


**INTERVENTI DI ADEGUAMENTO DELLA DIGA DI GIUDEA
A GELLO NEL COMUNE DI PISTOIA (PT)**



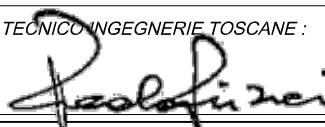
PROGETTO DEFINITIVO

Elaborato	Nome Elaborato:	Scala:
ET.04A	RELAZIONE GEOLOGICA, GEOLOGICO-TECNICA E SISMICA	-
		Data:
		gennaio 2020

Settore:	Sede Firenze Via de Sanctis, 49 Cod. Fiscale e P.I. 06111950488
	
<small>Organizzazione dotata di Sistema di Gestione Integrato certificato in conformità alla normativa ISO9001 - ISO14001 - OHSAS18001 - SA8000</small>	

PROGETTAZIONE : PROGETTISTA / PROJECT MANAGER : ING GIOVANNI SIMONELLI  GEOLOGO : DOTT. GEOL. FILIPPO LANDINI ESPROPRI : GEOM. ANDREA PATRIARCHI	COLLABORATORI : DOTT. GEOL. CARLO FERRI GEOM. MATTEO MASI
---	--

CONSULENTI TECNICI :  ING. DAVID SETTESOLDI  DOTT. GEOL. SIMONE FIASCHI  ING. GIOVANNI CANNATA	COMMESSA I.T. : INGT-TLPD-PBAAC252
	RESPONSABILE COMMITTENTE : ING. CRISTIANO AGOSTINI

DIRETTORE TECNICO INGEGNERIE TOSCANE :  ING. PAOLO PIZZARRI	RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO : ING. LEONARDO ROSSI
--	---

Rev.	Data	Descrizione / Motivo della revisione	Redatto	Controllato / Approvato
01	gennaio 2020	Prima Emissione	Fiaschi	Fiaschi

INDICE

1	PREMESSA	2
2	RELAZIONE PREISTRUTTORIA DELL'UFFICIO TECNICO PER LE DIGHE DI FIRENZE – LUGLIO 2018	3
3	RELAZIONE ISTRUTTORIA DEL MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI – NOVEMBRE 2018 4	
4	INQUADRAMENTO GEOGRAFICO.....	5
5	INQUADRAMENTO GEOLOGICO – CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DI DETTAGLIO	5
5.1	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	5
5.2	CARATTERISTICHE GEOLOGICO-TECNICHE DI DETTAGLIO.....	7
6	INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO.....	15
6.1	INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO.....	15
6.2	GEOMORFOLOGIA DI DETTAGLIO.....	15
7	INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO E IDROGEOLOGIA DI DETTAGLIO	23
8	INQUADRAMENTO SISMICO, STUDIO SISMOTETTONICA E ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE..	25
9	CONSIDERAZIONI SULLE PERICOLOSITÀ (GEOLOGICA ED IDRAULICA) DEL SITO D'INTERVENTO (ESTRATTI DELLE CARTOGRAFIE DEGLI S.U. VIGENTI E DEI PIANI SOVRAORDINATI DELL'AUTORITÀ DI BACINO DISTRETTUALE DELL'APPENNINO SETTENTRIONALE, P.A.I. E P.G.R.A.)	25
10	INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE	27
10.1	CAMPAGNA DI INDAGINE 1991 - 1993	30
10.2	CAMPAGNA DI INDAGINE 2007	34
10.3	CAMPAGNA DI INDAGINE 2012 - 2014	40
10.4	CAMPAGNA DI INDAGINE 2018 - 2019	46

ELENCO ALLEGATI

ET.04B: RELAZIONE SISMOTETTONICA, MODELLAZIONE SISMICA E ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

ET.04C: CAMPAGNA DI INDAGINE 1991-1993

ET.04D: CAMPAGNA DI INDAGINE 2007

ET.04E: CAMPAGNA DI INDAGINE 2012-2014

ET.04F: CAMPAGNA DI INDAGINE 2018

ET.04G: CAMPAGNA DI INDAGINE 2019

ET.04H: VERIFICA DI STABILITÀ LUNGO LA SPONDA SINISTRA DELL'INVASO

ELENCO TAVOLE

GEO.01: COROGRAFIA GENERALE

GEO.02: CARTA DI INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

GEO.03: CARTA GEOMORFOLOGICA DI DETTAGLIO

GEO.04: CARTA DI INQUADRAMENTO GEOLOGICO

GEO.05: CARTA GEOLOGICO-TECNICA DI DETTAGLIO

GEO.06: CARTA DELLE SEZIONI GEOLOGICO-TECNICHE

GEO.07: CARTA IDROGEOLOGICA DI DETTAGLIO

GEO.08: CARTA DELLA PERICOLOSITÀ GEOLOGICA/GEOMORFOLOGICA

GEO.09: CARTA DELLA PERICOLOSITÀ IDRAULICA

GEO.10: CARTA DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE

1 PREMESSA

Su incarico della Soc. Acqua S.p.a. vengono esposti e commentati i risultati delle indagini geologiche e geotecniche relative agli interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea, in loc. Gello nel Comune di Pistoia (PT).

Il presente progetto definitivo prevede di ottenere la sicurezza idraulica dell'invaso mediante un abbassamento complessivo della quota massima del coronamento.

Le condizioni al contorno per la definizione degli interventi di messa in sicurezza sono le seguenti:

- Il gestore Publiacqua ha individuato nel volume di 250.000-300.000 mc la capacità necessaria al fine di garantire l'approvvigionamento idropotabile della rete acquedottistica di Pistoia;
- Necessità di individuazione del sito di destinazione delle terre movimentate e rimosse dal rilevato arginale.

Sulla base delle condizioni sopra riportate e sulla base della geometria dell'invaso è stato individuato un intervento che prevede le seguenti caratteristiche:

- | | |
|---|----------------------------------|
| • Quota del nuovo coronamento: | 143.3 m slm; |
| • Quota del nuovo sfioratore di superficie: | 140 m slm; |
| • Quota minima piede di valle | 118.2 m s.l.m. non modificato; |
| • Scarico di fondo: | 128.0 m s.l.m. (testa pozzetto); |
| • Condotta di alimentazione dal T. Vincio | non modificata; |
| • Sistema di derivazione | 130.0 m s.l.m. (testa pozzetto). |

L'intervento prevede di abbassare la quota del coronamento di circa 7m e inoltre di scavare anche al piede dell'attuale tura fino a riportarsi alla quota di circa 128 m slm con il piede di monte del coronamento. I pozzetti di presa sono tenuti 1.0 m più alti del fondo con la realizzazione di un volume morto di circa 3000 mc.

In corrispondenza dello scarico di fondo verrà realizzata una depressione del terreno al fine di farlo affiorare e valutarne lo stato di manutenzione.

Le pendenze di progetto dei paramenti di monte e di valle saranno rispettivamente 1:3.75 e 1:4.25.

La lunghezza del coronamento sarà di circa 205m, la quota al piede del paramento di valle rimarrà di 118.2m con un'altezza del nuovo invaso di 25.1m.

Per i dettagli si rimanda agli elaborati progettuali allegati al presente progetto definitivo.

Si fa presente che l'area in esame risulta soggetta al Vincolo Idrogeologico (RD 3267/23, LR 39/00 s.m.i. e D.P.G.R. n. 32/R del 16/03/2010 Regolamento Forestale della Toscana).

La presente relazione è stata redatta in ottemperanza alla normativa vigente (D.M. 17/01/2018 – NTC 2018 ed a quanto disposto dal Piano per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I. - D.P.C.M. 06/05/2005) e del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (P.G.R.A. - on DPCM del 26 ottobre 2016).

Oltre alla normativa vigente il presente documento tiene conto delle integrazioni richieste dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – Dipartimento per le infrastrutture, i sistemi informativi e statistici – Direzione Generale per le dighe e le infrastrutture idriche ed elettriche (Relazione istruttoria per gli aspetti strutturali e geotecnici – Novembre 2018) e dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – Dipartimento per le infrastrutture, i sistemi informativi e statistici – Direzione Generale per le dighe e le infrastrutture idriche ed elettriche, Ufficio Tecnico per le dighe di Firenze (Relazione preistruttoria dell'Ufficio tecnico per le dighe di Firenze – Luglio 2018).

Per i dettagli su quanto richiesto dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – Dipartimento per le infrastrutture, i sistemi informativi e statistici – Direzione Generale per le dighe e le infrastrutture idriche ed elettriche (Novembre 2018) e dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – Dipartimento per le infrastrutture, i sistemi informativi e statistici – Direzione Generale per le dighe e le infrastrutture idriche ed elettriche, Ufficio Tecnico per le dighe di Firenze (Luglio 2018) si rimanda rispettivamente agli allegati 1 e 2 del presente elaborato.

2 RELAZIONE PREISTRUTTORIA DELL'UFFICIO TECNICO PER LE DIGHE DI FIRENZE – LUGLIO 2018

In data 26/07/2018, l'Ufficio Tecnico per le Dighe di Firenze con nota prot. n.17336 ha trasmesso la "relazione preistrutturativa" (allegato 2 del presente elaborato).

Nel documento, in merito al progetto definitivo in oggetto e per quanto riguarda gli aspetti inerenti alla presente relazione, l'Ufficio Tecnico per le dighe di Firenze ha espresso il seguente parere:

- **Elaborato cartografici del progetto definitivo:**
 - Cartografia geologica e geomorfologica: Si evidenzia la mancanza di una cartografia geologica e geomorfologica aggiornata a scala opportuna, sottoscritta da tecnico abilitato....
 - ... Non sono presenti elaborati di dettaglio relativi alle modalità di stabilizzazione del movimento franoso in sponda sinistra, che verrà attraversata dalla viabilità di cantiere per i mezzi pesanti in sinistra in assenza di verifiche di stabilità del versante.
- **Rispondenza allo stato dei luoghi:**
 - In base alla cartografia resa disponibile, non si ravvisano elementi di difformità sostanziali rispetto allo stato attuale dei luoghi sede dell'opera di sbarramento e dell'invaso, salvo per quanto riguarda la situazione della sponda sinistra, sede di un movimento franoso quiescente, che necessita di essere cartografato in dettaglio per la modellazione degli interventi di stabilizzazione. Nell'elaborato "All.L1 – Indagini storiche a disposizione, si fa cenno anche ad un dissesto presente in coda al bacino, al di sopra della quota di massimo vaso, non individuabile nella cartografia presentata.
- **Ulteriori osservazioni dell'Ufficio Tecnico per le Dighe di Firenze:**
 - 4. ... Le ulteriori richieste di integrazioni e le ulteriori raccomandazioni di questo Ufficio scaturite dall'esame del progetto preliminare hanno avuto parziale riscontro nella progettazione definitiva, risultando non approfonditamente affrontate le questioni relative alla stabilità della sponda sinistra dell'invaso, ...
 - 7. Il sito presenta un valore di accelerazione sismica al suolo per $T_r = 475$ anni superiore a $0,15 g$ (il valore di accelerazione sismica al suolo risulta pari a $0,17 g$ – zona sismica 2) e pertanto è richiesto lo studio sismotettonico del sito previsto dal punto C.7.7.1 del DMIT 22/06/2014, non presente.
 - 9. Si ritiene che debba essere prodotta la cartografia geologica e geomorfologica a scala opportuna dell'invaso e delle aree di pertinenza dell'opera di sbarramento, compreso lo scarico di superficie, aggiornata e sottoscritta da tecnico abilitato.
 - 10. Non risultano accertati gli elementi dimensionali dei dissesti che hanno coinvolto nel 1990 il paramento di monte della diga; in particolare non è stata indicata la posizione della superficie di scorrimento dei dissesti all'interno del rilevato.
 - 12. Nell'elaborato "All.L1 – indagini storiche a disposizione" viene riportata una sezione interpretativa di un set di indagini sismiche a rifrazione effettuate nel Luglio 2007 e riguardante presumibilmente il profilo della zona su cui insiste lo scarico di superficie; in detto elaborato non risulta riportata tuttavia la traccia degli stendimenti effettuati.

- *18. Non viene affrontata la questione relativa alla messa in sicurezza della sponda sinistra nella porzione interessata da un movimento franoso (in prossimità della "abitazione Niccolai", come definita nel verbale di visita di vigilanza), come richiesto in fase di istruttoria sul progetto preliminare; manca un rilievo geomorfologico di dettaglio di questa zona, con l'indicazione della geometria del dissesto; mancano indicazioni sulla posizione, nel sottosuolo, della superficie di scorrimento...*

Per tutti gli altri punti indicanti nella relazione preistruttoria dell'Ufficio Tecnico per le dighe di Firenze si rimanda all'allegato 2 del presente elaborato, mentre per le relative risposte, non inerenti alla parte geologica, si rimanda ai documenti a cura dell'Ing. David Settesoldi.

3 RELAZIONE ISTRUTTORIA DEL MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI – NOVEMBRE 2018

A novembre 2018, il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – Dipartimento per le infrastrutture, i sistemi informativi e statistici – Direzione Generale per le dighe e le infrastrutture idriche ed elettriche ha emesso la sua "Relazione istruttoria per gli aspetti strutturali e geotecnici" (allegato 1 del presente elaborato), inerente al progetto definitivo in oggetto.

Nel documento, in merito agli aspetti geologici, Il Ministero ha espresso il seguente parere:

- **Osservazioni sul quadro di conoscenza:**
 - *Manca un'elaborazione sistematica e unitaria delle informazioni disponibili, comprese quelle relative alle indagini, che consenta di definire compiutamente il quadro di conoscenza necessario allo sviluppo della progettazione. La questione è rilevante nel caso in esame, per il quale è necessario accertare le caratteristiche dimensionali dei dissesti che hanno coinvolto il paramento di monte della diga (individuare la superficie di scorrimento e i volumi di materiale coinvolti), al fine di valutare se sarà effettivamente rimosso tutto il materiale franato.*
- **Osservazioni sulle verifiche di stabilità del rilevato**
 - *(1) La caratterizzazione dei materiali è estremamente semplificata...*
 - *(2) Il Progettista ipotizza che il materiale costituente il rilevato allo stato di progetto sia omogeneo, senza fare alcuna distinzione tra il materiale "stabile" (non interessato dai dissesti degli anni '90) e quello rimaneggiato a seguito dei movimenti franosi. Si raccomanda di chiarire se sia stata prevista la rimozione di tutto materiale franato, oppure se e come questo materiale sia stato rappresentato nei modelli di calcolo.*
 - *(3) È necessario effettuare lo studio sismotettonico.*
 - *(4) Non è ammissibile il ricorso ad accelerogrammi artificiali, dovendosi utilizzare segnali naturali, eventualmente scalati, spettrocompatibili in media. Il numero di segnali non può essere inferiore a tre. È altresì necessario considerare la risposta sismica locale.*

Per tutti gli altri punti indicanti nella relazione istruttoria del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti si rimanda all'allegato 1 del presente elaborato, mentre per le relative risposte, non inerenti alla parte geologica, si rimanda ai documenti a cura dell'Ing. David Settesoldi.

4 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

L'area oggetto degli interventi è sita nella porzione centrale del Comune di Pistoia ad una distanza di circa 3,5 Km in direzione Nord-Ovest dal centro del capoluogo comunale (vedi Tav.GEO.01)

Dal punto di vista morfologico, l'area oggetto degli interventi, è posta sui rilievi collinari cretaco paleogenici a margine della piana villafranchiana Firenze-Prato-Pistoia (margine Nord-Ovest). La diga è posta sul crinale di una dorsale morfologica ad andamento circa Nord-Ovest/Sud-Est che funge da spartiacque fra il torrente Tazzera ad Ovest e il fosso della Casaccia ad Est. La diga, in uscita, ha come canale di scolo di valle il fosso Fontanacci.

Nel suddetto contesto morfologico, fra Maggio 1965 e Novembre 1970, è stato realizzato l'invaso antropico oggetto del presente elaborato.

L'area d'intervento è posta ad una quota media assoluta di circa 130/150 m s.l.m.

5 INQUADRAMENTO GEOLOGICO – CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DI DETTAGLIO

5.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il contesto in esame, come descritto nel capitolo precedente, è posto nella zona di passaggio fra i rilievi collinari cretaco-paleogenici (zona pedemontana) e la piana lacustre villafranchiana Firenze-Prato-Pistoia (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

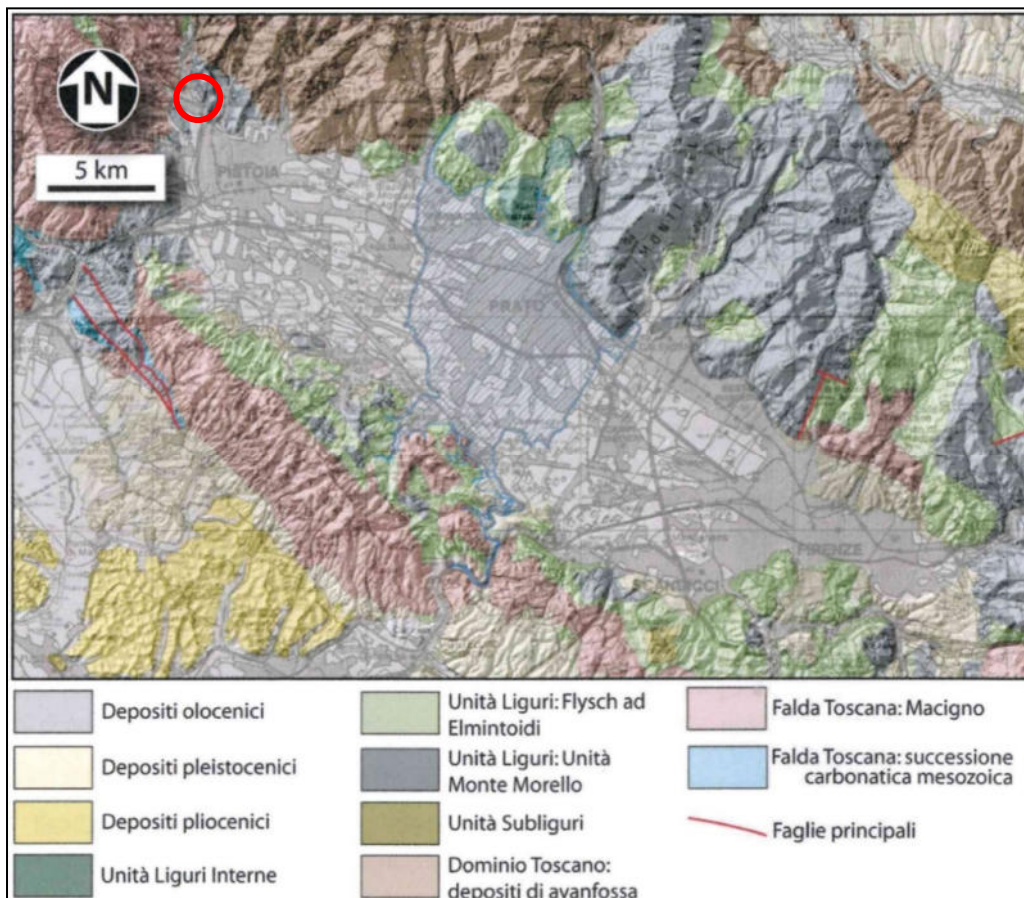


Fig. 1 – Schema geologico semplificato del Sistema della Piana Firenze-Prato-Pistoia (S. Angelini, G. Cannata, C. Lubello, M. Doveri, M. Menichini, 2016). In rosso l'area oggetto d'interesse

Da un punto di vista geologico, il suddetto contesto si inserisce nel quadro dell'evoluzione dell'Appennino Settentrionale. Una prima fase di natura compressiva, avvenuta durante il primo innalzamento della catena appenninica (Oligocene – Miocene), ha portato alla sovrapposizione delle formazioni appartenenti al dominio ligure su quelle del dominio toscano. A partire dal Miocene inf./ Pliocene, è iniziata una grande fase distensiva, in cui i movimenti verticali lungo le grandi superfici tettoniche, hanno creato una morfologia a bacini e catene alternate (depressioni e dorsali tettoniche). Nella piana Firenze-Prato-Pistoia, durante la fase distensiva, il progressivo abbassamento del bacino, veniva compensato dal notevole trasporto solido dei corsi d'acqua, tra cui il fiume Bisenzio rivestiva un ruolo predominante, grazie al forte sollevamento dell'area appenninica di origine, con conseguente deposizione di materiale macroclastico associato alla forma morfologica di conoide. Terminata nell'Olocene la fase sedimentaria suddetta, i corsi d'acqua suddetti hanno cominciato ad incidere le loro conoidi variando progressivamente il loro tracciato e diminuendo con il tempo la granulometria del materiale deposto (Consumi et al., 2016).

In considerazione di quanto sopra espresso la successione stratigrafica dell'area in esame viene così ad essere costituita dall'alto verso il basso in ordine cronologico dalle seguenti unità litologiche (vedi Tav. GEO.04):

- **Depositi alluvionali recenti (b) – Pliocene**
- **Merne di Marmoreto (MMA) – Ruperliano p.p. – Chattiano p.p**
- **Formazione di Sillano (SIL) – Cretacico sup. - Paleocene**

L'unità litologica delle alluvioni recenti (b) è caratterizzata da una composizione eterometrica e polimitica e su lungo il corso dei torrenti principali la granulometria è normalmente grossolana e sovente monomitica (arenaria) fino allo sbocco nelle pianure, dove si possono riconoscere anche conoidi di deiezione. Lungo gli alvei sono talvolta riconoscibili, ma non differenziabili, depositi riferibili a fenomeni di colata detritica. Nella pianura è possibile su vasta scala una differenziazione granulometrica fra prevalentemente grossolani e prevalentemente fini. Secondo la geologica riportata nel Database Geologico della Regione Toscana (<http://www502.regione.toscana.it/geoscopio/geologia.html>), nella porzione di interesse per il presente studio, risulta una prevalenza di depositi granulari rispetto ai depositi coesivi. Lo spessore dei depositi alluvionali recenti e attuali è generalmente ridotto lungo le valli secondarie dove di rado supera la decina di metri. Nella zona di piana, invece, tale spessore può raggiungere 30-40 m. Tale unità affiora a valle del bacino della Giudea, a Sud-Ovest, Nord-Est e Sud-Est della dorsale morfologica sul cui crinale è posto la diga in oggetto.

