

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



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



TITOLO

**RELAZIONE GEOTECNICA E
GEOMECCANICA**

CODICE OPERA

C732

CODICE ELABORATO

R105

REVISIONE	DATA	NOTE
0	29/04/22	Prima emissione

Contratto: n° 1401366462

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

Data contratto: 05 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, Luciano Serra, Luigi Papetti,
Matteo Rebuschi, Caterina Frosio

Storia del documento

Revisione	Data	Redatto	Verificato	Approvato	Note
0	29/04/22	Simone Di Lorenzo Piero Civollani	Gianluca Gatto Fabio Oliva	Giorgio Lupoi	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. ANALISI DELLA DOCUMENTAZIONE DISPONIBILE	18
3.1 PREMESSA	18
3.2 CAMPAGNE DI INDAGINI	18
3.2.1 <i>SONDEDILE Srl - ISMES (2008-2009)</i>	18
3.2.2 <i>Comitgeo s.n.c. (2003)</i>	19
4. CARATTERIZZAZIONE DEI TERRENI ED AMMASSO DI FONDAZIONE.....	22
4.1 CLASSIFICAZIONE AMMASSO E TERRENI CON CARATTERIZZAZIONE DELLE PROPRIETÀ GEOTECNICHE E GEOMECCANICHE	22
4.2 SEZIONI GEOTECNICHE DELLA ZONA DI IMPOSTA DELLO SBARRAMENTO	26
4.3 ANALISI GRANULOMETRICA E DETERMINAZIONE DEI LIMITI DI LIQUIDITÀ E PLASTICITÀ	31
4.3.1 <i>SONDEDILE Srl - ISMES (2008-2009)</i>	31
4.3.2 <i>Comitgeo s.n.c. (2003)</i>	32
4.4 CARATTERISTICHE FISICHE E PROPRIETÀ INDICE	34
4.4.1 <i>SONDEDILE Srl - ISMES (2008-2009)</i>	34
4.4.2 <i>Comitgeo s.n.c. (2003)</i>	34
4.5 PARAMETRI MECCANICI DI RESISTENZA AL TAGLIO	35
4.5.1 <i>SONDEDILE Srl - ISMES (2008-2009)</i>	35
4.5.2 <i>Comitgeo s.n.c. (2003)</i>	37
4.6 PERMEABILITÀ DEI TERRENI.....	38
4.6.1 <i>SONDEDILE Srl - ISMES (2008-2009)</i>	38
4.6.2 <i>Comitgeo s.n.c. (2003)</i>	38
4.7 PERMEABILITÀ DELL'AMMASSO	38
4.7.1 <i>SONDEDILE Srl - ISMES (2008-2009)</i>	38
4.8 PARAMETRI DI RIGIDEZZA ELASTICI.....	40
4.8.1 <i>SONDEDILE Srl - ISMES (2008-2009)</i>	40
4.9 PARAMETRI DINAMICI	41
4.9.1 <i>SONDEDILE Srl – PROGEO Srl (2008-2009)</i>	41
4.9.2 <i>Comitgeo s.n.c. (2003)</i>	58
4.9.3 <i>GeoExploration (2020)</i>	62

4.10	CLASSIFICAZIONE DELL'AMMASSO	65
4.10.1	<i>Unità Litotecnica 1 – Flysch arenaceo-pelitico da fortemente a mediamente fratturato (UL-1)</i>	65
4.10.2	<i>Unità Litotecnica 2 – Flysch arenaceo-pelitico compatto (UL-2)</i>	67
4.11	CARATTERIZZAZIONE DELLA MATRICE ROCCIOSA INTEGRA	69
4.11.1	<i>Unità Litotecnica 1 – Flysch arenaceo-pelitico da fortemente a mediamente fratturato (UL-1)</i>	69
4.11.2	<i>Unità Litotecnica 2 – Flysch arenaceo-pelitico compatto (UL-2)</i>	73
4.12	CARATTERIZZAZIONE DELLE DISCONTINUITÀ	77
4.13	CARATTERIZZAZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO.....	80
4.13.1	<i>Unità Litotecnica 1 – Flysch arenaceo-pelitico da fortemente a mediamente fratturato (UL-1)</i>	80
4.13.2	<i>Unità Litotecnica 2 – Flysch arenaceo-pelitico compatto (UL-2)</i>	83
5.	SELEZIONE DEI PARAMETRI PER IL MODELLO DI CALCOLO	87
5.1	PREMESSA	87
5.2	ANALISI GRANULOMETRICA	87
5.3	CARATTERISTICHE FISICHE E PROPRIETÀ INDICE	88
5.4	PARAMETRI MECCANICI DI RESISTENZA AL TAGLIO	89
5.5	PERMEABILITÀ	90
5.6	PARAMETRI DI RIGIDEZZA DINAMICI	91
5.6.1	<i>Curve di Decadimento del Modulo di Taglio.....</i>	92
5.6.2	<i>Curve di Incremento dello Smorzamento</i>	94
6.	CONCLUSIONI	95
7.	NORMATIVE E BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO	96

1. INTRODUZIONE

Il presente rapporto costituisce parte integrante del progetto definitivo di recupero della diga di Lago Ballano (PR) ai sensi della normativa nazionale vigente (MIT19-NTC18 e NTD14).

Il progetto in esame è finalizzato al recupero parziale dell'invaso della diga di Lago Ballano, attualmente messa sostanzialmente fuori esercizio, con limitazione del livello d'invaso alla 1'330.00 m s.l.m., a seguito nota prot. n. 20484 del 09.10.2015, del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – Ufficio Tecnico per le Dighe di Milano. L'intervento in progetto prevede la parziale demolizione e l'abbassamento della diga, riducendo in questo modo le sollecitazioni sul corpo diga e l'estensione degli interventi di manutenzione; inoltre verrà realizzato il nuovo scarico di superficie, l'impermeabilizzazione e il consolidamento del paramento di monte.

Lo sbarramento, costruito nel 1907-1908, attualmente è costituito da una diga a gravità con un'altezza di 20.00 m e volume di invaso di 1.27 Mm³. Tali caratteristiche inquadrano la diga nella come "diga di competenza del Servizio Nazionale Dighe", ai sensi della normativa tecnica nazionale (MinLLPP95), e come "grande diga", conseguentemente l'opera ricade nella categoria delle "dighe di importanza strategica" (NTD14, Par. C.7.7.2). Lo sbarramento è attualmente sostanzialmente fuori servizio, a causa della limitazione del livello d'invaso imposta con nota prot. n. 20484 del 09/10/2015, del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – Ufficio Tecnico per le Dighe di Milano. L'intervento oggetto del presente progetto definitivo prevede il parziale recupero della capacità d'invaso dello sbarramento, tramite demolizione di parte della diga esistente e interventi di ristrutturazione della restante parte di opera. In seguito agli interventi previsti dal presente progetto definitivo, la diga risulterà avere un'altezza pari a 9.70 m e un volume d'invasi pari a 0.60 Mm³. Tali caratteristiche comporteranno il declassamento dell'opera a "diga di competenza regionale" (MinLLPP95) e a "diga di dimensioni contenute", conseguentemente lo sbarramento ricadrà nella categoria delle "dighe di importanza normale" (NTD14, Par. C.7.7.2).

L'opera risulta costituita da una struttura originaria realizzata negli anni 1907- 1908, cui è stata successivamente aggiunta, lato monte, una struttura di consolidamento in muratura di pietrame e malta di cemento.

L'impianto di Rigoso è situato in prossimità del comune di Monchio delle Corti (PR). Il serbatoio ha lo scopo di regolare stagionalmente le acque del Rio della Barca per la produzione di energia elettrica nella centrale di Rigoso.

Le coordinate geografiche della Diga di Ballano sono:

- LATITUDINE, **44.36950°**
- LONGITUDINE, **10.10204°**



Figura 1.1 Vista aerea dell'opera di sbarramento



Figura 1.2 Foto da coronamento



Figura 1.3 Foto del paramento di valle



Figura 1.4 Foto del paramento di monte

2. TERRENI E ROCCE DI FONDAZIONE

Lo sbarramento di Ballano, 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 Ballano 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", 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 dell'area d'interesse di Ballano, 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, appartenente alla Carta Geologica d'Italia in scala 1:100'000 e riportato in Figura 2.1 e Figura 2.2, ha permesso di individuare le formazioni che caratterizzano l'area d'interesse nell'intorno dello sbarramento e del bacino di Ballano 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 evidenzia inoltre che la struttura originaria della diga risulta essere per la gran parte impostata al di sopra di depositi quaternari cartografati come depositi detritici gravitativi e morenici che caratterizzano l'area. Si tratta di depositi di versante e detritici olocenici situati a valle delle formazioni arenaceo-pelitiche che costituiscono il versante settentrionale dello spartiacque appenninico, oltre a depositi wurmiani riferibili a cordoni laterali e trasversali che sono stati depositi sulle soglie dei circhi glaciali e sui ripiani lungo le stesse valli un tempo occupate da lingue glaciali. A testimonianza dei processi che hanno caratterizzato questo tratto di crinale appenninico durante l'ultima glaciazione, si riconoscono numerose forme come quella entro la quale è impostato il bacino di Ballano e cartografate proprio come circhi

glaciali. La struttura di consolidamento dello sbarramento addossato sul lato di monte invece, risulta essere fondata quasi interamente sulla formazione arenacea del Macigno.

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 Castelnuovo 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 Ballano 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 le unità 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; Dallan Nardi & Nardi, 1972*).

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

Il serbatoio di Ballano è stato realizzato in un'area montana tra le quote 1330 e 1348 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 risultato delle fasi deposizionali dell'ultima glaciazione wurmiana.

L'invaso è impostato in gran parte su depositi detritici e morenici che ricoprono la formazione arenacea 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.

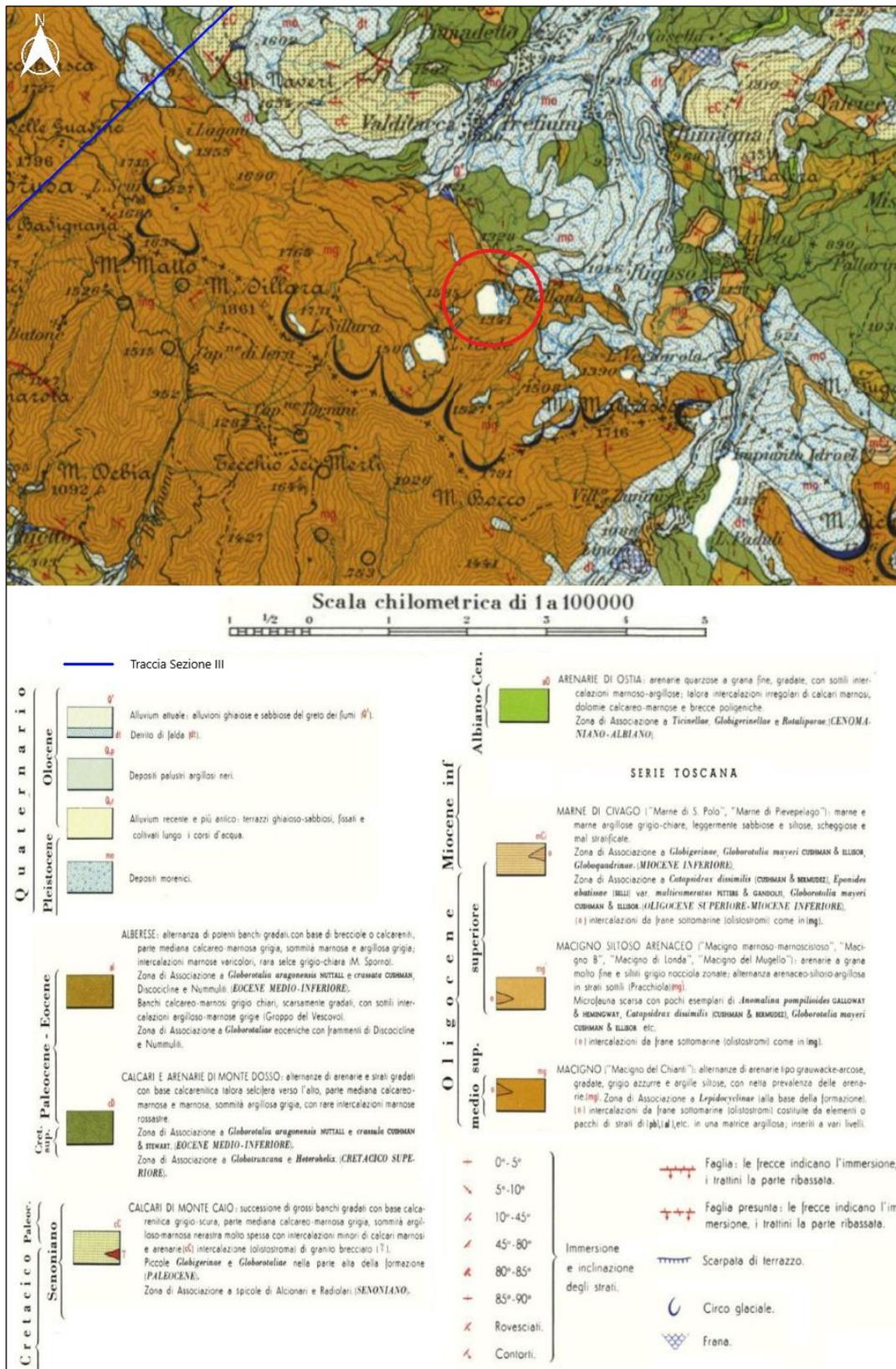


Figura 2.1 Stralcio della Carta Geologica d'Italia a scala 1:100'000. Il cerchio rosso indica il sito dello sbarramento. [Foglio 85 Castelnovo ne' Monti]

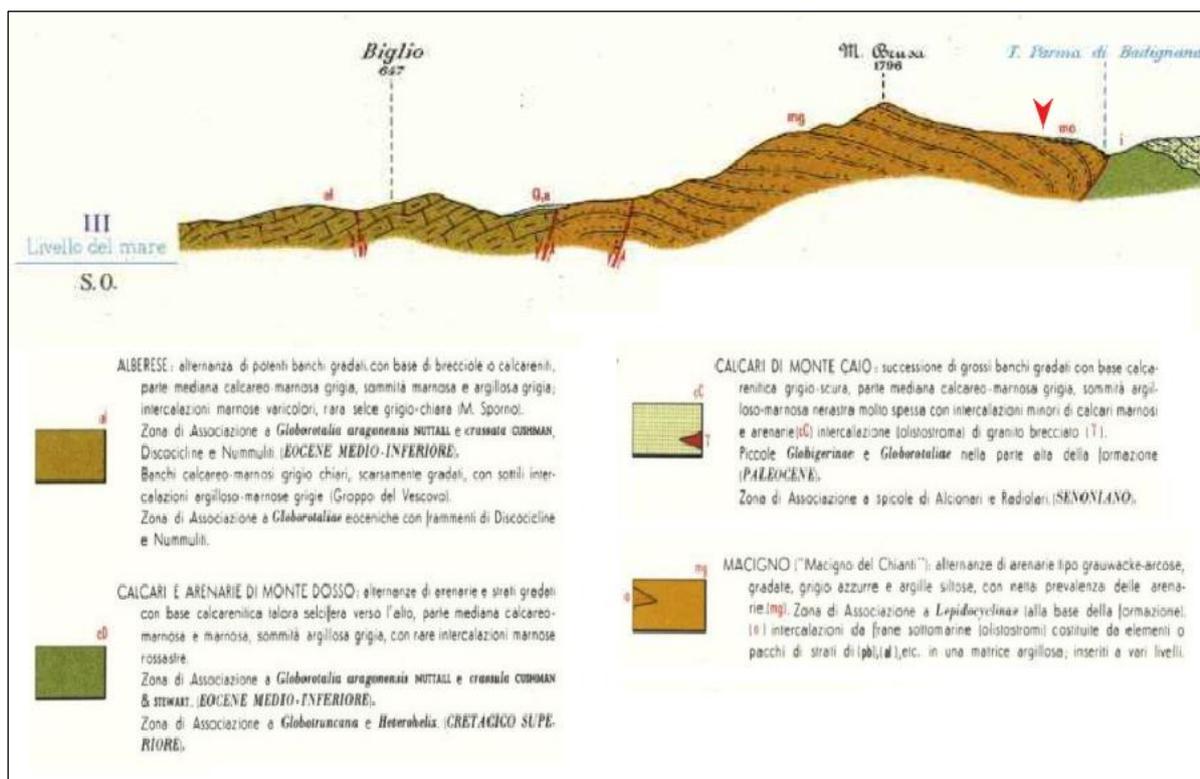


Figura 2.2 Parte terminale sud-occidentale della Sezione Geologica Interpretativa III compresa all'interno del Foglio 85 Castelnovo ne' Monti. Tale porzione terminale della sezione III è riportata in pianta in Figura 2.1 ed evidenziata dal lineamento blu che taglia dall'angolo NW dello stralcio di carta. La proiezione dell'ubicazione del sito di Ballano 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 Ballano, 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 rispettivamente 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 Ballano risulta essere impostata in parte sulla **Formazione del Macigno**, appartenente al Dominio Toscano, ed in parte su depositi eterogenei ed eterometrici, prevalentemente arenacei, riconducibili a **depositi di till indifferenziato** quaternario.

Dal punto di vista litologico la Formazione del Macigno, datata all'Oligocene superiore – Miocene inferiore, risulta essere costituita da 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 e molto spessi. Sono presenti, seppur subordinate, torbiditi pelitico – arenacee sottili o, raramente, calcareo marnose. Gli intervalli pelitici, costituiti da siltiti 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 porzione centrale e sud-orientale dello sbarramento risulta impostata nel contesto di depositi di till indifferenziato, datati al Pleistocene medio/superiore. Si tratta di un deposito costituito 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*).

La sezione geologica A – A' (Figura 2.4), riportata all'interno del Foglio 234 Fivizzano della Carta Geologica d'Italia, conferma come l'invaso di Ballano sia collocato al di sopra della Formazione del Macigno.

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 con quanto indicato dalla carta geologica a scala 1:50'000, mostra come sbarramento oggetto della presente Relazione sia impostato sulla Formazione del Macigno e su depositi periglaciali.

L'assetto strutturale dell'area appare uniforme con un'immersione prevalente della formazione arenaceo-pelitica del Macigno verso NE, determinando un assetto a franapoggio sul versante nel quale si colloca lo sbarramento di Ballano. Nelle immediate vicinanze del sito, le cartografie in scala 1:50'000 e 1:10'000 riportano giaciture di strato immergenti in direzione N-NE ed inclinazione media 25°.

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.

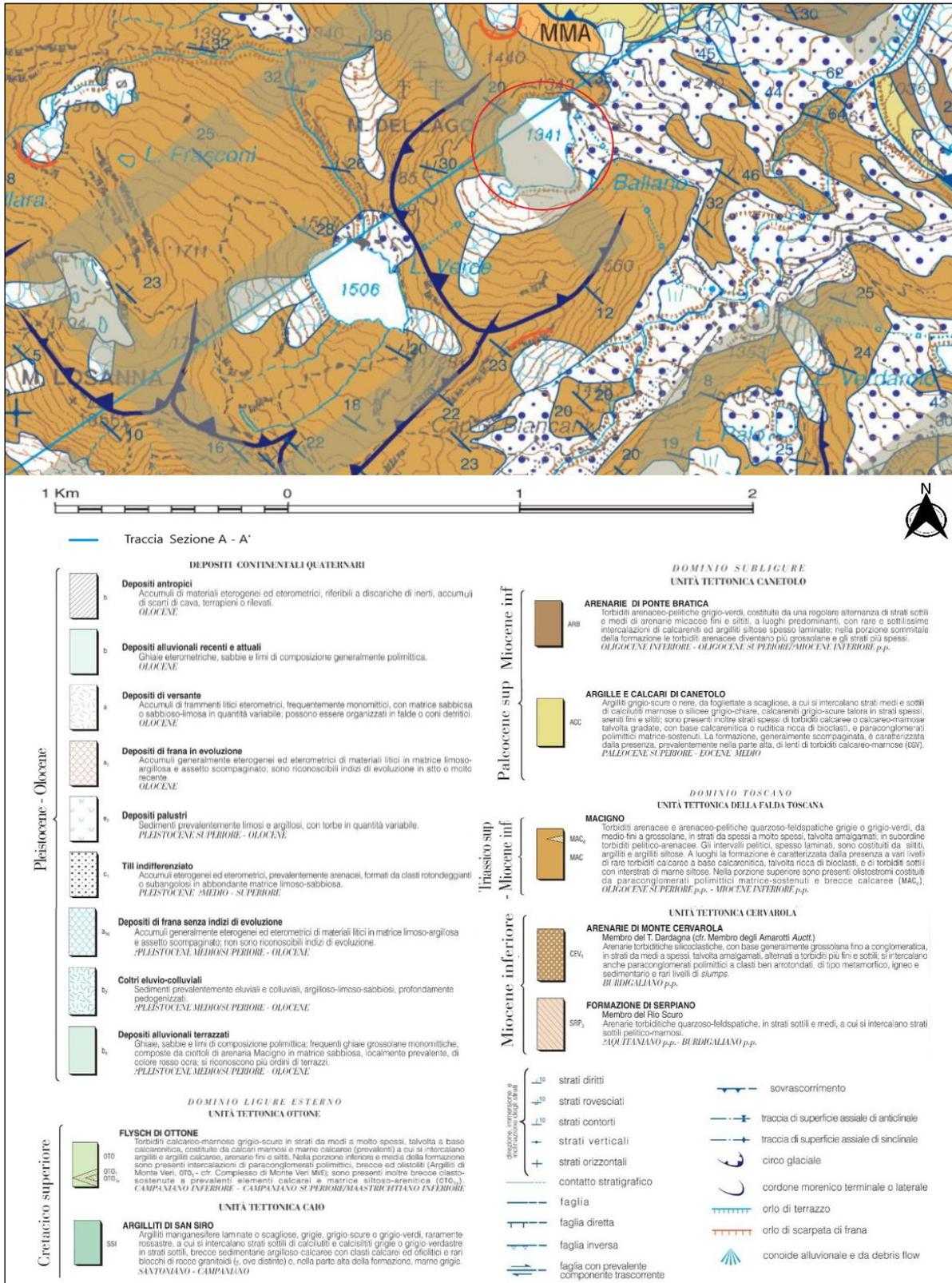


Figura 2.3 Stralcio della Carta Geologica a scala 1:50'000, con particolare dello sbarramento e dell'invaso di Lago Ballano [Foglio 234 Fivizzano – Università di Pisa – Dipartimento di Scienze della Terra]

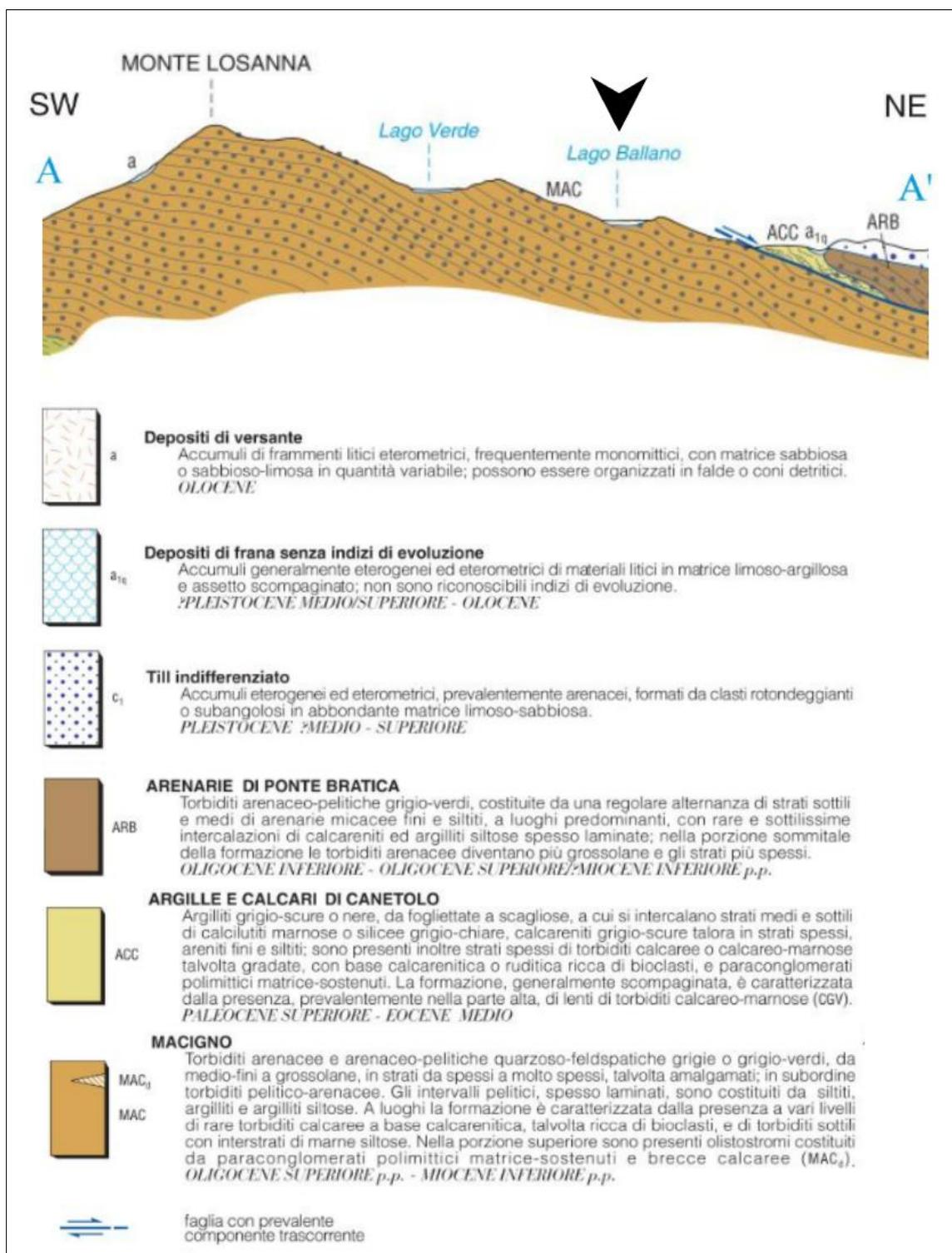
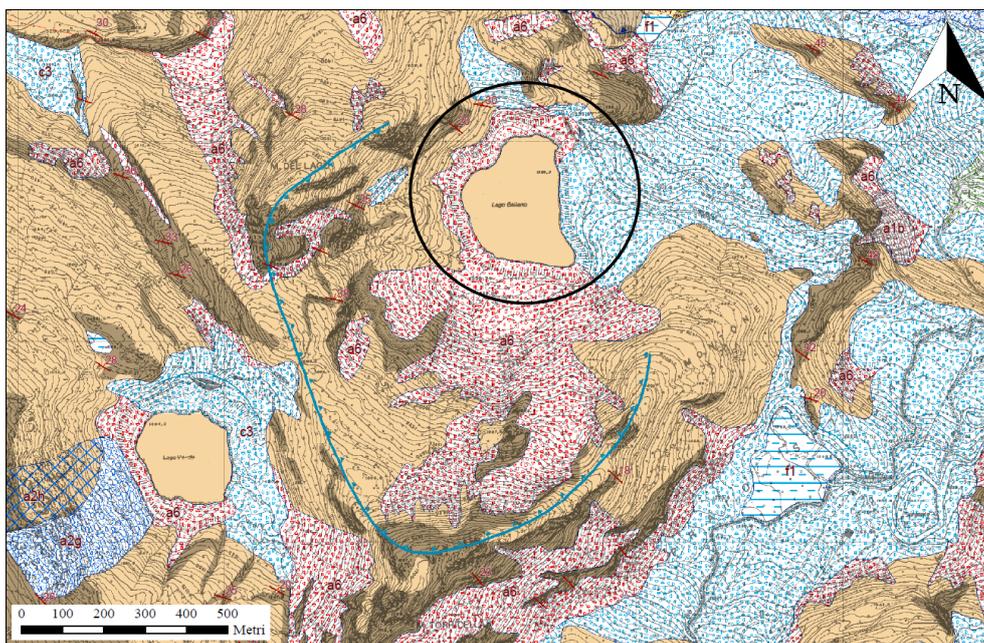


Figura 2.4 Parte della Sezione Geologica Interpretativa A – A' riportata all'interno del Foglio 234 Fivizzano a scala 1:50'000. Tale porzione della sezione A – A' è riportata in pianta in Figura 2.3 ed evidenziata dal lineamento blu che taglia lo stralcio di carta da SW a NE attraversando l'invaso di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



**LEGENDA DELLA SEZIONE CARTOGRAFICA:
234020 - VALDITACCA**

	a1b	Deposito di frana attiva per scivolamento
	a6	Detrito di falda
	a2g	Deposito di frana quiescente complessa
	a2h	Deposito di frana quiescente per scivolamento in blocco o DGPV
	c3	Deposito glaciale e periglaciale
	f1	Deposito palustre
	MAC	Macigno

Simboli Convenzionali presenti nel 10.000

Osservazioni puntuali:

	asse di piega mesoscopica
	asse di piega simmetrica (vergenza neutra) orizzontale
	stratificazione a polarità sconosciuta
	stratificazione dritta
	stratificazione rovesciata
	stratificazione verticale

Geomorfologia linee:

	circo glaciale
	cordone morenico terminale o laterale

Geologia linee:

	contatto stratigrafico o litologico certo
	contatto stratigrafico o litologico incerto
	contatto stratigrafico o litologico sepolto
	faglia certa
	faglia incerta
	faglia sepolta
	limite di natura incerta
	limite di regione
	sovrascorrimento certo
	sovrascorrimento incerto

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

Unitamente a quanto riportato dalla cartografia geologica analizzata finora nel presente paragrafo, le numerose campagne di indagine disponibili hanno permesso di definire un modello di sottosuolo di dettaglio per il sito d'interesse. Tali dati arricchiscono la definizione del modello geologico-stratigrafico derivato dall'analisi della cartografia geologica di riferimento. Proprio sulla base dei rilevamenti di superficie e delle campagne di indagini condotte, si è potuto ricostruire il modello geologico-stratigrafico nell'area dello sbarramento. In particolare, tra i 15 e i 20 m al di sotto del piano di coronamento, si riscontra la presenza in fondazione della formazione arenaceo-pelitica del Macigno da mediamente a fortemente alterata e fratturata, al di sotto della quale si incontra la stessa formazione ma caratterizzata da un grado di compattezza superiore ed alterazione inferiore. L'ammasso roccioso non affiora nell'area dello sbarramento, ma solamente nell'area a monte (Figura 2.6) ed a valle dello stesso. L'analisi delle indagini dirette ed indirette a disposizione ha permesso di ricostruire l'andamento del tetto substrato torbiditico sul quale è fondata la struttura muraria costituente il corpo più recente della diga. Mentre la Formazione del Macigno appare subaffiorante e si rinviene a pochi metri di profondità al di sotto delle coperture detritiche in spalla sinistra ed immediatamente a monte dell'imposta, il tetto del substrato tende ad approfondirsi rapidamente dirigendosi verso la porzione centrale della stretta e mantenendosi tra i 10 e 15 metri di profondità anche nell'area della sponda destra.

