

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



PROGETTO DEFINITIVO

Tavola/Elaborato: ET.04a	Nome Elaborato: RELAZIONE GEOLOGICA, GEOLOGICO-TECNICA E SISMICA	Scala: -
		Data: 01/04/2022

Settore:  Sede Firenze Via de Sanctis, 49 Cod. Fiscale e P.I. 06111950488 <small>Organizzazione dotata di Sistema di Gestione Integrata certificato in conformità alla normativa ISO9001 - ISO14001 - OHSAS18001 - SA8000</small>	
PROGETTAZIONE: PROGETTISTA - PROJECT MANAGER: GEOLOGO: ESPROPRI:	 ING. GIOVANNI SIMONELLI DOTT. GEOL. FILIPPO LANDINI GEOM. ANDREA PATRIARCHI
COLLABORATORI: DOTT. GEOL. CARLO FERRI GEOM. MATTEO MASI	
CONSULENTI TECNICI:  ING. DAVID SETTESOLDI  DOTT. GEOL. SIMONE FIASCHI	COMMESSA I.T.: INGT-TPLPD-PBAAC252
 ING. GIOVANNI CANNATA	RESPONSABILE COMMITTENTE: ING. CRISTIANO AGOSTINI
DIRETTORE TECNICO INGEGNERIE TOSCANES: ING. ANDREA DE CATERINI	RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO: ING. LEONARDO ROSSI

Rev.	Data	Descrizione / Motivo della revisione	Redatto	Controllato / Approvato
03	01/04/2022	Terza Emissione	Fiaschi / Ferri	Settesoldi
02	09/09/2020	Seconda Emissione	Fiaschi / Ferri	Settesoldi
01	27/12/2019	Prima Emissione	Fiaschi / Ferri	Settesoldi

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello – Comune di Pistoia (PT)

ET.04A - Relazione geologica, geologico-tecnica sulle indagini e sismica – modifica a seguito dell'interlocuzione istruttoria del 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 – Divisione 4 Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori del 19/06/2020 e del parere del 27/07/2021 (registro ufficiale U.0015609)

INDICE

1	PREMESSA	3
2	INQUADRAMENTO GEOGRAFICO.....	3
3	INQUADRAMENTO GEOLOGICO E CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DI DETTAGLIO	4
3.1	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	4
3.2	CARATTERISTICHE GEOLOGICO-TECNICHE DI DETTAGLIO.....	6
4	INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO E GEOMORFOLOGIA DI DETTAGLIO	15
4.1	INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO.....	15
4.2	GEOMORFOLOGIA DI DETTAGLIO.....	16
5	INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO E IDROGEOLOGIA DI DETTAGLIO	29
6	INQUADRAMENTO SISMICO, STUDIO SISMOTETTONICA E ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE ..	31
7	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.)	31
8	INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE	32
8.1	INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: SONDAGGI GEOGNOSTICI.....	36
8.2	INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: PROVE GEOTECNICHE DI LABORATORIO	44
8.3	INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: PROVE PENETROMETRICHE (STATICHE E DINAMICHE) 49	
8.4	INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: SONDAGGI AMBIENTALI E ANALISI GEOCHIMICHE DI LABORATORIO	49
8.5	INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: SISMICA PASSIVA	51
8.6	INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: PROVE SISMICHE IN FORO (DOWNHOLE – DH).....	52
8.7	INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE (SR)	54
8.8	INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: INDAGINI SISMICHE MASW	58

ELENCO ALLEGATI

ET.04B: RELAZIONE GEOMORFOLOGICA

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

ET.04D: INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: SONDAGGI GEOGNOSTICI

ET.04E: INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: PROVE PENETROMETRICHE (STATICHE E DINAMICHE)

ET.04F: INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: PROVE GEOTECNICHE DI LABORATORIO

ET.04G: INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: SISMICA PASSIVA (HVSr)

ET.04H: INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: PROVE SISMICHE IN FORO (DOWN-HOLE)

ET.04I: INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: PROSPEZIONI SISMICHE A RIFRAZIONE

ET.04L: INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: PROSPEZIONI SISMICHE MASW

ET.04M: INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: ANALISI CHIMICHE DI LABORATORIO

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

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello – Comune di Pistoia (PT)

ET.04A - Relazione geologica, geologico-tecnica sulle indagini e sismica – modifica a seguito dell'interlocuzione istruttoria del 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 – Divisione 4 Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori del 19/06/2020 e del parere del 27/07/2021 (registro ufficiale U.0015609)

GEO.07: CARTA IDROGEOLOGICA DI DETTAGLIO

GEO.08: CARTA DELLA PERICOLOSITA' GEOLOGICA/GEOMORFOLOGICA

GEO.09: CARTA DELLA PERICOLOSITA' IDRAULICA

GEO.10: CARTA DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE

GEO.11: CARTA DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: SONDAGGI GEOGNOSTICI

GEO.12: CARTA DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: PROVE PENETROMETRICHE (STATICHE E DINAMICHE)

GEO.13: CARTA DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: SISMICA PASSIVA (HVSr)

GEO.14: CARTA DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: PROVE SISMICHE IN FORO (DOWN-HOLE)

GEO.15: CARTA DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: PROSPEZIONI SISMICHE A RIFRAZIONE

GEO.16: CARTA DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: PROSPEZIONI SISMICHE MASW

GEO.17: CARTA DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: SONDAGGI AMBIENTALI

GEO.18: CARTA DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: SAGGI GEOGNOSTICI

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.

Per i dettagli si rimanda agli elaborati progettuali allegati al presente progetto definitivo modificati sulla base dell'interlocuzione istruttoria del 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 – Divisione 4 Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori del 19/06/2020 e del successivo parere del 27/07/2021 (registro ufficiale U.0015609).

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 interlocuzione istruttoria del 19/06/2020), 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) e del parere del Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili – Dipartimento per le opere pubbliche, le risorse umane e strumentali – Direzione Generale per le dighe e le infrastrutture idriche ed elettriche del 27/07/2021 (registro ufficiale U.0015609).

2 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 cretaceo 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.

3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DI DETTAGLIO

3.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il contesto in esame, come descritto nel capitolo precedente, è posto nella zona di passaggio fra i rilievi collinari cretacico-paleogenici (zona pedemontana) e la piana lacustre villafranchiana Firenze-Prato-Pistoia ().

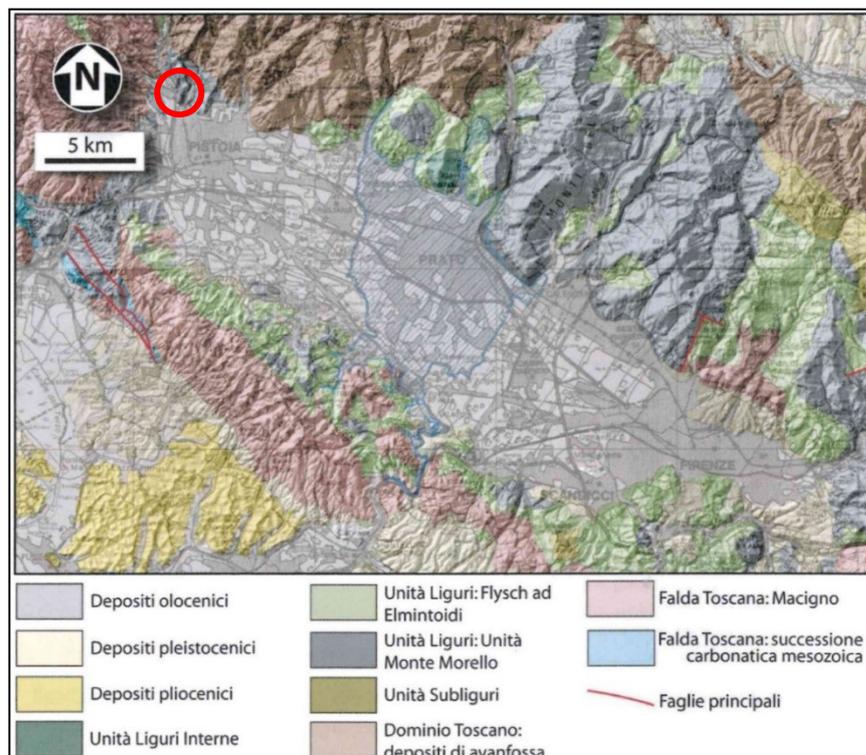


Fig. 1 – Schema geologico semplificato del Sistema della Piana Firenze-Prato-Pistoia (S. Angelini, G. Cannata, C. Lubello, M. Doveri, M. Menichini, 2016). In rosso l'area oggetto d'interesse

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).

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello – Comune di Pistoia (PT)

ET.04A - Relazione geologica, geologico-tecnica sulle indagini e sismica – modifica a seguito dell'interlocuzione istruttoria del 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 – Divisione 4 Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori del 19/06/2020 e del parere del 27/07/2021 (registro ufficiale U.0015609)

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**
- **Marne 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 anche 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 coni 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 secondaria 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 ocre, 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.

3.2 CARATTERISTICHE GEOLOGICO-TECNICHE DI DETTAGLIO

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 § 8) 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 grado di 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 § 8) 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).

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello – Comune di Pistoia (PT)

ET.04A - Relazione geologica, geologico-tecnica sulle indagini e sismica – modifica a seguito dell'interlocuzione istruttoria del 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 – Divisione 4 Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori del 19/06/2020 e del parere del 27/07/2021 (registro ufficiale U.0015609)

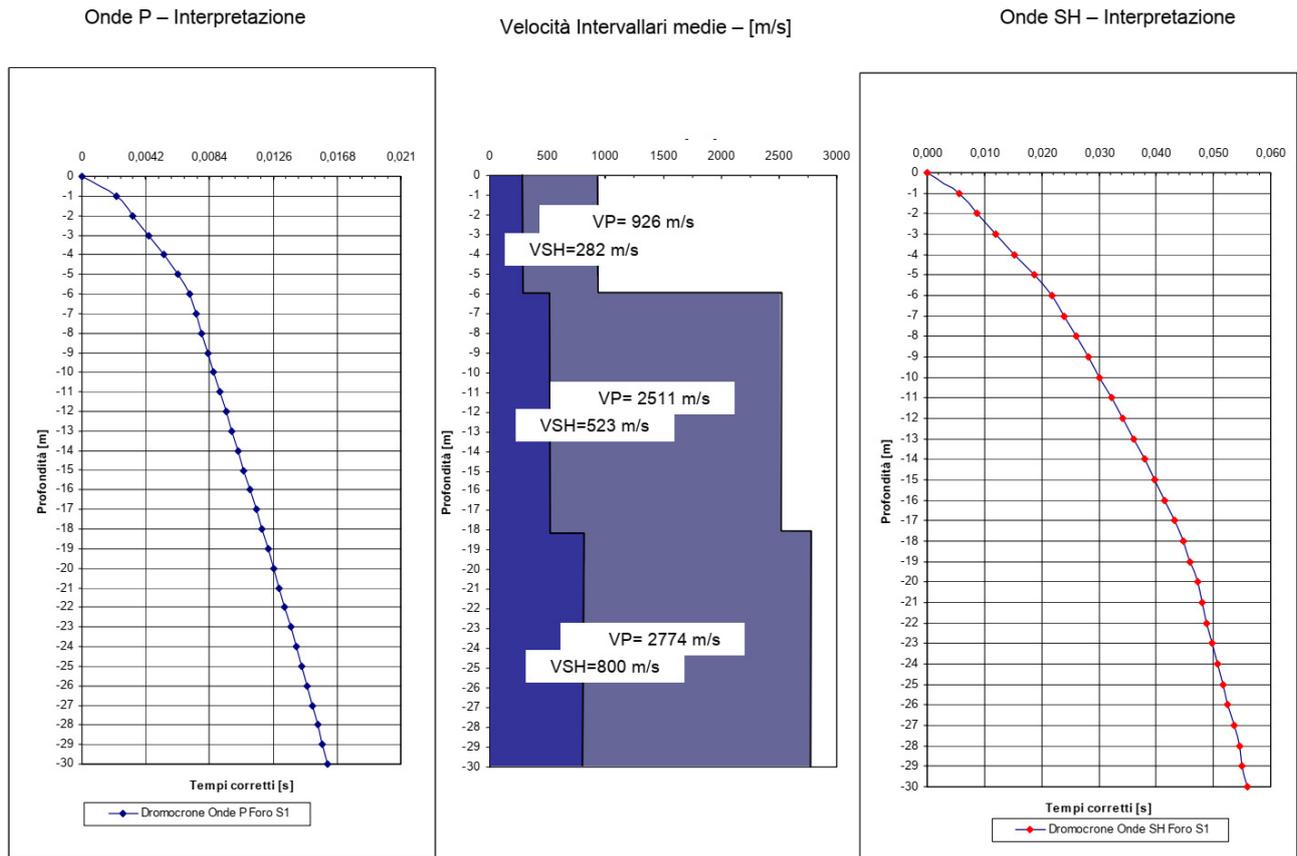


Fig. 2 – Grafico delle velocità intervallari medie (m/sec) delle onde P (Vp) e delle onde S (Vs) ricavate dalla prova sismica in foro DownHole (DH) eseguita nel sondaggio S1 del 2007 alla base del paramento di valle del corpo diga.

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello – Comune di Pistoia (PT)

ET.04A - Relazione geologica, geologico-tecnica sulle indagini e sismica – modifica a seguito dell'interlocuzione istruttoria del 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 – Divisione 4 Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori del 19/06/2020 e del parere del 27/07/2021 (registro ufficiale U.0015609)

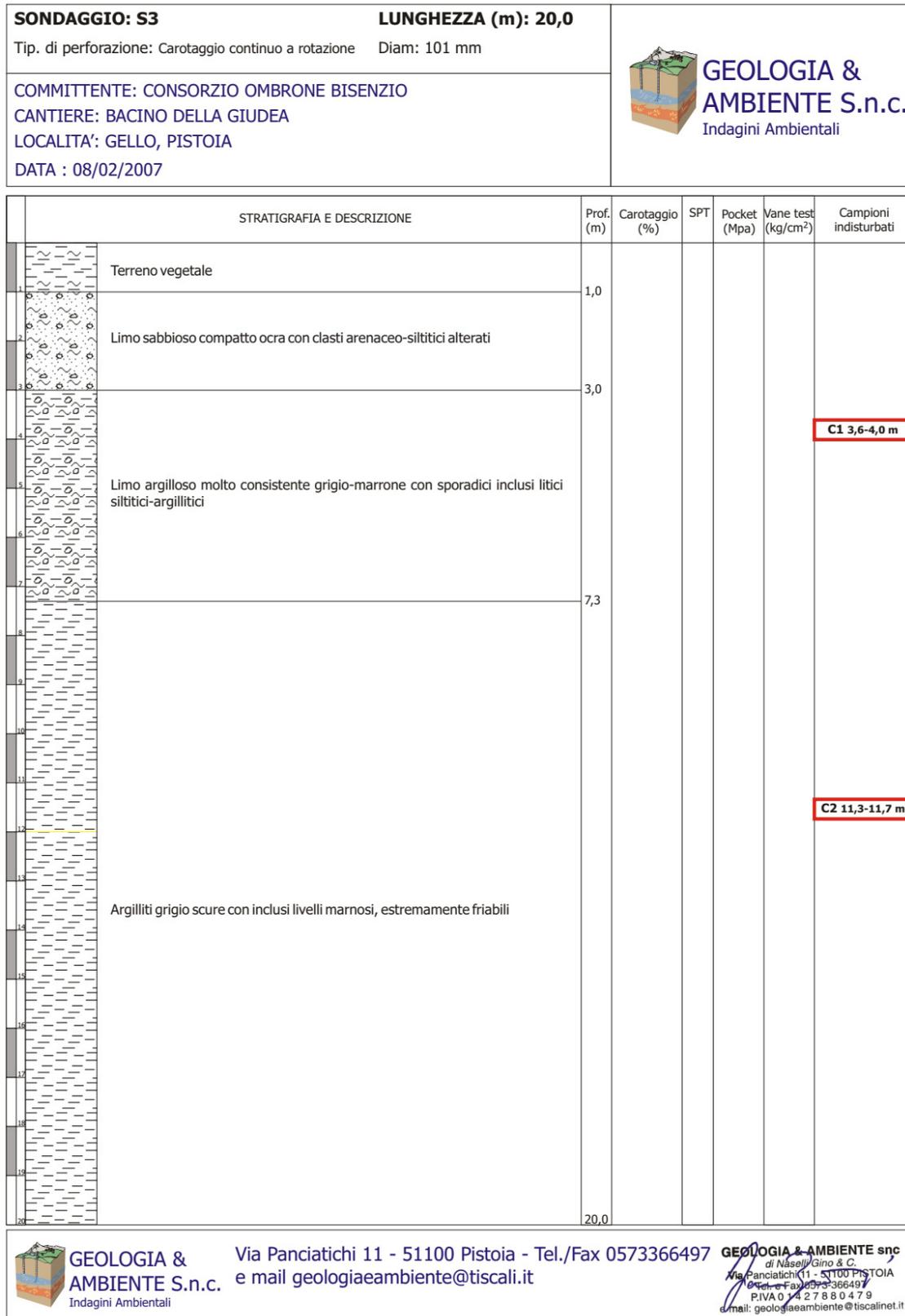


Fig. 3 – Stratigrafia del sondaggio S3 eseguito nel 2007 e posizionato lungo il versante SO (lungo la traccia del canale di scarico superficiale)

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello – Comune di Pistoia (PT)

ET.04A - Relazione geologica, geologico-tecnica sulle indagini e sismica – modifica a seguito dell'interlocuzione istruttoria del 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 – Divisione 4 Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori del 19/06/2020 e del parere del 27/07/2021 (registro ufficiale U.0015609)

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 lung oil versante SO della dorsale morfologica sulla cui sommità è posto il bacino antropico della Giudea

Dal 1965, la porzione di dorsale pedemontana 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 invasivo massimo da progetto: 754.600 m³

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello – Comune di Pistoia (PT)

ET.04A - Relazione geologica, geologico-tecnica sulle indagini e sismica – modifica a seguito dell'interlocazione istruttoria del 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 – Divisione 4 Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori del 19/06/2020 e del parere del 27/07/2021 (registro ufficiale U.0015609)



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 basale 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 § 8) 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

Secondo la normativa di riferimento per valore caratteristico di un parametro geotecnico si intende una stima ragionata e cautelativa del valore del parametro nello stato limite considerato. Le norme a cui si è fatto riferimento per la valutazione dei valori caratteristici sono le seguenti:

- Eurocodice 7;
- Circolare 02/02/2009;
- DM 17/01/2018.