L'unità litologica delle Marne di Marmoreto (MMA) è caratterizzata da marne e marne calcaree grigio-verdi o verdi, dure ed a frattura scagliosa, marne argillitico-siltose, alternate a strati sottili di areniti a grana media, talvolta spessi fino ad 1 m, areniti manganesiferi e siltiti. A luoghi questa formazione è costituita da marne argillitico-siltose, grigio-scure, a cui si intercalano argilliti cinerine e varicolori e strati sottili di siltiti. La stratificazione e la continuità laterale degli strati silicoclastici spesso non sono riconoscibili. Le fratture (talvolta abbondanti) di apertura centimetrica ed estensione metrica, sono riempite da più generazioni di vene di calcite, che in alcuni casi formano un fitto reticolo. All'interno della formazione si possono intercalare lenti di debris flow, con clasti di calcilutiti silicee (prevalenti), marne e calcareniti in alcuni casi con una tessitura di argille a blocchi. La formazione si è presumibilmente deposta in un ambiente di scarpata tettonicamente instabile. A causa dell'intenso piegamento, lo spessore della formazione è difficilmente determinabile; Dallan et alii (1981) lo valutano in alcune centinaia di metri. Tale unità affiora immediatamente a monte del bacino della Giudea coinvolgendo la sponda NO dell'invaso.

La Formazione del Sillano (SIL) è caratterizzata da argilliti e argilliti marnose a frattura aciculare (da grigie a grigio-scure, grigio-verdi e grigio-marroni) a cui si alternano strati medi e spessi di calcari marnosi e strati sottili di calcareniti, arenarie fini e siltiti. La formazione è spesso deformata e scompaginata; infatti le argilliti

solitamente mostrano una tessitura scagliosa, mentre gli strati coerenti hanno continuità laterale; a luoghi la formazione è costituita da argilliti di colore marrone-chiaro o rosso vinaccia. All'interno della formazione sono inoltre presenti depositi di debris flow matrice sostenuti ed olistoliti. I primi sono costituiti da una matrice argillitica e da clasti di calcilutiti silicee con atine di alterazione ruggine o ocra, mentre su sezioni fresche hanno un colore grigio; gli olistoliti sono costituiti da blocchi di calcari marnosi, da brecce calcaree grossolane cementate, con granuli e clasti spigolosi e da ammassi di serpentiniti. La formazione presenta uno spessore reale stimato di circa 200-300 m.

Tale unità affiora in corrispondenza del bacino della Giudea.

5.2 CARATTERISTICHE GEOLOGICO-TECNICHE DI DETTAGLIO

Il presente capitolo, oltre ad approfondire gli aspetti geologici di area vasta descritti nel capitolo precedente è realizzato in risposta alle seguenti richieste di integrazioni pervenute dall'Ufficio Tecnico per le Dighe di Firenze di Luglio 2018 e dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – Dipartimento per le infrastrutture, i sistemi informativi e statistici – Direzione Generale per le dighe e le infrastrutture idriche ed elettriche (vedi Allegati 1 e 2 del presente elaborato):

- **Elaborato cartografici del progetto definitivo:**
 - *Cartografia geologica e geomorfologica: Si evidenzia la mancanza di una cartografia geologica e geomorfologica aggiornata a scala opportuna, sottoscritta da tecnico abilitato....*
- **Ulteriori osservazioni dell'Ufficio Tecnico per le Dighe di Firenze:**
 - *9. Si ritiene che debba essere prodotta la cartografia geologica e geomorfologica a scala opportuna dell'invaso e delle aree di pertinenza dell'opera di sbarramento, compreso lo scarico di superficie, aggiornata e sottoscritta da tecnico abilitato.*
- **Osservazioni sulle verifiche di stabilità del rilevato**
 - *(1) La caratterizzazione dei materiali è estremamente semplificata...*
 - *(2) Il Progettista ipotizza che il materiale costituente il rilevato allo stato di progetto sia omogeneo, senza fare alcuna distinzione tra il materiale "stabile" (non interessato dai dissesti degli anni '90) e quello rimaneggiato a seguito dei movimenti franosi. Si raccomanda di chiarire se sia stata prevista la rimozione di tutto materiale franato, oppure se e come questo materiale sia stato rappresentato nei modelli di calcolo.*

Il contesto geologico in esame mostra una netta dicotomia geologico-tecnica. Il quadro generale di area vasta è caratterizzato dalla presenza di un'alternanza di litotipi pelitici (argilliti e siltiti) e non pelitici (marne calcari, calcareniti e arenarie) a struttura scagliosa con presenza di molteplici piani di taglio tettonici con spaziatura millimetrica. Tali superfici si presentano lisce o striate ad andamento irregolare e talvolta caotico.

Il substrato presenta un grado di alterazione crescente con la profondità. Prendendo a riferimento le velocità delle onde sismiche registrate nelle indagini geofisiche eseguite dal 2007 ad oggi (vedi § 10) è possibile evidenziare un orizzonte superficiale con velocità medie delle onde S (Vs) comprese fra 500 e 600 m/sec e con spessore variabile da circa 10 m a circa 15 m. Al di sotto si riscontro un secondo orizzonte con gradi alterazione minore al precedente, e sempre decrescente con la profondità, con valori delle velocità medie delle onde S (Vs) superiori a 800 m/sec (Fig. 2).

Dal combinato disposto delle prove geotecniche eseguite sui campioni prelevati nel corso delle sessioni di indagini effettuate dal 1991 ad oggi (per i dettagli vedi § 10) e delle formule empiriche presenti in letteratura è stato possibile assegnare al substrato il seguente set di parametri geotecnici (Tab. 1):

Modulo id Bulk	K0	Mpa	12122
Modulo Elastico	E0	MPa	1810,8
Modulo di Taglio	G0	MPa	599
Coefficiente di poisson	σ		0,46
Angolo di attrito interno	ϕ	°	23,6
Coesione efficace	c'	MPa	0,024
Coesione non drenata	cu	MPa	0,146
porosità	n	%	32,272

Tab. 1 – Parametri geotecnici assegnati al substrato sulla base delle indagini eseguite dal 1991 ad oggi e sulla base delle formule empiriche presenti in letteratura

Al di sopra del substrato, è presente un orizzonte superficiale di copertura avente uno spessore variabile da circa 3 m a circa 6 m costituito da limo argilloso sabbioso marrone grigio da poco consistente a consistente derivante da processi di alterazione e pedogenesi del substrato (Fig. 3).

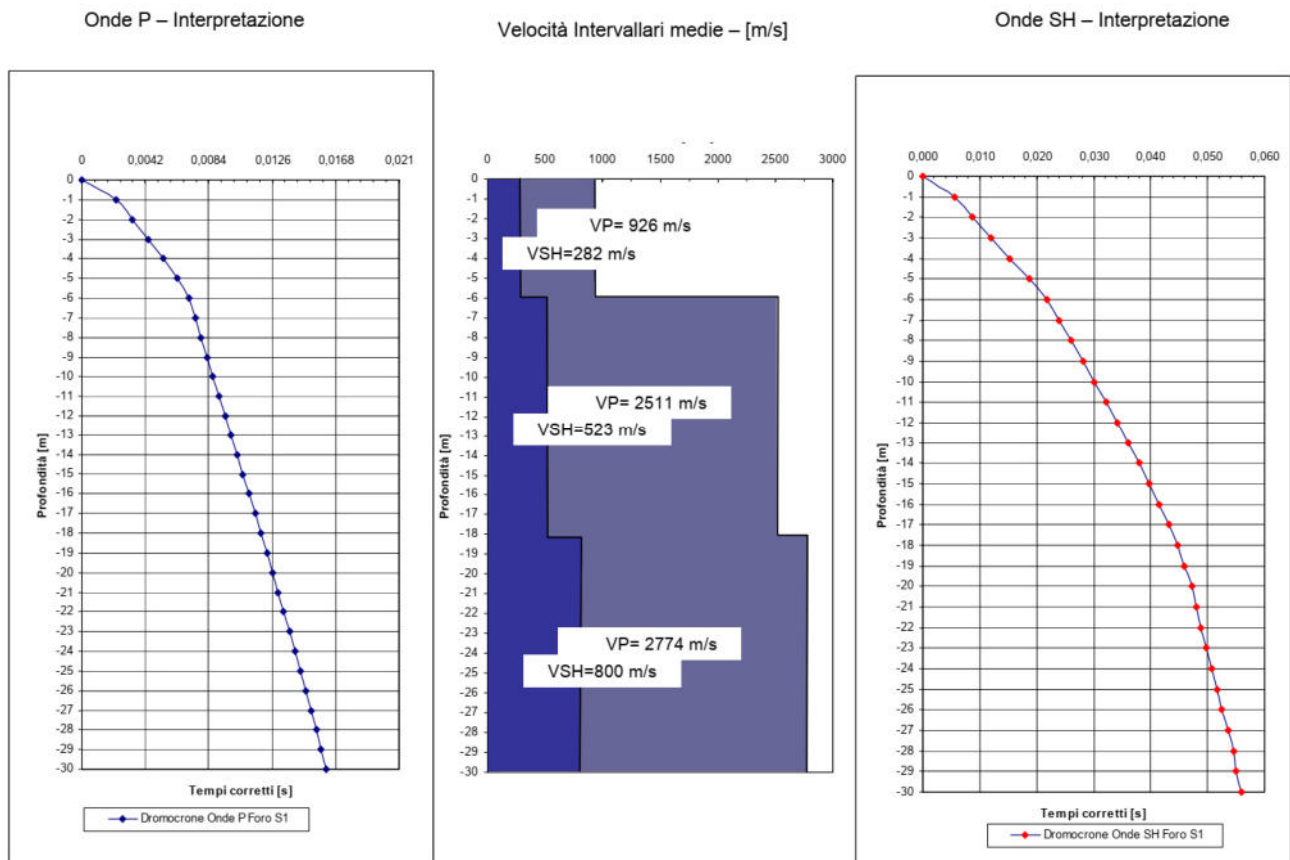


Fig. 2 – Grafico delle velocità intervallari medie (m/sec) delle onde P (Vp) e delle onde S (Vs) ricavate dalla prova sismica in foro DownHole (DH) eseguita nel sondaggio S1 del 2007 alla base del paramento di valle del corpo diga.

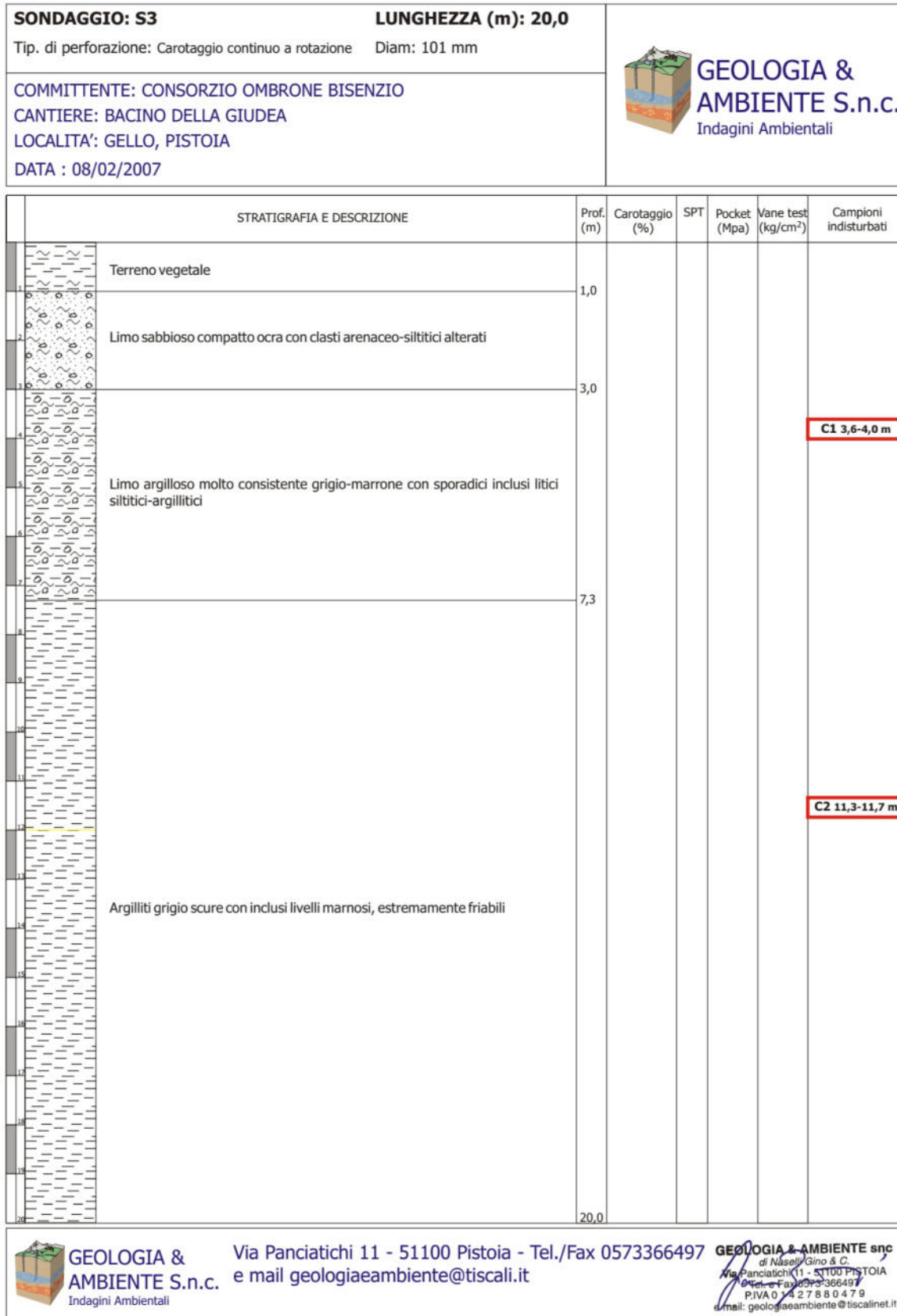


Fig. 3 – Stratigrafia del sondaggio S3 eseguito nel 2007 e posizionato lungo il versante SO (lungo la traccia del canale di scarico superficiale)

Tale orizzonte presenta una velocità delle onde sismiche P (V_p) compresa fra circa 700 m/sec e circa 900 m/sec (Fig. 4)



Fig. 4 – Risultato dell'indagine sismica a rifrazione onde P eseguita nel 2007 lungo la sonda destra dell'invaso e lungo il versante SO della dorsale morfologica sulla cui sommità è posto il bacino antropico della Giudea

Dal 1965, la porzione di dorsale pedemontata in oggetto è stata interessata da interventi antropici che hanno portato alla realizzazione del bacino antropico della Giudea (opera conclusa nel 1970 - Fig. 5).

L'opera ha previsto, oltre allo scavo dell'invaso, la realizzazione di una diga di valle in terra avente le seguenti caratteristiche tecniche:

- Altezza massima dal coronamento: 32 m
- Paramento di monte protetto da scogliera
- Larghezza coronamento: 6 m
- Lunghezza coronamento: 295 m
- Quota massima di coronamento: 150,06 m s.l.m.
- Larghezza scarico superficiale: 10,8 m
- Portata in uscita massima dallo scarico: 6,8 m³/sec
- Scarico di fondo con due tubazioni in acciaio del diametro di 450 mm e 400 mm
- Volume invaso massimo da progetto: 754.600 m³



Fig. 5 – Estratti delle ortofoto scattate sopra il bacino della Giudea nel 1963 (ante-operam – foto sopra) e nel 1978 (post-operam – foto sotto). Fonte Geoscopio – Regione Toscana

Il corpo diga risulta nel suo complesso mediamente omogeneo costituito da una netta prevalenza di materiale coesivo (limo/argilla) con presenza di piccoli orizzonti/lenti di materiale più granulare (sabbie e ghiaie). Dalle indagini geognostiche e geofisiche eseguite lungo il corpo diga dal 1991 ad oggi è stato possibile suddividere il corpo diga in tre macrodomini, qui di seguito elencati (Fig. 6 e Fig. 7):

- **MD1:** un macrodominio superficiale costituito principalmente da materiale limoso con presenza abbondante ma non prevalente della componente argillosa. Presenza di clasti e materiale sabbioso in subordine rispetto alla componente coesiva. Il macrodominio presenta una distribuzione spaziale (in direzione trasversale al corpo diga) discontinua, essendo presente sulla sommità del corpo diga e nella parte basale del paramento di monte. Il suo spessore medio è di circa 10 m.
- **MD2:** un macrodominio intermedio costituito principalmente da materiale argilloso con presenza abbondante ma non prevalente della componente limosa. Presenza di clasti e materiale sabbioso in subordine rispetto alla componente coesiva. Il macrodominio presenta una distribuzione spaziale continua ed uno spessore medio è di circa 11 m.
- **MD3:** un macrodominio superficiale costituito principalmente da materiale limoso con presenza abbondante ma non prevalente della componente argillosa. Presenza di clasti e materiale sabbioso in subordine rispetto alla componente coesiva. Presenza di livelli argillosi con frequenza maggiore rispetto al macrodominio 1 (MD1). Il macrodominio presenta una distribuzione spaziale continua ed uno spessore medio è di circa 6 m.

Dal combinato disposto delle prove geotecniche eseguite sui campioni prelevati nel corso delle sessioni di indagini effettuate dal 1991 ad oggi (per i dettagli vedi § 10) e delle formule empiriche presenti in letteratura è stato possibile assegnare ai macrodomini del corpo diga i seguenti set di parametri geotecnici (Tab. 2):

Macrodominio 1	Modulo id Bulk	K0	Mpa	401,2
	Modulo Elastico	E0	MPa	231,5
	Modulo di Taglio	G0	MPa	82,44
	Coefficiente di poisson	σ		0,4
	Angolo di attrito interno	ϕ	°	21,6
	Coesione efficace	c'	MPa	0,024
	Coesione non drenata	cu	MPa	0,074
	porosità	n	%	31,85
Macrodominio 2	Modulo id Bulk	K0	Mpa	759,3
	Modulo Elastico	E0	MPa	400,5
	Modulo di Taglio	G0	MPa	141,8
	Coefficiente di poisson	σ		0,41
	Angolo di attrito interno	ϕ	°	24,2
	Coesione efficace	c'	MPa	0,023
	Coesione non drenata	cu	MPa	0,076
	porosità	n	%	34,94
Macrodominio 3	Modulo id Bulk	K0	Mpa	1274
	Modulo Elastico	E0	MPa	735,4
	Modulo di Taglio	G0	MPa	147
	Coefficiente di poisson	σ		0,44
	Angolo di attrito interno	ϕ	°	23,4
	Coesione efficace	c'	MPa	0,022
	Coesione non drenata	cu	MPa	0,073
	porosità	n	%	30,4

Tab. 2 - Parametri geotecnici assegnati ai macrodomini del corpo diga sulla base delle indagini eseguite dal 1991 ad oggi e sulla base delle formule empiriche presenti in letteratura