Si è potuto inoltre verificare che la porzione del corpo diga originario risulta per la gran parte fondata sui terreni detritici di origine gravitativa e glaciale, rispettivamente nell'area centro-settentrionale e meridionale dello sbarramento. Gli stessi depositi di origine gravitativa ricoprono il substrato in corrispondenza della porzione centro-settentrionale della diga (Figura 2.7) e lungo le sponde settentrionale, occidentale e sud-occidentale dell'invaso, mentre i depositi detritici di origine glaciale caratterizzano le spalle e l'area a valle dello sbarramento (Figura 2.8) e soprattutto l'area orientale del bacino di Ballano.



Figura 2.6 Particolare di un affioramento della Formazione del Macigno nell'area a monte dello sbarramento lungo la strada che da Lago Ballano conduce a Lago Verde. Si tratta di torbiditi arenacei ed arenaceo – pelitici grigi 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



Figura 2.7 Vista sulla porzione centro-settentrionale a monte dello sbarramento, con particolare dei depositi detritici di origine gravitativa che ricoprono la formazione arenaceo-pelifica del Macigno sottostante. Le immagini evidenziano la natura caotica e la tessitura eterogenea dei depositi di versante che caratterizzano i versanti nordoccidentali dell'invaso e l'area settentrionale dello sbarramento. Tali depositi sono costituiti da accumuli di clasti eterometrici a struttura caotica immersi in una matrice sabbioso-limosa talora argillosa



Figura 2.8 Viste dell'area a valle dello sbarramento nella zona dello sfioratore (immagine di sinistra) e sulla spalla destra (immagine di destra), caratterizzate dalla presenza dei depositi di origine glaciale con clasti eterometrici e frequenti blocchi inglobati in una matrice sabbioso-limosa e limoso-sabbiosa

La **geomorfologia** dell'area di spartiacque appenninico di questo settore del Parco Nazionale dei Cento Laghi è caratterizzata da versanti a media inclinazione e risulta dominata dall'accumulo di grandi masse detritiche al piede degli stessi versanti ed all'interno degli alvei fluviali e dei circhi glaciali (Figura 2.9). I processi in atto e le evidenze morfogenetiche, unitamente alle caratteristiche litologiche-tessiturali delle formazioni ed unità rilevabili, indicano una genesi legata soprattutto a fenomeni erosivi ed a instabilità degli stessi versanti che costituiscono il circo glaciale all'interno del quale è ospitato il lago di Ballano. Tali fenomeni erosivi si inquadrano in un panorama geologico interessato da antichi processi glaciali ed a successivi fenomeni di natura prettamente fluviale. Le già citate indagini ed i rilievi di superficie, realizzati nel contesto dello sbarramento di Ballano, hanno portato a determinare che alcuni dei depositi rinvenuti al di sotto dell'imposta derivino da intensi fenomeni erosivi e da instabilità di versanti dell'area in esame.



Figura 2.9 Vista d'insieme del Lago di Ballano dal coronamento della diga, con particolare riferimento ai versanti a media-elevata acclività che circondano l'invaso. Le sponde che bordano il lago risultano essere caratterizzate dalla presenza di depositi di versante e di origine glaciale che ne addolciscono localmente le pendenze e ricoprono il substrato arenaceo-peltilico

3. ANALISI DELLA DOCUMENTAZIONE DISPONIBILE

3.1 Premessa

La documentazione disponibile rilevante ai fini della caratterizzazione dei materiali dei terreni di copertura e della formazione costituente il substrato di fondazione della diga e delle aree adiacenti l'invaso può essere riassunta come segue:

- relazione geotecnica ed indagini integrative Enel Green Power 2003;
- esecuzione di indagini geognostiche SONDEDILE Srl 2008;
- prove dilatometriche in roccia SONDEDILE Srl 2008;
- prospezioni con sonda televisiva geostrutturale ISMES 2009;
- indagini geofisiche cross hole e prospezioni sismiche a rifrazione ISMES 2009;
- indagini di laboratorio su terre e rocce ISMES 2009.

Le indagini disponibili sono riportate in Figura 3.1.

3.2 Campagne di indagini

Le proprietà dei terreni e rocce di fondazione sono state indagate soprattutto sulla base di due campagne di indagini:

3.2.1 SONDEDILE Srl - ISMES (2008-2009)

- esecuzione di n° 5 sondaggi a carotaggio continuo verticali;
- esecuzione di n° 4 sondaggi a carotaggio continuo orizzontali;
- esecuzione di n° 4 sondaggi a distruzione di nucleo;
- esecuzione di n° 12 prove di permeabilità Lugeon;
- prelievo di n° 12 campioni rimaneggiati di terreno;
- esecuzione di n° 6 prove SPT;
- esecuzione di n° 5 prove di densità in sito;
- esecuzione di n° 8 prove dilatometriche in foro;
- installazione di n° 8 Tubi per l'esecuzione di prove Cross Hole
- esecuzione di n° 4 prove cross hole eseguite all'interno di n. 4 coppie di fori di sondaggio:
 - ◆ CH1B – S1B, da 0 a 30 m;
 - ◆ CH2B – S2B, da 0 a 39 m;
 - ◆ CH3B – S3B, da 0 a 40 m;
 - ◆ CH4B – S4B, da 0 a 40 m.

- esecuzione di n° 11 prove dilatometriche su roccia tipo DRT (dilatometric rock test) in foro di sondaggio (Ballano: S4B D1 e D2; S1B D1, D2, e D3 e S2BD1, D2, e D3).
- prospezione con sonda televisiva geostrutturale eseguita all'interno di n. 2 fori di sondaggio verticali:
 - ◆ foro S3: eseguito a monte del corpo diga, presso il fondo del bacino d'invaso;
 - ◆ foro S2: eseguito sul coronamento diga.
- esecuzione di indagini di laboratorio su campioni prelevati dai fori di sondaggio (denominati da S1B a S5B) eseguiti sia a partire dal coronamento diga sia nel terreno d'imposta a pochi metri a valle della diga stessa e sulla spalla sinistra:
 - ◆ n° 5 analisi granulometriche su campioni di materiale granulare, ASTM-D422;
 - ◆ n° 5 determinazioni dei limiti di consistenza, ASTM-D4318;
 - ◆ n° 5 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° 7 prove di compressione triassiale con determinazione delle deformazioni assiali e determinazione della massa volumica apparente, ASTM-D5407-93;
 - ◆ n° 2 prove di compressione triassiale con determinazione delle deformazioni assiali e circolari, con determinazione della massa volumica apparente, ASTM-D5407-93;
 - ◆ n° 5 prove di carico puntuale (point load), ASTM-D5731-95.

3.2.2 Comitgeo s.n.c. (2003)

- esecuzione ed interpretazione di 4 basi sismiche a rifrazione, per un totale di 326m, con lettura sia delle onde P che delle onde S e definizione dei moduli elastico-dinamici dei terreni;
- esecuzione di n° 2 sondaggi meccanici a carotaggio continuo, con caratterizzazione geomeccanica dei litotipi, prelievo "orientato" delle carote in roccia, con analisi statistico strutturale sui depositi consolidati, posa in opera del rivestimento e relativa cementazione in foro (SC1 ed SC2);
- esecuzione di 4 logs termodifferenziali nei sondaggi meccanici;
- esecuzione di 9 prove di permeabilità in foro Lefranc;
- esecuzione di 3 prove di densità in sito entro l'area di fluttuazione del bacino d'invaso (D1, D2, D3) con prelievo ed analisi dei campioni relativi;

- prelievo ed analisi di laboratorio su 5 campioni dai pendii e dagli interstrati rocciosi ed 11 dai sondaggi meccanici eseguiti nel corso del presente studio (analisi granulometriche, limiti di Atterberg, umidità naturali);
- prelievo di 4 serie di campioni per l'esecuzione di una prova di taglio diretto su 4 provini diversi in roccia (C.1, C2, C2 bis e C3) e su 2 dei campioni sciolti prelevati per le densità in sito (D1 e D2).

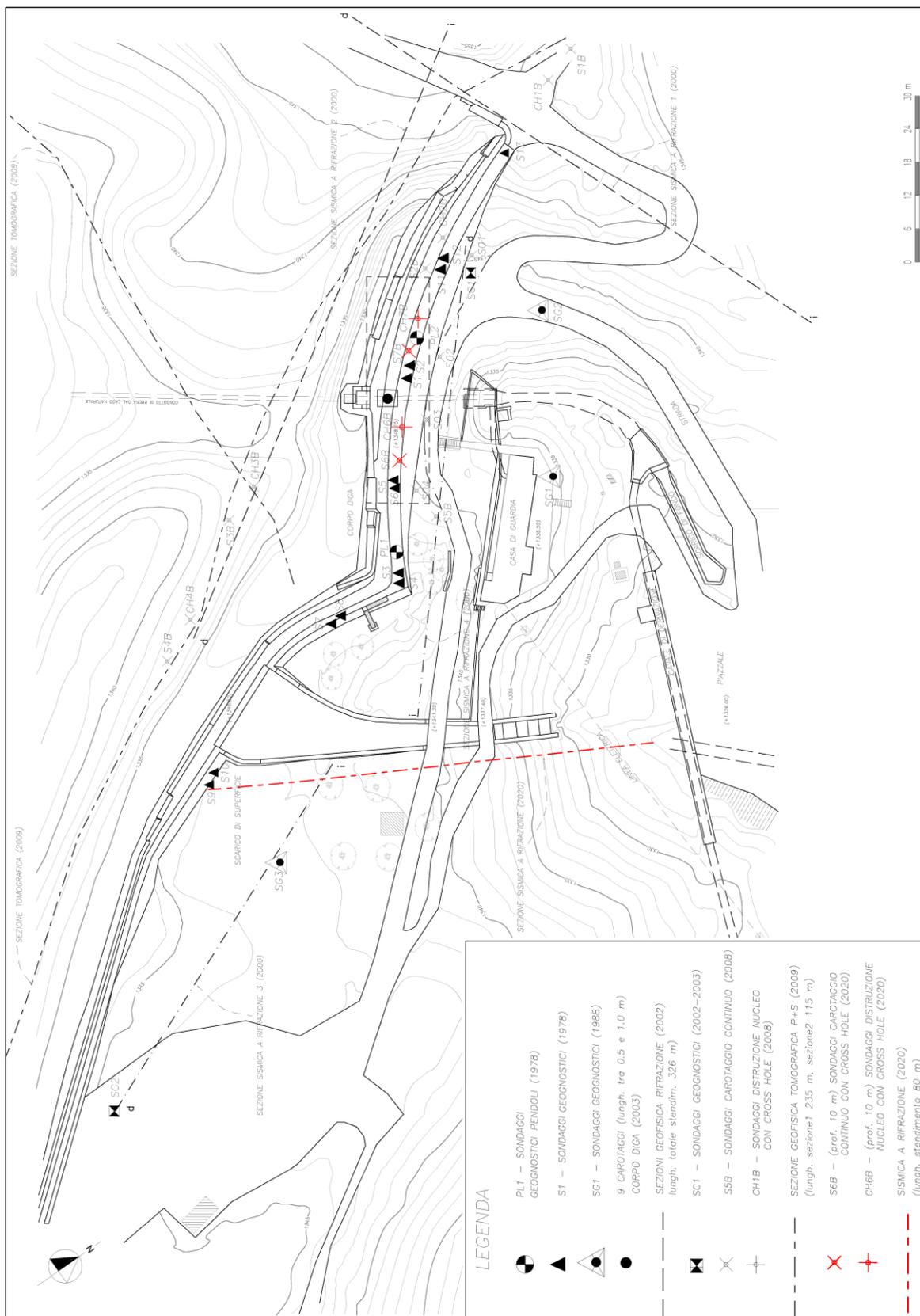


Figura 3.1 Ubicazione delle indagini pregresse realizzate nel contesto della diga di Ballano

4. CARATTERIZZAZIONE DEI TERRENI ED AMMASSO DI FONDAZIONE

4.1 Classificazione ammasso e terreni con caratterizzazione delle proprietà geotecniche e geomeccaniche

Per quanto riguarda i detriti di falda ed i depositi glaciali e periglaciali che caratterizzano rispettivamente il contesto geologico nella porzione nord-occidentale e sud-orientale dello sbarramento, si evidenziano delle peculiarità di comportamento geotecnico che li portano ad essere caratterizzati all'interno di un'unica 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-limoso.

Nel Volume Geotecnico Significativo i depositi detritici e glaciali sono stati ritenuti omogenei in termini di comportamento meccanico e **classificati e caratterizzati come una terra nel contesto di un'unica 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 a diretto contatto con l'estrema porzione occidentale del corpo diga è stato definito mettendo a sistema le caratteristiche desunte dalle campagne di indagini in sito del 2003 e del 2008-2009, 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.

Il **comportamento geomeccanico dell'intero ammasso di fondazione** costituito dalle alternanze arenaceo-pelitiche della Formazione del Macigno è stato definito in accordo con le indicazioni e le metodologie fornite dai principali Autori. Più precisamente, sono state considerate sia le caratteristiche della roccia intatta che le peculiarità delle discontinuità dell'ammasso (Barton & Choubey, 1977; Hoek & Brown, 1980, De Vallejo, 2004 e riferimenti all'interno; De Vallejo & Ferrer, 2011 e riferimenti all'interno; Bruno, 2012 e riferimenti all'interno).

In una fase preliminare dello studio geomeccanico dell'ammasso, è stata condotta una ricerca bibliografica su studi a carattere geologico-tecnico e sulla letteratura scientifica, basandosi su unità geologiche ed ammassi simili a quello analizzato.

Alcune delle caratteristiche dell'ammasso roccioso in esame sono state parallelamente valutate in modo indiretto, confrontando le peculiarità dell'ammasso roccioso in esame con le caratteristiche di ammassi aventi la medesima connotazione litotecnica in letteratura. Più precisamente, per la determinazione della miglior stima dei valori dei parametri fisico-meccanici da assegnare all'ammasso roccioso sono state prese in considerazione le determinazioni derivanti dalle indagini sito-specifiche condotte unitamente alle informazioni derivanti dalla letteratura tecnica.

Le prove di laboratorio sui campioni prelevati hanno consentito di caratterizzare i parametri della matrice rocciosa integra, mentre le indagini in sito – in foro e in superficie – hanno permesso la caratterizzazione d'ammasso.

In tal modo, mettendo a sistema le caratteristiche geotecniche e geomeccaniche derivate dalla letteratura scientifica con le valutazioni realizzate per i dati desunti dalle campagne di indagini disponibili e dai rilievi geomeccanici effettuati, sono stati derivati i parametri della matrice rocciosa integra e dell'ammasso roccioso.

Così, lo studio delle fonti bibliografiche e di studi geologici e geotecnici sito-specifici ha consentito di ottenere i parametri della matrice rocciosa integra, mentre, al contempo, l'analisi delle informazioni derivanti dalle citate campagne di indagini ha permesso di costruire un modello completo sullo stato di quest'ultimo. In questo modo è stato possibile derivare i parametri legati alla **resistenza della matrice rocciosa**, al **Modulo di Young**, al **coefficiente di permeabilità**, all'**angolo d'attrito equivalente** ed alla **coesione equivalente dell'ammasso**, oltre all'**orientazione delle famiglie di discontinuità** per l'eventuale individuazione di meccanismi di scorrimento, consentendo quindi una definizione delle informazioni utili al presente Progetto.

Per la classificazione geomeccanica dell'ammasso roccioso arenaceo-pelitico, ci si è basati sul criterio di classificazione GSI (*Geological Strength Index*) introdotto da *Hoek et al. (1992)* e sviluppato per i litotipi costituiti da alternanze in *Marinos e Hoek (2001)* e *Marinos (2019)*.

La libertà di un ammasso roccioso fratturato dipende dalle proprietà dei blocchi di roccia intatta e dalla libertà di questi ultimi di scorrere e ruotare nelle condizioni imposte di stress. Tale libertà è controllata dalla forma geometrica dei blocchi rocciosi e dalle condizioni delle superfici che li separano. In particolare, il GSI fornisce un numero che, insieme alle proprietà della roccia intatta, può essere utilizzato per stimare la riduzione della resistenza e rigidità dell'ammasso per diverse condizioni geologiche. Proprio grazie alle osservazioni effettuate in sito è stato possibile definire differenti sistemi di discontinuità all'interno dei volumi di ammasso considerati, caratterizzando quindi un certo grado di fratturazione e di alterazione del sistema preso in esame. Nel dettaglio, ad ammassi rocciosi costituiti da alternanze si assegna una classe e un valore di qualità d'ammasso attraverso una combinazione della sua struttura e della sua composizione (dipendenti particolarmente dal rapporto tra la parte grossolana e la parte fine del flysch, unitamente al grado di deformazione fragile o duttile subito) e delle condizioni delle superfici di discontinuità (rugosità, alterazione, apertura, ecc. soprattutto dei piani di strato, ritenuti la famiglia di discontinuità più pervasiva di questo tipo di ammassi).

Sulla base di quanto riportato nella documentazione disponibile, all'interno del Volume Geotecnico Significativo, alla scala dello sbarramento, sono state riconosciute, classificate e caratterizzate 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. 3 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;
- **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.

In Tabella 4.1 si riporta la matrice di correlazione tra unità stratigrafiche e unità geotecniche scaturita dall'analisi.

Tabella 4.1 Matrice di correlazione per le unità considerate all'interno del VGS

MATRICE DI CORRELAZIONE UNITÀ STRATIGRAFICHE – UNITÀ LITOTECNICHE	
Depositi detritici derivanti da fenomeni di origine gravitativa e glaciale	UG-1 = Ghiaia con sabbia limosa
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, UL-1, UL-2 e il corpo diga e, successivamente, si analizzano le stesse UG-1, UL-1 e UL-2 sulla base dei dati disponibili, per giungere alle loro classificazioni e caratterizzazioni.

4.2 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. 3 sezioni geotecniche interpretative della zona di imposta dell'opera: n. 2 longitudinali, con viste da monte e da valle, e n. 1 trasversale al coronamento.

Si riportano di seguito le tracce di 3 sezioni geotecniche, su base della cartografia geologica in scala 1:10'000 (Figura 4.1), realizzate longitudinalmente e trasversalmente al coronamento dell'opera. La sezione A-A' rappresenta quella longitudinale al coronamento dell'opera, con viste da monte e da valle, mentre la sezione D-3 quella trasversale (rispettivamente in Figura 4.2, Figura 4.3 e Figura 4.4).

In particolare, la sezione D-3 di Figura 4.4 rappresenta la sezione di verifica che è stata tracciata in sinistra rispetto al punto di massima altezza del corpo diga.

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 geotecniche e litotecniche è stato dedotto dai sondaggi geognostici realizzati, unitamente alle informazioni derivanti dalle prove geofisiche.

La Formazione Macigno, cui si riferiscono le unità UL-1 e UL-2 ed individuabile al di sotto dell'imposta e localmente dei depositi detritici di origine gravitativa e glaciale, presenta un generale assetto con la stratificazione principale orientata verso N-NE, come deducibile dalle indagini realizzate. In ogni caso, frequentemente le carote estratte dai sondaggi sono risultate caratterizzate da sistemi di discontinuità e fratturazione con inclinazioni medie di circa 25° rispetto all'orizzontale.

Infine, grazie alle testimonianze fornite dalle stesse indagini realizzate nell'ambito dello sbarramento, la formazione rocciosa di fondazione risulta essere caratterizzata dalla presenza di una fascia superficiale di spessore medio compreso tra 5 e 10 metri di ammasso particolarmente fratturato ed alterato rispetto a quanto riscontrabile più in profondità.

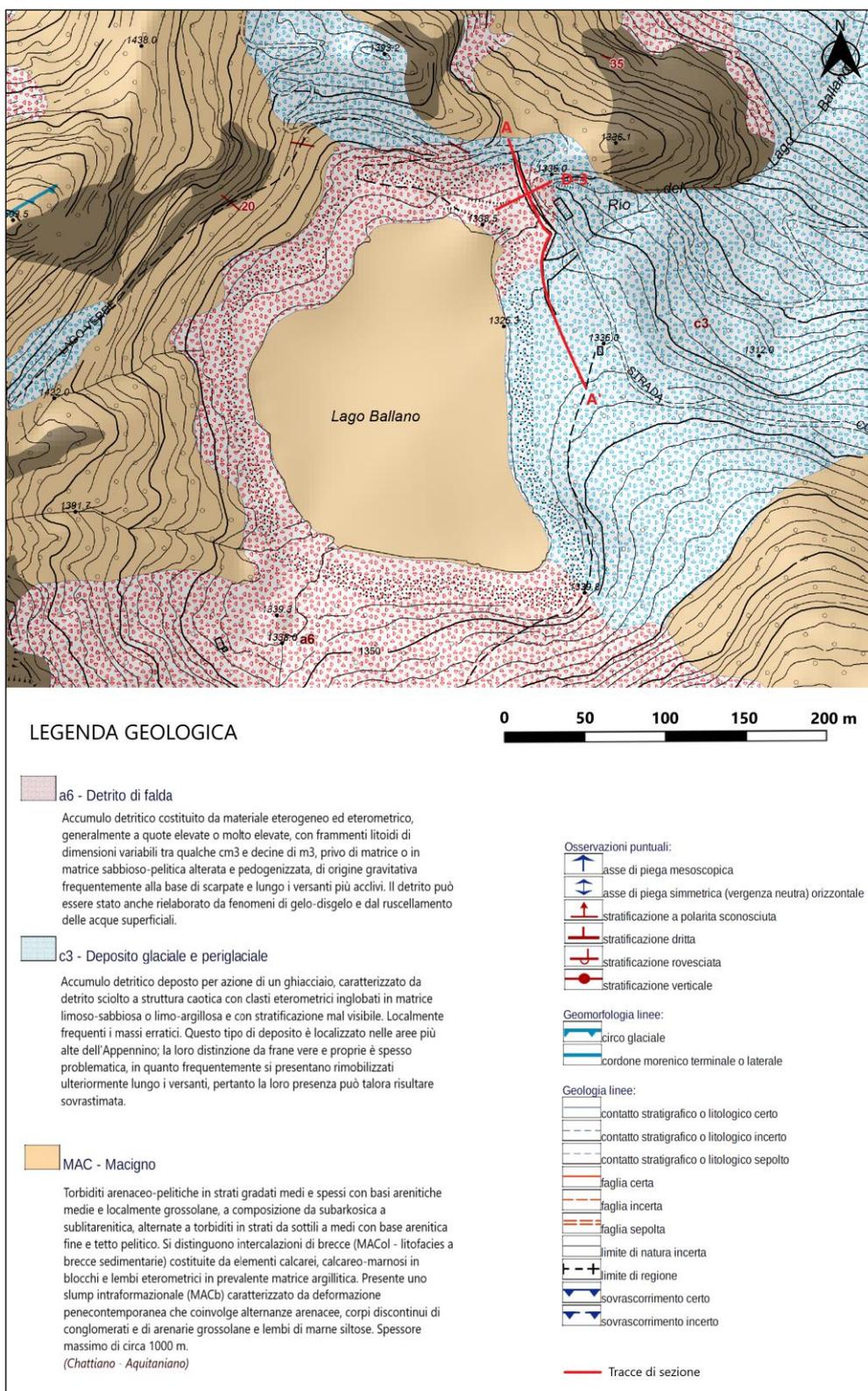


Figura 4.1 Stralcio della Carta Geologica in scala 1:10'000 della Regione Emilia-Romagna, nella quale sono riportate le tracce delle sezioni geotecniche A-A' e D-3 [234020 Valditacca – Carta Geologica dell'appennino emiliano-romagnolo, 2011]

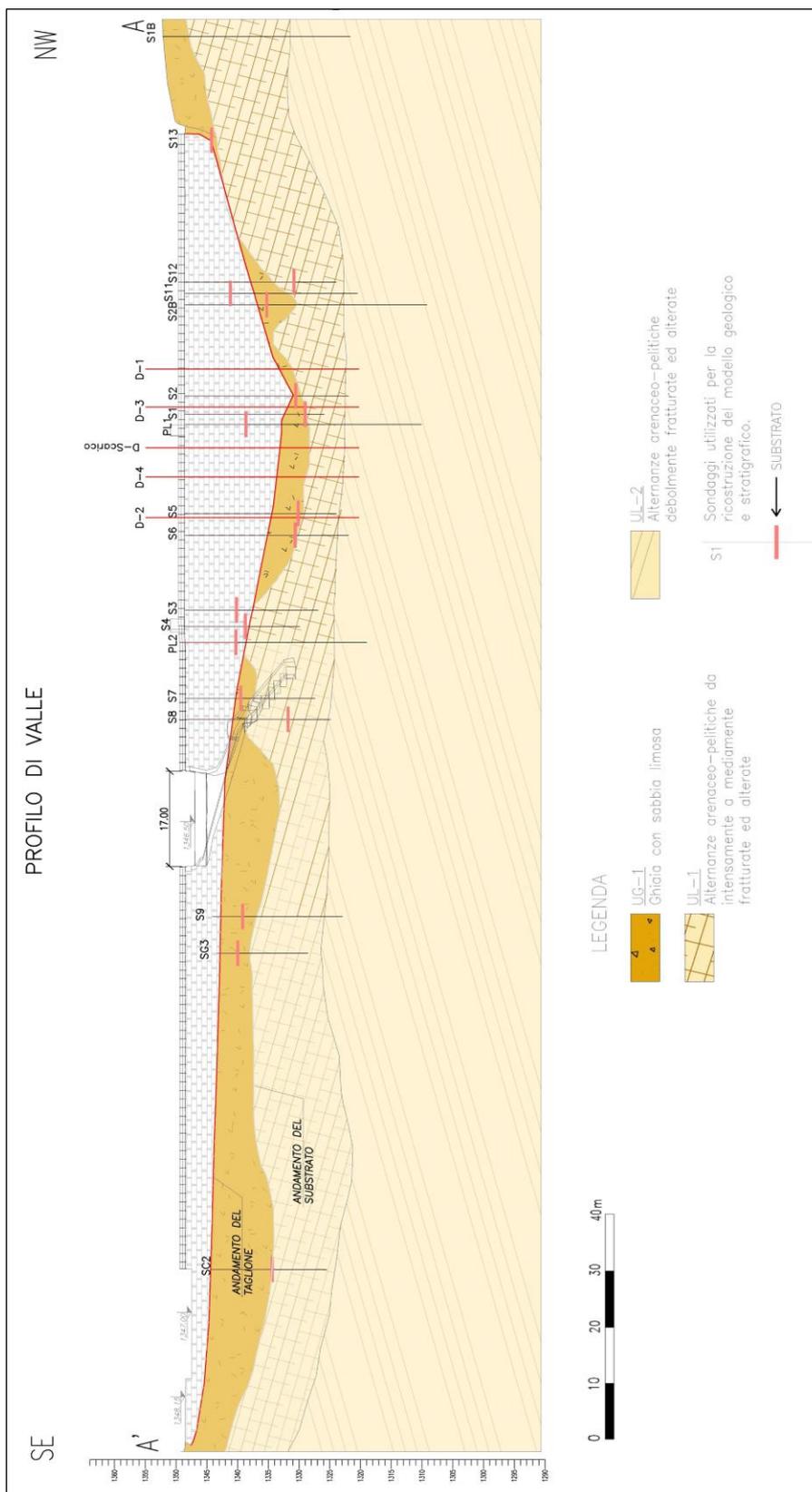


Figura 4.3 Sezione geotecnica interpretativa A-A' parallela al coronamento dell'opera, vista da valle

