

	IMPIANTO Impianto idroelettrico di Levane	CODICE CKS GRE.OEM.R.90.IT.H.49017.09.011.00
	Diga di Levane: Progetto di Sovralzo ai fini di laminazione	

DIGA DI LEVANE

O&M Hydro Italy

Northern Central Area - Territorial Unit Lucca - UE Levane

Comune di Montevarchi - Provincia di Arezzo

PROGETTO DI SOVRALZO AI FINI DI LAMINAZIONE - PROGETTO DEFINITIVO

RELAZIONE GEOLOGICA

00	21/04/2020	Primo emissione	P. Vendrame	A. Nardi G. Ceroni	A. Masera
REV.	DATA	DESCRIZIONE REVISIONI	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO
ELABORATO CESI N. C0006347		NOME FILE R05 Relazione geologica.docx	SCALA -	FOGLIO -	
NUMERO E DATA ORDINE		Ordine n. 3500053942 del 28/09/2019			
IL PROGETTISTA  CESI S.p.A. Via Rubattino 54 I-20134 Milano - Italy Tel: +39 02 21251 Fax: +39 02 21255440 e-mail: info@cesi.it www.cesi.it Engineering & Environment - ISMES Division Structural & Civil Engineering			Timbro e firma per presa visione 		
			ING. ALBERTO MASERA	DOTT. GEOL. GIOVANNI CERONI	
IL COMMITTENTE  ENEL GREEN POWER ITALIA S.r.l. Power Generation Italy O&M Hydro Italy Northern Central Area			DATA	ING. M. SESSEGO	
PER PRESA VISIONE ING. RESPONSABILE			No. HYD		
DATA	ING. S. GABBRIELLI				

RAPPORTO

USO RISERVATO

BOZZA

C0006347

Cliente ENEL Green Power S.p.A.

Oggetto DIGA DI LEVANE (comune di Montevarchi e Terranuova Bracciolini AR)
Progetto di sovrizzo ai fini di laminazione – Progetto definitivo
RELAZIONE GEOLOGICA

Ordine Contratto Aperto di Servizi n. 3500053854 del 26/09/2019 nell'ambito del Contratto Aperto di Servizi n. 8400140386 del 07/05/2019

Note Rev. 00 – A1300002142 – Lettera di trasmissione C0009658

La parziale riproduzione di questo documento è permessa solo con l'autorizzazione scritta del CESI.

N. pagine 137 **N. pagine fuori testo** Tav.1

Data 21/04/2020

Elaborato STC - Vendrame Paolo
C0006347 115028 ALU

Verificato STC - Ceroni Giovanni, INE - Nardi Andrea
C0006347 114952 VER C0006347 3011309 VER

Approvato INE - Masera Alberto (Project Manager)
C0006347 114993 APP

CESI S.p.A.

Via Rubattino 54
I-20134 Milano - Italy
Tel: +39 02 21251
Fax: +39 02 21255440
e-mail: info@cesi.it
www.cesi.it

Capitale sociale € 8.550.000 interamente versato
C.F. e numero iscrizione Reg. Imprese di Milano 00793580150
P.I. IT00793580150
N. R.E.A. 429222

© Copyright 2020 by CESI. All rights reserved

Pag. 1/137

Indice

1	PREMESSA	5
2	METODOLOGIA DI STUDIO	7
3	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	8
4	INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL'AREA	9
5	ASSETTO LITOSTRATIGRAFICO DELL'AREA.....	12
5.1	Sezione d'imposta	14
5.2	Sponde del bacino	15
5.3	Formazione delle Arenarie del Monte Falterona	16
5.4	Terreni neogenici delle sponde del bacino	17
6	ASSETTO GEOMORFOLOGICO	18
6.1	Generalità	18
6.2	Geomorfologia di sito del versante sinistro	19
6.3	Geomorfologia di sito del versante destro.....	30
6.4	Geomorfologia dell'alveo di valle.....	32
7	ASSETTO IDROGEOLOGICO	41
8	SINTESI DELLE INDAGINI ESEGUITE	44
8.1	Nuove indagini.....	50
9	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA GEOMECCANICA	52
9.1	Caratterizzazione geotecnica dei terreni	52
9.2	Caratterizzazione geostrutturale della roccia di fondazione	54
9.2.1	Metodologia di lavoro	54
9.2.2	Assetto stratigrafico	59
9.2.3	Log di sondaggio	60
9.2.4	Stato della fratturazione.....	66
9.2.5	Analisi strutturale	81
9.3	Qualità ammasso tramite RQD.....	87
9.4	Correlazione tra le velocità Vp e l'indice Q di Barton	89
9.5	Indice GSI dei sondaggi.....	97
9.5.1	Formula di calcolo	97
9.5.2	Elaborazioni	100
10	SISMICITÀ DEL SITO	107
10.1	Sorgenti sismogenetiche e faglie capaci	107
10.2	Sismicità storica.....	108
10.3	Sismicità di base dell'area	112
10.4	Risposta sismica locale	113
10.4.1	Corpo diga in alveo e spalla destra.....	115
10.4.2	Spalla sinistra.....	116
11	CONSIDERAZIONI SUGLI INTERVENTI DI PROGETTO	118

11.1	Sovralzo spalla sinistra della diga	118
11.2	Sovralzo spalla destra	121
11.3	Viabilità.....	124
11.3.1	Pista di cantiere	124
11.3.2	Adeguamento della viabilità di accesso	125
12	INDAGINI INTEGRATIVE	131
13	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	132
14	BIBLIOGRAFIA	135
ALLEGATI	137

STORIA DELLE REVISIONI

Numero revisione	Data	Protocollo	Lista delle modifiche e/o dei paragrafi modificati
00	21/04/2020	C0006347	

1 PREMESSA

Nell'ambito della progettazione definitiva dell'intervento di sovrizzo della diga di Levane (Comune di Montevarchi e Terranuova Bracciolini, AR, Figura 1.1), ai fini della laminazione degli eventi di piena del fiume Arno, ENEL Green Power ha incaricato CESI della riedizione della *Relazione Geologica, Geomeccanica e Geognostica*, a corredo del progetto ENEL PRODUZIONE S.p.A. del 2015, tenendo conto dei commenti del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (Comunicazione Prot. 51/2016 del maggio 2017). Come concertato con ENEL Green Power S.p.A., il presente documento non è rivolto all'analisi delle condizioni delle sponde del bacino, oggetto di uno studio *ad hoc*.



Figura 1.1 – Vista da valle dello sbarramento di Levane (foto ENEL).

Per chiarezza e in breve sintesi, si ricorda che i commenti in argomento riferivano di incertezze sulla modellazione geologica nella zona della spalla sinistra, ove non erano di fatto eseguite indagini, e della mancata valorizzazione delle informazioni storiche, anche pertinenti la realizzazione della stessa diga, a servizio delle più recenti indagini per una migliore definizione del quadro interpretativo. A tal fine ENEL Green Power ha incaricato CESI della realizzazione di due sondaggi geognostici (divenuti tre in corso d'opera) eseguiti nel periodo 27 novembre – 17 dicembre 2019 (doc. CESI prot. C0006135) mirati ad accrescere le informazioni inerenti la zona di spalla sinistra, e propedeutici anche all'acquisizione di dati utili per la definizione di alcune fasi del progetto.

Pertanto, il presente documento è il risultato dell'integrazione di parti estratte dalla *Relazione Geologica, Geotecnica e Geomeccanica* del progetto ENEL del 2015 e di contributi originali di approfondimento specifico nell'area di imposta. La relazione propone un aggiornamento del modello geotecnico longitudinale e trasversale della sezione d'imposta dell'opera, basato sia su due nuove sezioni litotecniche, sia su una minuziosa analisi delle foto storiche messe a disposizione da ENEL Green Power che, unitamente alla rivisitazione delle indagini più recenti, ha permesso di estendere l'analisi ad un arco temporale a partire dalla fine degli anni '50 sino alle più recenti indagini del dicembre 2019.

In aggiunta alle parti estratte dalla relazione geologica di progetto del 2015 (e documenti allegati), considerate tuttora adeguate, il presente studio si avvale appunto di contributi originali di approfondimento specifico che, in particolare, fanno riferimento a:

- geomorfologia e quadro instabilità (cfr. § 6)
- idrogeologia (cfr. § 7)
- caratterizzazione geotecnica e geomeccanica (cfr. § 8)
- inquadramento sismico (cfr. § 9)
- considerazioni sugli interventi di progetto (cfr. § 11)
- indagini integrative (cfr. § 12)

Si tiene a precisare che nella redazione di tale studio ci si è avvalsi della collaborazione della società IMAGEO in accordo quadro con CESI per lavori attinenti ad aspetti geologici, che si ringrazia per la precisione e solerzia nell'aver fornito il loro contributo.

2 METODOLOGIA DI STUDIO

Nel dettaglio, sono state svolte le seguenti attività:

1. Raccolta ed analisi dei dati bibliografici esistenti riguardanti l'assetto geologico, geomorfologico, strutturale, idrogeologico, sismico dell'area interessata;
2. Esame ed analisi critica e ragionata dei documenti tecnici e specialistici esistenti relativi al contorno dello sbarramento e messi a disposizione dalla Committenza;
3. Sopralluogo di terreno e rilievo geologico di superficie dell'area in esame, effettuato nel mese di dicembre 2019 ed integrazione nel mese di maggio 2020;
4. Supervisione durante l'esecuzione dei sondaggi SS1 e SS2;
5. Elaborazione della carta geologica dell'imposta, alla scala 1:1.000 e relative sezioni alla scala 1:500 (TAV.1);
6. Redazione del rapporto tecnico specialistico.