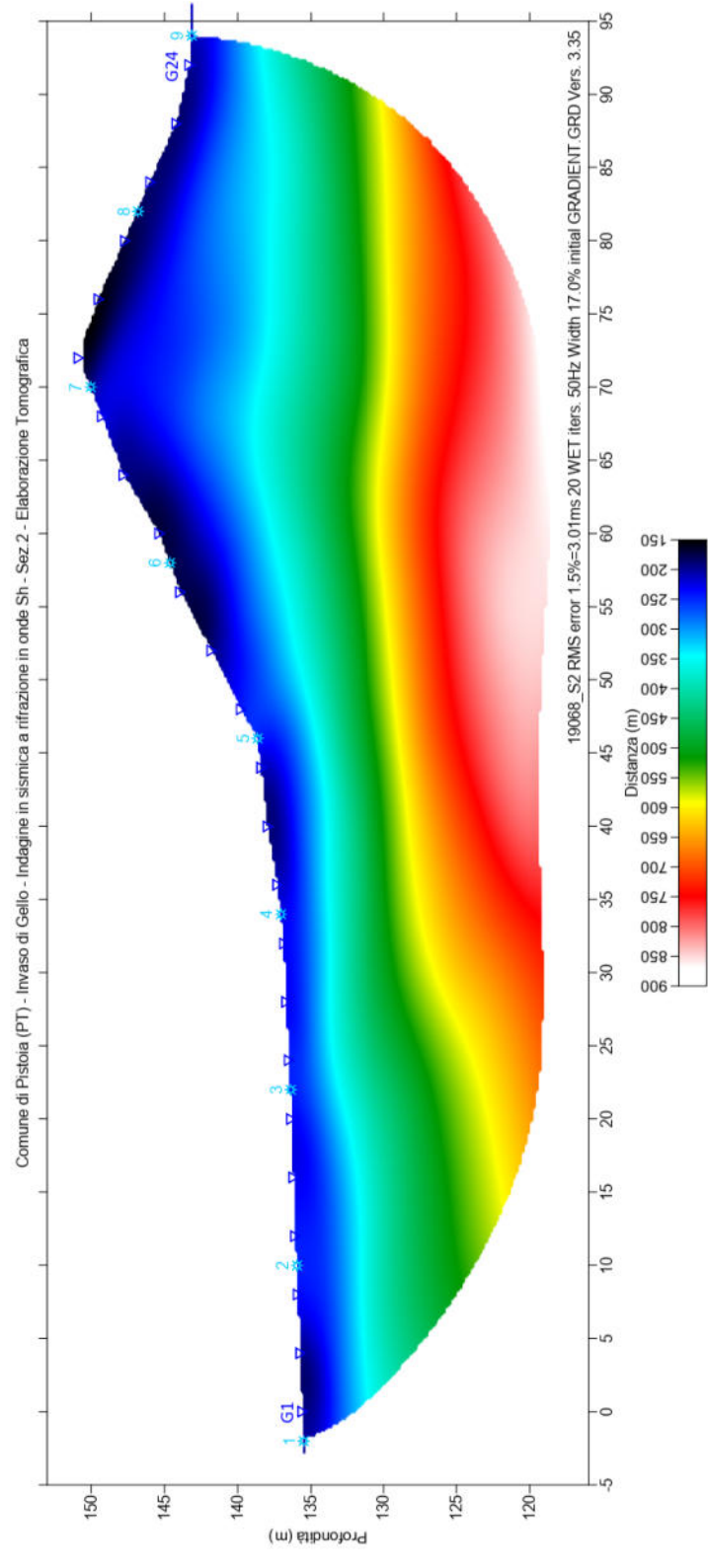
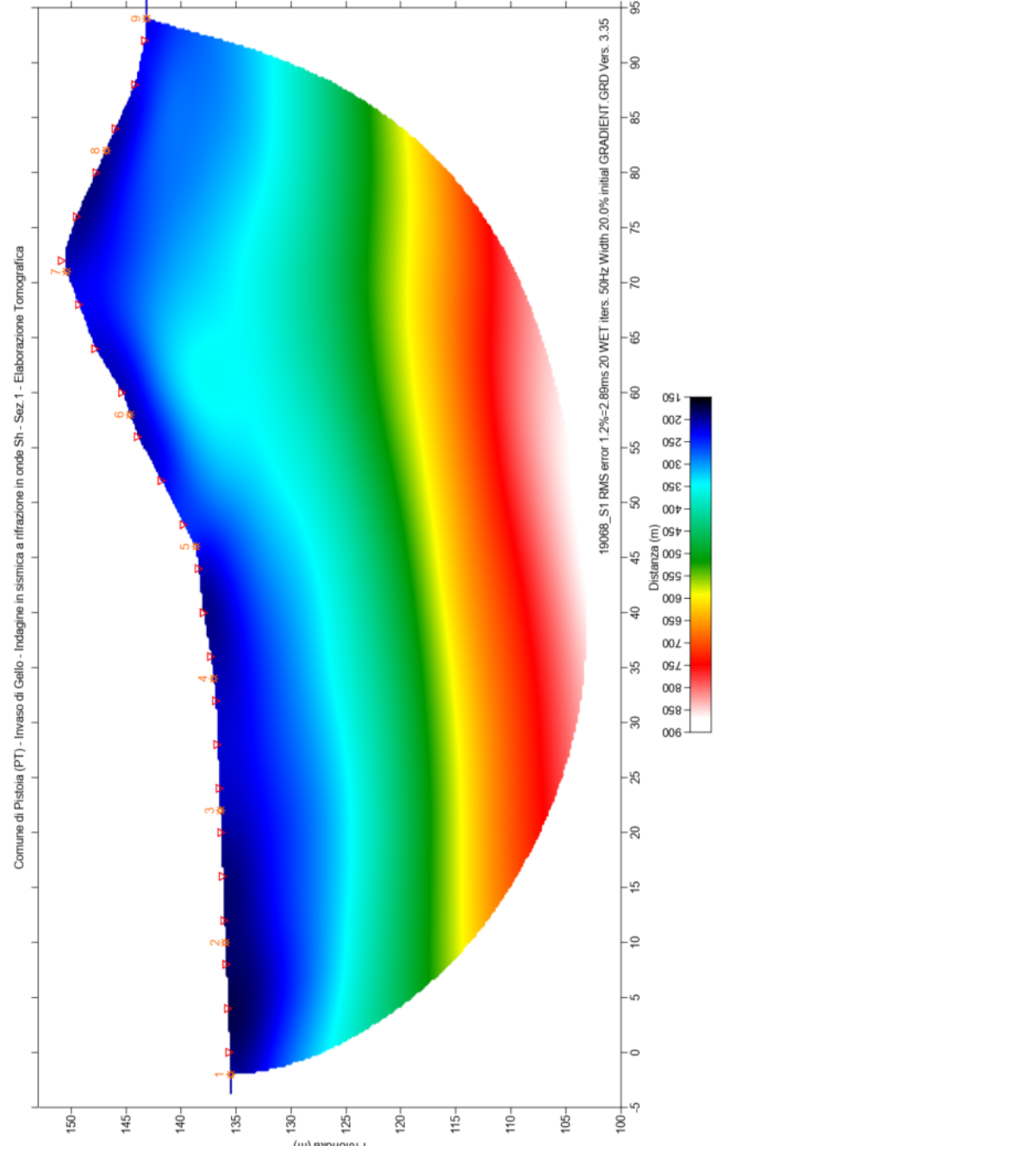


Fig. 7 – Tomografie trasversali del corpo diga derivanti dalle indagini sismiche a rifrazione del 2019. Il corpo diga presenta una velocità delle onde sismiche S (V_s) inferiore a 500 m/sec

Per i dettagli sulle sezioni geologico-tecniche realizzate nell'area del bacino antropico della Giudea si rimanda alla Tav. GEO.06. Per i dettagli sulle indagini geognostiche e geofisiche realizzate a supporto delle varie fasi progettuali che si sono succedute dal 1991 ad oggi si rimanda al § 10 e agli allegati ET.04 C, D, E, F e G.

Per i dettagli cartografici geologici e geologico-tecnici dell'area in esame si rimanda alle Tavv. GEO.04 e GEO.05.

6 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

6.1 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

Come descritto nei §§ 4 e 5.1 l'area in studio si pone lungo una dorsale pedemontana morfologica ad andamento circa NO-SE. A partire dal 1965 tale dorsale, per una porzione della sua area di crinale, è stata oggetto di interventi antropici al fine di realizzare l'attuale bacino della Giudea. Il progetto, oltre a prevedere lo scavo dell'invaso ha visto la messa in opera di un corpo diga di valle costituito da uno sbarramento in terra alto circa 32 m nel suo punto di massima.

In termini di area vasta l'area interessata dal presente studio risulta relativamente stabile con la sola presenza di alcune frane quiescenti poste lungo il versante SO della dorsale in indagine (vedi Tav.GEO.02). Tali frane non interessano direttamente l'area del bacino della Giudea in quanto poste a debita distanza a valle dello stesso. Tale assetto è confermato sia dal Database Geomorfologico della Regione Toscana sia dalla cartografia geomorfologica realizzata a supporto del vigente Piano Strutturale del Comune di Pistoia (PT).

In termini di acclività l'area dell'invaso presenta basse pendenze (inferiori al 5%) ad eccezione delle sponde dell'invaso e dello sbarramento di valle che presentano una pendenza superiore al 5% con picchi superiori al 15%.

All'esterno dell'area antropica di interesse le pendenze risultano variabili da <5% dell'area di crinale fino a valori mediamente comprese fra 10% e 15%.

6.2 GEOMORFOLOGIA DI DETTAGLIO

Il presente capitolo, oltre ad approfondire gli aspetti geomorfologici di area vasta descritti nel capitolo precedente è realizzato in risposta alle seguenti richieste di integrazioni pervenute dall'Ufficio Tecnico per le Dighe di Firenze di Luglio 2018 e dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – Dipartimento per le infrastrutture, i sistemi informativi e statistici – Direzione Generale per le dighe e le infrastrutture idriche ed elettriche (vedi Allegati 1 e 2 del presente elaborato):

- **Elaborato cartografici del progetto definitivo:**
 - *Cartografia geologica e geomorfologica: Si evidenzia la mancanza di una cartografia geologica e geomorfologica aggiornata a scala opportuna, sottoscritta da tecnico abilitato....*
- **Rispondenza allo stato dei luoghi:**
 - *In base alla cartografia resa disponibile, non si ravvisano elementi di difformità sostanziali rispetto allo stato attuale dei luoghi sede dell'opera di sbarramento e dell'invaso, salvo per quanto riguarda la situazione della sponda sinistra, sede di un movimento franoso quiescente, che necessita di essere cartografato in dettaglio per la modellazione degli interventi di stabilizzazione. Nell'elaborato "All.L1 – Indagini storiche a disposizione, si fa cenno anche ad un dissesto presente in coda al bacino, al di sopra della quota di massimo invasore, non individuabile nella cartografia presentata*

- **Ulteriori osservazioni dell'Ufficio Tecnico per le Dighe di Firenze:**
 - 4. ... Le ulteriori richieste di integrazioni e le ulteriori raccomandazioni di questo Ufficio scaturite dall'esame del progetto preliminare hanno avuto parziale riscontro nella progettazione definitiva, risultando non approfonditamente affrontate le questioni relative alla stabilità della sponda sinistra dell'invaso, ...
 - 9. Si ritiene che debba essere prodotta la cartografia geologica e geomorfologica a scala opportuna dell'invaso e delle aree di pertinenza dell'opera di sbarramento, compreso lo scarico di superficie, aggiornata e sottoscritta da tecnico abilitato.
 - 10. Non risultano accertati gli elementi dimensionali dei dissesti che hanno coinvolto nel 1990 il paramento di monte della diga; in particolare non è stata indicata la posizione della superficie di scorrimento dei dissesti all'interno del rilevato.
 - 18. Non viene affrontata la questione relativa alla messa in sicurezza della sponda sinistra nella porzione interessata da un movimento franoso (in prossimità della "abitazione Niccolai", come definita nel verbale di visita di vigilanza), come richiesto in fase di istruttoria sul progetto preliminare; manca un rilievo geomorfologico di dettaglio di questa zona, con l'indicazione della geometria del dissesto; mancano indicazioni sulla posizione, nel sottosuolo, della superficie di scorrimento...
- **Osservazioni sulle verifiche di stabilità del rilevato**
 - (2) Il Progettista ipotizza che il materiale costituente il rilevato allo stato di progetto sia omogeneo, senza fare alcuna distinzione tra il materiale "stabile" (non interessato dai dissesti degli anni '90) e quello rimaneggiato a seguito dei movimenti franosi. Si raccomanda di chiarire se sia stata prevista la rimozione di tutto materiale franato, oppure se e come questo materiale sia stato rappresentato nei modelli di calcolo.

Nel 2019 è stato eseguito un rilievo geomorfologico di dettaglio dell'area in studio. Per quanto riguarda il quadro geomorfologico di area vasta, esterno al bacino della Giudea, esso risulta pressochè coerente con quanto indicato nella cartografia a supporto del vigente P.S. comunale e del Database Geomorfologico della Regione Toscana (vedi Tav. GEO.02). All'interno del bacino della Giudea si riscontrano invece alcune criticità geomorfologiche che è stato opportuno approfondire con il combinato disposto del rilievo geomorfologico e dei risultati delle indagini geognostiche e geofisiche eseguite nel corso degli anni.

A partire dal 1990 si è verificato sia sulla sponda sinistra dell'invaso che sul paramento di monte del corpo diga dei dissesti franosi classificabili come a scivolamento rotazionale che hanno interessato ampie aree dei due settori suddetti e che hanno portato al momentaneo arresto del funzionamento dell'invaso antropico (Fig. 8).

A seguito dei franamenti suddetti, nel 1993, fu realizzata una tura al piede di monte del rilevato antropico al fine di riprendere parzialmente il funzionamento dell'opera con un invaso massimo di circa 65.000 m³.

La suddetta tura è stata realizzata utilizzando i terreni franati e quelli derivanti dal rimodellamento della porzione di paramento di monte franata nel 1990.



Fig. 8 - Estratti delle ortofoto scattate sopra il bacino della Giudea nel 1978 (post-operam – foto sopra) e nel 1998(post-franamento e realizzazione della tura al piede di monte dello sbarramento – foto sotto). Fonte Geoscopio – Regione Toscana

In virtù di ciò lungo il paramento di monte, allo stato attuale non risultano criticità geomorfologiche di spessore rilevante. L'attuale superficie del paramento di monte rappresenta la vecchia superficie di scivolamento rimodellata al fine di garantire la sicurezza all'invaso nel suo utilizzo a volume provvisorio.

A supporto di tale tesi è possibile osservare il confronto fra i risultati delle prove penetrometriche eseguite lungo il paramento di monte e quelle eseguite lungo il paramento di valle del corpo diga (Fig. 9).

Ad ulteriore supporto di tale tesi, nessuno dei sondaggi eseguiti lungo il coronamento del corpo diga o lungo il paramento di monte ha mostrato, nelle relative descrizioni, evidenza di terreni superficiali allentati associabili a corpi di frana.

In virtù di ciò gli interventi di progetto, descritti brevemente nel § 1, andranno a rimuovere completamente qualsiasi criticità geomorfologica residua presente eventualmente lungo il paramento di monte del corpo diga.

Per quanto riguarda la sponda sinistra, la situazione risulta più complessa in quanto al corpo di frana rilevato nella campagna d'indagine del 1991 si aggiungono ampie aree adiacenti al suddetto che mostrano segni di potenziale instabilità con possibili fenomeni di scivolamento superficiale.

Il corpo di frana rilevato mostra uno spessore lungo il versante di circa 1,2 m / 2 m. Tale valore tende a crescere verso valle passando ad un valore, prossimo all'invaso di circa 3,5 m / 4 m. Per la geometria del corpo di frana presente sulla sponda sinistra dell'invaso si rimanda alle Tav. GEO.03 e GEO.06 (Fig. 10).

Sulla base della presenza della suddetta criticità geomorfologica è stata eseguita una verifica di stabilità della porzione di versante suddetta al fine di controllare il livello di criticità dello stesso.

La verifica è stata eseguita a lungo termine, in condizioni sismica e con gli orizzonti superficiali (orizzonti del corpo di frana) completamente saturi.

La verifica è stata eseguita con il metodo di calcolo: Borselli (2016). I parametri sono stati ricavati partendo dai risultati dalle prove di laboratorio sui campioni prelevati nelle varie sessioni di indagine confrontati con i risultati delle prove penetrometriche eseguite nel sito specifico del corpo di frana.

Al termine dei calcoli è risultato un fattore di sicurezza minimo di circa 1,16. Considerato che la normativa vigente in materia prevede un fattore di sicurezza minimo di 1,1 la condizione di criticità rilevata dai sopralluoghi è confermata anche dalla verifica di stabilità (vedi Fig. 11 e allegato ET.04H).

In virtù di ciò al fine di garantire la massima stabilità della porzione di versante interessata dalla criticità geomorfologica rilevata, si prevede di realizzare un'opera di ingegneria ambientale caratterizzata da palificate lungo il corpo di frana. Per i dettagli si rimanda alla Tav. GEO.03 del presente elaborato.

Le palificate saranno realizzate in legno e si svilupperanno trasversalmente alla sponda sinistra su 4 file posti tutte al di sopra della quota massima di invasore prevista da progetto (circa 140 m s.l.m.). Ogni gradone di palificata sarà integrato con fascinate di opportuno elemento vegetale (Fig. 12).

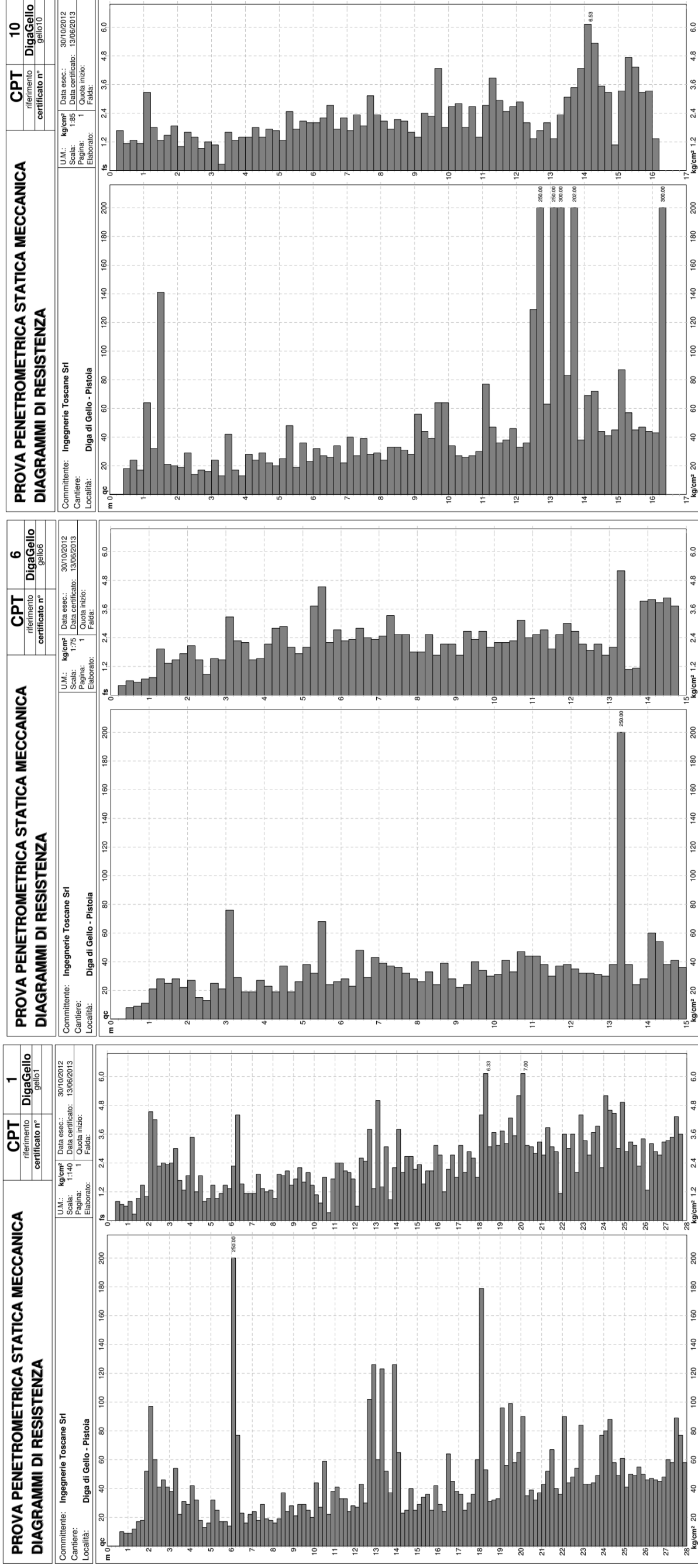


Fig. 9 – Confronto fra prove penetrometriche eseguite sul corpo diga. CPT 1 eseguita sul coronamento del corpo diga, CPT 6 eseguita lungo il paramento di monte e CPT 10 eseguita lungo il paramento di valle. Indagini del 2012