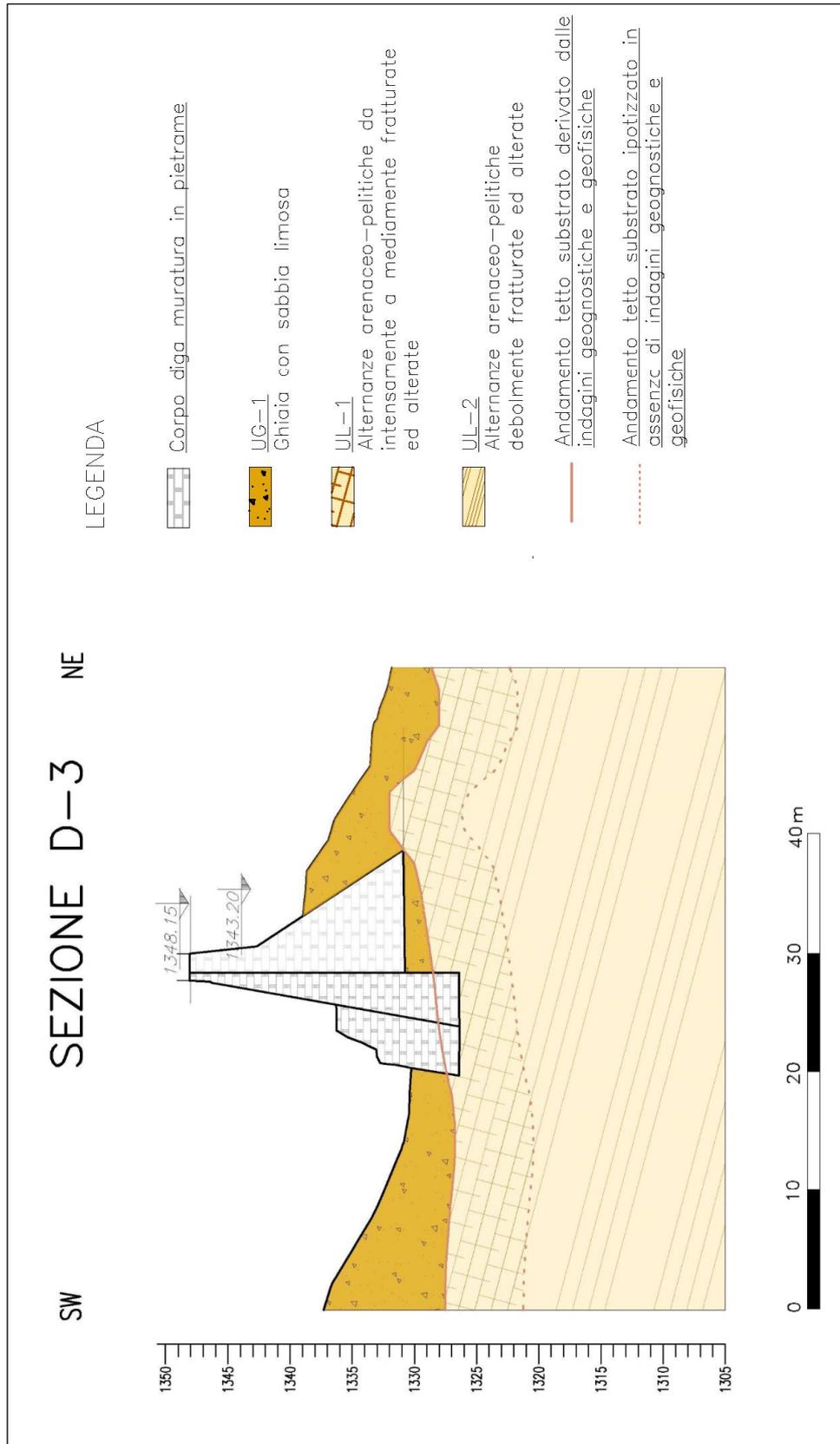


Figura 4.4 Sezione geotecnica interpretativa D-3 trasversale al coronamento dell'opera

4.3 Analisi granulometrica e determinazione dei limiti di liquidità e plasticità

4.3.1 SONDEDILE Srl - ISMES (2008-2009)

I sondaggi geognostici effettuati nel 2009 da Sonedile Srl hanno permesso l'estrazione rispettivamente di n. 18 campioni di materiale suddivisi tra campioni delle terre e delle rocce.

Tabella 4.2 Prove eseguite in laboratorio

PROVE SULLE TERRE			
Sondaggio	Id. Campione	Profondità [m]	Prova eseguita
S3B	SPT2	8.00 – 8.46	Analisi Granulometrica Limiti di consistenza
S3B	1	10.50 – 11.00	Analisi Granulometrica Limiti di consistenza
S4B	SPT2	6.00 – 6.45	Analisi Granulometrica Limiti di consistenza
S4B	1	11.00 – 11.60	Analisi Granulometrica Limiti di consistenza
S5B	1	7.00 – 7.50	Analisi Granulometrica Limiti di consistenza
D1		Superficie	Deter. Umidità naturale
D2		Superficie	Deter. Umidità naturale
D3		Superficie	Deter. Umidità naturale
D4		Superficie	Deter. Umidità naturale
D5		Superficie	Deter. Umidità naturale

Le analisi di laboratorio, data l'impossibilità di prelievo di campioni indisturbati, essendo prelevati da carote estratte con carotiere doppio (T6S) e semplice, e visto il carattere prettamente granulare dei terreni incontrati, hanno riguardato la determinazione della distribuzione granulometrica ed ove possibile delle caratteristiche di plasticità.

Sono stati determinati i limiti di Atterberg su 2 dei 5 campioni prelevati, che hanno fornito un limite liquido WL 25-23 % ed un indice di plasticità IP = 7.

La caratterizzazione granulometrica dei campioni, effettuata da ISMES nel 2009, è stata eseguita mediante setacciatura per via umida.

Le frazioni granulometriche dei campioni analizzati possono essere così sintetizzate:

- **frazione grossolana:**
 - 36 ÷ 57 % (47 % in media) di ghiaia;
 - 21 ÷ 31 % (26 % in media) di sabbia.
- **frazione fine:**
 - 15 ÷ 41 % (27 % in media) di limo.

In definitiva il materiale è classificabile, secondo AGI 1977, come **ghiaia con sabbia limosa**.

In Figura 4.5 è possibile osservare le curve granulometriche rinvenute dai campioni.

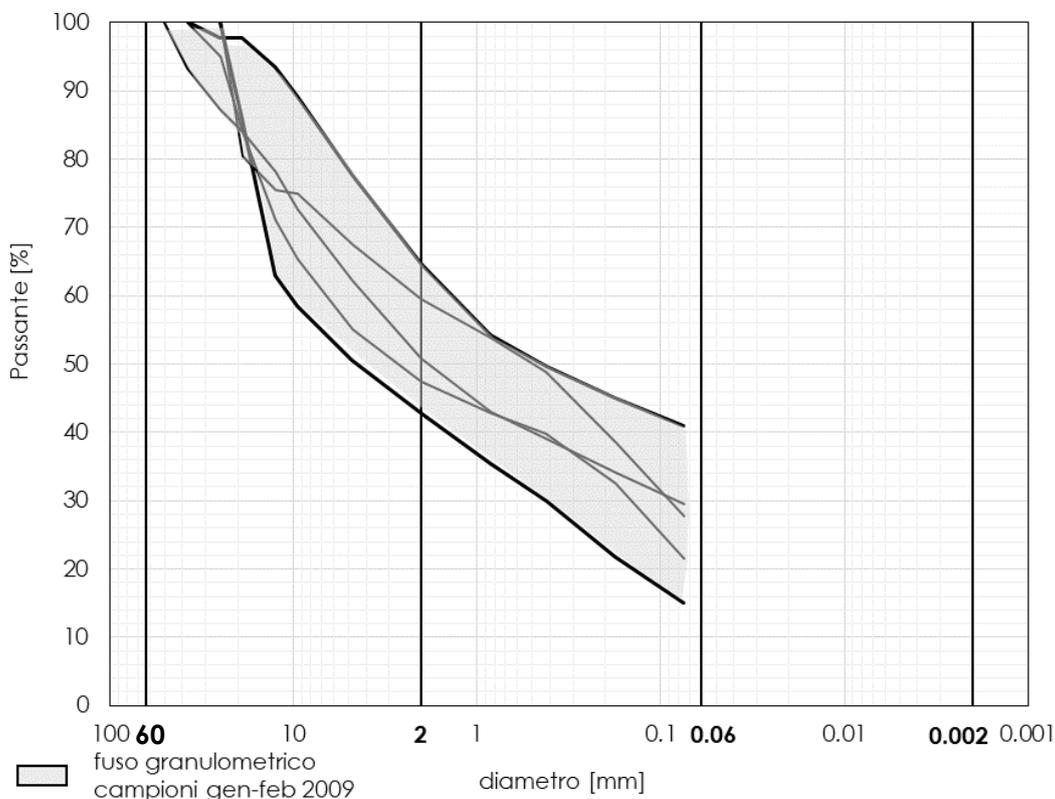


Figura 4.5 Curve granulometriche dei campioni estratti nel 2009

4.3.2 Comitgeo s.n.c. (2003)

Durante la campagna indagini sono state effettuate 3 prove di densità in sito entro l'area di fluttuazione del bacino d'invaso (D1, D2, D3) con prelievo ed analisi dei campioni relativi e 11 dai sondaggi meccanici eseguiti nel corso del presente studio (analisi granulometriche, limiti di Atterberg, umidità naturali) (Figura 4.6) che fornisce risultati sostanzialmente in linea con quanto evidenziato dalla campagna indagini SONDEDILE Srl - ISMES (2008-2009) (Par 4.3.1).

Le frazioni granulometriche dei campioni analizzati possono essere così sintetizzate:

- **frazione grossolana:**
 - 6 ÷ 30 % (14 % in media) di ghiaia e ciottoli;
 - 11 ÷ 59 % (32 % in media) di ghiaia;
 - 18 ÷ 43 % (32 % in media) di sabbia.
- **frazione fine:**
 - 4 ÷ 33 % (22 % in media) di limo;

In definitiva il materiale è classificabile, secondo AGI 1977, come **ghiaie e sabbie limoso ciottolose**.

In Figura 4.6 è possibile osservare le curve granulometriche rinvenute dai campioni.

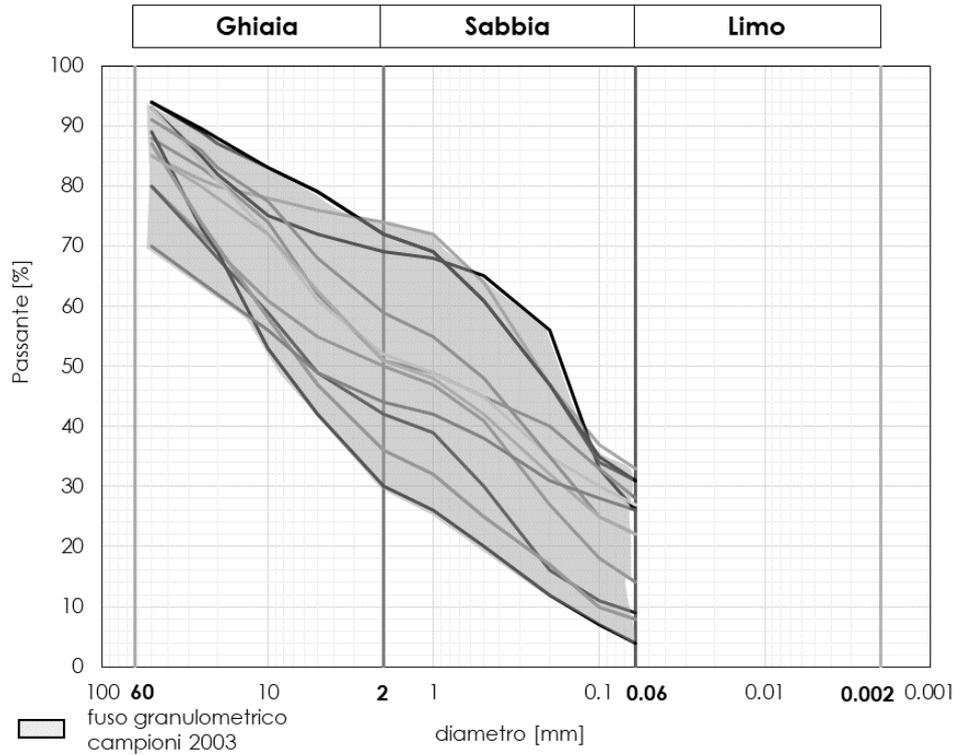


Figura 4.6 Curve granulometriche dei campioni estratti nel 2003

4.4 Caratteristiche fisiche e proprietà indice

4.4.1 SONDEDILE Srl - ISMES (2008-2009)

Nella relazione non sono riportate indicazioni specifiche riguardanti il peso per unità di volume dei terreni e rocce di fondazione.

Per questo motivo, le uniche informazioni riguardanti il peso specifico dell'unità UG-1, possono essere dedotte solo dalle prove geofisiche Par. 4.9 oltre che dalla letteratura tecnica.

4.4.2 Comitgeo s.n.c. (2003)

Pur non essendo presenti certificati, sono state effettuate prove di densità in sito per la determinazione del peso per unità di volume su n. 3 campioni (D1, D2, D3). I risultati sono riportati in Tabella 4.3.

Si evidenzia come il **peso per unità di volume del materiale dell'unità UG-1 è mediamente pari a $\gamma = 19.2 \text{ kN/m}^3$** .

Tabella 4.3 Prove per la determinazione del peso per unità di volume del 2003

Zona	Campione	Unità	Peso per unità di volume	
			γ [kN/m ³]	γ_d [kN/m ³]
Area di fluttuazione del bacino	D3	-	17.08	4.93
	D1	UG1	18.93	16.07
	D2	UG1	19.43	18.35

4.5 Parametri meccanici di resistenza al taglio

4.5.1 SONDEDILE Srl - ISMES (2008-2009)

Sono state eseguite n. 6 prove penetrometriche dinamiche (SPT) in corrispondenza dei terreni granulari e coesivi, sondaggi S1B, S3B e S4B.

La procedura seguita per l'esecuzione della prova e per la registrazione dei dati di avanzamento è quella contenuta nella normativa AGI. L'esecuzione di ogni prova è avvenuta utilizzando il campionatore Raymond, dotato di una scarpa terminale che consente il prelievo, a fine prova, di un campione rimaneggiato.

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 4.4, le informazioni di dettaglio sono invece osservabili in Figura 4.7.

Tabella 4.4 Risultati ed elaborazioni delle SPT effettuate sul materiale.

	profondità	N _{SPT}	Bazaraa (1967) Dr [-]	Skempton (1986) Dr [-]	Bolton (1986) ϕ'_{picco} [gradi]	De Mello (1971) ϕ'_{picco} [gradi]	Schmertmann (1977) ϕ'_{picco} [gradi]
S1B	3,15	31	0,65	0,66	44	46	43
	3,30						
	3,45						
S3B	3,15	62	0,93	0,90	49	53	45
	3,30						
	3,45						
S3B	6,15	29	0,57	0,59	42	44	43
	6,30						
	6,45						
S4B	3,15	27	0,61	0,62	44	45	43
	3,30						
	3,45						
S4B	6,15	29	0,57	0,59	42	44	43
	6,30						
	6,45						
	media	36	0,67	0,67	43	45	43

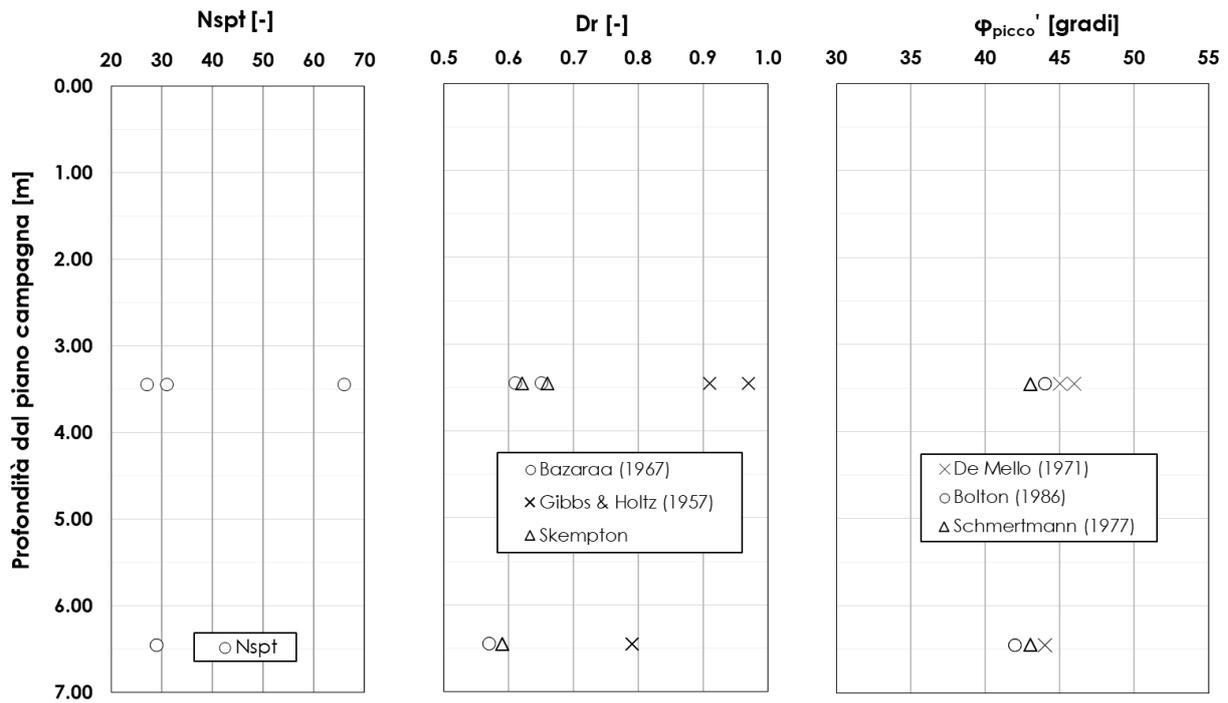


Figura 4.7 Profili di N_{SPT} , D_r e Φ' relativi ai sondaggi S1B, S2B e S4B

I risultati sono riportati in Tabella 4.4 e in Figura 4.7. È possibile notare che:

- Il numero di colpi N_{SPT} è simile per tutte le prove, ad eccezione del sondaggio S3B che fornisce un numero di colpi nettamente superiore; quindi, non è stato preso in considerazione nelle valutazioni.
- La **densità relativa del materiale dell'unità UG-1 risulta essere compresa tra 0.57 e 0.66 con un valore medio pari a circa 0.61** che, in base alle classificazioni presenti in letteratura tecnica (*Gibbs e Holtz 1957*) connotano il materiale dell'unità UG-1 come **mediamente addensato** (Figura 4.8).
- I valori dell'**angolo di attrito per l'unità UG-1 risultano compresi tra i 42° e i 46° 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 4.8 Stima della densità relativa dai risultati di prove SPT (*Gibbs e Holtz 1957*)

4.5.2 Comitgeo s.n.c. (2003)

Sono state eseguite prove di taglio diretto, secondo la normativa AGI 1994, su 2 dei campioni sciolti prelevati per le densità in sito (D1 e D3). Queste prove sono state eseguite su **provini ricostruiti con passante al setaccio 0.085 mm**.

I risultati sono riportati in Figura 4.9 e Tabella 4.5.

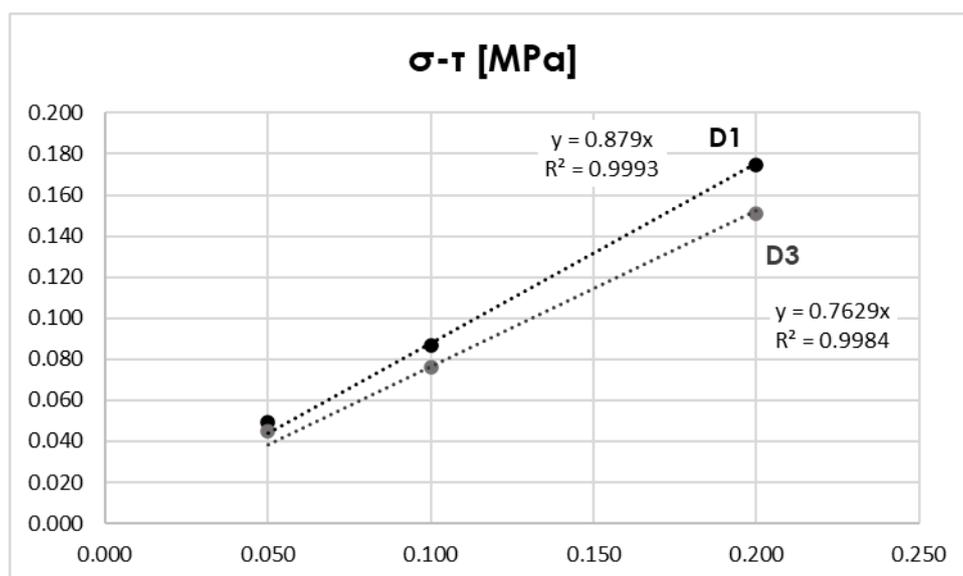


Figura 4.9 Prove per la determinazione della resistenza a taglio (2003)

Tabella 4.5 Risultati delle prove di taglio diretto (2003)

Zona	Campione	σ	τ_{max}	φ'	c'
[-]	[-]	[kPa]	[kPa]	[-]	[kPa]
Area di fluttuazione del bacino	D1	50.00	49.503	41	0
		100.00	87.099		
		200.00	175.231		
	D3	50.00	45.030	37	0
		100.00	76.169		
		200.00	151.643		

I risultati forniscono un **valore dell'angolo di attrito per l'unità UG-1 mediamente pari a $\varphi' = 39^\circ$** .

4.6 Permeabilità dei terreni

4.6.1 SONDEDILE Srl - ISMES (2008-2009)

Nella relazione non sono riportate indicazioni specifiche riguardanti la permeabilità dei terreni.

4.6.2 Comitgeo s.n.c. (2003)

Su tutti gli orizzonti rappresentativi riscontrati sui due sondaggi meccanici SC1 ed SC2, sono state eseguite prove di permeabilità con il metodo di Lefranc. I valori di permeabilità misurati risultano simili tra l'unità UG-1 e la UL-1. I risultati sono riportati nella Tabella 4.6.

Tabella 4.6 Risultati delle prove Lefranc

sondaggio	prova	Profondità da p.c. [m]	Descrizione stratigrafica	Unità	k [m/s]
SC1	1	4.5/5.3	Sabbie con limoso ghiaiosi	UG1	3.55E-07
	2	6.0/6.7	Trovante arenaceo a grana grossolana con spalmature limose	UG1	1.02E-06
	3	8.5/9.0	Sabbie e ghiaie limose deb. ciottolose	UG1	1.09E-07
	4	11.5/12.5	Arenarie fini fratturate	UL1	4.75E-06
	5	11.5/18	Arenarie fini compatte	UL2	Fondo intasato
SC2	1	6.0/6.8	Ghiaie con limi e sabbie e rari ciottoli fino a 10 cm di diametro	UG1	8.07E-06
	2	8.5/9.4	Ghiaie e sabbie limoso ciottolose	UG1	7.77E-07
	3	9.5/13.1	Alternanze di siltiti ed arenarie fini	UL1	1.99E-06
	4	9.5/16.0	Arenarie fini fratturate	UL1	1.04E-06

I risultati, per quanto riguarda l'unità **UG-1**, forniscono valori compresi fra $8 \cdot 10^{-6}$ e $3,5 \cdot 10^{-7}$ m/s a seconda della frazione di limo, con un **valore medio del coefficiente di permeabilità pari a $k = 2 \cdot 10^{-6}$ m/s**. Per quanto riguarda i tratti indicati con la sigla UL-1 ci si riferisce a quella porzione di UL-1 a diretto contatto con i depositi morenici ed avente caratteristiche intermedie tra un terreno ed un ammasso. Questa limitata fascia presenta un valore medio del coefficiente di permeabilità circa pari a $k = 3 \cdot 10^{-6}$ m/s.

4.7 Permeabilità dell'ammasso

4.7.1 SONDEDILE Srl - ISMES (2008-2009)

Le prove Lugeon realizzate per gli ammassi rocciosi, realizzate nella campagna di indagini Sondedile del 2008-2009 forniscono generalmente valori di permeabilità pressoché costanti all'interno delle singole unità stratigrafiche (Tabella 4.7).

In quanto agli ammassi rocciosi, le prove Lugeon forniscono, in generale, valori di permeabilità eterogenei per i diversi sondaggi e a varie profondità. In particolare, i litotipi dimostrano localmente una buona permeabilità, probabilmente per via del grado di fratturazione molto variabile. I valori di Unità Lugeon sono costantemente superiori all'unità, compresi tra 4.0 e 10.2.

I risultati delle prove indicano condizioni di flusso laminare e turbolento in discontinuità più o meno aperte. Si segnalano andamenti anomali per le prove n. 5 e 6 e si potrebbe probabilmente trattare di un malfunzionamento dei sensori utilizzati.

L'analisi dei risultati e dei grafici per la valutazione dei risultati delle prove, indica la presenza di fenomeni erosivi, di allentamento e rottura, nell'area di contatto tra i depositi detritici di UG-1 ed il sottostante substrato alterato (UL-1), in corrispondenza dei fori S1B ed S2B. Nel contesto dei sondaggi S3B e S5B, all'interno dell'ammasso si evidenziano allo stesso modo fenomeni erosivi nel tratto a profondità tra 16 e 21 m e ad oltre 25 m.

Si segnala infine che nell'ambito del foro S5B si evidenzia un recupero elastico nel tratto a fine della prova.

Tabella 4.7 Valori del grado di permeabilità nel contesto dell'ammasso roccioso da prove Lugeon eseguite nella campagna Sondedile del 2008-2009

Dati identificativi				Prove di permeabilità Lugeon		
Unità	Campagna di indagini	Sondaggio	Prof. da p.c.	Condizioni di moto idraulico	Valore Unità Lugeon	Valore di permeabilità
			(m)		(UL)	(m/s)
UL-1, UL2	SONDEDILE 2008-2009	S1B	7.00-12.00	Laminare	8.10	8.1E-07
			16.00-19.00	Allentamento o rottura	10.20	1.0E-06
			25.00-30.00		4.00	4.0E-07
		S2B	16.00-21.00	Allentamento o rottura	6.60	6.6E-07
			30.00-35.00	Laminare	4.50	4.5E-07
		S3B	16.00-21.00	Erosione	5.47	5.5E-07
			25.00-29.40	Allentamento o rottura	6.10	6.1E-07
			35.00-40.00	Laminare	4.00	4.0E-07
		S4B	15.00-19.00	Allentamento o rottura	7.02	7.0E-07
			30.00-34.65	Laminare	4.30	4.3E-07
		S5B	24.00-27.00	Laminare	10.10	1.0E-06
			37.00-40.00	Recupero elastico	5.80	5.8E-07
VALORE MEDIO RAPPRESENTATIVO						6.35E-07

Dalle prove Lugeon realizzate nel contesto dell'ammasso, si può derivare un valore di permeabilità K pari a $k = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$.

4.8 Parametri di rigidità elastici

4.8.1 SONDEDILE Srl - ISMES (2008-2009)

Sono state eseguite, presso Ballano, n. 8 prove dilatometriche su roccia tipo DRT (dilatometric rock test) in foro di sondaggio (Ballano: S4B D1 e D2; S1B D1, D2, e D3 e S2BD1, 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 geostrutturali e tensionali diversificate.