3 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

Per la redazione del presente rapporto si è fatto riferimento ai seguenti documenti interni messi a disposizione da ENEL a CESI:

- ✓ “Impianto idroelettrico di Levane sul Fiume Arno – Relazione geologica”, G. Dal Piaz, Società Elettrica SELT-Valdarno, febbraio 1955
- ✓ “Impianto idroelettrico di Levane, Società Elettrica SELT-Valdarno – Atti di Collaudo - Relazione, Verbale di Visita e Certificato” Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Ottobre 1958
- ✓ “Bacino del fiume Arno. Progetto per l’attenuazione del rischio idraulico. Relazione Geologico Tecnica preliminare”, Enel Produzione SpA, Divisione Generazione ed Energy Management, Ingegneria Civile Idraulica, Firenze, febbraio 2005
- ✓ “Indagini geognostiche per la caratterizzazione geotecnica dei terreni sulle sponde del F. Arno nelle aree delle dighe Enel di Levane e La Penna ai fini dello studio per la riduzione del rischio idraulico – Piano di stralcio riduzione rischio idraulico dell’Autorità di Bacino del F. Arno ai sensi del DPCM 05.11.1999”, Costruzioni Stradali Armando Di Eleuterio Srlu, Sant'Egidio alla Vibrata (TE), dicembre 2006
- ✓ “Diga di Levane. Esecuzione di nuove canne drenanti in corpo diga e nella roccia di fondazione. Relazione illustrativa sui lavori svolti”, Enel Produzione SpA, Divisione Generazione ed Energy Management, Ingegneria Civile Idraulica, Firenze, maggio 2011
- ✓ “Esecuzione di indagini geognostiche e geofisiche sul calcestruzzo e sulla roccia di fondazione della diga di Levane (AR). Rapporto tecnico conclusivo”, Sonedile Srlu, Teramo, gennaio 2015
- ✓ “Progetto per la riduzione del rischio idraulico. Sopralzo della diga di Levane a fini di laminazione. Relazione del quadro conoscitivo geologico, geotecnico e geomeccanico”, CGT SpinOff Srl, San Giovanni Valdarno (AR), febbraio 2015
- ✓ “Progetto di sopralzo della diga di Levane a fini di laminazione per la riduzione del rischio idraulico. Integrazione del quadro conoscitivo finalizzata alla verifica di stabilità di alcune porzioni rappresentative delle sponde a monte della diga. Rapporto conclusivo”, CGT SpinOff Srl, San Giovanni Valdarno (AR), settembre 2015
- ✓ “Impianto idroelettrico di Levane, Diga di Levane, Comune di Montevarchi e Terranuova Bracciolini (AR) - Sopralzo della Diga a scopo di laminazione Progetto Definitivo - Relazione geologica, geotecnica e geomeccanica”, Enel Produzione Spa, Unità di Business Emilia-Toscana, Settembre 2015
- ✓ “Impianto idroelettrico di Levane, Diga di Levane, Comune di Montevarchi e Terranuova Bracciolini (AR) - Sopralzo della Diga a scopo di laminazione Progetto Definitivo - Relazione Tecnica Generale”, Enel Produzione Spa, Unità di Business Emilia-Toscana, Settembre 2015
- ✓ “Diga del Lago di Levane, Lago di Levane - Montevarchi (AR) - Relazione Tecnica, Indagini Log in foro - Rapporto conclusivo”, Technosoil Srl, Gennaio 2020
- ✓ “Accordo quadro per l’esecuzione, sul territorio nazionale, di indagini geognostico geotecniche, quali sondaggi, prove in foro, prelievo campioni, prove penetrometriche statiche e posa di strumentazione geotecnica - Diga di Levane”, Cesi SpA, Gennaio 2020
- ✓ “Diga di Levane (comune di Montevarchi AR) – Indagini geognostiche 2019”, CESI S.p.A. prot. C0006135, aprile 2020.
- ✓ “Diga di Levane Comune di Montevarchi e Terranuova Bracciolini (AR) – Progetto di sopralzo della diga Progetto definitivo per autorizzazione Relazione di caratterizzazione geomeccanica e geotecnica”, CESI S.p.A. prot.C0006345, aprile 2020.
- ✓ “Diga di Levane (comune di Montevarchi e Terranuova Bracciolini AR) - Progetto di sovralzo ai fini di laminazione – Progetto definitivo - Prove di Laboratorio geotecnico e geomeccanico”, CESI S.p.A. prot. n° C0007830, maggio 2020.

4 INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL'AREA

L'area nella quale è situato il bacino di Levane, che si estende dalla diga fino al ponte del Romito, si trova nel settore tirrenico della catena montuosa arcuata che va sotto il nome di Appenninico Settentrionale, costituita, dal punto di vista geologico, da una successione di formazioni che sono in continuità stratigrafica fra di loro, la quale è denominata Falda Toscana, formata da due serie stratigrafiche:

- Serie Toscana Carbonatica, costituita da unità geologiche prevalentemente calcaree, deposte in ambienti marini relativamente poco profondi;
- Serie Toscana Turbiditica, costituita da unità geologiche prevalentemente terrigene deposte nei soliti bacini che si sono approfonditi; essa si trova stratigraficamente al di sopra della precedente e costituisce il termine di chiusura della sedimentazione della Falda Toscana.

L'assetto tettonico dell'Appennino Settentrionale si è originato durante una "Fase Compressiva" ed una successiva "Fase Distensiva". Durante la prima fase (Oligocene Medio Superiore), si è formata una struttura a "pieghe ed a sovrascorrimenti", con vergenza verso nord est costituita dall'impilamento delle formazioni geologiche calcaree e terrigene. Questa fase collisionale della orogenesi appenninica si svolge nell'Oligocene Superiore-Miocene.

Durante la seconda fase (Pliocene) si è originata, iniziando dalla parte interna dell'arco appenninico (sud ovest), verso la parte esterna (nord est), cioè secondo la vergenza appenninica, una serie di depressioni tettoniche (Bacini Neogenici) delimitate da faglie normali, o distensive, di direzione nord ovest-sud est (direzione appenninica) (Figura 4.1).

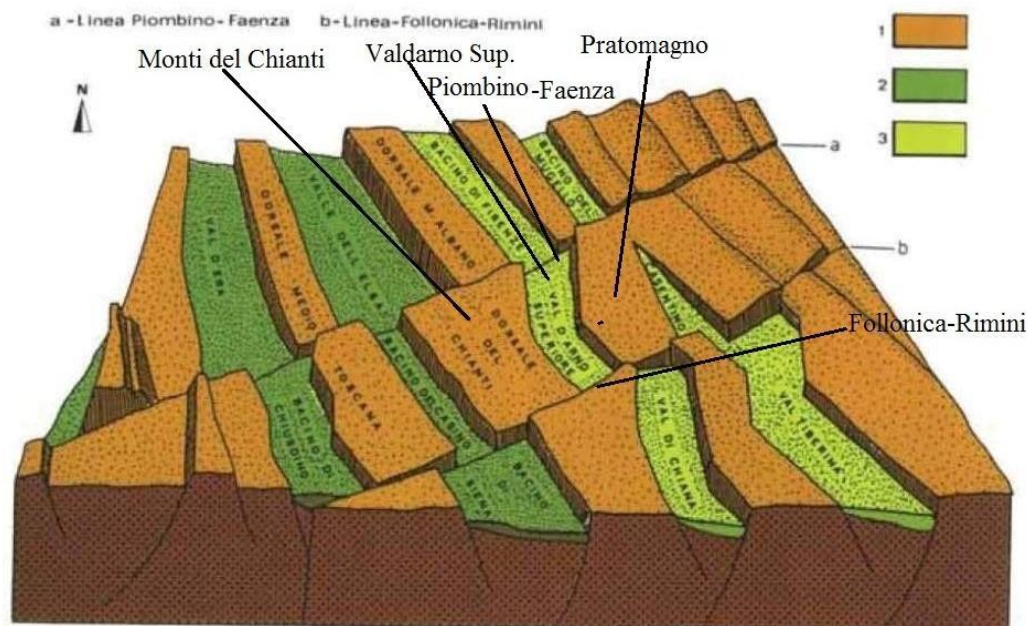


Figura 4.1 - Schema delle depressioni tettoniche interne alla catena appenninica (da CGT 2015): 1) substrato pre-neogenico; 2) bacini marini; 3) bacini intermontani.

Il Bacino Neogenico del Valdarno Superiore, percorso dal fiume Arno e definito, dal punto di vista di ubicazione "tettonica", "bacino intermontano", cioè di ambiente continentale, è una di queste depressioni tettoniche che è delimitata, a sud ovest, dai rilievi dei Monti del Chianti e, a nord est, dal rilievo del Pratomagno (Figura 4.2).

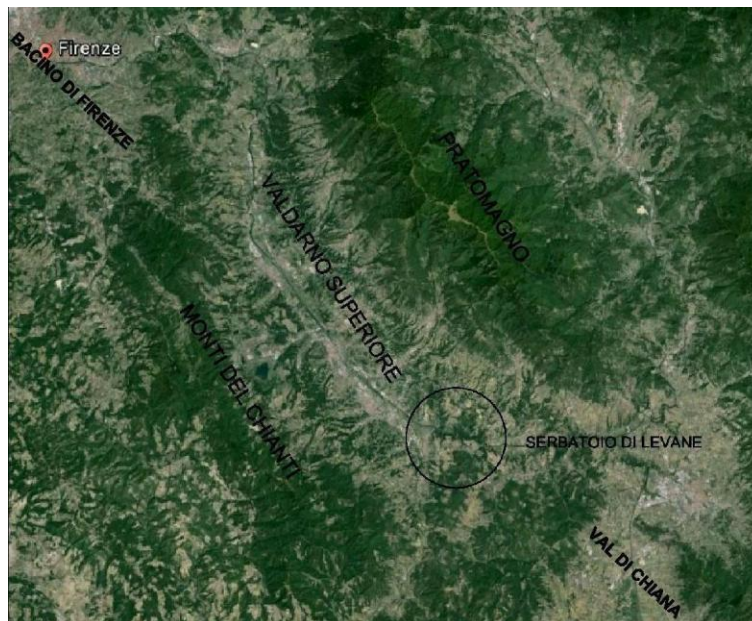


Figura 4.2 - Limiti della depressione tettonica del Valdarno Superiore.

Nella depressione tettonica del Valdarno Superiore, formata nel periodo del Pliocene Medio Superiore, si instaurò una sedimentazione di ambiente continentale, durante la quale si sono depositi sedimenti terrigeni che hanno raggiunto uno spessore stimato in circa 500 metri.

Il bacino del Valdarno Superiore ha subito, a sua volta, tre fasi tettoniche legate all'attivazione delle faglie distensive, alternativamente di sollevamento e di abbassamento, durante le quali si è verificata la deposizione di tre serie di depositi terrigeni fra loro sovrapposte.

L'insieme dei depositi accumulati nelle tre fasi tettoniche deposizionali è stato chiamato "Sistema del Valdarno Superiore" e ognuna delle tre serie di depositi è chiamata sub-sistema:

- Sub-sistema di Castelnuovo, di ambiente fluvio-lacustre, il più antico;
- Sub-sistema di Montevarchi, di ambiente fluvio-palustre, più recente e sovrastante il precedente;
- Sub-sistema di Monticello-Ciuffenna, il più recente, di ambiente fluviale, che chiude le fasi deposizionali del Valdarno Superiore.

I tre sub-sistemi sono fra loro separati da episodi di emersione estesi a tutto il bacino, verificatisi a causa di eventi di sollevamento tettonico.

