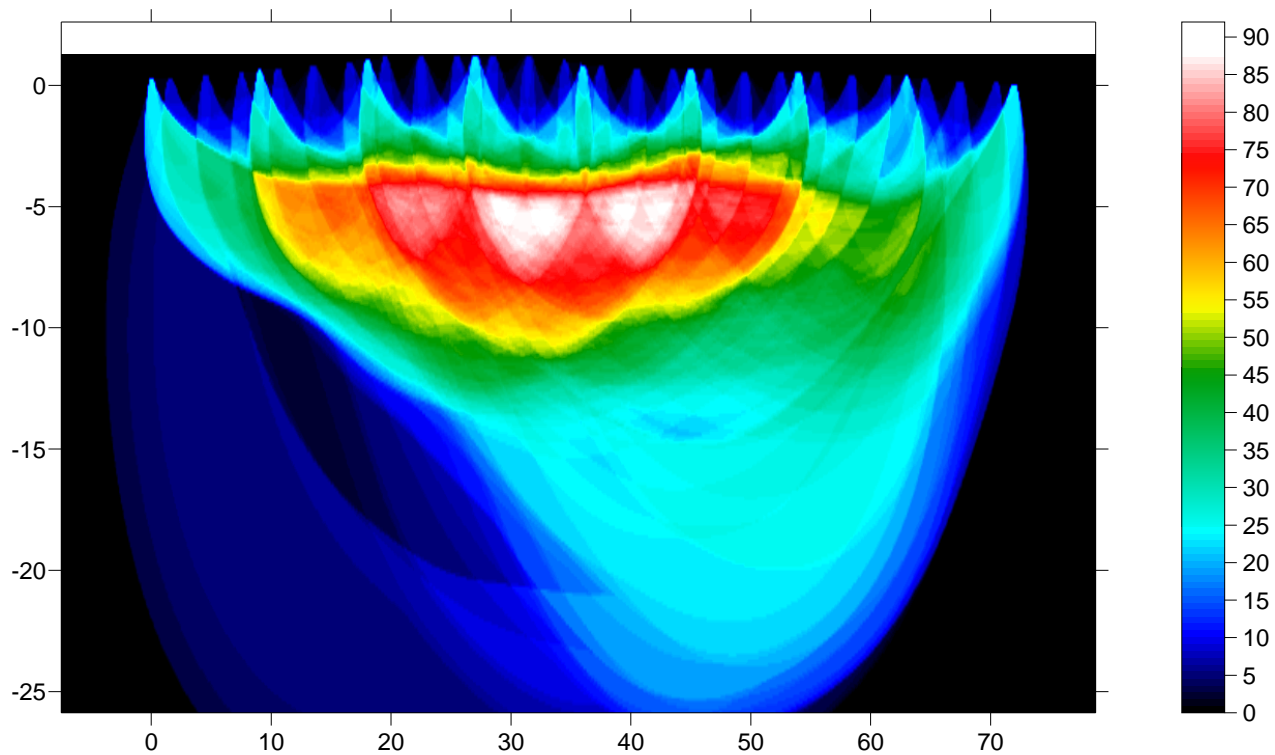
ALLEGATO 2

Sismica a rifrazione - dromocrone osservate e calcolate - grafico raggi sismici

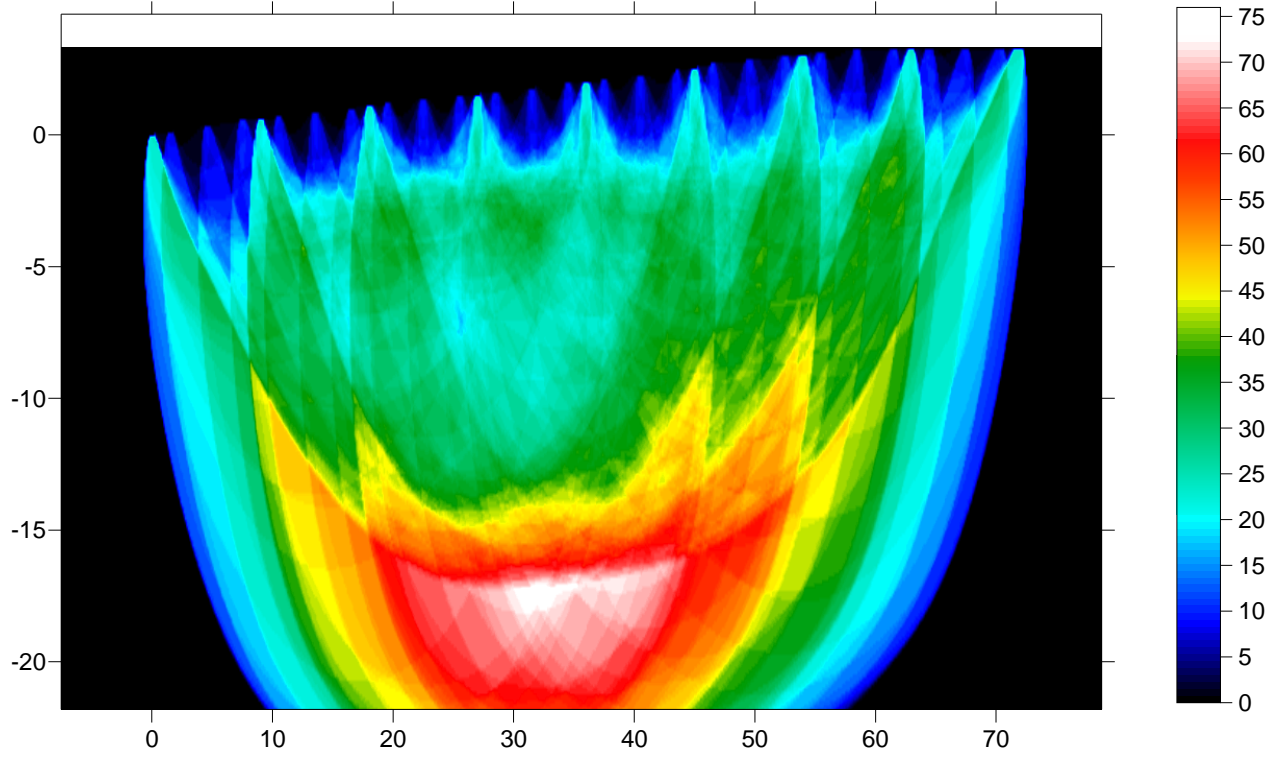
WTG012 - Sismica a rifrazione R1 in onde P
Copertura raggi sismici



