



**IMPIANTO DI RIGOSO – DIGA DI LAGO BALLANO E LAGO VERDE:
SERVIZI DI PROGETTAZIONE**



**RECUPERO DELLA DIGA DI LAGO VERDE
PROGETTO DEFINITIVO**



TITOLO

**RELAZIONE GEOTECNICA E
GEOMECCANICA**

CODICE OPERA

C732

CODICE ELABORATO

R203

REVISIONE	DATA	NOTE
0	30/4/22	Prima emissione

Contratto: n° 1401366462

Oggetto: **IMPIANTO DI RIGOSO - DIGA DI LAGO BALLANO E LAGO VERDE:
SERVIZI DI PROGETTAZIONE**

Data contratto: 5 Giugno 2020

Durata: 36 mesi

Cliente: **Enel Green Power S.p.A.**

Gestore del Contratto Ing. Federica Cella

Gestione Tecnica Ing. Luca Dal Canto

ATI: STUDIO SPERI Società di ingegneria S.r.l. (Mandataria)
Frosio Next S.r.l. (Mandante)
Waterways S.r.l. (Consulente)

ATI PM: Gianluca Gatto

ATI Staff Federico Bisci, Gioele Filippi, Piero Civollani, Fabrizio Cassone,
Simone Di Lorenzo, Alessandro Ferrera, (Speri)
Matteo Rebuschi, Luigi Papetti, Caterina Frosio (Frosio Next)
Luciano Serra, Federico Marini, Anxhela Zaza (Waterways)

Storia del documento

Revisione	Data	Redatto	Verificato	Approvato	Note
0	30/4/22	PCI SDL FBA	FOL GGA LSE	GLU	Prima emissione

STUDIO SPERI Società di ingegneria S.r.l. e Frosio Next S.r.l. non si assumono alcuna responsabilità per l'utilizzo da parte di terzi di risultati o metodi presentati in questo rapporto.

Le Società sottolineano inoltre che varie sezioni di questo rapporto si basano su dati forniti da o provenienti da fonti di terze parti. **STUDIO SPERI Società di ingegneria S.r.l. e Frosio Next S.r.l.** non si assumono alcuna responsabilità per perdite o danni subiti dal cliente o da terzi a causa di errori o inesattezze in tali dati da terze parti

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	4
2. TERRENI E ROCCE DI FONDAZIONE.....	7
3. NORMATIVE E BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO	21
4. ANALISI DELLA DOCUMENTAZIONE DISPONIBILE	23
4.1 CAMPAGNE DI INDAGINI	23
5. CARATTERIZZAZIONE DEI TERRENI ED AMMASSO DI FONDAZIONE.....	28
5.1 DEFINIZIONE DEL VOLUME GEOTECNICO SIGNIFICATIVO	28
5.2 SEZIONI GEOTECNICHE DELLA ZONA DI IMPOSTA DELLO SBARRAMENTO	31
5.3 ANALISI GRANULOMETRICA E DETERMINAZIONE DEI LIMITI DI LIQUIDITÀ E PLASTICITÀ	35
5.3.1 <i>SONDEDILE S.r.l., PROGEO S.r.l. e ISTITUTO SPERIMENTALE PER L'EDILIZIA – ISTEDIL S.p.A. (2008-2009)</i>	35
5.3.2 <i>ENEL (2012)</i>	39
5.3.3 <i>GEOEXPLORATION (2020)</i>	39
5.4 CARATTERISTICHE FISICHE E PROPRIETÀ INDICE	39
5.4.1 <i>SONDEDILE S.r.l., PROGEO S.r.l. e ISTITUTO SPERIMENTALE PER L'EDILIZIA – ISTEDIL S.p.A. (2008-2009)</i>	39
5.4.2 <i>ENEL (2012)</i>	39
5.4.3 <i>GEOEXPLORATION (2020)</i>	39
5.5 PARAMETRI MECCANICI DI RESISTENZA AL TAGLIO	40
5.5.1 <i>SONDEDILE S.r.l., PROGEO S.r.l. e ISTITUTO SPERIMENTALE PER L'EDILIZIA – ISTEDIL S.p.A. (2008-2009)</i>	40
5.5.2 <i>ENEL (2012)</i>	42
5.5.3 <i>GEOEXPLORATION (2020)</i>	42
5.6 PERMEABILITÀ.....	43
5.6.1 <i>SONDEDILE S.r.l., PROGEO S.r.l. e ISTITUTO SPERIMENTALE PER L'EDILIZIA – ISTEDIL S.p.A. (2008-2009)</i>	43
5.6.2 <i>ENEL (2012)</i>	44
5.6.3 <i>GEOEXPLORATION (2020)</i>	44
5.7 PARAMETRI DI RIGIDEZZA ELASTICI.....	44
5.7.1 <i>SONDEDILE Srl - ISMES (2008-2009)</i>	44
5.8 PARAMETRI DINAMICI	45

5.8.1	SONDEDILE Srl - ISMES (2008-2009).....	45
5.8.2	GeoExploration (2020)	56
5.9	CARATTERIZZAZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO.....	59
5.9.1	Unità Litotecnica 1 e 2 – Flysch arenaceo-pelitico da fortemente a mediamente fratturato (UL-1).....	59
6.	SELEZIONE DEI PARAMETRI PER IL MODELLO DI CALCOLO	60
6.1	PREMESSA	60
6.2	ANALISI GRANULOMETRICA	60
6.3	CARATTERISTICHE FISICHE E PROPRIETÀ INDICE	61
6.4	PARAMETRI MECCANICI DI RESISTENZA AL TAGLIO	62
6.5	PERMEABILITÀ	63
6.6	PARAMETRI DI RIGIDEZZA DINAMICI	64
6.6.1	Curve di Decadimento del Modulo di Taglio.....	65
6.6.2	Curve di Incremento dello Smorzamento	67
7.	CONCLUSIONI	68

1. INTRODUZIONE

Il presente rapporto costituisce parte integrante del progetto esecutivo di Declassamento dello sbarramento di Lago Verde (PR) e riporta gli esiti degli studi di **caratterizzazione geotecnica e geomeccanica dei terreni** presenti all'interno del Volume Geologico Significativo.

L'impianto di ritenuta è situato in corrispondenza del Rio del Lago, nel Comune di Monchio delle Corti (PR). Il serbatoio ha lo scopo di regolare le portate del Torrente Rio del Lago per la produzione di energia elettrica della centrale di Rigoso.

La diga attuale è del tipo a gravità massiccia, in muratura di pietrame, con coronamento a quota 1514,60 m, altezza di 27,50 m sul piano di fondazione, e risulta costituita da una struttura originaria cui è stata successivamente aggiunta, lato monte, una struttura di consolidamento. Il progetto di declassamento prevede l'abbassamento della diga fino alla quota 1505 di coronamento e di quota 1498 dello sfioratore, e quindi della massima regolazione. A seguito dell'intervento di demolizione e di recupero lo sbarramento, con la conseguente riduzione di altezza dei paramenti e di volume invasato, si avrà il declassamento della diga di Lago Verde a diga di competenza regionale.

Le coordinate geografiche della linea mediana del coronamento della Diga di Lago Verde in corrispondenza del punto centrale sono:

- LATITUDINE, **44.36402°**
- LONGITUDINE, **10.09095°**

L'opera di sbarramento in oggetto è ubicata in **zona sismica 2**.

Di seguito si riporta la vista aerea dell'opera di sbarramento unitamente ad alcune fotografie del corpo diga.



Figura 1.1 Vista aerea dell'opera di sbarramento



Figura 1.2. Foto del corpo diga: lato monte



Figura 1.3. Foto del corpo diga: lato valle

2. TERRENI E ROCCE DI FONDAZIONE

Lo sbarramento di Lago Verde, posizionato in prossimità dello spartiacque appenninico e del Passo del Lagastrello, è ubicato in corrispondenza di depressioni e gradini morfologici formatisi all'interno di circhi glaciali per erosione differenziale. L'area in esame risulta essere compresa sul versante settentrionale di uno spartiacque orientato in direzione NW-SE lungo l'allineamento tra Monte Orsaro – Monte bocco – Monte Sillara. L'opera è localizzata nel contesto della catena appenninica settentrionale, risultato di diverse fasi di collisione che hanno coinvolto le placche Apula ed Europa, a partire dal Cretaceo e tutt'oggi in corso.

Secondo la cartografia Geologica d'Italia in scala 1:100'000, la diga di Lago Verde è localizzata sul margine settentrionale dell'Appennino tosco-emiliano dove vengono a contatto i rilievi montuosi caratterizzati dalla potente successione arenaceo-pelitica della Serie Toscana del "Macigno" le alternanze di banchi gradati e sequenze arenaceo-calcareo-argillose della Formazione dei "Calcari e Arenarie di Monte Dosso", appartenenti alla Serie Ligure-Emiliana.

L'area d'interesse, che ricade nell'area sud-occidentale del Foglio 85 "Castelnovo ne' Monti", comprende formazioni riferibili soprattutto ai domini paleogeografici esterno Ligure, Subligure e Toscano. Nell'area in esame la Formazione del Macigno, appartenente al Dominio Toscano e costituente il crinale appenninico della zona, presenta una struttura anticlinale con asse orientato NW-SE. In corrispondenza dell'alta valle del Fiume Enza e della valle del Torrente Parma, le formazioni appartenenti al Dominio Toscano risultano essere interrotte da una successione di terreni argilloso-calcarei e calcareo-marnosi riferibili al Dominio Ligure. Nell'intorno di Lago Verde, inoltre, i contatti tra le Unità Toscane e quelle Liguri e Subliguri sono interpretati come lineamenti tettonici.

L'analisi dello stralcio di Foglio 85 Castelnovo ne' Monti con relativa sezione interpretativa, appartenenti alla Carta Geologica d'Italia in scala 1:100'000 e riportati in Figura 2.1 e Figura 2.2, hanno permesso di individuare le formazioni che caratterizzano l'area d'interesse nell'intorno dello sbarramento e del bacino di Lago Verde e che risultano appartenenti all'**Unità Tettonica Toscana**. Nel dettaglio, lo sbarramento risulta compreso nel contesto della formazione calcareo-marnosa del "Macigno", una sequenza arenacea con intercalazioni argilloso-siltitiche e riferibile all'Oligocene medio e superiore, costituita da strati arenacei prevalenti dello spessore medio di 0,5 - 5 m molto compatte, micacee, grigie, a grana variabile da finissima a grossolana e caratterizzate da un cemento argilloso-calcareo. Le intercalazioni siltoso-argillitiche, dello spessore medio decimetrico, si presentano talora fogliettate.

Si vuole sottolineare inoltre che nell'ambito di studi geologici datati, tra i quali si può inserire anche la Carta Geologica d'Italia in scala 1:100'000 del Foglio 85 Castelnovo ne' Monti risalente al 1968, parte delle successioni arenaceo-pelitiche del crinale tosco-emiliano dell'area in esame veniva indistintamente indicata come Formazione del Macigno. Più precisamente nell'intorno dello sbarramento di Lago Verde si riconoscono formazioni riferibili al "Macigno b" o "Macigno del Mugello" e del "Macigno a", "Macigno del Chianti" o "Macigno p.d.". Nel dettaglio, all'interno della Formazione del Macigno venivano riconosciute differenti litofacies che ricalcavano la suddivisione introdotta da *Signorini* nel 1936 ("Macigno

a" o "del Chianti", "Macigno b" o "del Mugello" e "Macigno c" per una facies prettamente marnosa).

In particolare, per l'area oggetto della presente Relazione al termine "Formazione del Macigno", denominazione rimasta in uso per l'identificazione delle successioni arenaceo-pelitiche più antiche di questa fascia di crinale tosco-emiliano, sono così stati affiancati differenti terminologie succedutesi nel tempo.

In quest'ottica recenti studi stratigrafici di maggiore dettaglio hanno sottolineato ulteriori rilevanti differenze cronologiche e sedimentologiche all'interno di queste successioni arenaceo-pelitiche, suggerendo la definizione di nuove formazioni geologiche. Così in lavori successivi le unità arenacee dell'area di crinale dell'Appennino Settentrionale, riferibili al "Macigno a", sono state denominate semplicemente con il termine di "Macigno", mentre, al "Macigno b" venivano ascritte alle Arenarie del Monte Cervarola (*Bortolotti et al., 1970; Nardi & Nardi, 1972*).

Proprio le successioni arenaceo-pelitiche che caratterizzano il contesto geologico dello sbarramento di Lago Verde possono essere ricondotte, secondo la nomenclatura stratigrafica più recente, alla Formazione del Macigno (MAC) appartenente all'Unità Tettonica della Falda Toscana.

Il serbatoio di Lago Verde è stato realizzato in un'area montana tra le quote 1485 e 1515 m s.l.m. nel settore immediatamente a nord dello spartiacque appenninico e di sviluppo SE – NW pressoché coincidente con l'allineamento Monte Orsaro – Monte Bocco – Monte Sillara. L'invaso occupa un modesto circo glaciale dominato dalla presenza di estesi corpi morenici da imputare all'ultima glaciazione wurmiana.

L'invaso è impostato in gran parte sui depositi detritici e morenici che ricoprono la formazione arenacea del Macigno e sulla stessa formazione del Macigno. I versanti del bacino sono caratterizzati da limitati affioramenti per la presenza di una fitta vegetazione che in molti casi è attecchita su depositi di copertura detritici e di natura morenica.

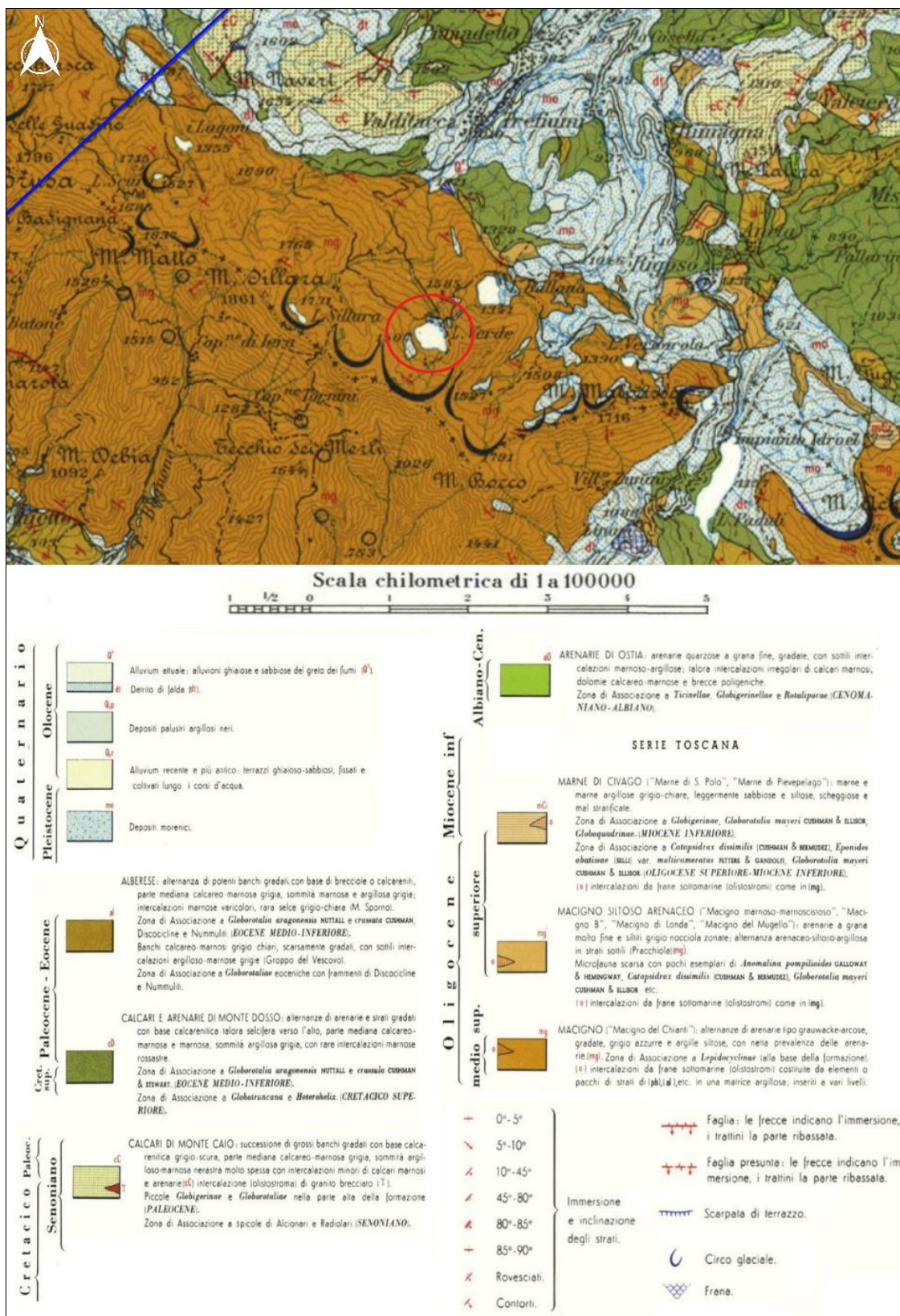


Figura 2.1 Stralcio della Carta Geologica d'Italia a scala 1:100'000. Il cerchio rosso indica il sito dello sbarramento. [Foglio 85 Castelnovo ne' Monti]

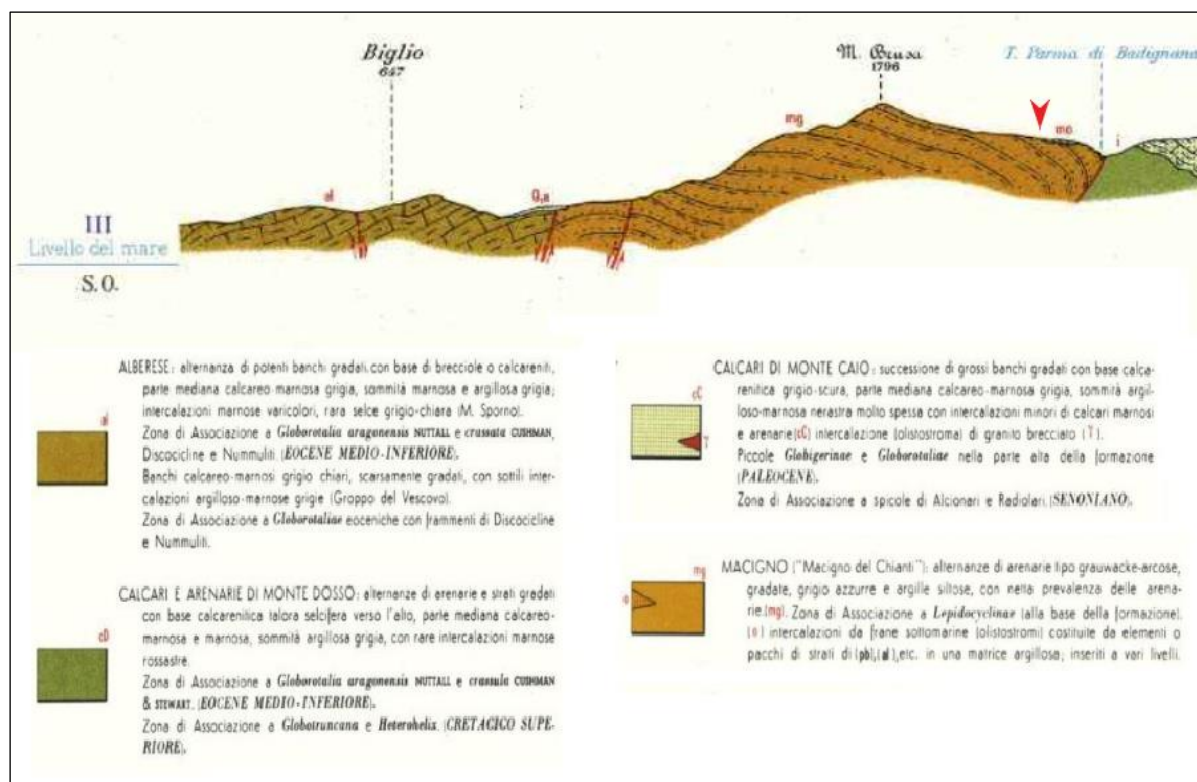


Figura 2.2 Parte terminale sud-occidentale della Sezione Geologica Interpretativa III compresa all'interno del Foglio 85 Castelnovo ne' Monti. Tale porzione terminale della sezione III taglia l'area posizionata a NW di Verde in direzione NE-SW (traccia di sezione in blu nell'angolo NW dello stralcio di carta). La proiezione dell'ubicazione del sito di Verde può essere individuata dalla freccia rossa, in corrispondenza dell'anticlinale con asse orientato SW-NE

Si analizza il contesto geologico nel quale si inserisce la diga di Lago Verde, grazie allo stralcio del Foglio 234 "Fivizzano" della Carta Geologica d'Italia in scala 1:50'000 "Fivizzano" della Cartografia Geologica realizzata dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Pisa e alla relativa sezione geologica, riportate in Figura 2.3 e Figura 2.4. L'area dello sbarramento d'interesse si posiziona nella porzione nord-occidentale del Foglio 234 "Fivizzano".

Secondo il foglio geologico a scala 1:50'000, la diga di Lago Verde risulta essere impostata su depositi eterogenei ed eterometrici, prevalentemente arenacei, riconducibili a **depositi morenici**, nel panorama geologico della **Formazione del Macigno**, appartenente al Dominio Toscano.

Dal punto di vista litologico la Formazione del Macigno, datata all'Oligocene superiore – Miocene inferiore, risulta essere costituita da torbiditi arenacei ed arenaceo – pelitiche grigie con granulometria da media a medio – fine negli strati meno spessi e da grossolana a molto grossolana negli strati spessi e molto spessi. Sono presenti, seppur subordinate, torbiditi pelitico – arenacei sottili o, raramente, calcareo marnosi. Gli intervalli pelitici, costituiti da silti grigie, marne siltose ed argilliti da grigie a grigio – scure, sono spesso sottili e laminati e possono raggiungere qualche decina di centimetri di spessore.