Gli Eurocodici suggeriscono due metodi di calcolo per la stima dei valori caratteristici dei parametri geotecnici:

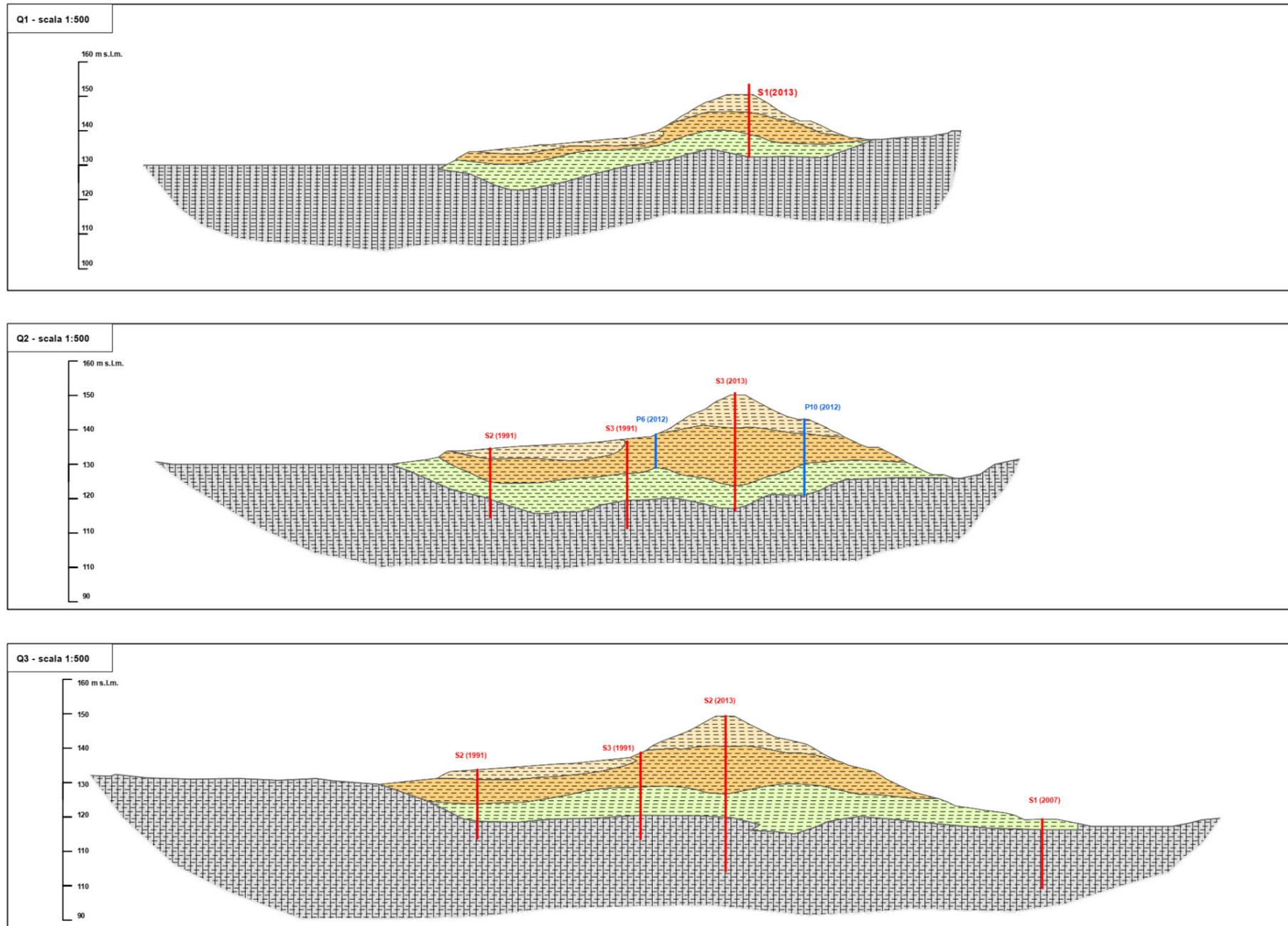
1. approccio deterministico o fisico o, semplicemente, **geotecnico**: dove le informazioni sulla distribuzione statistica della proprietà siano lacunose, può essere utilizzato un valore nominale rappresentativo del comportamento del materiale, scelto in base ad una valutazione cautelativa del valore che influenza l'insorgere dello stato limite.
2. approccio **statistico**: indicato in maniera esplicita nell'Eurocodice 7, tratta l'insieme dei valori assunti dal parametro in questione come una popolazione statistica ed il parametro stesso come una variabile casuale. In tale approccio conta più la quantità che la qualità dei campioni.

Le **NTC 2018** in relazione alla determinazione dei valori caratteristici confermano quanto riportato nelle precedenti norme del 2008. In particolare, nella Circolare esplicativa del 11/02/2019, paragrafo 6.2.2 in merito alla scelta dei parametri caratteristici si esplicita che essi derivano da una stima, effettuata dal progettista, del valore del parametro appropriato per lo stato limite considerato. Viene inoltre chiarito cosa si debba intendere nella pratica per valore caratteristico di un parametro geotecnico:

1. **paragrafo C.6.2.2.4** *...appare giustificato il riferimento a valori medi quando nello stato limite considerato, è coinvolto un elevato volume di terreno, con possibile compensazione delle eterogeneità ...*

Nel caso specifico trattandosi di una problematica geotecnica che prevede il coinvolgimento di un elevato volume di terreno, con possibile compensazione delle eterogeneità, riteniamo (e confermiamo) idoneo il criterio delle "resistenze compensate" secondo il quale "i valori caratteristici dei parametri geotecnici potranno corrispondere ad una stima cautelativa del valore medio misurato". Per quanto concerne la "stima cautelativa" riteniamo che l'approccio applicato sia in linea con tale criterio sicuramente per quanto concerne i parametri geomeccanici derivanti da prove SPT, prove penetrometriche (statiche e dinamiche) o da analisi di laboratorio prelevati con fustella, operazioni queste che hanno avuto compimento solo sui materiali meno tenaci. Anche per i campioni prelevati direttamente dalla cassetta catalogatrice, non campionabili con fustella, il criterio cautelativo è stato rispettato considerando che questi sono stati scelti in corrispondenza degli spessori, ovviamente riferibili allo strato/livello/orizzonte da caratterizzare, che hanno manifestato una minore resistenza all'avanzamento del carotiere o della punta penetrometrica. Il resto è derivato necessariamente dalla bibliografia e dalla letteratura facendo comunque attenzione a rispettare il criterio della cautela.

In ragione di quanto sopra riteniamo di poter identificare come valori medi e quindi caratteristici, quelli sperimentali riportati nella modellazione geologica e geotecnica che verranno pertanto utilizzati nella verifica per le valutazioni analitiche di carattere geotecnico del progetto.



Legenda

Corpo diga

- Corpo diga - Terreno di riporto costituito da una prevalenza di materiale limoso rispetto alla componente argillosa, presenza di livelletti prevalentemente argillosi. Presenza con distribuzione omogenea di componente sabbiosa e clasti prevalentemente millimetrici
- Corpo diga - Terreno di riporto costituito da una prevalenza di materiale argilloso rispetto alla componente limosa, presenza di livelletti prevalentemente argillosi. Presenza con distribuzione omogenea di componente sabbiosa e di clasti prevalentemente millimetrici
- Corpo diga - Terreno di riporto costituito da una prevalenza di materiale limoso rispetto alla componente argillosa, presenza di livelletti prevalentemente argillosi (in maggiore alternanza rispetto all'orizzonte superficiale). Presenza con distribuzione omogenea di componente sabbiosa e clasti prevalentemente millimetrici

Substrato

- Substrato - Ammasso roccioso costituito da un'alternanza di orizzonti pelitici (argillitici/siltitici) e orizzonti massoso calcarei, massoso argillitici, calcarei, calcarenitici e arenacei. Presenza in superficie di un orizzonte di spessore variabile da alcuni metri ad una decina di metri di terreno fortemente alterato costituito da materiale prevalentemente limoso argilloso

STRATIGRAFIA CAROTAGGIO S3 DIGA DELLA GIUDEA (PT)			
Profondità (m)	Potenza (m)	Simbolo	Descrizione
0,00	0,10		asfalto
0,10	0,30		pietrisco
0,30	0,60		pietrisco con argilla limosa
0,60	1,40		limo deb. argilloso e ghiaietto
1,40	2,40		argilla limosa e ghiaietto
2,40	2,60		limo deb. argilloso e ghiaietto
2,60	0,90		argilla limosa, sabbia e ghiaietto
3,50	0,50		limo deb. argilloso e ghiaietto
4,00	0,30		argilla limosa con sabbia e ghiaietto
4,30	0,50		limo deb. argilloso e ghiaietto
4,80	0,20		argilla limosa e ghiaietto
5,00	0,10		limo deb. argilloso e ghiaietto
5,10	0,50		argilla limosa con sabbia e ghiaietto
5,60	0,40		limo deb. argilloso e ghiaietto
6,00	0,40		argilla limosa con sabbia e ghiaietto
6,40	0,40		limo deb. argilloso e ghiaietto
6,80	2,60		limo argilloso con sabbia e ghiaietto
9,40	0,50		CAMPIONE INDISTURBATO
9,90	0,10		argilla limosa e ghiaietto
10,00	0,40		argilla limosa e ghiaietto
10,40	0,30		argilla con limo, sabbia e ghiaietto
10,70	0,20		limo argilloso con sabbia e ghiaietto
10,90	0,50		limo deb. argilloso e ghiaietto
11,40	0,20		argilla limosa e ghiaietto
11,60	0,60		argilla e tratti torbosa con limo
12,20	0,60		argilla limosa con sabbia e ghiaietto
12,80	0,60		limo deb. argilloso e ghiaietto
13,40	0,40		sabbia e pietrisco
13,80	0,20		argilla limosa con sabbia e ghiaietto
14,00	0,60		argilla con limo, sabbia e ghiaietto
14,60	1,20		limo argilloso con sabbia e ghiaietto
15,80	0,50		CAMPIONE INDISTURBATO
16,30	2,20		argilla con limo, sabbia e ghiaietto
17,50	0,30		limo deb. argilloso e ghiaietto
18,00	0,30		argilla grigia con limo, sabbia e ghiaietto
18,30	0,20		argilla con limo, sabbia e ghiaietto
18,50	0,20		limo deb. argilloso e ghiaietto
18,70	1,30		argilla grigia con limo, sabbia e ghiaietto
20,00	0,80		argilla grigia con limo, sabbia e ghiaietto
20,80	0,50		argilla limosa con sabbia e ghiaietto
21,30	0,70		limo deb. argilloso con ghiaietto
22,00	0,50		CAMPIONE INDISTURBATO
22,50	1,70		argilla grigia con limo, sabbia e ghiaietto
24,20	0,30		argilla con limo, sabbia e ghiaietto
24,50	1,00		argilla grigia con limo, sabbia e ghiaietto
25,50	0,50		CAMPIONE DISTURBATO
26,00	0,70		argilla grigia con limo, sabbia e ghiaietto
26,70	0,50		limo argilloso con ghiaietto
27,20	0,20		argilla grigia con limo, sabbia e ghiaietto
27,40	0,40		limo argilloso con ghiaietto
27,80	1,20		argilla grigia con limo, sabbia e ghiaietto
29,00	0,40		limo argilloso con ghiaietto
29,40	0,80		limo deb. argilloso con ghiaietto
30,20	0,60		argilla grigia con limo, sabbia e ghiaietto
30,80	1,00		limo deb. argilloso con ghiaietto
31,80	0,20		argilla grigia con limo, sabbia e ghiaietto
32,00	1,40		limo deb. argilloso con ghiaietto
33,40	0,30		argilla grigia con limo, sabbia e ghiaietto
33,70	0,40		limo argilloso con ghiaietto
34,10	2,90		argilliti grigio scure alterate
37,00			

Fig. 6 – A destra, sezioni geologico-tecnice del corpo diga. A sinistra stratigrafia del sondaggio S3 eseguito nel 2013 sul coronamento della diga

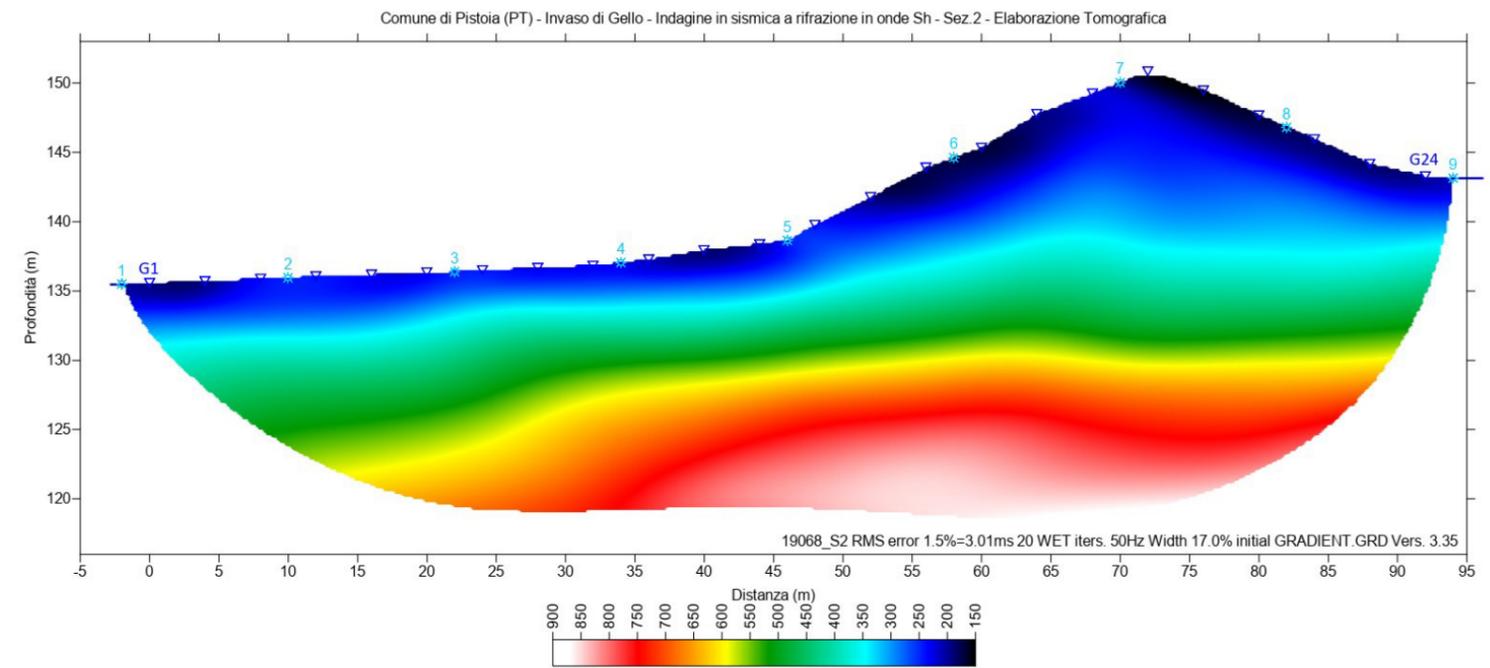
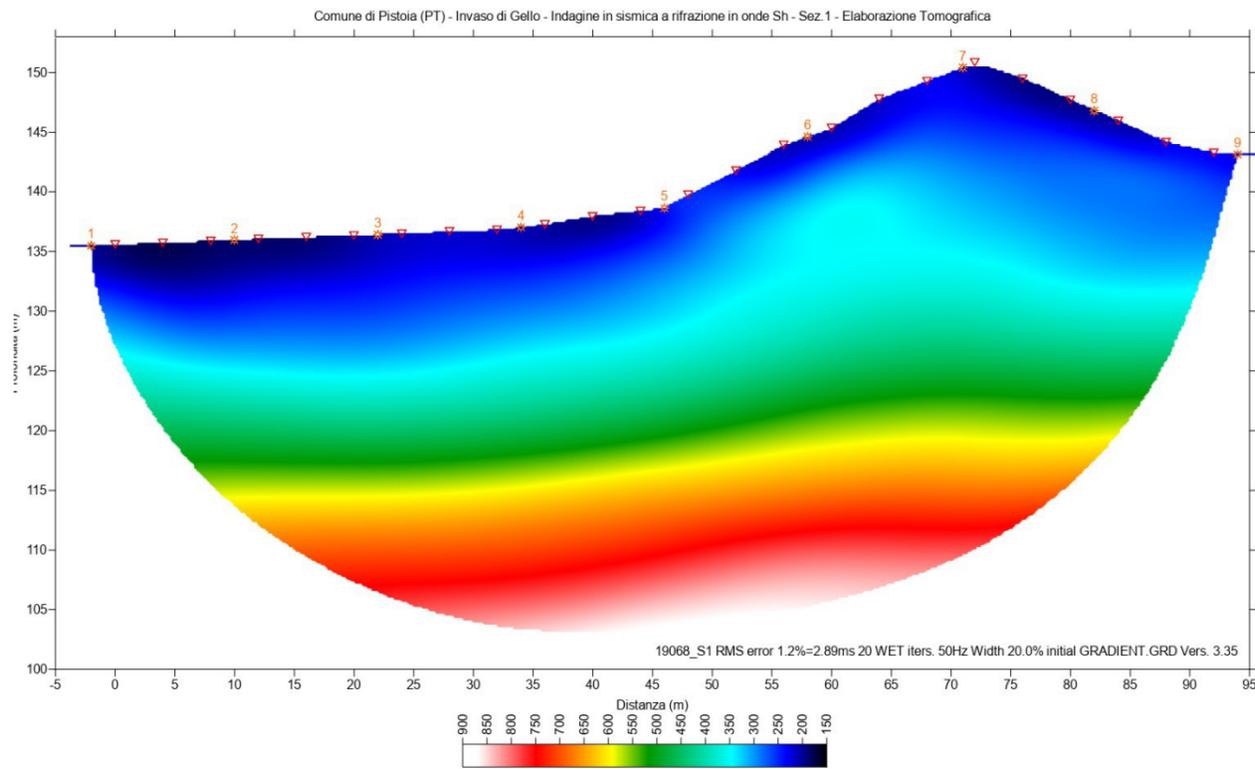


Fig. 7 – Tomografie trasversali del corpo diga derivanti dalle indagini sismiche a rifrazione del 2019. Il corpo diga presenta una velocità delle onde sismiche S (V_s) inferiore a 500 m/sec

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello – Comune di Pistoia (PT)

ET.04A - Relazione geologica, geologico-tecnica sulle indagini e sismica – modifica a seguito dell'interlocuzione istruttoria del 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 – Divisione 4 Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori del 19/06/2020 e del parere del 27/07/2021 (registro ufficiale U.0015609)

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 § 8 e agli allegati ET.04 dalla D alla N

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

Per i dettagli sulla stratigrafia e le caratteristiche geotecniche della sponda sinistra si rimanda al § 4.2.

4 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO E GEOMORFOLOGIA DI DETTAGLIO

4.1 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

Come descritto nei §§ 2 e 3 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.

Osservando le cartografie comunali e regionali di carattere geomorfologico, 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%.