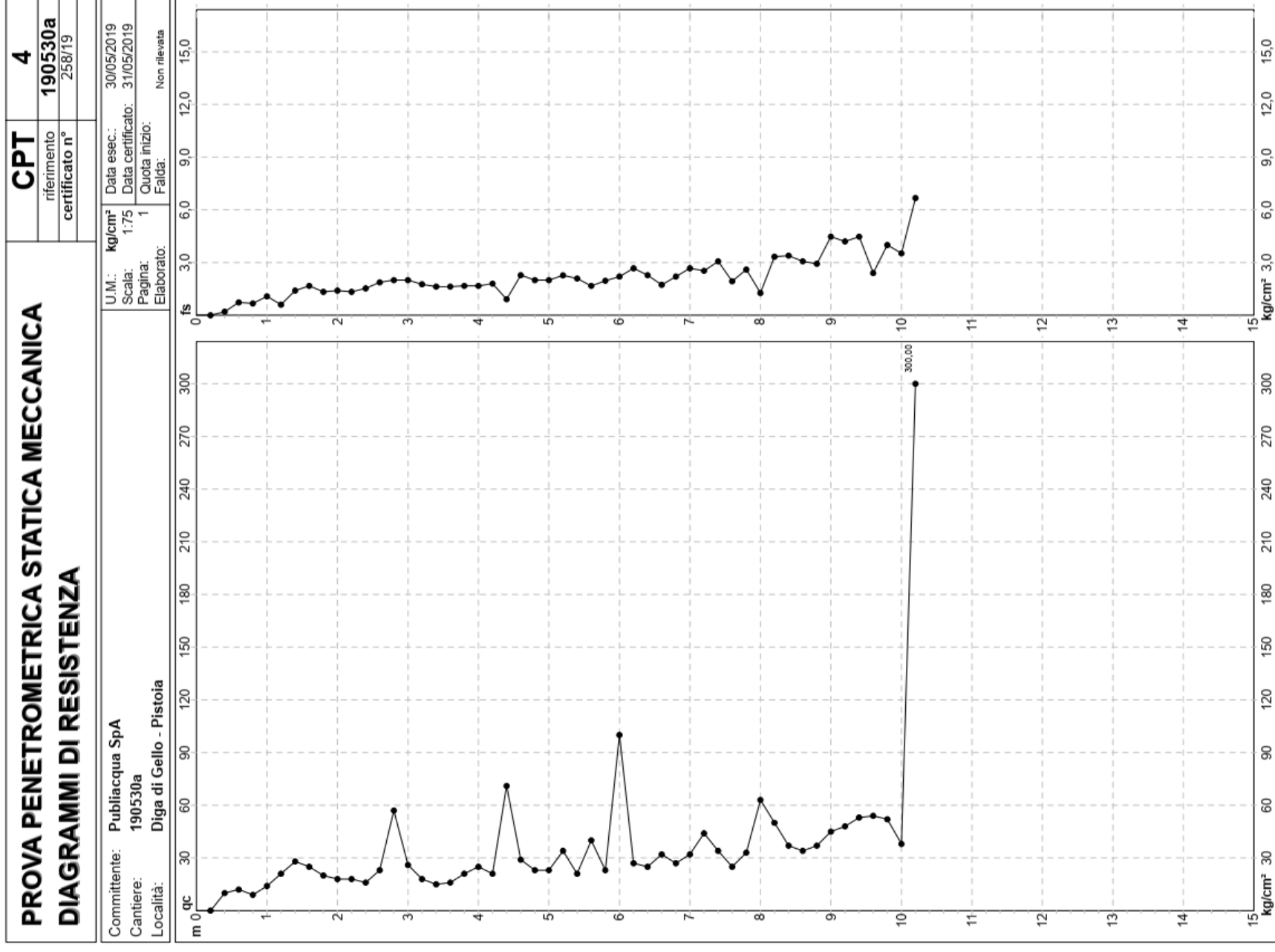
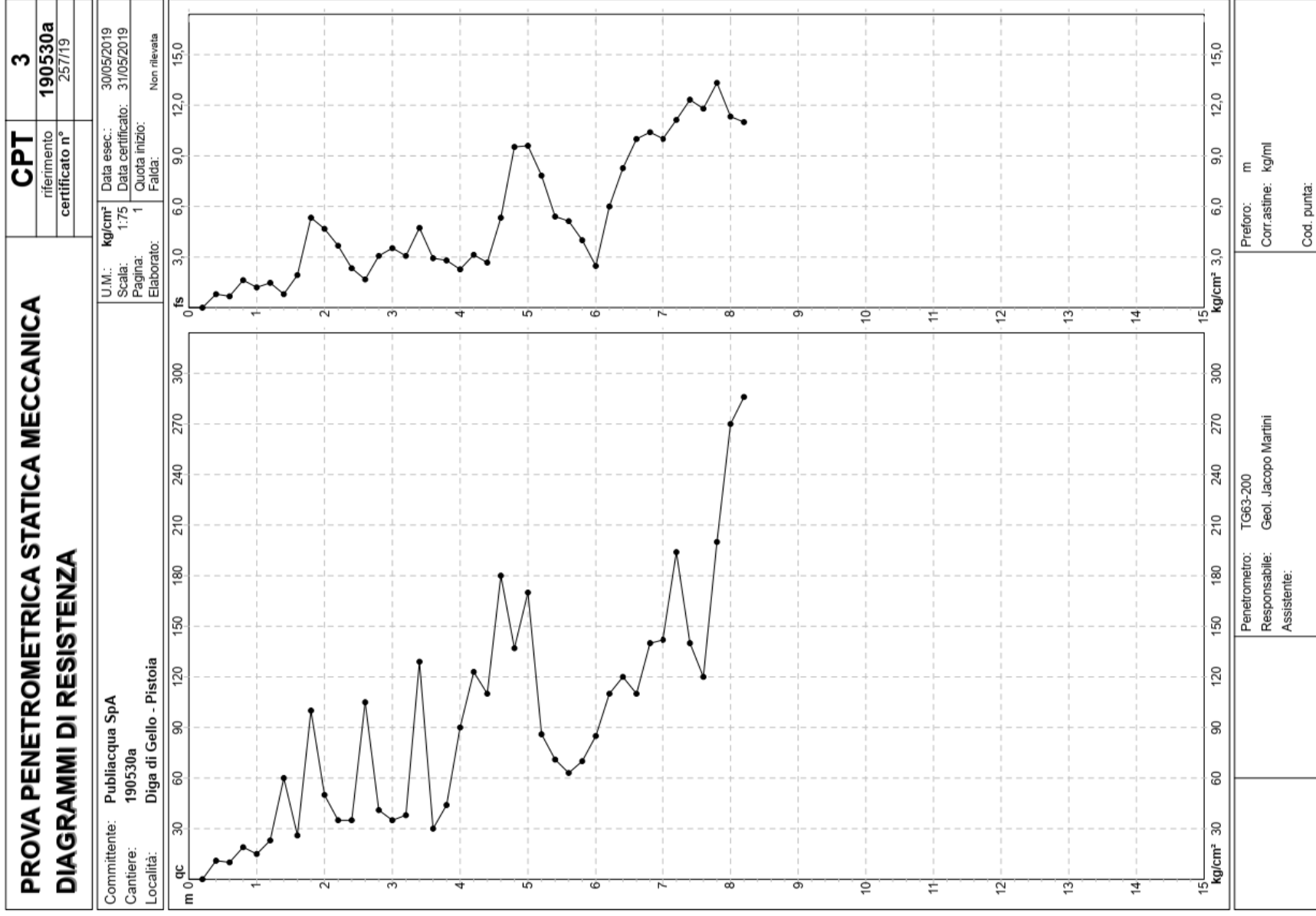
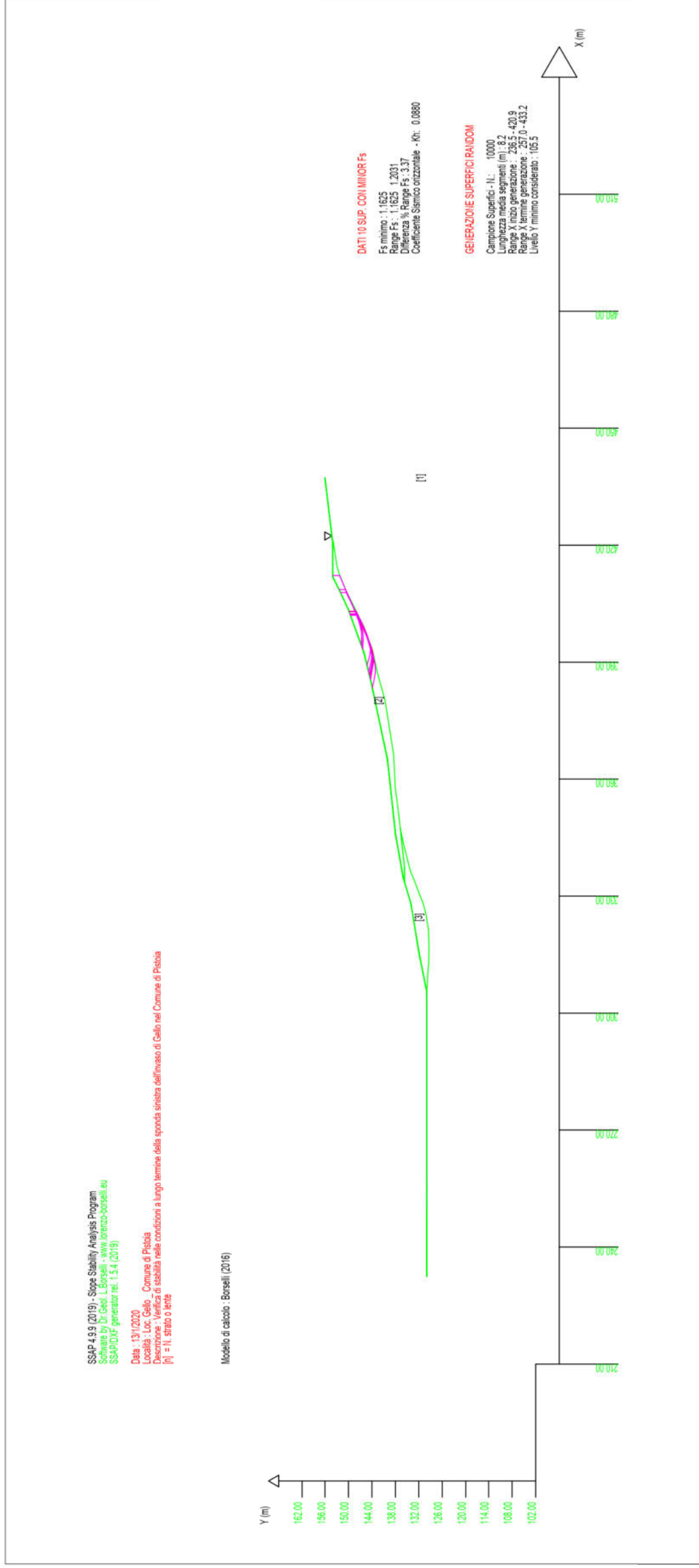


Fig. 10 – Risultati delle prove penetrometriche CPT 3 e CPT 4 eseguite nel 2019 lungo la sponda sinistra dell'invaso



Parametri Geotecnici degli strati - Stato Attuale - condizioni drenate									
N.	phi'' deg	C' kPa	Cu kPa	Gamm kN/m3	GammSat kN/m3	sgci MPa	GSI	mi	D
1	23,60	24,00	0	18,40	27,20	0,00	0,00	0,00	0,00
2	20,00	8,00	0	17,50	19,50	0,00	0,00	0,00	0,00
3	22,00	15,00	0	17,50	19,50	0,00	0,00	0,00	0,00

Sub-strato argilloso
 Corpo di frana (1991), considerato saturo in via caudale
 Terreni potenzialmente instabili (rilievo 2019), considerato saturo

phi'' : Angolo di attrito interno in termini di tensioni efficaci sgci : resistenza a compressione uniaassiale degli elementi di roccia intatta
 C' : resistenza al taglio in termini di tensioni efficaci GSI : Geological strength index secondo Hoek et al. 2002
 Cu : resistenza al taglio in termini di tensioni totali mi : coefficiente litologico dimensionale
 Gamm : peso unitario per la porzione fuori falda D : coefficiente di disturbo meccanico
 GammSat : peso unitario per la porzione sommersa

Fig. 11 – Risultato della verifica di stabilità della porzione di versante interessata da criticità geomorfologica sulla sponda sinistra dell'invaso.

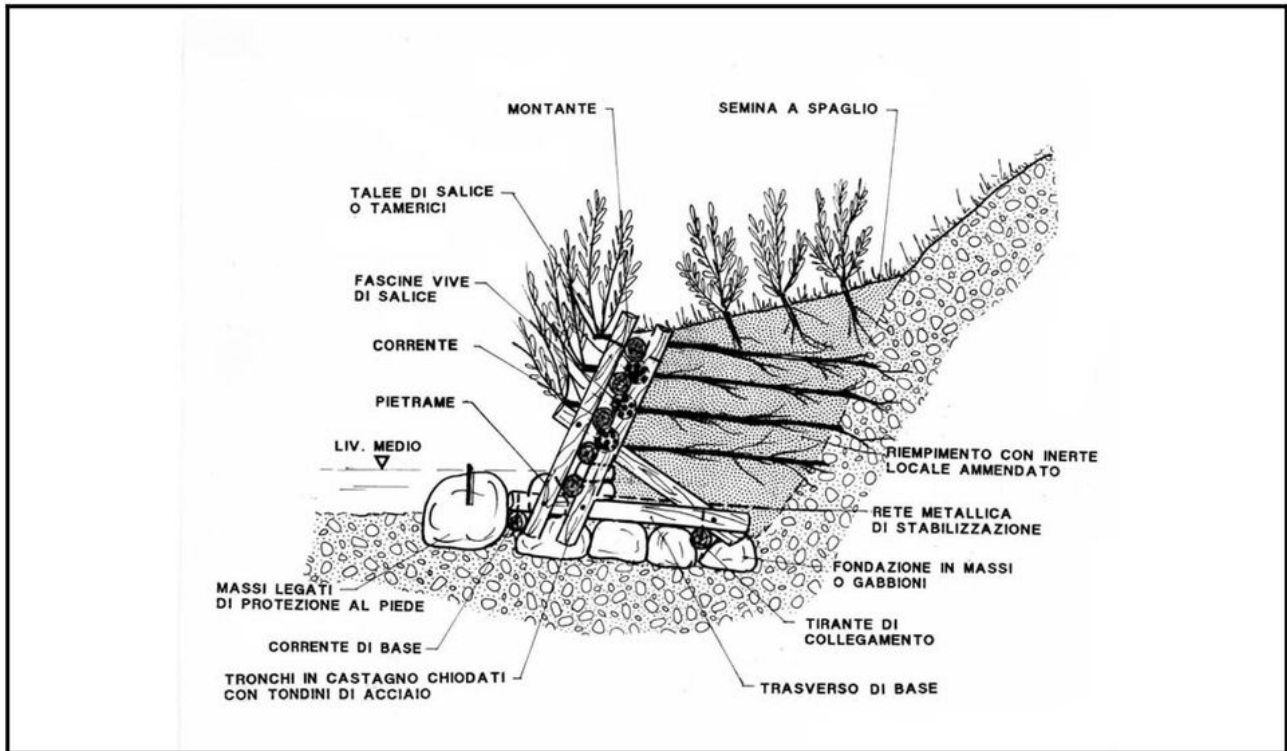


Fig. 12 – Esempio di palificata naturale per la stabilità della sponda

7 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO E IDROGEOLOGIA DI DETTAGLIO

Il quadro geologico e geologico-tecnico descritto nei §§ 5.1 e 5.2 ha permesso di avere un quadro di area vasta degli aspetti idrogeologici dell'areale di studio.

Nel complesso, il contesto in esame mostra una permeabilità da bassa a molto bassa prevalentemente secondaria (per fratturazione) associata alla presenza in affioramento della formazione del Sillano e della formazione delle Marne di Marmoreto.

Al di sopra del suddetto contesto di bedrock, fra il 1965 e il 1970 è stato impostato un rilevato in terra di altezza massima di circa 32 m costituito da una prevalenza di materiale coesivo con presenza subordinata di livelli o lenti di materiale granulare principalmente sabbioso con ghiaietto.

Lo sbarramento di valle presenta una permeabilità da bassa a molto bassa di tipo primario (per porosità).

Nel corso delle indagini del 1991 sono state eseguite lungo le verticali dei sondaggi S1, S2, S3 e S4 delle prove di permeabilità al fine di quantificare il grado di permeabilità del rilevato antropico e del sottostante substrato.

Tale indagine ha mostrato i seguenti valori (Tab. 3 e Fig. 13):

Corpo diga	Macrodominio 1	Coeff. Permeabilità	k	m/sec	1,00E-07
	Macrodominio 2	Coeff. Permeabilità	k	m/sec	1,00E-08
	Macrodominio 3	Coeff. Permeabilità	k	m/sec	1,00E-07
Substrato		Coeff. Permeabilità	k	m/sec	1,00E-08

Tab. 3 – Valori di coefficienti di permeabilità ricavati dalle prove di permeabilità eseguiti lungo le verticali dei sondaggi del 1991

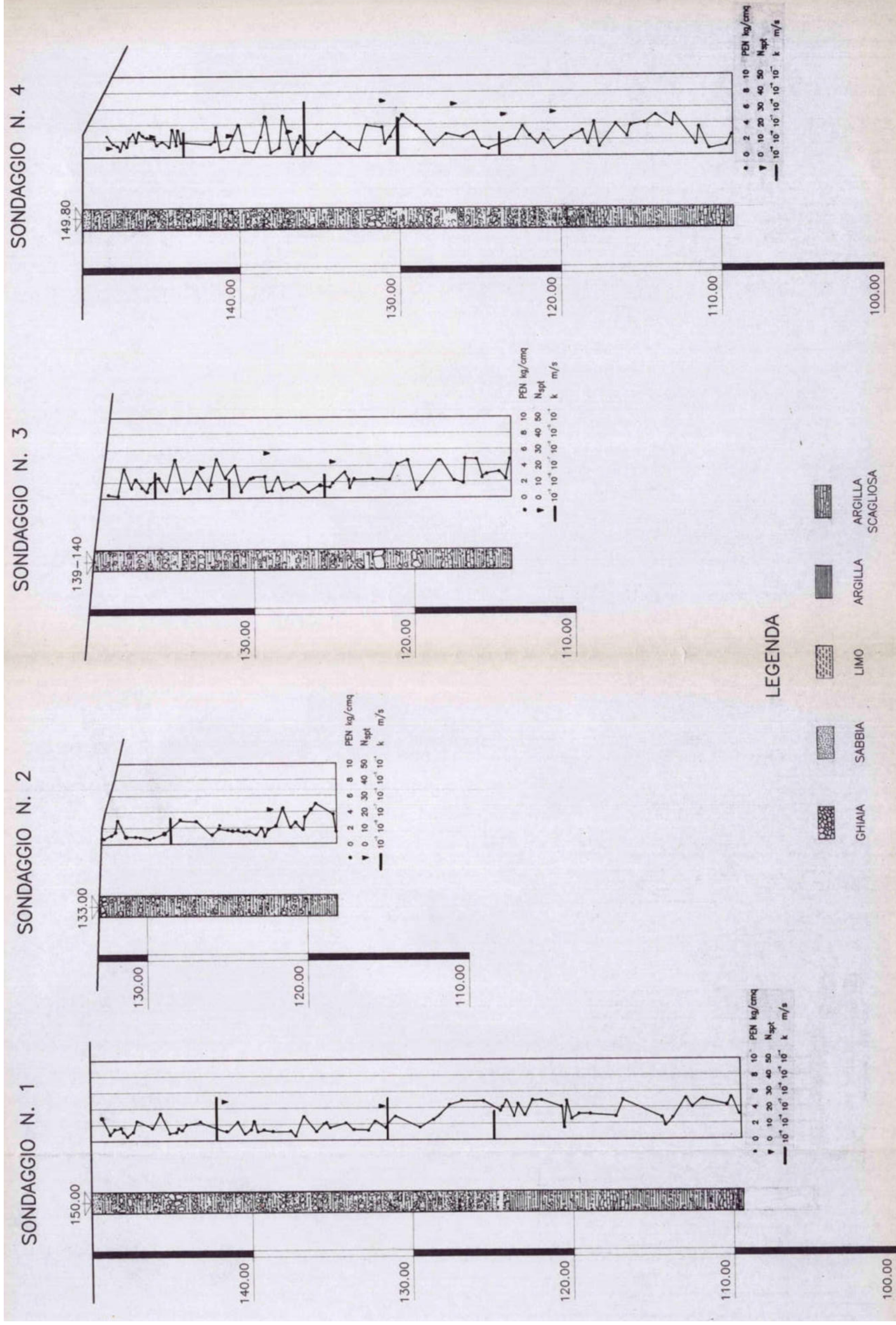


Fig. 13 Risultati delle prove di permeabilità realizzate lungo le verticali dei sondaggi eseguiti nella campagna del 1991

8 INQUADRAMENTO SISMICO, STUDIO SISMOTETTONICA E ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

Il presente capitolo è realizzato in risposta alle seguenti richieste di integrazioni pervenute dall'Ufficio Tecnico per le Dighe di Firenze di Luglio 2018 e dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – Dipartimento per le infrastrutture, i sistemi informativi e statistici – Direzione Generale per le dighe e le infrastrutture idriche ed elettriche (vedi Allegati 1 e 2 del presente elaborato):

- **Ulteriori osservazioni dell'Ufficio Tecnico per le Dighe di Firenze:**
 - 7. Il sito presenta un valore di accelerazione sismica al suolo per $T_r = 475$ anni superiore a $0,15$ g (il valore di accelerazione sismica al suolo risulta pari a $0,17$ g – zona sismica 2) e pertanto è richiesto lo studio sismotettonico del sito previsto dal punto C.7.7.1 del DMIT 22/06/2014, non presente.
- **Osservazioni sulle verifiche di stabilità del rilevato**
 - (3) È necessario effettuare lo studio sismotettonico.
 - (4) Non è ammissibile il ricorso ad accelerogrammi artificiali, dovendosi utilizzare segnali naturali, eventualmente scalati, spettrocompatibili in media. Il numero di segnali non può essere inferiore a tre. È altresì necessario considerare la risposta sismica locale.

Al fine di rispondere alle suddette richieste è stato prodotto un elaborato specifico denominato “Relazione sismotettonica, modellazione sismica e analisi di risposta sismica locale” a cui si rimanda per i dettagli (vedi allegato ET.04B)

9 CONSIDERAZIONI SULLE PERICOLOSITÀ (GEOLOGICA ED IDRAULICA) DEL SITO D'INTERVENTO (ESTRATTI DELLE CARTOGRAFIE DEGLI S.U. VIGENTI E DEI PIANI SOVRAORDINATI DELL'AUTORITÀ DI BACINO DISTRETTUALE DELL'APPENNINO SETTENTRIONALE, P.A.I. E P.G.R.A.)

Sulla base del quadro geologico e geomorfologico descritto nei §§ 5.1, 5.2, 6.1 e 6.2, oltre che sulla base degli studi idrologici, idraulici eseguiti a supporto dei vigenti strumenti urbanistici e piani sovracomunali è stato possibile evidenziare il quadro delle pericolosità geologiche/geomorfologiche e idrauliche del contesto in esame.

Per quanto concerne la **pericolosità geologica** dell'area in studio, secondo quanto indicato nelle Indagini Geologico-Tecniche di supporto allo S.U. vigente, il comparto d'intervento ricade all'interno della seguente classe di pericolosità per fattori geologici (ai sensi del DGR 94/85 – vedi Tav.GEO.08):

- **classe 3 – pericolosità media.**

Aree in cui non sono presenti fenomeni attivi, tuttavia le condizioni geologico-tecniche e morfologiche sono tali da far ritenere che esse si trovino al limite dell'equilibrio e/o possano essere interessate da fenomeni di amplificazione della sollecitazione sismica o di liquefazione

Come da normativa vigente, sono stati presi in considerazione gli elaborati cartografici redatti dall'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale. In particolare, dalle cartografie realizzate a supporto del Piano Assetto Idrogeologico (P.A.I.) l'area ricade in (vedi Tav. GEO.08):

- **classe P.F.2 - pericolosità media da processi geomorfologici di versante**
Aree apparentemente stabili, interessate da litologie con caratteri intrinsecamente sfavorevoli alla stabilità dei versanti

Per quanto concerne la **pericolosità idraulica** dell'area in studio, secondo quanto indicato nelle Indagini Geologico-Tecniche di supporto allo S.U. vigente, il comparto d'intervento ricade all'interno della seguente classe di pericolosità idraulica (ai sensi del DGR 94/85 – vedi Tav.GEO.09):

- **classe 1 – pericolosità bassa.**
Aree collinari o montane prossime ai corsi d'acqua per le quali ricorrono le seguenti condizioni:
 - *non vi sono notizie storiche di precedenti inondazioni;*
 - *sono in situazione favorevole di alto morfologico, di norma a quote altimetriche superiori di ml 2 rispetto al piede esterno dell'argine o, in mancanza al ciglio di sponda*

Come da normativa vigente, sono stati presi in considerazione gli elaborati cartografici redatti dall'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale. In particolare, dalle cartografie realizzate a supporto del Piano Gestione Rischio Alluvioni l'area in studio) l'area dell'invaso ricade in (vedi Tav.GEO.09):

- **classe P.I.1 - pericolosità da alluvione bassa (P.1)**
Corrispondenti ad aree inondabili da eventi con tempo di ritorno superiore a 200 anni e comunque corrispondenti al fondovalle alluvionale.