L'intera unità presenta uno spessore variabile da centinaia di metri fino a 2'000 metri.

La sezione geologica A – A' (Figura 2.5), riportata all'interno del Foglio 234 Fivizzano della Carta Geologica d'Italia, conferma come l'invaso di Lago Verde sia collocato nel contesto della Formazione del Macigno e fondata su depositi detritici di till indifferenziato. I depositi di till indifferenziato, datati al Pleistocene medio/superiore, sono costituiti da accumuli di clasti subangolosi, prevalentemente arenacei, di dimensioni comprese tra le ghiaie ed i massi, immersi in una matrice sabbioso – limosa grigio – ocracea. Lo spessore dell'unità varia da qualche metro fino ad un massimo di 100 metri (*Puccinelli et al., 2015*).

Si vuole analizzare a questo punto il contesto geologico di maggiore dettaglio dell'area oggetto del presente rapporto, grazie alla carta geologica dell'appennino emiliano – romagnolo a scala 1:10'000 della Regione Emilia-Romagna (Figura 2.5).

In particolare, la cartografia 1:10'000, in accordo parziale con quanto indicato dalla carta geologica a scala 1:50'000, mostra come lo sbarramento oggetto della presente Relazione sia impostato su depositi glaciali e periglaciali, mentre l'invaso sia interessato da depositi detritici di falda e derivanti da instabilità di versante.

In particolare, il detrito di falda è costituito da materiale eterogeneo ed eterometrico, con frammenti litoidi di dimensioni variabili tra qualche cm³ e decine di m³, privo di matrice o in matrice sabbioso-pelitica alterata e pedogenizzata, di origine gravitativa. Questi depositi si trovano generalmente a quote elevate o molto elevate, alla base di scarpate e lungo i versanti più acclivi. Il detrito può essere stato anche rimaneggiato da fenomeni di gelo-disgelo e dal ruscellamento delle acque superficiali.

I depositi glaciali e periglaciali sono costituiti da detrito sciolto a struttura caotica con clasti eterometrici inglobati in matrice limoso-sabbiosa o limo-argillosa e con stratificazione mal visibile. Frequentemente sono presenti massi erratici.



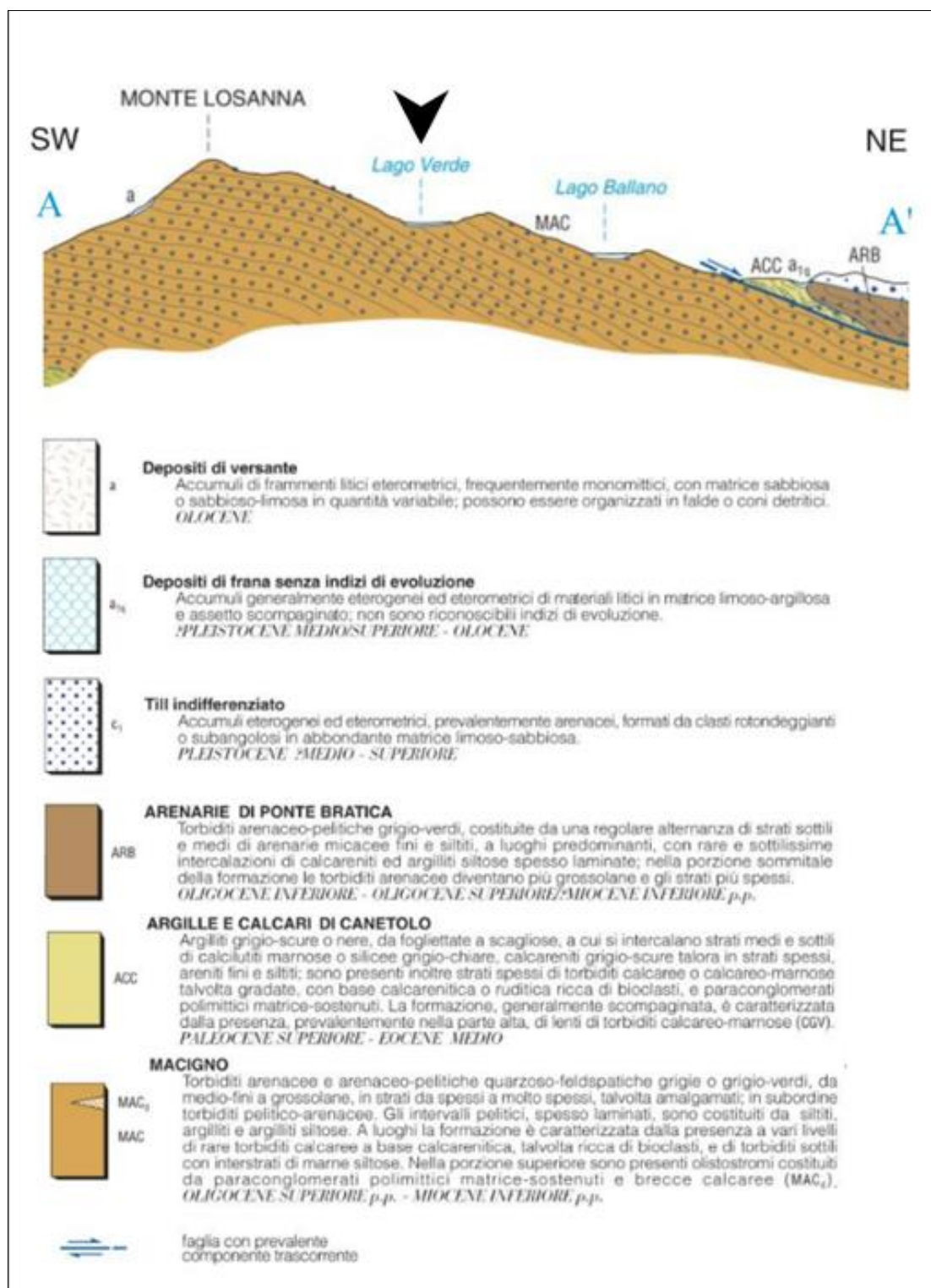


Figura 2.4 Parte della Sezione Geologica Interpretativa A – A' riportata all'interno del Foglio 234 Fivizzano a scala 1:50'000. Tale porzione della sezione A – A' è riportata in pianta in Figura 2.3 ed evidenziata dal lineamento blu che taglia lo stralcio di carta da SW a NE attraversando l'invaso di Lago Verde. La proiezione dell'ubicazione del sito d'interesse può essere individuata dalla freccia nera

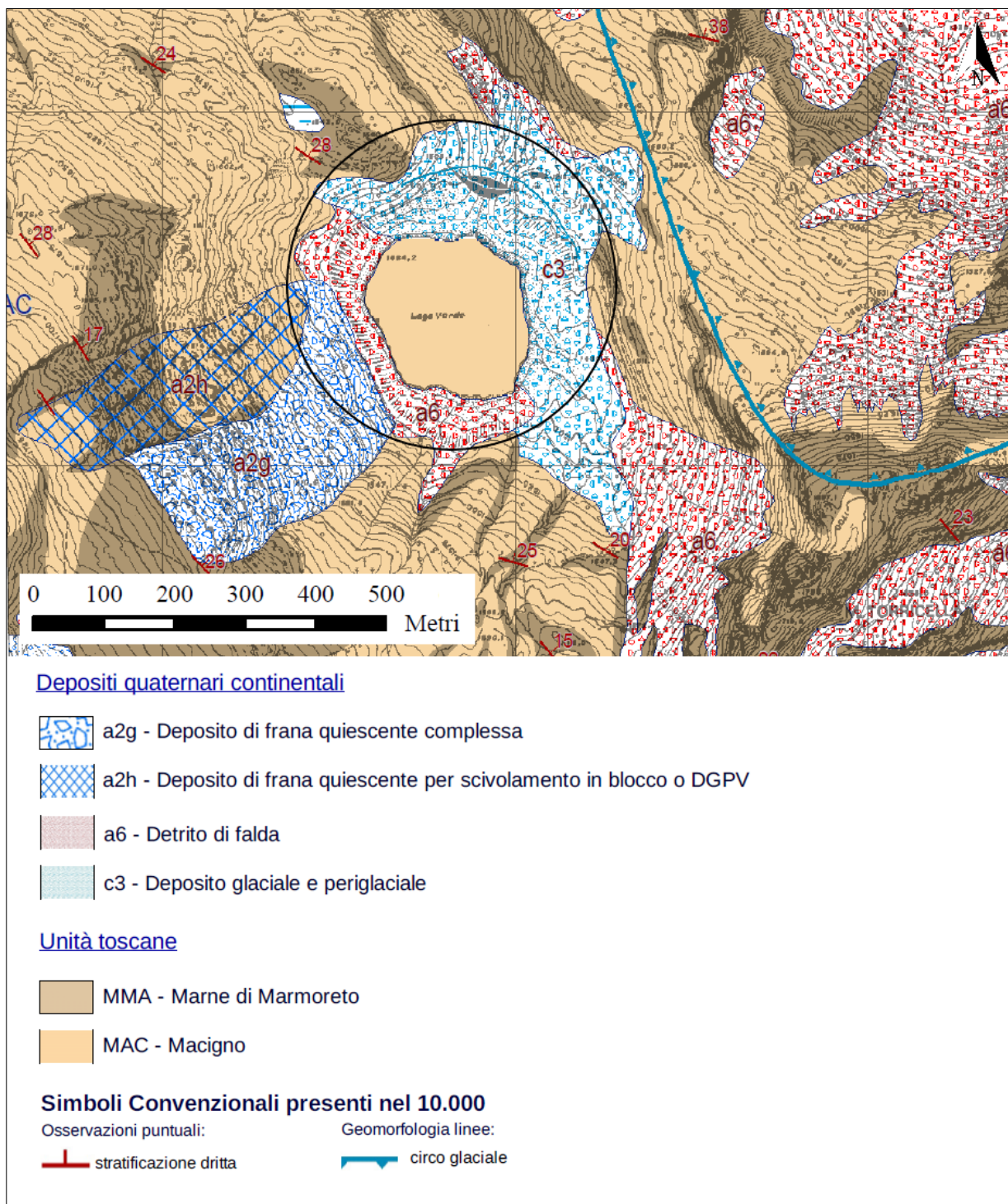
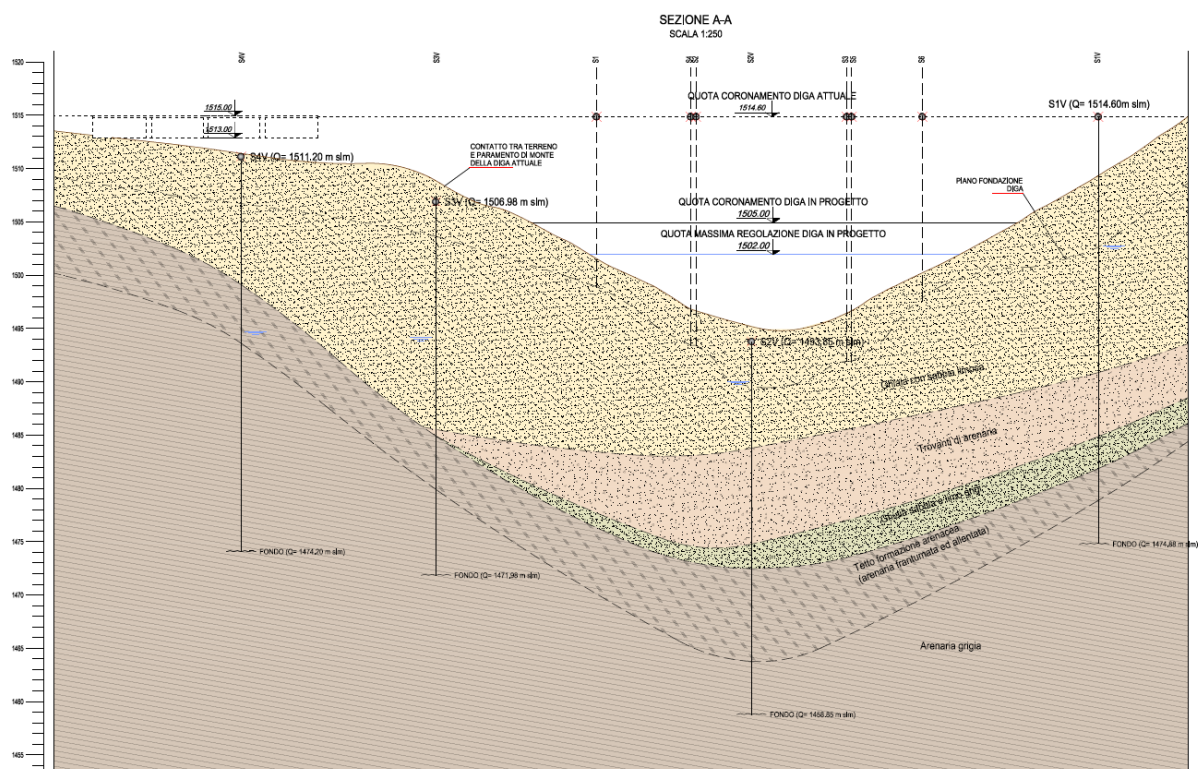


Figura 2.5 Stralcio della Carta Geologica dell'appennino emiliano romagnolo a scala 1:10'000. Il cerchio nero individua lo sbarramento e l'invaso di Lago Verde [Elemento 234020 – Carta Geologica dell'appennino emiliano – romagnolo, 2011]

A differenza di quanto riportato dalla cartografia geologica analizzata finora nel presente paragrafo, le indagini prese in considerazione hanno permesso di definire un modello di sottosuolo di dettaglio per il sito d'interesse. Tale modello si accorda con quanto si evince dalla sola analisi della cartografia geologica di riferimento, e, in particolare, in interposizione tra il corpo diga ed il substrato costituito dalla Formazione del Macigno, si identificano differenti terreni associabili ad altrettante tipologie di depositi quaternari differenziabili tra di loro per caratteristiche tessiturali, composizionali e genetiche.



LEGENDA

UBICAZIONE DEI SONDAGGI GEOGNOSTICI:

- S1V Sondaggi a carotaggio continuo (2008)
- CH1V Sondaggi a distruzione di nucleo (2008)
- S2 Sondaggi a carotaggio continuo in corpo diga (2000)
- S4 Sondaggi a distruzione di nucleo in corpo diga (2000)
- Testa bocca foro

Fondo foro

Livello falda attuale

CARATTERIZZAZIONE LITOTECNICA DEI TERRENI:

- Ghiaia con sabbia limosa - Accumuli detritici fluvio-glaciali, con prevalenza di sabbie e ghiaie
- Trovanti di arenaria - Accumuli detritici fluvio-glaciali, con prevalenza di trovanti arenacei in matrice ghiaioso-sabbiosa
- Depositi morenici in posto - Ghiaia, sabbia e limo grigi
- Livello alterato al tetto della formazione arenacea
- Arenaria grigia compatta

Figura 2.6 Sezione geologica dell'area di imposta della diga di Lago Verde [Tavola 5, Sezioni geologiche dell'area di imposta della diga. Recupero della diga di Lago Verde. Impianto idroelettrico di Rigoso. U.B. Bologna – Nucleo idroelettrico di Bologna, 2012]

Come osservabile nella sezione geologica dell'area di imposta della diga di Figura 2.6, al di sotto del corpo diga, grazie alle differenti tipologie di indagini considerate è stato possibile individuare **depositi fluvio – glaciali** caratterizzati da matrice incoerente costituita da ghiaia con sabbia limosa (Figura 2.7). Lo spessore di tali depositi, che si riduce fino quasi a scomparire salendo lungo le pendici, risulta essere di 10 m al centro della valle e di 20 m alle spalle della diga.

Più in profondità, tali depositi risultano essere composti in prevalenza da trovanti arenacei in matrice ghiaioso – sabbiosa. Lo spessore di tali depositi è di 10 m al centro della valle, di 6 m presso la spalla destra e assente nella parte alta della spalla sinistra.

Al di sotto di quest'ultimi depositi si trovano **depositi morenici** in posto costituiti da ghiaia, sabbia e limo addensati di colore grigio. Lo spessore massimo di tale unità si attesta a 3/4 m.



Figura 2.7 Vista sulla porzione immediatamente a monte dello sbarramento, con particolare dei depositi detritici che ricoprono la formazione arenaceo-pelitica del Macigno sottostante e caratterizzano l'area dell'imposta e la sponda destra dell'invaso. Le immagini evidenziano la natura caotica e la tessitura eterogenea dei depositi in esame.

Tali depositi sono costituiti da accumuli di clasti eterometrici a struttura caotica immersi in una matrice sabbioso-limosa talora argillosa

Le sponde sud-occidentali che bordano l'invaso risultano caratterizzate da diffusi depositi detritici riconducibili a detriti di falda e derivanti da fenomeni di instabilità di versante (Figura 2.8).



Figura 2.8 Viste dell'area sud-occidentale dell'invaso, caratterizzata dalla presenza dei depositi di versante e detriti di falda che caratterizzano tale porzione del lago. Si tratta di depositi detritici con clasti eterometrici e massi

Al di sotto di tali depositi quaternari, le indagini a disposizione hanno confermato la presenza del **substrato costituito da arenaria grigia compatta**, riconducibile alla Formazione del Macigno, sovrastato da un livello frantumato e allentato risultato dell'alterazione dell'unità sottostante. ricostruendone allo stesso tempo l'andamento e la profondità al di sotto dell'imposta. Il tetto della formazione è più superficiale lungo la spalla sinistra dello sbarramento, mentre, nella parte centrale della valle si approfondisce fino a 30 metri di profondità, per poi innalzarsi nuovamente, seppur in minor forma, lungo la spalla destra della diga. L'ammasso roccioso non affiora nell'area dello sbarramento, ma solamente nell'area a valle (Figura 2.9) ed a monte dello stesso.



Figura 2.9 Particolare di un affioramento della Formazione del Macigno nell'area a valle dello sbarramento lungo la strada che da Lago Verde conduce a Lago Ballano. Si tratta di torbiditi arenacee ed arenaceo – pelitiche grigie con granulometria da media a medio – fine negli strati meno spessi e da grossolana a molto grossolana negli strati spessi, a cui sono subordinati livelli pelitici, costituiti da siltiti grigie, marne siltose ed argilliti grigie

Da punto di vista geomorfologico, la diga di Lago Verde è ubicata lungo il versante adriatico dell'Appennino parmense, immediatamente sotto la linea di spartiacque compresa tra il Monte Sillara e il Monte Bocco, in corrispondenza di una conca di origine glaciale.

La **geomorfologia** locale è caratterizzata da una marcata differenziazione fra i pendii ricoperti da depositi sciolti, che presentano forme più dolci, e le creste rocciose acclivi che mostrano una morfologia più aspra, in particolare sul fianco orientale del bacino (Figura 2.10).

In particolare, lungo i versanti occidentali e meridionali dell'invaso di Lago Verde sono presenti limitati lembi di depositi morenici mescolati al materiale di disfacimento del substrato roccioso.

Quest'ultimi sono costituiti prevalentemente da sabbie e grossi massi, originatisi in seguito all'azione crioclastica e meccanica subita dalle locali arenarie alterate.

Si osserva, inoltre, ad est dello sbarramento, una montonatura che, mettendo in evidenza la presenza di un cordone morenico, conferma l'origine glaciale del Lago Verde.



Figura 2.10 Vista d'insieme del Lago Verde dal coronamento della diga, con particolare riferimento ai versanti a differente acclività. Le sponde che bordano il lago risultano essere caratterizzate dalla presenza di detrito di falda e di depositi glaciali e periglaciali

3. NORMATIVE E BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

NTC08. D.M. del 14 gennaio 2008. "Norme tecniche per le costruzioni".

NTD14. D.M. del 26 giugno 2014. Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse).

MIT-DGD17. Note esplicative per le Verifiche Sismiche delle Grandi Dighe ai sensi del D.M. 26 giugno 2014 (NTD) e del D.M. 14 gennaio 2008 (NTC). Direzione generale per le dighe e infrastrutture idriche ed elettriche, Divisione 6 – Strutture e geotecnica. Marzo 2017.

Circolare applicativa NTC18. Istruzioni per l'applicazione dell'"Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni" di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018. Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP.

MIT-DGD19. Istruzioni per l'applicazione della normativa tecnica di cui al D.M. 26 giugno 2014 (NTD14) e del D.M. 17 gennaio 2018 (NTC18). Direzione generale per le dighe e infrastrutture idriche ed elettriche. Luglio 2019.

ASTM D422- 63. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (2007).

ASTM D5030. Standard Test Methods for Density of Soil and Rock in Place by the Water Replacement Method in a Test Pit.

ASTM D3999-91. Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus (2003).

ASTM D2435- 11. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading (2020).

ASTM D4767 - 11. Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils (2020).

Associazione Geotecnica Italiana (A.G.I.), 1977. Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geognostiche.

Bazaraa, A., R. (1967). Use of the Standard Penetration Test For Estimating Settlement of Shallow Foundations on Sand." Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana, Ill.

Becker, E., Chan, C. K., and Seed, H. B. (1972). Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materials in Plane Strain and Triaxial Compression Tests, Report No. TE-72-3, Dept. of Civil Engineering, University of California, Berkeley.

Bolton, M., D. (1986). The strength and dilatancy of sands, *Geotechnique*, 36, 1, 65-78.

Darendeli, M. (2001). Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. University of Texas at Austin.

de Mello, V., F., B. (1971). The standard penetration test state of the art report, 4th Pan American Conf. On Soil Mechanics Foundation Engineering, Puerto Rico, 1, 1-86.

Duncan, J. M., Wright, S. G., Brandon, T. L. (2014). *Soil Strength and Slope Stability*, 2nd Edition Wiley.