Durante il Quaternario, in seguito all'incisione degli alti strutturali nelle aree di Incisa e di Rignano, il fiume Arno ha iniziato ad erodere i depositi accumulati nel bacino, approfondendo sempre più il suo alveo, con la formazione di terrazzi morfologici fluviali e delle alluvioni attuali di fondovalle.

Successivamente alla fase tettonica distensiva, i bacini neogenici sono stati interessati da una fase di "tettonica trasversale" che ha causato la formazione di alcuni lineamenti tettonici con direzione nord est-sud ovest, cioè antiappenninica, e costituiti ognuno da fasci di faglie a prevalente rigetto orizzontale denominate "faglie trascorrenti". Le depressioni tettoniche formatesi durante la fase distensiva sono delimitate dai lineamenti tettonici trasversali, che hanno interessato tutta la catena appenninica suddividendola in blocchi.

Nella Figura 4.1, nella quale è schematizzata la struttura dell'Appennino Settentrionale formatasi in seguito alla tettonica distensiva, con l'instaurarsi della fase "trascorrente" che ha originato i bacini neogenici, sono riportate anche le faglie trascorrenti che li delimitano: il bacino neogenico del Valdarno Superiore è individuato da due lineamenti trascorrenti noti in letteratura come "Linea Piombino-Faenza" e "Linea Follonica Rimini".

I lineamenti trasversali hanno causato la formazione di “alti strutturali” del substrato roccioso, che si trova alla base dei bacini neogenici, già corrugato durante le fasi tettoniche compressive.

Gli alti strutturali del substrato roccioso, che possono essere sepolti sotto i depositi neogenici oppure affioranti, sono risultati vere e proprie soglie geomorfologiche di delimitazione dei bacini stessi.

Il bacino neogenico del Valdarno Superiore è delimitato, a sud ovest ed a nord est, dalle faglie normali che si trovano all’incirca in corrispondenza del versante orientale dei Monti del Chianti e del versante occidentale del Pratomagno, e dagli alti strutturali, generati durante l’attività tettonica di tipo trascorrente. Gli alti strutturali corrispondono, a nord ovest, alle propaggini nord orientali dei Monti del Chianti (Monte Muro, Poggio di Firenze) che separa il Bacino del Valdarno Superiore dal Bacino Quaternario di Firenze, ed a sud est dall’alto strutturale, profondamente inciso dal fiume Arno, di Civitella Val di Chiana (a sud ovest) e Castiglion Fibocchi (a nord est), che separano il Bacino del Valdarno Superiore dal Bacino Neogenico della Val di Chiana (Figura 4.2).

Nella porzione sud orientale del Bacino del Valdarno Superiore si trova un alto strutturale che lo divide in un settore occidentale corrispondente alla Piana di Montevarchi-San Giovanni, ed uno orientale corrispondente alla Piana di Laterina. L’alto strutturale in questione è stato profondamente inciso dal fiume Arno in epoche geologicamente recenti, con la formazione di una valle molto stretta, denominata Valle dell’Inferno, al termine della quale è stata impostata la diga di Levane (Figura 4.3).

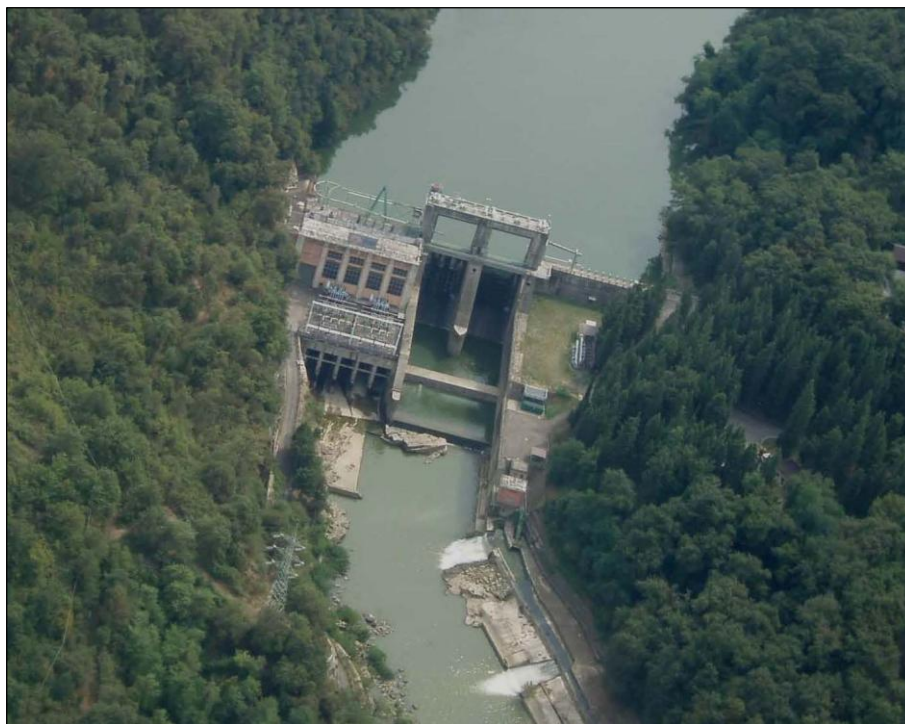


Figura 4.3 - Vista aerea della stretta di imposta della diga di Levane.

A monte della suddetta valle, il bacino è impostato all’interno della Piana di Laterina, costituita da terreni argilloso limosi, sabbiosi e ciottolosi appartenenti ad unità geologiche relativamente recenti depostesi al di sopra del substrato roccioso, in ambiente prima marino e poi continentale, deposte dallo stesso fiume Arno. Il fiume scorre, attualmente, nella Piana di Laterina, su questi depositi che, essendo stati erosi parzialmente dal fiume, costituiscono le attuali sponde del bacino in quel tratto.

5 ASSETTO LITOSTRATIGRAFICO DELL'AREA

L'attuale bacino di Levane, inteso come l'insieme delle sponde e dello sbarramento, è situato all'interno dell'alto strutturale della Valle dell'Inferno, il cui termine costituisce la zona di imposta della diga (Figura 5.1).

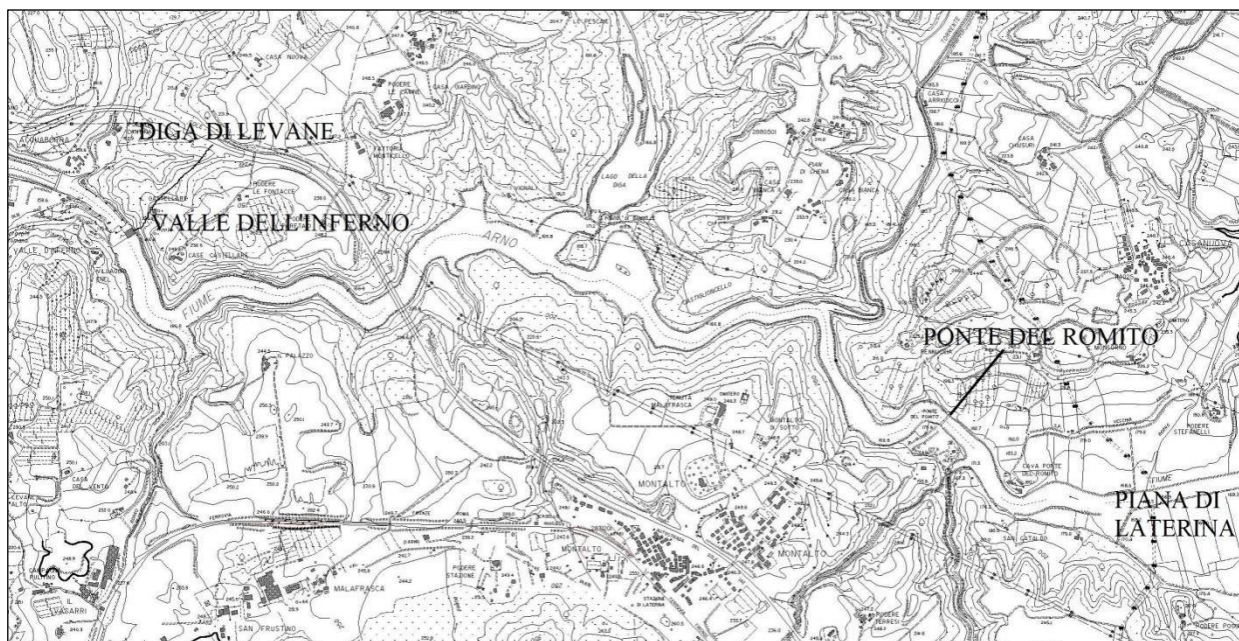


Figura 5.1 - Planimetria della sezione di imposta della diga (Valle Dell'Inferno).

L'assetto geologico della zona di imposta della diga è conosciuto attraverso i risultati di indagini geologiche e geologico strutturali di superficie e di una serie di carotaggi eseguiti nella sezione di imposta, dal coronamento e dal cunicolo di ispezione della diga, i quali sono serviti per indagare la roccia di fondazione, per reperire campioni di roccia da sottoporre a prove di laboratorio e per l'esecuzione di prove in sito.

L'assetto geologico delle sponde del bacino è conosciuto essenzialmente nelle cartografie del PAI del Bacino del Fiume Arno e del CARG della Regione Toscana e soprattutto dagli studi eseguiti nell'ambito del presente progetto dal Centro di Geotecnologie dell'Università di Siena. Nella Figura 5.2 è riportato uno stralcio della Carta Geologica della Regione Toscana (CARG) dell'area del Bacino di Levane, con annessa legenda.