4.2 GEOMORFOLOGIA DI DETTAGLIO

Nell'agosto 2020 è stato eseguito un rilievo geomorfologico di dettaglio dell'area in studio. In aggiunta a ciò, è stata eseguita una fotointerpretazione multitemporale del sito analizzando i seguenti fotogrammi messi a disposizione dalla Regione Toscana:

- Fotogramma c0486_001_952 del 06/08/1988
 - Volo CGR SPA Parma - Quota 2000 m
- Fotogramma c0485_002_511/512 e 513 del 04/10/1989
 - Volo CGR SPA Parma - Quota 2800 m
- Fotogramma c0469_001_3476/3477/3450 e 3451 del 13/04/1990
 - Volo CGR SPA Parma - Quota 1400 m
- Fotogramma c0510_006a/b_1148/1150/1152/1188/1190 e 1192 del 06/10/1993 (Fig. 8)
 - Volo CGR SPA Parma - Quota 5000 m
- Fotogramma c0567_007b_544/546/548 e 550 del 19/06/1995
 - Volo ALI TOSCANE - Quota 5000 m
- Fotogramma c0634_022b_1242 e 1243 del 22/04/1998 (Fig. 8)
 - Volo AVIORIPRESE - Quota 1100 m
- Fotogramma c0810_019_186/186/187/204 e 205 del 13/10/2007
 - Volo IAS - Quota 1100 m

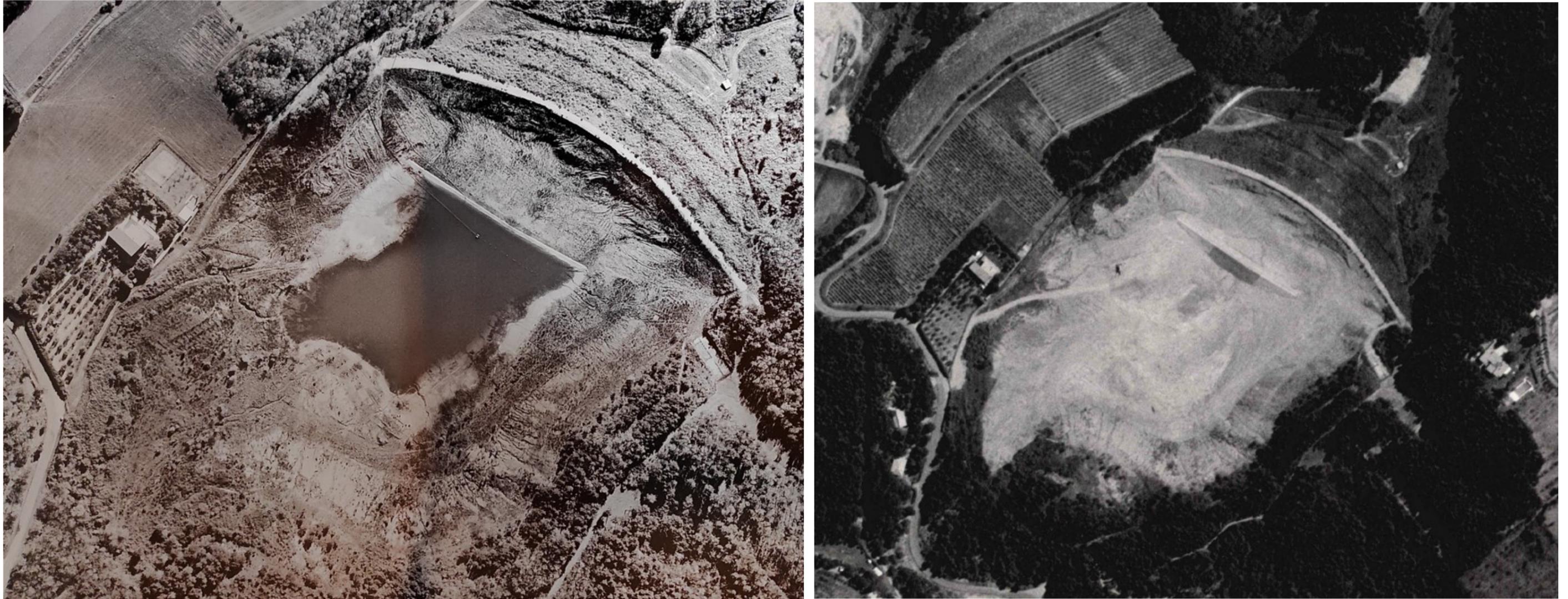


Fig. 8 – A sinistra fotogramma aereo del 1998, a destra fotogramma aereo del 1993

Per quanto riguarda il quadro geomorfologico di area vasta, esterno al bacino della Giudea, esso non risulta coerente con quanto indicato nella cartografia a supporto del vigente P.S. comunale e del Database Geomorfologico della Regione Toscana (vedi Tav. GEO.02). In particolare, dai rilievi geomorfologici eseguiti non risulta la presenza delle frane quiescenti lungo il versante esterno Sud-Ovest. Nello stesso versante sono state rilevate delle erosioni incanalate per rivoli.

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 sono verificati, 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. 9).

In particolare, per quanto riguarda il paramento di monte siamo in presenza di una frana quiescente stabilizzata (a seguito di interventi antropici) che interessa approssimativamente tutto il versante antropico di monte con una lunghezza al coronamento di circa 260 ml. Il complesso franoso è costituito da più nicchie di scivolamento rotazionale che si sono venute a formare a partire dal 1990, hanno interessato il bordo interno del coronamento e che sono proseguite nel corso degli anni fino a raggiungere una parziale stabilità (quiescenza) a partire dal 1993/1994 in concomitanza con la realizzazione degli interventi di bonifica al piede del versante (riprofilatura e realizzazione della tura).

Il Prof. Colombo nella relazione tecnica del 1990 a supporto del progetto di massima per il consolidamento della diga descriveva tale movimento franoso come segue:

Durante lo svuotamento dell'esate 1990, il paramento interno, a partire dal bordo interno del coronamento a quota m l m 150,06 ha manifestato dei cedimenti che si sono sempre più accentuati al proseguire dello svuotamento stesso, con formazione di alcuni cretti longitudinali lungo l'asse del coronamento sul manto bituminoso. Il movimento di scoscendimento ha interessato tutto il paramento interno della diga per una lunghezza di circa 260 m rispetto alla lunghezza totale del coronamento di 296 m. Si è creato quindi un'ampia nicchia a partire dall'alto; mentre sulla parte del paramento interno in prossimità del minimo invaso utile si è manifestato un'ampio rigonfiamento a quota m.l.m. 134; in prossimità di questo la lunghezza orizzontale del movimento, ove il materiale si è seduto risulta di circa 138 m.

Le cause del dissesto potranno essere più dettagliatamente descritte quando saranno state effettuate le indagini geognostiche e geotecniche previste.

Tuttavia di massima si può affermare che le cause vanno ricercate nella concomitanza di 2 fattori: la notevole scarsa permeabilità del materiale che compone il paramento interno della diga, e gli svuotamenti totali, rapidi e ripetuti cui la diga è stata sottoposta in 20 anni.

La suddetta descrizione è confermata anche nello studio del Prof. Ing. Giuseppe Baldwin del 1995 a supporto del progetto esecutivo di intervento per il ripristino funzionale per l'aumento della capacità e per l'adeguamento del D.M. 24/03/1982 n.44 in cui si dichiara quanto segue:

I dissesti sono stati ampiamente analizzati nelle relazioni del prof. P.Colombo, alle quali si rimanda per una disamina completa.

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello – Comune di Pistoia (PT)

ET.04A - Relazione geologica, geologico-tecnica sulle indagini e sismica – modifica a seguito dell'interlocuzione istruttoria del 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 – Divisione 4 Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori del 19/06/2020 e del parere del 27/07/2021 (registro ufficiale U.0015609)



Fig. 9 - 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

A seguito dei franamenti suddetti, nel 1993, fu realizzato 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 parte dei terreni franati e parte di quelli derivanti dal rimodellamento della porzione di paramento di monte franata nel 1990.

Alla luce di tutte le indagini geognostiche e geofisiche eseguite dal 1990 ad oggi, non è possibile definire una superficie di scivolamento certa che discrimini la parte franata dal terreno in posto e conseguentemente permetta di definire un volume certo di terreno franato.

Già nella documentazione del Prof. Colombo (1990) e del Prof. Ing. Baldwin (1995) non viene definita alcuna superficie di scivolamento certa, ovvero evidenziata dalle risultanze delle indagini geognostiche eseguite. In particolare, nella relazione del Prof. Ing. Baldwin del 1995 si riporta quanto segue:

Non è stato comunque individuata la superficie di scorrimento della frana, mentre è stato riconosciuto dall'esame delle carote, il passaggio tra i materiali del rilevato ed i terreni di fondazione.

Con una trincea (T12) si è cercato anche di individuare la superficie di scorrimento dello scoscendimento, che ha interessato il rilevato diga, senza tuttavia riuscire nell'intento.

- **Nei sondaggi del '91 non è stata individuata la superficie di scorrimento della frana, mentre è stato riconosciuto il passaggio tra i materiali del rilevato e i terreni di fondazione.**

Anche le indagini geognostiche e geofisiche che si sono succedute dal 2007 ad oggi non hanno mostrato alcuna presenza di superfici di scivolamento certe. Oltretutto le nuove indagini (dal 2007 ad oggi) sono state eseguite su un paramento completamente rimodellato e che quindi presenta una condizione geomorfologica completamente diversa rispetto al contesto post-frana del 1990. A titolo di esempio si riporta 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. 11). In entrambi i casi si riscontrano valori di resistenza alla punta e resistenza laterale comparabili e quindi associabili a terreni aventi le stesse caratteristiche geotecniche (al netto delle minime differenziazioni litologiche presenti nel corpo diga ed illustrate nel § 3.2 del presente elaborato) senza alcuna evidenza di terreni allentati dal fenomeno gravitativo o con caratteristiche geotecniche scadenti associabili alla presenza di un corpo franoso rilevante e relative superfici di scivolamento a resistenza nettamente minore.

Tuttavia, il Prof. Colombo, a conclusione del suo studio 1990 (poi riportato anche nello studio del Prof. Ing. Baldwin del 1995), ha definito una possibile superficie di scivolamento basata su una back analysis di stabilità che ha evidenziato un corpo di frana con uno spessore massimo di circa 10 m che coinvolge l'intero paramento di monte (Fig. 10). Preme sottolineare che tale superficie di scivolamento è figlia di una back analysis e come dichiarato dallo stesso Prof. Colombo e dallo stesso Prof. Ing. Baldwin non presenta alcun riscontro con le risultanze delle prove geognostiche, sia dirette che indirette, eseguite sul corpo diga.

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello – Comune di Pistoia (PT)

ET.04A - Relazione geologica, geologico-tecnica sulle indagini e sismica – modifica a seguito dell'interlocuzione istruttoria del 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 – Divisione 4 Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori del 19/06/2020 e del parere del 27/07/2021 (registro ufficiale U.0015609)

SUOLO	PESO SP. LIMIDO	PESO SP. SATURO	COESIONE	ANGOLO D'ATTR.	PRESS. PORI
No	Kg/mc	Kg/mc	Kg/mq	Grad I	
1	2000.00	2100.00	500.00	25.00	.00
2	2000.00	2100.00	1000.00	20.00	.00
3	2100.00	2200.00	.00	30.00	.00
4	2100.00	2200.00	.00	45.00	.00
5	2000.00	2100.00	500.00	25.00	.00

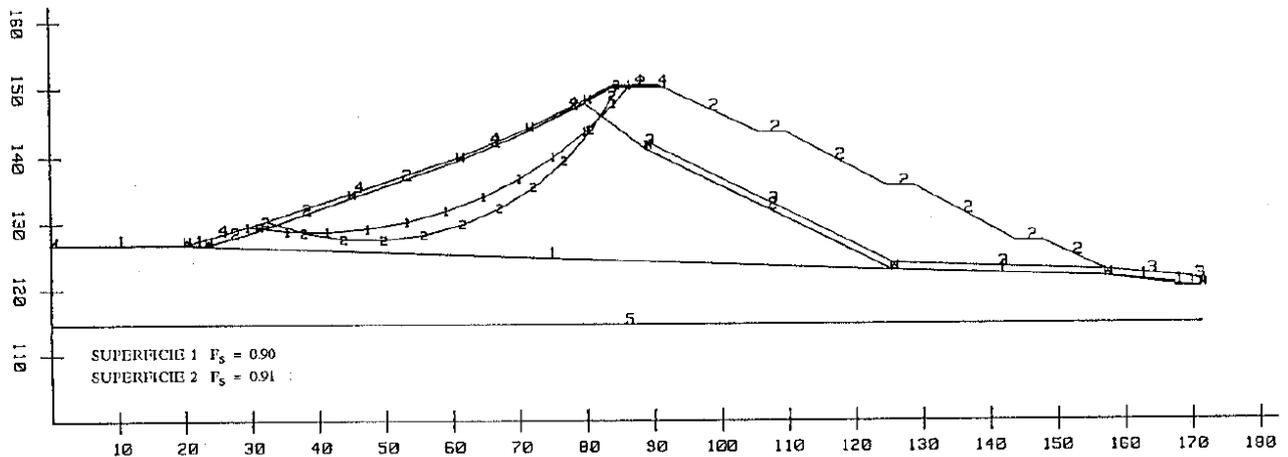


Fig. 10 - Estratti delle ortofoto scattate sopra il bacino della Giudea nel 1978 (post-operam – foto sopra) e nel 1998(post-franamento e realizzazione della tura al piede di monte dello sbarramento – foto sotto). Fonte Geoscopio – Regione Toscana

In virtù di ciò, e a conclusione di tutte le indagini geognostiche e geofisiche eseguite dal 1990 ad oggi (vedi § 8 e allegati ET.04 dalla D alla N), è possibile ipotizzare che il franamento del paramento di monte ha interessato solo scaglie superficiali del terreno del corpo diga associato agli svasi rapidi del bacino ed ha raggiunto una condizione temporanea di stabilità (quiescenza) a partire dal 1994. La superficie di scivolamento individuata dagli studi di back analysis del Prof. Colombo, allo stato attuale delle conoscenze, risulta estremamente cautelativa e non rispondente con le risultanze delle indagini geognostiche e geofisiche susseguitesesi dal 1990 ad oggi, come anche evidenziato dagli stessi Prof. Colombo e Baldwin nei loro elaborati. Tuttavia, il progetto attuale, oggetto della presente documentazione si pone come obiettivo, oltre all'asportazione di tutto il materiale franato del paramento di monte (aspetto che potrà essere definito con maggior dettaglio in fase esecutiva o in fase di cantiere), anche la riduzione dell'altezza del corpo diga (circa 7 m) con conseguente riduzione della pendenza dei paramenti di monte e di valle da un valore di circa 1:2 ad un valore di circa 1:3,75. Queste modifiche vanno nella direzione cautelativa auspicata anche nella documentazione del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti nelle varie osservazioni pervenute durante il procedimento istruttorio del progetto definitivo. Inoltre, la pendenza di progetto del paramento di monte (come anche del paramento di valle) sarà di circa 15°, cautelativamente inferiore alla pendenza critica individuata dal Prof. Ing. Baldwin e pari a circa 20° (con coesione di circa 0,2 Kg/cm²). Comunque, se in fase esecutiva o in fase di cantiere emergessero condizioni o evidenze geomorfologiche/geotecniche che definiscono un quadro geomorfologico/geologico tecnico non compatibile con alcuni aspetti progettuali, i medesimi aspetti verranno modificati in coerenza con il quadro geomorfologico/geotecnico evidenziato. Ricordiamo nuovamente che allo stato attuale delle conoscenze non è possibile definire con certezza una superficie di scivolamento e conseguentemente una volumetria certa del corpo di frana. Tale aspetto è in

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello – Comune di Pistoia (PT)

ET.04A - Relazione geologica, geologico-tecnica sulle indagini e sismica – modifica a seguito dell'interlocuzione istruttoria del 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 – Divisione 4 Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori del 19/06/2020 e del parere del 27/07/2021 (registro ufficiale U.0015609)

coerenza con quanto indicato dal Prof. Colombo e dal Prof. Ing. Baldwin nei loro studi del 1990 e del 1995 al netto della definizione di una superficie di scivolamento, effettuata dal Prof. Colombo e confermata dal Prof. Baldwin, figlia di una modellazione in back analysis e che come indicato da entrambi i professori nei loro elaborato, non ha mostrato alcun riscontro, in termini di superficie di scivolamento con quanto è emerso dalle risultanze delle indagini geognostiche eseguite.

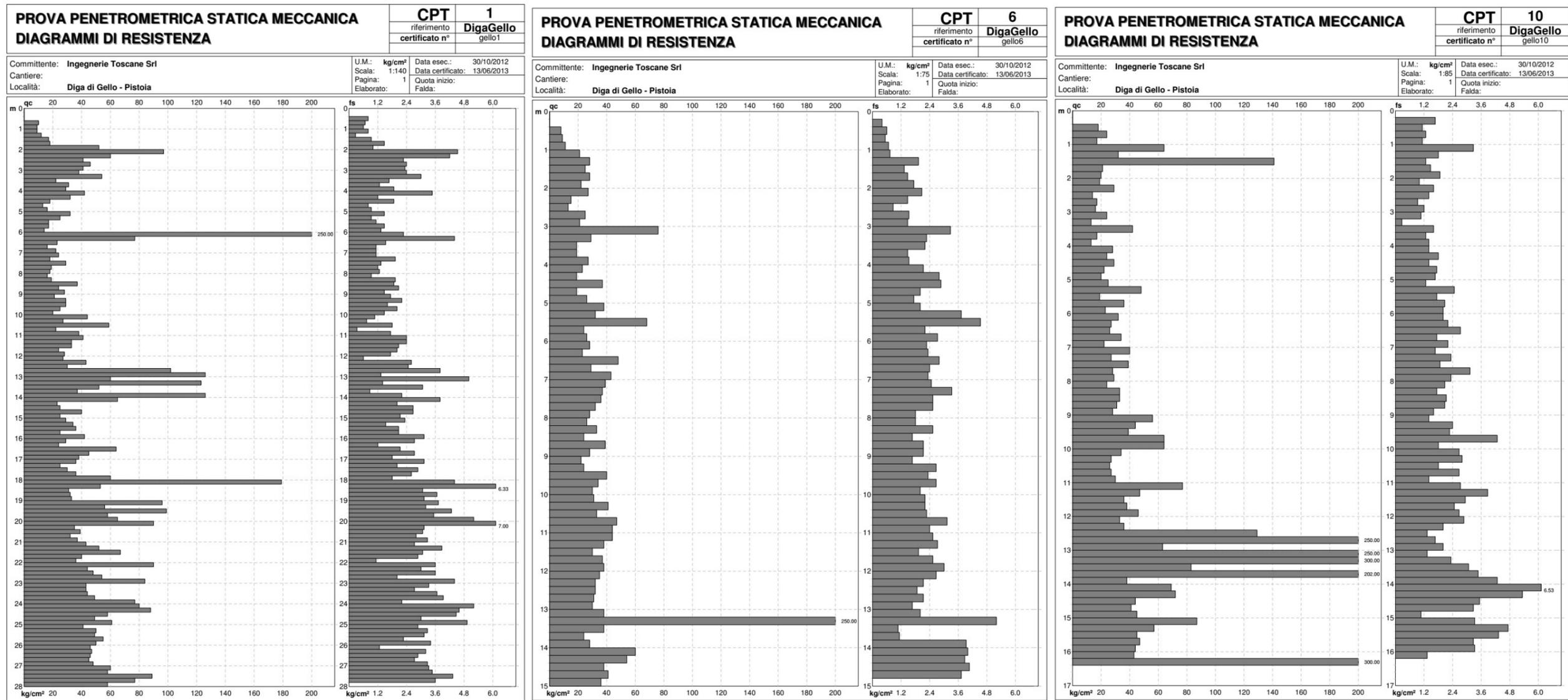


Fig. 11 – Confronto fra prove penetrometriche eseguite sul corpo diga. CPT 1 eseguita sul coronamento del corpo diga, CPT 6 eseguita lungo il paramento di monte e CPT 10 eseguita lungo il paramento di valle. Indagini del 2012