Gibbs H., J., and Holtz W.G. (1957). Research on determining the density of sands by spoon penetration testing. *Proc. Of the 4th Internal Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, pp.35-39

Hough, B. K. (1957) *Basic Soil Engineering*, Ronald Press, New York.

Hardin, B., O., Drnevich, V., P. (1972) Shear modulus and damping in soils: design equations and curves, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 98 (SM6), pp. 603-624.

Ishihara K. (1996). *Soil behaviour in earthquake geotechnics*. Clarendon Press, Oxford.

Leps T. M., Review of shearing strength of rockfill. *Journal of the soil mechanics and foundations division – Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 1970.

Marachi, N. D., Chan, C. K., Seed, H. B., and Duncan, J. M. (1969). Strength and deformation characteristics of rockfill materials. Office of Research Services, Report No. TE 69-5, University of California, Berkeley.

Ovalle C. [et al.], Data Compilation from Large Drained Compression Triaxial Tests on Coarse Crushable Rockfill Materials. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 2020.

Kokusho, T., Yoshida, Y., and Esashi, Y. (1982). Dynamic properties of soft clays for wide strain range. *Soils and Foundations*.

Rollins K.M., Evans M.D., Diehl N.B., Daily III W.D., Shear Modulus and Damping Relationships for Gravels. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 1998.

Rollins K.M., Singh M., Roy J., Simplified Equations for Shear-Modulus Degradation and Damping of Gravels. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 2020.

Schmertmann, J.H., (1975). "In-Situ Measurement of Shear Strength," State-of-the-Art Paper, Session III, Proceedings of the Conf. on InSitu measurement of Soil Properties, Specialty Conf. of the Geotechnical Div., ASCE, North Carolina State University, Raleigh, Vol. I, pp. 57-138.

Schmertmann (1977). Angolo di attrito (gradi) per vari tipi litologici (valori massimi).

Skempton, A. W. (1986). Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation. *Geotechnique*, 36(3), 425-447.

Stokoe K.H., Darendeli M.B., Andrus R.D., Brown L.T., Dynamic soil properties: Laboratory, field and correlation studies. 2nd Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, 1999.

Vucetic, M. (1994). Cyclic threshold shear strains in soils. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 120.

Yokota K., Imai T., Konno M. (1981). Dynamic deformation characteristic of soils determined by laboratory tests, OYO Technical Report, n.3, pp. 13-37.

4. ANALISI DELLA DOCUMENTAZIONE DISPONIBILE

4.1 Campagne di indagini

La definizione del contesto geologico e geomorfologico dell'area in esame, inoltre, si è potuta avvalere del fondamentale contributo delle indagini che negli anni si sono succedute nell'ambito dello studio dello sbarramento di Lago Verde. In particolare, tali indagini, realizzate nel contesto della diga o nelle immediate vicinanze della stessa, hanno contribuito a definire nel dettaglio la natura, la successione stratigrafica e l'assetto strutturale dei terreni e del substrato che possono essere rilevati all'interno del Volume Geologico Significativo dell'imposta.

In questo senso ci si riferisce soprattutto alle indagini geognostiche, geofisiche e di laboratorio eseguite durante le campagne di indagini del 1997, 2000 e 2008 e allo stendimento di sismica a rifrazione eseguito a valle della sponda destra del Lago Verde nel 2020. In particolare, le indagini che hanno fornito dati utili alla caratterizzazione geologica del sito sono riportate di seguito.

- GEOEMME, 1997:
 - esecuzione di n. 4 perforazioni a carotaggio continuo realizzati sulle spalle (SG1 e SG3) ed a monte dello sbarramento (SG2 E SG2bis), fino ad una profondità massima di 35 m al di sotto del piano campagna. La stratigrafia del sondaggio SG2 non è disponibile. I sondaggi hanno attraversato i depositi morenici e detritici che caratterizzano l'area circostante lo sbarramento.
 - Esecuzione di n. 12 prove di permeabilità Lefranc nel contesto dei 4 fori di sondaggio SG1, SG2, SG2bis e SG3.
- ELLETIPI, 2000:
 - esecuzione di n. 2 perforazioni a carotaggio continuo (S2 e S5) in corrispondenza del nucleo del corpo diga, fino ad una profondità massima di 25 m dal coronamento. I sondaggi hanno attraversato la muratura del corpo diga fino a raggiungere i depositi morenici e detritici che caratterizzano il piano di fondazione dello sbarramento.
 - esecuzione di n. 4 perforazioni a distruzione di nucleo S1, S3, S4 e S6, in corrispondenza del corpo diga, fino ad una profondità rispettivamente 16 m, 25 m, 25 m e 12 m dal coronamento.

Si specifica che i sondaggi S1, S2 e S3 hanno interessato la struttura della diga originaria del 1907, mentre i sondaggi S4, S5 e S6 sono stati realizzati nel contesto della diga addossata nel 1929.

- PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO – SERVIZIO GEOLOGICO – LABORATORIO GEOTECNICO, 2002:
 - esecuzione di n. 9 analisi granulometriche, limiti di Atterberg, umidità naturali, permeabilità espressa con il parametro K_d su n. 9 campioni prelevati dai sondaggi meccanici Geoemme del 1997.
 - esecuzione di n. 3 prove di densità in sito sul fianco orientale dell'invaso (D1, D2, D3) con prelievo ed analisi granulometriche, limiti di Atterberg e permeabilità espressa con il parametro K_d sui campioni relativi. Non sono disponibili l'ubicazione del punto di prelievo del campione D2, oltre alla profondità massima raggiunta per i punti di prelievo D1, D2 e D3. Vengono invece riportate le profondità di prelievo per i campioni D1, D2, D3, che si attestano a 0,5 m da piano campagna.
 - esecuzione di n. 3 prove di taglio diretto sui 3 campioni ricostruiti prelevati per le densità in sito (D1, D2 e D3).
- SONDEDILE S.r.l., 2008:
 - esecuzione di n. 4 perforazioni a carotaggio continuo in corrispondenza del corpo diga della struttura del 1929 (S1v), della spalla sinistra (S4v), dei terreni e rocce di fondazione immediatamente al piede del paramento di monte (S2v e S3v), fino ad una profondità massima di 40 m. Il sondaggio S1v attraversa tutto il corpo della diga addossata ed i depositi morenici e detritici, fino a giungere al substrato arenaceo del Macigno.
 - esecuzione di n. 3 perforazioni a distruzione di nucleo per l'attrezzamento dei fori per le prove Cross-hole, in corrispondenza del nucleo della struttura del 1929 (CH1v) e nell'area dell'invaso a poche decine di metri dal paramento di monte (CH2v e CH3v), fino ad una profondità massima di 40 m.
 - esecuzione di n. 27 prove S.P.T. in corrispondenza dei carotaggi continui S1v, S2v, S3v, S4v.
 - prelievo di n. 53 campioni rimaneggiati dai terreni prelevati dalle carote dei sondaggi a carotaggio continuo per l'esecuzione di prove granulometriche e prove per la determinazione dei limiti di Atterberg.
 - realizzazione di n. 6 prove di permeabilità Lefranc in corrispondenza dei fori di sondaggio S1v (2), S3v, S4v (2), CH3v (2).
 - realizzazione di n. 5 prove di permeabilità Lugeon nel contesto dei fori di sondaggio S1v, S2v (2), S3v, S4v.
 - realizzazione di n. 3 prove dilatometriche su roccia nel contesto del sondaggio S3v.
 - realizzazione di n. 3 prove di densità in sito (volumometro a sabbia), di cui non si conosce l'esatta ubicazione.

- PROGEO S.r.l., 2008:
 - esecuzione di n. 103 misure Cross-hole tra i fori di sondaggio realizzati nel contesto della campagna d'indagine geognostica Sondedile del 2008. In particolare, la realizzazione di tali prove è stata eseguita nei fori S1v-CH1v, S2v-CH2v, S3v-CH3v. La prova Cross hole della coppia CH1V-S1V attraversa 12,30 m di materiali costituenti il corpo della diga in blocchi e muratura cementata per poi entrare nei materiali morenici fino a 30,0 m ed infine nelle arenarie della formazione del Macigno toscano (torbiditi arenaceo-pelitiche variamente fratturate). La prova Cross hole della coppia CH2V-S2V, effettuata sul fondo valle lato monte, attraversa 21.3 m di detrito morenico per poi passare fino a fondo foro nella formazione del Macigno. La prova Cross hole della coppia CH3V-S3V è realizzata sul versante sinistro ed incontra per 22 m detriti di versante e morenico per poi anch'esso entrare nella formazione delle arenarie, fratturate e ricementate con calcite spatica.
- PROGEO S.r.l., 2009:
 - esecuzione di n. 1 stendimenti a rifrazione con elaborazione tomografica, destinata all'approfondimento delle conoscenze della zona di imposta e della zona a valle della diga, con lo scopo di valutare le caratteristiche di fratturazione dell'ammasso roccioso ed evidenziare eventuali zone superficiali più allentate e di ricostruire l'andamento dei lineamenti tettonici nella zona di imposta della diga e a valle.

Linea sismica trasversale all'asse della diga in direzione monte-valle della lunghezza di 210 m con 39 sensori di ricezione delle onde di compressione (P) (geofoni) interspaziati ogni 5 m delle partendo circa 70 m a monte del manufatto e terminando 115 m circa a valle dello stesso lungo un allineamento in asse all'impiuvio vallivo adiacente ai sondaggi della prova Cross hole CH2V-S2V.
- ISTITUTO SPERIMENTALE PER L'EDILIZIA – ISTEDIL S.p.A., 2009:

Dai sondaggi eseguiti da Sondedile nel 2008 (S1v, S2v, S3v, S4v) sono stati prelevati complessivamente n. 53 campioni di materiale suddivisi tra campioni delle terre e delle rocce, sui quali nel periodo gennaio-febbraio 2009 sono state eseguite le seguenti indagini di laboratorio:

 - n. 19 analisi granulometriche su campioni di materiale granulare, ASTM-D422.
 - n. 18 determinazioni dei limiti di consistenza, ASTM-D4318.
 - n. 10 determinazioni di contenuto d'acqua allo stato naturale, ASTM-D2216.
 - n. 5 prove di taglio diretto con determinazione della resistenza residua, con determinazione di peso di volume con fustella tarata e determinazione del contenuto d'acqua iniziale e finale, AGI1994.
 - n. 9 prove di Tilt test.

- n. 3 prove di compressione triassiale con determinazione delle deformazioni assiali, con determinazione della massa volumica apparente, ASTM-D5407-93.
- n. 2 prove di compressione triassiale con determinazione delle deformazioni assiali e circonferenziali, con determinazione della massa volumica apparente, ASTM-D5407-93.
- n. 7 prove di carico puntuale (point load), ASTM-D5731-95.
- ENEL, 2012:
 - realizzazione di una campagna di rilievi geomeccanici nel contesto dello sbarramento e delle sponde dell'invaso.
 - esecuzione realizzazione di rilievi geologici e geomorfologici dell'area dello sbarramento e dell'invaso.
- GEOEXPLORATION, 2020:
 - realizzazione di una campagna di rilievi sismici a rifrazione con tomografia in onde P e S nel contesto dell'area in sponda destra a valle dello sbarramento scarico di superficie e dell'area immediatamente a valle di quest'ultimo.

Tali indagini hanno interessato l'intera estensione dell'imposta, permettendo una buona ricostruzione del modello stratigrafico dei terreni e del substrato di fondazione.

Ai fini della caratterizzazione geotecnica-geomeccanica non sono state ritenute sufficientemente rappresentative le precedenti campagne di indagine (1997, 2000 e 2002), volte principalmente alla definizione delle caratteristiche dei materiali costituenti il corpo diga e marginalmente alla conoscenza delle caratteristiche dei terreni di imposta della diga stessa. Le stesse valutazioni sono state desunte anche dal Progetto Enel 2018.

In relazione ai dati disponibili, si specifica che la classificazione e la caratterizzazione geotecnica e geomeccanica delle unità litotecniche riferibili alla Formazione del Macigno, è stata definita validando la caratterizzazione realizzata nel contesto della relazione geotecnica per il Progetto Definitivo di *Dismissione della diga e realizzazione di una nuova opera di presa* del 2018.

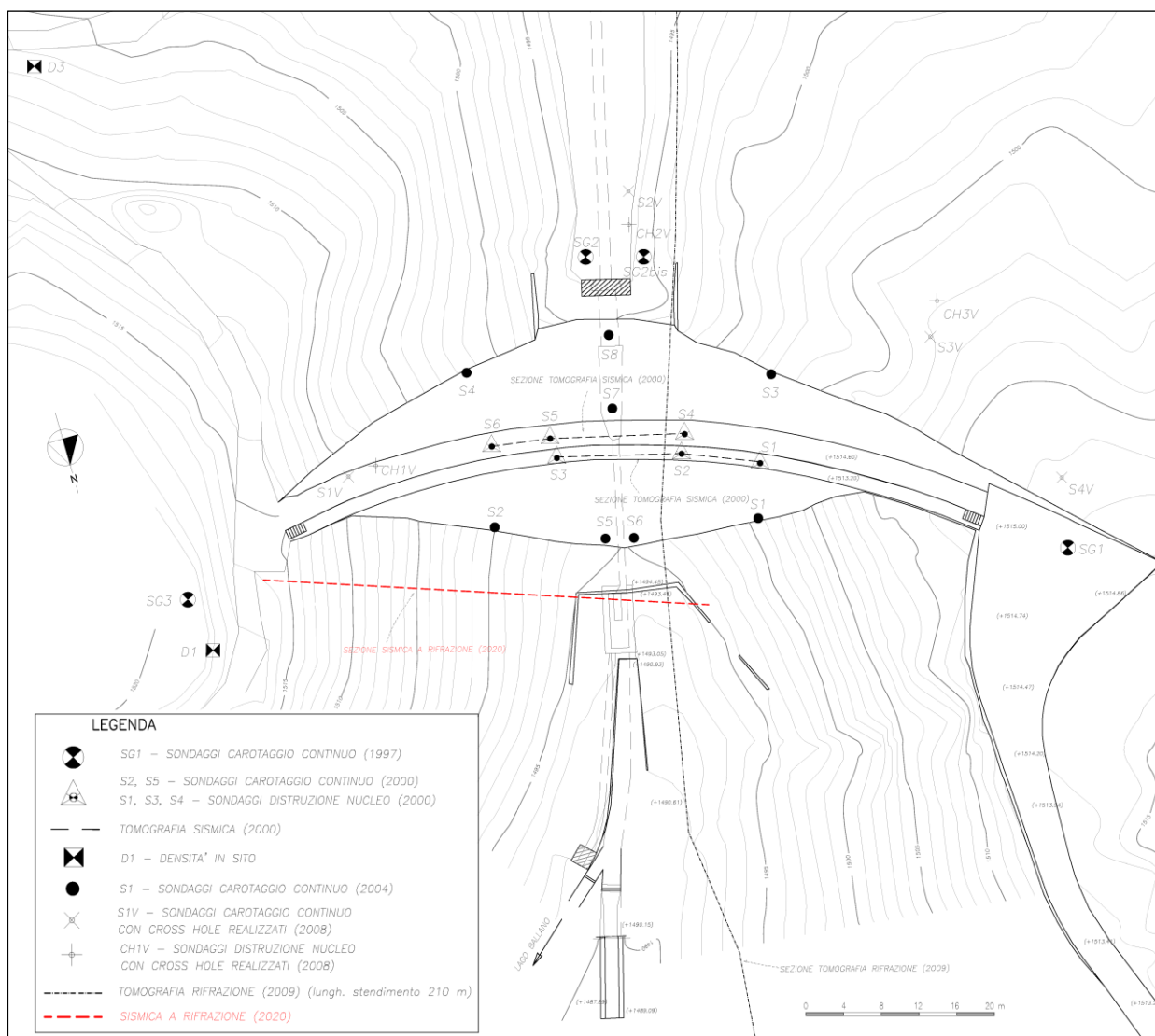


Figura 4.1 Planimetria dello sbarramento di Lago Verde con ubicazione delle indagini pregresse realizzate nel 1997, 2000, 2002, 2004, 2008, 2009, unitamente alle integrazioni di indagini geofisiche realizzate a complemento del progetto di dismissione

5. CARATTERIZZAZIONE DEI TERRENI ED AMMASSO DI FONDAZIONE

5.1 Definizione del Volume Geotecnico Significativo

Il **comportamento geomeccanico dell'intero ammasso di fondazione**, costituito dalle alternanze arenaceo-pelitiche della Formazione del Macigno, è stato definito validando la caratterizzazione realizzata nel contesto della relazione geotecnica per il Progetto Definitivo di *Dismissione della diga e realizzazione di una nuova opera di presa* del 2018. L'analisi della documentazione e dei dati disponibili, unitamente all'analisi derivante dai più completi studi di caratterizzazione geotecnica e geomeccanica condotti sullo sbarramento dell'adiacente diga di Lago Ballano, hanno permesso di definire e convalidare le classificazioni e la caratterizzazione realizzata nell'ambito del Progetto Definitivo Enel del 2018.

Per quanto riguarda i depositi fluvio-glaciali che caratterizzano il contesto geologico dello sbarramento, si evidenziano delle peculiarità di comportamento geotecnico che li portano ad essere caratterizzati all'interno di differenti unità dalle caratteristiche geotecniche costanti. In particolare, tali formazioni detritiche di materiale eterogeneo ed eterometrico presentano una prevalente componente ghiaiosa di natura arenacea prevalente ed immersa in matrice sabbioso-limosa.

Nel Volume Geologico Significativo ed all'interno di ogni unità, i depositi detritici e glaciali sono stati ritenuti omogenei in termini di comportamento meccanico e **classificati e caratterizzati come terreni nel contesto di tre differenti unità**, mettendo a sistema le caratteristiche individuate in foro e in laboratorio geotecnico durante e al seguito dell'esecuzione dei sondaggi geognostici, con i risultati derivanti dalle indagini geofisiche di superficie, utili per poter avere una visione d'insieme del sito riuscendo così a espandere l'informazione puntuale dei campioni e lineare dei sondaggi, fino a portarla alla scala areale dell'intera fondazione.

Il **comportamento geotecnico dei terreni** presenti all'interno del VGS è stato definito mettendo a sistema le caratteristiche desunte dalle campagne di indagini in sito del 2002, del 2008-2009, del 2020 con le caratteristiche composizionali e meccaniche che è stato possibile derivare dall'analisi delle prove di laboratorio condotte nel contesto delle stesse indagini, utili per poter avere una visione d'insieme del sito riuscendo così a espandere le informazioni derivanti dalle descrizioni dei sondaggi geognostici e dei rilievi geologici realizzati, fino a portarla alla scala areale dell'intero sbarramento. Tali informazioni sono state utilizzate come base per un'attenta ricerca di parametri da associare ai terreni in base a quanto disponibile nella letteratura scientifica.

Per la classificazione geologico-tecnica dei terreni è stato adottato il sistema AGI (Associazione Geotecnica Italiana, 1977) che propone una serie di classi granulometriche basate sul diametro delle particelle espresso in millimetri. Ciò garantisce di prevedere in prima approssimazione quale sarà il comportamento reologico di un terreno e quali le sue caratteristiche, in funzione della propria appartenenza a un gruppo.

Sulla base di quanto riportato nella documentazione disponibile, all'interno del Volume Geotecnico Significativo, alla scala dello sbarramento, sono state riconosciute, classificate e caratterizzate tre unità geotecniche, riferibili ai depositi detritici di differente genesi presenti all'interno del VGS. Tali unità presentano un comportamento e caratteristiche geotecniche che li differenziano tra di loro. Al di sotto di tali unità geotecniche sono state riconosciute due unità litotecniche, riferibili alla stessa Formazione del Macigno ma suddivise sulla base delle caratteristiche geotecniche e geomeccaniche, ovvero un'alternanza arenaceo-pelitica da mediamente ad intensamente fratturata ed il sottostante ammasso flyschide debolmente fratturato ed alterato.

Sia i rilievi geologici in superficie, sia la cartografia geologica di riferimento, unitamente alle indagini svolte, evidenziano in profondità una sostanziale omogeneità all'interno di ciascuna delle due unità litotecniche riconosciute. Nell'area dell'invaso e dello sbarramento l'ammasso risulta essere ricoperto da coltri e depositi detritici di differente genesi, derivanti da fenomeni gravitativi e dall'azione glaciale ed intrinsecamente connessi tra di loro. La caratterizzazione fisica, meccanica ed elastica di tali depositi ha permesso di comprenderli entrambi all'interno di una stessa unità geotecnica, in quanto il comportamento di tali terreni può essere assimilabile dal punto di vista geotecnico. Si assume pertanto che tali terreni siano compresi all'interno di una stessa unità per la presente caratterizzazione geomeccanica.

In conclusione, all'interno del Volume Geotecnico Significativo dell'opera sono state riconosciute, classificate e caratterizzate n. 5 unità geologico-tecniche, riferibili ai terreni detritici derivanti da fenomeni gravitativi e dall'azione glaciale ed alla successione arenaceo-pelitica della Formazione del Macigno, riportate al seguito come:

- **Unità Geotecnica 1 – Ghiaia con sabbia limosa (UG-1):** individuabile nei terreni ghiaiosi con sabbia limosa, che caratterizzano l'area dell'imposta e dell'invaso. Si tratta di depositi fluvio-glaciali caratterizzati da una matrice sabbioso-limosa prevalente.
- **Unità Geotecnica 2 – Ghiaia grossolana con trovanti in matrice sabbioso limosa (UG-2):** si tratta di un'unità detritica di origine fluvio-glaciale caratterizzata dalla presenza di ghiaia e trovanti immersi in una matrice sabbioso-limosa.
- **Unità Geotecnica 3 – Ghiaia con sabbia e limo (UG-3):** individuabile nei terreni ghiaiosi con sabbia limosa, posizionati al di sotto dei depositi di origine fluvio-glaciale. Si tratta di depositi di origine morenica di spessore limitato e non costante lungo lo sviluppo dell'imposta.
- **Unità Litotecnica 1 – Flysch arenaceo-pelitico da fortemente a mediamente fratturato (UL-1):** identificabile con lo spessore di ammasso roccioso flyschide sottostante il piano di posa dello sbarramento e presente nel VGS;

- Unità Litotecnica 2 – Flysch arenaceo-pelitico debolmente fratturato ed alterato (UL-2):**
 identificabile con le torbiditi arenaceo-pelitiche a ridotta fratturazione ed alterazione che si trovano al di sotto di UL-1.