In Tabella 4.8 sono riepilogati i risultati delle prove dilatometriche eseguite. In tutti e tre i fori il valore medio del modulo di elasticità cresce con la profondità. Nel foro prossimo alla spalla sinistra della diga (S1B) la determinazione più superficiale dà un valore di 4850 MPa, la più profonda di 6906 MPa, con un valore medio di circa 6400 MPa.

Negli altri due fori si hanno invece valori relativamente più bassi (S2B Emedio = 3000 MPa; S4B Emedio = 1250 MPa).

I valori del modulo di elasticità di Young sono stati ricavati dalla pendenza media del ciclo stesso ovvero dal tratto di scarico o ricarica. 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 ricarica.

Tabella 4.8 - Riepilogo delle prove dilatometriche in foro

Sondaggio	Profondità [m]	RQD [%]	Litotipo	EG [MPa]	E1 [MPa]	E2 [MPa]	Emedio [MPa]
S1B-D1	15.5	90	Arenaria medio fine grigia	3544	4494	5206	4850
S1B-D2	24.5	85	Arenaria medio grossa grigia	5525	4460	10359	7410
S1B-D3	29.5	90	Arenaria medio grossa grigia	7767	4437	9375	6906
S2B-D1	21.5	50	Siltite nerastra	1165	1322	3504	2413
S2B-D2	29.5	75	Siltite / arenaria fine	1355	2246	3501	2874
S2B-D3	37.5	80	Siltite / arenaria fine	1219	3541	4387	3964
S4B-D1	14.5	60	Arenaria medio fine grigia	333	396	-	396
S4B-D2	26.5	70	Arenaria fine	1034	1841	3156	2498

4.9 Parametri dinamici

4.9.1 SONDEDILE Srl – PROGEO Srl (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 SONDEDILE Srl nel 2009.

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), ubicati come mostrato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**

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

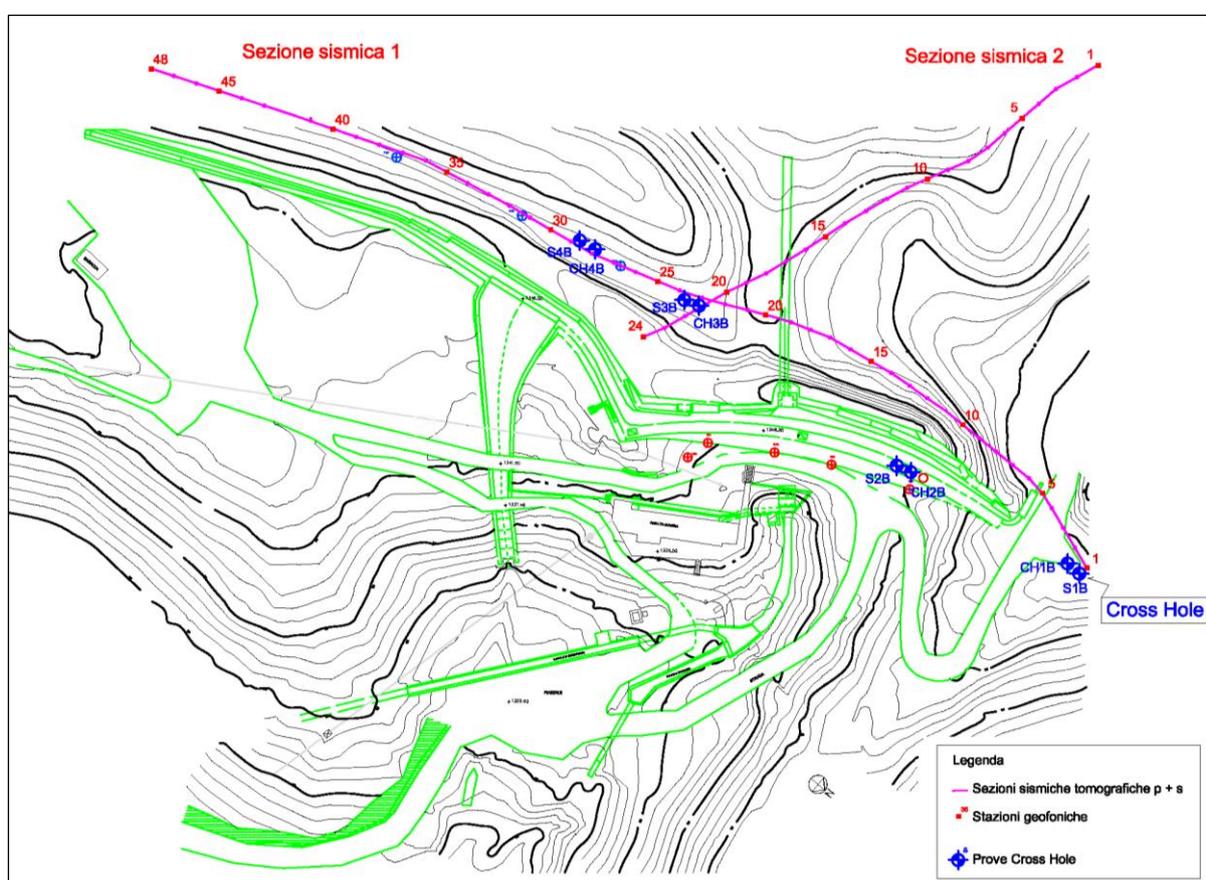


Figura 4.10 Posizionamento delle indagini geofisiche realizzate nel corso della campagna indagini del 2008-2009

4.9.1.1 Prove Cross-hole

Sono state eseguite n. 4 prove cross-hole nelle coppie di fori appositamente attrezzati, intercettando rispettivamente le unità UG-1, UL-1 e UL-2. I risultati delle misure di velocità delle onde longitudinali e trasversali sono rappresentati in forma numerica in Tabella 4.11, Tabella 4.12, Tabella 4.13 e Tabella 4.14, sotto forma di diagrammi in Figura 4.11, Figura 4.12, Figura 4.13 e Figura 4.14.

Le coppie di fori considerate sono state: S1B-CH1B, S2B-CH2B, S3B-CH3B e S4B-CH4B. Per quanto riguarda la coppia S2B-CH2B, ha avuto un accoppiamento mediamente scadente, portando ad un deterioramento dei segnali sismici fino a 18 m di profondità, per questo motivo sono stati considerati solo gli ultimi metri della prova.

I risultati, in termini di **velocità delle onde di taglio** negli spessori dei terreni, indicano un **andamento linearmente crescente con la profondità per l'unità UG-1 con legge:**

$$V_s = \frac{z + 6}{0.0257}$$

mentre, fatta eccezione per i primi metri, non si apprezza una crescita nelle due unità **UL-1** e **UL-2**, dove si possono assumere dei **valori medi rispettivamente pari a 1200 m/s e 1500 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 con legge:**

$$V_p = \frac{z + 4}{0.0058}$$

mentre si possono assumere dei **valori medi pari a 3200 m/s e 3900 m/s rispettivamente per UL-1 e UL-2.**

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 4.9.

Tabella 4.9 Pesi per unità di volume

Unità	γ (kN/m ³)
UG-1	20.0
UL-1	23.5
UL-2	24.5

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

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

mentre, come per le V_s , nelle **unità UL-1 e UL-2** non si apprezza una crescita importante e possono essere considerati dei **valori medi del modulo di taglio rispettivamente pari a 3500 MPa e 5700 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 con legge:

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

mentre nelle unità **UL-1 e UL-2** possono essere considerati dei valori medi rispettivamente pari a **11000 MPa e 16000 MPa**. I risultati sono rappresentati sotto forma di diagrammi in Figura 4.15, Figura 4.16, Figura 4.17, e Figura 4.18.

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 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

Tabella 4.10 Coefficienti di Poisson dinamici

Unità	ν (-)
UG-1	$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$
UL-1	0.42
UL-2	0.41

Tabella 4.11 Velocità delle onde e parametri meccanici dalla prova S1B-CH1B

stratigrafia	CH1B-S1B							
	profondità	Vp	Vs	v	ρ_{din}	Eo	Go	RQD
	[m]	[m/s]	[m/s]	[-]	kg/m ³	[MPa]	[MPa]	[%]
UG1	0	1068	280	0.46	1919	449	153	
	1	1246	381	0.45	1976	847	292	
	2	1438	430	0.45	2030	1110	383	
	3	1613	454	0.46	2075	1270	436	
	4	1828	559	0.45	2125	1961	677	
UL1	5	1837	657	0.43	2127	2670	936	
	6	2076	848	0.40	2177	4468	1596	100
	7	2413	922	0.41	2240	5491	1941	90
	8	2531	966	0.41	2260	6084	2150	100
	9	2713	1129	0.40	2290	8305	2976	90
	10	3031	1281	0.39	2339	10888	3913	100
	11	3005	1341	0.38	2335	11779	4281	70
	12	2893	1461	0.33	2319	13408	5045	90
	13	3268	1583	0.35	2373	16326	6061	100
	14	3084	1224	0.41	2347	10083	3584	100
	15	3287	1615	0.34	2376	16938	6316	70
	16	3082	1591	0.32	2347	15965	6055	100
	17	3240	1658	0.32	2369	17561	6639	90
UL2	18	3251	1608	0.34	2371	16721	6248	100
	19	3481	1654	0.35	2402	18139	6697	100
	20	3391	1764	0.31	2390	19927	7580	100
	21	3976	1699	0.39	2463	20123	7247	100
	22	3742	1620	0.38	2435	18038	6514	100
	23	3214	1579	0.34	2365	16123	6012	100
	24	3849	1768	0.37	2448	21314	7800	100
	25	3695	1548	0.39	2429	16537	5933	90
	26	3568	1572	0.38	2413	16770	6078	40
	27	3613	1567	0.38	2419	16759	6054	100
	28	3958	1551	0.41	2461	17009	6035	100
	29	3899	1301	0.44	2454	12171	4234	100
	30	3385	978	0.45	2389	6775	2329	100

Tabella 4.12 Velocità delle onde e parametri meccanici dalla prova S2B-CH2B

stratigrafia	CH2B-S2B							
	profondità	Vp	Vs	v	ρ_{din}	Eo	Go	RQD
	[m]	[m/s]	[m/s]	[-]	kg/m ³	[MPa]	[MPa]	[%]
CORPO DIGA	0	1332	586	0.38	2001	1933	700	
	1	1514	561	0.42	2050	1869	658	
	2	1252	514	0.40	1977	1490	533	
	3	1010	405	0.40	1898	891	317	
	4	1205	378	0.45	1963	827	286	
	5	1083	341	0.44	1924	659	228	
	6	1405	321	0.47	2021	625	212	
	7	1549	335	0.48	2059	695	236	
	8	1787	418	0.47	2116	1109	377	
	9	1635	529	0.44	2080	1711	593	
	10	2062	673	0.44	2174	2892	1004	
UG1	11	2121	681	0.44	2186	2981	1033	
	12	2103	626	0.45	2182	2530	872	
	13	2063	649	0.45	2174	2698	934	
	14	2484	612	0.47	2252	2524	860	
UL1	15	3823	656	0.48	2445	3185	1072	50
	16	3119	719	0.47	2352	3649	1239	70
	17	3250	877	0.46	2370	5429	1858	70
	18	2706	846	0.45	2289	4830	1670	30
	19	2475	815	0.44	2251	4387	1524	40
	20	2636	805	0.45	2278	4360	1505	100
	21	2399	917	0.41	2238	5426	1918	80
	22	2302	817	0.43	2220	4314	1511	70
	23	2383	806	0.44	2235	4248	1480	100
	24	2437	786	0.44	2244	4076	1413	100
	25	2467	826	0.44	2249	4496	1564	90
	26	3372	993	0.45	2387	6970	2399	90
UL2	27	3772	1195	0.44	2438	10253	3550	100
	28	4056	1346	0.44	2472	13133	4566	100
	29	3955	1465	0.42	2461	15293	5383	100
	30	4054	1503	0.42	2472	16171	5693	80
	31	4041	1543	0.41	2471	16965	5996	90
	32	3370	1835	0.29	2387	21125	8193	100
	33	3348	1626	0.35	2384	17291	6425	70
	34	3256	1587	0.34	2371	16367	6088	100
	35	3436	1407	0.40	2396	13529	4834	60
	36	3515	1446	0.40	2406	14340	5128	80
	37	3685	1413	0.41	2428	13971	4941	50
	38	3346	1415	0.39	2384	13535	4865	50
	39	3525	1733	0.34	2407	19760	7370	50

Tabella 4.13 Velocità delle onde e parametri meccanici dalla prova S3B-CH3B

stratigrafia	CH3B-S3B							
	profondità	Vp	Vs	v	ρ_{din}	Eo	Go	RQD
	[m]	[m/s]	[m/s]	[-]	kg/m ³	[MPa]	[MPa]	[%]
UG1	0	527	185	0.43	1678	167	59	
	1	647	284	0.38	1744	396	143	
	2	758	295	0.41	1798	450	159	
	3	970	299	0.45	1884	497	172	
	4	1286	326	0.47	1988	631	215	
	5	1623	394	0.47	2077	966	329	
	6	1869	488	0.46	2134	1516	518	
	7	2092	573	0.46	2180	2130	730	
	8	2500	950	0.42	2255	5874	2075	
	9	2879	1055	0.42	2316	7477	2628	
UL1	10	3062	1183	0.41	2344	9444	3344	60
	11	3195	1262	0.41	2363	10799	3836	20
	12	3308	1269	0.41	2378	11039	3904	
	13	3484	1381	0.41	2402	13138	4670	40
	14	3505	1527	0.38	2405	15808	5716	80
UL2	15	3596	1542	0.39	2416	16251	5857	80
	16	3693	1509	0.40	2429	15782	5637	80
	17	3684	1465	0.41	2428	14935	5311	70
	18	3811	1436	0.42	2443	14558	5136	100
	19	3816	1429	0.42	2444	14432	5087	60
	20	3891	1440	0.42	2453	14732	5185	100
	21	4019	1680	0.39	2468	19799	7101	100
	22	4181	1874	0.37	2487	24468	8902	100
	23	4232	1828	0.39	2492	23522	8490	90
	24	4270	1925	0.37	2497	25887	9431	100
	25	4334	1946	0.37	2504	26554	9665	90
	26	4355	1867	0.39	2506	24708	8904	90
	27	4351	1795	0.40	2506	23000	8229	100
	28	4435	1866	0.39	2515	24857	8926	100
	29	4464	1736	0.41	2518	21826	7735	100
	30	4589	1699	0.42	2531	21160	7448	80
	31	4607	1683	0.42	2533	20814	7313	70
	32	4670	1740	0.42	2539	22249	7837	70
	33	4652	1601	0.43	2538	19000	6630	70
	34	4682	1596	0.43	2541	18924	6597	70
	35	4661	1634	0.43	2539	19759	6909	70
	36	4686	1613	0.43	2541	19312	6739	70
	37	4687	1644	0.43	2541	20022	7001	70
	38	4686	1717	0.42	2541	21725	7636	70
	39	4526	1627	0.43	2524	19425	6812	70
	40	4531	1658	0.42	2525	20132	7075	70

Tabella 4.14 Velocità delle onde e parametri meccanici dalla prova S4B-CH4B

stratigrafia	CH4B-S4B							
	profondità	Vp	Vs	v	ρ_{din}	Eo	Go	RQD
	[m]	[m/s]	[m/s]	[-]	kg/m ³	[MPa]	[MPa]	[%]
UG1	0	736	214	0.45	1788	243	83	
	1	747	230	0.45	1793	280	97	
	2	801	238	0.45	1817	305	105	
	3	960	403	0.39	1880	867	311	
	4	1200	483	0.40	1962	1309	466	
	5	1562	574	0.42	2062	1970	693	
	6	1816	612	0.44	2122	2327	810	
	7	2036	674	0.44	2169	2889	1004	
	8	2219	721	0.44	2205	3367	1168	
UL1	9	2478	736	0.45	2251	3609	1243	
	10	2845	1098	0.41	2311	8024	2840	
	11	3085	1145	0.42	2347	8909	3137	
	12	3308	1067	0.44	2378	7960	2760	
	13	3500	1083	0.45	2404	8319	2874	70
	14	3524	1178	0.44	2407	9787	3405	90
	15	3584	1299	0.42	2415	11833	4154	30
UL2	16	3617	1414	0.41	2419	13902	4930	90
	17	3689	1368	0.42	2428	13158	4632	100
	18	3813	1274	0.44	2443	11620	4043	100
	19	3986	1163	0.45	2464	9876	3398	100
	20	4030	1104	0.46	2469	8955	3068	80
	21	4024	1233	0.45	2469	11081	3826	90
	22	4192	1155	0.46	2488	9872	3383	100
	23	4122	1305	0.44	2480	12436	4305	100
	24	4190	1248	0.45	2488	11464	3950	100
	25	4195	1312	0.45	2488	12625	4366	100
	26	4233	1374	0.44	2492	13825	4797	100
	27	4300	1347	0.45	2500	13368	4624	100
	28	4378	1329	0.45	2508	13091	4516	100
	29	4385	1267	0.45	2509	11944	4106	100
	30	4396	1394	0.44	2510	14363	4973	100
	31	4470	1218	0.46	2518	11120	3809	100
	32	4394	1143	0.46	2510	9786	3343	100
	33	4367	1141	0.46	2507	9738	3327	100
	34	4272	1286	0.45	2497	12208	4209	100
	35	4199	1298	0.45	2489	12371	4274	100
	36	3973	1454	0.42	2463	15101	5307	80
	37	4053	1325	0.44	2472	12742	4424	90
	38	3971	1161	0.45	2462	9834	3383	90
	39	3919	1099	0.46	2456	8814	3024	90
	40	3808	1252	0.44	2443	11237	3903	100

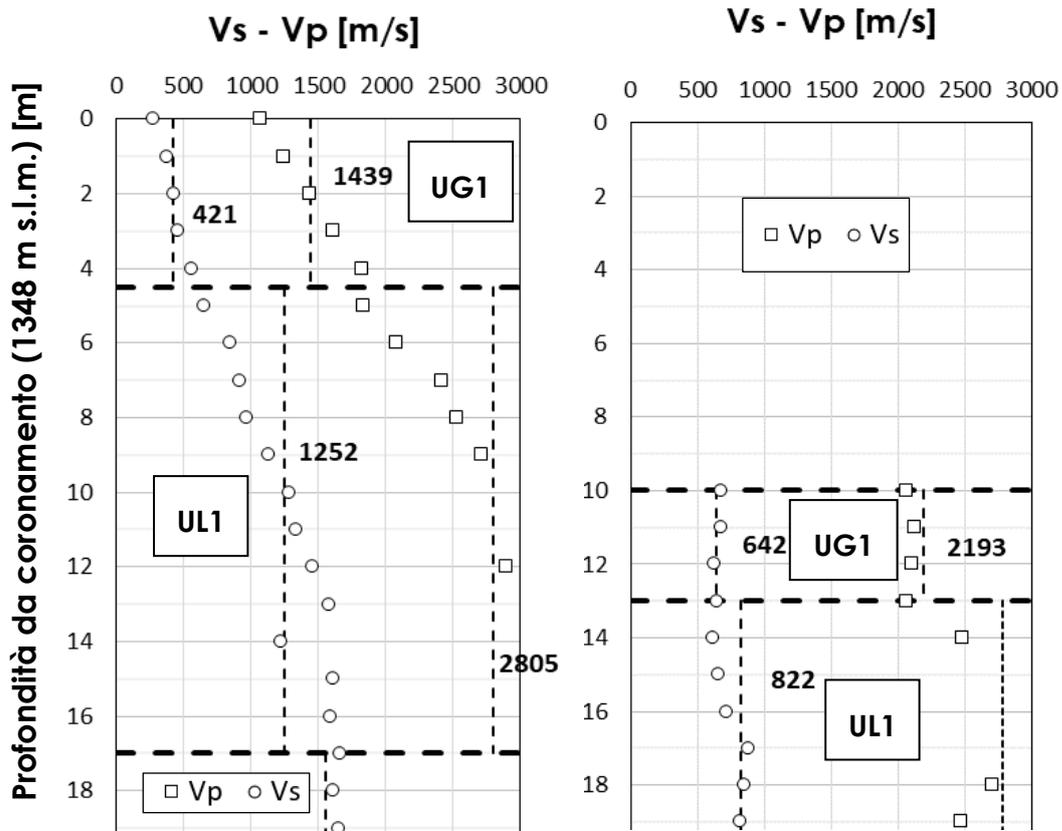


Figura 4.11 Profili delle velocità delle onde P-S per le unità UG-1 e UL-1 tra le coppie di fori S1B-CH1B e S2B-CH2B

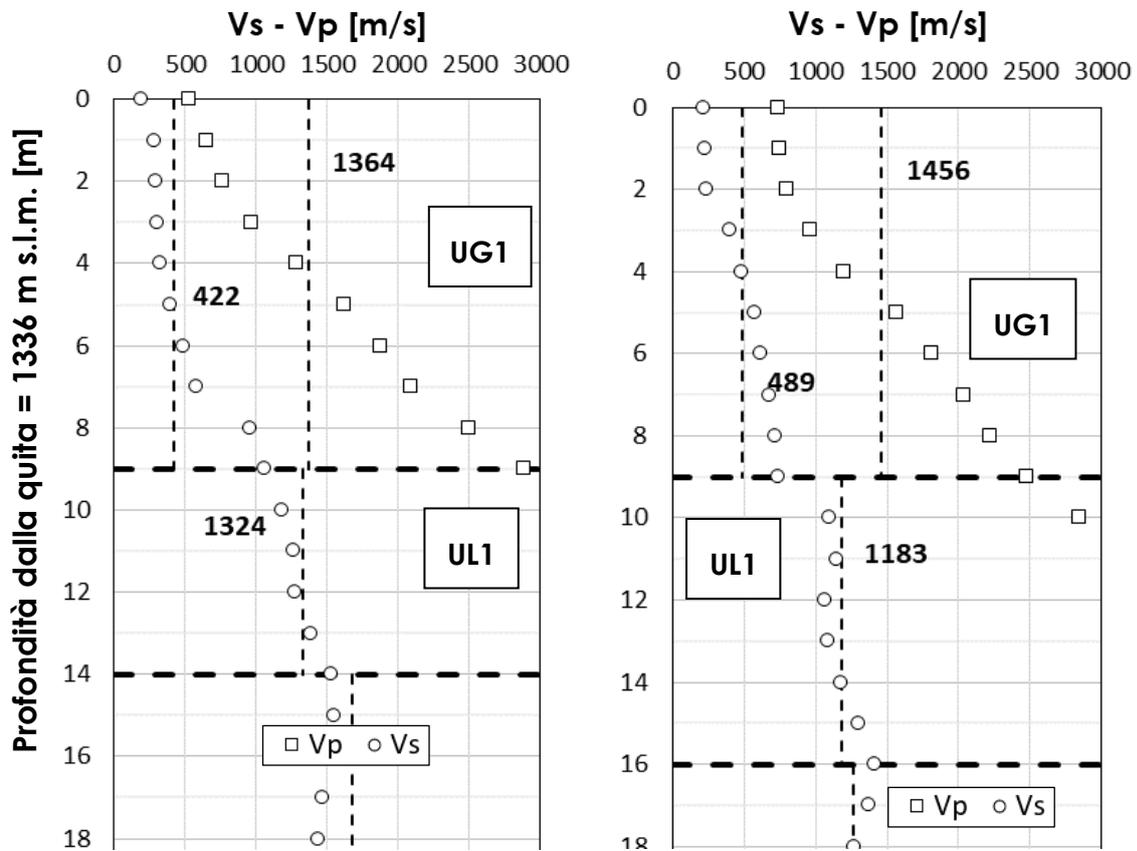


Figura 4.12 Profili delle velocità delle onde P-S per le unità UG-1 e UL-1 tra le coppie di fori S3B-CH3B e S4B-CH4B

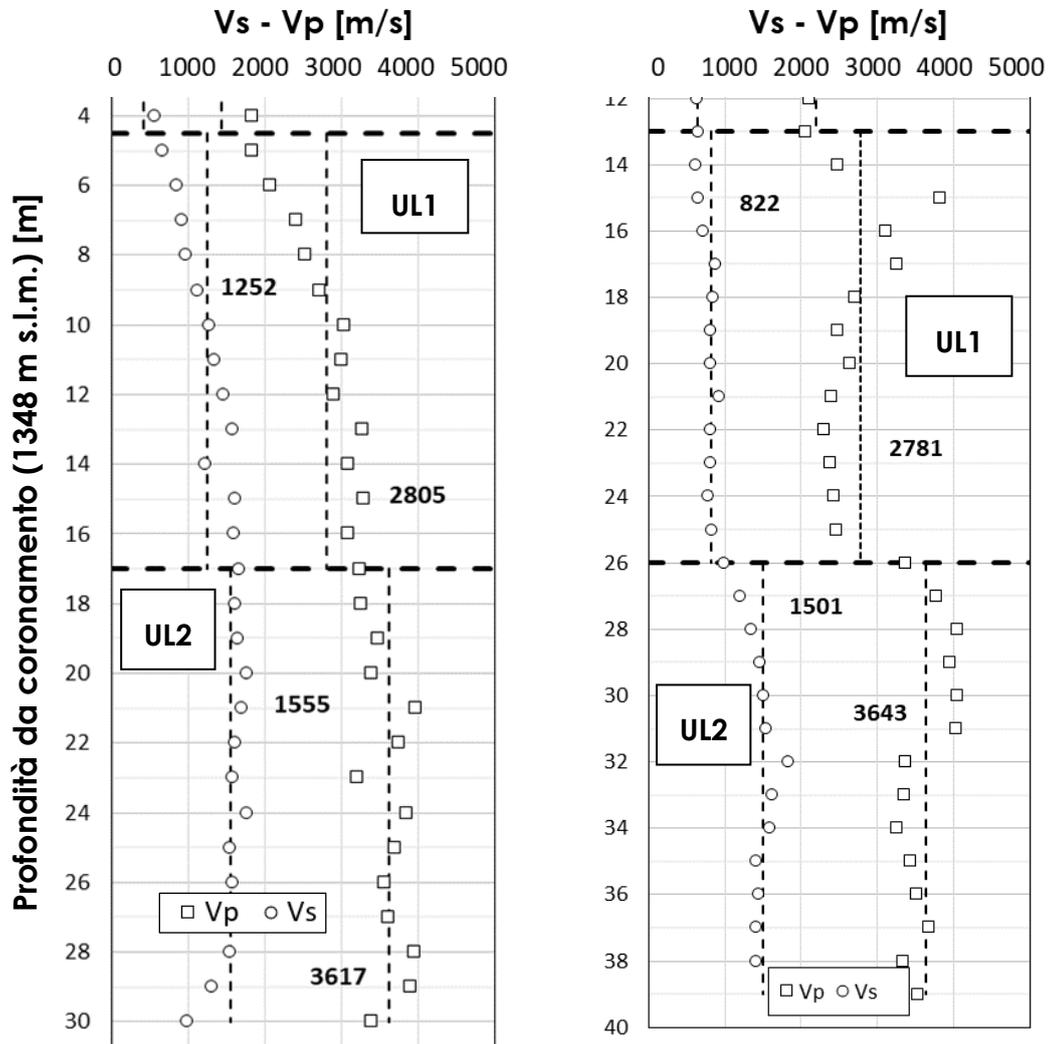


Figura 4.13 Profili delle velocità delle onde P-S per le unità UL-1 e UL-2 tra le coppie di fori S1B-CH1B e S2B-CH2B