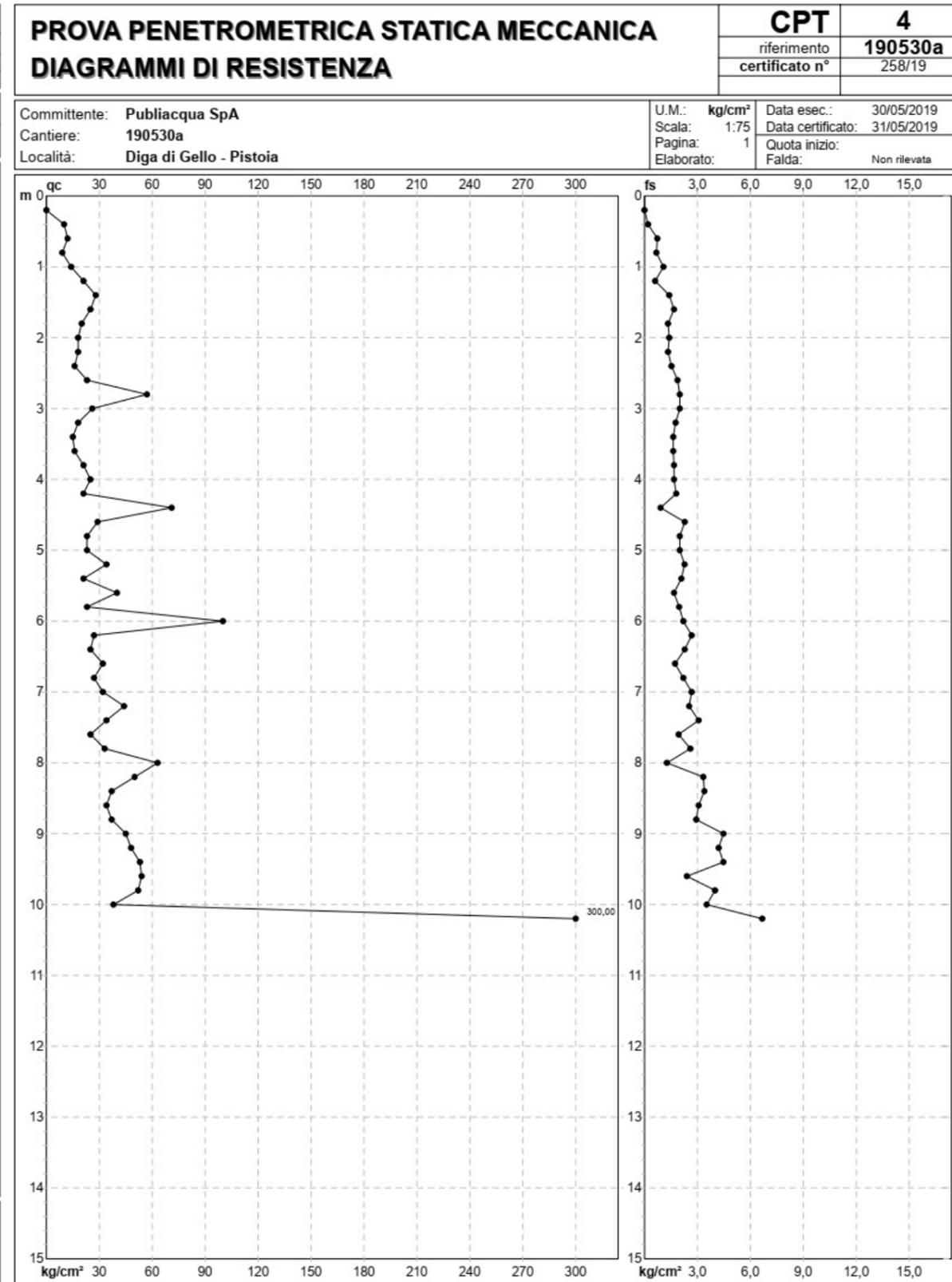
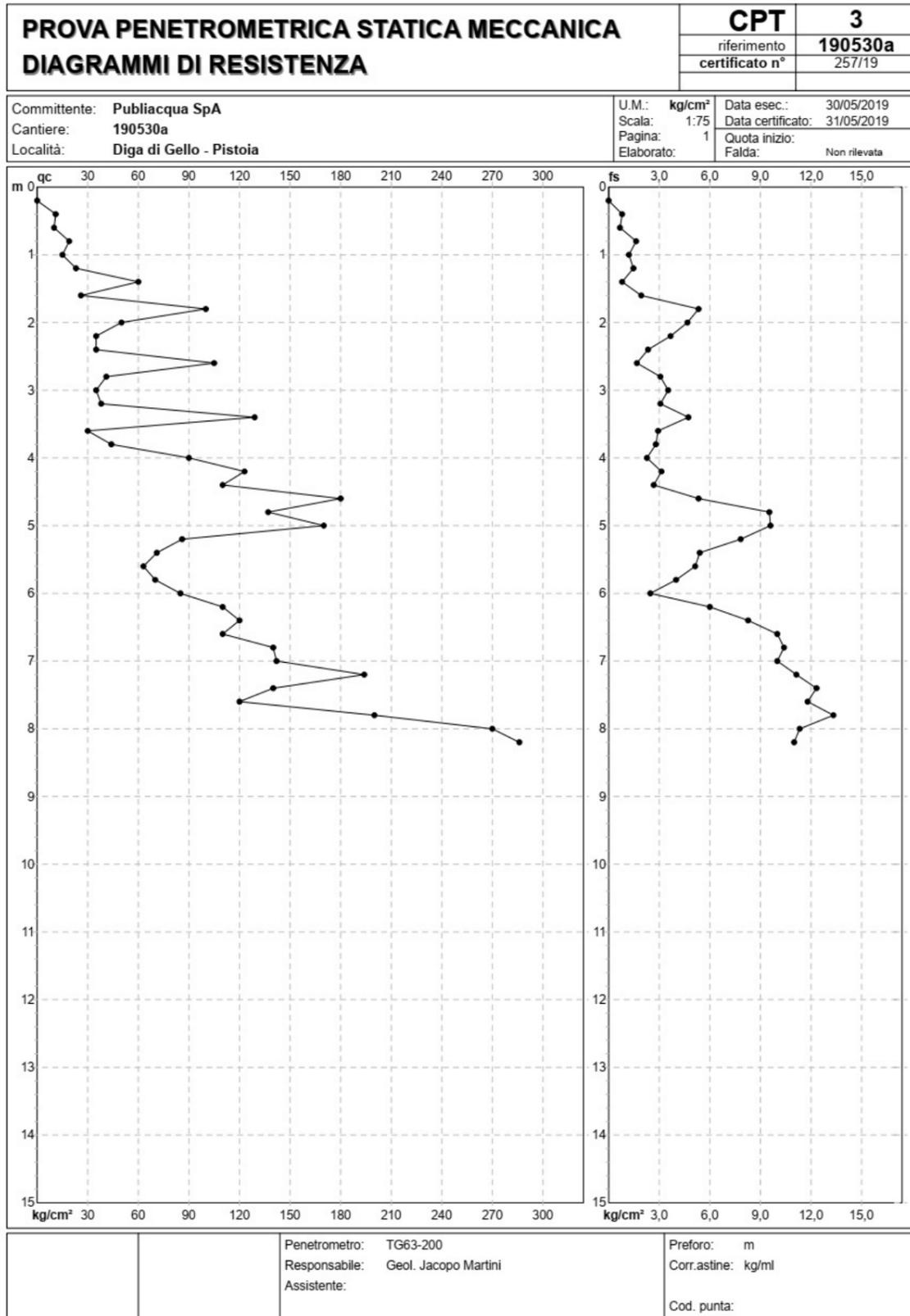


Fig. 12 – Risultati delle prove penetrometriche CPT 3 e CPT 4 eseguite nel 2019 lungo la sponda sinistra dell'invaso

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 mostravano segni di potenziale instabilità con possibili fenomeni di scivolamento superficiale. Il corpo di frana si è sviluppato, come indicato dallo studio del Prof. Ing. Baldwin del 1995, nell'autunno del 1990 ed ha visto come causa scatenante la rottura di una tubazione a monte della scarpata. Nel documento del Prof. Ing. Baldwin è riportata la seguente descrizione:

Nell'invaso, in sponda sinistra poco a monte dell'argine, si è sviluppato nell'autunno '90 uno scivolamento rotazionale che ha in parte messo a nudo il substrato. La zona coinvolta ha una larghezza di circa 50 m tra le quote 140 e 155 m s.m. e presenta all'intorno fenomeni di erosione regressiva. Fenomeni di erosione superficiale di circa 60-70 m di larghezza interessano sempre la sponda sinistra tra la frana segnalata e il podere Giudea. L'erosione pare imputabile sia all'elevata pendenza della pendice in quel tratto, sia a perdite d'acqua concentrate provenienti dalla rottura di una tubazione.

Il dissesto ha coinvolto solo la facies alterata (cappellaccio) della formazione argilloscistosa (Complesso eterogeneo) di base.

Allo stato attuale e a seguito del rilievo geomorfologico e della fotointerpretazione multitemporale (1988 – 2007 – vedi sopra per l'elenco dei fotogrammi utilizzati) è stato possibile evidenziare, per la sponda sinistra, la presenza di segni di attività nella porzione centrale dalla strada di monte fino alla base del versante. Le altre porzioni del versante a Nord e a Sud della zona attiva mostrano segni di quiescenza senza evidenze di instabilità attiva. Le indagini geognostiche e geofisiche eseguite hanno mostrato una stratigrafia caratterizzata da tre orizzonti:

- Un primo orizzonte di materiale franato/allentato a componente prevalentemente coesiva (argilla limosa) dello spessore massimo di circa 3 m.
- Un secondo orizzonte costituito dal substrato argilloscistico alterato (cappellaccio) avente uno spessore medio di circa 12/13 m.
- Un terzo orizzonte costituito dal substrato in posto (con basso grado di alterazione decrescente con la profondità) con velocità delle onde Sh superiori agli 800 m/sec. Tale assetto è confermato anche dalle prove penetrometriche e dalle indagini geofisiche eseguite lungo la sponda sinistra (Fig. 13)

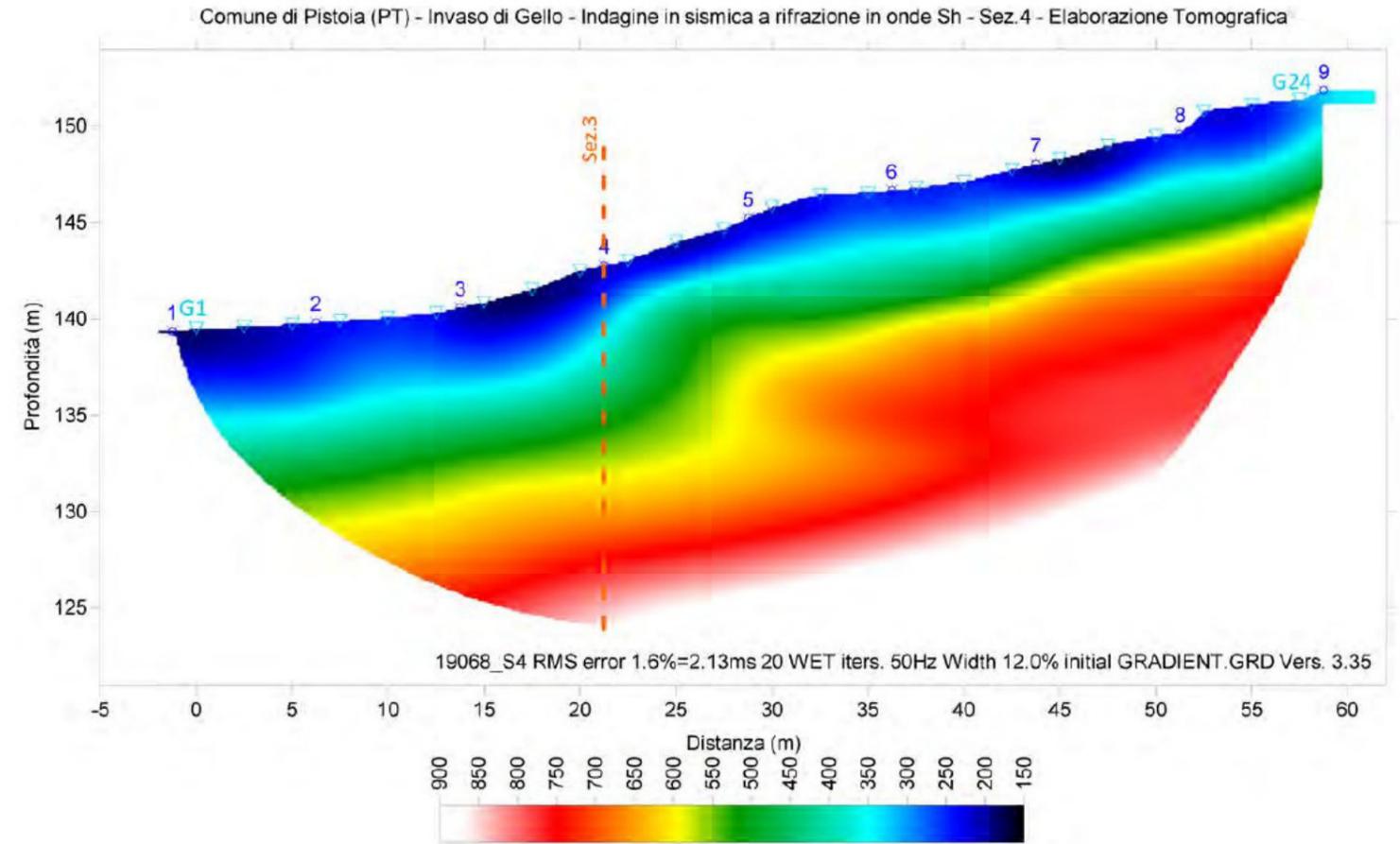
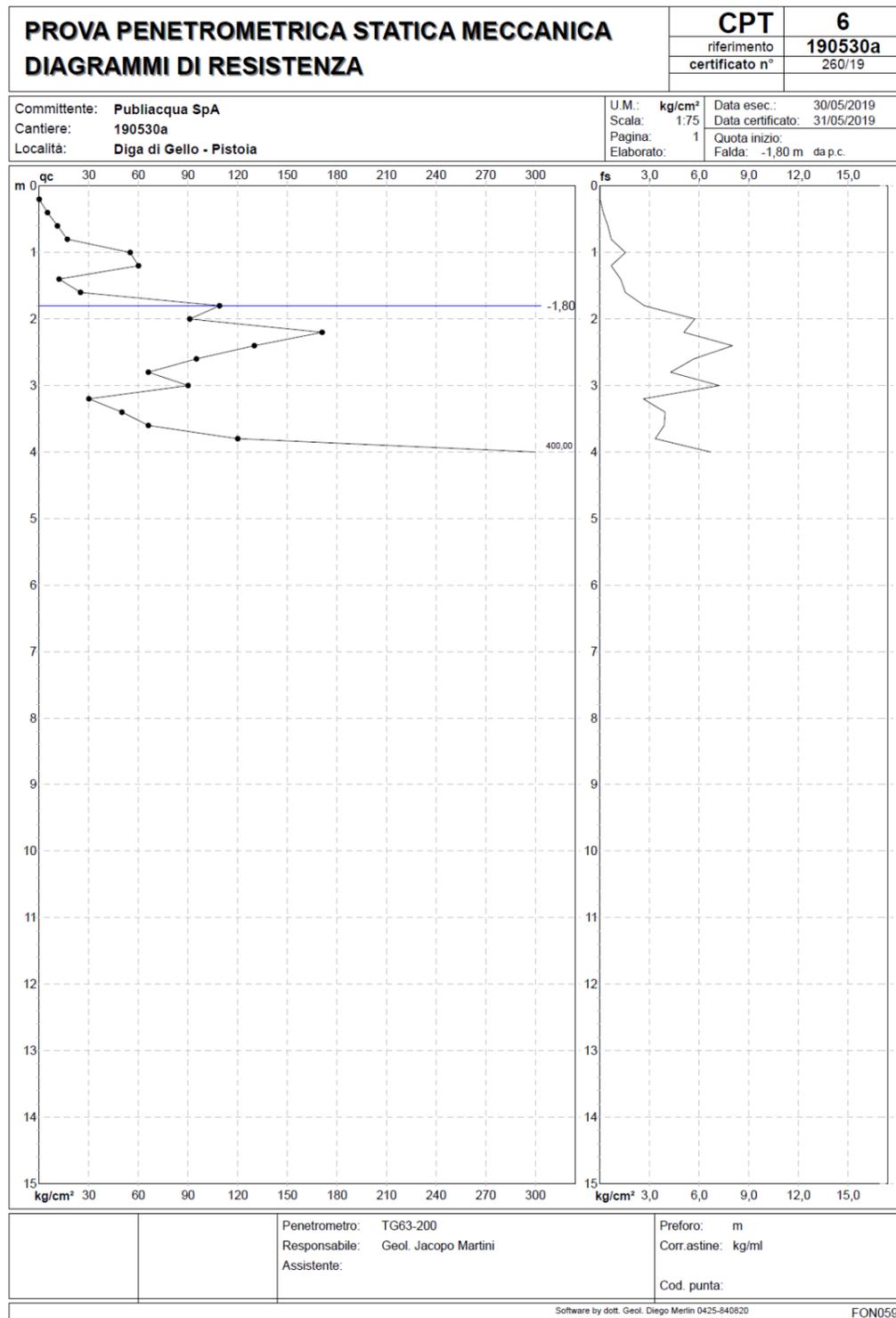


Fig. 13 – A sinistra risultanza della prova penetrometrica statica CPT6 lungo la sponda sinistra. A destra risultanza dell'indagine sismica e rifrazione onde S lungo la sponda sinistra

Le indagini geognostiche eseguite dal 1991 ad oggi hanno permesso di definire i seguenti parametri caratteristici:

- Corpo di frana
 - Coesione residua C' – 0 kPa (cautelativa)
 - Coesione non drenata CU – 40 kPa
 - Angolo di taglio residuo - 14.3°
- Substrato alterato
 - Coesione C' – 22 kPa
 - Coesione non drenata – 100 kPa
 - Angolo di taglio – 23,4°
- Substrato
 - Coesione C' - 24 kPa
 - Coesione non drenata – 150 kPa
 - Angolo di taglio - 23,6°

In particolare, per il corpo di frana sono stati presi a riferimento i risultati delle prove geotecniche di laboratorio eseguite sui campioni prelevati a settembre 2020, per quanto riguarda la coesione e l'angolo di attrito residuo mentre per la coesione non drenata si è fatto riferimento ai valori stimati dalle prove penetrometriche statiche eseguite nel 2019 sulla sponda sinistra. Stessa cosa riguarda la coesione non drenata e drenata del substrato alterato, stima basata sui risultati delle prove penetrometriche statiche eseguite sulla sponda sinistra. Tali valori sono stati naturalmente confrontati con i risultati delle indagini geognostiche e geotecniche eseguite sui terreni alla base del corpo diga. Per quanto riguarda invece il substrato non alterato si è fatto riferimento alle prove che hanno intaccato il substrato geologico alla base del corpo diga in quanto il substrato presente al di sotto del corpo diga è lo stesso che è presente sulla sponda sinistra al di sotto del cappellaccio di alterazione.

Sulla base della presenza della suddetta criticità geomorfologica sono state eseguite le verifiche di stabilità della porzione di versante suddetta al fine di controllare il livello di criticità della stessa.

Per i dettagli sulle verifiche di stabilità suddette, sui parametri geotecnici utilizzati per le suddette verifiche, sugli interventi di messa in sicurezza del versante e sul sistema di monitoraggio delle condizioni geomorfologiche si rimanda agli elaborati ET.07, ET.08, ET.08, ET.10, ET.11, ET.12 ed EG.49.

Per quanto riguarda le venute d'acqua rilevate durante le visite di vigilanza, lungo il versante della sponda sinistra, in fase di progettazione esecutiva, verranno eseguiti dei controlli sulla tubazione di monte così' da verificare eventuali perdite associate alla suddetta tubazione.