Nella tabella seguente si riporta la matrice di correlazione tra unità stratigrafiche e unità geotecniche scaturita dall'analisi.

MATRICE DI CORRELAZIONE UNITÀ STRATIGRAFICHE – UNITÀ LITOTECNICHE	
Depositi detritici derivanti da fenomeni di origine fluvio glaciale	UG-1 = Ghiaia con sabbia limosa
Depositi detritici derivanti da fenomeni di origine fluvio glaciale	UG-2 = Ghiaia grossolana con trovanti in matrice sabbioso limosa
Depositi detritici derivanti da fenomeni di origine fluvio glaciale	UG-3 = Ghiaia con sabbia e limo
Formazione del Macigno = Torbiditi arenaceo-pelitiche con granulometria da media, con intervalli pelitici, costituiti da siltiti, marne siltose ed argilliti sottili e laminati	UL-1 = Flysch arenaceo-pelitico da fortemente a mediamente fratturato
Formazione del Macigno = Torbiditi arenaceo-pelitiche con granulometria da media, con intervalli pelitici, costituiti da siltiti, marne siltose ed argilliti sottili e laminati	UL-2 = Flysch arenaceo-pelitico debolmente fratturato ed alterato

Nella trattazione che segue, si presentano in sezioni geotecniche i rapporti spaziali tra le unità UG-1, UG-2, UG3, UL-1, UL-2 ed il corpo diga e, successivamente, si analizzano le stesse UG-1,

UG-3 e UG-3 sulla base dei dati disponibili, per giungere alle loro classificazioni e caratterizzazioni.

Al contempo, come evidenziato nella premessa del presente capitolo, **la classificazione e la caratterizzazione geotecnica e geomeccanica delle unità litotecniche riferibili alla Formazione del Macigno, è stata definita validando la caratterizzazione realizzata nel contesto della relazione geotecnica per il Progetto Definitivo di Dismissione della diga e realizzazione di una nuova opera di presa del 2018.**

5.2 Sezioni geotecniche della zona di imposta dello sbarramento

Dall'analisi dei dati geologici e geotecnici derivanti dalla letteratura geologica, dalla documentazione storica e dalle indagini geognostiche è stato possibile costruire n. 2 sezioni geotecniche interpretative della zona di imposta dell'opera: n. 1 longitudinale e n. 1 trasversale al coronamento.

Si riportano di seguito le tracce di 2 sezioni geotecniche, su base della cartografia geologica in scala 1:10'000 (Figura 5.1), realizzate longitudinalmente e trasversalmente al coronamento dell'opera. La sezione A-A rappresenta quella longitudinale al coronamento dell'opera, mentre la sezione B-B quella trasversale (rispettivamente in Figura 5.2 e Figura 5.3).

Nelle sezioni, la geometria dell'opera è stata ricostruita in base ai disegni disponibili ed alle indagini effettuate, così come gli spessori e l'andamento delle unità geologiche è stato dedotto dai sondaggi geognostici realizzati, unitamente alle informazioni derivanti dalle prove geofisiche.

In particolare, al di sotto del corpo diga sono stati individuati depositi fluvio – glaciali caratterizzati da matrice incoerente costituita da ghiaia con sabbia limosa, seguiti, più in profondità, da depositi fluvio – glaciali composti in prevalenza da trovanti arenacei in matrice ghiaioso – sabbiosa. Al di sotto di quest'ultimi sono stati riscontrati depositi morenici in posto costituiti da ghiaia, sabbia e limo addensati di colore grigio. Infine, è stata rilevata la presenza di arenaria grigia compatta, identificabile con la formazione del Macigno, sovrastata da un livello di ammasso con un medio-elevato grado di fratturazione ed alterazione.

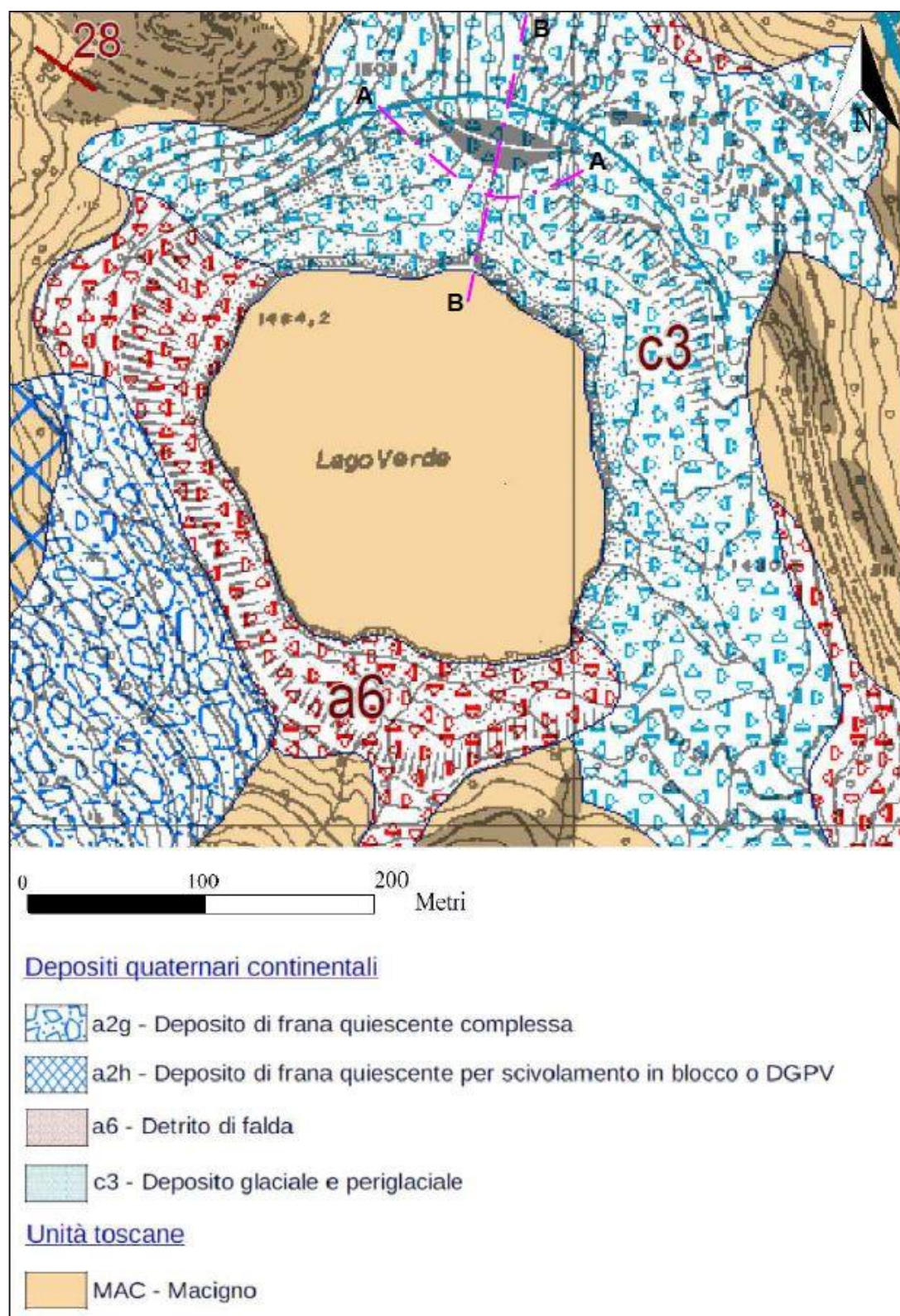


Figura 5.1 Stralcio della Carta Geologica dell'appennino emiliano romagnolo a scala 1:10'000 nella quale sono riportate in viola le tracce delle sezioni geotecniche A-A e B-B
 [Elemento 234020 – Carta Geologica dell'appennino emiliano – romagnolo, 2011]

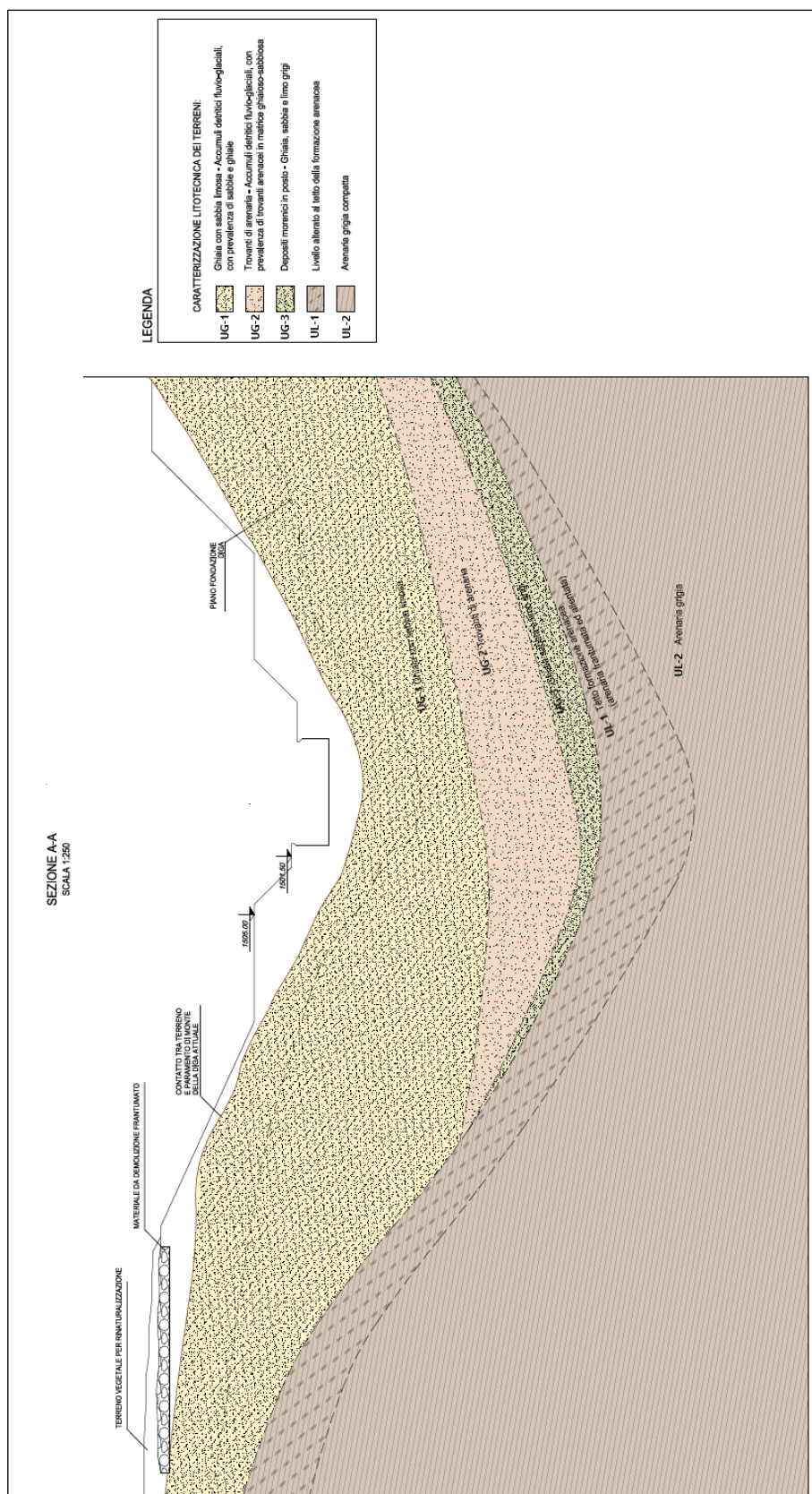


Figura 5.2 Sezione geotecnica interpretativa A – A longitudinale al coronamento dell'opera

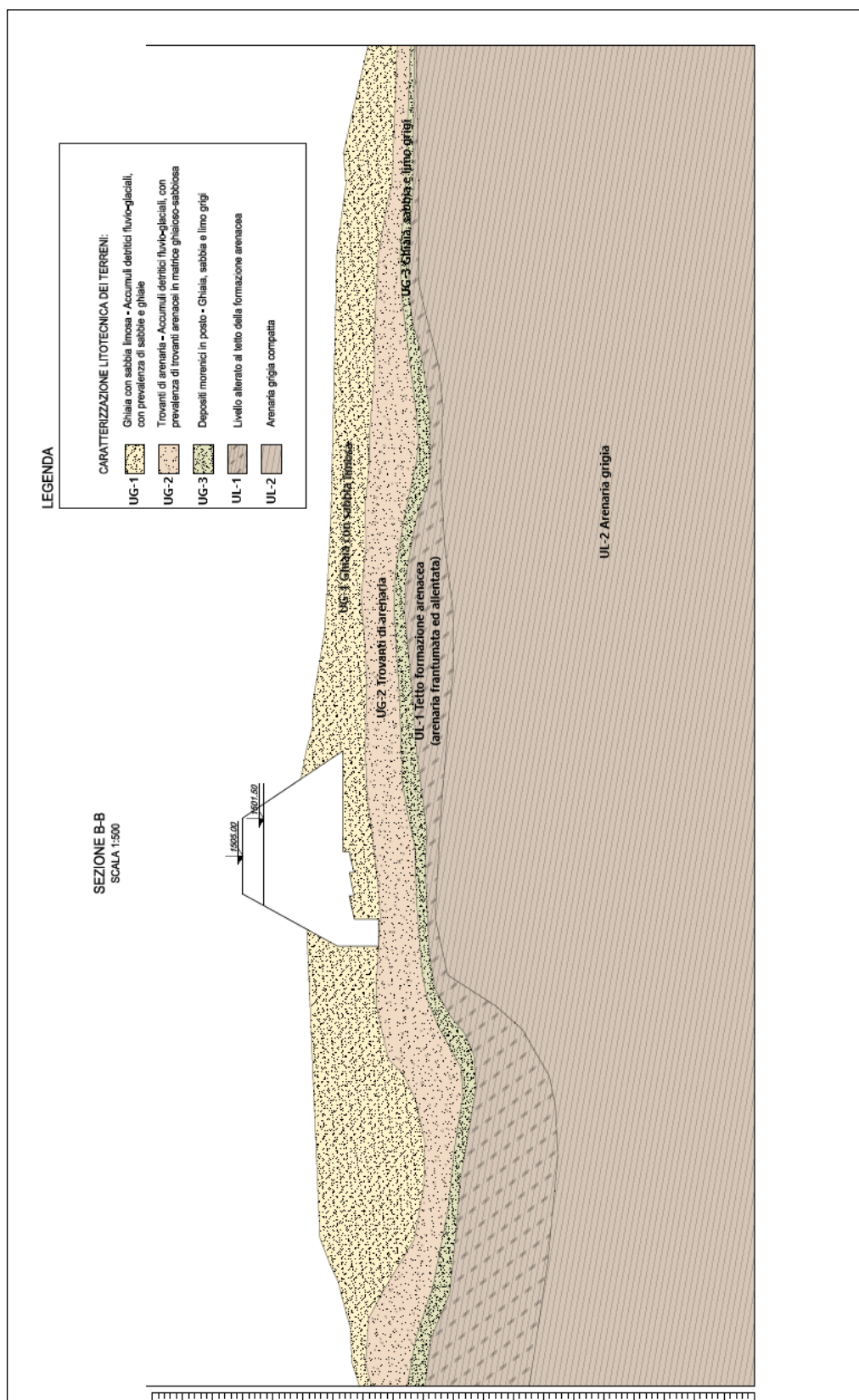


Figura 5.3 Sezione geotecnica interpretativa B-B trasversale al coronamento dell'opera

5.3 Analisi granulometrica e determinazione dei limiti di liquidità e plasticità

5.3.1 SONDEDILE S.r.l., PROGEO S.r.l. e ISTITUTO SPERIMENTALE PER L'EDILIZIA – ISTEDIL S.p.A. (2008-2009)

Al fine di classificare i terreni rinvenuti durante i sondaggi, sono state eseguite in totale n. 19 analisi granulometriche, su campioni rimaneggiati prelevati in adiacenza alle prove SPT.

I risultati ottenuti per ogni verticale indagata sono riportati in Figura 5.4, Figura 5.5, Figura 5.6 e Figura 5.7, mentre l'insieme dei risultati è in Figura 5.8.

Le frazioni granulometriche dei campioni analizzati possono essere così sintetizzate:

- **frazione grossolana:**
 - 17 ÷ 63 % (39 % in media) di ghiaia;
 - 32 ÷ 43 % (38 % in media) di sabbia.
- **frazione fine:**
 - 5 ÷ 40 % (23 % in media) di limo.

In definitiva i terreni possono essere contenuti all'interno di un fuso granulometrico che permette di classificarli, secondo AGI 1977, come **ghiaie con sabbie limose** o **sabbie con ghiaie limose**.

La prevalente presenza di materiale incoerente è confermata dalla assenza di plasticità, come evidenziato dalla possibilità di determinare i limiti di Atterberg solo su 4 campioni che hanno, comunque, ottenuto un limite liquido $WL = 18 \%$ a fronte di un indice di plasticità massimo $IP = 2 \%$, come mostrato in Figura 5.10.

Potendo disporre dei risultati di n. 9 analisi granulometriche eseguite nel 2003 da campioni prelevati dalle cassette dei sondaggi della campagna di indagini del 1997, si è riunito l'insieme delle granulometrie nella Figura 5.9.

Si nota come i campioni prelevati nel 2003 siano pienamente confrontabili con gli attuali, ma presentino in generale una percentuale minore di fino. Tale differenza è probabilmente dovuta al tempo intercorso fra l'esecuzione dei sondaggi ed il prelievo dei campioni, che ha comportato una perdita del materiale più "fino" dalle cassette in legno dove erano contenute le carote.