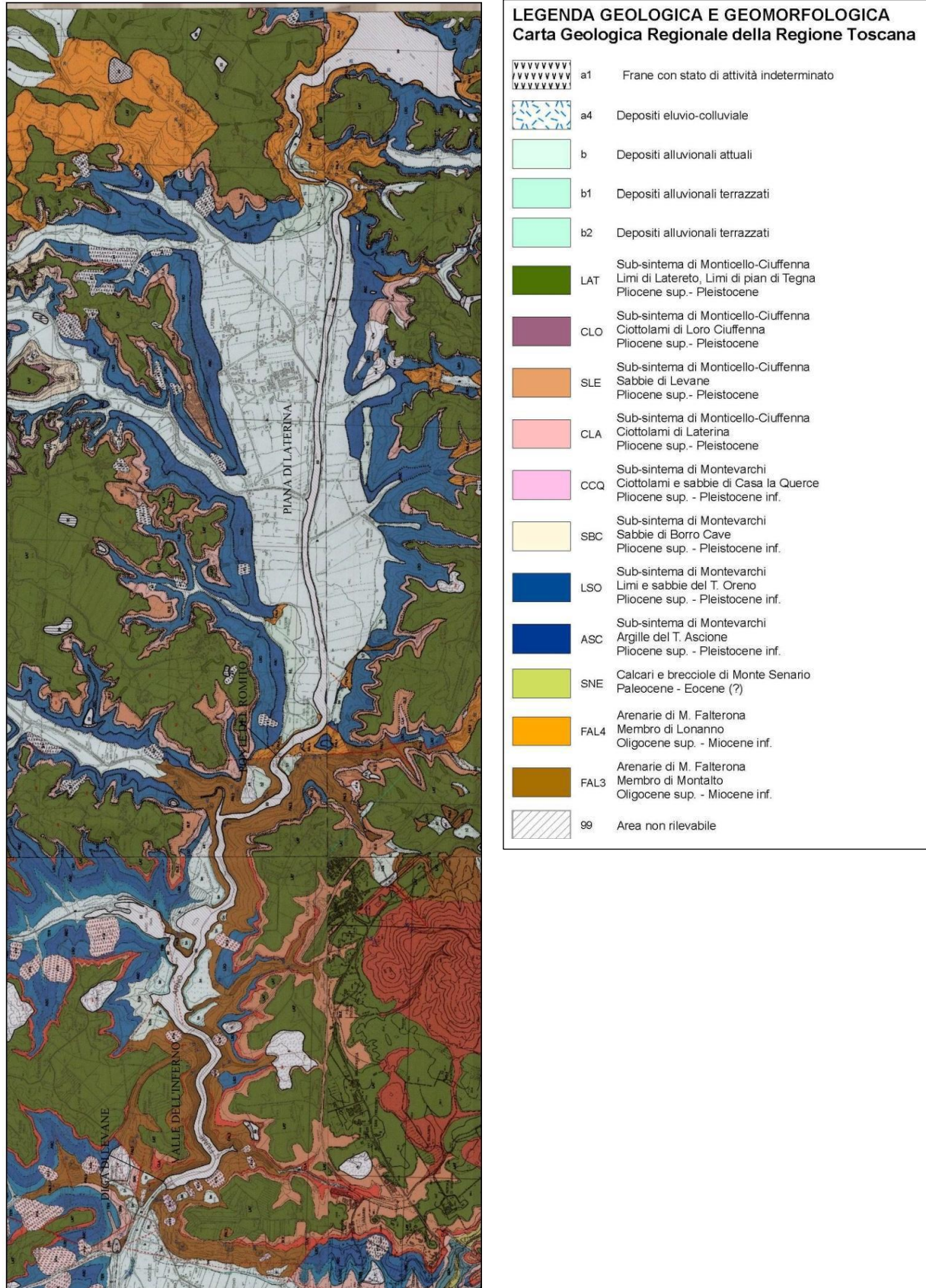


Figura 5.2 - Carta geologica delle sponde del Serbatoio di Levane (da CARG, Regione Toscana).

5.1 Sezione d'imposta

Il substrato roccioso presente nella sezione di imposta della diga è parte dell'unità geologica prevalentemente terrigena denominata Formazione del Macigno, che costituisce il termine ultimo della Falda Toscana. Essa è formata da tre Unità stratigrafiche che variano fra di loro per età, per posizione stratigrafica all'interno dell'Appennino Settentrionale e per composizione litologico- mineralogica.

Le tre Unità stratigrafiche sono disposte nella catena appenninica da sud-ovest, le più interne, verso nord-est, le più esterne, cioè da quella più antica a quella più recente, in accordo alla vergenza tettonica (Figura 5.3). Le tre Unità stratigrafiche sono le seguenti:

- Macigno del Chianti: alternanza di arenarie turbiditiche quarzoso feldspatiche con matrice argillosa ed assenza di cemento, sostituito dalle argille della matrice, a grana medio grossolana e sottili livelli argillitici; è presente nell'omonima catena montuosa; rapporto arenarie/peliti >1.
- Arenarie del Monte Cervarola - Monte Falterona: alternanza di strati di arenarie turbiditiche quarzoso feldspatiche a grana medio fine, con matrice argillosa e scarso cemento calcareo, e livelli siltitico marnosi, rispettivamente meno e più spessi che nella precedente unità; è presente nella parte centrale della catena, costituendone i rilievi più elevati; rapporto arenarie/peliti ~1:1.
- Marnoso Arenacea: alternanze di arenarie turbiditiche quarzoso feldspatiche a grana medio fine, con matrice argillosa e cemento calcareo dolomitico, e spessi livelli di marne; è situata ancora più ad oriente nella Catena Appenninica, nel versante romagnolo marchigiano; rapporto arenarie/peliti <1.

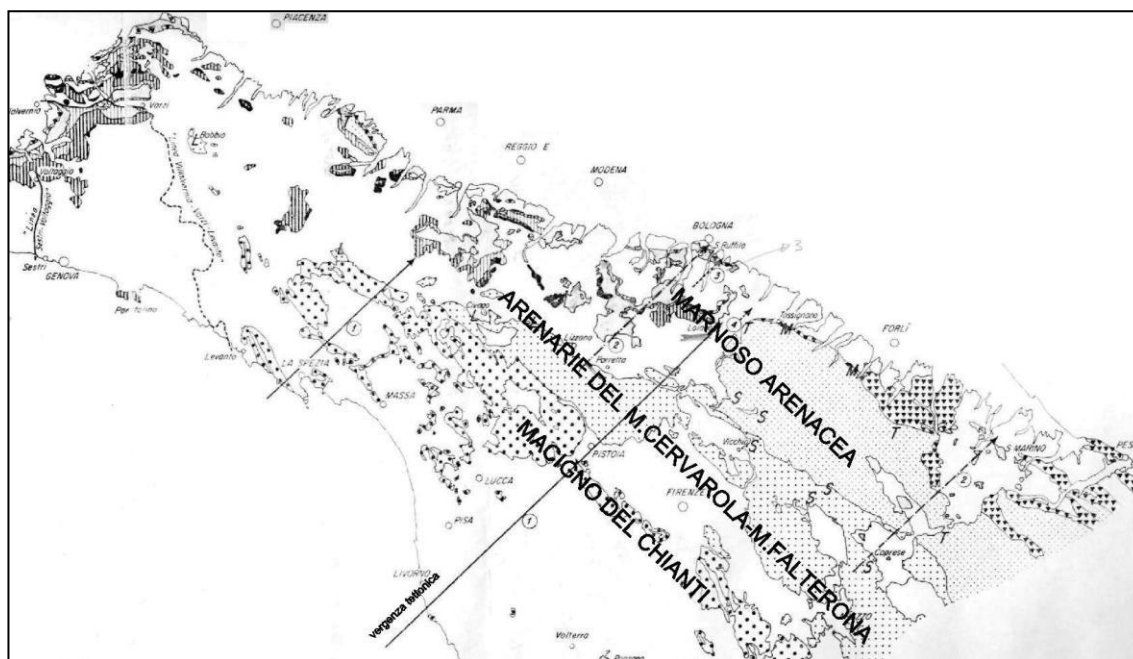


Figura 5.3 - Assetto delle tre unità costituenti il "Macigno".

Come precedentemente illustrato, il bacino neogenico del Valdarno Superiore è delimitato a sud ovest dall'alto strutturale dei Monti del Chianti e a nord est dall'alto strutturale del Pratomagno. Come si vede nello stralcio della carta geologica del CARG, Regione Toscana (Figura 5.4), ripresa dallo studio di CGT, il primo dei due rilievi è costituito dal Macigno del Chianti (34), mentre il rilievo del Pratomagno, l'alto strutturale della Valle dell'Inferno ed il rilievo di Civitella Val di Chiana - Castiglion Fibocchi, dalle Arenarie del Monte Falterona (32). Il bacino neogenico è, quindi, in corrispondenza dell'accavallamento tettonico che ha sovrapposto il Macigno del Chianti alla Formazione delle Arenarie del Monte Falterona.

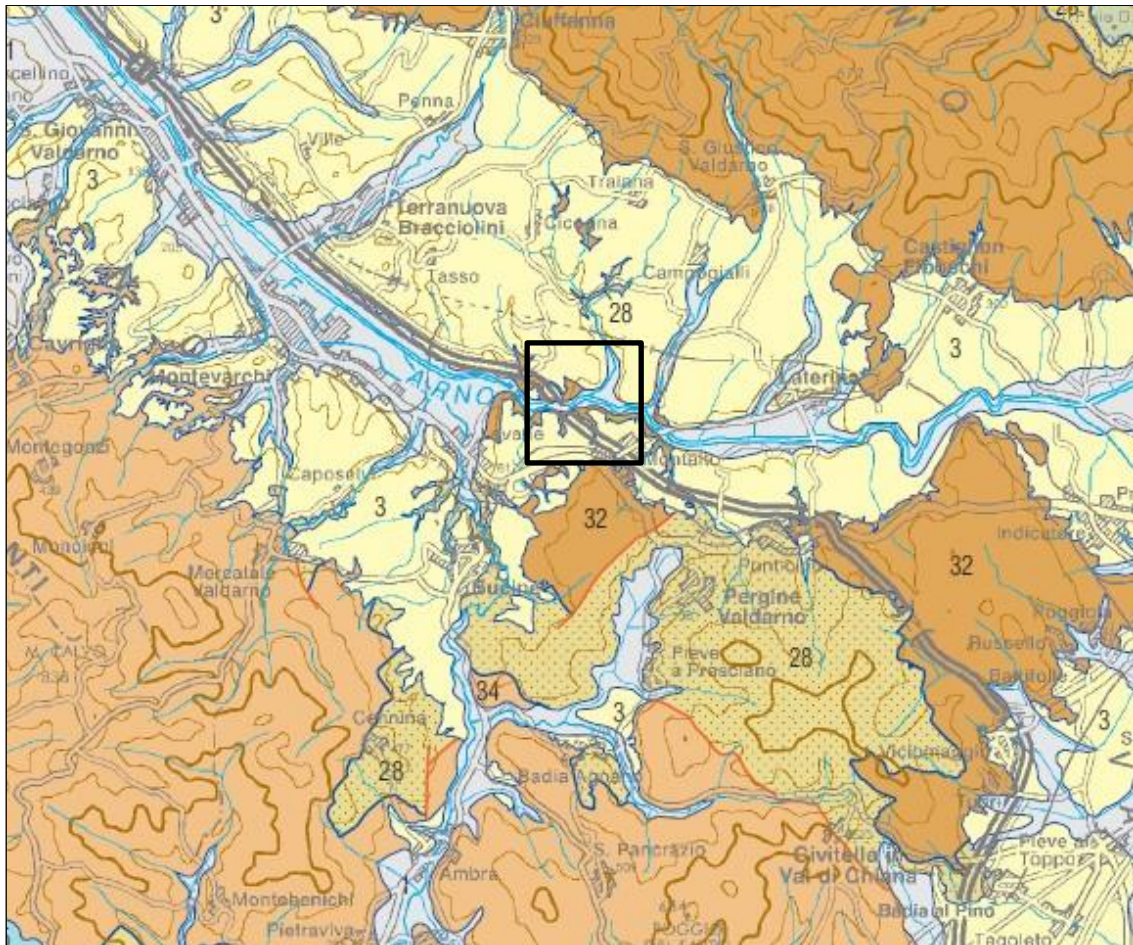


Figura 5.4 - Stralcio della Carta Geologica della Toscana a scala 1:250.000 [A5].