Sulle restanti sponde dell'invaso, non sono emerse, né in fase di rilievo geomorfologico né in fase di fotointerpretazione segni di instabilità associabili a corpi franosi quiescenti o attivi. Sono emerse invece segni di erosione superficiale estesi sia alla sponda di monte (Nord-Ovest) che alla sponda destra (Sud-Ovest) con locali evidenze di erosione incanalate per rivoli in prossimità delle zone di raccordo fra una sponda e l'altra (oltre che lungo il versante di valle della sponda destra). Sempre lungo la sponda destra e lungo la sponda di monte (Nord-Ovest) sono presenti alcune scarpate d'erosione prevalentemente concentrate lungo la sponda di monte.

Per i dettagli sugli aspetti geomorfologici di dettaglio derivanti dal rilievo geomorfologico e dalla fotointerpretazione e sui dettagli degli aspetti in profondità dei dissesti presenti lungo la sponda sinistra si rimanda agli elaborati GEO.03 e GEO.06.

5 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO E IDROGEOLOGIA DI DETTAGLIO

Il quadro geologico e geologico-tecnico descritto nei §§ 3.1 e 3.2 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. 14):

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

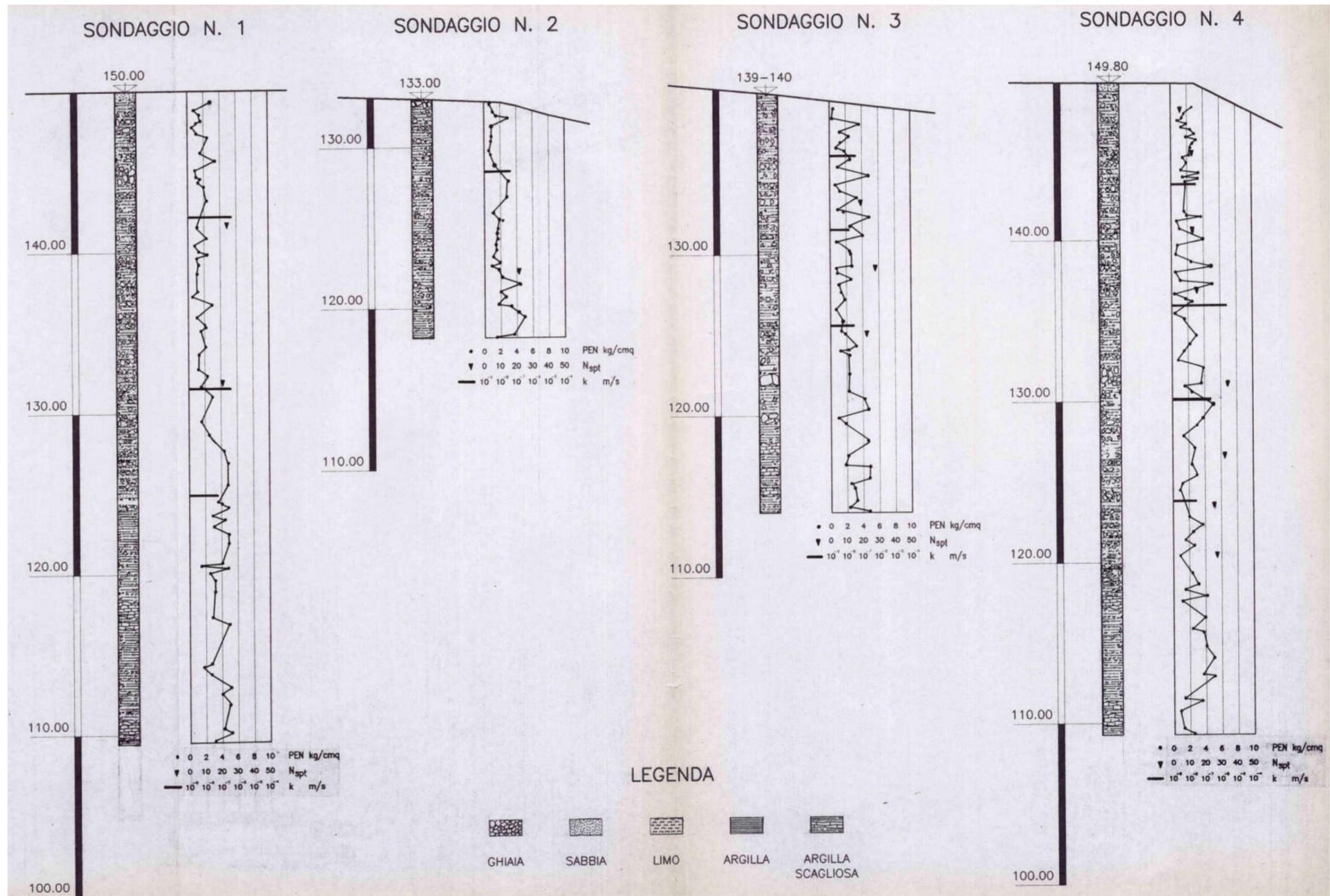


Fig. 14 Risultati delle prove di permeabilità realizzate lungo le verticali dei sondaggi eseguiti nella campagna del 1991

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

Per gli aspetti sismici, sismotettonici e per l'analisi di Risposta Sismica Locale (RSL) si rimanda all'elaborato ET04c.

7 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 §§ 3.1, 3.2, 4.1 e 4.2, 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 e dell'Ing. Giovanni Simonelli.

8 INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE

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.

Per i dettagli sulle singole indagini si rimanda agli allegati ET.04 dalla D alla N.

A partire dal 1991 sono state eseguite, nel sito di interesse, n.126 fra indagini geognostiche e geofisiche qui di seguito riassunte (Fig. 15):

- **Sondaggi geognostici:**
 - **Totale eseguiti 15:**
 - n.4 Sondaggi geognostici nel periodo 1991 – 1993;
 - n.5 Sondaggi geognostici nel 2007;
 - n.4 Sondaggi geognostici nel periodo 2012-2014;
 - n.2 Sondaggi geognostici nel periodo 2018-2019;
- **Sondaggi ambientali:**
 - **Totale eseguiti 19:**
 - n.7 Sondaggi ambientali nel periodo 2012-2014;
 - n.12 Sondaggi ambientali nel periodo 2018-2019;
- **Trincee e saggi esplorativi:**
 - **Totale eseguiti 57:**
 - n.20 Trincee esplorative nel periodo 1991 – 1993;
 - n.12 Saggi geognostici nel periodo 2012-2014;
 - n.22 Saggi geognostici nel periodo 2018-2019;
 - n.3 Saggi geognostici nel 2020

- **Prove penetrometriche (statiche e dinamiche):**
 - **Totale eseguiti 18:**
 - n.11 Prove penetrometriche CPT nel periodo 2012-2014;
 - n.7 Prove penetrometriche (CPT/DPSH) nel periodo 2018-2019;
- **Indagine sismica DownHole (DH):**
 - **Totale eseguiti 1:**
 - n.1 indagine sismica DownHole nel 2007;
- **Indagine sismica a rifrazione (SR)**
 - **Totale eseguiti 7:**
 - n.3 Indagine sismica a rifrazione nel 2007;
 - n.4 Indagine sismica a rifrazione nel periodo 2018-2019;
- **Indagine sismica MASW**
 - **Totale eseguiti 6:**
 - n.3 Indagine sismica a rifrazione nel 2007;
 - n.3 Indagine sismica a rifrazione nel periodo 2018-2019;
- **Indagine sismica passiva (HVSr)**
 - **Totale eseguiti 3:**
 - n.3 Indagine sismica passiva (HVSr) nel periodo 2018-2019;

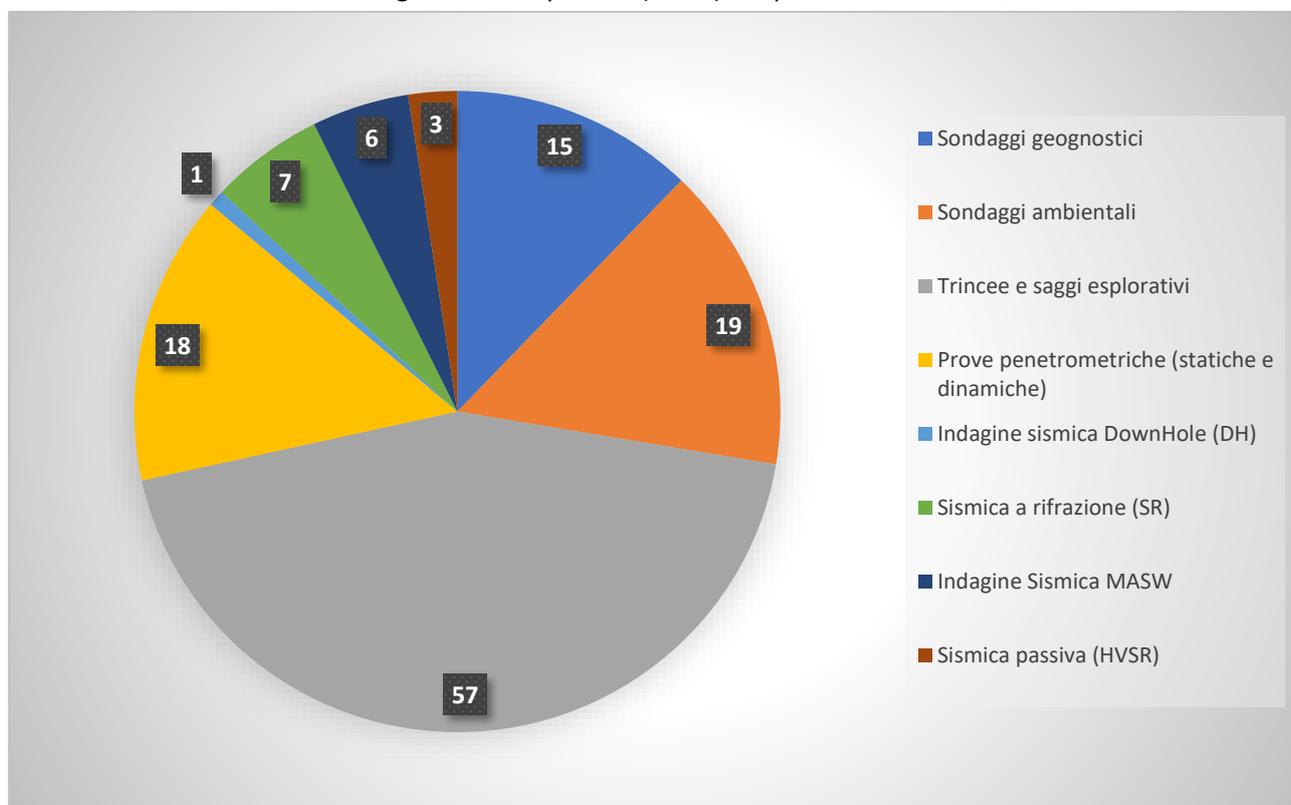


Fig. 15 – Grafico di distribuzione delle indagini geognostiche e geofisiche eseguite dal 1991 ad oggi divise per tipologia

Associate ad esse sono stati prelevati n. 131 campioni da sottoporre a prove geotecniche e analisi di laboratorio qui brevemente riassunte (Fig. 16):

- **Classificazione granulometrica:**
 - **Totale eseguiti 53:**
 - n.15 Campioni nel periodo 1991-1993;
 - n.4 Campioni nel 2007;
 - n.26 Campioni nel periodo 2012-2014
 - n.5 Campioni nel periodo 2018-2019
 - n.3 Campioni nel 2020
- **Contenuto d'acqua:**
 - **Totale eseguiti 60:**
 - n.15 Campioni nel periodo 1991-1993;
 - n.6 Campioni nel 2007;
 - n.25 Campioni nel periodo 2012-2014
 - n.11 Campioni nel periodo 2018-2019
 - n.3 Campioni nel 2020
- **Limiti di Atterberg:**
 - **Totale eseguiti 59:**
 - n.15 Campioni nel periodo 1991-1993;
 - n.4 Campioni nel 2007;
 - n.26 Campioni nel periodo 2012-2014
 - n.11 Campioni nel periodo 2018-2019
 - n.3 Campioni nel 2020
- **Pesi di Volume:**
 - **Totale eseguiti 55:**
 - n.9 Campioni nel periodo 1991-1993;
 - n.6 Campioni nel 2007;
 - n.26 Campioni nel periodo 2012-2014
 - n.11 Campioni nel periodo 2018-2019
 - n.3 Campioni nel 2020
- **Prove di taglio diretto:**
 - **Totale eseguiti 21:**
 - n.3 Campioni nel periodo 1991-1993;
 - n.4 Campioni nel 2007;
 - n.9 Campioni nel periodo 2012-2014
 - n.2 Campioni nel periodo 2018-2019
 - n.3 Campioni nel 2020
- **Prove triassiali:**
 - **Totale eseguiti 16:**
 - n.7 Campioni nel periodo 1991-1993;
 - n.1 Campioni nel 2007;
 - n.6 Campioni nel periodo 2012-2014
 - n.2 Campioni nel periodo 2018-2019

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello – Comune di Pistoia (PT)

ET.04A - Relazione geologica, geologico-tecnica sulle indagini e sismica – modifica a seguito dell'interlocuzione istruttoria del 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 – Divisione 4 Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori del 19/06/2020 e del parere del 27/07/2021 (registro ufficiale U.0015609)

- **Prova di espansione laterale libera:**
 - **Totale eseguiti 15:**
 - n.3 Campioni nel 2007;
 - n.6 Campioni nel periodo 2012-2014
 - n.6 Campioni nel periodo 2018-2019
- **Prova edometrica:**
 - **Totale eseguiti 6:**
 - n.2 Campioni nel periodo 1991-1993;
 - n.4 Campioni nel periodo 2018-2019
- **Analisi geochimiche di laboratorio:**
 - **Totale eseguiti 68:**
 - n.34 Campioni nel periodo 2012-2014
 - n.34 Campioni nel periodo 2018-2019

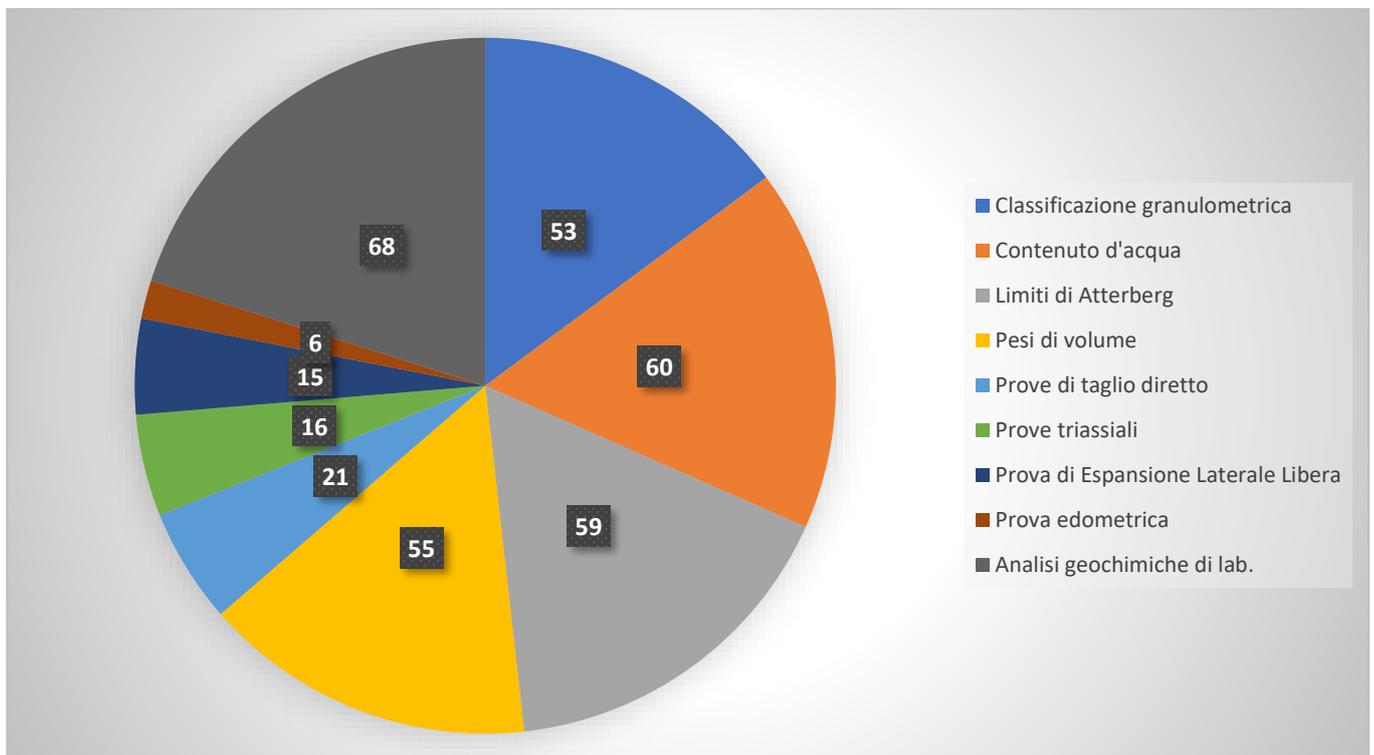


Fig. 16 - Grafico di distribuzione delle analisi geochimiche eseguite dal 1991 ad oggi divise per tipologia

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello – Comune di Pistoia (PT)

ET.04A - Relazione geologica, geologico-tecnica sulle indagini e sismica – modifica a seguito dell'interlocuzione istruttoria del 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 – Divisione 4 Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori del 19/06/2020 e del parere del 27/07/2021 (registro ufficiale U.0015609)

8.1 INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: SONDAGGI GEOGNOSTICI

Come riportato nel capitolo precedente, nel periodo 1991 – 2020 sono stati eseguiti n.15 sondaggi geognostici:

- **Sondaggi geognostici:**
 - **Totale eseguiti 15:**
 - n.4 Sondaggi geognostici nel periodo 1991 – 1993;
 - n.5 Sondaggi geognostici nel 2007;
 - n.4 Sondaggi geognostici nel periodo 2012-2013;
 - n.2 Sondaggi geognostici nel periodo 2018-2019;

I sondaggi sono stati eseguiti prevalentemente sul corpo diga (paramento di monte e di valle) e secondariamente sulla sponda destra (in prossimità dello scarico di superficie e nella zona di raccordo del corpo diga), sulla sponda di sinistra (nella zona di raccordo con il corpo diga) e sulla sponda di monte dell'invaso antropico.

Per i dettagli sui risultati delle indagini si rimanda all'allegato ET.04d e alle Tavv. GEO.10. e GEO.11 Qui di seguito si riporta una breve sintesi dei risultati (figg. dalla 17 alla 20).

		S1(1991)				S2(1991)				S3(1991)				S4(1991)	
		Geologia	Profondità			Geologia	Profondità			Geologia	Profondità			Geologia	Profondità
Coronamento paramento di valle	MD1		p.c. / -3,1	Base paramento di monte	MD1		p.c. / -3	Base paramento di monte	MD2		p.c. / -10	Coronamento paramento di valle	MD1		p.c. / -7
	MD2		-3,1/-12,6		MD2		-3 / -10		MD3		-10/-15		MD2		-7/-17,8
	MD3		-12,6/-27		Substrato		-13/-15		MD3		-10/-18		MD3		-17,8/-32
	Substrato		-27/-42						Substrato		-18/-26		Substrato		-32/-42

Fig. 17 – Schema sintentico delle stratigrafie dei sondaggi eseguiti nel 1991.