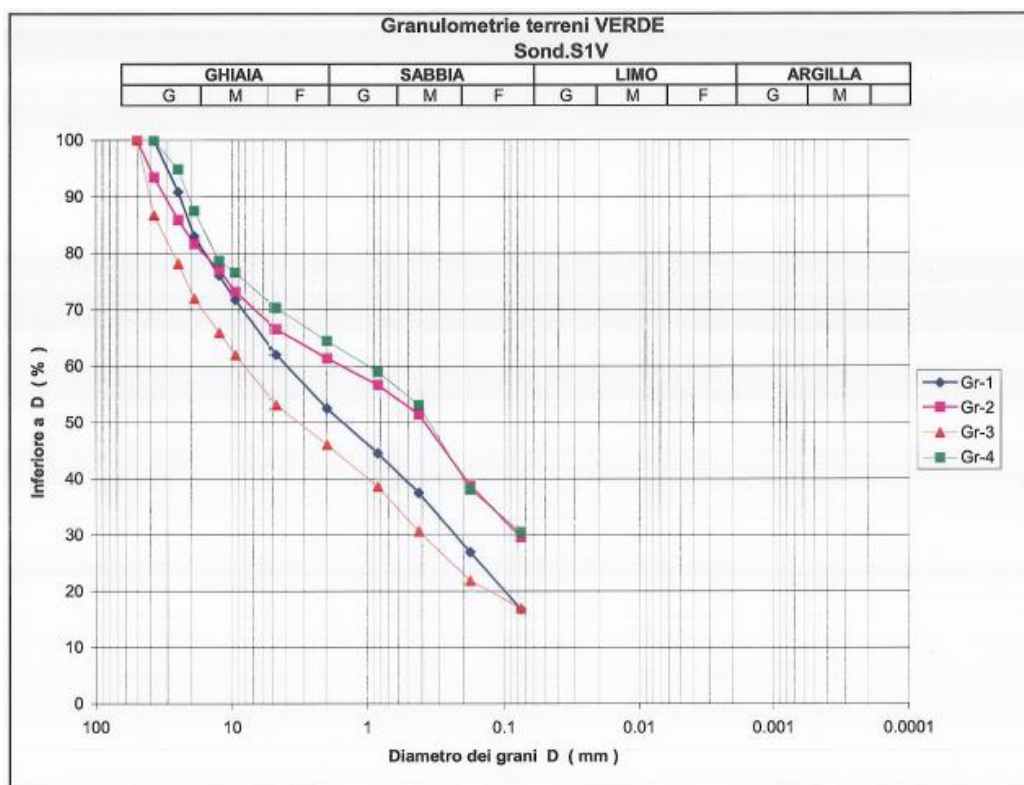


Figura 5.4 Curve granulometriche sondaggio S1V

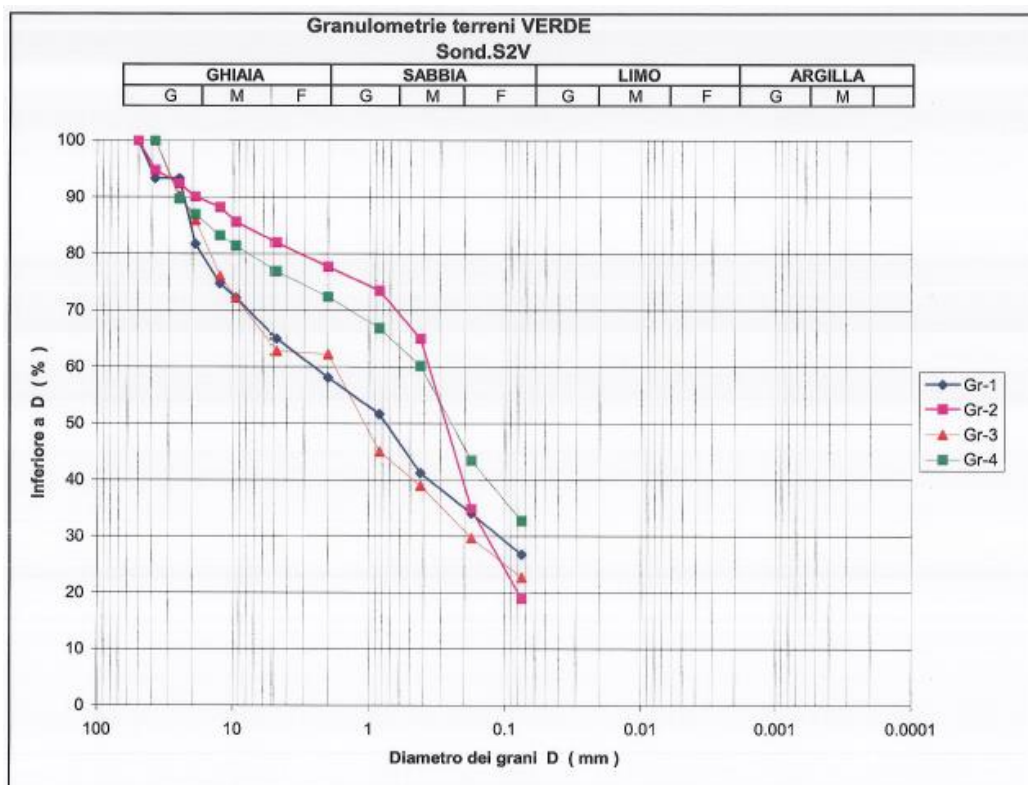


Figura 5.5 Curve granulometriche sondaggio S2V

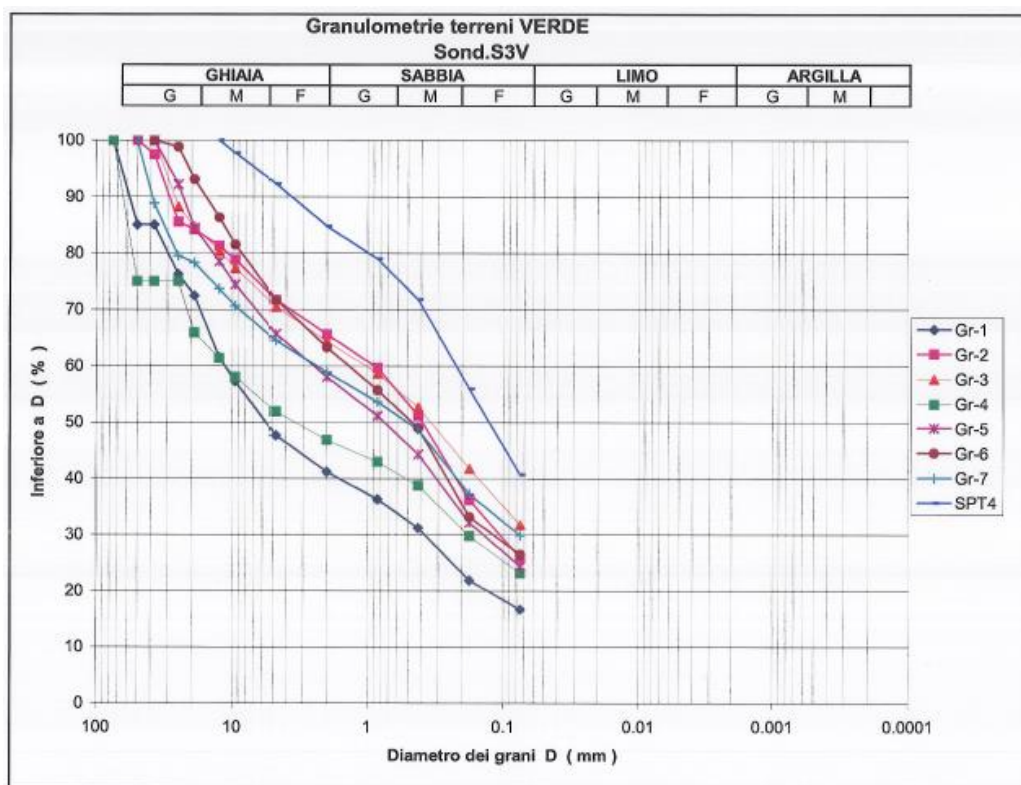


Figura 5.6 Curve granulometriche sondaggio S3V

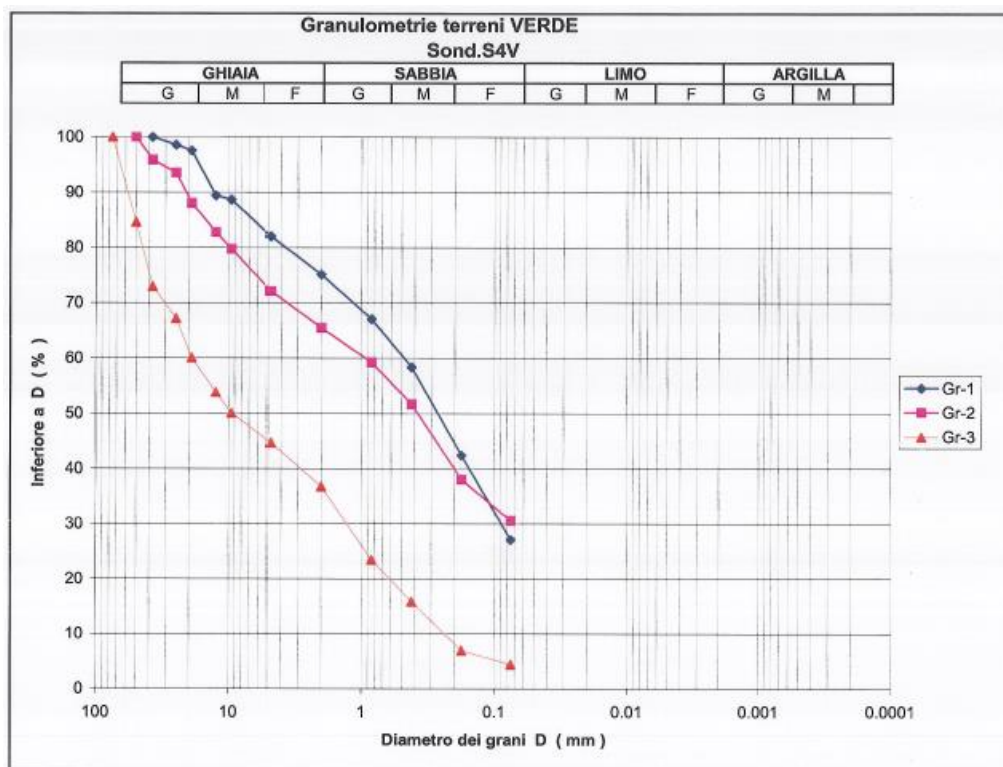


Figura 5.7 Curve granulometriche sondaggio S4V

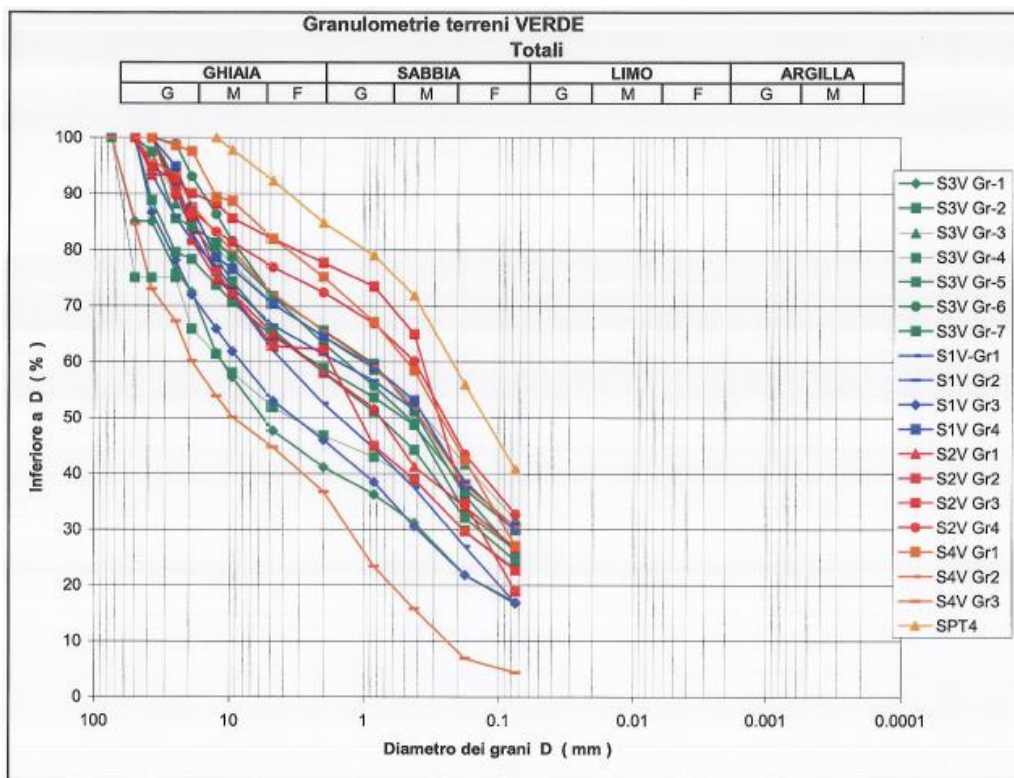


Figura 5.8 Curve granulometriche Totali

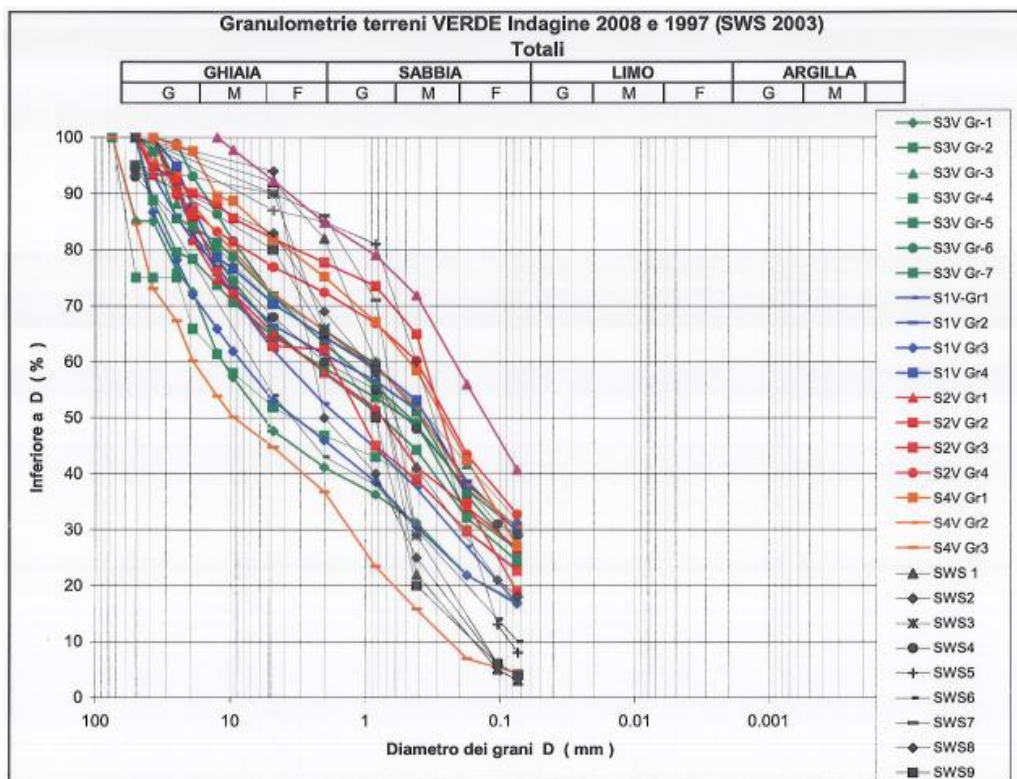


Figura 5.9 Curve granulometriche considerando anche la campagna indagini 1997

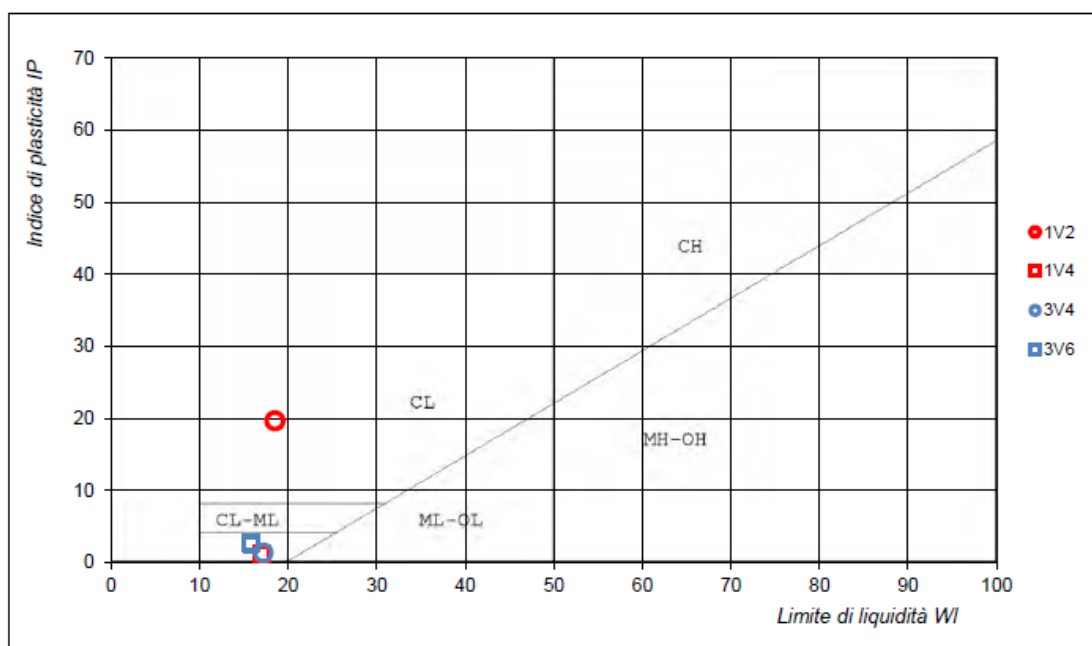


Figura 5.10 Determinazione limiti di Atterberg

5.3.2 ENEL (2012)

Nella relazione non sono riportate indicazioni specifiche riguardanti l'analisi granulometrica dei terreni di fondazione.

5.3.3 GEOEXPLORATION (2020)

Nella relazione non sono riportate indicazioni specifiche riguardanti l'analisi granulometrica dei terreni di fondazione.

5.4 Caratteristiche fisiche e proprietà indice

5.4.1 SONDEDILE S.r.l., PROGEO S.r.l. e ISTITUTO SPERIMENTALE PER L'EDILIZIA – ISTEDIL S.p.A. (2008-2009)

Non risultano disponibili dati derivanti da prove di laboratorio affidabili per la determinazione del peso dell'unità di volume. Pertanto, si è deciso di realizzare la caratterizzazione delle proprietà fisiche a partire dalle numerose ed estese indagini geofisiche disponibili.

5.4.2 ENEL (2012)

Nella relazione non sono riportate indicazioni specifiche riguardanti l'analisi granulometrica dei terreni di fondazione.

5.4.3 GEOEXPLORATION (2020)

Nella relazione non sono riportate indicazioni specifiche riguardanti l'analisi granulometrica dei terreni di fondazione.

5.5 Parametri meccanici di resistenza al taglio

5.5.1 SONDEDILE S.r.l., PROGEO S.r.l. e ISTITUTO SPERIMENTALE PER L'EDILIZIA – ISTEDIL S.p.A. (2008-2009)

Sono state eseguite n. 6 prove penetrometriche dinamiche (SPT) in corrispondenza dei terreni granulari e coesivi, sondaggi S1V, S2V, S3V e S4V (Figura 2.6).

Lo stato di addensamento dei materiali è stato determinato con le relazioni proposte da Bazaraa (1967) e Skempton (1986), valide rispettivamente per sabbie sovraconsolidate e costipate in cantiere e per ghiaie e sabbie aventi percentuali al 50%. Il materiale è stato caratterizzato in termini di resistenza al taglio drenata, utilizzando la relazione empirica di Bolton (1986). L'angolo di resistenza al taglio di picco (ϕ'_{picco}) è stato stimato in funzione della tensione media efficace alla profondità di prova, della associata densità relativa, cautelativamente dedotta con la relazione di Bazaraa, e dell'angolo di resistenza al taglio a volume costante (ϕ'_{cv}) assunto pari a 36° da B.K. Hough (1957). L'angolo di resistenza al taglio di picco (ϕ'_{picco}), è stato inoltre stimato, per confronto, con le relazioni di Schmertmann (1977) e de Mello (1971), valide rispettivamente, per ghiaia media e fine e sabbia e ghiaia poco limosa e sabbie in genere.

Le elaborazioni delle prove sono sinteticamente riportate in Tabella 5.1, le informazioni di dettaglio sono invece osservabili in Figura 5.11.

Tabella 5.1 Risultati ed elaborazioni delle SPT effettuate sul materiale.

-	Profondità [m]	Nspt	N1,60	Bazaraa (1967) Dr [-]	Skempton (1986) Dr [-]	Bolton (1986) ϕ'_{picco} [gradi]	De Mello (1971) ϕ'_{picco} [gradi]	Schmertmann (1977) ϕ'_{picco} [gradi]
S1V	13.45	63	49	0.72	0.74	42	45	44
S1V	15.45	70	54	0.73	0.77	42	44	44
S2V	3.45	47	52	0.80	0.79	47	50	44
S2V	4.95	70	71	0.91	0.90	48	53	45
S2V	6.45	52	49	0.76	0.76	45	49	44
S2V	7.95	81	77	0.92	0.90	47	52	45
S2V	9.45	57	49	0.75	0.75	44	47	44
S3V	5.45	25	25	0.54	0.56	42	43	42
S3V	6.45	38	36	0.65	0.66	43	46	43
S3V	7.95	21	17	0.47	0.50	40	40	42
S3V	9.45	26	20	0.51	0.53	40	41	42
S3V	10.95	36	27	0.58	0.60	41	42	43
S3V	13.95	37	25	0.56	0.59	40	40	42
S3V	16.65	51	35	0.63	0.67	41	41	43
S3V	18.45	63	45	0.68	0.72	41	42	43
S3V	19.95	47	29	0.57	0.63	40	38	43
S4V	4.95	78	78	0.96	0.94	49	53	46
S4V	6.45	90	89	1.00	0.97	49	54	46
	media	50	46	0.63	0.66	42	43	43

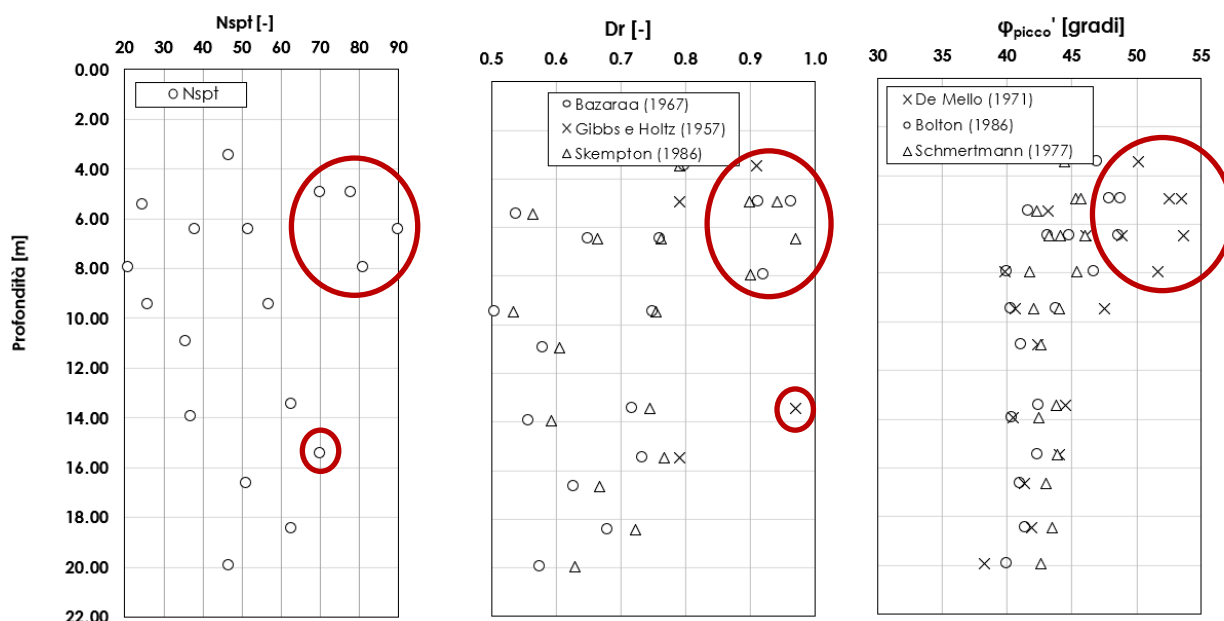


Figura 5.11 Profili di N_{spt} , Dr e Φ' relativi ai sondaggi S1V, S2V, S3V e S4V

risultati sono riportati in Tabella 5.1 e in Figura 5.11. È possibile notare che:

- In generale si nota un sostanziale aumento del numero di colpi con l'aumentare della profondità dal piano di campagna, indipendentemente dalla verticale indagata.
- Il sondaggio S1V inizia dal piano di coronamento della diga e la profondità di prova è riferita a tale quota; è immediato verificare come i valori siano in linea con il sondaggio S2V. I valori minori sono stati rilevati nel sondaggio S3V.
- I valori a rifiuto ($N_{spt}=100$) sono imputabili alle caratteristiche granulometriche dei terreni indagati, costituiti in generale da ghiaie con sabbie limose con presenza di ciottoli e/o trovanti, mentre gli altri valori, tenuto conto della regolarità degli andamenti con la profondità, sono da ritenere pienamente rappresentativi della matrice dei terreni.
- Nella determinazione dei parametri meccanici di resistenza a taglio e di densità relativa sono state escluse le prove che hanno fornito valori del numero di colpi $N_{spt} > 65$ (cerchiate in rosso nella Figura 5.11) in quanto dovuti alla presenza di ciottoli e/o trovanti.
- La **densità relativa del materiale dell'unità UG-1 risulta essere compresa tra 0.50 e 0.80 con un valore medio pari a circa 0.64** che, in base alle classificazioni presenti in letteratura tecnica (Gibbs e Holtz 1957) connotano il materiale dell'unità UG-1 come **mediamente addensato** (Figura 5.12).
- I valori dell'**angolo di attrito per l'unità UG-1 risultano compresi tra i 40° e i 45° con un valore medio pari a circa 43°**.