All'esterno dell'invaso, compresa l'area del corpo diga, il P.G.R.A non prevede nessuna classificazione di pericolosità idraulica in quanto aree collinari non interessate da processi alluvionali.

Tale contesto di pericolosità ad area vasta non tiene in considerazione del quadro delle criticità geomorfologiche presenti all'interno dell'invaso antropico per cui è necessario effettuare gli interventi previsti dal presente progetto al fine di ridare funzionalità e sicurezza all'opera antropica. Per i dettagli degli aspetti progettuali si rimanda agli elaborati progettuali a cura dell'Ing. David Settesoldi.

10 INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE

Il presente capitolo è realizzato in risposta alle seguenti richieste di integrazioni pervenute dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – Dipartimento per le infrastrutture, i sistemi informativi e statistici – Direzione Generale per le dighe e le infrastrutture idriche ed elettriche (vedi Allegati 1 e 2 del presente elaborato):

- **Ulteriori osservazioni dell'Ufficio Tecnico per le Dighe di Firenze:**
 - 12. *Nell'elaborato "All.L1 – indagini storiche a disposizione" viene riportata una sezione interpretativa di un set di indagini sismiche a rifrazione effettuate nel Luglio 2007 e riguardante presumibilmente il profilo della zona su cui insiste lo scarico di superficie; in detto elaborato non risulta riportata tuttavia la traccia degli stendimenti effettuati.*
- **Osservazioni sul quadro di conoscenza:**
 - *Manca un'elaborazione sistematica e unitaria delle informazioni disponibili, comprese quelle relative alle indagini, che consenta di definire compiutamente il quadro di conoscenza necessario allo sviluppo della progettazione. La questione è rilevante nel caso in esame, per il quale è necessario accertare le caratteristiche dimensionali dei dissesti che hanno coinvolto il paramento di monte della diga (individuare la superficie di scorrimento e i volumi di materiale coinvolti), al fine di valutare se sarà effettivamente rimosso tutto il materiale franato.*

Dal momento in cui sono avvenuti i movimenti franosi descritti nel § 6.2 del presente elaborato (avvenimenti risalenti al 1990), sono iniziate una serie di campagne di indagini a supporto di vari progetti che si sono susseguiti nel corso degli anni.

Al fine di fare chiarezza in merito alle varie indagini geognostiche e geofisiche eseguite nel periodo 1991 – 2019 è stata realizzata la Tav.GEO.10. Qui di seguito si riporta una descrizione delle singole indagini eseguite divise per sessioni di indagini.

Per i dettagli sulle singole indagini si rimanda agli allegati ET.04 C, D, E, F e G.

A partire dal 1991 sono state eseguite, nel sito di interesse, n.123 fra indagini geognostiche e geofisiche qui di seguito riassunte (Fig. 14):

- **Sessione 1991 – 1993**
 - n.4 Sondaggi geognostici
 - profondità variabile da circa 40 m a circa 20 m
 - n.17 trincee esplorative
 - n.3 trincee esplorative con esecuzione di prove di densità
- **Sessione 2007**
 - n.5 Sondaggi geognostici
 - profondità variabile da circa 30 m a circa 20 m
 - n.1 prova sismica in foro tipo DownHole (DH)
 - n.3 stendimenti sismici a rifrazione
 - n.3 stendimenti sismici tipo MASW
- **Sessione 2012-2013**
 - n.4 Sondaggi geognostici
 - profondità variabile da circa 45 m a circa 37 m
 - n.7 Sondaggi ambientali
 - n.12 Saggi geognostici
 - n.11 prove penetrometriche statiche CPT
 - profondità variabile da circa 28 m a circa 7 m

- **Sessione 2018 - 2019**

- n.12 Sondaggi ambientali
 - profondità variabile da circa 25 m a circa 3 m
- n.22 Saggi geognostici
- n.2 Sondaggi geognostici
 - profondità variabile da circa 20 m a circa 18,5 m
- n.7 Prove penetrometriche statiche/dinamiche
- n.3 Prove di sismica passiva tipo HVSR
- n.4 stendimenti sismici a rifrazione
- n.3 stendimenti sismici tipo MASW

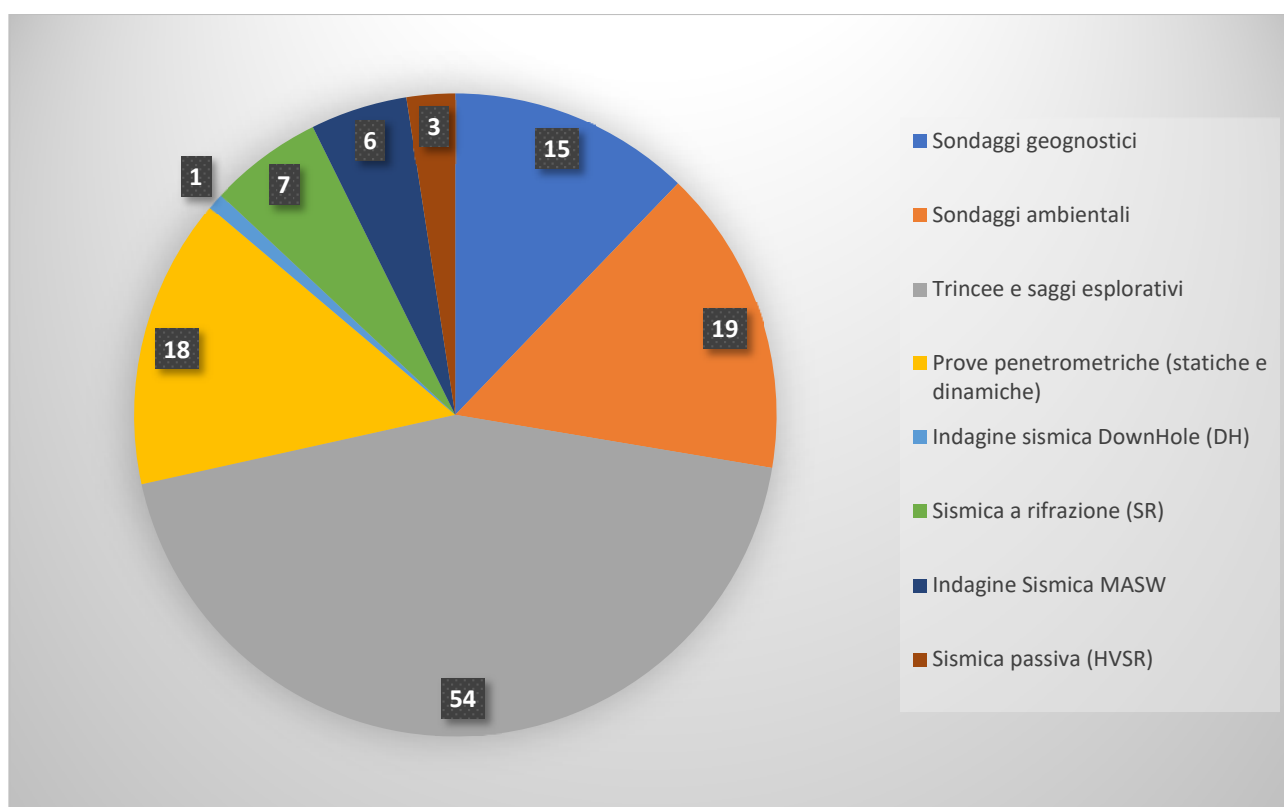


Fig. 14 – Grafico di distribuzione delle indagini geognostiche e geofisiche eseguite dal 1991 ad oggi divise per tipologia

Associate ad esse sono stati prelevati n. 128 campioni da sottoporre a prove geotecniche e analisi di laboratorio qui brevemente riassunte (Fig. 15):

- **Sessione 1991 – 1993**

- n.15 Campioni
 - n.15 Classificazione granulometrica
 - n.15 Contenuto d'acqua
 - n.15 Limiti di Atterberg
 - n.9 Pesi di volume
 - n.3 Taglio diretto
 - n.7 Prove triassiali
 - n.2 Prove edometriche

- **Sessione 2007**
 - n.8 Campioni
 - n.4 Classificazione granulometrica
 - n.6 Contenuto d'acqua
 - n.4 Limiti di Atterberg
 - n.6 Pesi di volume
 - n.4 Taglio diretto
 - n.1 Prove Triassiali
 - n. 3 Prove di espansione laterale libera
- **Sessione 2012-2014**
 - n.26 Campioni per prove geotecniche di laboratorio
 - n.26 Classificazione granulometrica
 - n.25 Contenuto d'acqua
 - n.26 Limiti di Atterberg
 - n.26 Pesi di volume
 - n.9 Taglio diretto
 - n.6 Prove Triassiali
 - n.6 Prove di espansione laterale libera
 - n.34 campioni per analisi di laboratorio
 - set analitico tabella 4.1 dell'allegato 4 del D.P.R. 120/2017
- **Sessione 2018-2019**
 - n 11 Campioni per prove geotecniche di laboratorio
 - n.5 Classificazione granulometrica
 - n.11 Contenuto d'acqua
 - n.11 Limiti di Atterberg
 - n.11 Pesi di volume
 - n.2 Taglio diretto
 - n.2 Prove Triassiali
 - n.6 Prove di espansione laterale libera
 - n.4 Prova edometrica
 - n.34 campioni per analisi di laboratorio
 - set analitico tabella 4.1 dell'allegato 4 del D.P.R. 120/2017

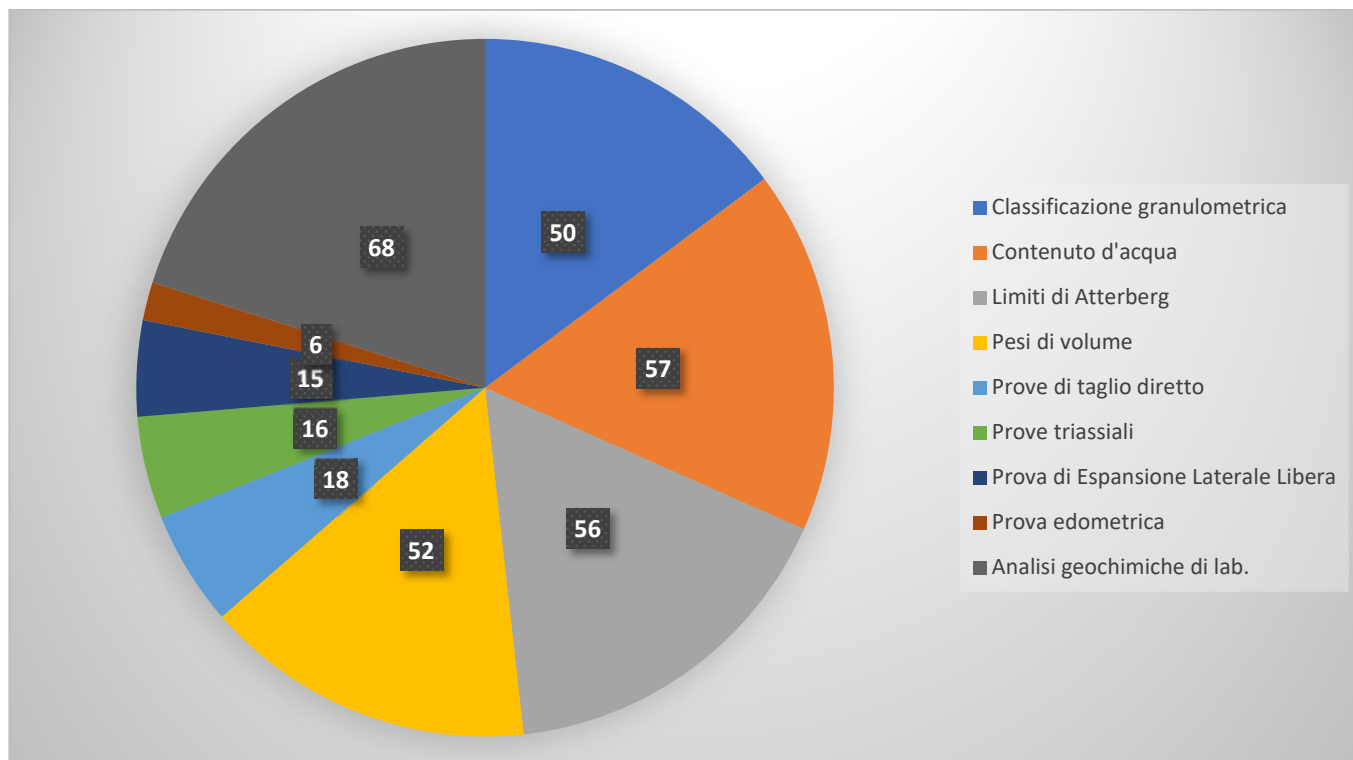


Fig. 15 - Grafico di distribuzione delle analisi geochimiche eseguite dal 1991 ad oggi divise per tipologia

10.1 CAMPAGNA DI INDAGINE 1991 - 1993

Nella campagna di indagine del 1991-1993 sono stati eseguite le seguenti indagini geognostiche:

- **Sessione 1991 – 1993**
 - n.4 Sondaggi geognostici
 - profondità variabile da circa 40 m a circa 20 m
 - n.17 trincee esplorative
 - n.3 trincee esplorative con esecuzione di prove di densità

Dai sondaggi geognostici sono stati prelevati n.15 campioni che sono stati sottoposti alle seguenti prove geotecniche di laboratorio:

- **Sessione 1991 – 1993**
 - n.15 Campioni
 - n.15 Classificazione granulometrica
 - n.15 Contenuto d'acqua
 - n.15 Limiti di Atterberg
 - n.9 Pesi di volume
 - n.3 Taglio diretto
 - n.7 Prove triassiali
 - n.2 Prove edometriche

Per i dettagli sui risultati delle indagini si rimanda all'allegato ET.04C e alla Tav. GEO.10. Qui di seguito si riporta una breve sintesi dei risultati.

I sondaggi geognostici sono stati eseguiti tutti nel corpo diga: n.2 lungo il coronamento (S1 e S4) e n.2 lungo il paramento di monte (S2 e S3). Da un punto di vista geologico in tutti i sondaggi è stato possibile osservare sia il passaggio fra corpo diga e substrato sia la distinzione fra macrodomini all'interno del corpo diga (vedi § 5.2 del presente elaborato). In particolare, si osserva quanto riportato in Fig. 16.

Lungo le verticali dei sondaggi sono state eseguite prove SPT e prove di permeabilità qui di seguito brevemente riassunti (Tab. 4):

	Quota	NSPT	Permeabilità
	m da p.c.		m/sec
S1 (1991)	-8	25	10^{-7}
	-18	20	10^{-7}
	-25		10^{-7}
S2 (1991)	-5		10^{-7}
	-11	20	
S3 (1991)	-3		10^{-7}
	-11	30	
	-14	20	10^{-7}
S4 (1991)	-2	8	
	-5	10	
	-7		10^{-7}
	-10	11	
	-15	15	10^{-8}
	-20	42	10^{-7}
	-25	30	
	-27	25	10^{-8}
-30	30		

Tab. 4 – Sintesi delle prove SPT e di permeabilità eseguite lungo i sondaggi del 1991

Dai sondaggi sono stati prelevanti n.15 campioni che sono sottoposti a prove geotecniche di laboratorio la cui sintesi è riportata in Tab. 5.

ID Campione	Profondità m da p.c.	Contenuto d'acqua (Ww)	Limite di liquidità (WL)	Limite di plasticità (WL)	Indice di plasticità (WI)	γ_{sec} kN/mc	γ_{nat} kN/mc	γ_{sat} kN/mc	n %	Ed kg/cmq	Cu Kpa	ϕ °	c' Kpa	ϕ' °	Poisson	Modulo di Young Mpa	Modulo di Taglio Mpa	Modulo di Bulk Mpa	Ghiglia %	Sabbia %	Limo %	Argilla %	
S1C1 (1991)	-2,8 / -3,10	24	30	21	9																		Argilla limosa con granuli sabbiosi e numerosi noduli calcarei
S1C2 (1991)	-7,3 / -7,6	19	42	20	22		20,7						40	(1 provino)									Argilla deb. Limosa con noduli calcarei
S1C3 (1991)	-12,6 / -12,9	18	41	19	22														36	9	55		Argilla deb limosa con noduli calcarei
S1C4 (1991)	-16,1 / -16,5	21	55	21	34		16,8	20,3					30	19					16	7	77		Argilla deb limosa con noduli calcarei
S2C1 (1991)	-6,4 / -6,7	18	42	21	21		16,6	20,1					30	25					30	6	64		Argilla deb limosa con noduli calcarei
S3C2 (1991)	-8,6 / -8,9	21	45	22	23		16,7	20,2					25	19									Argilla deb limosa presenza di noduli calcarei
S3C3 (1991)	-12,4 / -12,7	20	52	21	31		16,4	20,3					0	31					31	12	57		Argilla deb limosa con noduli calcarei
S4C1R (1991)	-1,5 / -1,7	17	42	20	22																		Argilla deb limosa con noduli calcarei
S4C1 (1991)	-3,3 / -3,6	23	49	22	27		19,8	27,1		100			30	(1 provino)									Argilla deb limosa con noduli calcarei
S4C2R (1991)	-4,2 / -4,4	22	44	22	22																		Argilla deb limosa con noduli calcarei
S4C2 (1991)	-7 / -7,3	23	50	21	29			20					40	(1 provino)									Argilla deb limosa con noduli calcarei
S4C3R (1991)	6,4 / -6,6	19	41	21	20																		Argilla deb limosa con noduli calcarei
S4C3 (1991)	13,5 / -13,85	17	42	19	23		21						50	15									Argilla deb limosa con noduli calcarei
S4C4 (1991)	17,8 / -18,3	22	44	21	23									15					39	11	50		Argilla deb limosa con noduli calcarei
S4C5 (1991)	-21 / -21,35	16	43	20	23		16,4	21		172,41			0	31									Argilla deb limosa con noduli calcarei

Tab. 5 – Tabella riassuntiva dei risultati delle prove geotecniche di laboratorio eseguite sui campioni prelevati dai sondaggi del 1991.

10.2 CAMPAGNA DI INDAGINE 2007

Nella campagna di indagine del 2007 sono stati eseguite le seguenti indagini geognostiche:

- **Sessione 2007**
 - n.5 Sondaggi geognostici
 - profondità variabile da circa 30 m a circa 20 m
 - n.1 prova sismica in foro tipo DownHole (DH)
 - n.3 stendimenti sismici a rifrazione
 - n.3 stendimenti sismici tipo MASW

Dai sondaggi geognostici sono stati prelevati n.8 campioni che sono stati sottoposti alle seguenti prove geotecniche di laboratorio:

- **Sessione 2007**
 - n.8 Campioni
 - n.4 Classificazione granulometrica
 - n.6 Contenuto d'acqua
 - n.4 Limiti di Atterberg
 - n.6 Pesi di volume
 - n.4 Taglio diretto
 - n.1 Prove Triassiali
 - n. 3 Prove di espansione laterale libera

Per i dettagli sui risultati delle indagini si rimanda all'allegato ET.04D e alla Tav. GEO.10. Qui di seguito si riporta una breve sintesi dei risultati.

I sondaggi geognostici sono stati eseguiti parte lungo la sponda destra dell'invaso e lungo il versante SO della dorsale morfologica interessata dal bacino della Giudea (S2 e S3), parte lungo la sponda di monte dell'invaso (sponda NE – S4 e S5) e parte al piede del paramento di valle del corpo diga (S1). Da un punto di vista geologico tutti i sondaggi sono terebrati nel substrato geologico. Tale substrato è sormontato in superficie da un piccolo orizzonte di copertura costituito da limo argilloso sabbioso con presenza di clasti siltitici-arenacei—argillitici. La copertura ha uno spessore variabile da 3 m a 6 m (Fig. 17).

Dai sondaggi sono stati prelevanti n.8 campioni che sono sottoposti a prove geotecniche di laboratorio la cui sintesi è riportata in Tab. 6.