Legenda - 1: depositi alluvionali attuali e recenti (Olocene); 3: depositi fluvio-lacustri (Pliocene sup. - Pleistocene medio); 28: Dominio Sub-ligure, Unità di Canetolo, Formazione di M. Senario (Eocene - Oligocene); 32: Dominio Toscano, Unità Falterona-Cervarola, Formazione del M. Falterona (Chattiano - Langhiano); 34: Dominio Toscano, Unità della Falda Toscana, Formazione del Macigno (Oligocene - Miocene inf.).

Nella sezione di imposta della diga è presente la Formazione delle Arenarie del Monte Falterona (AMF), che appartiene all'Unità Stratigrafica Cervarola Falterona.

5.2 Sponde del bacino

Le sponde del bacino sono costituite dalla Formazione delle Arenarie del Monte Falterona, affioranti nella sezione di imposta della diga e in tutto il tratto dell'alveo del fiume interno alla Valle dell'Inferno. In alcuni tratti, la AMF è coperta nelle parti superiori dei versanti dalle unità geologiche neogeniche.

Le sponde del tratto di bacino interno alla Piana di Laterina sono costituite dai sedimenti fluvio-lacustri depositi nella depressione tettonica del Valdarno Superiore, in tre fasi successive (sub-sintemi), intervallate fra di loro da episodi di emersione:

- **Prima fase fluvio lacustre (Pliocene superiore):** si sono formati due bacini lacustri legati ai primi movimenti di abbassamento del Pliocene superiore (Villafranchiano), che non hanno interessato l'area nella quale è impostato l'invaso di Levane, ancora emersa e rimasta priva dei sedimenti di questo periodo (Sub sintema di Castelnuovo); al termine della fase si è avuta un'emersione dei due bacini formati, con un basculamento dei sedimenti depositi verso nord est.

- Seconda fase fluvio-lacustre (Pliocene terminale-Pleistocene inferiore): si è formato un lago molto esteso ma poco profondo nel quale si sono accumulati depositi di palude (Sub sintema di Montevarchi); anche questa fase termina con l'emersione dell'area a causa di importanti movimenti tettonici che determinarono la formazione di spessi depositi continentali (conoidi, alluvioni).
- Terza fase fluviale (Pleistocene medio): il fiume Arno ha deposto, ai piedi dei rilievi che delimitano il bacino, una grande quantità di sedimenti, che ricoprono ai loro bordi quelli della fase precedente (Sub sintema di Monticello-Ciuffenna); i rapporti fra i due depositi sono di "discordanza angolare" dovuta ad una inversione del corso del fiume: nel Quaternario più antico scorreva verso sud est in quella che adesso è la Val di Chiana, mentre successivamente, per fenomeni di basculamento, cambiò direzione scorrendo, come attualmente, verso nord ovest, all'interno del Valdarno Superiore; qui, durante la Terza fase, ha depositato sedimenti alluvionali e si sono formate diverse conoidi fluviali ad opera degli affluenti del fiume.

5.3 Formazione delle Arenarie del Monte Falterona

La litologia della AMF affiorante nella zona di imposta della diga e sui versanti della Valle dell'Inferno (Figura 5.5 e Figura 5.6), conosciuta dai risultati dei suddetti rilevamenti geologico strutturali, è formata da un'alternanza di strati di arenarie quarzoso feldspatiche a grana medio fine di spessore dell'ordine decimetrico, raramente dell'ordine metrico, e di livelli siltitico marnosi, che costituiscono la parte alta ed a grana più fine degli strati arenacei, il cui spessore è, in generale, dello stesso ordine di grandezza dei precedenti. A differenza, però, di quanto detto in precedenza (§ 5.1), il rapporto fra il litotipo arenaria e litotipo siltite-marna, cioè, A/P, è superiore ad 1, come è stato evidenziato dalla analisi litologica delle carote estratte dai sondaggi geognostici.



Figura 5.5 – Affioramento di AMF, versante destro sopra la centrale [A1].



Figura 5.6 - Affioramento di AMF versante destro a monte diga [A5].

5.4 Terreni neogenici delle sponde del bacino

I terreni neogenici che sono stati depositi nella depressione tettonica del Valdarno Superiore, sono raggruppati nel Sub-sistema intermedio ed in quello più recente, dal momento che quello più antico, con il quale inizia la sedimentazione nel bacino, non è rappresentato nell'area in oggetto. La loro litologia è riportata nella Tabella 5.1.

Sub-sistema	Nome unità	Litologia prevalente
Sub-sistema del T. Ciuffenna	Limi di Latereto e Pian Tegna (LAT)	Sabbie più o meno limose, bruno giallastre
	Sabbie di Levane (SLE)	Sabbie fluviali con lenti di ciottoli, grigie
	Ciottolami di Laterina (CLA)	Ciottolami fluviali di natura calcarea
Sub-sistema di Montevarchi	Sabbie di Borro Cave (SBC)	Sabbie limi e argille grigio giallastre, in livelli e lenti
	Limi del T. Oreno (LSO)	Limi grigio azzurrognoli con lenti di sabbie e ciottolami arenacei
	Argille del T. Asciano (ASC)	Argille più o meno sabbiose con frammenti vegetali e torba
	Limi di Terranuova (TER)	Limi argilloso sabbioso grigi con intercalazioni di sabbie giallastre
	Sabbie di Palazzetto (SPA)	Sabbie più o meno limose giallastre con lenti di ciottolami arenacei

Tabella 5.1 - Litologie dei terreni neogenici presenti nel bacino.

6 ASSETTO GEOMORFOLOGICO

6.1 Generalità

La diga e la maggior parte del bacino di Levene sono situati nella Valle dell'Inferno, forra originatasi in risposta alla fase di intensa erosione del fiume Arno avvenuta nel Pleistocene Superiore, innescata da un abbassamento del livello di base regionale. Dopo aver inciso le coperture pleistoceniche, il fiume ha inciso gli alti strutturali del substrato roccioso, sovraimponendo la propria direttrice di drenaggio nell'erosione della soglia rocciosa attraverso un processo di antecedenza (Figura 6.1).

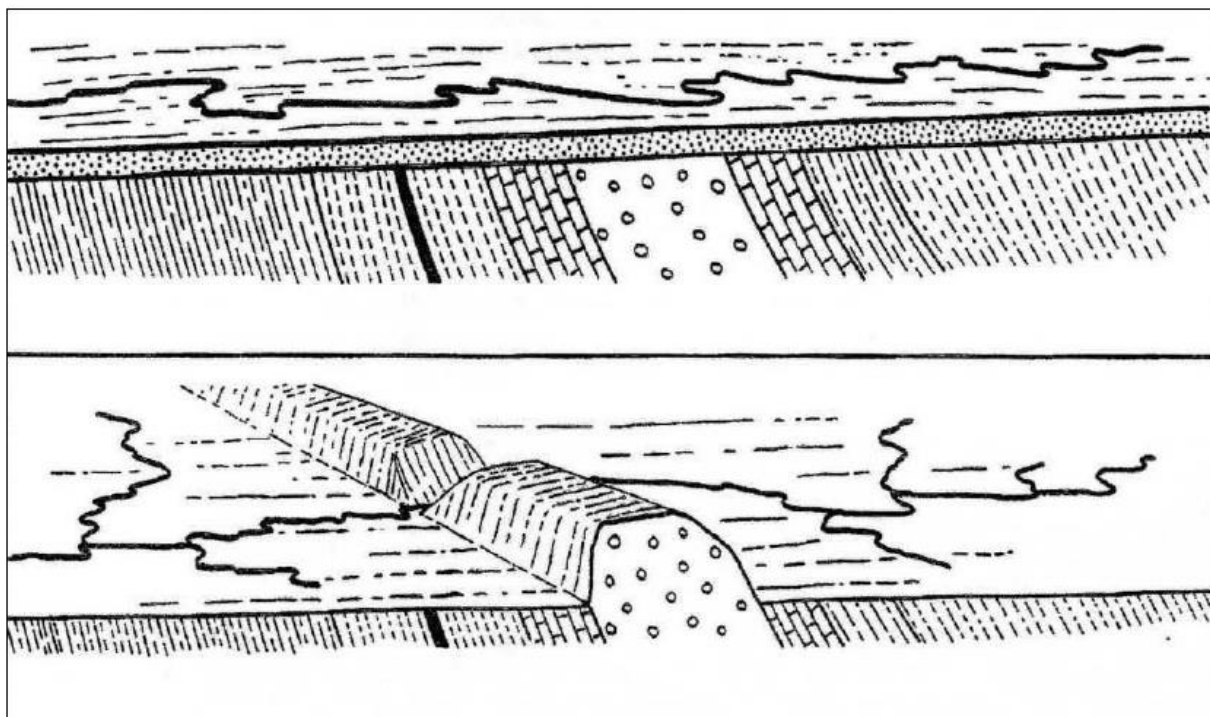


Figura 6.1 - Esempio del processo di antecedenza in cui il corso d'acqua mantiene la precedente direttrice di drenaggio (sopra) imponendola al substrato che è stato portato in erosione, ad esempio per sollevamento tettonico (sotto).

I fianchi della Valle dell'Inferno, costituiti da un'alternanza di strati arenacei e di livelli siltoso marnosi (AMF), sono caratterizzati da una marcata asimmetria, particolarmente visibile nell'area di imposta della diga, dove il versante destro presenta un'acclività elevata ($>40^\circ$) e una pressoché continua scarpata rocciosa mentre il versante sinistro presenta un'acclività minore (circa 20°), limitati affioramenti rocciosi e ubiquitarie coperture di depositi sciolti.

La ragione di tale asimmetria risiede nell'assetto strutturale locale, caratterizzato da una monoclinale piuttosto regolare, immergente verso NE di circa 20° ; poiché nell'area di imposta la valle è diretta NW-SE, ne consegue che i fianchi vallivi si trovano in condizioni di perfetto franapoggio (il sinistro) e reggipoggio (il destro). È ipotizzabile inoltre che l'assetto monoclinale induca l'Arno a migrare verso il suo fianco destro, mantenendolo acclive e privo di coperture.