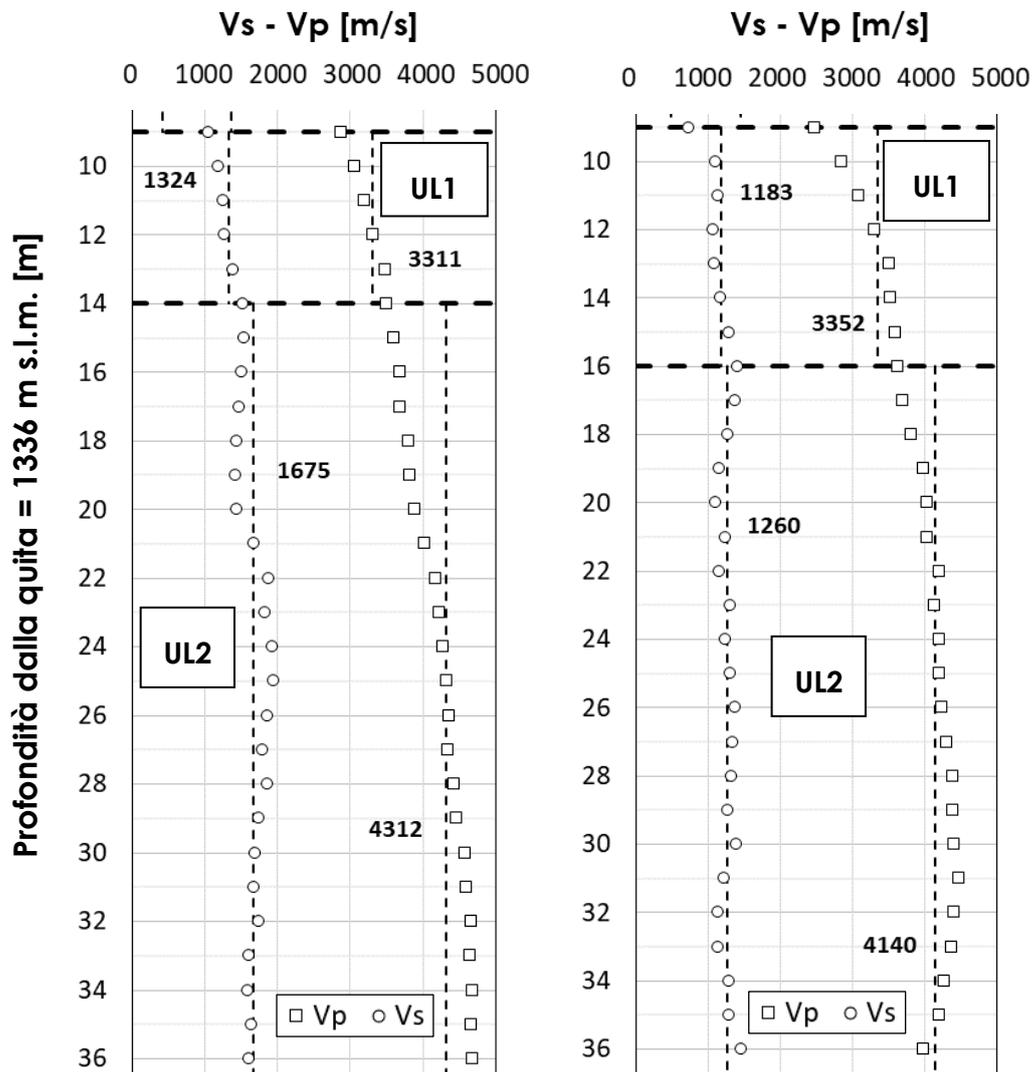


Figura 4.14 Profili delle velocità delle onde P-S per le unità UL-1 e UL-2 tra le coppie di fori S3B-CH3B e S4B-CH4B

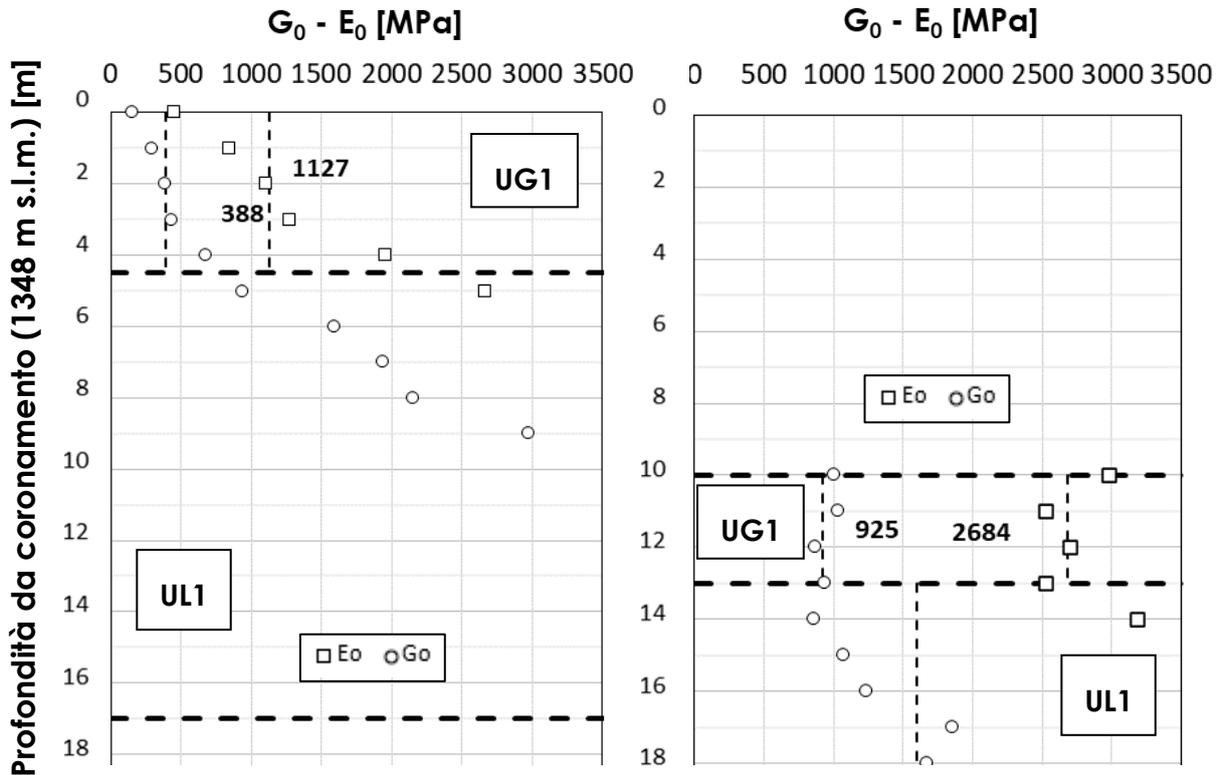


Figura 4.15 Profili dei moduli elastici dinamici per le unità UG-1 e UL-1 tra le coppie di fori S1B-CH1B e S2B-CH2B

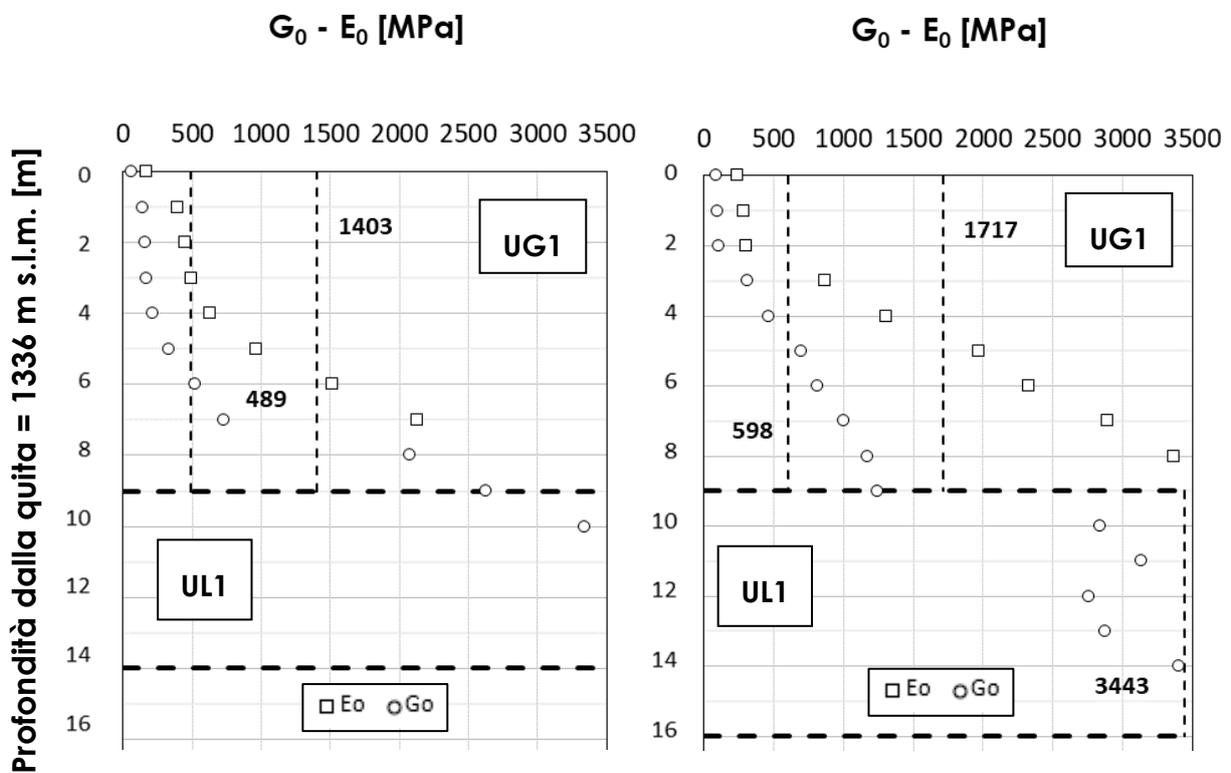


Figura 4.16 Profili dei moduli elastici dinamici per le unità UG-1 e UL-1 tra le coppie di fori S3B-CH3B e S4B-CH4B

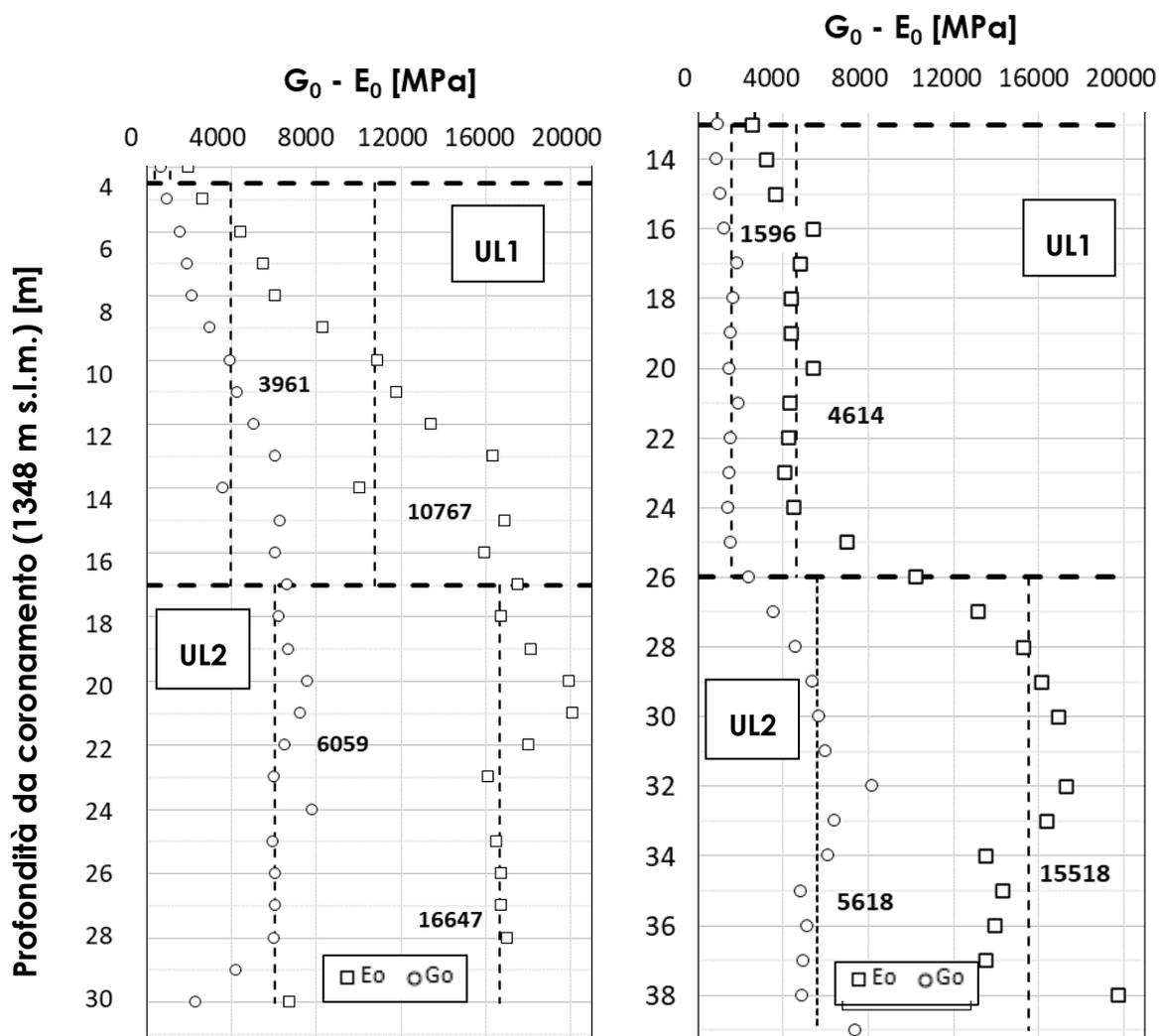


Figura 4.17 Profili dei moduli elastici dinamici per le unità UL-1 e UL-2 tra le coppie di fori S1B-CH1B e S2B-CH2B

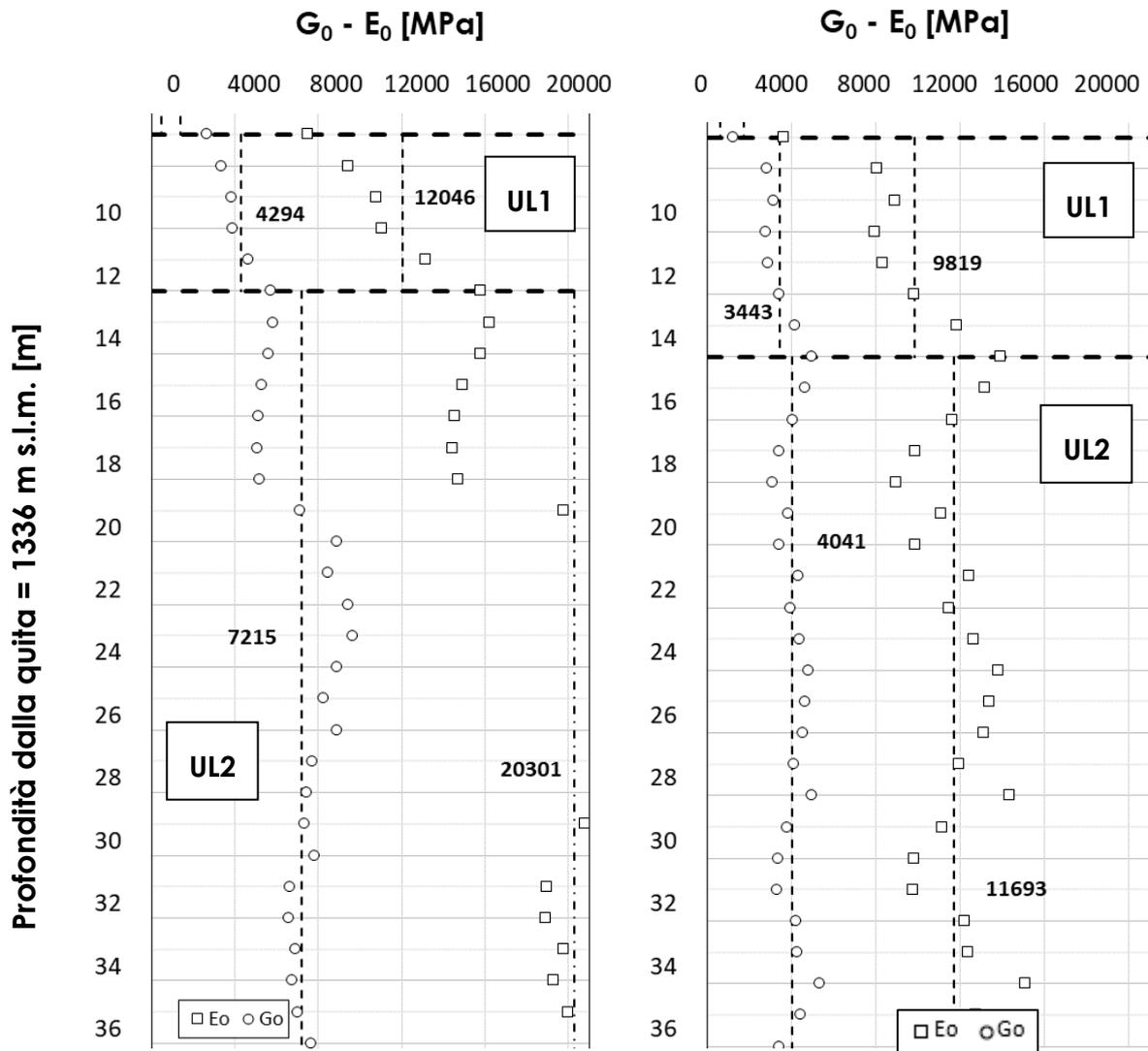


Figura 4.18 Profili dei moduli elastici dinamici per le unità UL-1 e UL-2 fra le coppie di fori S3B-CH3B e S4B-CH4B

4.9.1.2 Rilievi sismici a rifrazione

Durante tale campagna di indagini del 2008-2009 sono stati realizzati n. 2 rilievi sismici a rifrazione in corrispondenza degli stendimenti 1 e 2 (Figura 4.10).

Stendimento 1

La linea 1 si sviluppa longitudinalmente all'asse della diga in direzione N-S per una lunghezza complessiva di 235 m, partendo in corrispondenza della coppia di sondaggi CH1B-S1B, proseguendo in direzione delle coppie di sondaggi CH3B-S3B e CH4B-S4B a monte del manufatto e terminando un centinaio di metri circa sempre parallelamente al paramento di monte della diga. La strumentazione utilizzata si compone di 48 sensori di ricezione delle onde di compressione (P) con una spaziatura tra i sensori di 5 m.

Il campo di velocità delle onde P ottenuto (Figura 4.19) è caratterizzato da velocità piuttosto omogenee longitudinalmente e marcatamente crescenti con la profondità nell'area NE e dello sfioratore, mentre si rileva un'area caratterizzata da un netto aumento delle velocità delle onde di compressione in corrispondenza dell'area di massima altezza dello sbarramento, laddove è stato riscontrato che il substrato arenaceo-pelitico si trova a profondità inferiori rispetto al piano campagna.

È inoltre possibile evidenziare una marcata differenziazione tra le velocità delle onde che caratterizzano i depositi detritici rispetto al sottostante ammasso roccioso arenaceo-pelitico, ovvero all'interfaccia con l'isolinea relativa a 2300 m/s.

Si evidenzia infine una buona correlazione con i risultati delle indagini sismiche in foro.

Stendimento 2

Lo stendimento in questione si sviluppa da monte verso valle lungo il corpo della diga, attraversandolo ortogonalmente. La linea sismica è stata realizzata mediante l'utilizzo di 24 sensori di ricezione delle onde di compressione interspaziati di 5 m l'uno dall'altro, per un'estensione complessiva di 115 m. Lo stendimento è stato realizzato partendo dall'area a monte dell'imposta e sviluppandosi in direzione W-E, fino a terminare a ridosso del paramento di monte, in corrispondenza della coppia di sondaggi CH3B-S3B.

Si riscontra un progressivo incremento delle onde P con la profondità. In questo senso le onde P assumono valori che risultano piuttosto congruenti con quelli ottenuti dalle prove Cross-hole. Osservando il campo delle onde P (Figura 4.20) si evince piuttosto chiaramente l'innalzamento del tetto del substrato arenaceo pelitico dirigendosi da monte verso l'area dello sbarramento. In accordo a quanto osservato nella sezione longitudinale, si riscontra che il tetto dell'ammasso roccioso si trova alla profondità di pochi metri dal piano campagna nell'area della sezione di massima altezza dello sbarramento.

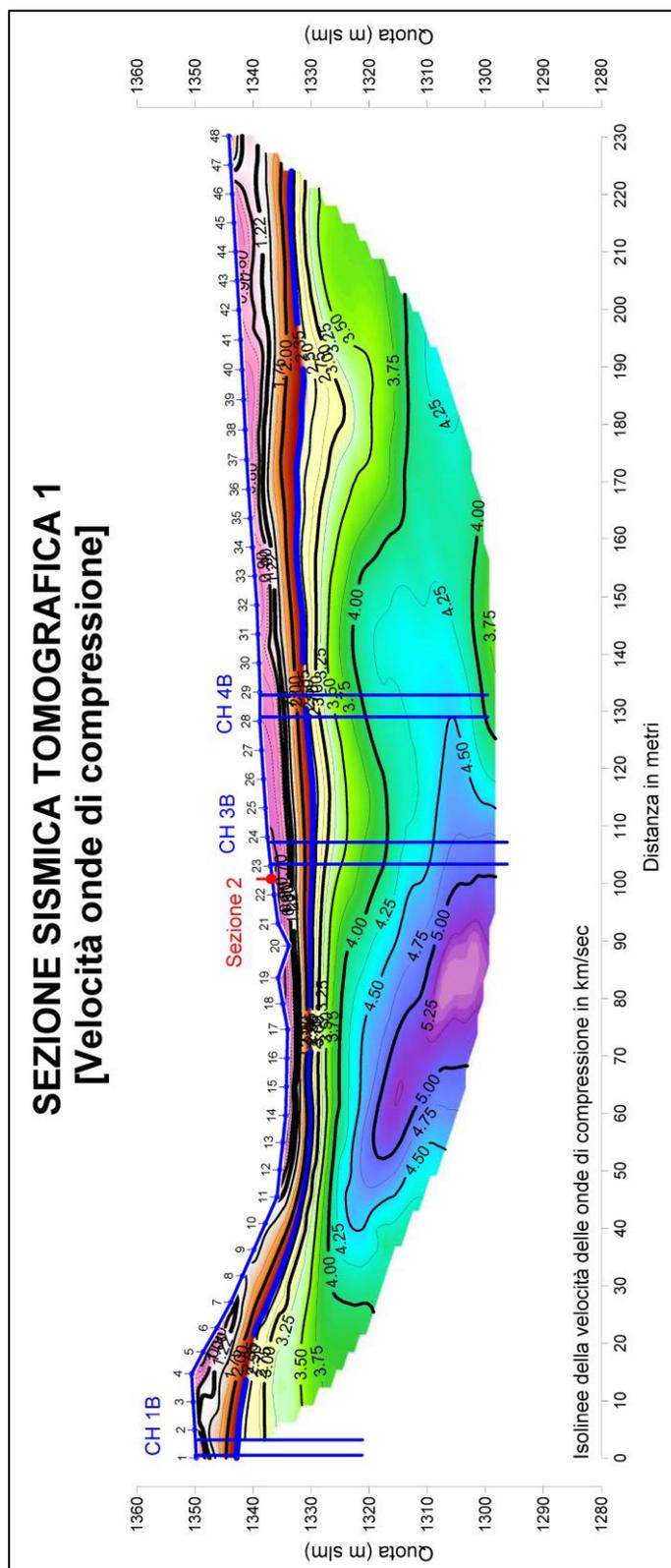


Figura 4.19 Campi di velocità delle onde P determinate con prova sismica a rifrazione.
 Stendimento 1, longitudinale al coronamento

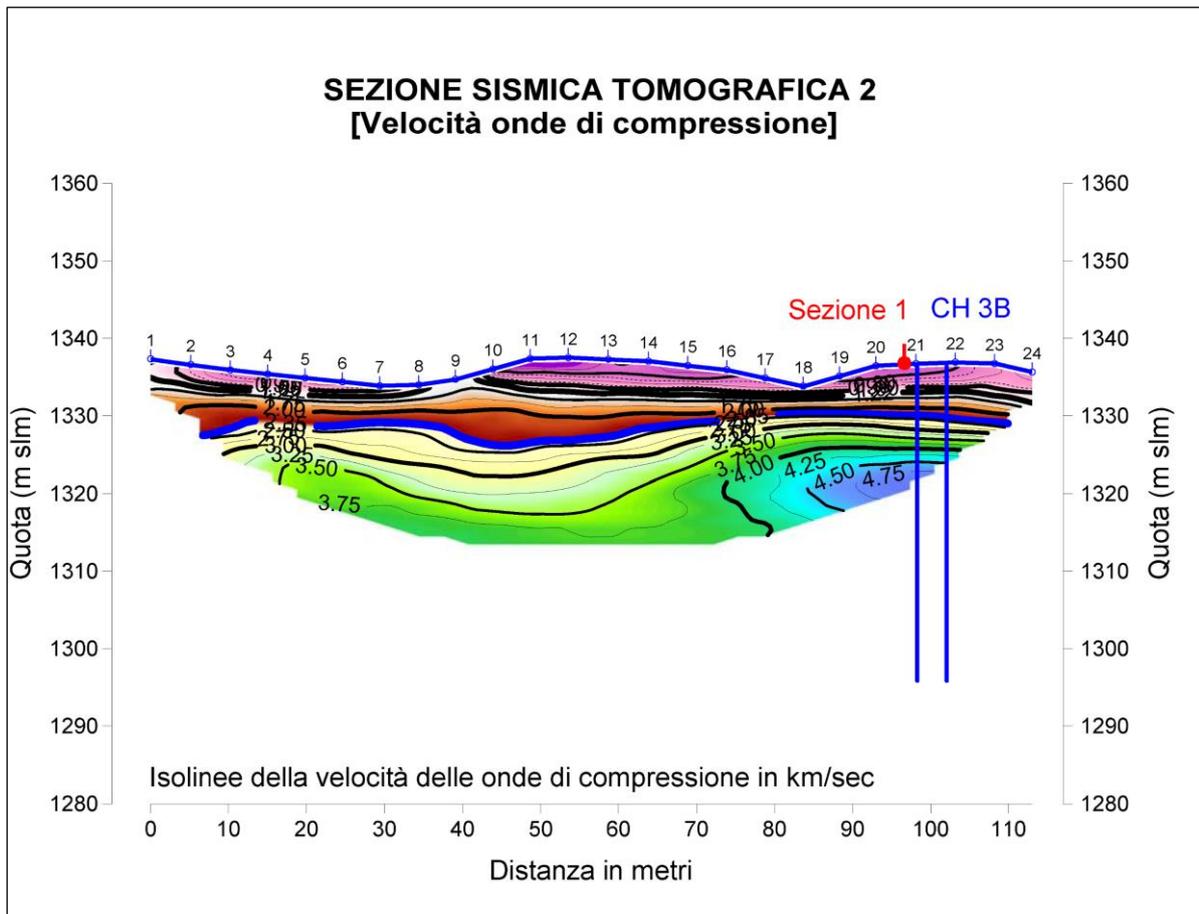


Figura 4.20 Campi di velocità delle onde P determinate con prova sismica a rifrazione. Stendimento 2, orientato in direzione trasversale al coronamento

4.9.2 Comitgeo s.n.c. (2003)

Nelle aree di monte e di valle, oltre alla spalla occidentale della diga di Ballano (Figura 4.21), sono stati realizzati stendimenti di sismica a rifrazione, con definizione sia delle onde P che delle onde S, per la determinazione dei moduli elastico-dinamici locali, relativamente ai diversi terreni e litotipi caratterizzati sino alla profondità d'investigazione degli stendimenti.

L'indagine sismica a rifrazione si è potuta avvalere di un sismografo ad accumulo d'impulsi GEODE della Geometrics e registrazione simultanea di 12 geofoni.

L'analisi delle dromocrone riportate in Figura 4.22, Figura 4.23 e Figura 4.24 ha permesso di caratterizzare dal punto di vista elastico i depositi incontrati, oltre a definire la profondità alla quale si rinviene il substrato arenaceo-pelitico.