Tabella 9.5. Valutazione della densità relativa sulla base dei valori di N non corretti		
CLASSIFICAZIONE	N	D_r
Molto sciolta	0 – 4	0 – 15%
Sciolta	4 – 10	15 – 35%
Media	10 – 30	35 – 65%
Densa	30 – 50	65 – 85%
Molto densa	> 50	85 – 100%

Figura 5.12 Stima della densità relativa dai risultati di prove SPT (Gibbs e Holtz 1957)

Sono state eseguite prove di taglio diretto, secondo la normativa AGI1994, su 5 campioni di materiale passante al vaglio 4.76 mm, ricostruiti e riconsolidati in laboratorio vista l'impossibilità di prelevare campioni indisturbati.

I risultati sono riportati in Tabella 5.2.

Tabella 5.2 Risultati delle prove di taglio diretto

Sondaggio	Campione	Profondità	φ'_r	φ'	c'
[-]	[-]	[m]	[-]	[-]	[kPa]
S2V	CR3	7.0-7.5	35.4	44.7	5
S3V	CR3	11.3-11.7	33.0	37.9	-
S3V	CR5	16.6-17.0	35.8	37.2	-
S3V	CR7	20.4-21.0	32.3	37.1	-
S4V	CR2	6.5-7.0	30.7	35.0	-

Tali provini ricostruiti, però, non sono rappresentativi del materiale indagato e quindi questi risultati sono da considerare solamente come limiti inferiori dei valori attesi in situ.

5.5.2 ENEL (2012)

Nella relazione non sono riportate indicazioni specifiche riguardanti l'analisi granulometrica dei terreni di fondazione.

5.5.3 GEOEXPLORATION (2020)

Nella relazione non sono riportate indicazioni specifiche riguardanti l'analisi granulometrica dei terreni di fondazione.

5.6 Permeabilità

5.6.1 SONDEDILE S.r.l., PROGEO S.r.l. e ISTITUTO SPERIMENTALE PER L'EDILIZIA – ISTEDIL S.p.A. (2008-2009)

All'interno dei materiali attraversati sono state eseguite, in avanzamento alla perforazione, prove di permeabilità di tipo Lefranc e di tipo Lugeon.

L'insieme dei risultati è riportato in Tabella 5.3.

Come immediatamente verificabile il coefficiente di permeabilità ottenuto dalle prove Lefranc, eseguite nello strato di materiale incoerente, è per tutte le prove dello stesso ordine di grandezza:

il valore medio si attesta su $K = 3.2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$.

I risultati delle prove Lugeon, elaborate secondo le Raccomandazioni AGI, hanno fornito valori di $K = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ nello spessore di trovanti e di $K = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ all'interno dello strato arenaceo.

La prova eseguita nell'arenaria ha mostrato una roccia pressoché impermeabile, ma tale comportamento si ritiene rappresentativo della roccia intatta invece che dell'ammasso nel suo insieme.

I valori ottenuti nella campagna di indagine del 1997 avevano fornito coefficienti di permeabilità variabili fra $1 \cdot 10^{-6}$ e $1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$, nei materiali alle varie profondità, senza una chiara differenza fra terre, trovanti e formazione di base.

In generale, le prove hanno permesso di identificare dei valori decrescenti della permeabilità con la profondità passando dai terreni, allo strato arenaceo intensamente fratturato ed infine all'arenaria compatta.

Tabella 5.3 Risultati delle prove Lefranc

Prova	sondaggio	Profondità da p.c. [m]	k [m/s]
Lefranc	S1V	17.5-18.0	3.86E-05
	S1V	22.0-22.5	1.37E-07
	S3V	10.0-10.5	5.07E-05
	CH3V	15.0-15.5	3.09E-05
	CH3V	18.0-18.5	1.65E-05
	S4V	8.5-9.0	4.16E-05
Lugeon	S1V	33.0-38.0	6.00E-07
	S2V	10.0-14.5	1.00E-06
	S2V	25.0-30.0	5.00E-07
	S3V	23.0-27.5	5.00E-07
	S4V	32.0-37.0	>>10 ⁻⁷

5.6.2 ENEL (2012)

Nella relazione non sono riportate indicazioni specifiche riguardanti l'analisi granulometrica dei terreni di fondazione.

5.6.3 GEOEXPLORATION (2020)

Nella relazione non sono riportate indicazioni specifiche riguardanti l'analisi granulometrica dei terreni di fondazione.

5.7 Parametri di rigidità elastici

5.7.1 SONDEDILE Srl - ISMES (2008-2009)

Sono state eseguite, presso Verde, n. 3 prove dilatometriche su roccia tipo DRT (dilatometric rock test) in foro di sondaggio (Verde: SV3 D1, D2 e D3).

Le prove eseguite sono state mirate alla determinazione della deformabilità/elasticità in sito degli ammassi rocciosi investigati, in prossimità degli sbarramenti citati, ed in condizioni geostrukturali e tensionali diversificate.

In **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** sono riepilogati i risultati delle prove dilatometriche eseguite. Il valore medio del modulo di elasticità presenta un valore variabile con la profondità, passando da circa 800 MPa alla profondità di 22.5 m a 152 MPa a 31.5 m.

I valori del modulo di elasticità di Young sono stati ricavati dalla pendenza media del ciclo stesso ovvero dal tratto di scarico o ricarico. EG, modulo di prima compressione, calcolato sulla curva vergine, mentre i moduli di elasticità E1 ed E2 sono stati calcolati rispettivamente nel primo e nel secondo ciclo di scarico ricarico.

Tabella 5.4 - Riepilogo delle prove dilatometriche in foro

Sondaggio	Profondità [m]	RQD [%]	Litotipo	EG [MPa]	E1 [MPa]	E2 [MPa]	E _{medio} [MPa]
SV3-D1	22.5	15	Arenaria medio fine grigia	168	919	787	853
SV3-D2	26.5	80	Arenaria fratturata	1228	915	2877	1896
SV3-D3	31.5	35	Arenaria medio fine grigia	203	119	185	152

5.8 Parametri dinamici

La caratterizzazione dinamica dei materiali costituenti il sottosuolo è stata effettuata utilizzando i risultati delle prove geofisiche di sito (cross-hole e sismiche a rifrazione), la cui ubicazione è riportata in Figura 5.13.

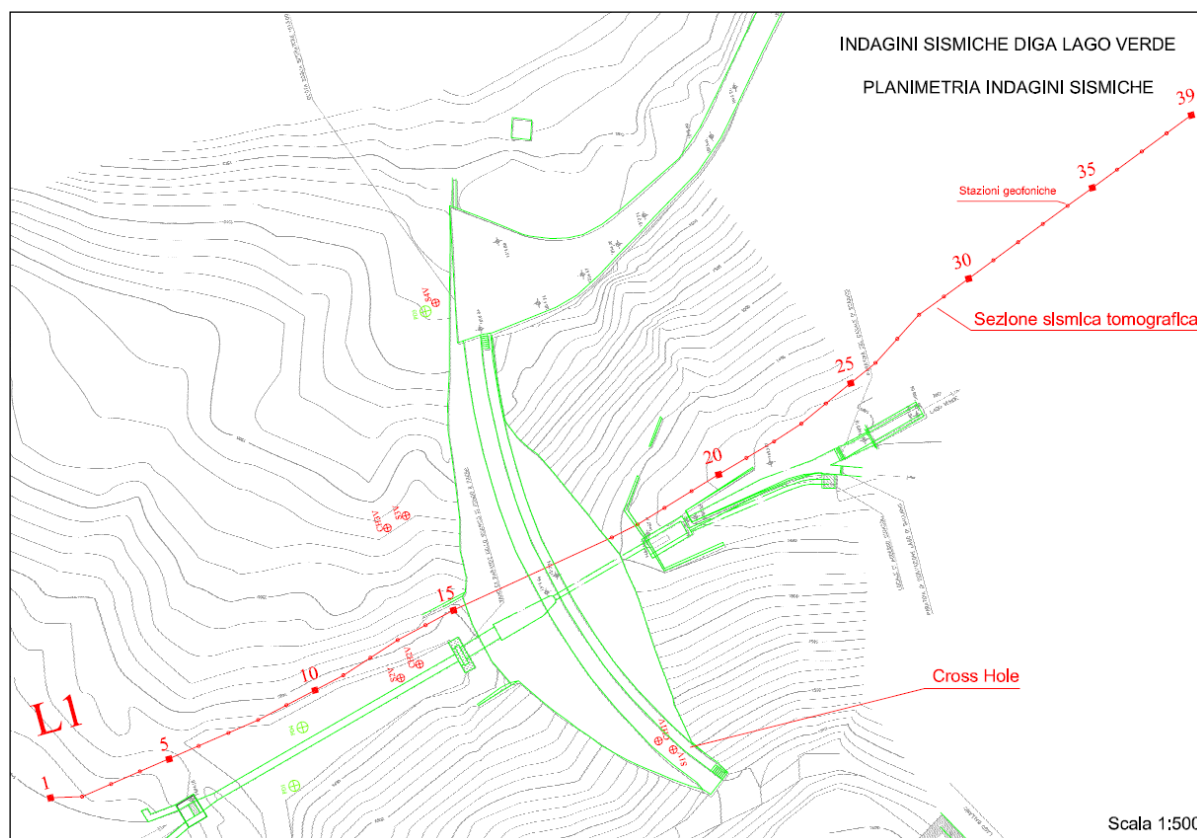


Figura 5.13 Posizionamento delle indagini geofisiche realizzate nel corso della campagna indagini del 2008-2009

I parametri necessari alla definizione del modello elastico lineare equivalente impiegato per le analisi dinamiche sono riportati nei seguenti paragrafi.

5.8.1 SONDEDILE Srl - ISMES (2008-2009)

I moduli di rigidezza a basse deformazioni (G_0 , E_0) sono stati dedotti a partire dalle prove geofisiche di sito effettuate da PROGEO Srl nel 2009.

5.8.1.1 Prove Cross-hole

Le prove geofisiche in foro sono state eseguite su tre coppie di fori, S1V-CH1V, S2V-CH2V, S3V-CH3V, che si distribuiscono lungo lo sviluppo trasversale della diga. L'analisi degli andamenti delle velocità delle onde di compressione e taglio con la profondità mostra una buona corrispondenza tra le onde P e S lungo le verticali.

Si possono associare i valori misurati delle velocità delle onde di taglio a materiali addensati. Si evidenziano valori delle onde di taglio superiori a 800 m/s, associabili a materiali del bedrock sismico, già entro i primi 12 m da piano campagna, all'interno dell'unità UG-1. La verticale di indagine realizzata a partire dal coronamento è caratterizzata da valori di velocità delle onde che presentano un netto incremento dei valori al di sotto della fondazione della diga. Questo comportamento può essere imputabile al carico imposto dal corpo diga che insiste sui depositi investigati e che hanno generato un maggiore addensamento nei terreni direttamente interessati.

Sono state eseguite n. 3 prove cross-hole nelle coppie di fori appositamente attrezzati, intercettando rispettivamente le unità UG-1, UG-2, UG-3, UL-1 e UL-2. I risultati delle misure di velocità delle onde longitudinali e trasversali sono rappresentati in forma numerica in Tabella 5.5, Tabella 5.6 e Tabella 5.7 sotto forma di diagrammi in Figura 5.14, Figura 5.15 e Figura 5.16.

Le coppie di fori considerate sono state: S1V-CH1V, S2V-CH2V e S3V-CH3V.

I risultati, in termini di **velocità delle onde di taglio** negli spessori dei terreni, indicano un generale **andamento crescente con la profondità per l'unità UG-1**. I modesti spessori investigati per le unità UG-2 e UG-3 non permettono di apprezzare una crescita notevole delle velocità delle onde di taglio, che presentano comunque valori medi rispettivamente di **1300 m/s e 1200 m/s**.

Lo stesso si può affermare per quanto riguarda le **onde P**, con **valori linearmente crescente con la profondità per l'unità UG-1**, mentre si possono assumere dei **valori medi pari a 2900 m/s e 2800 m/s rispettivamente per UG-2 e UG-3**.

Tabella 5.5 Velocità delle onde e parametri meccanici dalla prova S1V-CH1V

stratigrafia	CH1V-S1V						
	profondità	Vp	Vs	v	ρ_{din}	Eo	Go
	[m]	[m/s]	[m/s]	[-]	kg/m ³	[MPa]	[MPa]
UG1	13	1257	660	0.31	1979	2302	879
	14	1259	697	0.28	1980	2508	980
	15	1462	735	0.33	2037	2985	1122
	16	1474	701	0.35	2040	2767	1022
	17	1841	746	0.40	2128	3384	1207
	18	2829	798	0.46	2309	4367	1499
	19	3482	1452	0.39	2402	14398	5162
	20	3561	1569	0.38	2412	16700	6053
	21	3491	1089	0.45	2403	8401	2905
	22	3465	1693	0.34	2399	18833	7011
	23	3782	1727	0.37	2440	20298	7417
	24	3743	1763	0.36	2435	20945	7715
UG2	25	3480	1630	0.36	2401	17684	6504
	26	3662	1616	0.38	2425	17804	6455
	27	3553	1565	0.38	2411	16609	6019
	28	3335	1660	0.34	2382	17870	6691
	29	3618	1419	0.41	2419	13994	4966
	30	3195	1447	0.37	2363	13828	5043
UG3	31	3307	771	0.47	2378	4241	1441
	32	3484	1529	0.38	2402	15807	5724
	33	3344	1816	0.29	2383	20685	8012
UL1	34	4537	1659	0.42	2526	20163	7086
	35	4715	1993	0.39	2544	28662	10301
UL2	36	4451	1368	0.45	2516	13901	4800
	37	4554	2017	0.38	2527	28886	10481

Tabella 5.6 Velocità delle onde e parametri meccanici dalla prova S2V-CH2V

stratigrafia	CH2V-S2V						
	profondità	Vp	Vs	v	ρ_{din}	Eo	Go
	[m]	[m/s]	[m/s]	[-]	kg/m ³	[MPa]	[MPa]
UG1	0	330	140	0.39	1535	85	31
	1	400	142	0.43	1592	93	33
	2	489	134	0.46	1654	88	30
	3	493	137	0.46	1657	92	32
	4	615	144	0.47	1728	107	37
	5	564	144	0.47	1699	105	36
	6	719	241	0.44	1780	303	105
	7	1750	876	0.33	2107	4394	1648
	8	1780	881	0.34	2114	4476	1673
	9	1632	881	0.29	2080	4259	1645
	10	1924	902	0.36	2146	4837	1780
UG2	11	2021	988	0.34	2166	5789	2155
	12	2088	1043	0.33	2179	6447	2417
	13	2233	1071	0.35	2207	6972	2581
	14	2416	1090	0.37	2241	7447	2714
	15	2447	1243	0.33	2246	9382	3537
	16	2456	1132	0.37	2248	8016	2936
	17	2374	1174	0.34	2233	8397	3137
	18	2538	1212	0.35	2262	9159	3387
UG3	19	2550	1159	0.37	2264	8492	3100
	20	2469	1061	0.39	2250	7160	2582
UL1	21	1986	1003	0.33	2159	5883	2214
	22	1966	881	0.37	2155	4686	1705
	23	1964	962	0.34	2154	5455	2032
	24	1971	896	0.37	2156	4833	1764
	25	2037	834	0.40	2169	4304	1538
	26	2035	785	0.41	2169	3849	1362
	27	1961	798	0.40	2153	3916	1398
	28	2018	913	0.37	2165	5046	1840
	29	2276	911	0.40	2215	5265	1874
	30	2399	1024	0.39	2238	6642	2392
	31	2900	1116	0.41	2320	8323	2945
UL2	32	3187	1276	0.40	2362	11011	3920
	33	3225	1355	0.39	2367	12340	4430

Tabella 5.7 Velocità delle onde e parametri meccanici dalla prova S3V-CH3V

stratigrafia	CH3V-S3V						
	profondità	Vp	Vs	v	ρ_{din}	Eo	Go
	[m]	[m/s]	[m/s]	[-]	kg/m ³	[MPa]	[MPa]
UG1	1	479	163	0.43	1648	128	45
	2	525	165	0.45	1676	134	47
	3	518	193	0.42	1672	180	63
	4	617	233	0.42	1729	271	96
	5	789	246	0.45	1811	323	112
	6	851	250	0.45	1838	340	117
	7	914	275	0.45	1863	416	144
	8	1290	309	0.47	1989	569	194
	9	1877	407	0.48	2136	1064	361
	10	1361	538	0.41	2009	1669	593
	11	1375	493	0.43	2013	1423	499
	12	2418	910	0.42	2241	5363	1892
	13	2585	1122	0.38	2270	8061	2912
	14	2885	1097	0.42	2317	8048	2843
	15	2636	1414	0.30	2278	12053	4643
	16	2625	1490	0.26	2276	13005	5151
	17	2984	1606	0.30	2332	15896	6132
	18	2514	1433	0.26	2258	11903	4726
	19	2365	1452	0.20	2232	11486	4796
	20	2494	1481	0.23	2254	12374	5040
	21	2591	1373	0.30	2271	11386	4363
	22	2737	1535	0.27	2294	14003	5511
UL1	23	2871	1676	0.24	2315	16461	6629
	24	3443	1725	0.33	2397	19372	7269
	25	2990	1617	0.29	2333	16085	6219
	26	3251	1354	0.40	2371	12361	4430
	27	3556	1872	0.31	2411	22539	8614
UL2	28	3598	1891	0.31	2417	23066	8809
	29	3328	1798	0.29	2381	20306	7847
	30	3214	1783	0.28	2365	19589	7666
	31	3247	1617	0.34	2370	16867	6317

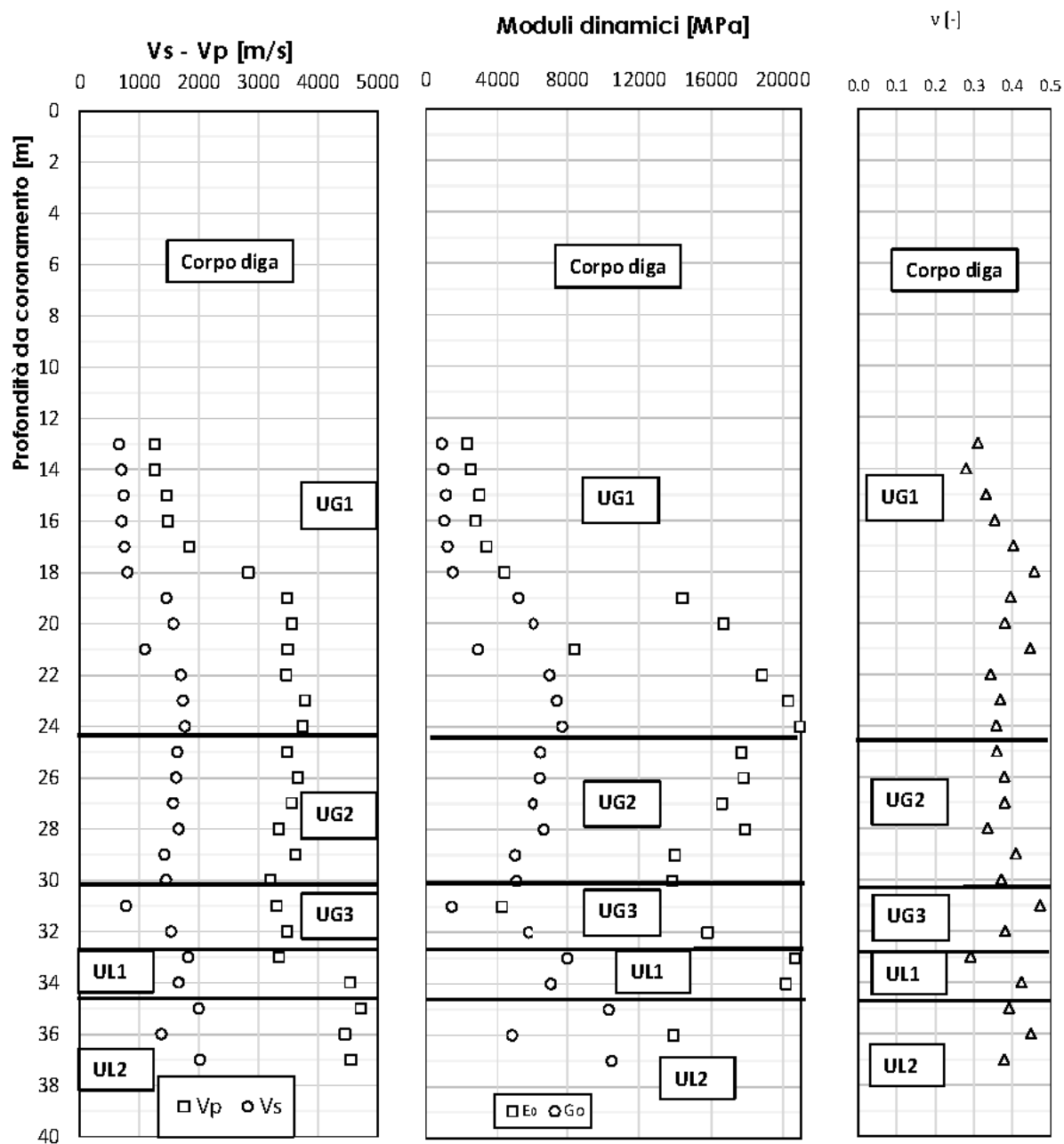


Figura 5.14 Profili delle velocità delle onde P-S, andamento dei moduli di Young e di Taglio dinamici e coefficiente di Poisson dinamico per le unità UG-1, UG-2, UG-3, UL-1 e UL-2 tra la coppia di fori S1V-CH1V