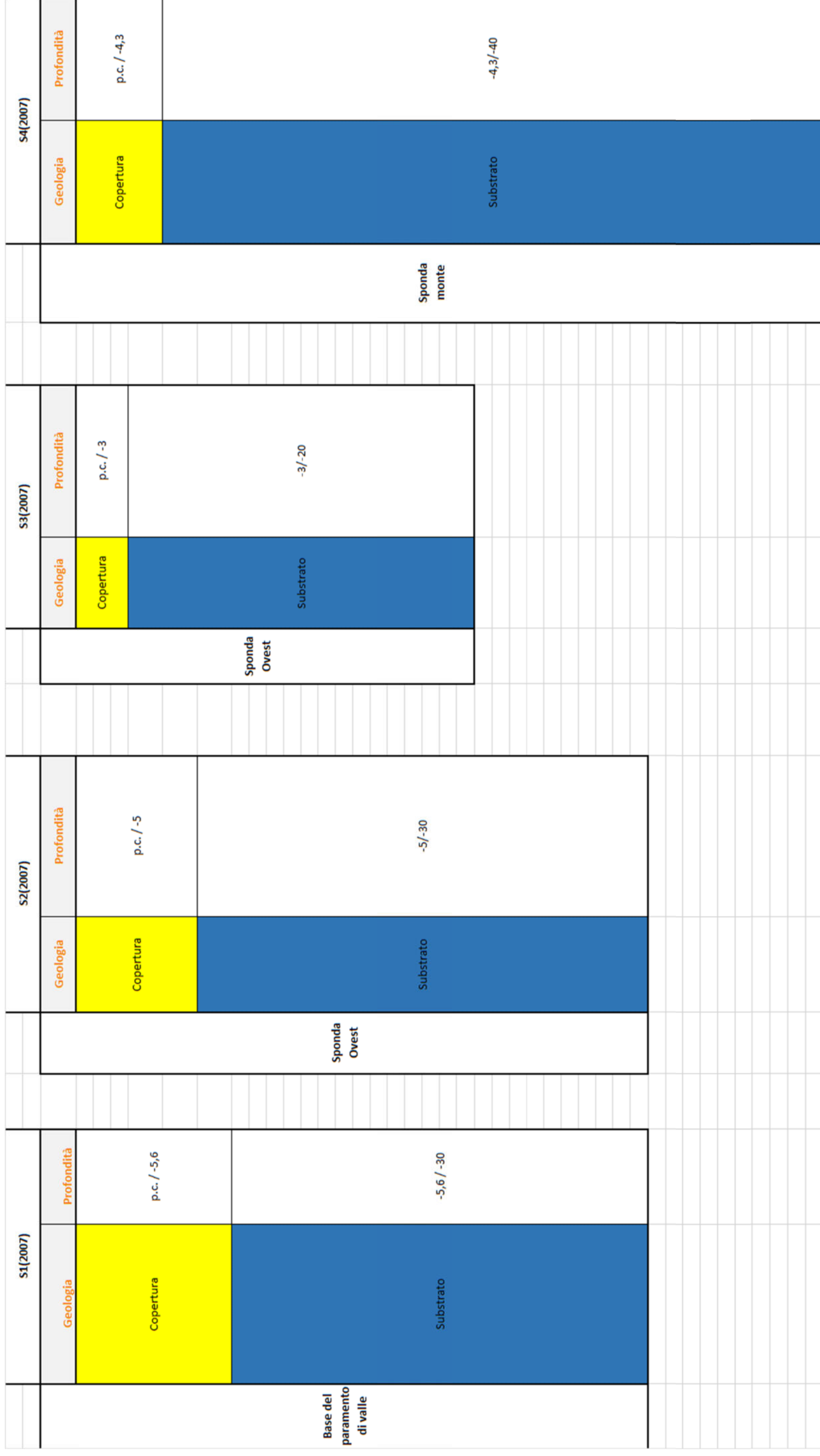


Fig. 17 - Schema sintetico delle stratigrafie dei sondaggi eseguiti nel 2007

ID Campione	Profondità m da p.c.	Contenuto d'acqua (W _a) %	Limite di liquidità (W _L) %	Limite di plasticità (W _P) %	Indice di plasticità (W _P) %	γ_{sec} kn/mc	γ_{nat} kn/mc	γ_{sat} kn/mc	n %	Ed kg/cm ²	Cu kpa	ϕ °	c' kpa	ϕ' °	Poisson	Modulo di Young Mpa	Modulo di Taglio Mpa	Modulo di Bulk Mpa	Ghiaia %	Sabbia %	Limo %	Argilla %	
S1C1 (2007)	-4/-4,4	13,5	35	18	17	18,66	21,2	26,87	30,4		5,2	20,7	3,2	25,75					8	26	32	34	Argilla con limo e sabbia deb ghialosa
S1C2 (2007)	-14	11,9				19,92	22,29	26,87	25,9														
S1C3 (2007)	-19,5	13	35	18	17	18,92	21,37	26,87	29,57				25,49	27					5	45	33	17	Sabbia con limo argilloso deb ghialosa
S1C4 (2007)	-22,7	14				18,6	21,25	26,87	35,16				59,2	22,5									
S1C5 (2007)	-28,4																						
S2C1 (2007)	-3,2/-3,6	28,16	37	19	18	15,68	20,09	26,87	41,63				3,6	29,5					17	28	37	18	Limo con sabbia argillosa ghialosa
S3C1 (2007)	-3,6/-4		37	19	18														4	18	42	36	Limo con argilla sabbiosa Limo argilloso
S3C2 (2007)	-11,3 / - 11,7	10				19	21	28,67	29,1														

Tab. 6 - Tabella riassuntiva dei risultati delle prove geotecniche di laboratorio eseguite sui campioni prelevati dai sondaggi del 2007.

Oltre alle indagini geognostiche nella campagna del 2007 sono state eseguite anche prove geofisiche ed in particolare:

- **Sessione 2007**
 - n.1 prova sismica in foro tipo DownHole (DH)
 - n.3 stendimenti sismici a rifrazione
 - n.3 stendimenti sismici tipo MASW

La prova sismica in foro, tipo Down-Hole (DH) è stata eseguita nel sondaggio S1 posto al piede del paramento di valle del corpo diga. Dai risultati dell'indagine è risultata la presenza di tre orizzonti sismici: il primo orizzonte con spessore di circa 6 m associabile alla copertura del substrato; un secondo orizzonte, dello spessore di circa 12 m associabile alla parte maggiormente alterata del substrato ed uno terzo orizzonte associabile alla porzione di substrato con minor alterazione (Fig. 18).

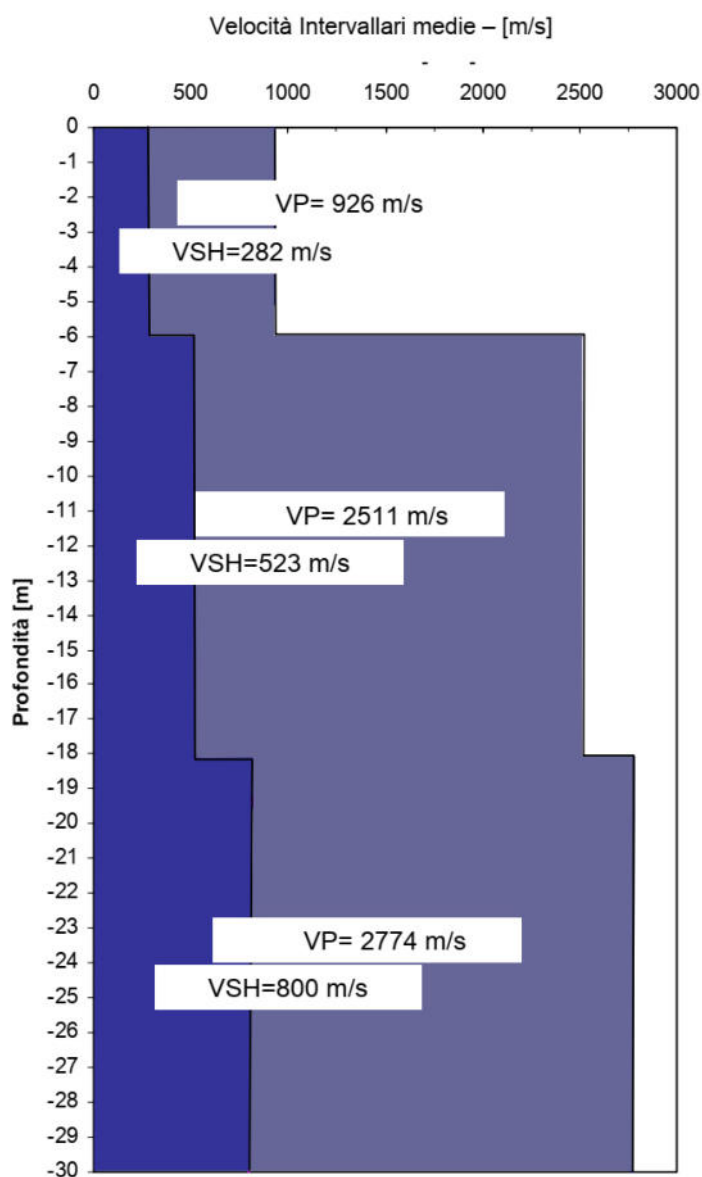


Fig. 18 – Risultato della prova sismica DownHole del 2007

Per quanto riguarda gli stendimenti sismici a rifrazione, essi si sono concentrati lungo la direzione dello scarico superficiale posta nella porzione SO dell'invaso. Le prove si sono focalizzate sulla registrazione delle onde sismiche P (Vp) ed hanno dato il seguente assetto sismico-stratigrafico (Fig. 19).

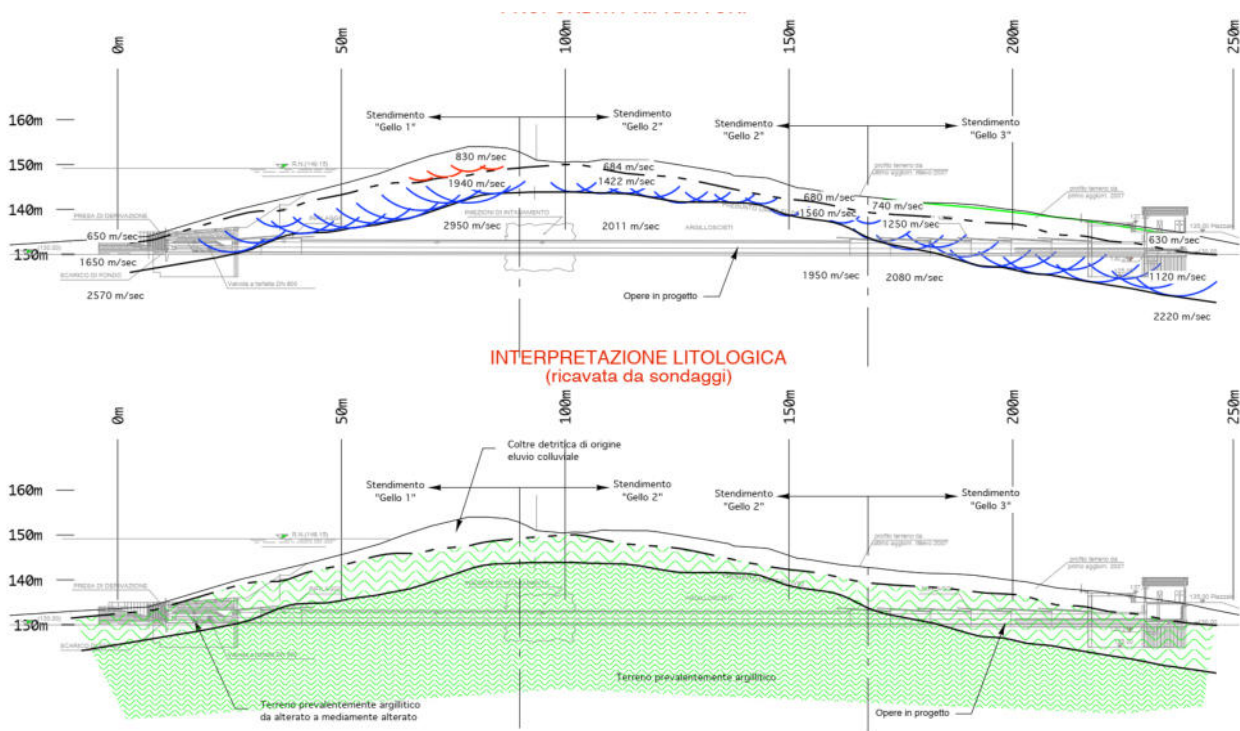


Fig. 19 - Risultato dell'indagine sismica a rifrazione onde P eseguita nel 2007 lungo la sonda destra dell'invaso e lung oil versante SO della dorsale morfologica sulla cui sommità è posto il bacino antropico della Giudea

Le indagini sismiche tipo MASW invece sono state realizzate lungo il paramento di valle del corpo diga. Esse hanno mostrato la presenza di una stratificazione interna al corpo diga (vedi § 5.2) ed un passaggio fra corpo diga e substrato sottostante. In particolare, il macrodominio 1 del corpo diga (MD1) mostra una velocità delle onde sismiche S (Vs) intorno ad un valore medio di 200 m/sec. Il macrodominio 2 del corpo diga (MD2) mostra una velocità delle onde sismiche S (Vs) intorno ad un valore medio di 270 m/sec. Il macrodominio 3 del corpo diga (MD3) mostra una velocità delle onde sismiche S (Vs) intorno ad un valore medio di 370 m/sec. Il substrato mostra una velocità delle onde sismiche S (Vs) intorno ad un valore medio superior a 530 m/sec (Fig. 20).

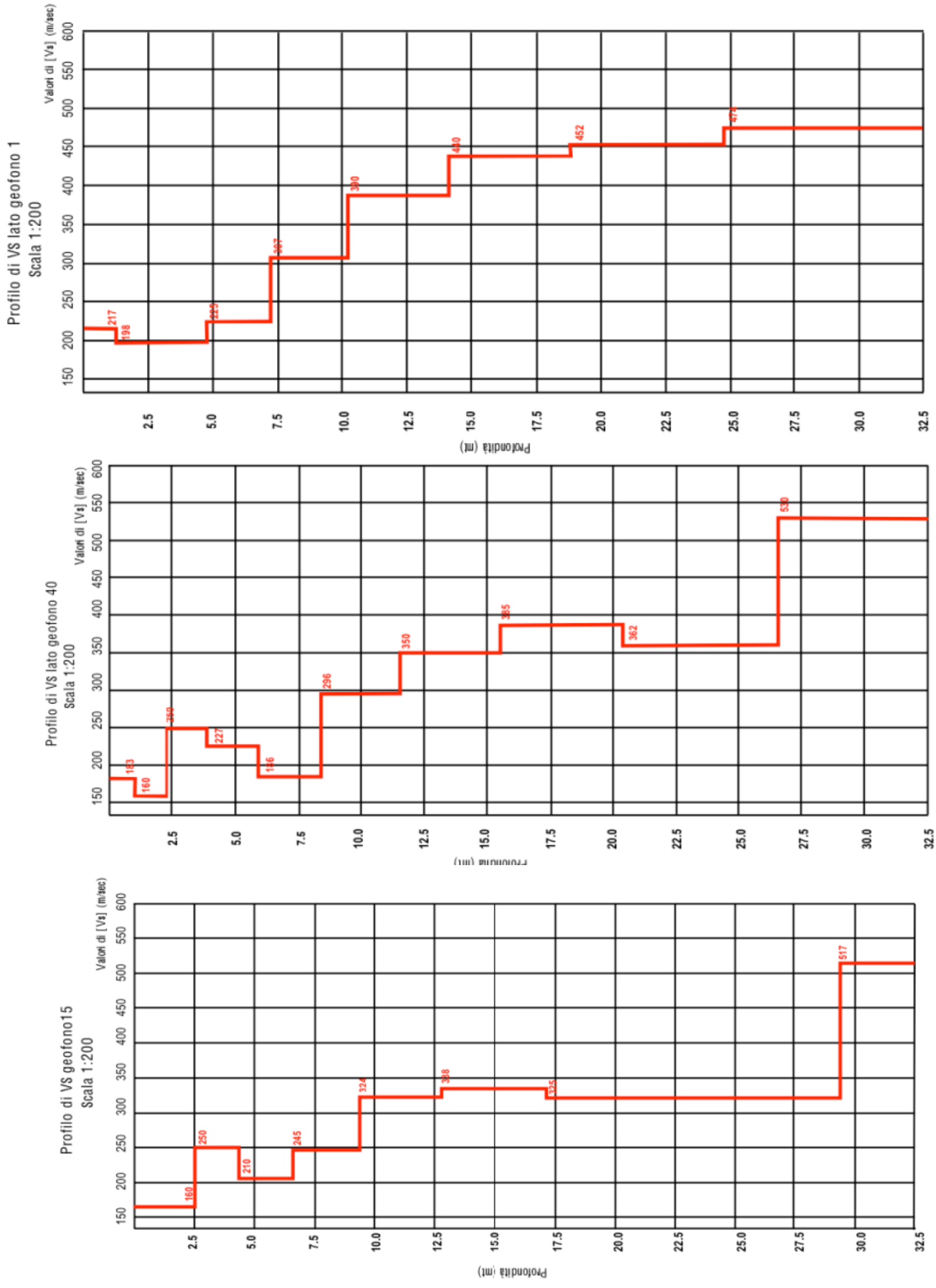


Fig. 20 – Risultati indagine sismica MASW del 2007

10.3 CAMPAGNA DI INDAGINE 2012 - 2014

Nella campagna di indagine del 2012-2014 sono stati eseguite le seguenti indagini geognostiche:

- **Sessione 2012-2013**
 - n.4 Sondaggi geognostici
 - profondità variabile da circa 45 m a circa 37 m
 - n.7 Sondaggi ambientali
 - n.12 Saggi geognostici
 - n.11 prove penetrometriche statiche CPT
 - profondità variabile da circa 28 m a circa 7 m

Dai sondaggi geognostici sono stati prelevati n.60 campioni che sono stati sottoposti alle seguenti prove geotecniche e analisi geochimiche di laboratorio:

- **Sessione 2012-2014**
 - n.26 Campioni per prove geotecniche di laboratorio
 - n.26 Classificazione granulometrica
 - n.25 Contenuto d'acqua
 - n.26 Limiti di Atterberg
 - n.26 Pesi di volume
 - n.9 Taglio diretto
 - n.6 Prove Triassiali
 - n.6 Prove di espansione laterale libera
 - n.34 campioni per analisi di laboratorio
 - set analitico tabella 4.1 dell'allegato 4 del D.P.R. 120/2017

I sondaggi geognostici sono stati eseguiti tutti lungo il coronamento del corpo diga. Da un punto di vista geologico essi hanno mostrato, come nel caso dei sondaggi del 1991, sia la distinzione fra macrodomini del corpo diga sia fra corpo diga e substrato sottostante (Fig. 21).

In aggiunta sono stati eseguiti n.7 sondaggi ambientali eseguiti al fine di recuperare campioni di terreno da sottoporre ad analisi geochimiche di laboratorio. Di esse non abbiamo un report stratigrafico ma solo le foto da cassetta. I sondaggi sono stati eseguiti in parte lungo il coronamento (S7 e S5) e in parte lungo il paramento di monte del corpo diga (S8, S9, S10, S11 e S13). Oltre ai campioni per le analisi geochimiche sono stati prelevati anche campioni per prove geotecniche di laboratorio.

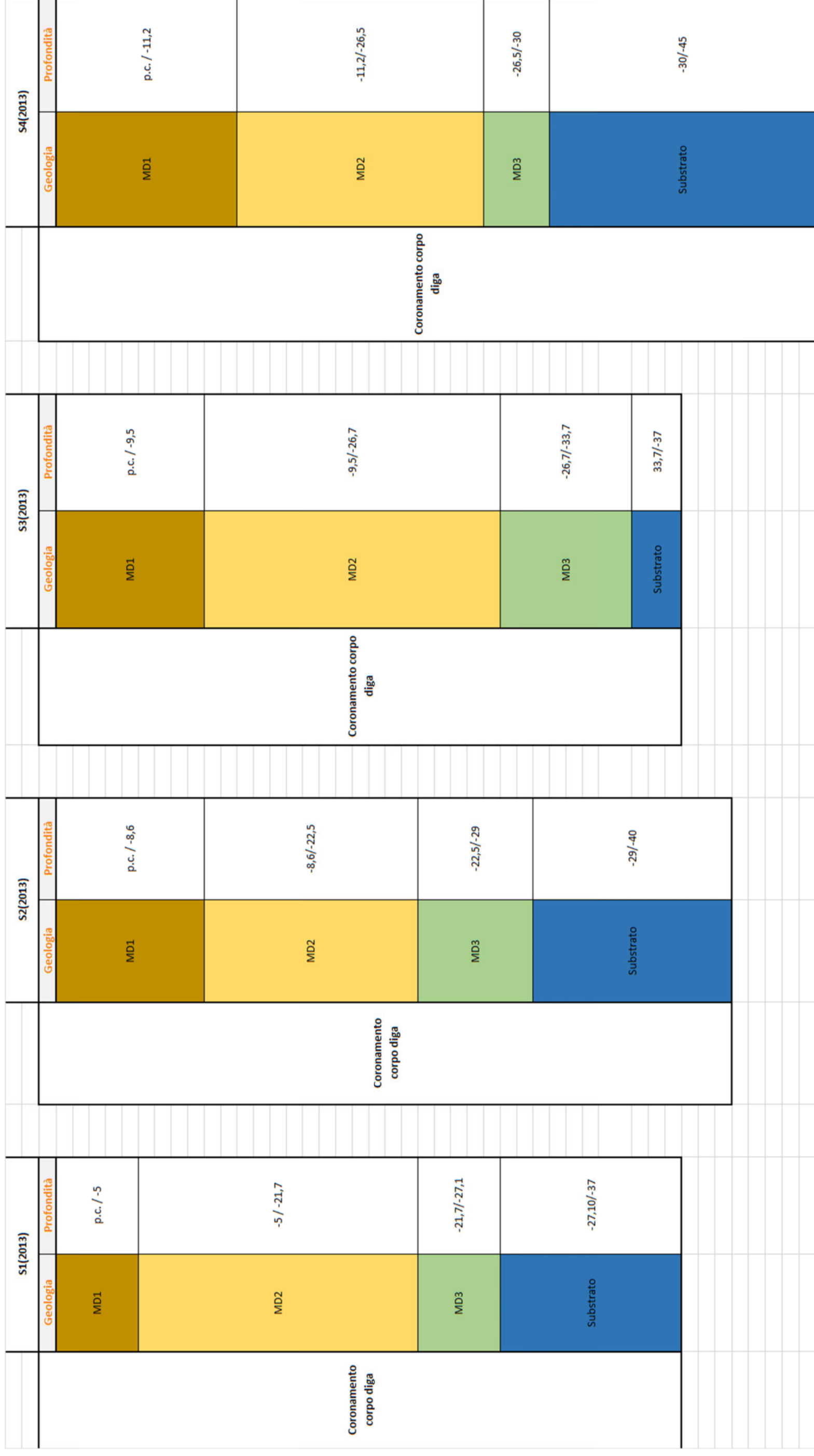


Fig. 21 - Schema sintetico delle stratigrafie dei sondaggi geognostici eseguiti nella campagna 2012 -2014

Lungo la verticale sono state eseguite prove SPT che hanno dato i seguenti risultati (Tab. 7 e Tab. 8)

Campionamenti e prove penetrometriche nel sondaggio S1:

profondità (m) da coronamento	Tipologia di campione	N° colpi SPT
tra 9,00 m e 9,50 m	indisturbato	-
9,50 m		6-7-11
tra 15,00 m e 15,50 m	indisturbato	-
15,50 m	-	9-11-16
tra 22,50 m e 23,00 m	indisturbato	-
23,00 m	-	35-41-49
tra 25,50 m e 26,00 m	disturbato	-

Campionamenti e prove penetrometriche nel sondaggio S2:

profondità (m) da coronamento	Tipologia di campione	N° colpi SPT
tra 9,00 m e 9,50 m	indisturbato	-
9,50 m		6-12-17
tra 15,00 m e 15,50 m	indisturbato	-
15,50 m	-	11-13-17
tra 22,00 m e 22,50 m	indisturbato	-
22,50 m	-	21-50-rifiuto
tra 25,50 m e 26,00 m	disturbato	-

Campionamenti e prove penetrometriche nel sondaggio S3:

profondità (m) da coronamento	Tipologia di campione	N° colpi SPT
tra 9,00 m e 9,50 m	indisturbato	-
tra 15,00 m e 15,50 m	indisturbato	-
18,00 m	-	10-15-21
tra 22,00 m e 22,50 m	indisturbato	-
tra 25,50 m e 26,00 m	disturbato	-

Tab. 7 – Risultati delle prove SPT lungo le verticali dei sondaggi S1, S2 e S3

Campionamenti e prove penetrometriche in foro:

profondità (m) da coronamento	Tipologia di campione	N° colpi SPT
tra 9,00 m e 9,50 m	indisturbato	-
tra 13,50 m e 14,00 m	indisturbato	-
14,00 m	-	7-11-17
tra 18,00 m e 18,50 m	indisturbato	-
18,50 m	-	11-22-26
tra 22,00 m e 22,50 m	indisturbato	-
22,50 m	-	12-13-18
tra 26,00 m e 26,50 m	indisturbato	-
26,50 m	-	9-15-21
tra 30,00 m e 30,50 m	indisturbato	-
30,50 m	-	22-33-39
tra 34,00 m e 34,50 m	disturbato	-
34,50 m	-	rifiuto (*N ₁ =50 per 12,5 cm di avanzamento)
tra 35,00 m e 35,50 m	indisturbato	-
40,00 m	-	rifiuto (*N ₁ =50 per 13 cm di avanzamento)
tra 40,50 m e 41,00 m	indisturbato	-

* Le misure vengono effettuate per tre avanzamenti consecutivi di 15 cm ciascuno, contando il numero di colpi necessari (N_{spt}) per ogni avanzamento. La *resistenza alla penetrazione* del terreno è caratterizzata dalla somma del numero di colpi per il secondo e terzo avanzamento, cioè $N=N_2+N_3$. La prova va a rifiuto se il numero di colpi del primo avanzamento (N₁) è maggiore di 50 prima dei 15 cm o se N_2+N_3 è maggiore di 100 colpi prima dei 30 cm di avanzamento.