6.2 Geomorfologia di sito del versante sinistro

Come precedentemente accennato, il versante sinistro è caratterizzato da una monotona isoclinale immergente di circa 20° verso NE. In ragione di questo assetto marcatamente a franapoggio il versante, con particolare riferimento all'area nell'intorno dell'imposta dell'opera realizzata, è privo di affioramenti del substrato, ricoperto da una coltre detritica di spessore variabile.

In particolare, il rilievo geologico-geomorfologico di sito eseguito nel mese di Dicembre 2019, unitamente ad una minuziosa analisi della documentazione pregressa esistente ed alle risultanze della campagna indagini CESI 2019, ha posto l'attenzione sul dissesto messo in evidenza dalla relazione del prof. Giorgio dal Piaz nel 1956.

La prima segnalazione di tale dissesto risale ai sondaggi ed agli studi eseguiti da SELT a metà anni '50 del novecento in fase di progettazione dell'opera. Nonostante la frammentarietà dei dati, nelle stratigrafie dei sondaggi in sponda sinistra è chiaramente indicato l'attraversamento di un deposito caotico indicato come "*arenaria marnosa fratturata*" (sondaggio F.5), "*trovanti di arenaria con passaggi di argilla*" (sondaggio F.6), etc., la cui base è indicata a profondità variabili tra 5,50m e 8,50m.

Nella descrizione il fenomeno è indicato come un insieme di "*slittamenti della parte superficiale del terreno per spessori relativamente modesti*" in cui si riscontrano "*blocchi arenacei fra loro slegati avvolti di marne argillose e tracce di distacchi a gradinata*". Lungo la sezione trasversale all'alveo, il corpo di depositi viene limitato verso il basso da una superficie listrica, aperta verso l'alto e chiusa verso il basso, in contropendenza, in prossimità dell'alveo (Figura 6.2).

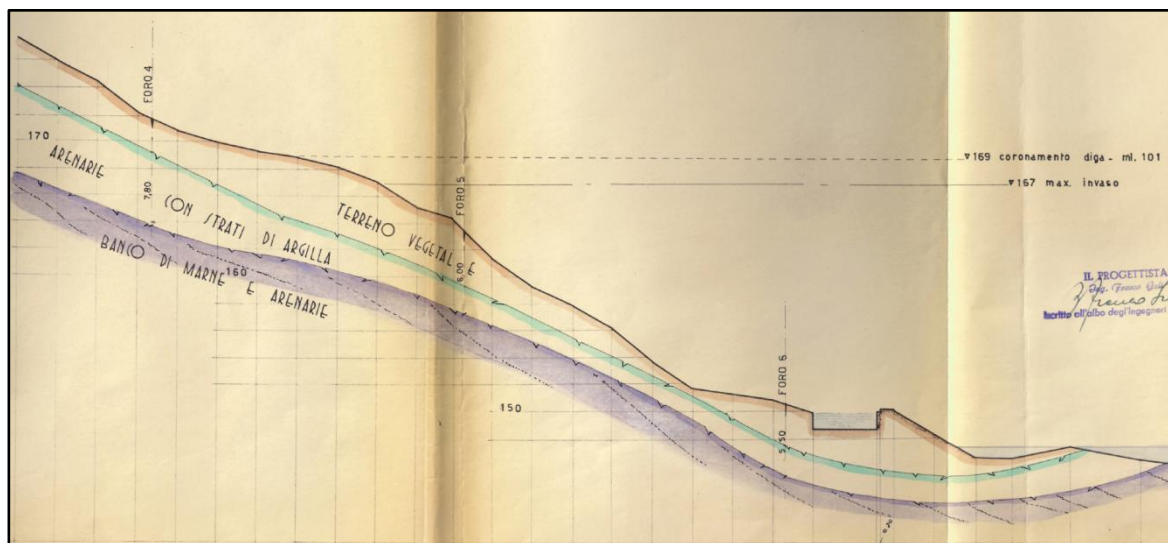


Figura 6.2 – Sezione trasversale all'alveo, in corrispondenza dell'imposta della diga, redatta dal Prof. Dal Piaz in fase di progettazione; da notare l'andamento listrico dell'appoggio dei depositi superficiali sul substrato litoide (in viola).

Analogamente nella sezione longitudinale all'Arno, lungo l'asse del muro d'ala in sponda sinistra, è indicata la presenza di una zona franosa, la cui geometria non è ben definita; i relativi depositi sono indicati come "*arenarie fratturate*" (sondaggio F.18), "*marne sconvolte*" e "*detriti scagliosi*" (sondaggio F.17), passanti verso l'alto a depositi alluvionali e la cui base è a profondità variabili da 2m a 7,30m, rispetto alla topografia originaria della valle.

I successivi sondaggi eseguiti più di recente confermano l'assetto del sottosuolo, in particolare da monte verso valle:

- sondaggio SS1: blocchi, ciottoli, ghiaie, con argilla limosa, fino a 8,30m da p.c. (Figura 6.3 e Figura 6.4);

- sondaggio SL6: ghiaia con ciottoli, in matrice limosa-sabbiosa, fino a 2,40m da p.c..

L'appoggio sul substrato avviene attraverso rocce argillitiche-siltitiche, talora arenacee, fratturate.

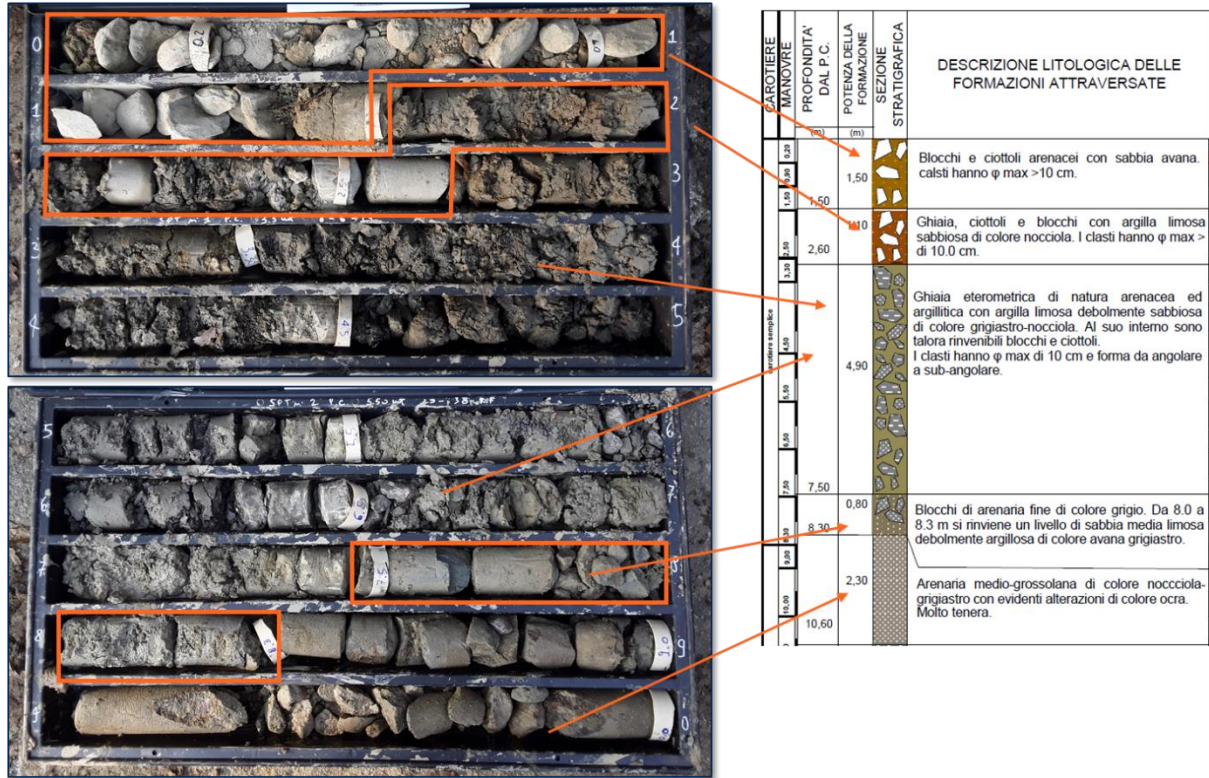


Figura 6.3 – Sondaggio SS1, stratigrafia dei primi 10 m in cui è evidente la natura caotica del materiale superficiale.



Figura 6.4 – Dettagli dello scavo della piazzola del sondaggio SS1 e della relativa pista di accesso.

La natura caotica del deposito attraversato dai sondaggi è confermata dallo scasso effettuato in corrispondenza della piazzola del recente sondaggio SS1, in cui sono ben riconoscibili i blocchi arenacei, angolosi, pluridecimetrici inglobati in matrice fine (Figura 6.4).

Nel complesso anche la geometria riconosciuta da Dal Piaz è confermata dai dati più recenti, dalla cui interpolazione si ottiene un andamento analogo a quanto indicato in fase di progettazione (Figura 6.5).