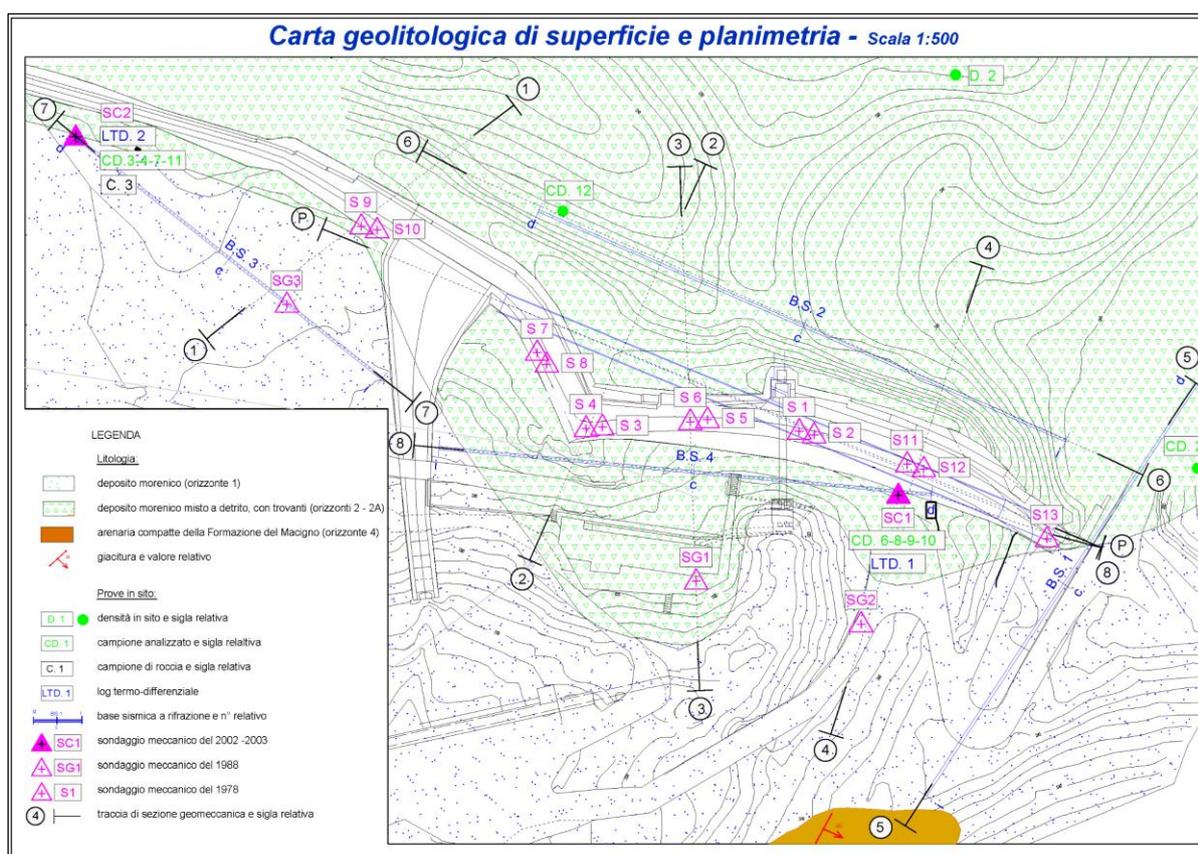


Figura 4.21 Posizionamento delle indagini geofisiche e tracce degli stendimenti sismici a rifrazione (linee blu) realizzati nel corso della campagna indagini del 2003

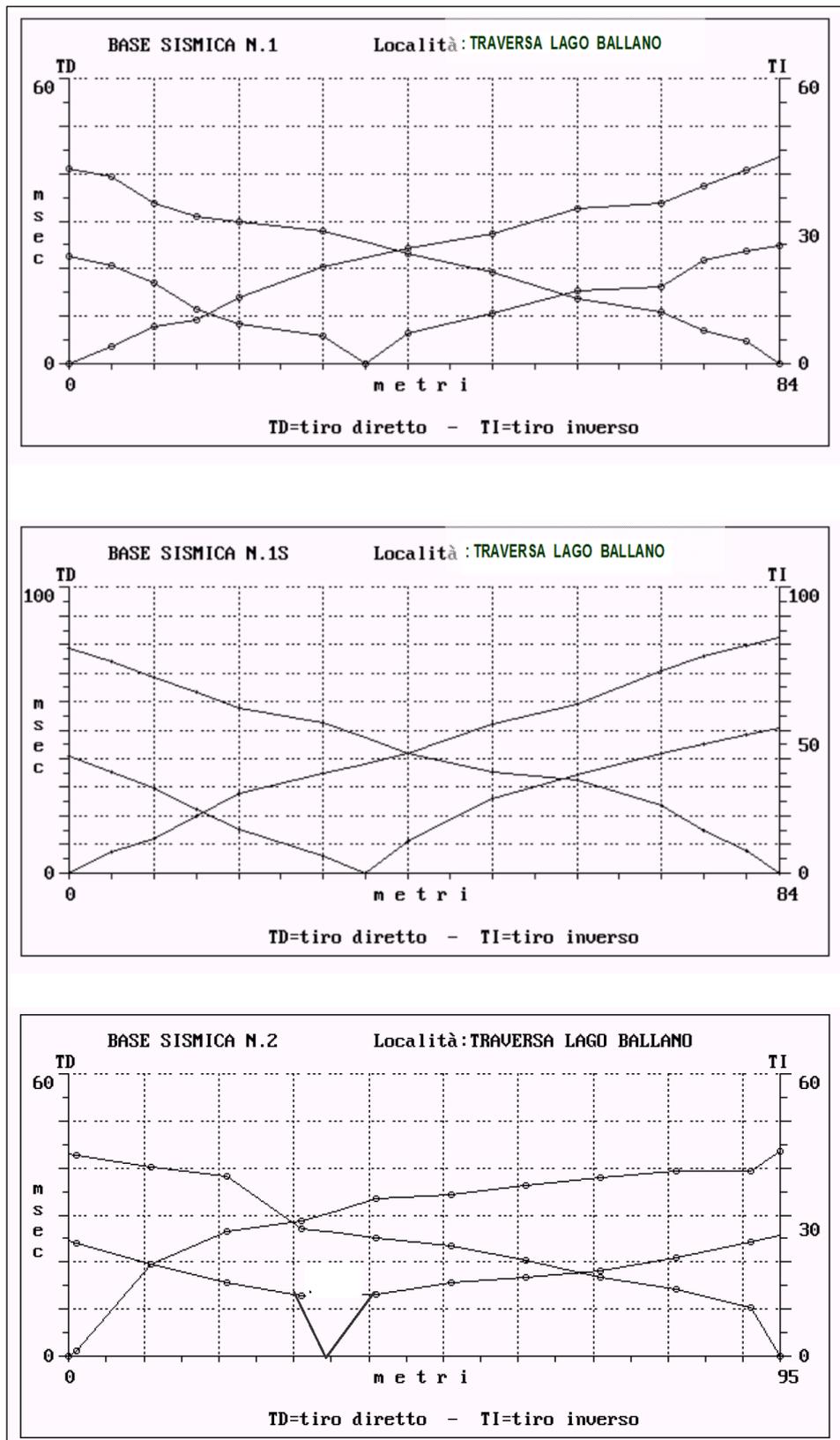


Figura 4.22 Dromocrone relative agli stendimenti 1 e 2 della campagna indagini del 2003

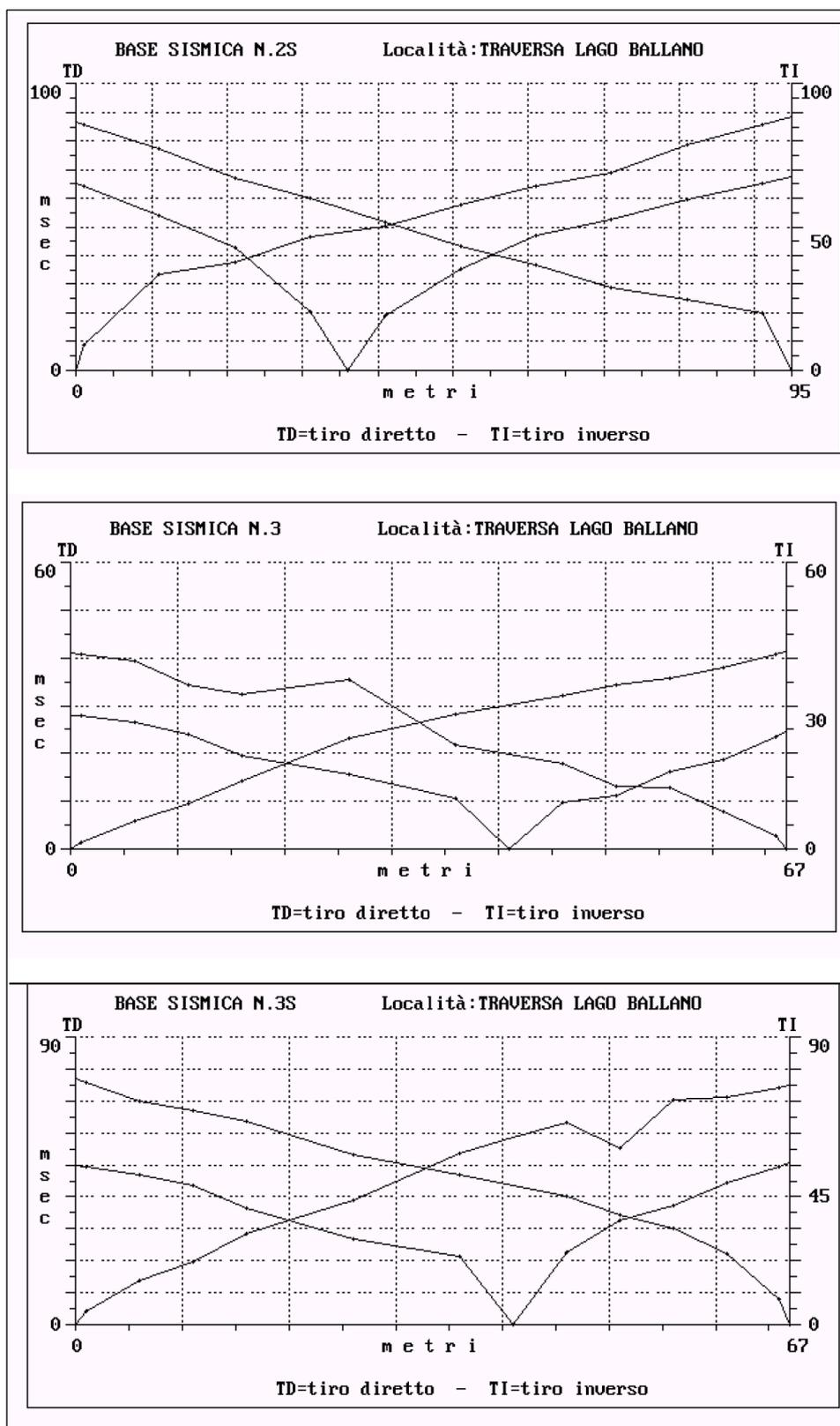


Figura 4.23 Dromocrone relative agli stendimenti 2 e 3 della campagna indagini del 2003

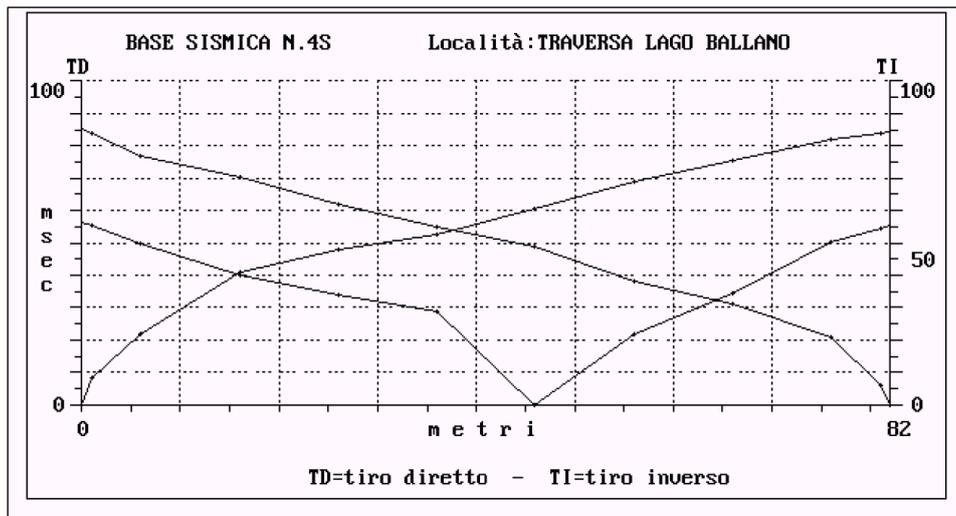


Figura 4.24 Dromocrone relative agli stendimenti 4 della campagna indagini del 2003

4.9.3 GeoExploration (2020)

Nell'area immediatamente ad est dello sfioratore ed in direzione longitudinale allo stesso (Figura 4.25), 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.

Dall'andamento delle velocità delle onde di compressione e di taglio (Figura 4.26), 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 onde tra le progressive metriche 15 e 40 alla profondità di circa 8 m dal piano campagna. Tale abbassamento delle velocità delle onde potrebbe essere riconducibile all'attraversamento di una fascia di ammasso roccioso particolarmente fratturata ed alterata, in accordo alle indagini geofisiche e geognostiche pregresse disponibili a breve distanza.

A partire dalle progressive metriche 45-50, si denota un più repentino aumento delle velocità delle onde di compressione e di taglio a breve distanza dal piano campagna e quest'andamento risulta essere in accordo con la ricostruzione dell'andamento del tetto del substrato arenaceo pelitico dell'area. In particolare, l'area terminale dello sfioratore risulta essere caratterizzata da una progressiva diminuzione della profondità del substrato rispetto al piano campagna.



Figura 4.25 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)

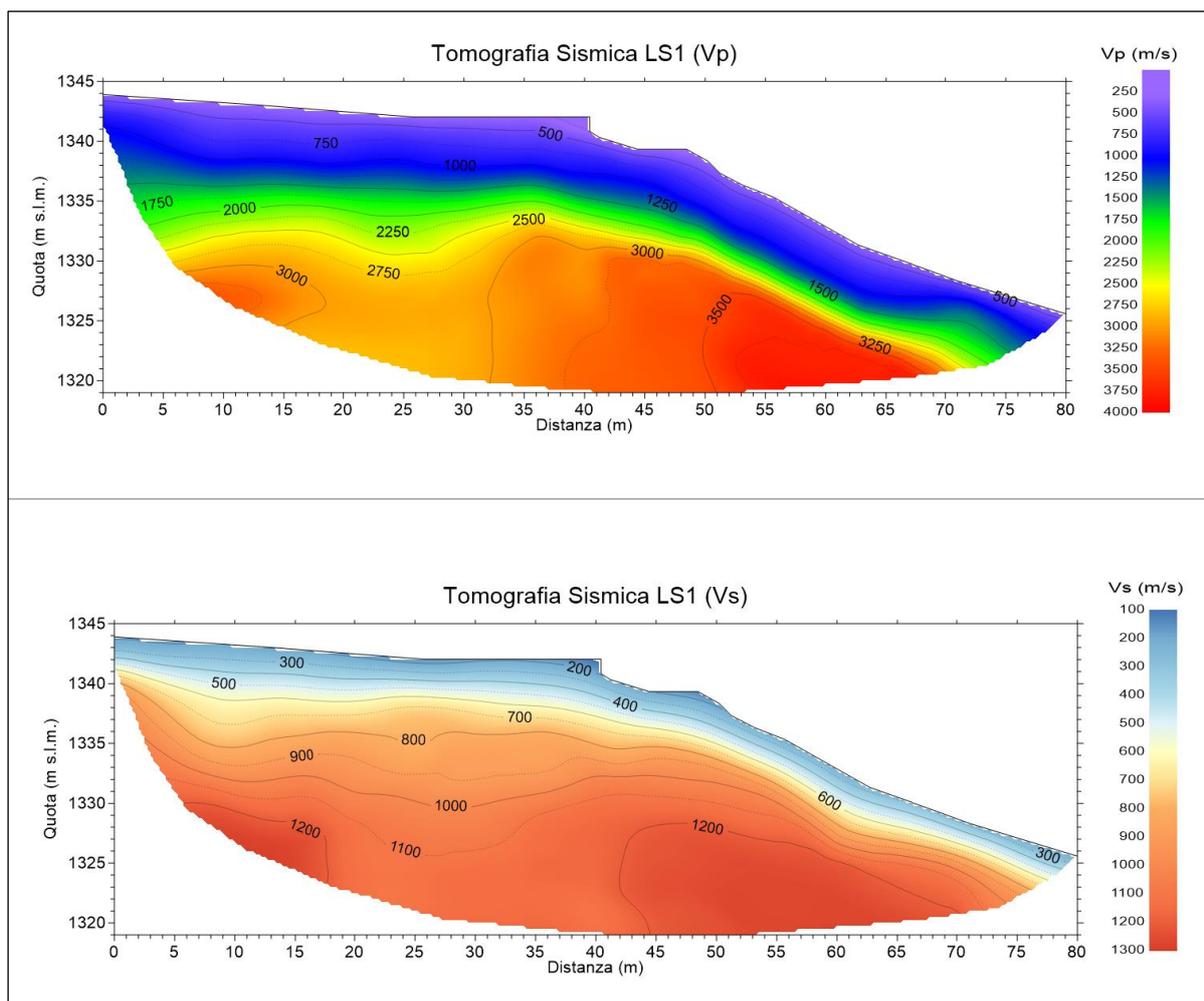


Figura 4.26 Tomografie sismiche in onde P e S dello stendimento realizzato ad est dello sfioratore nel corso della campagna indagini GeoExploration del 2020

4.10 Classificazione dell'ammasso

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

Come anticipato nei capitoli precedenti, l'Unità UL-1 è stata classificata attraverso il criterio GSI.

Proprio tramite la classificazione GSI, essendo UL-1 un ammasso eterogeneo costituito da alternanze, è stato scelto il metodo introdotto in *Marinos & Hoek (2000; 2001)* e successivamente ampliato in *Marinos (2019)*, specifico per tali litotipi.

Come riscontrabile in Figura 4.27, all'ammasso è attribuita la classe C di GSI (sensu *Marinos & Hoek (2000; 2001)*) e IV di GSI (sensu *Marinos (2019)*), riferite ad un ammasso con prevalente componente arenacea e con livelli pelitici con fratturazione media ed elevata, e superfici con caratteristiche "fair" per via della loro debole rugosità, medio-elevata alterazione e modesta serratura. Tali valori si ritengono associabili a un ammasso come quello descritto ed investigato dalle campagne di indagini del 2003, 2008-2009, 2020 e soprattutto da quanto è stato possibile riscontrare in sito grazie ai rilievi geomeccanici del 2003 e del 2012.

Si osserva che i due metodi portano a valori GSI differenti. In particolare, secondo *Marinos & Hoek (2000; 2001)*, il valore di GSI varia tra 40 e 35, visto che all'ammasso è stata assegnata una classe C. Come descritto in precedenza, i rapporti tra litotipi arenacei e pelitici, sia a monte che a valle dello sbarramento, alla scala d'indagine evidenziano una prevalenza della facies arenitica, con un rapporto medio arenaria/pelite di circa 3/1. Le discontinuità invece presentano rugosità debole e media, alterazione medio-elevata e serratura complessivamente modesta.

Realizzando le stesse premesse riguardo alle caratteristiche dei litotipi e delle discontinuità, secondo la classificazione di *Marinos (2019)*, è stato possibile attribuire un valore di GSI variabile tra 55 e 50.

Ritenendo più corretto, perché più aggiornato, il secondo sistema, senza però trascurare i risultati forniti dal primo, a UL-1 è attribuito un **GSI tra 55 e 50**.

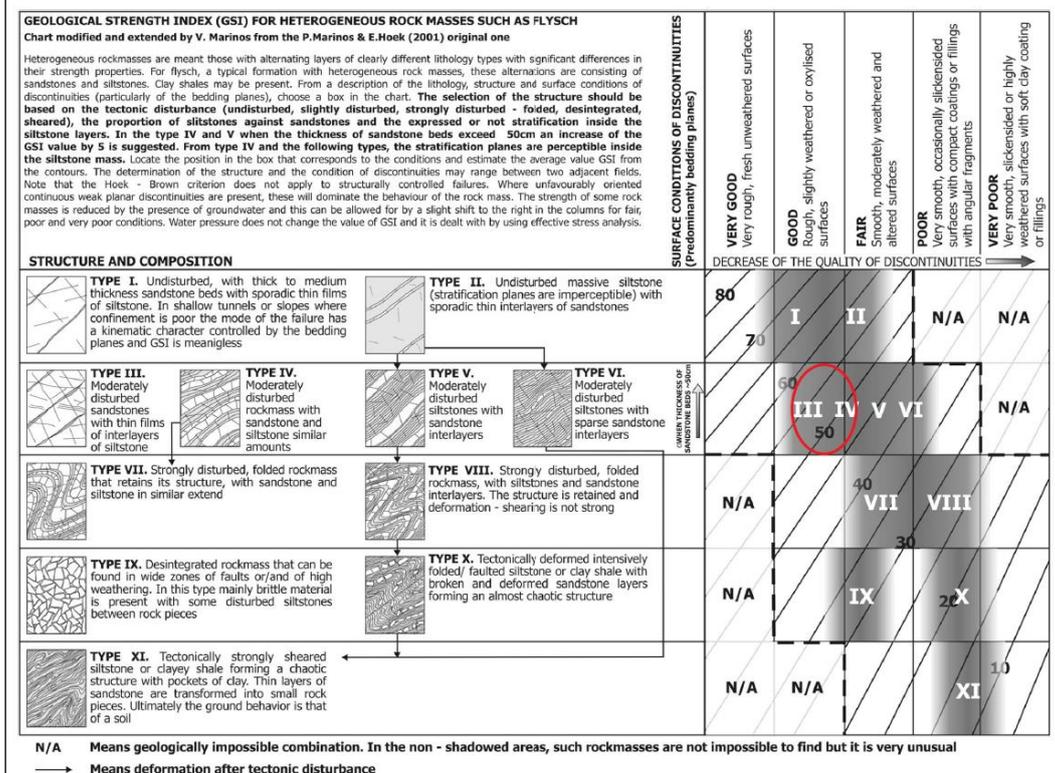
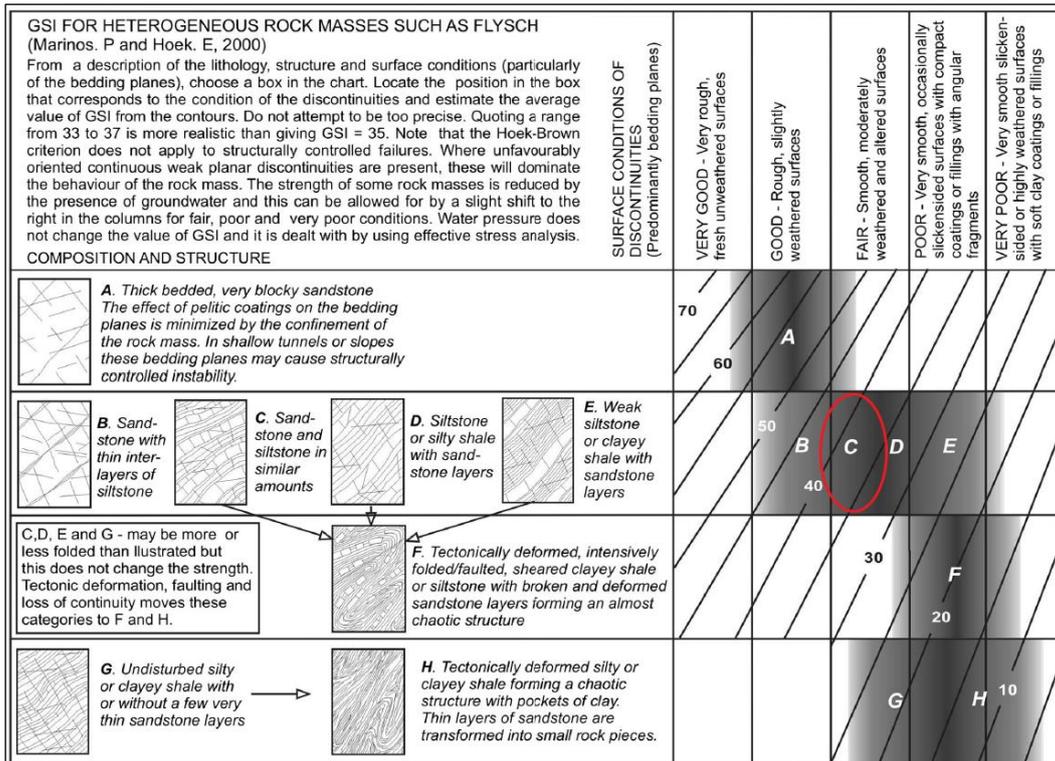


Figura 4.27 Carte di classificazione GSI per ammassi rocciosi eterogenei di tipo flyschoido secondo Marinos & Hoek (2000; 2001), in alto, e secondo Marinos (2019), in basso. Si evidenziano in rosso le aree ritenute rappresentative dell'Unità UL-1

4.10.2 Unità Litotecnica 2 – Flysch arenaceo-pelitico compatto (UL-2)

Così come per UL-1, anche per quanto riguarda UL-1 si è stato scelto il metodo introdotto in *Marinos & Hoek (2000; 2001)* e successivamente ampliato in *Marinos (2019)*, specifico per tali litotipi eterogenei costituito da alternanze.

Come riscontrabile in Figura 4.28, all'ammasso è attribuita la classe A di GSI (sensu *Marinos & Hoek (2000; 2001)*) e I - II di GSI (sensu *Marinos (2019)*), riferite ad un ammasso con prevalente componente arenacea e con livelli pelitici con fratturazione medio-bassa, e con superfici con caratteristiche "good" per via della loro rugosità, limitata alterazione e buona serratura. Tali valori si ritengono associabili a un ammasso come quello descritto ed investigato dalle campagne di indagini del 2003, 2008-2009, 2020 e soprattutto da quanto è stato possibile riscontrare in sito grazie ai rilievi geomeccanici del 2003 e del 2012.

Si osserva che i due metodi portano a valori GSI differenti. In particolare, secondo *Marinos & Hoek (2000; 2001)*, il valore di GSI varia tra 55 e 50, visto che all'ammasso è stata assegnata una classe A. Come descritto in precedenza, i rapporti tra litotipi arenacei e pelitici, sia a monte che a valle dello sbarramento, alla scala d'indagine evidenziano una prevalenza della facies arenitica, con un rapporto medio arenaria/pelite di circa 3/1. Le discontinuità invece presentano una buona rugosità, debole alterazione e serratura complessivamente buona.

Realizzando le stesse premesse riguardo alle caratteristiche dei litotipi e delle discontinuità, secondo la classificazione di *Marinos (2019)*, è stato possibile attribuire un valore di GSI variabile tra 65 e 60.

Ritenendo più corretto, perché più aggiornato, il secondo sistema, senza però trascurare i risultati forniti dal primo, a UL-1 è attribuito un **GSI tra 65 e 60**.

4.11 Caratterizzazione della matrice rocciosa integra

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

I parametri di caratterizzazione della matrice rocciosa integra di UL-1 sono stati elaborati sulla base dei risultati delle prove di laboratorio eseguite sui campioni prelevati nel corso dell'esecuzione dei carotaggi realizzati nella campagna 2008-2009 e delle informazioni reperibili in letteratura scientifica.

Per ciascun parametro indice indagato dalle indagini, significativo ai fini della caratterizzazione, sono stati determinati i valori medi e di deviazione standard. Tali valori sono riportati nelle tabelle che seguono (Tabella 4.15; Tabella 4.16; Tabella 4.17; Tabella 4.18).

Tabella 4.15 Tabella riepilogativa dell'elaborazione dei valori dei parametri fisici "peso di volume" della matrice rocciosa di UL-1

Dati identificativi					Parametri fisici
					Peso di volume
Unità	Campagna di indagini	Sondaggio	Campione	Prof. da p.c.	γ
				(m)	(kN/m ³)
UL-1	ISMES - ISTDIL 2008-2009	S1B	CR2	13.40-13.80	25.87
		S2B	CR1	17.20-17.60	25.91
		S5B	CR2	14.60-15.00	26.04
MEDIA					25.94
DEV. ST. CAMPIONARIA					0.09
COEFF. DI VARIAZIONE					0%

Tabella 4.16 Tabella riepilogativa dell'elaborazione dei valori dell'angolo di attrito di UL-1 secondo i risultati forniti dalle prove Tilt Test

Dati identificativi					Tilt Test
					Angolo d'attrito
Unità	Campagna di indagini	Sondaggio	Campione	Prof. da p.c.	ϕ
				(m)	(°)
UL-1	ISMES - ISTDIL 2008-2009	S1B	C1	8.65 - 9.00	36
			C2	13.40 - 13.80	37
		S2B	C2	20.60 - 20.90	36
		S4B	C2	16.30 - 16.70	34
MEDIA					35.75
DEV. ST. CAMPIONARIA					1.26
COEFF. DI VARIAZIONE					4%

Tabella 4.17 Tabella riepilogativa dell'elaborazione dei valori dei parametri di "sforzo a rottura", "modulo tangente" e "modulo secante" determinati mediante prove triassiali sulla matrice rocciosa di UL-1

Dati identificativi					Sforzo a rottura		
					Modulo tangente	Modulo secante	
Unità	Campagna di indagini	Sondaggio	Campione	Prof. da p.c.	σ_1	E	E_s
				(m)	(MPa)	(GPa)	(GPa)
UL-1	ISMES - ISTEDIL 2008-2009	S1B	CR2	13.40-13.80	89.20	31.100	28.500
		S2B	CR1	17.20-17.60	116.97	41.490	31.540
		S5B	CR2	14.60-15.00	77.30	32.870	30.290
MEDIA					94.49	35.15	30.11
DEV. ST. CAMPIONARIA					20.36	5.56	1.53
COEFF. DI VARIAZIONE					22%	16%	5%

Tabella 4.18 Tabella riepilogativa dell'elaborazione dei valori dei parametri di "resistenza a compressione semplice" e "resistenza a trazione" della matrice rocciosa di UL-1, determinati mediante Point Load Test tramite le relazioni fornite in ISRM (1985)

Dati identificativi					Point load test					
					Dati di prova		Elaborazioni secondo ISRM 1985			
					Indice corretto	Stima della resistenza a trazione		Stima della resist. a compressione semplice		
$0.8 \cdot I_s (50)$	$20 \cdot I_s (50)$	$25 \cdot I_s (50)$								
Unità	Campagna di indagini	Sondaggio	Campione	Prof. da p.c. (m)	$I_s (50)$ (MPa)	t (MPa)	Co (MPa)			
UL-1	ISMES - ISTEDIL 2008-2009	S1B	CR1	8.80-9.00	3.440	2.8	68.8	86.0		
			CR2	13.40-13.80	3.590	2.9	71.8	89.8		
		S2B	CR2	20.60-20.90	4.710	3.8	94.2	117.8		
		S3B	CR2	13.60-13.90	3.950	3.2	79.0	98.8		
		MEDIA					3.913	3.1	78.3	97.8
		DEV. ST. CAMPIONARIA					0.694	0.6	13.9	17.3
COEFF. DI VARIAZIONE					18%	18%	18%	18%		

In merito alla caratterizzazione della matrice rocciosa di UL-1 mediante prove di laboratorio, è opportuno riportare alcune considerazioni.