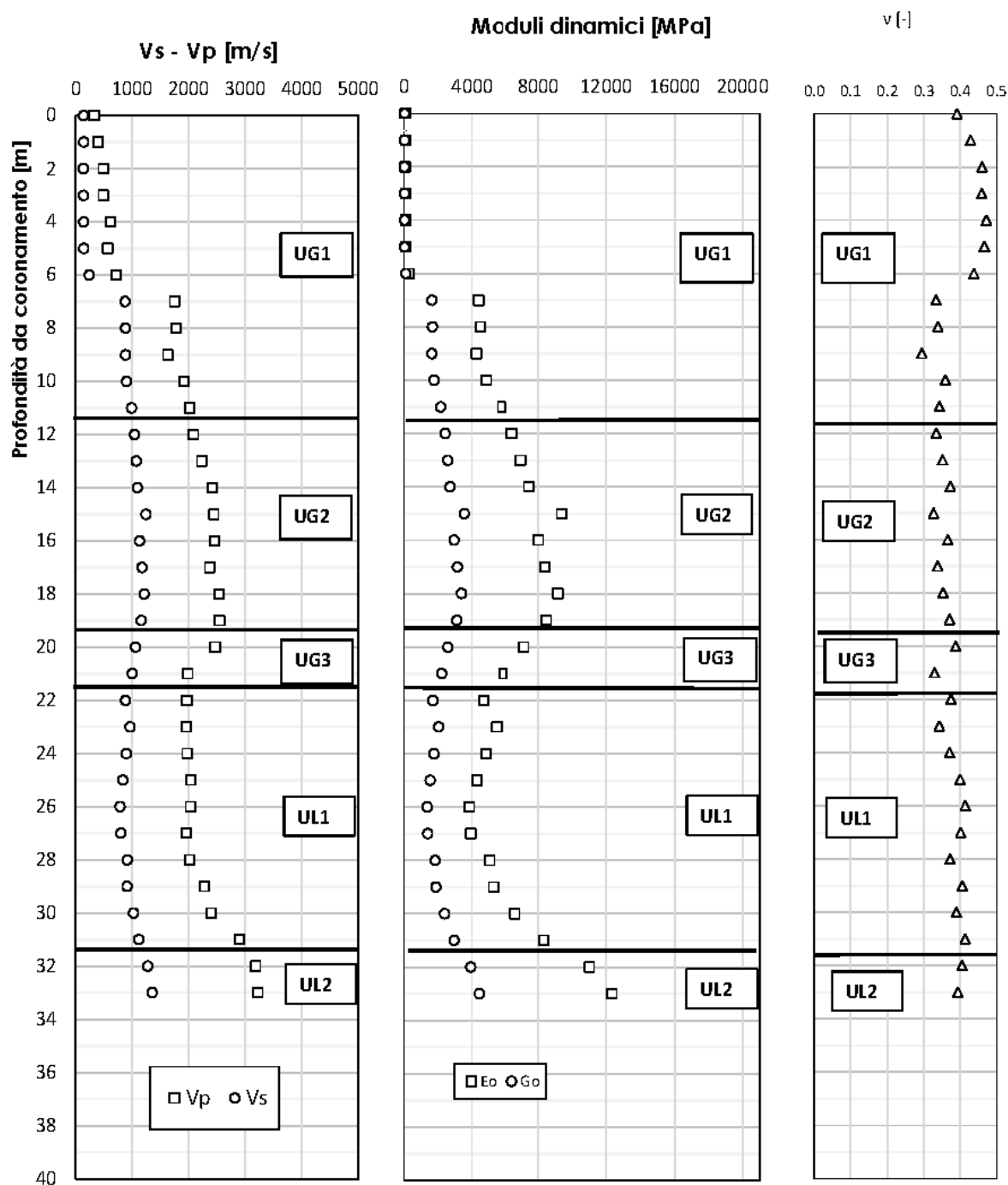


Figura 5.15 Profili delle velocità delle onde P-S per le unità UG-1, UG-2, UG-3, UL-1 e UL-2 tra la coppia di fori S2V-CH2V

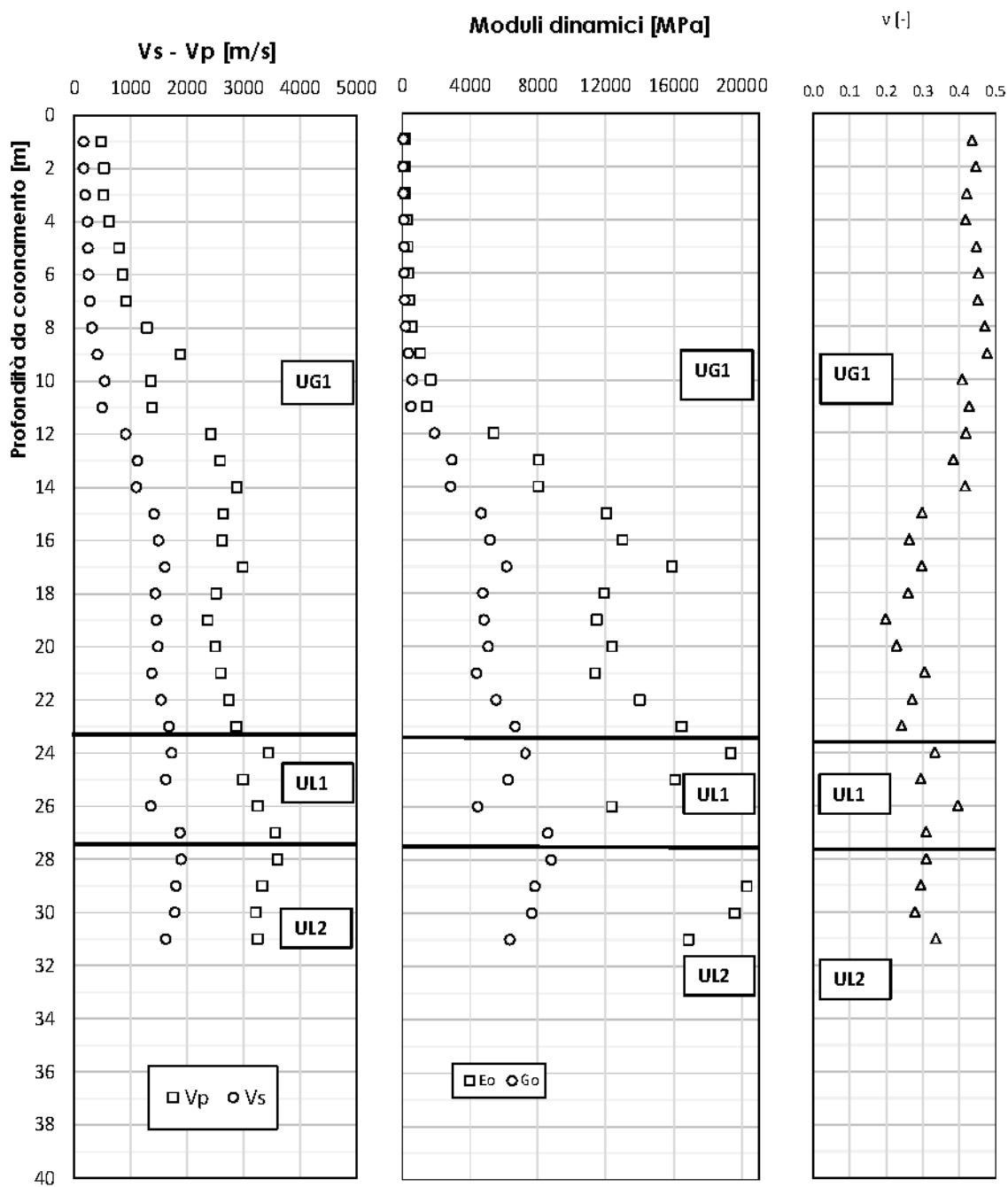


Figura 5.16 Profili delle velocità delle onde P-S per le unità UG-1, UG-2, UG-3, UL-1 e UL-2 tra la coppia di fori S3V-CH3V

I risultati ottenuti in termini di velocità delle onde P ed S sono stati utilizzati per ricavare i parametri meccanici dei materiali per mezzo delle seguenti relazioni, valide nelle ipotesi di semispazio elastico, omogeneo e isotropo:

$$E_0 = V_p^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} ; G_0 = V_s^2 \cdot \rho ; \nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} ; \gamma_{din} = 0.51 \cdot V_p^{0.19}$$

dove sono stati utilizzati i seguenti simboli:

- ρ = massa volumica media dei materiali misurata nella medesima campagna di indagine;
- V_p = velocità delle onde P misurata nello spazio delimitato dal foro di energizzazione e quello di ricezione;
- V_s = velocità delle onde S misurata nello spazio delimitato dal foro di energizzazione e quello di ricezione;
- ν = modulo di Poisson dinamico;
- γ_{din} = peso di volume;
- $E_0; G_0$ = moduli elastici dinamici.

Per quanto riguarda i **pesi per unità di volume**, i valori medi per ogni unità sono riportati in Tabella 5.8.

Tabella 5.8 Pesi per unità di volume

Unità	γ (kN/m ³)
UG-1	20.0
UG-2	23.0
UG-3	22.5

Il **modulo di taglio a basse deformazioni (G_0)** dell'unità **UG-1** cresce apprezzabilmente con la **profondità**, mentre, come per le V_s , nelle **unità UG-2 e UG-3** non si apprezza una crescita importante e possono essere considerati dei **valori medi del modulo di taglio rispettivamente pari a 4400 MPa e 3700 MPa**.

Lo stesso discorso può essere fatto per il **modulo elastico (E_0)**, nell'unità **UG-1** il suo valore **cresce apprezzabilmente con la profondità**, mentre nelle unità **UG-2 e UG-3** possono essere considerati dei valori medi rispettivamente pari a **12100 MPa e 10000 MPa**.

Per quanto riguarda i **coefficienti di Poisson dinamici**, i valori medi per ogni unità sono stati ricavati a partire dalle velocità delle onde P ed S e sono riportati in Tabella 5.9.

Tabella 5.9 Coefficienti di Poisson dinamici

Unità	ν (-)
UG-1	0.38
UG-2	0.36
UG-3	0.37

5.8.1.2 Rilievi sismici a rifrazione

Nel corso della campagna indagini del 2008-2009, sono stati realizzati n. 1 rilievo sismico a rifrazione in corrispondenza degli stendimenti 1 e 2, allo scopo di definire l'assetto stratigrafico dei materiali presenti nell'ambito dello sbarramento e delle aree immediatamente circostanti.

Nel dettaglio, è stata prevista una sezione di sismica a rifrazione con tomografia in onde di compressione, orientata in direzione monte-valle. E' stato inoltre possibile calibrare i risultati ottenuti dallo stendimento sismico grazie alla indagini dirette realizzate nel corso delle campagne indagini che hanno interessato l'area di Lago Verde. In particolare, si è potuto fare riferimento al sondaggio geognostico S2V ed alla prova Cross hole S2V-CH2V.

Lo stendimento L1 si sviluppata trasversalmente all'asse della diga in direzione monte-valle per una lunghezza complessiva di 210 m con 39 sensori di ricezione delle onde di compressione (P) (geofoni) interspaziati ogni 5 m. La linea sismica è stata realizzata partendo da circa 70 m a monte dell'imposta e terminando 115 m circa a valle della stessa, lungo l'allineamento di fondo valle che corre nell'area ed in adiacenza ai sondaggi della prova cross hole CH2V-S2V. Il campo di velocità delle onde P ottenuto (Figura 5.17) è caratterizzato da velocità piuttosto omogenee longitudinalmente e marcatamente crescenti con la profondità. Si nota un miglioramento delle caratteristiche elastiche dei materiali incontrati dirigendosi verso valle, in relazione ad un innalzamento della quota del substrato rispetto all'area di monte.

Gli andamenti delle velocità delle onde di compressione sembrano essere concordi a quanto si evince dall'analisi dei risultati delle prove Cross hole, oltre che dai dati e dalle indagini geognostiche di riferimento.

Si riconoscono dunque unità riferibili ai depositi detritici che caratterizzano l'area e risultano essere

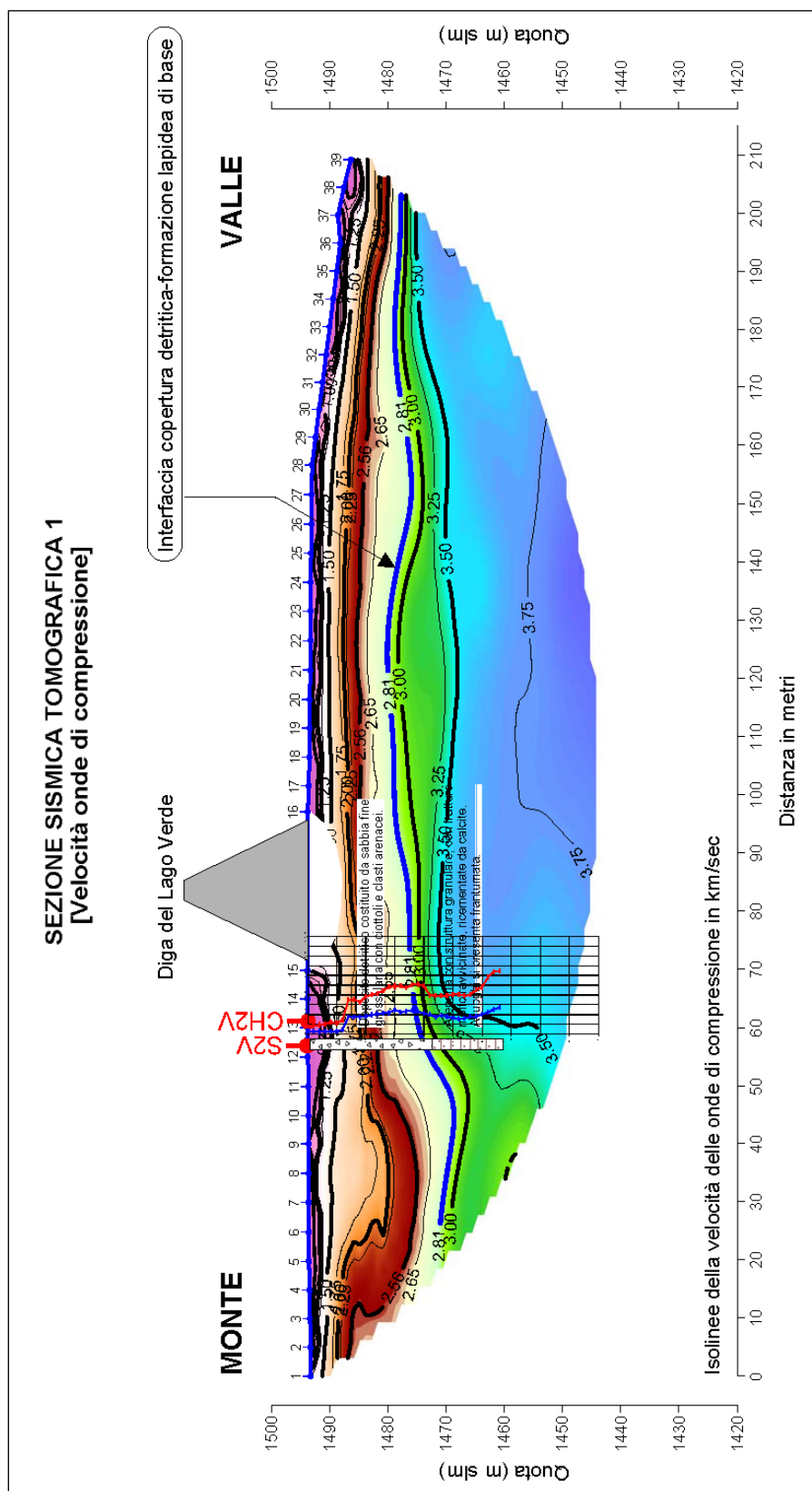


Figura 5.17 Campi di Velocità delle onde P e S determinate con prova sismica a rifrazione. Stendimento L1, trasversale al coronamento

5.8.2 GeoExploration (2020)

Nel contesto dell'area di sponda destra ed immediatamente a valle dello sbarramento, in direzione longitudinale allo stesso (Figura 5.18), è stato realizzato uno stendimento di sismica a rifrazione con elaborazione tomografica in onde P e S. Si è voluto in particolare caratterizzare un'area che non era stata interessata da precedenti indagini o rilievi specifici, andando ad arricchire le informazioni riguardanti la risposta elastica delle unità considerate.

Dall'andamento delle velocità delle onde di compressione e di taglio (Figura 5.19), si evidenzia un progressivo aumento delle velocità sismiche in relazione all'aumentare della profondità e della consistenza dei materiali attraversati. Da evidenziare un modesto abbassamento delle velocità delle onde tra le progressive metriche a partire dalla progressiva metrica 30 e ciò potrebbe essere riconducibile ad un progressivo detensionamento dell'area del versante in esame.

L'indagine riguarda per la maggior parte l'unità detritica UG-1 e l'intervallo di velocità registrate si presenta in linea con quanto rilevato dalle indagini geofisiche pregresse e dai dati geognostici a disposizione.

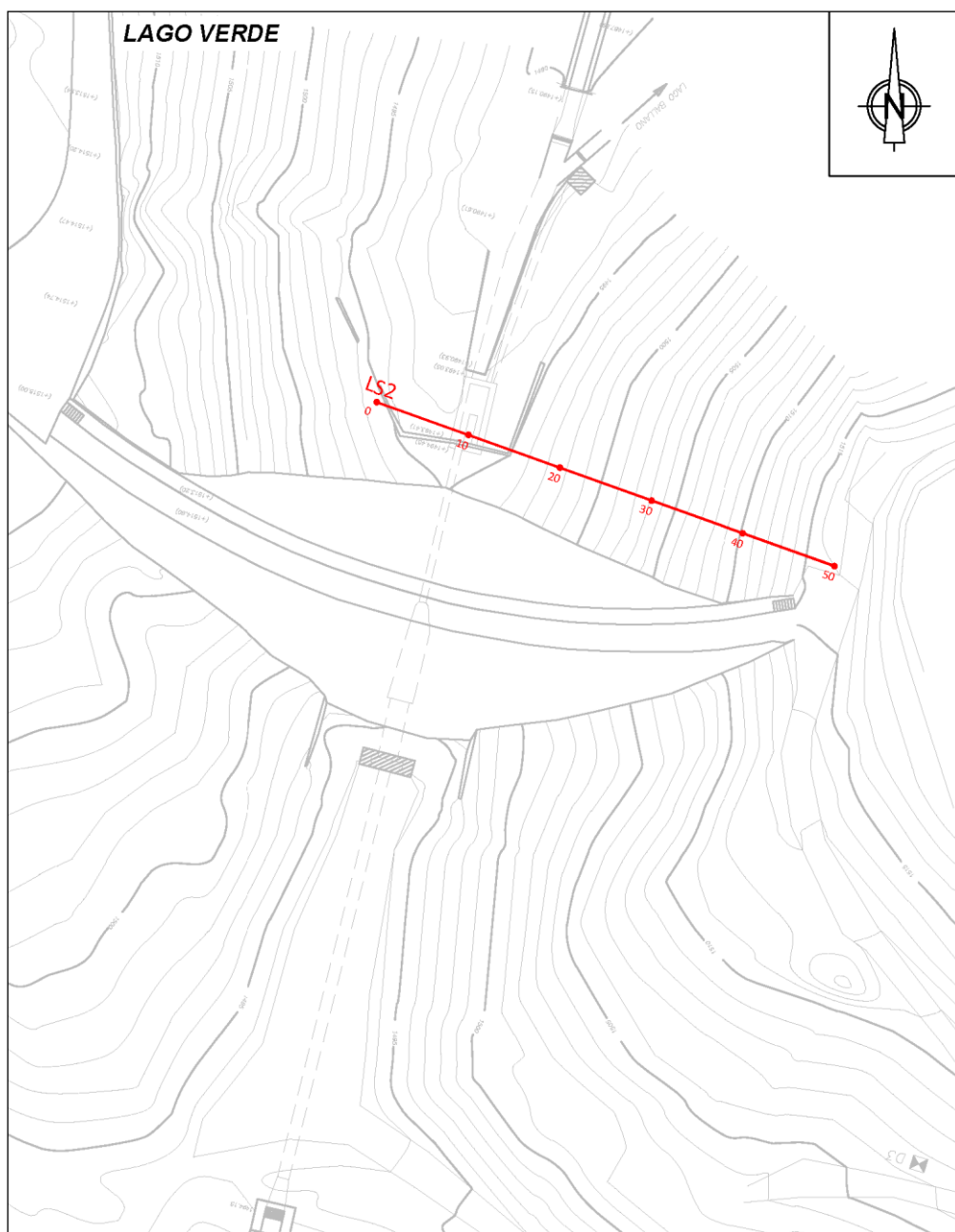


Figura 5.18 Ubicazione dello stendimento di sismica a rifrazione con tomografia in onde P e S realizzato ad est dello sfioratore ed in direzione longitudinale allo stesso nel corso della (campagna indagini GeoExploration del 2020)