	S1(2007)			S2(2007)			S3(2007)			S4(2007)	
	Geologia	Profondità		Geologia	Profondità		Geologia	Profondità		Geologia	Profondità
Base del paramento di valle	Copertura	p.c. / -5,6	Sponda Ovest	Copertura	p.c. / -5	Sponda Ovest	Copertura	p.c. / -3	Sponda monte	Copertura	p.c. / -4,3
	Substrato	-5,6 / -30		Substrato	-5/-30		Substrato	-3/-20		Substrato	-4,3/-40

Fig. 18 - Schema sintentico delle stratigrafie dei sondaggi eseguiti nel 2007

		S1(2013)		S2(2013)		S3(2013)		S4(2013)			
		Geologia	Profondità	Geologia	Profondità	Geologia	Profondità	Geologia	Profondità		
Coronamento corpo diga	MD1	p.c. / -5	Coronamento corpo diga	MD1	p.c. / -8,6	Coronamento corpo diga	MD1	p.c. / -9,5	Coronamento corpo diga	MD1	p.c. / -11,2
	MD2	-5 / -21,7		MD2	-8,6/-22,5		MD2	-9,5/-26,7		MD2	-11,2/-26,5
	MD3	-21,7/-27,1		MD3	-22,5/-29		MD3	-26,7/-33,7		MD3	-26,5/-30
	Substrato	-27,10/-37		Substrato	-29/-40		Substrato	33,7/-37		Substrato	-30/-45

Fig. 19 - Schema sintentico delle stratigrafie dei sondaggi geognostici eseguiti nella campagna 2012 -2014

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello – Comune di Pistoia (PT)

ET.04A - Relazione geologica, geologico-tecnica sulle indagini e sismica – modifica a seguito dell'interlocuzione istruttoria del 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 – Divisione 4 Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori del 19/06/2020 e del parere del 27/07/2021 (registro ufficiale U.0015609)

	S17(2019)			S18(2019)	
	Geologia	Profondità		Geologia	Profondità
Sponda sinistra	Copertura	p.c. / -3,2	Sponda destra	Copertura	p.c. / -4,3
	Substrato	-3,2 / -20		Substrato	-4,3 / -18,5

Fig. 20 - Schema sintentico delle stratigrafie dei sondaggi geognostici eseguiti nella campagna 2018 - 2019

I sondaggi geognostici eseguiti nel corpo diga hanno mostrato un assetto geologico descritto nel capitolo 3.2 a cui si rimanda per i dettagli. Qui di seguito si riporta una breve descrizione geologico-tecnica:

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 basale 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.

Da nessun sondaggio geognostico, eseguito nel corpo diga, sono emersi dettagli inerenti alla potenziale superficie di scivolamento del movimento franoso occorso sul paramento di monte.

Al di sotto del corpo diga è presente il substrato geologico caratterizzato dal seguente pattern litologico:

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

In particolare, per quanto riguarda il substrato geologico i sondaggi eseguiti sulle sponde dell'invaso e alla base del paramento di valle hanno mostrato il seguente schema litostratigrafico.

Da un punto di vista geologico tutti i sondaggi hanno mostrato la presenza di un substrato con grado di alterazione crescente con la profondità sormontato 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.

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

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello – Comune di Pistoia (PT)

ET.04A - Relazione geologica, geologico-tecnica sulle indagini e sismica – modifica a seguito dell'interlocuzione istruttoria del 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 – Divisione 4 Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori del 19/06/2020 e del parere del 27/07/2021 (registro ufficiale U.0015609)

- **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.)

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		

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	-

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.

- **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.)

Tab. 4 – Sintesi delle prove SPT e di permeabilità eseguite lungo i sondaggi dal 1991 al 2019: in alto a sinistra i risultati delle prove eseguite nel 1991: In alto al centro e a destra i risultati delle prove eseguiti nel period 2012-2014 per I sondaggi S1, S2, S3 e S4. In basso a sinistra i risultati delle prove eseguite nel period 2018-2019.

8.2 INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: PROVE GEOTECNICHE DI LABORATORIO

Lungo le verticali dei sondaggi e dei saggi geognostici descritti nel capitolo precedente e nelle Tavv.GEO.10, GEO.11 e GEO.18 sono stati prelevati n. 131 campioni da sottoporre a prove geotecniche e analisi di laboratorio:

- **Classificazione granulometrica:**
 - **Totale eseguiti 53:**
 - n.15 Campioni nel periodo 1991-1993;
 - n.4 Campioni nel 2007;
 - n.26 Campioni nel periodo 2012-2014
 - n.5 Campioni nel periodo 2018-2019
 - n.3 Campioni nel 2020
- **Contenuto d'acqua:**
 - **Totale eseguiti 60:**
 - n.15 Campioni nel periodo 1991-1993;
 - n.6 Campioni nel 2007;
 - n.25 Campioni nel periodo 2012-2014
 - n.11 Campioni nel periodo 2018-2019
 - n.3 Campioni nel 2020
- **Limiti di Atterberg:**
 - **Totale eseguiti 59:**
 - n.15 Campioni nel periodo 1991-1993;
 - n.4 Campioni nel 2007;
 - n.26 Campioni nel periodo 2012-2014
 - n.11 Campioni nel periodo 2018-2019
 - n.3 Campioni nel 2020
- **Pesi di Volume:**
 - **Totale eseguiti 55:**
 - n.9 Campioni nel periodo 1991-1993;
 - n.6 Campioni nel 2007;
 - n.26 Campioni nel periodo 2012-2014
 - n.11 Campioni nel periodo 2018-2019
 - n.3 Campioni nel 2020
- **Prove di taglio diretto:**
 - **Totale eseguiti 21:**
 - n.3 Campioni nel periodo 1991-1993;
 - n.4 Campioni nel 2007;
 - n.9 Campioni nel periodo 2012-2014
 - n.2 Campioni nel periodo 2018-2019
 - n.3 Campioni nel 2020
- **Prove triassiali:**
 - **Totale eseguiti 16:**
 - n.7 Campioni nel periodo 1991-1993;
 - n.1 Campioni nel 2007;
 - n.6 Campioni nel periodo 2012-2014
 - n.2 Campioni nel periodo 2018-2019

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello – Comune di Pistoia (PT)

ET.04A - Relazione geologica, geologico-tecnica sulle indagini e sismica – modifica a seguito dell'interlocuzione istruttoria del 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 – Divisione 4 Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori del 19/06/2020 e del parere del 27/07/2021 (registro ufficiale U.0015609)

- **Prova di espansione laterale libera:**
 - **Totale eseguiti 15:**
 - n.3 Campioni nel 2007;
 - n.6 Campioni nel periodo 2012-2014
 - n.6 Campioni nel periodo 2018-2019
- **Prova edometrica:**
 - **Totale eseguiti 6:**
 - n.2 Campioni nel periodo 1991-1993;
 - n.4 Campioni nel periodo 2018-2019
- **Analisi geochimiche di laboratorio:**
 - **Totale eseguiti 68:**
 - n.34 Campioni nel periodo 2012-2014
 - n.34 Campioni nel periodo 2018-2019

Per i dettagli sui certificati delle indagini geotecniche di laboratorio si rimanda all'elaborato ET.04f. Qui di seguito si riportano le sintesi dei risultati (Tabb. dalla 5 alla 7).

Tali risultati hanno permesso, insieme alle altre indagini di carattere geotecnico e geofisico descritte nel capitolo 8 del presente elaborato e nei suoi sotto capitoli, di ricostruire il modello geologico-tecnico di dettaglio descritto nel capitolo 3.2 e il modello geomorfologico di dettaglio descritto nel capitolo 4.2 a cui si rimanda per i dettagli.

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello – Comune di Pistoia (PT)

ET.04A - Relazione geologica, geologico-tecnica sulle indagini e sismica – modifica a seguito dell'interlocuzione istruttoria del 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 – Divisione 4 Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori del 19/06/2020 e del parere del 27/07/2021 (registro ufficiale U.0015609)

ID Campione	Profondità	Contenuto d'acqua (WN)	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	
	m da p.c.	%	%	%	%	kN/mc	kN/mc	kN/mc	%	kg/cmq	Kpa	°	Kpa	°		Mpa	Mpa	Mpa	%	%	%	%	
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

ID Campione	Profondità	Contenuto d'acqua (WN)	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	
	m da p.c.	%	%	%	%	kN/mc	kN/mc	kN/mc	%	kg/cmq	Kpa	°	Kpa	°		Mpa	Mpa	Mpa	%	%	%	%	
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 ghiaiosa
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 ghiaiosa
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 ghiaiosa
S3C1 (2007)	-3,6 / -4		37	19	18														4	18	42	36	Limo con argilla sabbiosa
S3C2 (2007)	-11,3 / - 11,7	10				19	21	28,67	29,1														Limo argilloso

Tab. 5 - Tabella riassuntiva dei risultati delle prove geotecniche di laboratorio eseguite sui campioni prelevati dai sondaggi del 1991 (in alto) e del 2007 (in basso).

S8C1 (2012)	-1		36	23	13			26,32										45,5	32,4	12,8	9,3	Ghiaia con sabbia deb limosa/argillosa
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	7	23						5,45	9,05	52,46	33,04	
S1C2(2013)	-15	17,8	35	22	13		20,79			73	22	20,4						8,09	15,94	55,85	20,12	
S1C3(2013)	-22,5	13,05	37	21	16		20,3			33	8	22						16,62	12,88	49,13	21,37	
S1C4(2013)	-25,5	8,04	33	20	13		23,63				0	23,9						25,74	23,13	29,73	21,4	
S2C1(2013)	-9	12,07	33	21	12		21,48			77	18	27,7						10,56	13,88	51,68	23,88	
S2C2(2013)	-15	18,82	37	22	15		20,79			92	0	30						17,1	26,49	32,5	23,91	
S2C3(2013)	-22	20,81	35	21	14		20,69			78	0	29,4						14,14	6,87	55,26	23,73	
S2C4(2013)	-25,5	16,08	31	18	13		21,28				7	24,9						15,76	28,03	38,27	17,94	
S3C1(2013)	-9	18,4	36	23	13		21,09			74	24	21,6						16,71	24,18	33,29	25,82	
S3C2(2013)	-15	17,92	36	23	13		19,42			34	20	20,9						9,69	22,49	50,27	17,55	
S3C3(2013)	-22,5	19,67	41	22	19		20,5			37	29	26,2						16,59	21,99	37	24,42	
S3C4(2013)	-25,5	20,81	46	25	21		20,5				7	23,6						9,29	16,37	44,08	30,26	
S4C7(2014)	-34		33	20	13						22	24,4						20,48	20,85	48,67	10	
S4C8(2014)	-35	10,29	30	18	12		22,36			69	7	29,9						38,69	14,07	30,76	16,48	
S4C9(2014)	-40,5	10,94	33	20	13		22,95			85	38	20						4,83	29,97	43,35	21,85	

ID Campione	Profondità	Contenuto d'acqua (WN)	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
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											
S17C6(2019)	-15	6,09	33	18	15		21,4	20,2											44,3	28,3	16,7	10,7
S18C1(2019)	-3,2	13,28	33	21	12		20,5	18,1			84,6											
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. 6 - Tabella riassuntiva dei risultati delle prove geotecniche di laboratorio eseguite sui campioni prelevati dai sondaggi delle campagne di indagine 2012-2014 (in alto) e 2018-2019 (in basso)

CAMPIONE	P1
Profondità metri	2.0 - 2.5
Limiti di Atterberg	
Umidità naturale (%)	4.92
Limite liquido (%)	40
Limite plastico (%)	21
Indice di plasticità (%)	19
Indice di consistenza	1.85
Indice di attività	0.79
Classificaz. Casagrande	CL
Limite di Ritiro	
Limite di ritiro (%)	14.1
Coefficiente di ritiro	1.95
Granulometria	
Ghiaia (%)	16.2
Sabbia (%)	41.9
Limo (%)	27.6
Argilla (%)	14.3
Classificazione UNI 10006	
Gruppo	A6
Indice di gruppo	4
Parametri fisici	
Peso volume naturale (kN/m ³)	18.2
Peso volume secco (kN/m ³)	17.0
Prova di taglio diretto	
Coesione di picco, C' (kPa)	9.4
Angolo di resistenza al taglio di picco, ϕ' (°)	24.4
Coesione residua, C' (kPa)	0
Angolo di resistenza al taglio residuo, ϕ' (°)	16.3

CAMPIONE	P2
Profondità metri	2.0 - 2.3
Limiti di Atterberg	
Umidità naturale (%)	7.12
Limite liquido (%)	39
Limite plastico (%)	20
Indice di plasticità (%)	19
Indice di consistenza	1.68
Indice di attività	1.01
Classificaz. Casagrande	CL
Limite di Ritiro	
Limite di ritiro (%)	13.6
Coefficiente di ritiro	1.95
Granulometria	
Ghiaia (%)	5.7
Sabbia (%)	39.7
Limo (%)	39.6
Argilla (%)	15.0
Classificazione UNI 10006	
Gruppo	A6
Indice di gruppo	8
Parametri fisici	
Peso volume naturale (kN/m ³)	18.3
Peso volume secco (kN/m ³)	17.1
Prova di taglio diretto	
Coesione di picco, C' (kPa)	8.6
Angolo di resistenza al taglio di picco, ϕ' (°)	24.2
Coesione residua, C' (kPa)	5.7
Angolo di resistenza al taglio residuo, ϕ' (°)	14.3

CAMPIONE	P3
Profondità metri	2.0 - 2.5
Limiti di Atterberg	
Umidità naturale (%)	1.68
Limite liquido (%)	42
Limite plastico (%)	21
Indice di plasticità (%)	21
Indice di consistenza	1.92
Indice di attività	1.04
Classificaz. Casagrande	CL
Limite di Ritiro	
Limite di ritiro (%)	14.3
Coefficiente di ritiro	1.94
Granulometria	
Ghiaia (%)	4.8
Sabbia (%)	40.6
Limo (%)	38.5
Argilla (%)	16.0
Classificazione UNI 10006	
Gruppo	A7-6
Indice di gruppo	9
Parametri fisici	
Peso volume naturale (kN/m ³)	18.3
Peso volume secco (kN/m ³)	16.8
Prova di taglio diretto	
Coesione di picco, C' (kPa)	9.3
Angolo di resistenza al taglio di picco, ϕ' (°)	22.7
Coesione residua, C' (kPa)	0.2
Angolo di resistenza al taglio residuo, ϕ' (°)	14.6

Tab. 7– Risultati delle prove geotecniche di laboratorio eseguite sui campioni prelevati dai saggi del 2020

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello – Comune di Pistoia (PT)

ET.04A - Relazione geologica, geologico-tecnica sulle indagini e sismica – modifica a seguito dell'interlocuzione istruttoria del 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 – Divisione 4 Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori del 19/06/2020 e del parere del 27/07/2021 (registro ufficiale U.0015609)

8.3 INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: PROVE PENETROMETRICHE (STATICHE E DINAMICHE)

Nel periodo 1991 – 2020 sono stati eseguiti n.18 prove penetrometriche (statiche e dinamiche):

- **Prove penetrometriche (statiche e dinamiche):**
 - **Totale eseguiti 18:**
 - n.11 Prove penetrometriche CPT nel periodo 2012-2014;
 - n.7 Prove penetrometriche (CPT/DPSH) nel periodo 2018-2019;

Le prove sono state eseguite prevalentemente sul corpo diga e secondariamente sulla sponda sinistra dell'invaso antropico.

Le prove effettuate sulla sponda sinistra hanno messo in evidenza, nel caso delle prove P6, PD5 e PD1 eseguite nel periodo 2018-2019 la presenza di un terreno allentato superficiale poggiante su un substrato alterato (cappellaccio) a sua volta poggiante sul substrato geologico con basso grado di alterazione decrescente con la profondità. Per i dettagli dell'assetto litologico della sponda sinistra si rimanda al § 3.2 e all'elaborato GEO.06. Anche le prove eseguite sul corpo diga hanno confermato l'assetto litostratigrafico riportato nel capitolo 3.2 a cui si rimanda per i dettagli. Nelle prove eseguite sul paramento di monte e sul coronamento del corpo diga **non sono emersi dettagli inerenti alla potenziale superficie di scivolamento del movimento franoso occorso sul paramento di monte**

Per i dettagli sui risultati delle indagini suddette si rimanda all'elaborato ET.04e. Per la loro ubicazione geografica si rimanda alle Tavv. GEO.10 e GEO.12.

8.4 INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: SONDAGGI AMBIENTALI E ANALISI GEOCHIMICHE DI LABORATORIO

Nel periodo 2012 – 2019 sono stati eseguiti n.19 sondaggi ambientali e sono stati prelevati n.68 campioni da sottoporre ad analisi geochimiche di laboratorio (campioni prelevati dai suddetti sondaggi e da saggi geognostici)

- **Sondaggi ambientali:**
 - **Totale eseguiti 19:**
 - n.7 Sondaggi ambientali nel periodo 2012-2014;
 - n.12 Sondaggi ambientali nel periodo 2018-2019;
- **Analisi geochimiche di laboratorio:**
 - **Totale eseguiti 68:**
 - n.34 Campioni nel periodo 2012-2014
 - n.34 Campioni nel periodo 2018-2019

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 Tabella 8.

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello – Comune di Pistoia (PT)

ET.04A - Relazione geologica, geologico-tecnica sulle indagini e sismica – modifica a seguito dell'interlocuzione istruttoria del 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 – Divisione 4 Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori del 19/06/2020 e del parere del 27/07/2021 (registro ufficiale U.0015609)

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

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. 8 - Tabella dei campioni che hanno mostrato valori degli analiti superiori ai limiti di legge. In alto, campioni prelevati nella campagna di indagine 2013) In basso, campioni prelevati nella campagna di indagine 2018: in rosso il campione che ha mostrato valori superiori al limite di legge nel test di cessione

Qui di seguito si riporta la distribuzione spaziale dei campioni con valori di cromo VI (Cr VI) oltre i limiti di legge (Fig. 21).