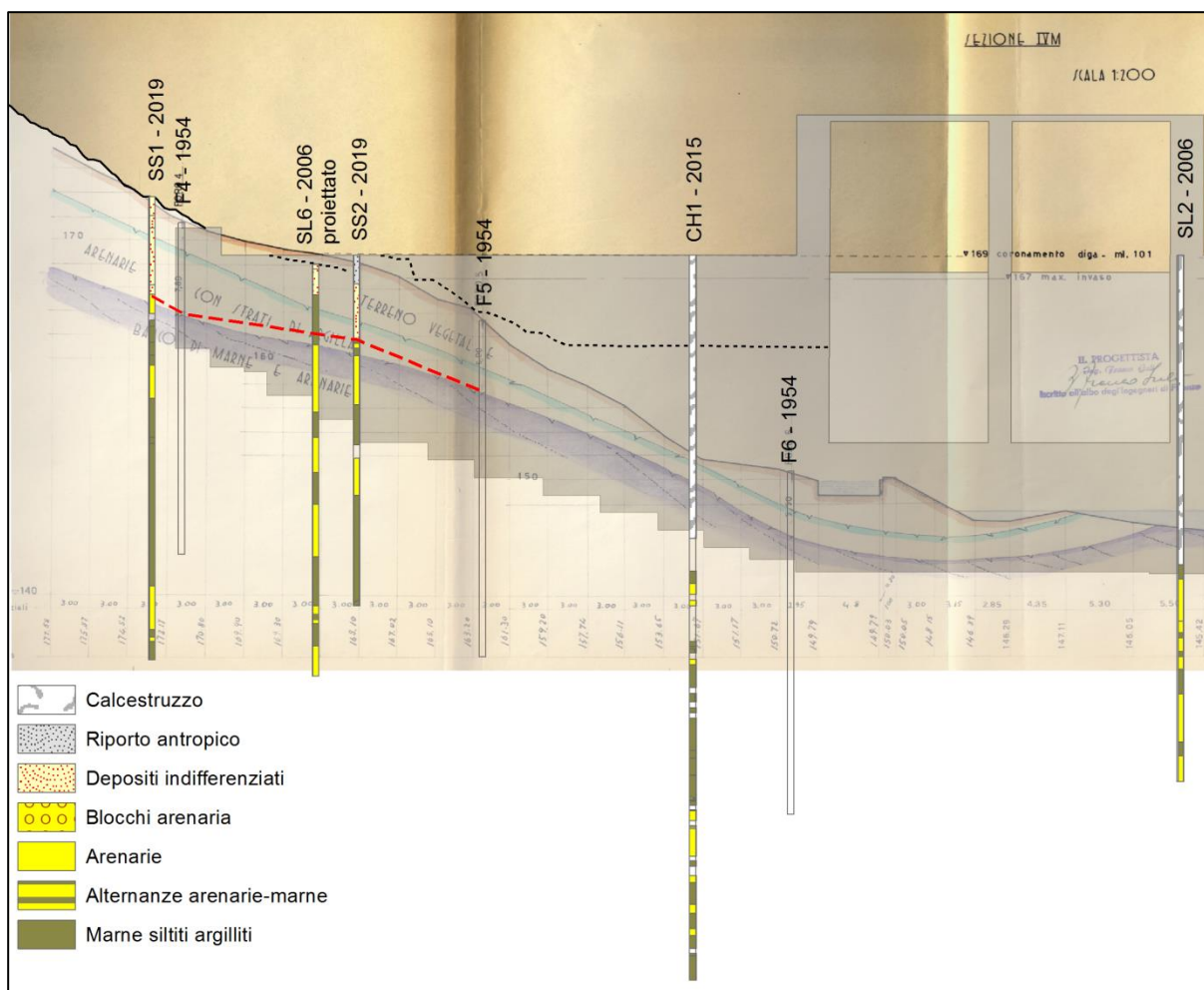


Figura 6.5 – Sezione lungo l’imposta sinistra con l’attuale topografia, il corpo diga e i sondaggi effettuati; dall’interpolazione della base dei depositi caotici superficiali (tratteggio rosso), si ottiene un andamento analogo all’interpretazione di Dal Piaz.

L’analisi delle fotografie storiche disponibili viene in aiuto nella comprensione della genesi della morfologia del versante mostrando per il fianco sinistro un significativo rimodellamento antropico dovuto alla cantierizzazione della diga, per cui risulta non agevole distinguere le aree che hanno preservato i caratteri originali da quelle totalmente rimaneggiate (Figura 6.6).

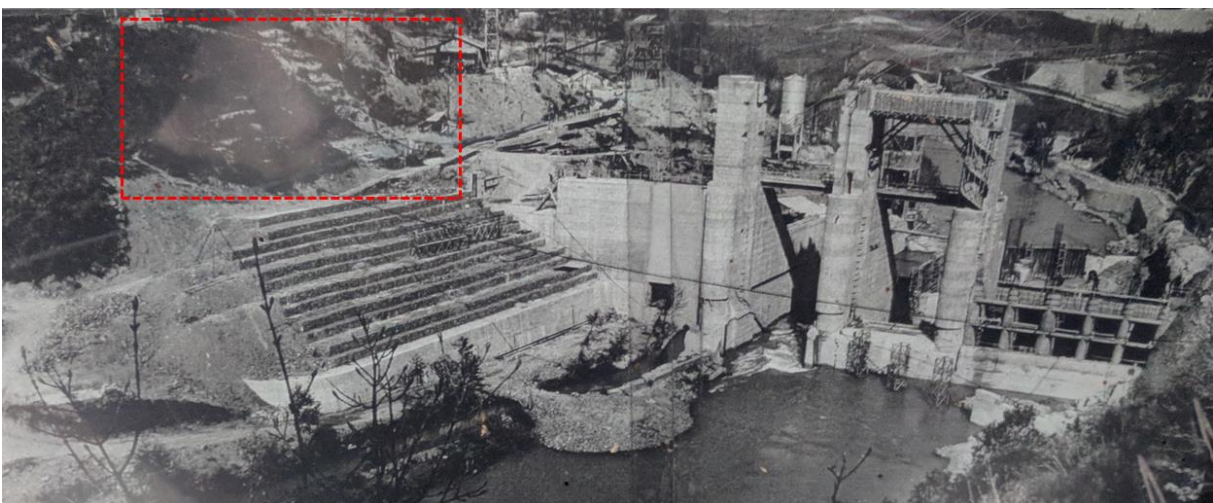


Figura 6.6 – Viste storiche dell’imposta di sinistra in confronto alla situazione attuale (in alto).

Le cartografie redatte più di recente presentano un quadro non univoco in cui compaiono alternativamente accumuli di frana e depositi di versante. Tutti i dati disponibili sono stati integrati e

messi a confronto con un rilievo di dettaglio eseguito nel Dicembre 2019 sui fianchi della diga di cui in Figura 6.8 se ne riporta uno stralcio. Il versante di imposta sinistra risulta caratterizzato da una morfologia regolare, a partire dalla sommità del terrazzo fluviale su cui sorge il villaggio SELT; non si riscontrano morfologie riconducibili alla presenza di un fenomeno gravitativo in s.s., non vi sono affioramenti del substrato, sono esclusivamente riconoscibili blocchi di arenaria di dimensioni decimetriche imballati in una coltre colluviale completamente vegetata (Figura 6.4).



Figura 6.7 – Versante di imposta sinistra, come si presentava a dicembre 2019.

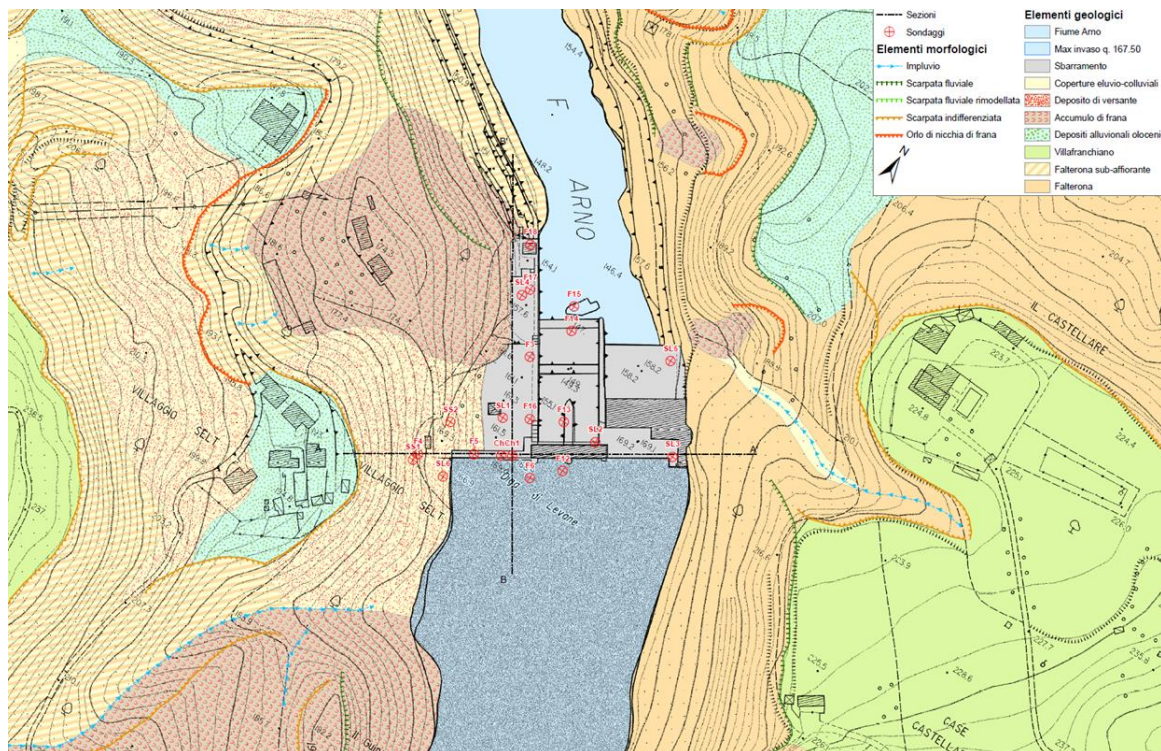


Figura 6.8 – Carta geologico-geomorfologica del sito diga.

In sintesi, dall'insieme degli elementi raccolti (documentazione storica, caratteristiche litostratigrafiche, assetto morfologico locale attuale, probabile rimodellamento antropico), si ipotizza l'esistenza di una coltre di materiale detritico caotico la cui presenza sia da mettere in relazione all'assetto strutturale locale caratterizzato da andamento a franapoggio degli strati con presenza di livelli pelitici e la cui morfologia sia imputabile al rimodellamento locale (soprattutto antropico).