I risultati dei *Point Load Test* sono stati derivati in riferimento ai valori di resistenza a trazione e a compressione semplice. Risulta una sovrastima della resistenza a trazione e una sottostima della resistenza a compressione rispetto ai risultati di laboratorio, tuttavia, si specifica che le correlazioni presenti in *ISRM (1985)* contengono una variabilità insita nella loro formulazione, che può portare a errori nella determinazione delle resistenze reali; pertanto, sono sempre e solo da considerare per stimare tali parametri, come suggerito anche nello standard di prova.

Le resistenze a rottura, confinate e non, ottenute, rispettivamente, dalle prove triassiali, tenendo in considerazione anche le indicazioni fornite dai risultati delle prove *Point Load Test*, sono state utilizzate per ricavare i parametri " m_i " e " σ_{ci} " della roccia intatta, che costituiscono alcuni degli input per costruire l'involuppo di Hoek e Brown di UL-1.

Dalle prove a compressione semplice con misura delle deformazioni è stato ricavato il valore del modulo di Young statico per la roccia intatta ($E_{i,sta}$). Per ricavare quest'ultimo, è stato scelto innanzitutto di basarsi sui moduli di Young tangenti ($E_{t50\%}$, ovvero ricavati dalla tangente alla curva nel grafico sforzo-deformazione per un valore di sforzo pari al 50% della resistenza a compressione). È stato calcolato il *Modulus Ratio* (MR), definito in *Hoek & Diederichs (2006)*, sulla base delle correlazioni proposte in *Deere (1968)* e in *Palmström & Singh (2001)*, come il rapporto tra il modulo di Young della roccia intatta e la resistenza a compressione semplice della stessa:

$$MR = \frac{E_{i,sta}}{UCS}$$

Nel calcolo sono state utilizzate la media del modulo tangente e quella della resistenza a compressione semplice ottenute dalle prove effettuate:

Sforzo a rottura medio	Modulo di Young statico intatto	Modulus Ratio medio
UCS	$E_{i,sta}$	MR
(MPa)	(MPa)	(-)
94	35344	376

Il valore ottenuto rientra negli intervalli suggeriti in *Hoek & Diederichs (2006)* per alternanze arenaceo-pelifiche (Figura 4.29).

Rock type	Class	Group	Texture				
			Coarse	Medium	Fine	Very fine	
Sedimentary	Clastic		Conglomerates 300-400 Breccias 230-350	Sandstones 200-350	Siltstones 350-400 Greywackes 350	Claystones 200-300 Shales 150-250 ^a Marls 150-200	
		Non-clastic	Carbonates	Crystalline limestones 400-600	Sparitic limestones 600-800	Micritic Limestones 800-1000	Dolomites 350-500
		Evaporites		Gypsum (350) ^b	Anhydrite (350) ^b		
		Organic				Chalk 1000+	
Metamorphic	Non-foliated		Marble 700-1000	Hornfels 400-700 Metasandstone 200-300	Quartzites 300-450		
	Slightly foliated		Migmatite 350-400	Amphibolites 400-500	Gneiss 300-750 ^a		
	Foliated ^a			Schists 250-1100 ^a	Phyllites/Mica Schist 300-800 ^a	Slates 400-600 ^a	
Igneous	Plutonic	Light	Granite ^c 300-550 Granodiorite ^c 400-450	Diorite ^c 300-350			
		Dark	Gabbro 400-500 Norite 350-400	Dolerite 300-400			
	Hypabyssal			Porphyries (400) ^b	Diabase 300-350	Peridotite 250-300	
	Volcanic	Lava			Rhyolite 300-500 Andesite 300-500	Dacite 350-450 Basalt 250-450	
		Pyroclastic	Agglomerate 400-600		Volcanic breccia (500) ^b	Tuff 200-400	

^aHighly anisotropic rocks: the value of MR will be significantly different if normal strain and/or loading occurs parallel (high MR) or perpendicular (low MR) to a weakness plane. Uniaxial test loading direction should be equivalent to field application.
^bNo data available, estimated on the basis of geological logic.
^cFelsic Granitoids: coarse grained or altered (high MR), fined grained (low MR).

Figura 4.29 Abaco dei valori tipici di *Modulus Ratio (MR)* per diversi litotipi, secondo *Hoek & Diederichs (2006)*. Si evidenziano in rosso le voci affini alla natura litologica di UL-1

Sulla base dei risultati delle prove di laboratorio e delle conseguenti elaborazioni, alla matrice rocciosa di UL-1 sono stati attribuiti:

- **peso per unità di volume apparente (γ_a) = 26.0 kN/m³**
- **resistenza a compressione semplice (UCS) = 94 MPa**
- **modulo di Young statico della roccia intatta ($E_{i,sta}$) = 35000 MPa**

4.11.2 Unità Litotecnica 2 – Flysch arenaceo-pelitico compatto (UL-2)

I parametri di caratterizzazione della matrice rocciosa integra di UL-2 sono stati elaborati sulla base dei risultati delle prove di laboratorio eseguite sui campioni prelevati nel corso dell'esecuzione dei carotaggi realizzati nella campagna 2008-2009 e delle informazioni reperibili in letteratura scientifica.

Per ciascun parametro indice indagato dalle indagini, significativo ai fini della caratterizzazione, sono stati determinati i valori medi e di deviazione standard. Tali valori sono riportati nelle tabelle che seguono (Tabella 4.19; Tabella 4.20; Tabella 4.21; Tabella 4.22).

Tabella 4.19 Tabella riepilogativa dell'elaborazione dei valori dei parametri fisici "peso di volume" della matrice rocciosa di UL-2

Dati identificativi					Parametri fisici
					Peso di volume
Unità	Campagna di indagini	Sondaggio	Campione	Prof. da p.c.	γ (kN/m ³)
				(m)	
UL-2	ISMES - ISTEDIL 2008- 2009	S1B	CR3	24.30-24.60	26.04
			CR4	27.40-27.80	26.19
		S3B	CR3	29.50-30.00	25.90
		S34B	CR2	16.30-16.70	26.43
			CR3	22.00-22.36	25.54
			CR4	27.60-28.00	26.43
		MEDIA			
DEV. ST. CAMPIONARIA				0.34	
COEFF. DI VARIAZIONE				1%	

Tabella 4.20 Tabella riepilogativa dell'elaborazione dei valori dell'angolo di attrito di UL-2 secondo i risultati forniti dalle prove Tilt Test

Dati identificativi					Tilt Test
					Angolo d'attrito
Unità	Campagna di indagini	Sondaggio	Campione	Prof. da p.c.	ϕ (°)
				(m)	
UL-2	ISMES - ISTEDIL 2008- 2009	S1B	C3	24.30 - 24.60	35
			C4	27.40 - 27.80	40
		S3B	C3	29.50 - 30.00	39
		S4B	C4	27.60 - 28.00	35
		S5B	C2	16.60 - 15.00	36
		MEDIA			
DEV. ST. CAMPIONARIA				2.35	
COEFF. DI VARIAZIONE				6%	

Tabella 4.21 Tabella riepilogativa dell'elaborazione dei valori dei parametri di "sforzo a rottura", "modulo tangente" e "modulo secante" determinati mediante prove triassiali sulla matrice rocciosa di UL-2

Dati identificativi					Sforzo a rottura				
					σ_1	Et	Modulo secante		
Unità	Campagna di indagini	Sondaggio	Campione	Prof. da p.c.	σ_1	Et	E _s		
				(m)				(MPa)	(GPa)
UL-2	ISMES - ISTEDIL 2008-2009	S1B	CR3	24.30-24.60	83.00	42.100	27.200		
			CR4	27.40-27.80	155.10	55.820	56.040		
		S3B	CR3	29.50-30.00	75.4	33.610	28.740		
		S4B	CR2	16.30-16.70	93.19	39.270	34.530		
			CR3	22.00-22.36	141.92	30.670	50.320		
			CR4	27.60-28.00	61.62	37.200	17.540		
		MEDIA					101.71	39.78	35.73
		DEV. ST. CAMPIONARIA					37.92	8.84	14.69
COEFF. DI VARIAZIONE					37%	22%	41%		

Tabella 4.22 Tabella riepilogativa dell'elaborazione dei valori dei parametri di "resistenza a compressione semplice" e "resistenza a trazione" della matrice rocciosa di UL-2, determinati mediante Point Load Test tramite le relazioni fornite in ISRM (1985)

Dati identificativi					Point load test				
					Dati di prova		Elaborazioni secondo ISRM 1985		
					Indice corretto	Stima della resistenza a trazione		Stima della resist. a compressione semplice	
$0.8 \cdot I_s (50)$	$20 \cdot I_s (50)$	$25 \cdot I_s (50)$							
Unità	Campagna di indagini	Sondaggio	Campione	Prof. da p.c.	$I_s (50)$	t	Co		
				(m)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	
UL-2	ISMES - ISTEDIL 2008-2009	S1B	CR4	27.40-27.80	5.340	4.3	106.8	133.5	

Come specificato all'interno del paragrafo precedente, risultati dei Point Load Test sono stati derivati in riferimento ai valori di resistenza a trazione e a compressione semplice. Risulta una sovrastima della resistenza a trazione e una sottostima della resistenza a compressione rispetto ai risultati di laboratorio, tuttavia, si specifica che le correlazioni presenti in ISRM (1985) contengono una variabilità insita nella loro formulazione, che può portare a errori nella determinazione delle resistenze reali; pertanto, sono sempre e solo da considerare per stimare tali parametri, come suggerito anche nello standard di prova.

Le resistenze a rottura, confinate e non, ottenute, rispettivamente, dalle prove triassiali, tenendo in considerazione anche le indicazioni fornite dai risultati delle prove Point Load Test, sono state utilizzate per ricavare i parametri " m_i " e " σ_{ci} " della roccia intatta, che costituiscono alcuni degli input per costruire l'involuppo di Hoek e Brown di UL-2.

Dalle prove a compressione semplice con misura delle deformazioni è stato ricavato il valore del modulo di Young statico per la roccia intatta ($E_{i,sta}$). Per ricavare quest'ultimo, è stato scelto

innanzitutto di basarsi sui moduli di Young tangenti (E_t 50%, ovvero ricavati dalla tangente alla curva nel grafico sforzo-deformazione per un valore di sforzo pari al 50% della resistenza a compressione). È stato calcolato il *Modulus Ratio* (MR), definito in *Hoek & Diederichs (2006)*, sulla base delle correlazioni proposte in *Deere (1968)* e in *Palmström & Singh (2001)*, come il rapporto tra il modulo di Young della roccia intatta e la resistenza a compressione semplice della stessa:

$$MR = \frac{E_{i,sta}}{UCS}$$

Nel calcolo sono state utilizzate la media del modulo tangente e quella della resistenza a compressione semplice ottenute dalle prove effettuate:

Sforzo a rottura medio	Modulo di Young statico intatto	Modulus Ratio medio
UCS	$E_{i,sta}$	MR
(MPa)	(MPa)	(-)
102	43452	426

Seppur di un valore limitato, il risultato ottenuto risulta non perfettamente allineato con gli intervalli suggeriti in *Hoek & Diederichs (2006)* per alternanze arenaceo-pelitiche (Figura 4.30).

Rock type	Class	Group	Texture				
			Coarse	Medium	Fine	Very fine	
Sedimentary	Clastic		Conglomerates 300-400 Breccias 230-350	Sandstones 200-350	Siltstones 350-400 Greywackes 350	Claystones 200-300 Shales 150-250 ^a Marls 150-200	
		Non-clastic	Carbonates	Crystalline limestones 400-600	Sparitic limestones 600-800	Micritic Limestones 800-1000	Dolomites 350-500
		Evaporites		Gypsum (350) ^b	Anhydrite (350) ^b		
		Organic				Chalk 1000+	
Metamorphic	Non-foliated		Marble 700-1000	Hornfels 400-700 Metasandstone 200-300	Quartzites 300-450		
	Slightly foliated		Migmatite 350-400	Amphibolites 400-500	Gneiss 300-750 ^a		
	Foliated ^a			Schists 250-1100 ^a	Phyllites/Mica Schist 300-800 ^a	Slates 400-600 ^a	
Igneous	Plutonic	Light	Granite ^c 300-550 Granodiorite ^c 400-450	Diorite ^c 300-350			
		Dark	Gabbro 400-500 Norite 350-400	Dolerite 300-400			
	Hypabyssal			Porphyries (400) ^b	Diabase 300-350	Peridotite 250-300	
	Volcanic	Lava			Rhyolite 300-500 Andesite 300-500	Dacite 350-450 Basalt 250-450	
		Pyroclastic	Agglomerate 400-600		Volcanic breccia (500) ^b	Tuff 200-400	

^aHighly anisotropic rocks: the value of MR will be significantly different if normal strain and/or loading occurs parallel (high MR) or perpendicular (low MR) to a weakness plane. Uniaxial test loading direction should be equivalent to field application.
^bNo data available, estimated on the basis of geological logic.
^cFelsic Granitoids: coarse grained or altered (high MR), fined grained (low MR).

Figura 4.30 Abaco dei valori tipici di **Modulus Ratio (MR)** per diversi litotipi, secondo **Hoek & Diederichs (2006)**. Si evidenziano in rosso le voci affini alla natura litologica di UL-1

Sulla base dei risultati delle prove di laboratorio e delle conseguenti elaborazioni, alla matrice rocciosa di UL-1 sono stati attribuiti:

- **peso per unità di volume apparente (γ_a) = 26.0 kN/m³**
- **resistenza a compressione semplice (UCS) = 102 MPa**
- **modulo di Young statico della roccia intatta ($E_{i,sta}$) = 43000 MPa**

4.12 Caratterizzazione delle discontinuità

La caratterizzazione delle discontinuità di UL-1 e UL-2 è stata svolta mediante l'analisi dei dati derivanti dai rilievi realizzati in corrispondenza delle stazioni geomeccaniche, in combinazione con i dati giacitureali della cartografia geologica CARG e della Regione Emilia-Romagna, le campagne di indagine del 2003, del 2008-2009 (rilievi e stazioni geomeccaniche rilievi geostrutturali in foro) e del 2012, nel contesto del corpo diga e degli ammassi rocciosi affioranti a monte ed a valle dell'imposta.

L'analisi complessiva delle misure di orientazione eseguite e dello studio degli affioramenti a valle dell'imposta e in spalla destra, nelle immediate vicinanze dello sbarramento (Figura 4.31) ha permesso di definire la presenza di **4 famiglie di discontinuità principali per UL-1 e UL-2** (Tabella 4.23).

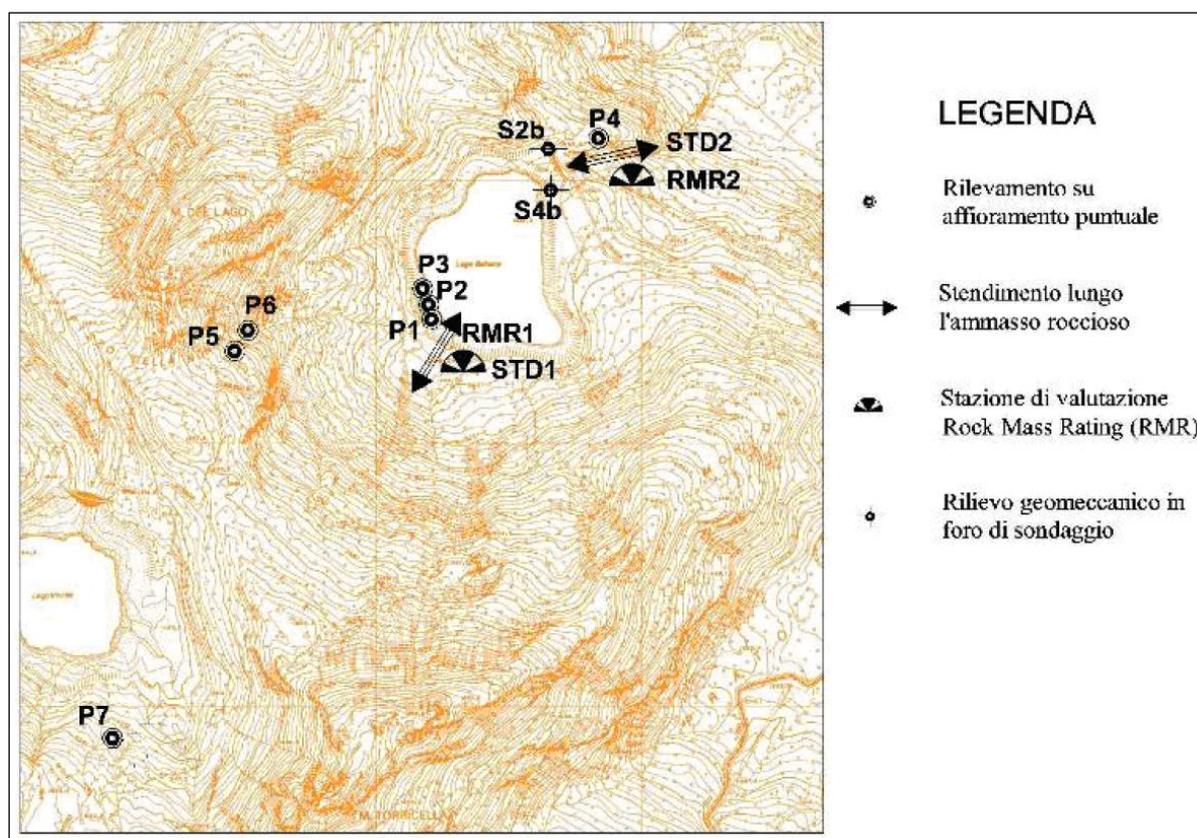


Figura 4.31 Rilievi geomeccanici e rilievi televisivi in foro considerati per la caratterizzazione delle discontinuità di UL-1 e UL-2 (campagna di indagini 2007-2008 e 2012)

Più precisamente nell'area dello sbarramento, tali discontinuità principali sono identificabili con la stratificazione dell'alternanza arenaceo-pelitica della Formazione del Macigno (Bedding) e da quattro sistemi di fratturazione (Joint 1, Joint 2, Joint 3 e Joint 4). Tali sistemi di discontinuità rilevati sono caratterizzati da spaziature medie in prevalenza decimetriche, che

hanno permesso di classificare l'ammasso roccioso in esame come "a blocchi". Le fratture sono mediamente serrate e con un grado di persistenza medio-elevato, mentre gli strati in quelle sporadiche situazioni in cui si presentano aperti sono caratterizzati riempimenti molli. La persistenza della stratificazione può essere considerata infinita.

Nel dettaglio, l'orientazione della stratificazione è stata desunta in primo luogo dalle stazioni geomeccaniche e poi confermata dalla cartografia geologica di riferimento. In particolare, nell'area dello sbarramento viene definita una direzione media di immersione verso monte di 14° con inclinazione di 40°. Tale conformazione risulta essere coerente con l'assetto stratigrafico e strutturale dell'area.

Tabella 4.23 Orientazione delle famiglie di discontinuità di UL-1 e UL-2 derivate dalle stazioni geomeccaniche, dai rilievi geostrutturali in foro, dai dati giacitureali della cartografia geologica CARG e della Regione Emilia-Romagna

Famiglia di discontinuità	Giacitura immersione / inclinazione
Bedding	14° / 40°
Joint 1	249° / 78°
Joint 2	169° / 67°
Joint 3	139° / 76°
Joint 4	209° / 71°

Proprio la rappresentazione grafica degli assetti di tali famiglie di discontinuità alla scala d'affioramento può essere visualizzata tramite la proiezione stereografica con ciclografiche riportata in Figura 4.32.

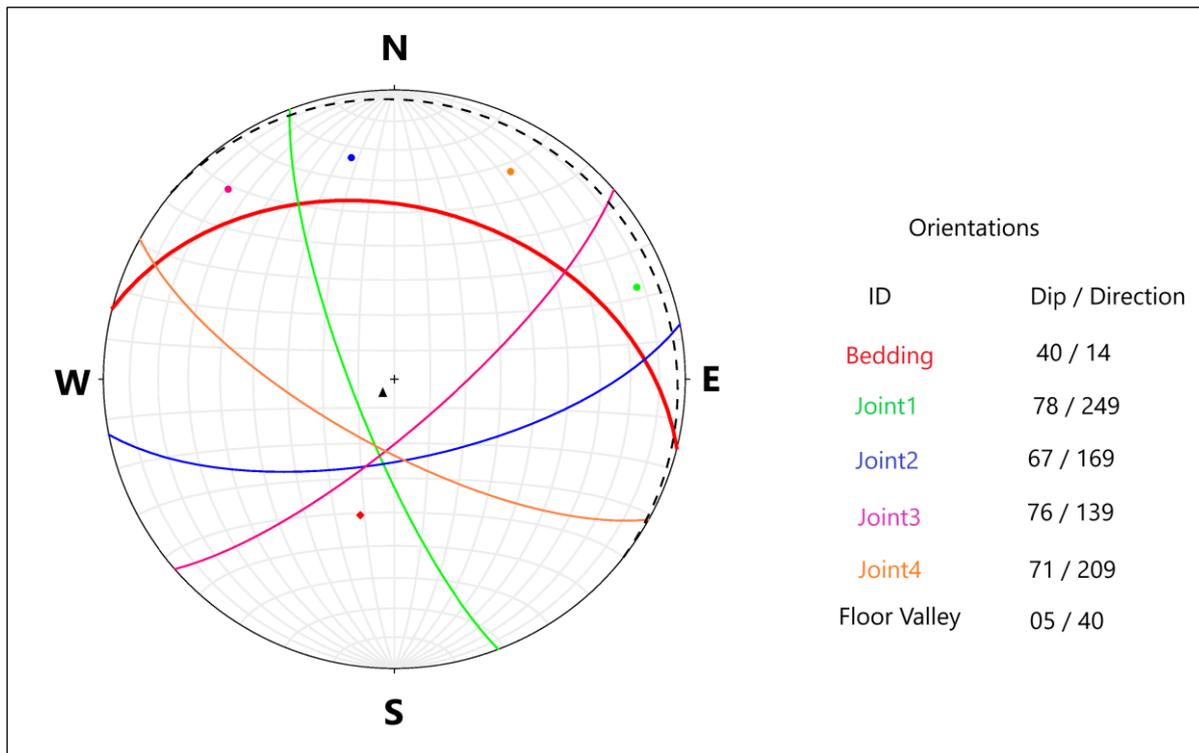


Figura 4.32 Proiezione stereografica con ciclografiche riferite alle giaciture delle famiglie Bedding, Joint 1, Joint 2, Joint 3 e Joint 4, ottenute dai rilievi geomeccanici realizzati, dalla documentazione disponibile, delle campagne di indagine analizzate e dalla cartografia geologica di riferimento. Si considera come alveo fluviale rilevato (Floor Valley) quella porzione di fondo valle posizionata immediatamente ai piedi dello sbarramento

4.13 Caratterizzazione dell'ammasso roccioso

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

Per la caratterizzazione a livello di ammasso roccioso, si è fatto riferimento al criterio di rottura proposto da *Hoek & Brown (1980)* e da *Hoek et al. (2002)*.

In particolare, a partire da parametri relativi alla roccia intatta, quali la resistenza a compressione semplice della roccia intatta ($\sigma_{ci} = UCS$) e la costante empirica "mi", ed utilizzando come indice per l'ammasso il valore di GSI, è possibile costruire, tramite le relazioni empiriche proposte in *Hoek et al. (2002)*, il criterio di rottura di Hoek & Brown, in grado di fornire indicazioni sulla resistenza dell'ammasso roccioso per diversi stati tensionali. L'involuppo è stato costruito grazie al codice di calcolo RocLab (©2002 Rocscience Inc.), del quale si riportano di seguito gli output (Tabella 4.24; Figura 4.33).

Il valore di " σ_{ci} " è stato determinato mediante dati derivanti dalle prove di laboratorio della campagna di indagini del 2008-2009.

Si specifica che per la scelta del coefficiente "mi" della roccia intatta è stato utilizzato l'abaco fornito dallo stesso software, realizzando una media pesata del coefficiente "mi" tra quello riferito alle arenarie e quello riferito alle siltiti e marne.

Infine, oltre al calcolo della resistenza dell'ammasso, RocLab implementa anche la legge empirica proposta in *Hoek & Diederichs (2006)*, che consente la valutazione del Modulo di Young statico ($E_m = E_{a,sta}$), sulla base del modulo della roccia intatta ($E_{i,sta}$), del GSI e del fattore di disturbo (D), in questo caso posto pari a 0.

Tabella 4.24 Tabella riepilogativa dell'elaborazione dei parametri di Hoek e Brown sviluppata per UL-1

Dati identificativi		Parametri di input					Parametri di Hoek & Brown			Parametri dell'ammasso roccioso		
		Resist. a compress. semplice roccia intatta	GSI	m_i	D	Modulo di Young statico roccia intatta	m_b	s	a	Resist. a trazione	Resist. a compress. semplice	Modulo di Young
Litotipo	Unità litotecnica	UCS (MPa)				$E_{i,sta}$ (MPa)			t_a (MPa)	UCS _a (MPa)	$E_{a,sta}$ (MPa)	
Flysch arenaceo-pelitico	UL-1	94.0	53	17	0	30000	3.1730	0.0054	0.5050	-0.160	22.515	10982

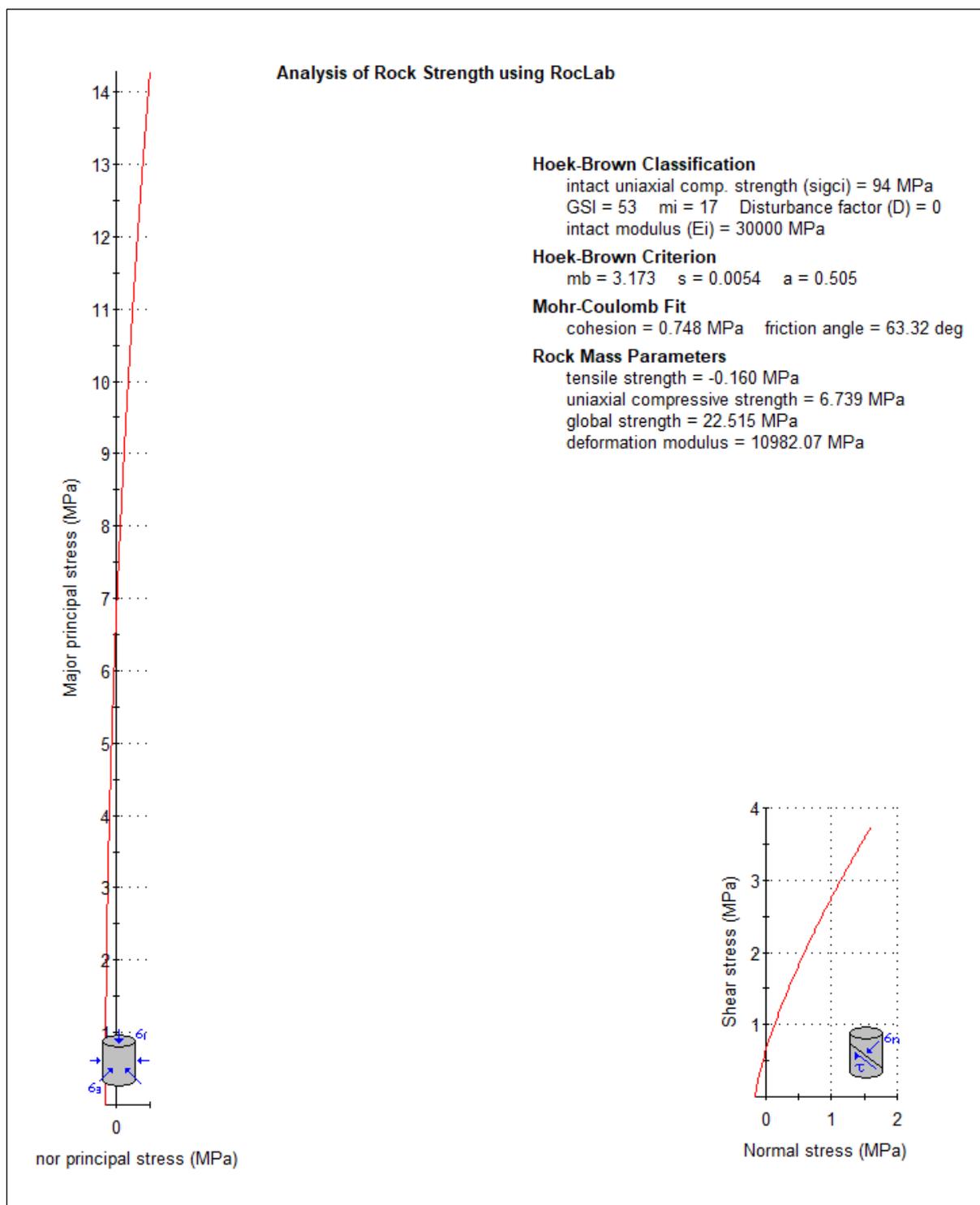


Figura 4.33 Grafici di output di RocLab con le curve del comportamento a rottura dell'ammasso roccioso di UL-1 nei grafici σ_1 - σ_3 e τ - σ_n , e parametri associati

In definitiva, relativamente alla **caratterizzazione elastica** dell'Unità, ai fini della Verifica, **è stato scelto di caratterizzare UL-1 sulla base dei dati provenienti dalle indagini per la roccia intatta e dei risultati ottenuti tramite il codice RocLab per quanto riguarda l'ammasso roccioso.**

Si assume che il Modulo di Young Dinamico sia pari a quello Statico calcolato tramite l'equazione di *Hoek & Diederichs (2006)*, implementata nel codice di calcolo di RocLab.