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello – Comune di Pistoia (PT)

ET.04A - Relazione geologica, geologico-tecnica sulle indagini e sismica – modifica a seguito dell'interlocuzione istruttoria del 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 – Divisione 4 Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori del 19/06/2020 e del parere del 27/07/2021 (registro ufficiale U.0015609)

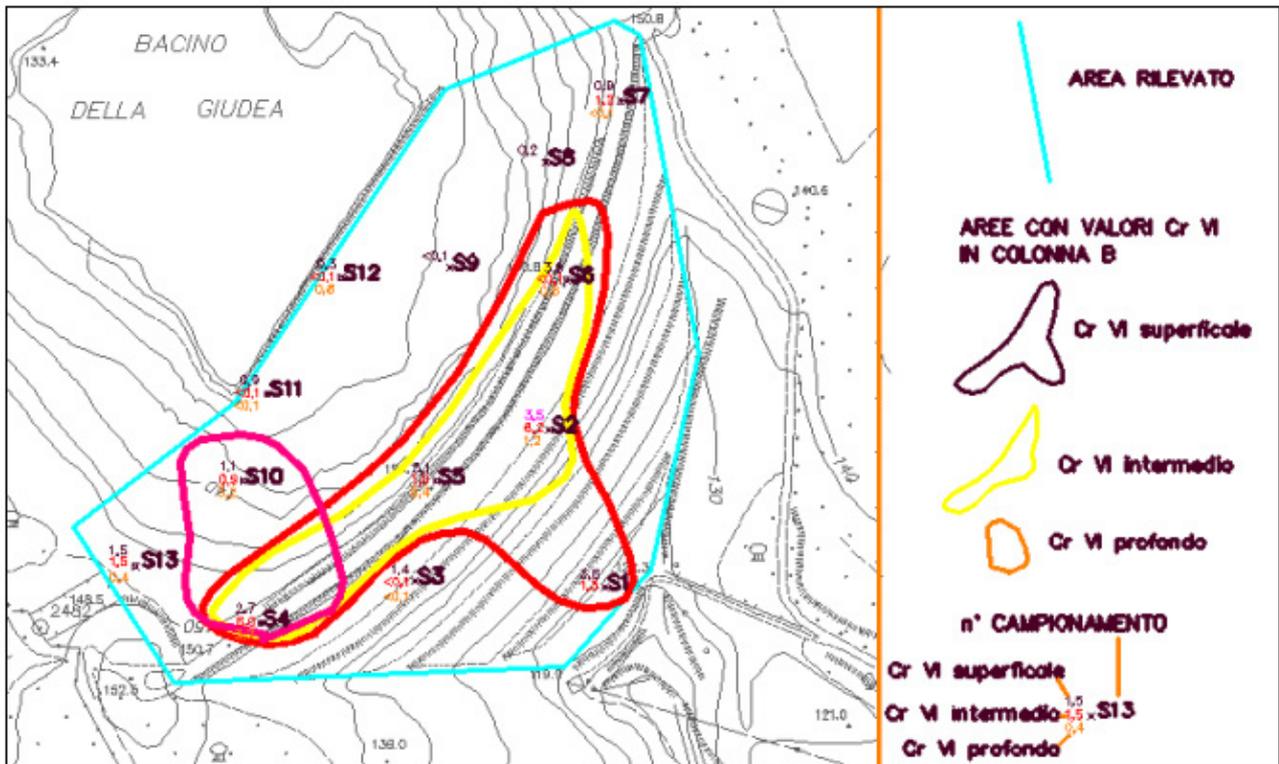


Fig. 21 – Distribuzione spaziale dei campioni con valori di cromo VI (Cr VI) oltre i limiti di legge

Preme sottolineare che nel corpo diga non è stato riscontrato alcun acquifero significativo. Per i dettagli sulle risultanze delle indagini suddette si rimanda all'elaborato ET.04m. Per la loro ubicazione geografica si rimanda alle Tavv. GEO.10, GEO.17 e GEO.18.

8.5 INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: SISMICA PASSIVA

Nella campagna di indagine 2019 sono stati eseguite n.3 indagini di sismica passiva (HVSr):

- **Indagine sismica passiva (HVSr)**
 - **Totale eseguiti 3:**
 - n.3 Indagine sismica passiva (HVSr) nel periodo 2018-2019;

Le prove sono state eseguite sul paramento di monte del corpo diga (2) e sulla sponda sinistra dell'invaso antropico (1).

Le prove hanno avuto una durata cadauna di circa 30 min e una frequenza di campionamento di 128 Hz.

PARAMETRI CONFIGURAZIONALI INDAGINE HVSr					
Denominazione	Coordinate Gauss Boaga			Durata acquisizione	Frequenza di campionamento
HVSr 1	1651239.0	4869170.8	136.8	30 min	128 Hz
HVSr 2	1651261.4	4869222.1	137.6	30 min	128 Hz
HVSr 3	1651230.6	4869344.8	142.8	30 min	128 Hz

Il confronto tra le tre misure HVSR evidenzia come le tre verticali di misura presentino curve H/V siano confrontabili con l'individuazione di un picco diffuso del rapporto H/V a frequenze comprese tra di 2 e 5 Hz circa (HVSR2 e HVSR3) e tra di 2 e 8 Hz circa (HVSR1) con massimo pari a circa 2.5 (HVSR2 e HVSR3) e 4 (HVSR1), imputabile a un contrasto di impedenza presente a qualche decina di metri di profondità (tra 20 e 30 m). Tale contrasto corrisponderebbe al passaggio fra copertura superficiale e bedrock sismico.

Nella figura sottostante è riportato il confronto tra le curve H/V sperimentali relative alle due misure eseguite.

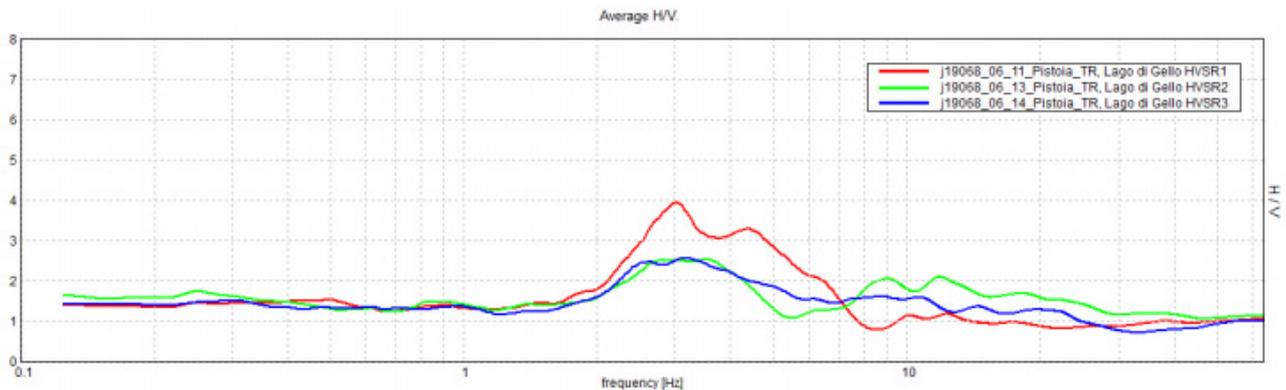


Fig. 22 – Grafico H/V – Frequenza per le tre prove HVSR eseguiti nel 2019

Per le risultanze, in dettaglio, delle indagini suddette si rimanda all'elaborato ET.04g. Per l'ubicazione delle indagini suddette si rimanda alle Tavv. GEO.10 e GEO.13.

8.6 INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: PROVE SISMICHE IN FORO (DOWNHOLE – DH)

Nella campagna di indagine 2007 è stata eseguita un'indagine sismica in foro tipo DownHole (DH):

- **Indagine sismica DownHole (DH):**
 - **Totale eseguiti 1:**
 - n.1 indagine sismica DownHole nel 2007;

La prova sismica in foro, tipo Down-Hole (DH) è stata eseguita nel sondaggio S1 (realizzato anch'esso nel 2007) 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. 23).

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello – Comune di Pistoia (PT)

ET.04A - Relazione geologica, geologico-tecnica sulle indagini e sismica – modifica a seguito dell'interlocuzione istruttoria del 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 – Divisione 4 Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori del 19/06/2020 e del parere del 27/07/2021 (registro ufficiale U.0015609)

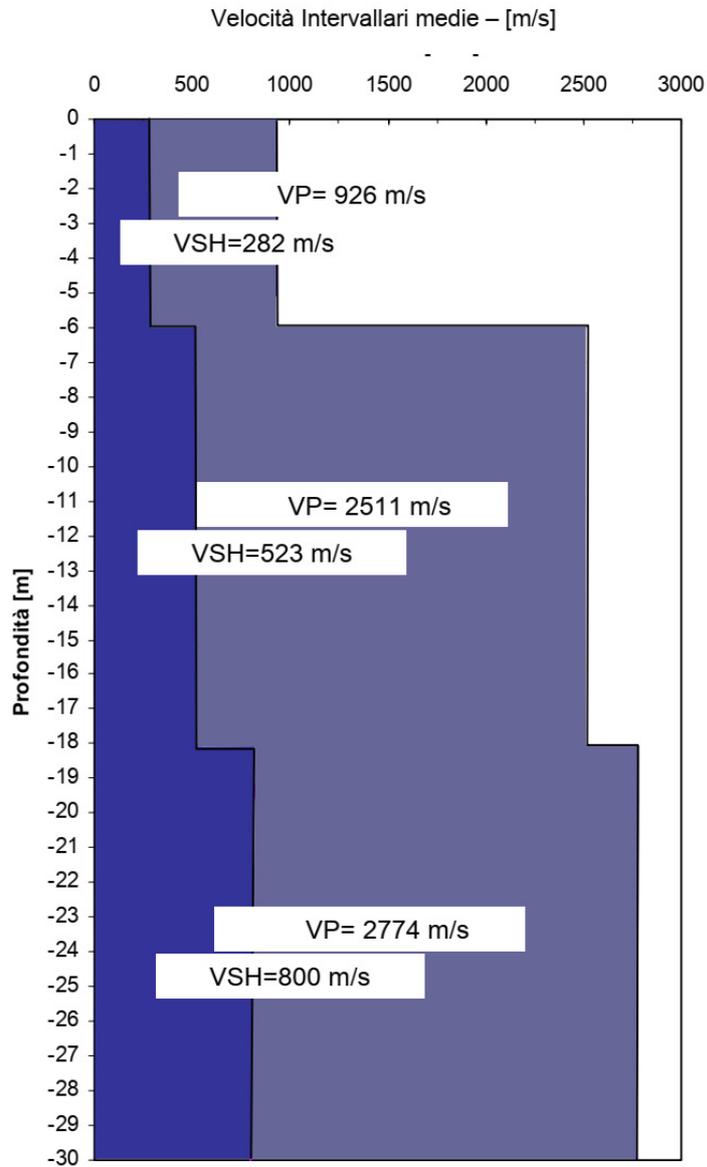


Fig. 23 – Risultato della prova sismica DownHole del 2007

Per le risultanze, in dettaglio, dell'indagine suddetta si rimanda all'elaborato ET.04h. Per l'ubicazione delle indagini suddette si rimanda alle Tavv. GEO.10 e GEO.14.

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello – Comune di Pistoia (PT)

ET.04A - Relazione geologica, geologico-tecnica sulle indagini e sismica – modifica a seguito dell'interlocuzione istruttoria del 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 – Divisione 4 Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori del 19/06/2020 e del parere del 27/07/2021 (registro ufficiale U.0015609)

8.7 INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE (SR)

Dal 2007 al 2019 sono state eseguite n.7 indagini sismiche a rifrazione:

- **Indagine sismica a rifrazione (SR)**
 - **Totale eseguiti 7:**
 - n.3 Indagine sismica a rifrazione nel 2007;
 - n.4 Indagine sismica a rifrazione nel periodo 2018-2019;

Tali indagini sono state eseguite lungo lo scarico di superficie (2007), lungo il paramento di monte del corpo diga e lungo la sponda sinistra dell'invaso antropico (2019).

Le sezioni lungo lo scarico superficiale (Fig. 24) individuano uno spessore di terreno ad omogenee caratteristiche geofisiche, che in base al risultato delle indagini geognostiche attribuiamo costituito da una coltre detritica di origine eluvio colluviale posta a profondità variabili e comprese da poche decine di centimetri a qualche metro (vedi tabelle allegate all'interpretazione di ciascun stendimento). A maggiori profondità vi è un livello, con caratteristiche geofisiche migliori, che si interpone tra i materiali di copertura e il substrato, prevalentemente argillitico.

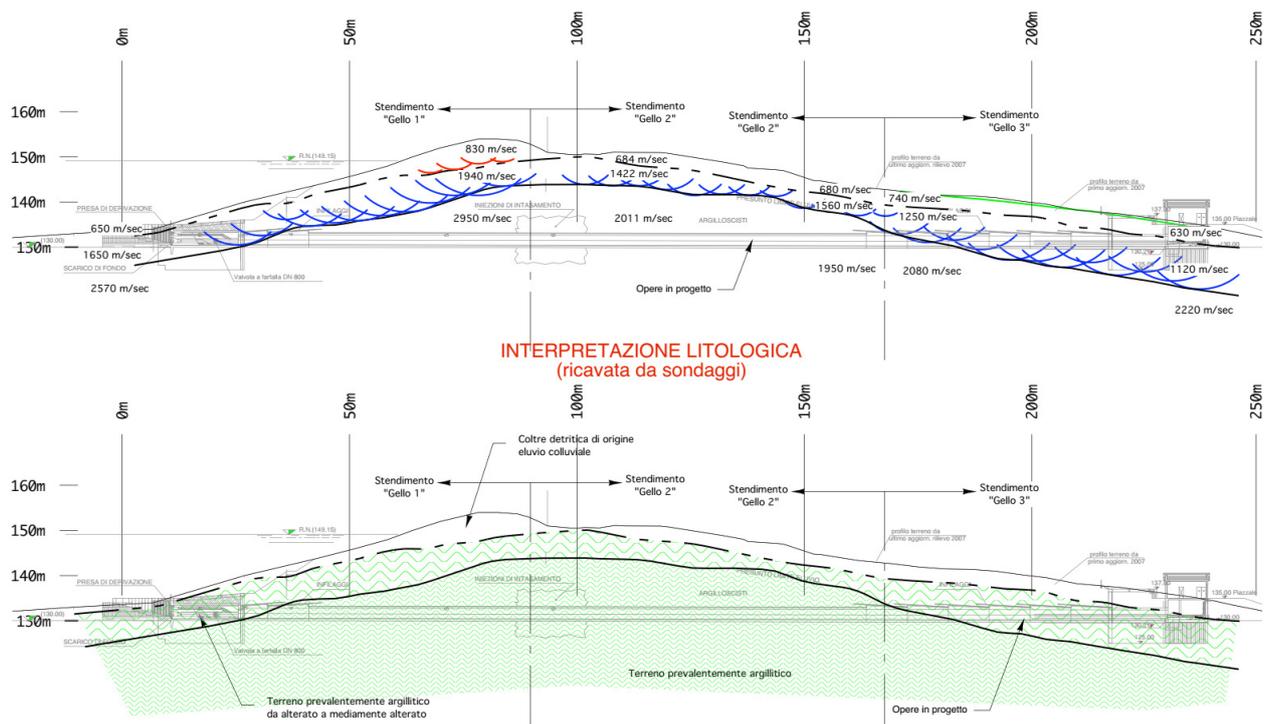


Fig. 24 - Risultato dell'indagine sismica a rifrazione onde P eseguita nel 2007 lungo la sponda destra dell'invaso e lungo il versante SO della dorsale morfologica sulla cui sommità è posto il bacino antropico della Giudea

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello – Comune di Pistoia (PT)

ET.04A - Relazione geologica, geologico-tecnica sulle indagini e sismica – modifica a seguito dell'interlocuzione istruttoria del 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 – Divisione 4 Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori del 19/06/2020 e del parere del 27/07/2021 (registro ufficiale U.0015609)

Gli stendimenti di sismica a rifrazione effettuati nel 2019 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.

Per quanto riguarda il corpo diga, prendendo a riferimento i valori medi di velocità delle onde S (Vs) risultati anche dalle altre indagini geofisiche realizzate sul corpo diga (vedi §§ 8.6 e 8.8) si osserva quanto segue:

- 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 superiore a 530 m/sec

Possiamo evidenziare, per quanto riguarda l'area del corpo diga la distinzione fra macrodomini e fra corpo diga e substrato (Fig. 25). **Non sono emersi dettagli inerenti alla potenziale superficie di scivolamento del movimento franoso occorso sul paramento di monte.**

Per quanto riguarda invece gli stendimenti lungo la sponda sinistra è possibile distinguere fra copertura e substrato ed evidenziare la presenza di un orizzonte superficiale allentato associabile all'orizzonte interessato dal movimento franoso del 1990 (Fig. 26).

Per le risultanze, in dettaglio, dell'indagine suddetta si rimanda all'elaborato ET.04i. Per l'ubicazione delle indagini suddette si rimanda alle Tavv. GEO.10 e GEO.15.

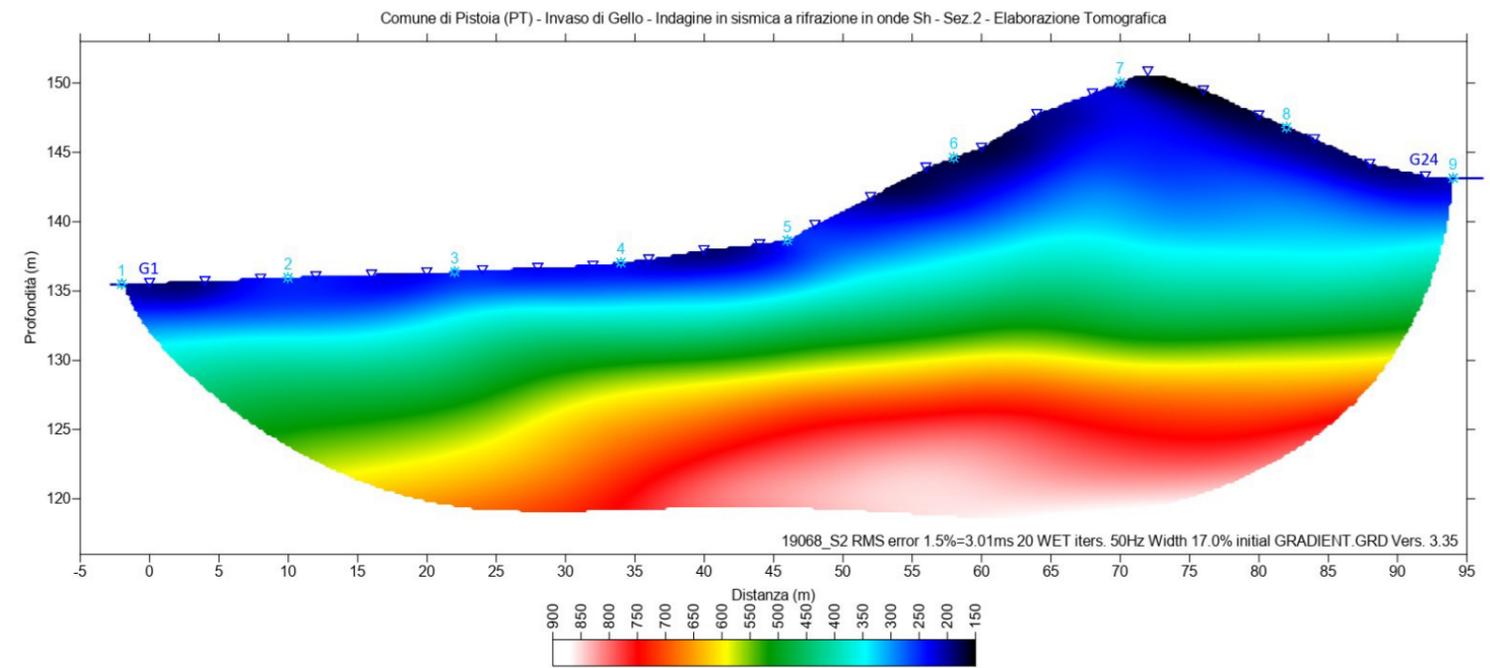
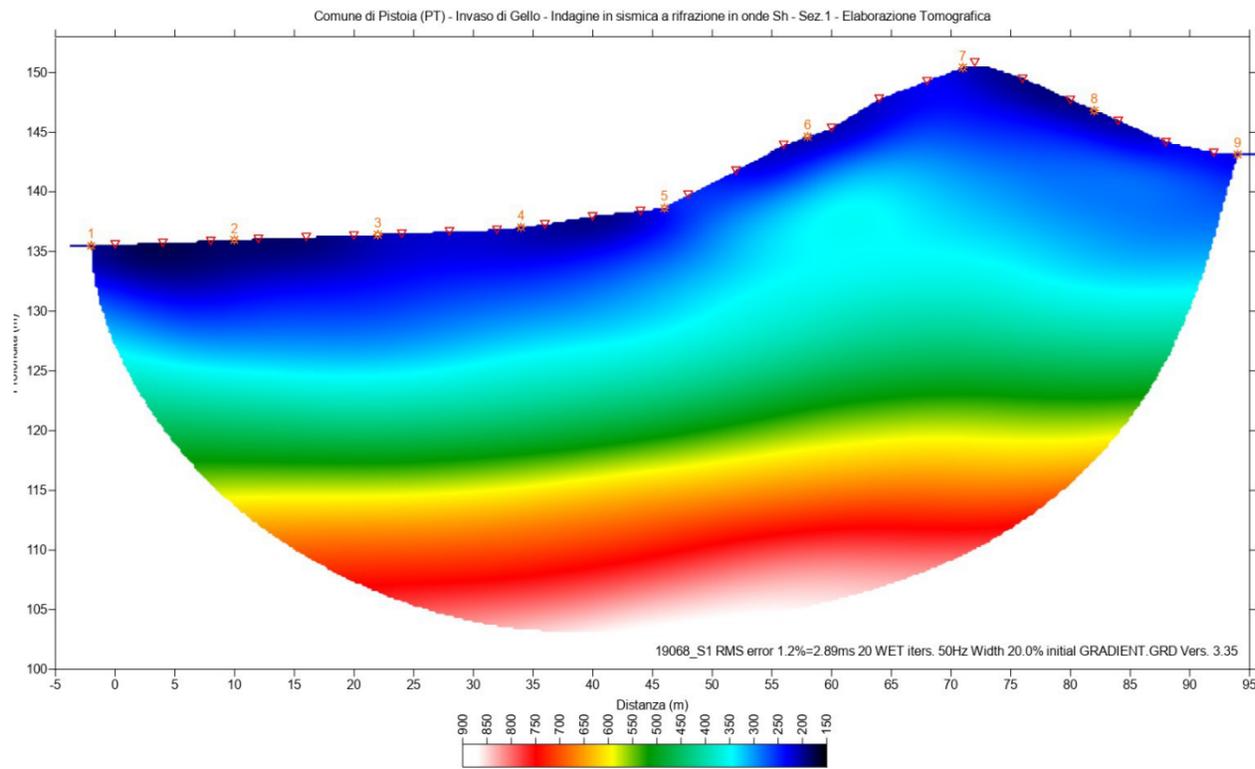