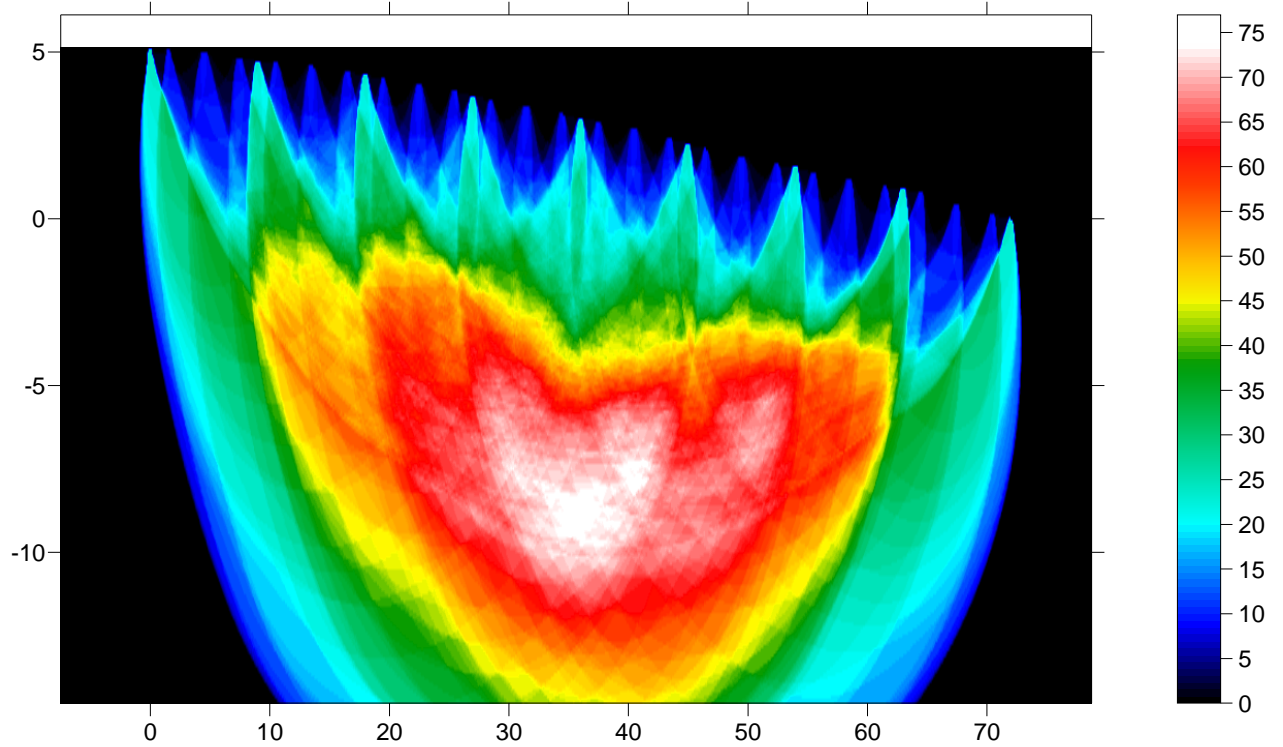
WTG006 - Sismica a rifrazione R2 in onde P
Copertura raggi sismici



WTG005 - Sismica a rifrazione R3 in onde P
Copertura raggi sismici



WTG001 - Sismica a rifrazione R4 in onde P
Copertura raggi sismici



Allegato 3: Documentazione fotografica indagini geofisiche

WTG012-Stendimento T1 dall'elettrodo 1



WTG012-Stendimento T1 dall'elettrodo 32



WTG012- Stazione Stendimento T1-R1/M1



WTG006-Stendimento T2 dal centro verso l'elettrodo 1



WTG006-Stendimento T2 dal centro verso l'elettrodo 32



WTG006-Stendimento R2/M2 dal centro verso il geofono 1



WTG006-Stendimento R2/M2 dal centro verso il geofono 24



WTG005-Stendimento T3 dall'elettrodo 1



WTG005-Stendimento T3 dall'elettrodo 32



WTG005-Stendimento R3/M3 dal geofono 1



WTG005-Stendimento R3/M3 dal geofono 24



WTG001-Stendimento T4 dall'elettrodo 1



WTG001-Stendimento T4 dall'elettrodo 32



WTG001-Stendimento R4/M4 dal geofono 1



**WTG001-Stendimento R4/M4 dal geofono
24**



Stazione Stendimenti T2-R2/M2



Stazione Stendimenti T4-R4/M4