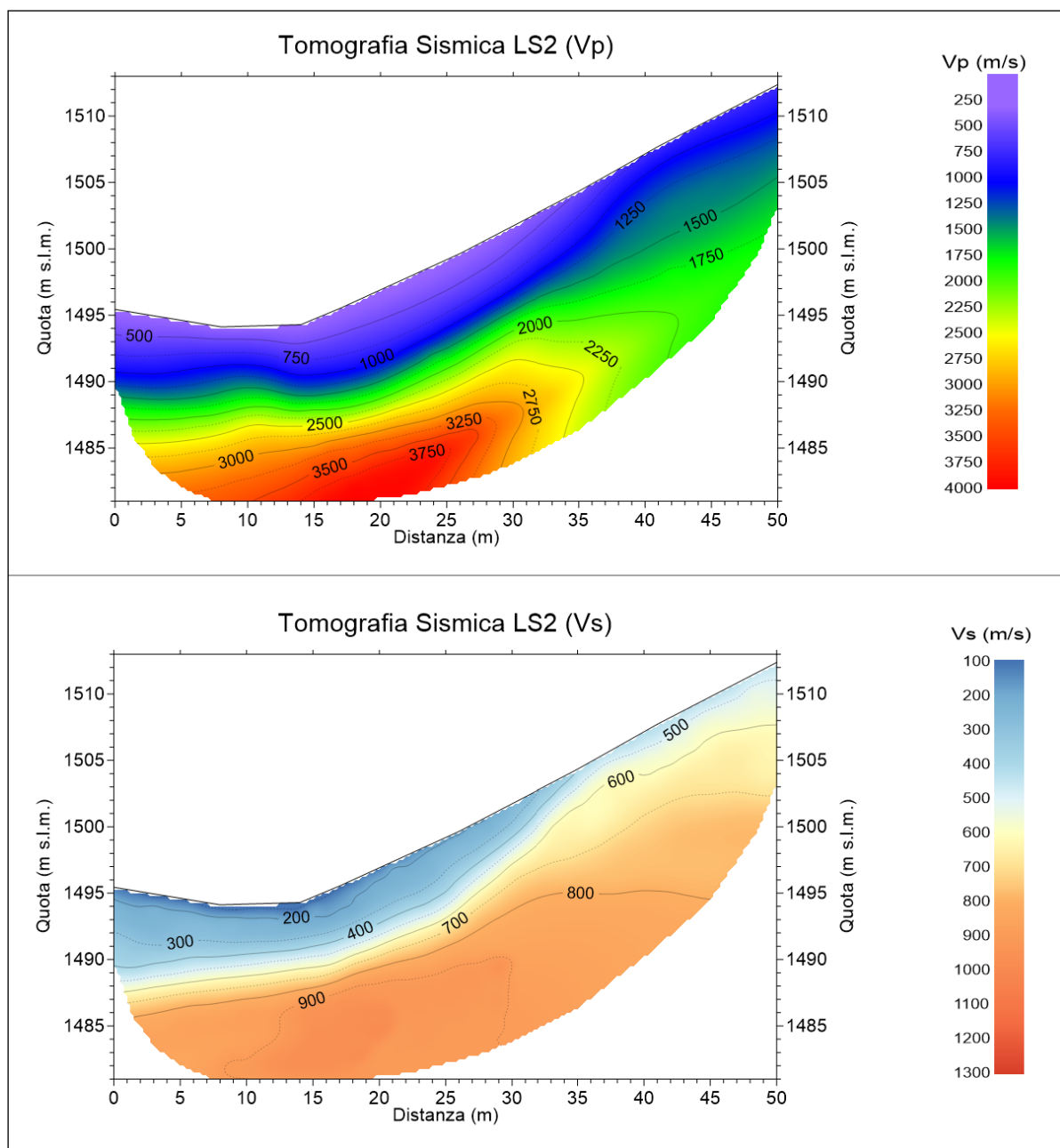


Figura 5.19 Tomografie sismiche in onde P e S dello stendimento realizzato in sponda destra dell'area a valle dell'imposta nel corso della campagna indagini GeoExploration del 2020

5.9 Caratterizzazione dell'ammasso roccioso

5.9.1 Unità Litotecnica 1 e 2 – Flysch arenaceo-pelitico da fortemente a mediamente fratturato (UL-1)

Sulla base di quanto sopra esposto, si assume dal **Progetto Definitivo di Dismissione della diga e realizzazione di una nuova opera di presa del 2018** che all'ammasso roccioso costituito da alternanze arenaceo-pelitiche della formazione del Macigno sono stati attribuiti:

- resistenza a compressione semplice dell'ammasso roccioso (UCS_a) = 96 MPa
- $GSI = 63$
- resistenza a trazione dell'ammasso roccioso (t_a) = - 0.347 MPa
- coesione equivalente (c_e) = 6.788 MPa
- angolo d'attrito equivalente (φ_e) = 39°
- modulo di Young statico dell'ammasso roccioso ($E_{a,sta}$) = 15000 MPa
- permeabilità $K = 1 \cdot 10^{-7}$ m/s

6. SELEZIONE DEI PARAMETRI PER IL MODELLO DI CALCOLO

6.1 Premessa

In questa sezione vengono effettuate le scelte riguardanti i parametri per il modello di calcolo dei terreni di fondazione.

Tutte le scelte riguardanti i parametri per il modello, effettuate in questo capitolo, vengono giustificate da considerazioni ingegneristiche.

6.2 Analisi granulometrica

Le informazioni riguardanti la granulometria dei materiali provengono dai risultati delle campagne di indagini 1997 e 2008-2009. Da queste si può dedurre che i terreni possono essere contenuti all'interno di un fuso granulometrico che permette di classificarli, secondo AGI 1977, come **ghiaia con sabbia limosa**.

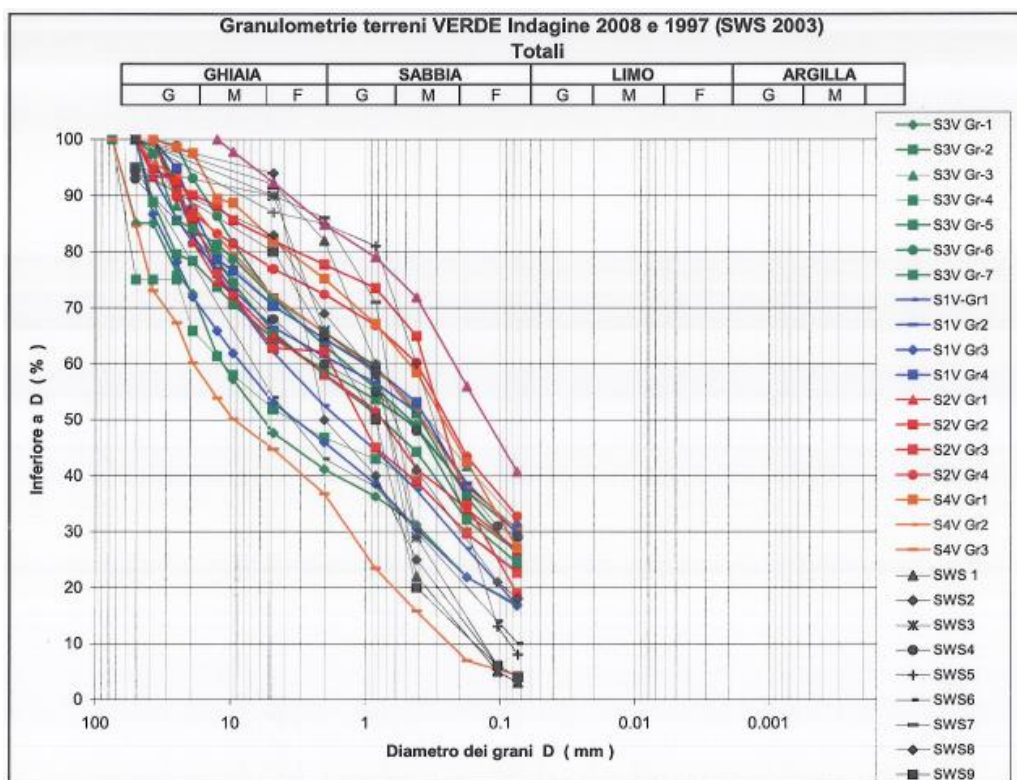


Figura 6.1 Curve granulometriche considerando anche la campagna indagini 1997

6.3 Caratteristiche fisiche e proprietà indice

I pesi per unità di volume adottati per le verifiche di sicurezza sono riportati in Tabella 6.1. Le informazioni riguardanti il peso per unità di volume dei materiali provengono dai risultati delle campagne di indagini geofisiche del 2008-2009 che forniscono informazioni in accordo tra di loro. **In entrambi i casi sono stati considerati dei valori medi.**

Tabella 6.1 Pesì specifici delle unità geotecniche (UG-1, UG-2 e UG-3)

Unità	γ (kN/m ³)
UG-1	20.0
UG-2	23.0
UG-3	22.5

In particolare, per quanto riguarda la campagna indagini del 2008-2009, le uniche informazioni inerenti al peso specifico sono state dedotte solo dalle prove geofisiche, mentre non sono state ritenute affidabili le prove di densità in sito realizzate.

6.4 Parametri meccanici di resistenza al taglio

I parametri meccanici di resistenza a taglio adottati per le verifiche di sicurezza sono riportati in Tabella 6.2. Le informazioni riguardanti i parametri meccanici di resistenza a taglio dei materiali provengono dai risultati della campagna di indagini del 2008, in particolare dalle prove penetrometriche dinamiche (SPT).

Non avendo a disposizione prove sito-specifiche che caratterizzassero i parametri di resistenza al taglio di UG-2 e UG-3, si sono assunti i valori attribuiti da Progetto Definitivo di Dismissione della diga e realizzazione di una nuova opera di presa del 2018.

Tabella 6.2 Parametri di resistenza al taglio di calcolo

Unità	c' (kPa)	φ' (°)	φ'_{cv} (°)
UG-1	-	43°	36°
UG-2	-	45°	
UG-3	-	38°	

Si è scelto di considerare i risultati delle prove in situ per la selezione dei parametri di resistenza del materiale dell'unità UG-1, pur sottolineando che i blocchi dell'unità non sono comunque campionabili; per questo motivo i parametri meccanici ricavati dall'interpretazione delle prove possono certamente considerarsi cautelativi.

Non sono state considerate, invece, le prove di taglio diretto eseguite da Comitgeo s.n.c. (2003). Questo perché si è ritenuto che tali prove non siano rappresentative dell'unità UG-1, in quanto i provini sono stati ricostruiti in laboratorio con passante al setaccio 0.850 mm.

In conclusione, **i parametri di resistenza per il materiale dell'unità UG-1 sono $c' = 0$ kPa e $\varphi' = 43^\circ$, per UG-2 $c' = 0$ kPa e $\varphi' = 45^\circ$ e per UG-3 $c' = 0$ kPa e $\varphi' = 38^\circ$.**

6.5 Permeabilità

I coefficienti di permeabilità adottati per le verifiche di sicurezza sono riportati in Tabella 6.3. Tali coefficienti dei terreni di fondazione sono stati stimati in base ai risultati delle prove Lefranc della campagna d'indagine del 2003, in quanto in quella del 2008-2009 non sono state eseguite prove.

Tabella 6.3 Coefficienti di permeabilità di calcolo

Unità	k (m/s)
UG-1	$3 \cdot 10^{-5}$
UG-2	$1 \cdot 10^{-6}$
UG-3	$3 \cdot 10^{-7}$

I risultati forniscono valori del coefficiente di permeabilità, per quanto riguarda l'unità geotecnica **UG-1**, più bassi di quello che ci si potrebbe aspettare. Viste le caratteristiche granulometriche dell'unità in esame si ritiene possibile una sottostima del valore di conducibilità idraulica, probabilmente dovuto ad una percentuale di materiali fini, nel punto dove hanno eseguito la prova, superiore a quella caratterizzata con i fusi analizzati.

6.6 Parametri di rigidezza dinamici

I moduli di rigidezza dinamici adottati per le verifiche di sicurezza sono riportati in Tabella 6.4. Le informazioni riguardanti i moduli dinamici dei materiali provengono dai risultati della campagna indagini del 2008-2009.

Tabella 6.4 Moduli di rigidezza dinamici adottati per le verifiche

Unità	ν (-)	G_0 (MPa)	E_0 (MPa)
UG-1	$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$	$G_0 = \left(\frac{z+6}{0.0257}\right)^2 \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{1}{1000}$	$E_0 = \left(\frac{z+4}{0.0058}\right)^2 \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}{(1-\nu)} \cdot \frac{1}{1000}$
UG-2	0.36	4400	12100
UG-3	0.37	3700	10000

I moduli di rigidezza a basse deformazioni (G_0 , E_0) sono stati dedotti a partire dalle prove geofisiche di sito (cross-hole e sismiche a rifrazione) effettuate nel 2008-2009.

Il modulo di taglio a basse deformazioni (G_0) dell'unità UG-1 cresce con la profondità con legge:

$$G_0 = \left(\frac{z+6}{0.0257}\right)^2 \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{1}{1000} \text{ [MPa]}$$

Per le unità UG-2 e UG-3 sono stati derivati dei valori medi di G_0 rispettivamente di 4400 MPa e 3700 MPa.

Lo stesso discorso può essere fatto per il **modulo elastico (E_0)**, nelle unità UG-1, UG-2 e UG-3 il suo valore cresce apprezzabilmente con la profondità con legge:

$$E_0 = \left(\frac{z+4}{0.0058}\right)^2 \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}{(1-\nu)} \cdot \frac{1}{1000} \text{ [MPa]}$$

Per le unità UG-2 e UG-3 sono stati derivati dei valori medi di E_0 rispettivamente di 12100 MPa e 10000 MPa.

6.6.1 Curve di Decadimento del Modulo di Taglio

In assenza di indagini specifiche di laboratorio sulle caratteristiche dei materiali UG-1, UG-2 e UG-3 per la valutazione delle curve di decadimento del modulo di taglio è possibile far riferimento alla letteratura tecnica (Seed B. 1986, Kokusho T. 1980, Rollins K. 1998, Darendeli M. 2001, Rollins K. 2020).

Per il caso in esame è stato adottato l'approccio proposto da Rollins (2020), nel quale sono stati confrontati i risultati di diverse prove (triassiali cicliche, colonna risonante e taglio torsionale ciclico) a larga scala (D=30 cm e H=60 cm) effettuate in diversi studi.

Per i materiali UG-1, UG-2 e UG-3 viene adottata la seguente relazione per descrivere il decadimento del modulo di taglio (rappresentata dalla curva nera continua in Figura 6.2):

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{0.0039(\sigma'_0)^{0.42}} \right)^a}$$

Dove:

- G è il modulo di taglio dinamico a una certa deformazione;
- G₀ è il modulo di taglio dinamico iniziale;
- γ è la deformazione di taglio (%);
- a parametro di curvatura pari a 0.84;

$$\sigma'_0 \text{ è la tensione di confinamento: } \sigma'_0 = \frac{\gamma_{diga}(H_{diga}) + \gamma_{UG1} \left(\frac{H_{UG1}}{2} \right) + 2k(\gamma_{diga}(H_{diga}) + \gamma_{UG1} \left(\frac{H_{UG1}}{2} \right))}{3} \approx 150 \text{ kPa}$$

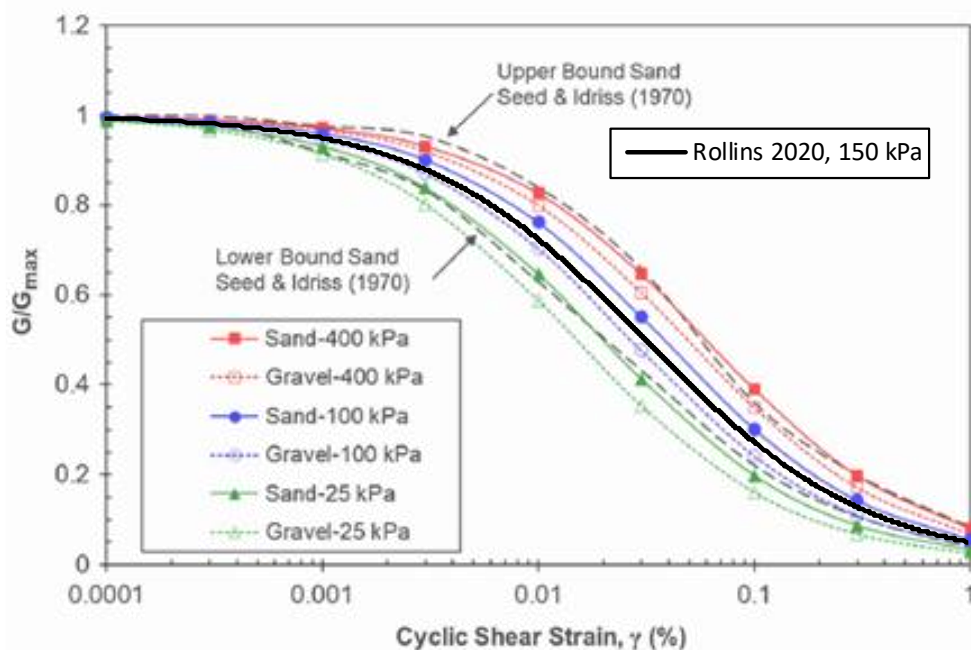


Figura 6.2 Confronto tra le curve di decadimento del modulo di taglio per: materiale dell'unità UG1 (linea nera continua), sabbie con formula di *Darendeli 2001* (linee continue colorate), ghiaie con formula di *Rollins 1998* (linee tratteggiate colorate) e campo di variabilità per le sabbie proposto in *Seed e Idriss 1970* e in *Seed et al. 1986* (linee tratteggiate in nero).

La curva di decadimento dei materiali delle unità UG-1, UG-2 e UG-3 si trova all'interno del campo di variabilità proposto da *Seed e Idriss (1970)* per le sabbie e i materiali granulari, coerentemente con quanto proposto da *Rollins* per materiali simili (*Rollins, 1998*).

6.6.2 Curve di Incremento dello Smorzamento

La curva dello smorzamento per i materiali UG-1, UG-2 e UG-3 è stata valutata per mezzo della relazione di Rollins (1998) (Figura 6.3):

$$D = 0.8 + 18(1 + 0.15\gamma^{-0.9})^{-0.75}$$

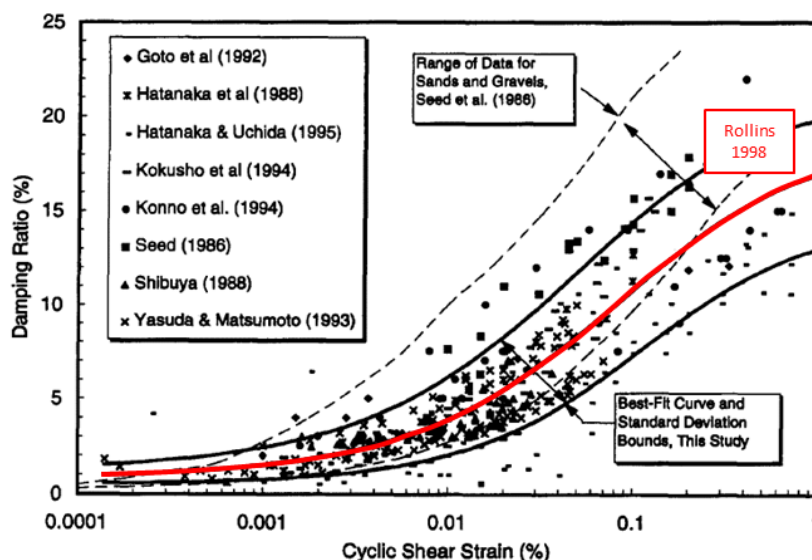


Figura 6.3 Confronto tra le curve dello smorzamento per il materiale della zona 1 ottenute tramite l'approccio di Rollins 1998 (curva rossa) e il campo di variabilità delle sabbie e delle ghiaie proposto da Seed et al. 1986 (curve nere tratteggiate)

7. CONCLUSIONI

I parametri meccanici scelti per la caratterizzazione dei terreni di fondazione sono stati desunti sulla base di un'attenta e critica interpretazione delle prove di sito e laboratorio effettuate nelle campagne di indagine disponibile.

Le caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali costituenti il rilevato da utilizzare per le verifiche di sicurezza sono riportate in Tabella 7.1.

Tabella 7.1. Sintesi dei parametri meccanici di calcolo per il corpo della diga

Parametri meccanici		UG-1	UG-2	UG-3
Peso per unità di volume	γ [kN/m ³]	20.0	23.0	22.5
Angolo di resistenza al taglio	ϕ' [gradi]	43	45	38
Coesione efficace	c' [kPa]	0	0	0
Permeabilità	k [m/s]	$3 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-7}$
Coefficiente di Poisson	ν [-]	Crescente con la profondità	0.36	0.37
Modulo Elastico dinamico	E_0 [MPa]	Crescente con la profondità	121000	10000
Modulo di taglio dinamico	G_0 [MPa]	Crescente con la profondità	4400	3700
Decadimento modulo di taglio	$G/G_0(\gamma)$ [-]	Rollins 2020 ($a=0.84$ $\sigma'_0 = 150$ kPa)	Rollins 2020 ($a=0.84$ $\sigma'_0 = 150$ kPa)	Rollins 2020 ($a=0.84$ $\sigma'_0 = 150$ kPa)
Fattore di smorzamento	$D(\gamma)$ [-]	Rollins 2020 ($b=0.8$)	Rollins 2020 ($b=0.8$)	Rollins 2020 ($b=0.8$)