Pertanto, il parametro elastico assunto per UL-1 risulta:

- **Modulo di Young dinamico dell'ammasso roccioso ($E_{a,din}$) = 11000 MPa**

Per assegnare valori equivalenti di resistenza coesiva e attritiva a UL-1 è stato scelto di linearizzare l'involuppo di cui sopra rispetto a un intervallo tensionale inferiore a 1 MPa, riferito alle alternanze arenaceo-pelitiche presenti in fondazione dello sbarramento. Il risultato ha permesso di assegnare a UL-1 un comportamento meccanico espletato da:

- **coesione equivalente (c) = 800 kPa**
- **angolo d'attrito equivalente (φ) = 64°**

4.13.2 Unità Litotecnica 2 – Flysch arenaceo-pelitico compatto (UL-2)

Per la caratterizzazione a livello di ammasso roccioso, si è fatto riferimento al criterio di rottura proposto da *Hoek & Brown (1980)* e da *Hoek et al. (2002)*.

In particolare, a partire da parametri relativi alla roccia intatta, quali la resistenza a compressione semplice della roccia intatta ($\sigma_{ci} = UCS$) e la costante empirica "mi", ed utilizzando come indice per l'ammasso il valore di GSI, è possibile costruire, tramite le relazioni empiriche proposte in *Hoek et al. (2002)*, il criterio di rottura di Hoek & Brown, in grado di fornire indicazioni sulla resistenza dell'ammasso roccioso per diversi stati tensionali. L'involuppo è stato costruito grazie al codice di calcolo RocLab (©2002 Rocscience Inc.), del quale si riportano di seguito gli output (Tabella 4.25; Figura 4.34).

Il valore di " σ_{ci} " è stato determinato mediante dati derivanti dalle prove di laboratorio della campagna di indagini del 2008-2009.

Si specifica che per la scelta del coefficiente "mi" della roccia intatta è stato utilizzato l'abaco fornito dallo stesso software, realizzando una media pesata del coefficiente "mi" tra quello riferito alle arenarie e quello riferito alle siltiti e marne.

Infine, oltre al calcolo della resistenza dell'ammasso, RocLab implementa anche la legge empirica proposta in *Hoek & Diederichs (2006)*, che consente la valutazione del Modulo di Young statico ($E_m = E_{a,sta}$), sulla base del modulo della roccia intatta ($E_{i,sta}$), del GSI e del fattore di disturbo (D), in questo caso posto pari a 0.

Tabella 4.25 Tabella riepilogativa dell'elaborazione dei parametri di Hoek e Brown sviluppata per UL-2

Dati identificativi		Parametri di input				Parametri di Hoek & Brown			Parametri dell'ammasso roccioso			
Litotipo	Unità litotecnica	Resist. a compress. semplice roccia intatta	GSI	m _i	D	Modulo di Young statico roccia intatta	m _b	s	a	Resist. a trazione	Resist. a compress. semplice	Modulo di Young
	Flysch arenaceo-pelitico											
		102.0	63	17	0	40000	4.5350	0.0164	0.5020	-0.369	30.225	23510

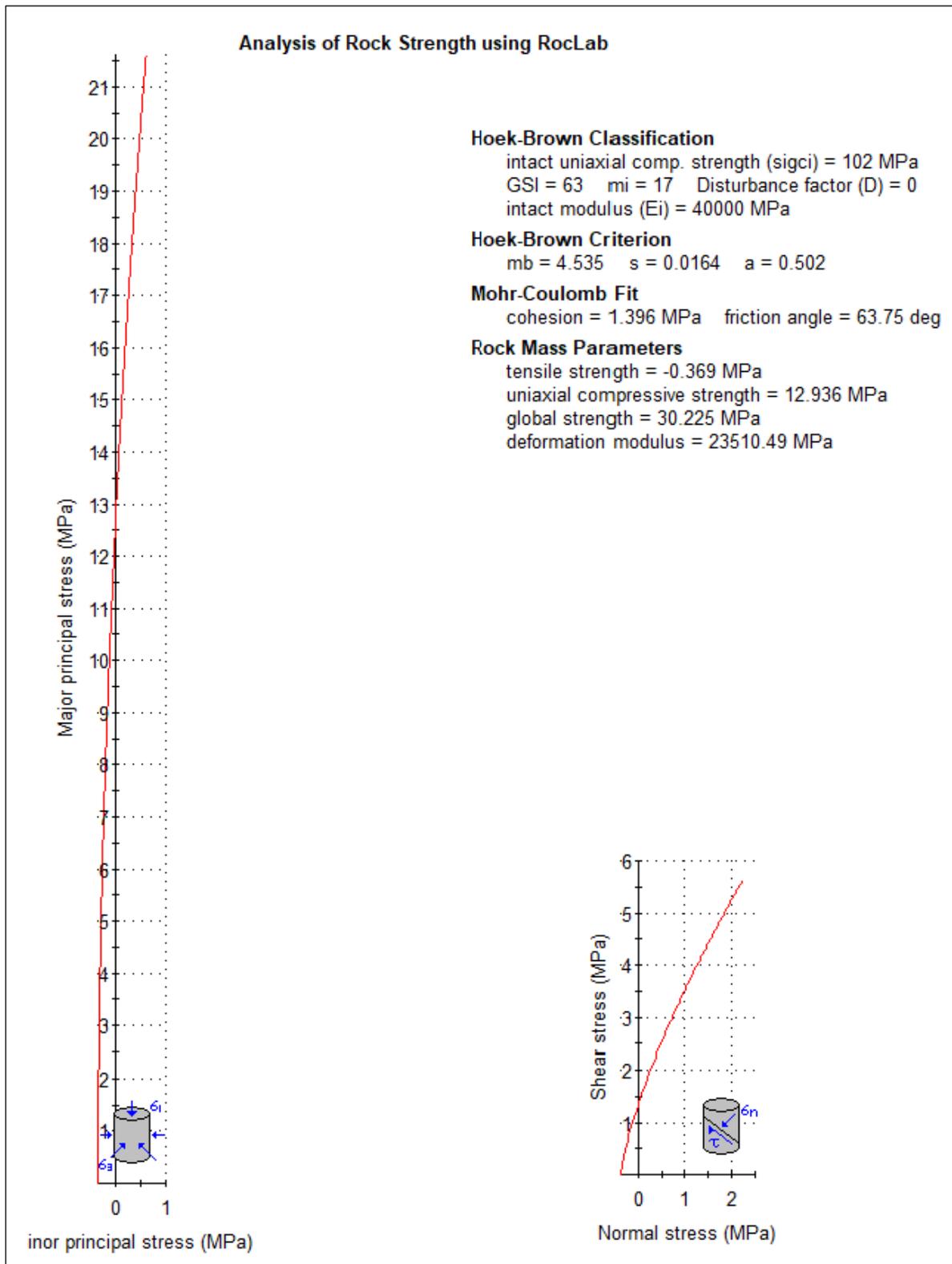


Figura 4.34 Grafici di output di RocLab con le curve del comportamento a rottura dell'ammasso roccioso di UL-2 nei grafici σ_1 - σ_3 e τ - σ_n , e parametri associati

In definitiva, relativamente alla **caratterizzazione elastica** dell'Unità, ai fini della Verifica, **è stato scelto di caratterizzare UL-2 sulla base dei dati provenienti dalle indagini per la roccia intatta e dei risultati ottenuti tramite il codice RocLab per quanto riguarda l'ammasso roccioso.**

Si assume che il Modulo di Young Dinamico sia pari a quello Statico calcolato tramite l'equazione di *Hoek & Diederichs (2006)*, implementata nel codice di calcolo di RocLab.

Pertanto, il parametro elastico assunto per UL-2 risulta:

- **Modulo di Young dinamico dell'ammasso roccioso ($E_{a,din}$) = 23000 MPa**

Per assegnare valori equivalenti di resistenza coesiva e attritiva a UL-2 è stato scelto di linearizzare l'involuppo di cui sopra rispetto a un intervallo tensionale inferiore a 1 MPa, riferito alle alternanze arenaceo-pelitiche presenti in fondazione dello sbarramento. Il risultato ha permesso di assegnare a UL-2 un comportamento meccanico espletato da:

- **coesione equivalente (c) = 1400 kPa**
- **angolo d'attrito equivalente (φ) = 64°**

5. SELEZIONE DEI PARAMETRI PER IL MODELLO DI CALCOLO

5.1 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, effettate in questo capitolo, vengono giustificate da considerazioni ingegneristiche.

5.2 Analisi granulometrica

Le informazioni riguardanti la granulometria dei materiali provengono dai risultati delle campagne di indagini 2003 e 2008-2009. Da queste si può dedurre che il fuso granulometrico dei campioni 2009, in rosso in Figura 5.1, è quasi completamente contenuto e comparabile col fuso granulometrico dei campioni del 2003 salvo la frazione più grossolana, in quanto sono state indagate pezzature fino ad un diametro massimo di 50 mm. Questo potrebbe essere soprattutto imputabile alle difficoltà intrinseche di campionamento per materiali grossolani di questo tipo. Tenendo conto di ciò, si può concludere che:

Il materiale è classificabile, secondo AGI 1977, come **ghiaia con sabbia limosa**.

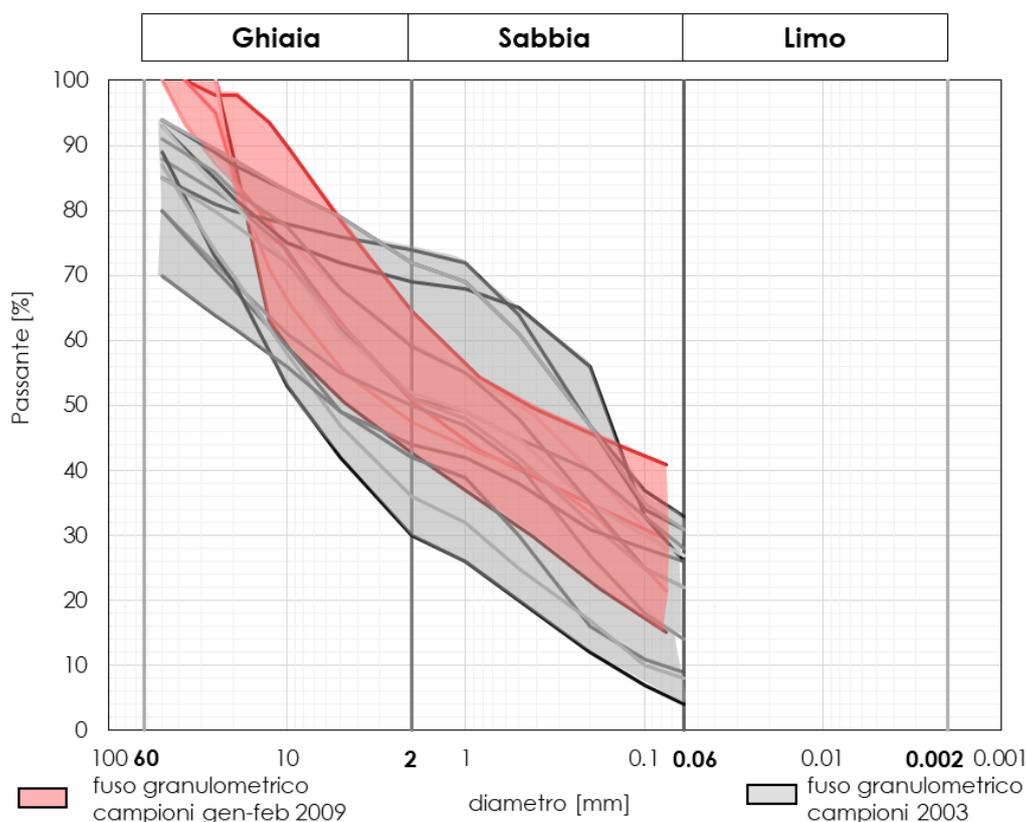


Figura 5.1 Curve granulometriche dei campioni estratti nel 2003 e nel 2009

5.3 Caratteristiche fisiche e proprietà indice

I pesi per unità di volume adottati per le verifiche di sicurezza sono riportati in Tabella 5.1. Le informazioni riguardanti il peso per unità di volume dei materiali provengono dai risultati delle campagne di indagini 2003 e 2008-2009 che forniscono informazioni in accordo tra di loro. **In entrambi i casi sono stati considerati dei valori medi tra i risultati delle prove geofisiche e quelli delle prove di laboratorio.**

Tabella 5.1 Pesì specifici delle unità geotecniche e litotecniche (UG-1, UL-1 e UL-2)

Unità	γ (kN/m ³)
UG-1	20.0
UL-1	23.5
UL-2	24.5

In particolare, per quanto riguarda la campagna indagini del 2008-2009, le informazioni inerenti al peso specifico dell'ammasso sono state dedotte sia dalle prove geofisiche che da quelle di laboratorio. La determinazione del peso specifico dei terreni è scaturita dalle sole indagini geofisiche del 2008-2009.

5.4 Parametri meccanici di resistenza al taglio

I parametri meccanici di resistenza a taglio adottati per le verifiche di sicurezza sono riportati in Tabella 5.2. 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).

Tabella 5.2 Parametri di resistenza al taglio di calcolo

Unità	c' (kPa)	φ' (°)	φ'_{cv} (°)
UG-1	0	43°	36°
UL-1	800	64°	
UL-2	1400	64°	

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 $\varphi' = 43^\circ$, mentre per si è considerato per UL-1 $c_{eq} = 800$ kPa e $\varphi_{eq} = 64^\circ$ e per UL-2 $c_{eq} = 1400$ kPa e $\varphi_{eq} = 64^\circ$.**

5.5 Permeabilità

I coefficienti di permeabilità adottati per le verifiche di sicurezza sono riportati in Tabella 5.3. 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. I valori di permeabilità per l'ammasso roccioso sono stati derivati a partire dalle prove Lugeon.

Tabella 5.3 Coefficienti di permeabilità di calcolo

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

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 sono state eseguite le prove, superiore a quella caratterizzata con i fusi analizzati.

5.6 Parametri di rigidezza dinamici

I moduli di rigidezza dinamici adottati per le verifiche di sicurezza sono riportati in Tabella 5.4. Le informazioni riguardanti i moduli dinamici dei materiali provengono dai risultati della campagna indagini del 2008-2009 e dalle prove di laboratorio.

Tabella 5.4 Moduli di rigidezza dinamici adottati per le verifiche

Unità	ν (-)	G_0 (MPa)	E_0 (MPa)
UG-1	$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$	$G_0 = \left(\frac{z+6}{0.0257}\right)^2 \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{1}{1000}$	$E_0 = \left(\frac{z+4}{0.0058}\right)^2 \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}{(1-\nu)} \cdot \frac{1}{1000}$
UL-1	0.42	3500	11000
UL-2	0.41	5700	20000

Per quanto riguarda l'unità **UG-1**, dalle prove Cross-Hole è risultato un coefficiente di Poisson dinamico variabile da 0.42 a 0.47. Pertanto, **è stato considerato un andamento crescente con la profondità in funzione delle velocità V_p e V_s** definite al Par. 4.9.

Dalle stesse prove, a partire dalle velocità medie V_p e V_s , sono stati ricavati i coefficienti di Poisson dinamici per le unità UL-1 e UL-2 (Par. 4.9). Quindi **i valori del coefficiente di Poisson dinamici per le unità UL-1 e UL-2 sono rispettivamente pari a $\nu = 0.42$ e $\nu = 0.41$.**

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. Le prove di rifrazione sismica sono state effettuate lungo stendimenti trasversali e longitudinali alla diga.

Sulla base di quanto detto al Par 4.9.1.1, **il modulo di taglio a basse deformazioni (G_0) dell'unità UG-1 cresce con la profondità con legge:**

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

mentre, nelle **unità UL-1 e UL-2**, la ridottissima variabilità delle onde S con la profondità giustifica l'utilizzo di un valore costante di G_0 per i materiali in questione e possono essere considerati dei **valori del modulo di taglio dinamico rispettivamente pari a 3500 MPa e 5700 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 con legge:**

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

Mentre, nelle unità **UL-1 e UL-2**, la ridottissima variabilità delle onde P con la profondità giustifica l'utilizzo di un valore costante di G_0 per i materiali in questione e possono essere considerati dei **valori del modulo elastico dinamico rispettivamente pari a 11000 MPa e 20000 Mpa**.

5.6.1 Curve di Decadimento del Modulo di Taglio

In assenza di indagini specifiche di laboratorio sulle caratteristiche del materiale UG-1 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 il materiale UG-1 viene adottata la seguente relazione per descrivere il decadimento del modulo di taglio (rappresentata dalla curva nera continua in Figura 5.2):

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

Dove:

- G è il modulo di taglio dinamico a una certa deformazione;
- G_0 è il modulo di taglio dinamico iniziale;
- γ è la deformazione di taglio (%);
- a parametro di curvatura pari a 0.84.

σ'_0 è la tensione di confinamento:

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

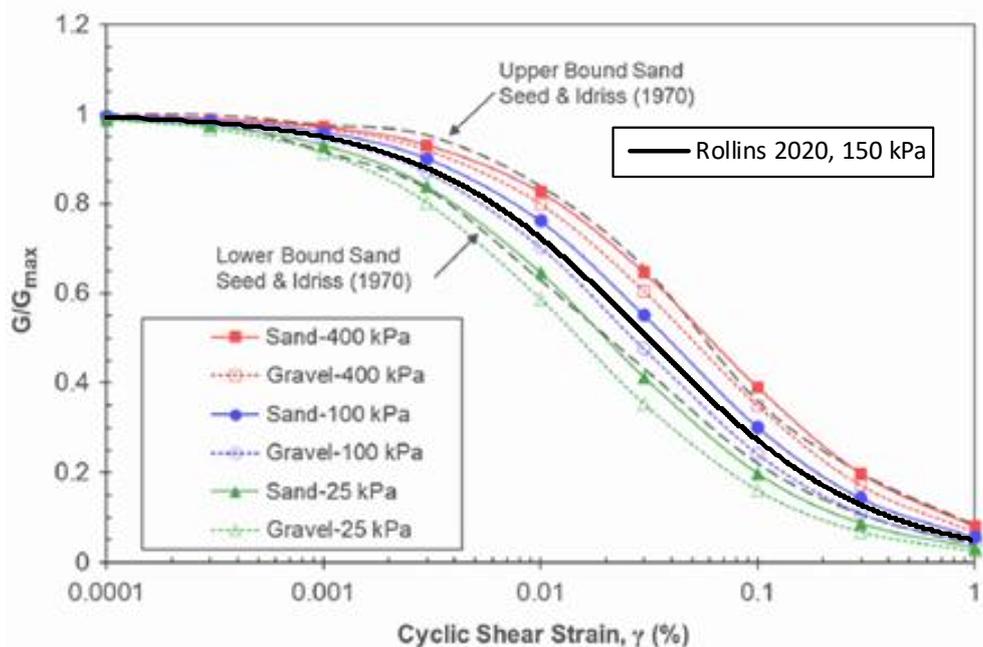


Figura 5.2 Confronto tra le curve di decadimento del modulo di taglio per: materiale dell'unità UG1 (linea nera continua), sabbie con formula di *Darendeli 2001* (linee continue colorate), ghiaie con formula di *Rollins 1998* (linee tratteggiate colorate) e campo di variabilità per le sabbie proposto in *Seed e Idriss 1970* e in *Seed et al. 1986* (linee tratteggiate in nero).

La curva di decadimento del materiale dell'unità UG1 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*).

5.6.2 Curve di Incremento dello Smorzamento

La curva dello smorzamento di UG-1 è stata valutata per mezzo della relazione di *Rollins (1998)* (Figura 5.3):

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

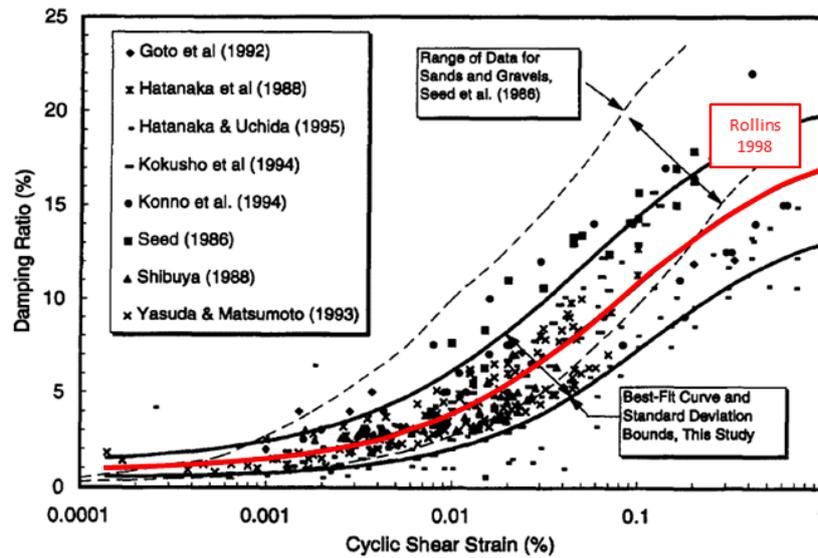


Figura 5.3 Confronto tra le curve dello smorzamento per il materiale della zona 1 ottenute tramite l'approccio di *Rollins 1998* (curva rossa) e il campo di variabilità delle sabbie e delle ghiaie proposto da *Seed et al. 1986* (curve nere tratteggiate)

6. 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 6.1.

Tabella 6.1. Sintesi dei parametri meccanici di calcolo per il corpo della diga

Parametri meccanici		UG-1	UL-1	UL-2
Peso per unità di volume	γ [kN/m ³]	20	23.5	24.5
Angolo di resistenza al taglio	ϕ' [gradi]	43	64	64
Coesione efficace/equivalente	c' [kPa]	0	800	1400
Permeabilità	k [m/s]	$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-7}$
Coefficiente di Poisson	ν [-]	Crescente con la profondità	0.42	0.41
Modulo Elastico dinamico	E_0 [MPa]	Crescente con la profondità	3500	11000
Modulo di taglio dinamico	G_0 [MPa]	Crescente con la profondità	5700	20000
Decadimento modulo di taglio	$G/G_0(\gamma)$ [-]	Rollins 2020 ($a=0.84$ $\sigma'_0 = 150$ kPa)	Costante	Costante
Fattore di smorzamento	$D(\gamma)$ [-]	Rollins 2020 ($b=0.8$)	Costante	Costante

7. 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.

AGI 1994. Raccomandazioni sulle prove geotecniche di laboratorio (1994).

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

ASTM-D4318. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils (2010). ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

ASTM-D2216. Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass (2010).

ASTM-D5407-93. Standard Test Method for Elastic Moduli of Undrained Intact Rock Core Specimens in Triaxial Compression Without Pore Pressure Measurement (2000).

ASTM-D5731-95. Standard Test Method For Determination Of The Point Load Strength Index Of Rock.

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.

Barton, N., & Choubey, V., 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock mechanics, 10(1-2), 1-54.

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.

- Bolton, M., D., 1986. The strength and dilatancy of sands, *Geotechnique*, 36, 1, 65-78.
- Bortolotti, V., Passerini, P., Sagri, M., Sestini, G., 1970. - The Miogeosynclinal Sequences. In: SESTINI G. (Ed.), *Development of the Northern Apennines Geosyncline*. *Sediment.Geol.* 4, 3/4.
- Bruno, G., 2012. *Caratterizzazione geomeccanica degli ammassi rocciosi per la progettazione ingegneristica*. Dario Flaccovio Editore, Palermo.
- Dallan Nardi, L., Nardi, R., 1972 - Schema stratigrafico e strutturale dell'Appennino settentrionale. *Mem. Acc. Lunig. Sc.*, 42: 1-212.
- 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.
- De Vallejo, L. G., 2004. *Geoingegneria*, Pearson Education Italia S.r.l., Milano.
- De Vallejo, L. G., & Ferrer, M., 2011. *Geological engineering*. CRC Press.
- Deere, D.U., 1968. *Geological considerations*. In: Stagg KG, Zienkiewicz OC, editors. *Rock mechanics in engineering practice*. London: Wiley; pp. 1-20.
- 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.
- Hoek, E., & Brown, E. T., 1980. *Underground excavations in rock*. CRC Press.
- Hoek, E., & Diederichs, M.S., 2006. *Empirical estimation of rock mass modulus*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(2), 203-215.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B., 2002. *Hoek-Brown failure criterion-2002 edition*. *Proceedings of NARMS-Tac*, 1, 267-273.
- Hoek, E., Wood, D., & Shah, S., 1992. *A modified Hoek-Brown failure criterion for jointed rock masses*. In *Rock Characterization: ISRM Symposium, Eurock'92, Chester, UK, 14-17 September 1992* (pp. 209-214). Thomas Telford Publishing.
- Hough, B. K., 1957. *Basic Soil Engineering*, Ronald Press, New York.
- ISPRA – Servizio Geologico d'Italia, 2009. *Carta Geologica d'Italia alla scala 1: 50'000. Foglio 234 Fivizzano*. Università di Pisa – Dipartimento di Scienze della Terra. https://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/234_FIVIZZANO/Foglio.html
- ISRM – International Society of Rock Mechanics, 1985. *Suggested method for determining point load strength*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 22, no. 2, pp. 51-60. Pergamon.
- Marinos, V., 2019. *A revised, geotechnical classification GSI system for tectonically disturbed heterogeneous rock masses, such as flysch*. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(2), 899-912.
- Marinos, P., & Hoek, E., 2000. *GSI: A geologically friendly tool for rockmass strength estimation*. *ISRM international symposium – Proc. GeoEng2000 at the Int. Conf. On Geotechnical and*

Geological Engineering, Melbourne, Technomic publishers, Lancaster, Pennsylvania, pp 1422–1446.

Marinos, P., & Hoek, E., 2001. Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 60(2), 85-92.

Palmström, A., & Singh, R., 2001. The deformation modulus of rock masses – Comparisons between in situ tests and indirect estimates. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16, 115–131.

Puccinelli, A., D'Amato Avanzi, G., Perilli, N., 2015. Note illustrative del Foglio 234 Fivizzano della Carta Geologica d'Italia alla scala 1: 50'000. ISPRA, Roma.

Regione Emilia-Romagna, 2011. Carta Geologica Carta Geologica dell'appennino emiliano-romagnolo, Elemento 234020 "Valditacca", a scala 1:10'000.

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

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

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

Servizio Geologico d'Italia, 1968. Carta Geologica d'Italia in Scala 1:100'000 – Foglio 85 "Castelnovo ne' Monti". II Edizione, Roma.

Signorini, R., 1936. Osservazioni geologiche sul bordo settentrionale del Casentino. *Boll. Soc. Geol. It.*, 55, 283-294.

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.