Tab. 8 - Risultati delle prove SPT lungo la vertical del sondaggio S4

Dai sondaggi sono stati prelevanti n.26 campioni che sono sottoposti a prove geotecniche di laboratorio la cui sintesi è riportata in Tab. 9.

ID Campione	Profondità	Contenuto d'acqua (Wt)	Limite di liquidità (WL)	Limite di plasticità (WL)	Indice di plasticità (WL)	γ_{sec}	γ_{nat}	γ_{sat}	n	Ed	Cu	ϕ	c'	ϕ'	Poisson	Modulo di Young	Modulo di Taglio	Modulo di Bulk	Ghiaia	Sabbia	Limo	Argilla	
S8C1 (2012)	-1		36	23	13			26,32											45,5	32,4	12,8	9,3	Ghiaia con sabbia deb limosa/argillosa ghiaiosa
S9C1 (2012)	-1		35	22	13			26,78											13,4	36	29,9	20,7	Sabbia con limo argillosa deb ghiaiosa
S11C1 (2012)	-1																		23,2	19,9	26,7	30,2	Argilla con limo ghiosa sabbiosa
S12C1 (2012)	-1		38	24	12														17,1	25,1	40,1	17,6	Limo con sabbia argillosa ghiaiosa
S12C2 (2012)	-5,5		47	23	24			27,34											17,4	20,1	36,2	26,3	Limo con argilla sabbioso ghiaioso
S7C1 (2012)	-2,5		43	22	21			28,04											16	10,3	40,8	32,9	Limo con argilla ghiaioso deb sabbioso
S6C1 (2012)	-8,5		48	28	20			28,37											8,4	11,7	35,1	44,7	Argilla con limo deb sabbiosa
S11C1 (2012)	-5,5		55	28	27			27,8											6,4	12,4	28,6	52,6	Argilla con limo deb. Sabbiosa deb ghiaiosa
S5C1 (2012)	-8,5		35	19	16			27,69											49,5	23	18,8	8,7	Ghiaia con sabbia limosa deb argillosa
S10C1 (2012)	-2,3		47	24	23			28,26											19,5	15,2	32,6	32,6	Limo con argilla ghiaioso sabbioso
S13C1 (2012)	-4,5		46	25	21			27,21											14,6	16,9	41,7	26,8	Limo con argilla sabbioso deb ghiaioso
S1C1 (2013)	-9	19,79	40	24	16		21,38				55	23	7	23					5,45	9,05	52,46	33,04	
S1C2 (2013)	-15	17,8	35	22	13		20,79				73	20,4	22	20,4					8,09	15,94	55,85	20,12	
S1C3 (2013)	-22,5	13,05	37	21	16		20,3				33	22	8	22					16,62	12,88	49,13	21,37	
S1C4 (2013)	-25,5	8,04	33	20	13		23,63					23,9	0	23,9					25,74	23,13	29,73	21,4	
S2C1 (2013)	-9	12,07	33	21	12		21,48				77	27,7	18	27,7					10,56	13,88	51,68	23,88	
S2C2 (2013)	-15	18,82	37	22	15		20,79				92	30	0	30					17,1	26,49	32,5	23,91	
S2C3 (2013)	-22	20,81	35	21	14		20,69				78	29,4	0	29,4					14,14	6,87	55,26	23,73	
S2C4 (2013)	-25,5	16,08	31	18	13		21,28					24,9	7	24,9					15,76	28,03	38,27	17,94	
S3C1 (2013)	-9	18,4	36	23	13		21,09				74	21,6	24	21,6					16,71	24,18	33,29	25,82	
S3C2 (2013)	-15	17,92	36	23	13		19,42				34	20,9	20	20,9					9,69	22,49	50,27	17,55	
S3C3 (2013)	-22,5	19,67	41	22	19		20,5				37	26,2	29	26,2					16,59	21,99	37	24,42	
S3C4 (2013)	-25,5	20,81	46	25	21		20,5					23,6	7	23,6					9,29	16,37	44,08	30,26	
S4C7 (2014)	-34		33	20	13							24,4	22	24,4					20,48	20,85	48,67	10	
S4C8 (2014)	-35	10,29	30	18	12		22,36				69	29,9	7	29,9					38,69	14,07	30,76	16,48	
S4C9 (2014)	-40,5	10,94	33	20	13		22,95				85	38	38	38					4,83	29,97	43,35	21,85	

Tab. 9 - Tabella riassuntiva dei risultati delle prove geotecniche di laboratorio eseguite sui campioni prelevati dai sondaggi della campagna di indagine 2012 - 2014

Oltre ai sondaggi e alle relative prove penetrometriche SPT e prove geotecniche di laboratorio sono state eseguite n.11 prove penetrometriche CPT distribuite fra coronamento del corpo diga (P1, P3 e P4), paramento di monte (P5, P6, P7 e P8) e paramento di valle del corpo diga (P2, P9, P10 e P11). Per i dettagli dei risultati si rimanda all'allegato ET.04E.

Sempre nella stessa campagna sono stati prelevati da saggi e da sondaggi n.34 campioni di terreno da sottoporre ad analisi geochimiche di laboratorio. I campioni prelevati hanno mostrato valori degli analiti al di sotto della soglia limite di legge (Colonna A, Tab.1 All.5 D.Lgs. 152/06) ad eccezione dei campioni riportati in Tab. 10.

Campione	Profondita	analita	Valore (mg/kg)	Limite (col.A)
1 A	1m	CROMO VI	3,8	2
2 A	1m	CROMO VI	3,5	2
4 A	1m	CROMO VI	2,7	2
4 B	2m	COBALTO CROMO VI	25,2 8,0	20 2
4 C	3m	CROMO VI	3,7	2
5 A	1m	CROMO VI	5,1	2
6 A	1m	CROMO VI	3,8	2
7 B	2m	IDROCARB. C>12	212,1	50
10 C	5m	CROMO VI	3,2	2

Tab. 10 – Tabella dei campioni che hanno mostrato valori degli analiti superiori ai limiti di legge (Campagna di indagine 2013)

La loro distribuzione spaziale tridimensionale all'interno del corpo diga è riportata in Fig. 22.

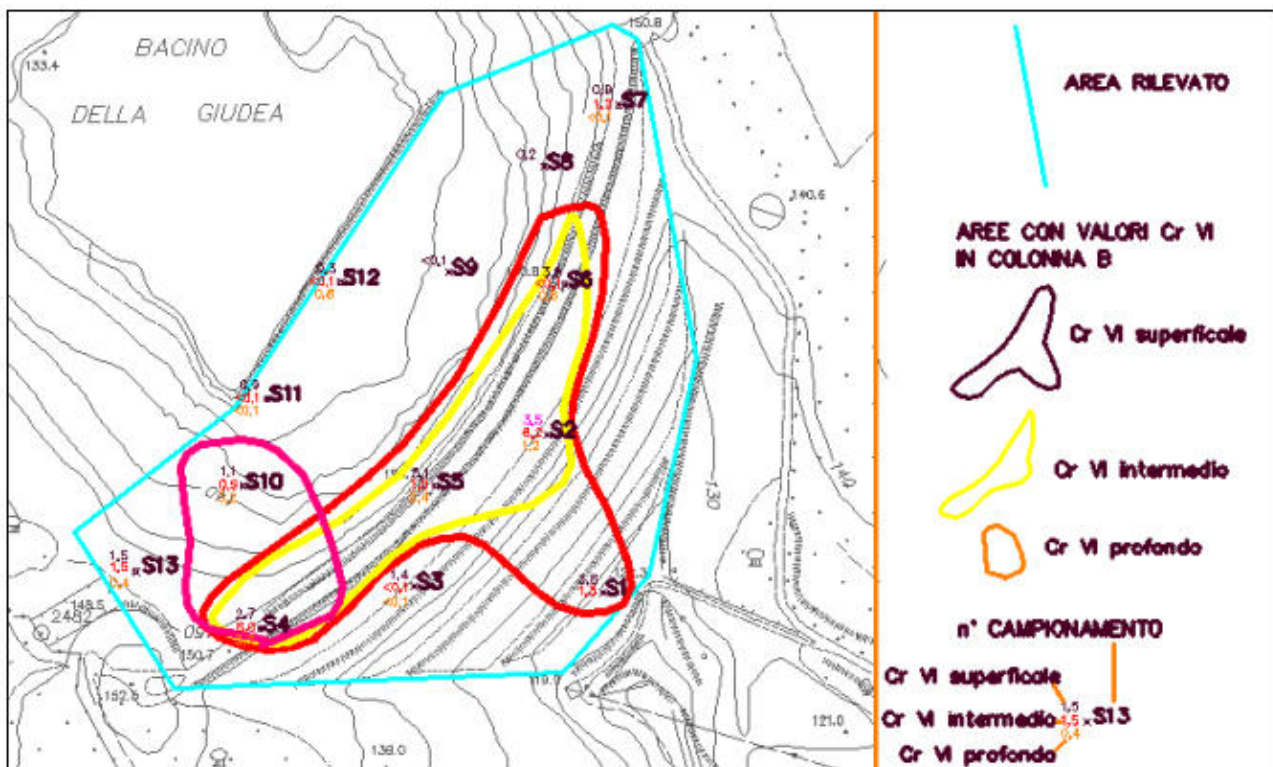


Fig. 22 – Distribuzione spaziale dei campioni con valori di cromo VI (Cr VI) oltre i limiti di legge

Preme sottolineare che nel corpo diga non è stato riscontrato alcun acquifero significativo.

10.4 CAMPAGNA DI INDAGINE 2018 - 2019

Nella campagna di indagine del 2018-2019 sono state eseguite le seguenti indagini geognostiche:

- **Sessione 2018 - 2019**
 - n.12 Sondaggi ambientali
 - profondità variabile da circa 25 m a circa 3 m
 - n.22 Saggi geognostici
 - n.2 Sondaggi geognostici
 - profondità variabile da circa 20 m a circa 18,5 m
 - n.7 Prove penetrometriche statiche/dinamiche
 - n.3 Prove di sismica passiva tipo HVSR
 - n.4 stendimenti sismici a rifrazione
 - n.3 stendimenti sismici tipo MASW

Dai sondaggi geognostici sono stati prelevati n.45 campioni che sono stati sottoposti alle seguenti prove geotecniche e analisi geochimiche di laboratorio:

- **Sessione 2018-2019**
 - n 11 Campioni per prove geotecniche di laboratorio
 - n.5 Classificazione granulometrica
 - n.11 Contenuto d'acqua
 - n.11 Limiti di Atterberg
 - n.11 Pesì di volume
 - n.2 Taglio diretto
 - n.2 Prove Triassiali
 - n.6 Prove di espansione laterale libera
 - n.4 Prova edometrica
 - n.34 campioni per analisi di laboratorio
 - set analitico tabella 4.1 dell'allegato 4 del D.P.R. 120/2017

I sondaggi geognostici sono stati eseguiti in corrispondenza del crinale della sponda destra sinistra dell'invaso al passaggio con il corpo diga. Entrambi i sondaggi sono stati terebrati all'interno del substrato e hanno mostrato, come nell'indagine del 2007, un orizzonte superficiale di copertura dello spessore di circa 3/4,5 m seguito dal substrato prevalentemente argillitico (Fig. 23).

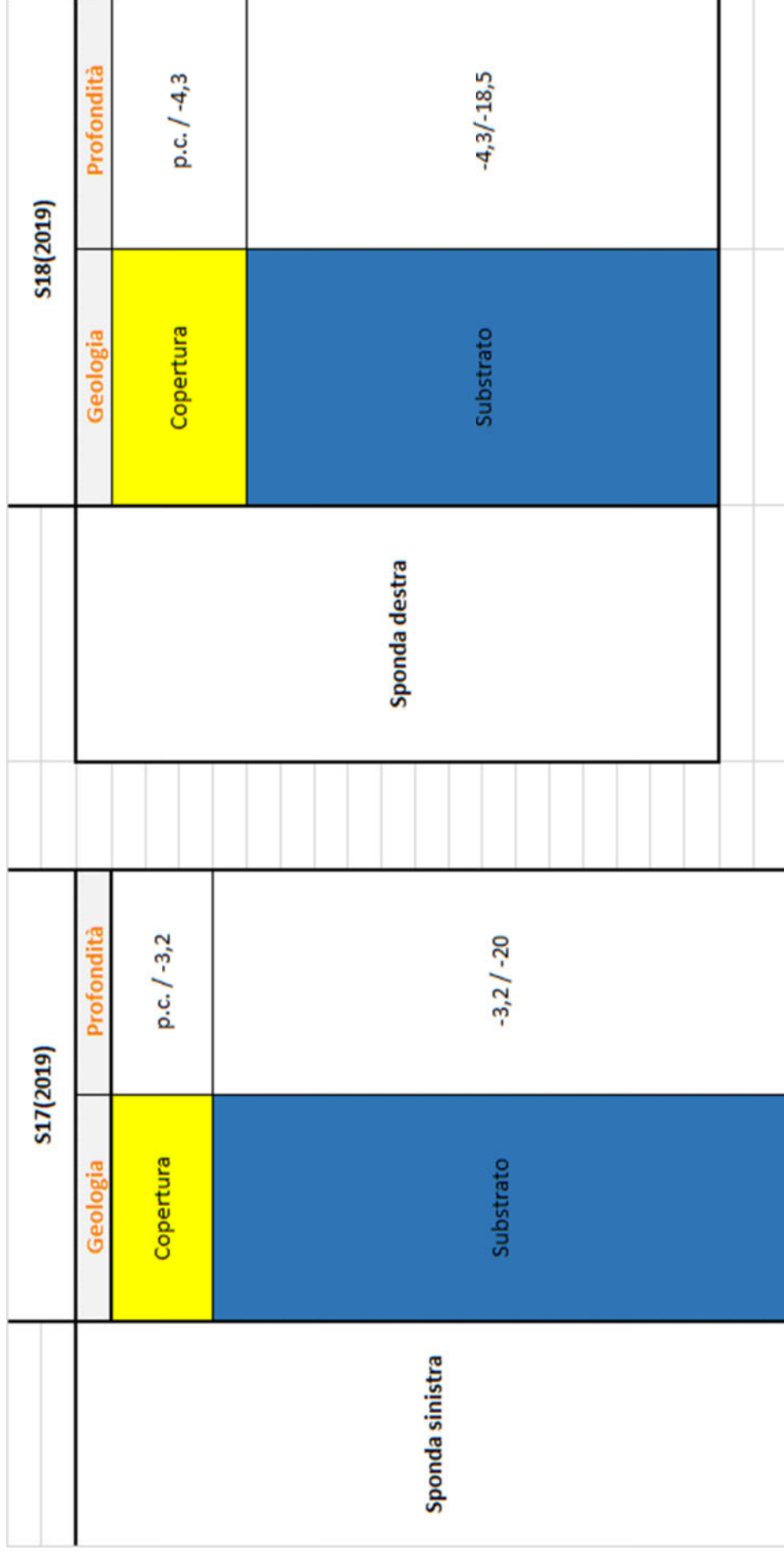


Fig. 23 - Schema sintetico delle stratigrafie dei sondaggi geognostici eseguiti nella campagna 2018 - 2019

Lungo la verticale dei sondaggi sono stati effettuate prove SPT che hanno prodotto I seguenti risultati:

- **S17**
 - Rif. (-4,5 m da p.c.)
 - 29/32/31 (fra -10,00 m da p.c. e -10,45 m da p.c.)
 - 24/26/28 (fra -15,00 m da p.c. e -15,45 m da p.c.)
 - 28/26/30 (fra -20,00 m da p.c. e -20,45 m da p.c.)
- **S18**
 - 11/11/15 (fra -4,7 m da p.c. e -5,15 m da p.c.)
 - 23/37/45 (fra -9,55 m da p.c. e -10 m da p.c.)
 - 27/31/33 (fra -13,55 m da p.c. e -14 m da p.c.)
 - 25/29/38 (fra -18,5 m da p.c. e -18,95 m da p.c.)

Dai sondaggi sono stati prelevanti n.11 campioni che sono sottoposti a prove geotecniche di laboratorio la cui sintesi è riportata in Tab. 12.

Oltre ai sondaggi e alle relative prove penetrometriche SPT e prove geotecniche di laboratorio sono state eseguite n.7 prove penetrometriche di cui n.4 di tipo statico (CPT), n.1 dinamica (DPSH) e n.2 di tipo misto. Le prove sono state effettuate tutte lungo la sponda sinistra dell'invaso. Per i dettagli dei risultati si rimanda all'allegato ET.04G.

Sempre nella stessa campagna sono stati prelevati da saggi ambientali n.34 campioni di terreno da sottoporre ad analisi geochimiche di laboratorio. I campioni prelevati hanno mostrato valori degli analiti al di sotto della soglia limite di legge (Colonna A, Tab.1 All.5 D.Lgs. 152/06) ad eccezione dei campioni riportati in Tab. 11.

campione	profondità	parametro	valore mg/kg	CSC (colonna A) mg/kg	CSC (colonna B) mg/kg
S15	0 - 1 m	Idrocarburi C>12	95	50	750
S16	0 - 1 m	Idrocarburi C>12	159	50	750
S16	14 - 15 m	Cobalto	21,2	20	250
S17	0 - 1 m	Idrocarburi C>12	286	50	750
S18	0 - 1 m	Idrocarburi C>12	230	50	750
S18	14 - 15 m	Cobalto	21.4	20	250

campione	profondità	parametro	valore	limite allegato III
S18	6 - 7 m	Cloruri	106	100

Tab. 11 - Tabella dei campioni che hanno mostrato valori degli analiti superiori ai limiti di legge. In rosso il campione che ha mostrato valori superiori al limite di legge nel test di cessione (Campagna di indagine 2018)

ID Campione	Profondità	Contenuto d'acqua (Ww)	Limite di liquidità (WL)	Limite di plasticità (WL)	Indice di plasticità (WL)	γ_{sec}	γ_{nat}	γ_{sat}	n	Ed	Cu	ϕ	c'	ϕ'	Poisson	Modulo di Young	Modulo di Taglio	Modulo di Bulk	Ghisa	Sabbia	Limo	Argilla	
S17C1(2019)	-2,8	15,63	39	21	18		20,4	17,6			188,3												
S17C2(2019)	-6,2	10,52	45	21	24		21,1	19,1					24,4	23,3					18	26,4	27,3	28,3	
S17C3(2019)	-8,2	8,89	34	19	15		19,5	18															
S17C4(2019)	-13	10,98	34	17	17		20,2	18,1			220,1		23,4	24,5					18,3	33,2	29,7	18,8	
S17C5(2019)	-18	8,92	37	18	19		22,3	20,6			311,1								44,3	28,3	16,7	10,7	
S17C6(2019)	-15	6,09	33	18	15		21,4	20,2															
S18C1(2019)	-3,2	13,28	33	21	12		20,5	18,1			94,6												
S18C2(2019)	-3,4	12,01	39	19	20		19,3	16,7					18,5	19,2					38,7	21,3	24,7	15,2	
S18C3(2019)	-8,7	12,45	37	21	16		21	18,7															
S18C4(2019)	-11,6	12,32	36	20	16		21,4	19,1					21,4	18,8					12	42,5	30,6	14,9	
S18C5(2019)	-16,3	7,52	36	18	18		21,1	19,4			175,1												

Tab. 12 - Tabella riassuntiva dei risultati delle prove geotecniche di laboratorio eseguite sui campioni prelevati dai sondaggi della campagna di indagine 2018-2019

Oltre alle indagini geognostiche e geochemiche nella campagna del 2018-2019 sono state eseguite anche prove geofisiche ed in particolare:

- **Sessione 2018 - 2019**
 - n.3 Prove di sismica passiva tipo HVSR
 - n.4 stendimenti sismici a rifrazione
 - n.3 stendimenti sismici tipo MASW

Gli stendimenti di sismica a rifrazione sono stati eseguiti in parte (n.2) lungo il paramento di monte del corpo diga e in parte (n.2) lungo la sponda sinistra dell'invaso.