Fig. 25– Tomografie trasversali del corpo diga derivanti dalle indagini sismiche a rifrazione del 2019. Il corpo diga presenta una velocità delle onde sismiche S (V_s) inferiore a 500 m/sec

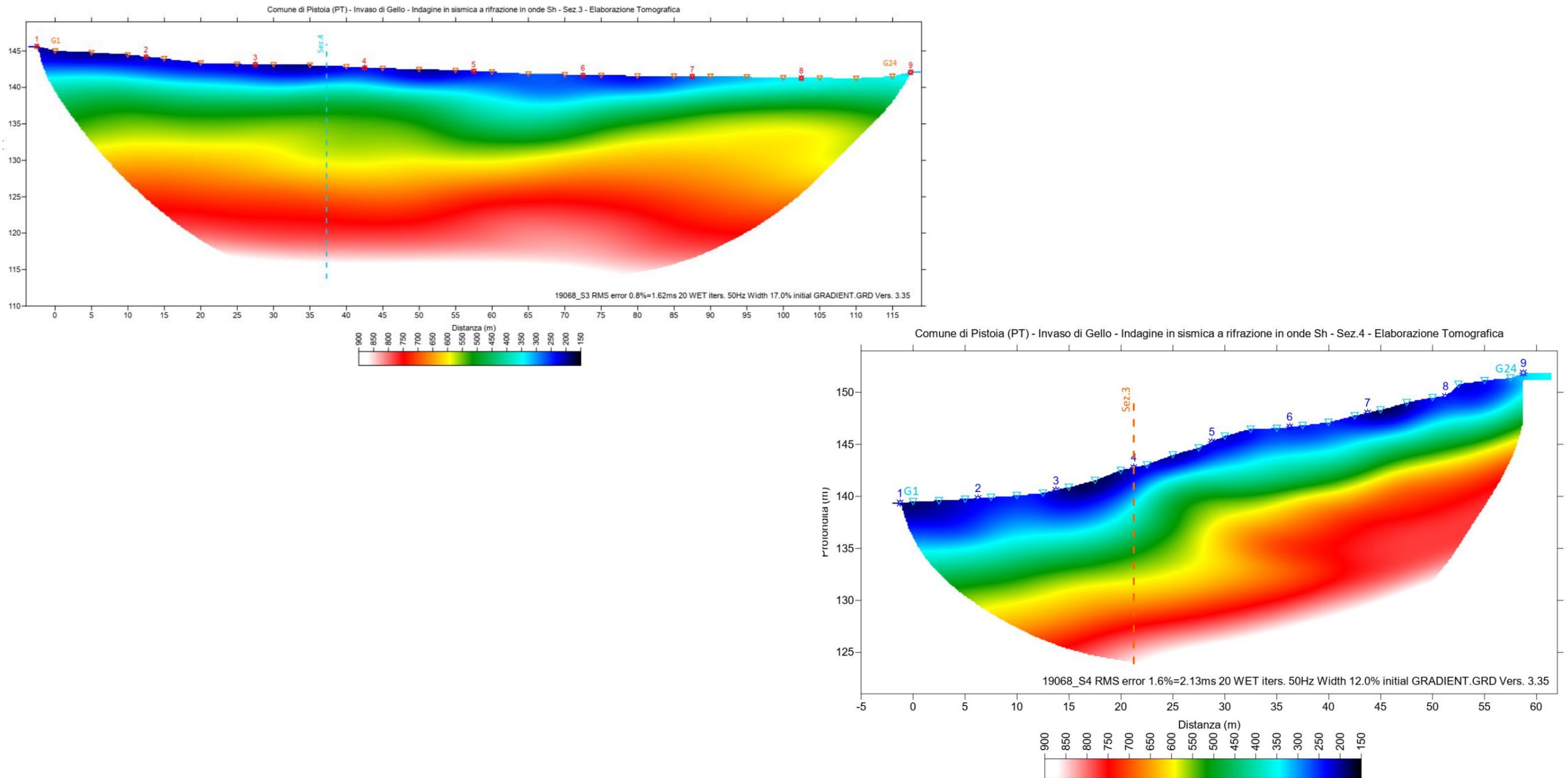


Fig. 26 - Tomografie lungo la sponda sinistra dell'invaso derivanti dalle indagini sismiche a rifrazione del 2019. Il corpo diga presenta una velocità delle onde sismiche S (V_s) inferiore a 500 m/sec

8.8 INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: INDAGINI SISMICHE MASW

Dal 2007 al 2019 sono state eseguite n.6 indagini sismiche a rifrazione:

- **Indagine sismica MASW**

- **Totale eseguiti 6:**

- n.3 Indagine sismica a rifrazione nel 2007;
 - n.3 Indagine sismica a rifrazione nel periodo 2018-2019;

Le indagini sono state eseguite lungo il corpo diga (paramento di monte e di valle) e lungo la sponda sinistra dell'invaso antropico.

Le indagini sismiche tipo MASW, realizzate lungo il paramento di valle del corpo diga hanno mostrato la presenza di una stratificazione interna al corpo diga (vedi § 3.2) 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 (V_s) intorno ad un valore medio di 200 m/sec. Il macrodominio 2 del corpo diga (MD2) mostra una velocità delle onde sismiche S (V_s) intorno ad un valore medio di 270 m/sec. Il macrodominio 3 del corpo diga (MD3) mostra una velocità delle onde sismiche S (V_s) intorno ad un valore medio di 370 m/sec. Il substrato mostra una velocità delle onde sismiche S (V_s) intorno ad un valore medio superior a 530 m/sec (Fig. 27).

Lungo il paramento di monte tale divisione è meno evidente mentre si osserva nitidamente il passaggio fra corpo di diga e substrato alterato e fra substrato alterato e bedrock sismico.

La prova eseguita sulla sponda sinistra mostra invece il passaggio fra copertura e substrato alterato con rilevamento dell'orizzonte superficiale associabile al corpo franoso del 1990 e fra substrato alterato e bedrock sismico (Fig. 28).

Per le risultanze, in dettaglio, dell'indagine suddetta si rimanda all'elaborato ET.04I. Per l'ubicazione delle indagini suddette si rimanda alle Tavv. GEO.10 e GEO.16.

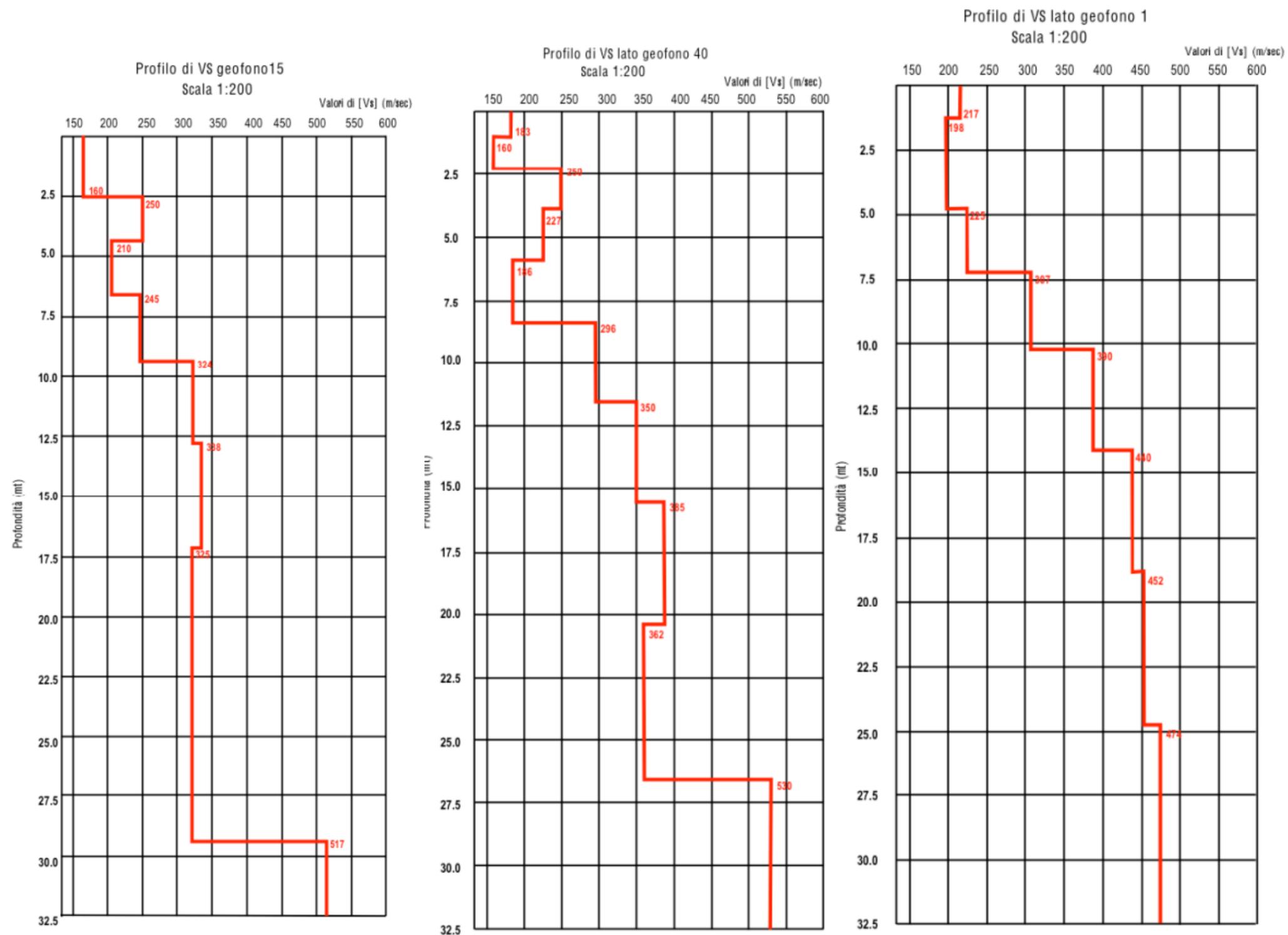


Fig. 27 – Risultati indagine sismica MASW del 2007

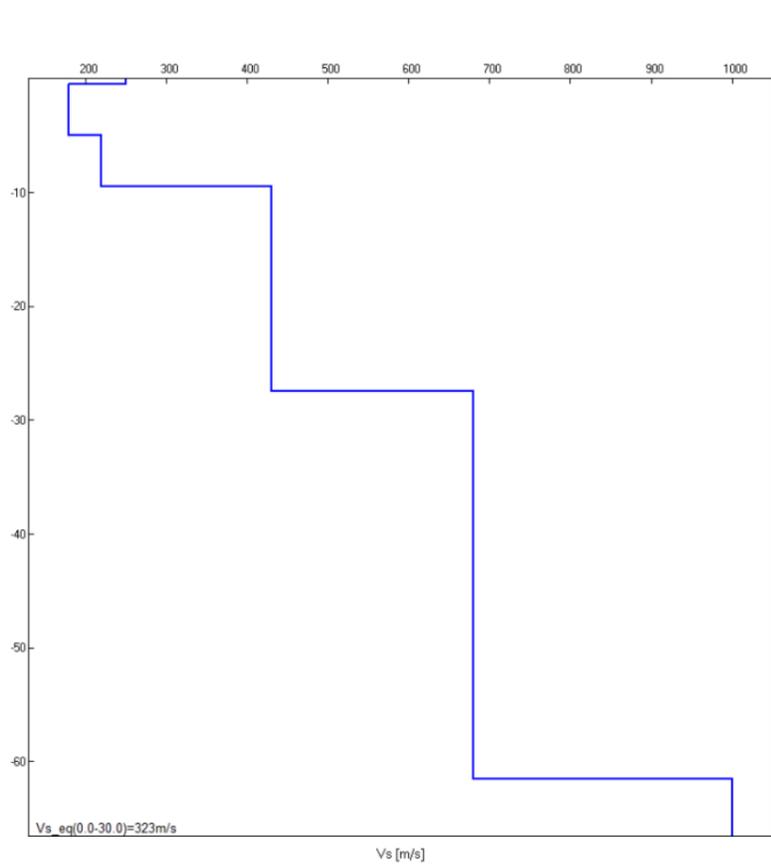


Figura 14: Indagine MASW 1. Profilo di velocità delle onde S

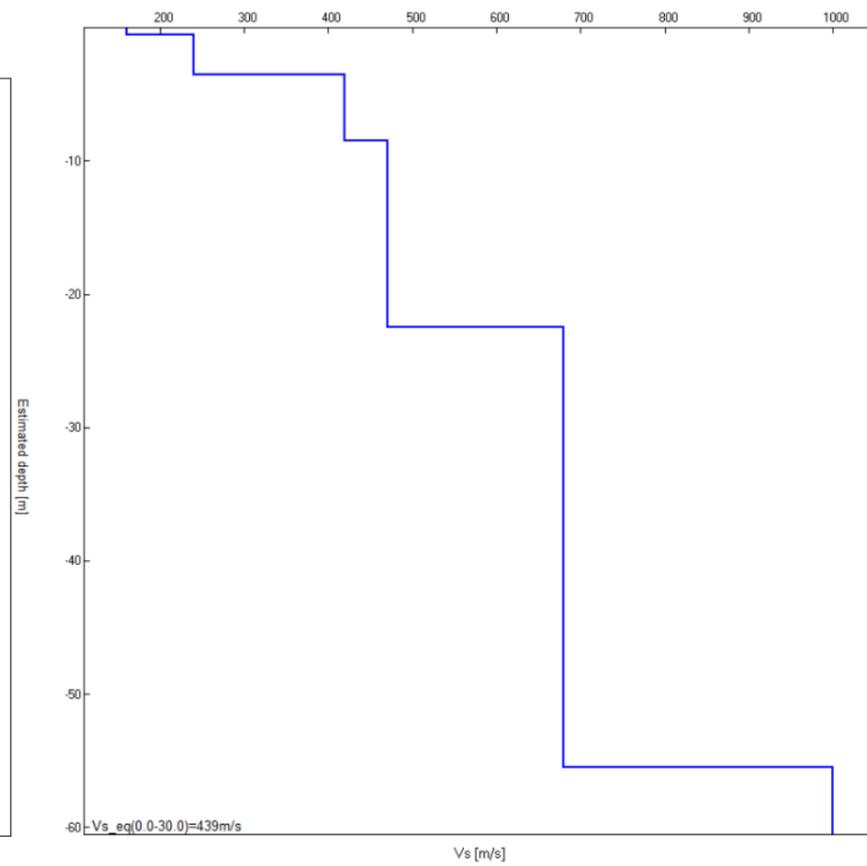


Figura 16: Indagine MASW 2. Profilo di velocità delle onde S

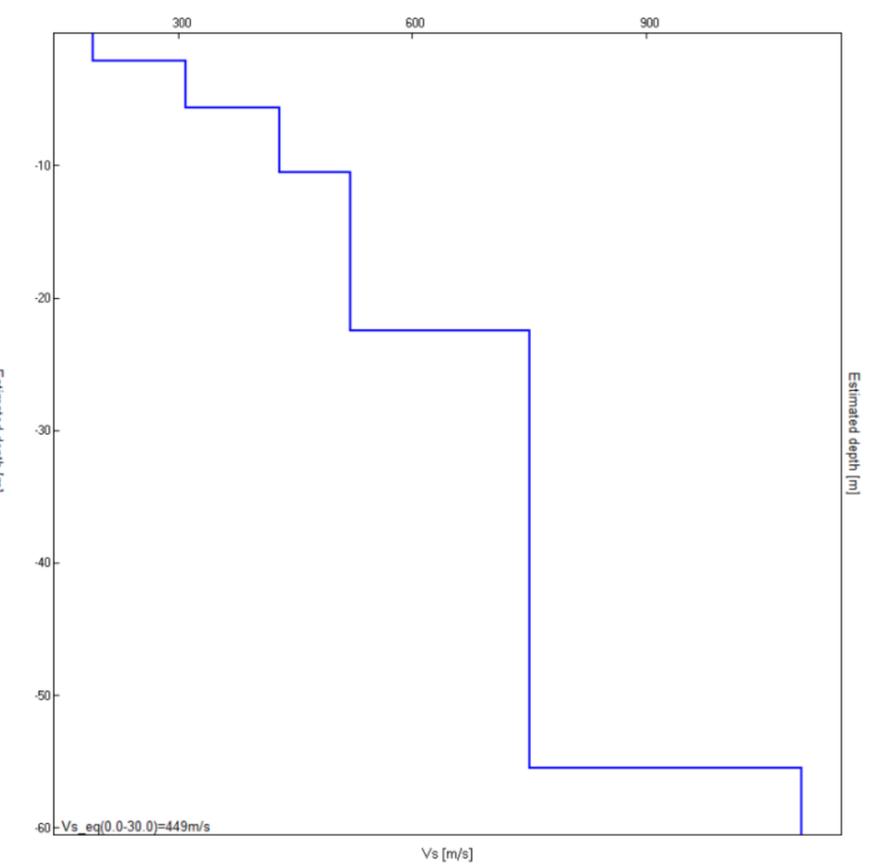


Figura 18: Indagine MASW 3. Profilo di velocità delle onde S

Fig. 28 – Risultati delle indagini sismiche MASW eseguite sul corpo diga (1 e 2) e sulla sponda sinistra dell'invaso (3) nel 2019

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello – Comune di Pistoia (PT)

ET.04A - Relazione geologica, geologico-tecnica sulle indagini e sismica – modifica a seguito dell'interlocuzione istruttoria del 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 – Divisione 4 Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori del 19/06/2020 e del parere del 27/07/2021 (registro ufficiale U.0015609)