Prendendo a riferimento i valori medi di velocità delle onde S (Vs) già descritti nel § 10.2 (il macrodominio 1 del corpo diga - MD1 mostra una velocità delle onde sismiche S (Vs) intorno ad un valore medio di 200 m/sec, il macrodominio 2 del corpo diga - MD2 mostra una velocità delle onde sismiche S (Vs) intorno ad un valore medio di 270 m/sec, il macrodominio 3 del corpo diga - MD3 mostra una velocità delle onde sismiche S (Vs) intorno ad un valore medio di 370 m/sec, il substrato mostra una velocità delle onde sismiche S (Vs) intorno ad un valore medio superior a 530 m/sec) possiamo evidenziare, per quanto riguarda l'area del corpo diga la distizione fra macrodomini e fra corpo diga e substrato (Fig. 24).

Per quanto riguarda invece gli stendimenti lungo la sponda sinistra è possibile distinguere fra copertura e substrato (Fig. 25).

Le prove sismiche MASW sono state eseguite n.2 lungo il paramento di monte del corpo diga e n.1 trasversalmente alla sponda sinistra dell'invaso. Le prove hanno in evidenza, nel primo caso, il passaggio fra corpo diga e substrato e nel secondo caso fra copertura e substrato (Fig. 26).

Gli aspetti indicati nelle precedenti prove geofisiche è confermato anche dai risultati delle prove sismiche passive HVSR eseguite nelle stesse posizione degli stendimenti MASW.

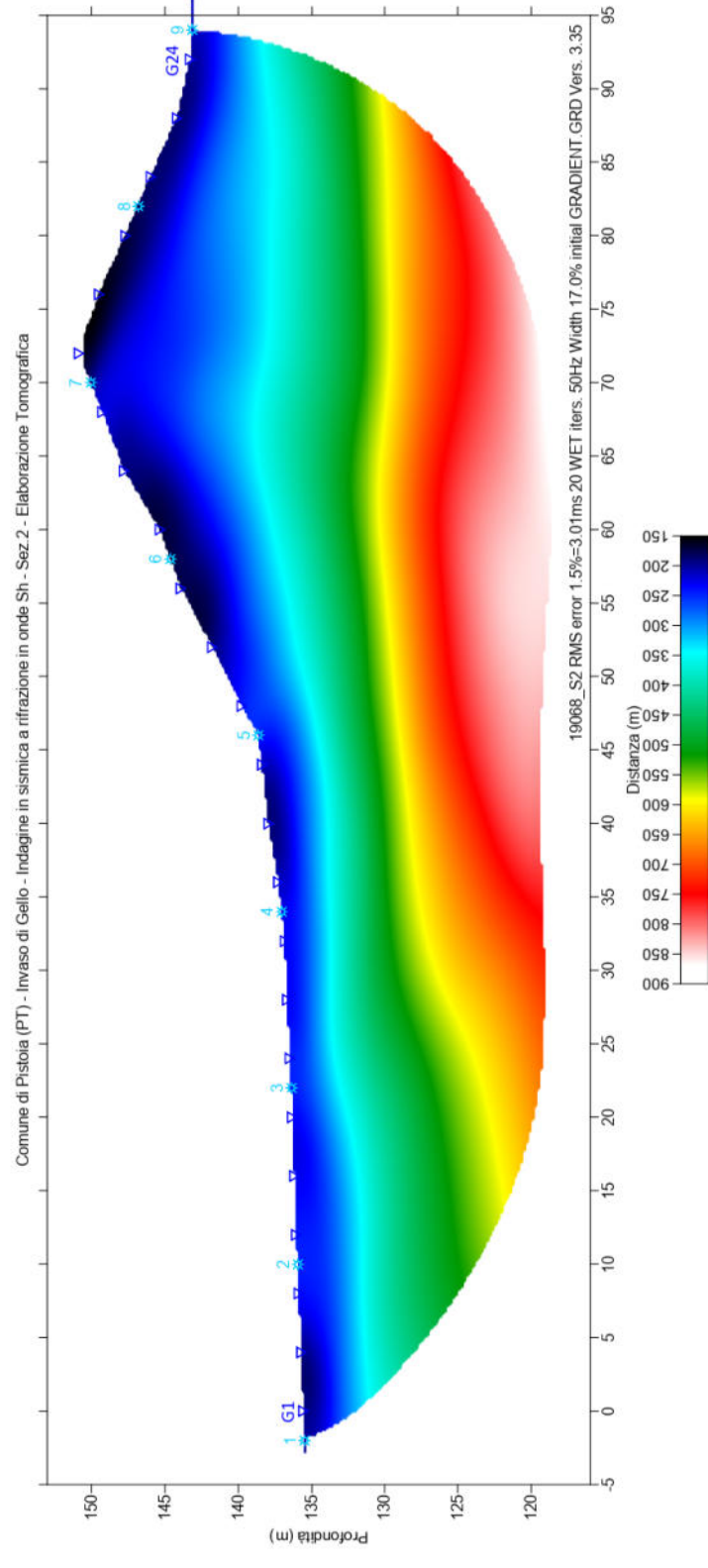
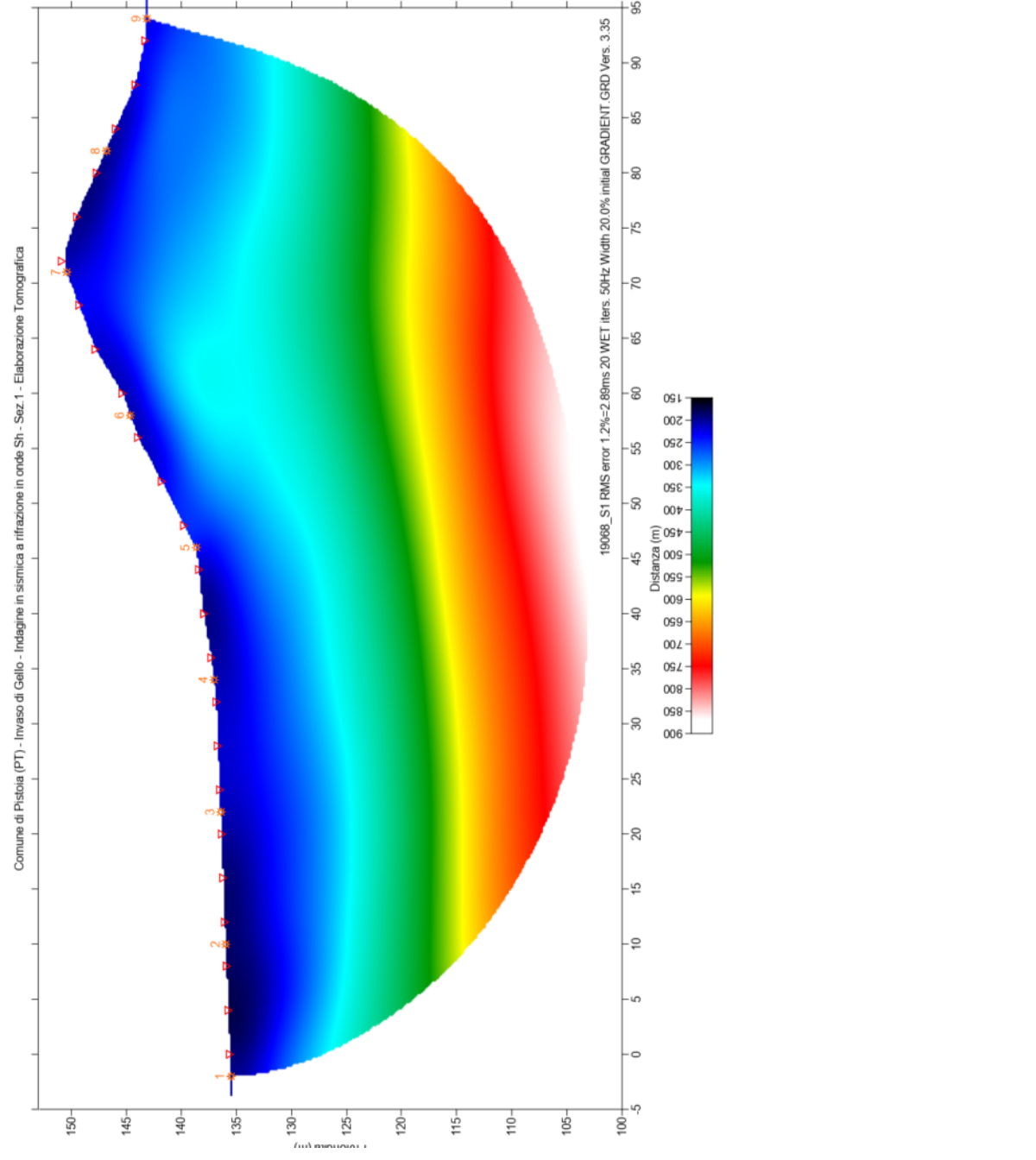


Fig. 24– Tomografie trasversali del corpo diga derivanti dalle indagini sismiche a rifrazione del 2019. Il corpo diga presenta una velocità delle onde sismiche S (Vs) inferiore a 500 m/sec

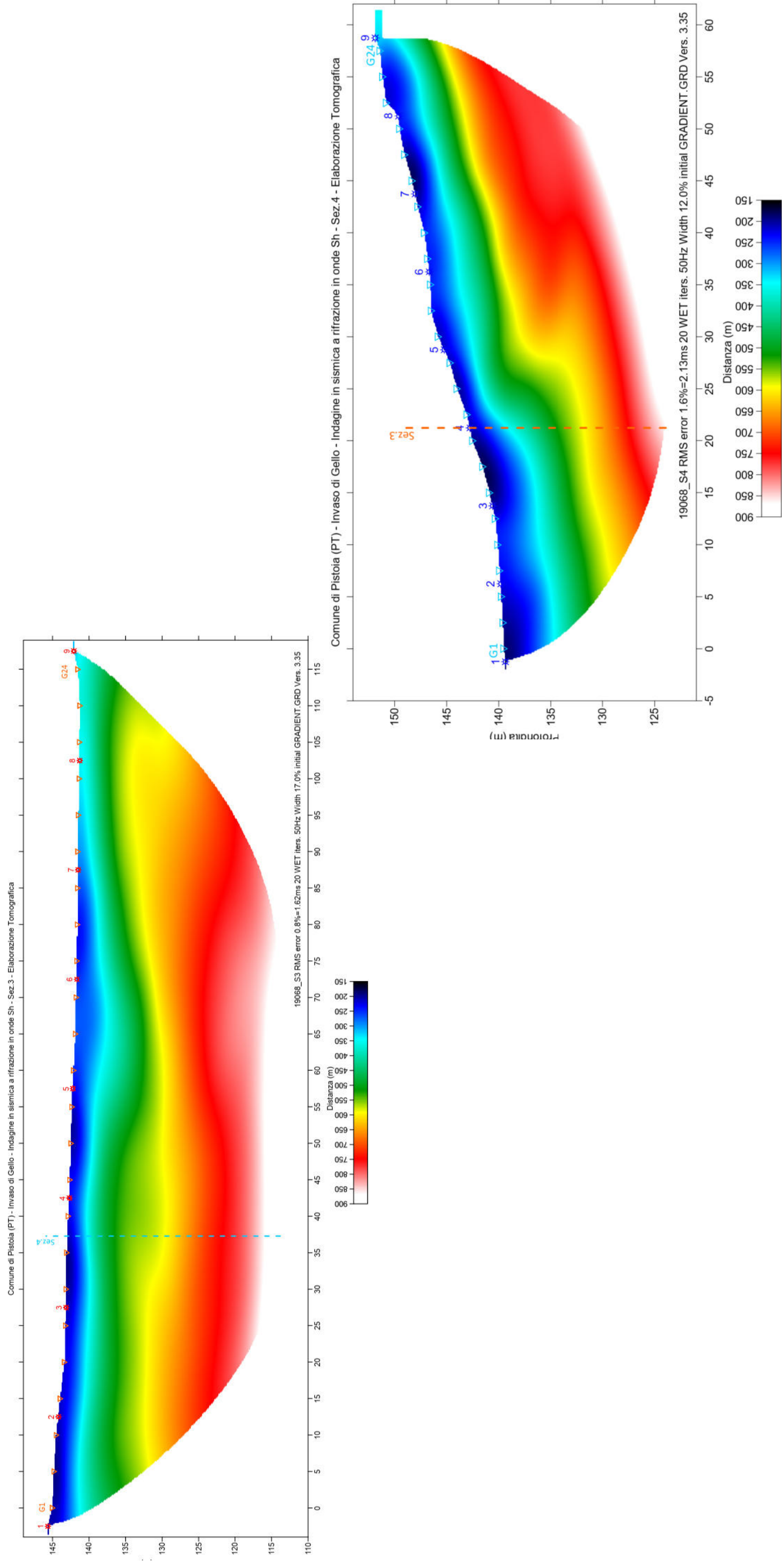


Fig. 25 - Tomografie lungo la sponda sinistra dell'invaso derivanti dalle indagini sismiche a rifrazione del 2019. Il corpo diga presenta una velocità delle onde sismiche S (Vs) inferiore a 500 m/sec

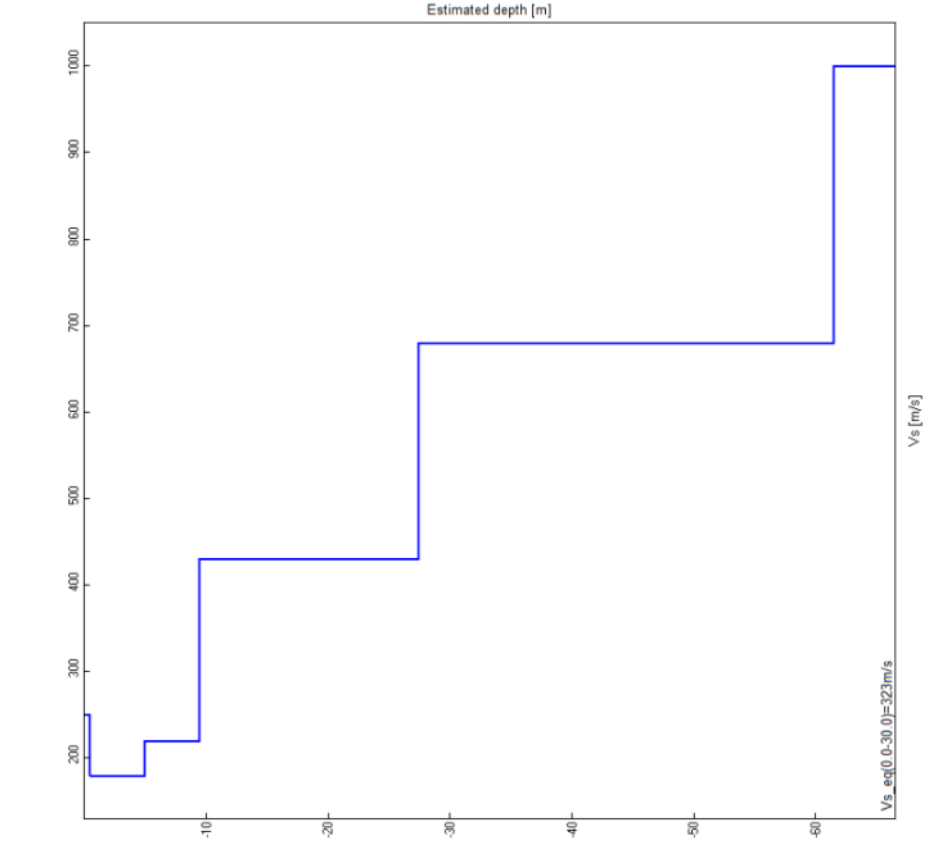


Figura 14: Indagine MASW 1. Profilo di velocità delle onde S

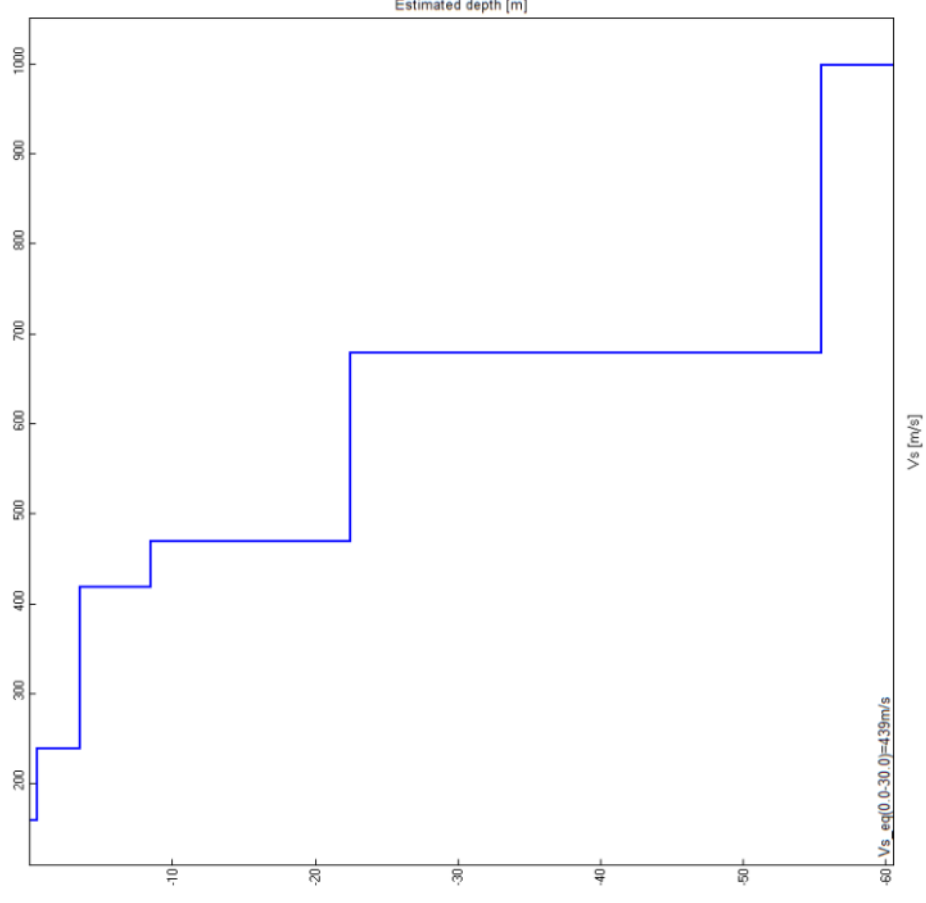


Figura 16: Indagine MASW 2. Profilo di velocità delle onde S

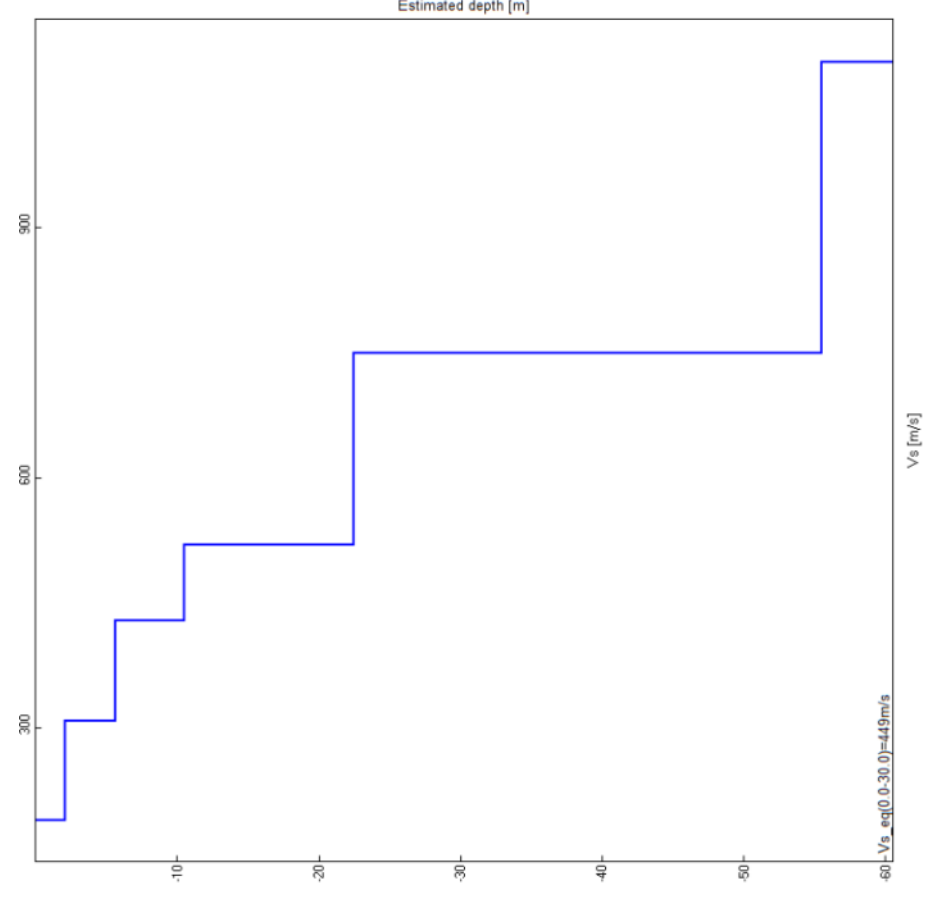


Figura 18: Indagine MASW 3. Profilo di velocità delle onde S

Fig. 26 – Risultati delle indagini sismiche MASW eseguite sul corpo diga (1 e 2) e sulla sponda sinistra dell'invaso (3) nel 2019