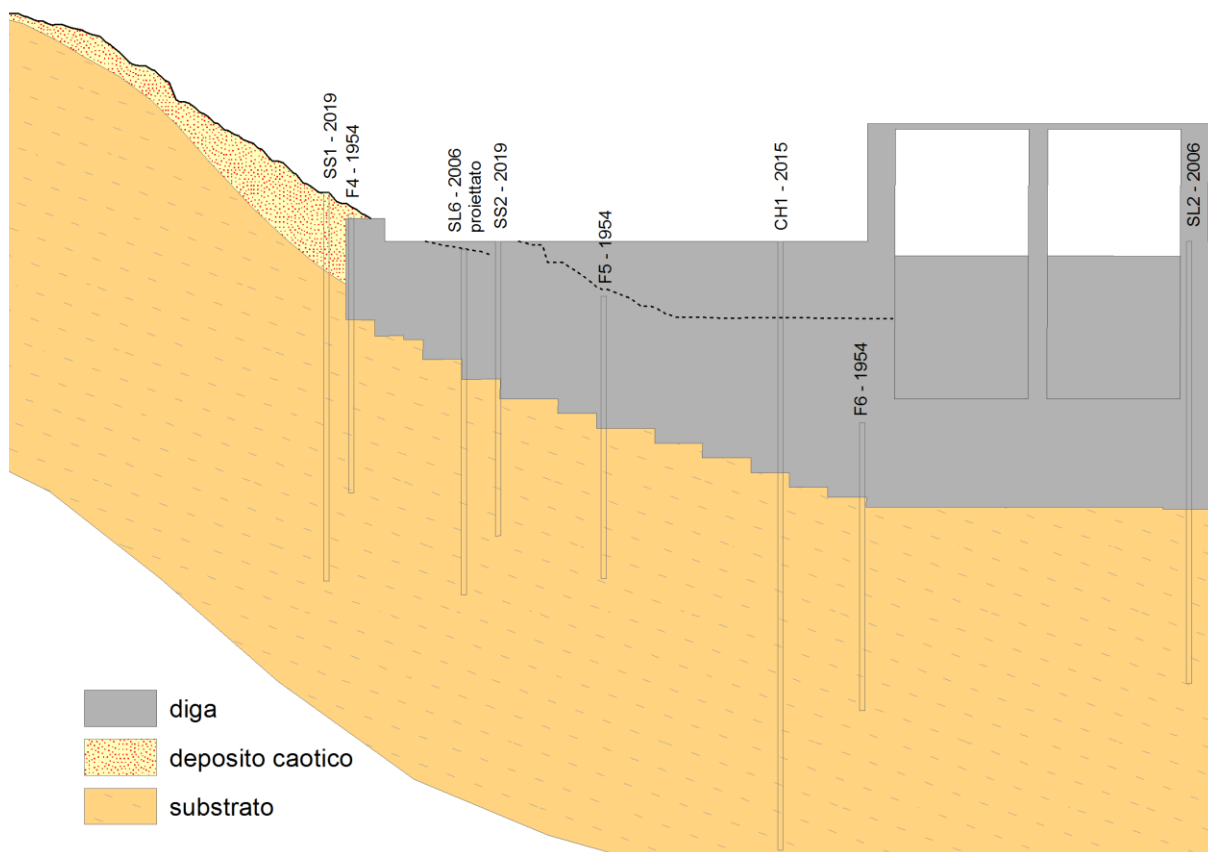


Figura 6.9 – Interpretazione dell'imposta sinistra in cui è rappresentata la presenza di un corpo detritico caotico addossato al versante.

Il versante sinistro, nella sua parte a valle dell'imposta, risulta invece caratterizzato da morfologie riconducibili più marcatamente gravitative: a monte della strada di accesso al villaggio SELT è ben visibile una scarpata di forma arcuata, concava e particolarmente acclive; a valle invece è riconoscibile una forma convessa a bassa acclività priva di affioramenti del substrato. Dal confronto con le stratigrafie dei sondaggi, in particolare quelli storici, e con le cartografie degli studi più recenti, emergono i seguenti elementi:

- lungo il muro d'ala, nella sua parte settentrionale, i sondaggi SELT intercettano marne e arenarie fratturate, "detrito scaglioso" che vengono attribuiti ad una "zona franosa" compresa tra i sondaggi F.3 ed F.18 (Figura 6.11);
- il versante, analogamente a quanto sopra, è stato oggetto di rimodellamento durante la fase di cantiere (Figura 6.12);
- nella carta geologica e geomorfologica di inquadramento (ENEL, 2015) viene riportato un accumulo di frana di tipo per scorrimento, inattivo, quiescente (Figura 6.13);
- il materiale estratto dal sondaggio SL4, tra i 5m e i 12m, sembrerebbe interpretabile come deposito caotico piuttosto che come substrato fratturato (Figura 6.15).

- nel merito della geometria dell'accumulo (profondità ed estensione laterale e longitudinale) sussiste una relativa incertezza legata al limite di informazioni disponibili ed al rimodellamento effettuato durante le lavorazioni. In base a ciò il limite di accumulo riportato nelle Figura 6.13 e Figura 6.14 è a tratteggio, quindi incerto. L'esistenza del substrato marnoso arenaceo riscontrato in SL1 a -11m dal piano campagna attuale, esclude però possibili interferenze con la struttura della diga.



Figura 6.10 – Il sondaggio SL1 ha incontrato il substrato roccioso a partire da 11m di profondità.

Nel complesso l'accumulo di frana risulta privo di tracce di attività recente, si presenta vegetato e rimodellato all'unghia dalla dinamica fluviale dell'Arno, fatto che indica per il fenomeno franoso in oggetto un'età non recente; sulla base di tali considerazioni è possibile ritenere attualmente inattivo (*sensu* Cruden & Varnes, 1996) il fenomeno franoso nel complesso in quanto l'ultima fase di attività è indubbiamente precedente all'ultimo ciclo stagionale; in considerazione al rimodellamento fluviale cui è stato oggetto il versante in seguito alla messa in posto dell'accumulo, questo può considerarsi stabilizzato *sensu* Flageollet, 1994 in quanto la sua ricorrenza è da riferirsi ad un'età antica/preistorica. Nel merito della geometria dell'accumulo (profondità ed estensione laterale e longitudinale) sussiste una relativa incertezza legata al limite di informazioni disponibili ed al rimodellamento effettuato durante le lavorazioni. In base a ciò il limite di accumulo riportato nella Figura 6.13 e nella Figura 6.14 è a tratteggio, quindi incerto. L'esistenza del substrato marnoso arenaceo riscontrato in SL1 a -11m dal piano campagna attuale, esclude però possibili interferenze con la struttura della diga.

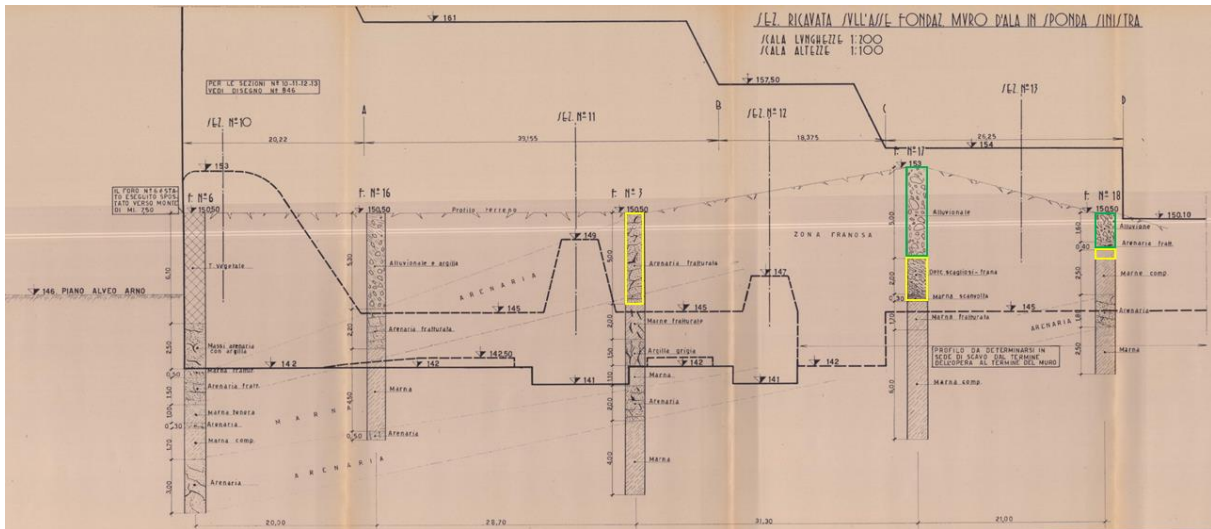


Figura 6.11 – Sezione lungo il muro d’ala in sponda sinistra ed interpretazione geologica dei dati di sottosuolo, SELT; in giallo il materiale estratto ascrivibile a deposito di frana, in verde un lembo di deposito alluvionale, verosimilmente appoggiato lateralmente verso valle.



Figura 6.12 – Vista della sponda sinistra durante la fase di cantiere (in basso) e dettaglio dell’attuale morfologia (in alto).

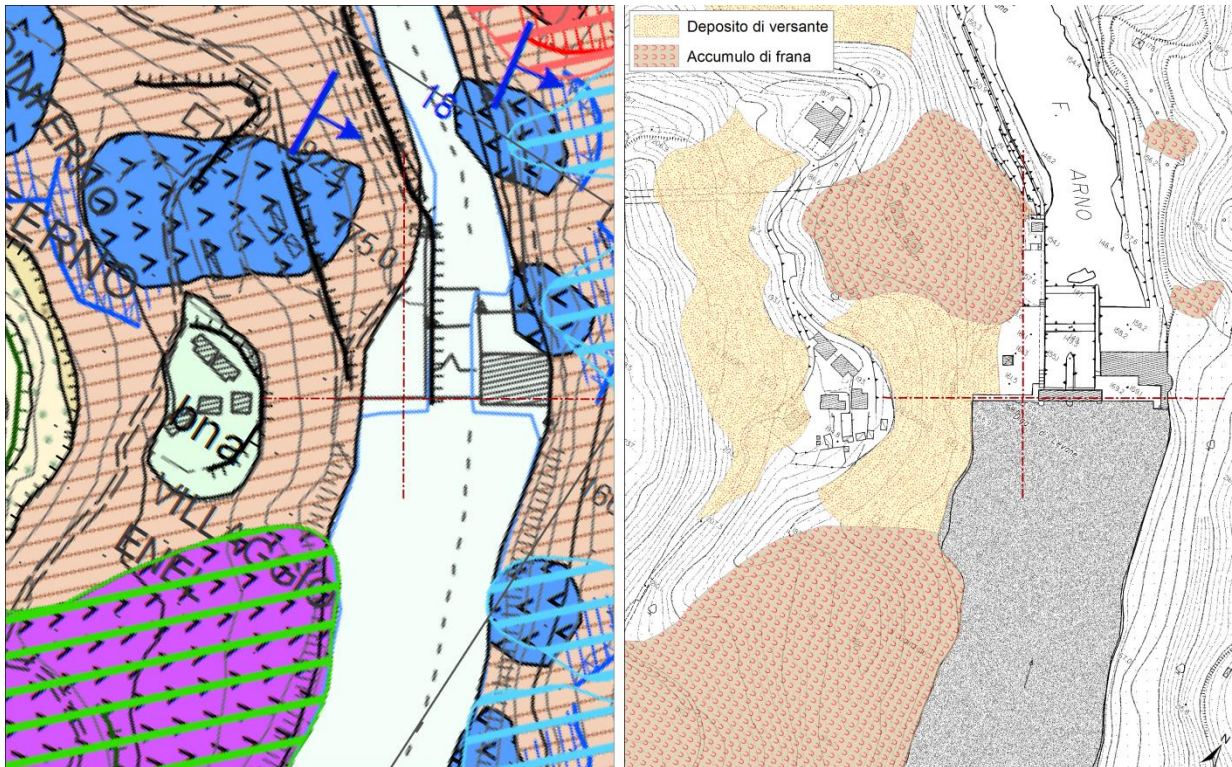


Figura 6.13 – Confronto tra cartografia ENEL 2015 (a sinistra) e rilievi originali (a destra) in cui sono evidenziati i soli elementi della dinamica gravitativa.

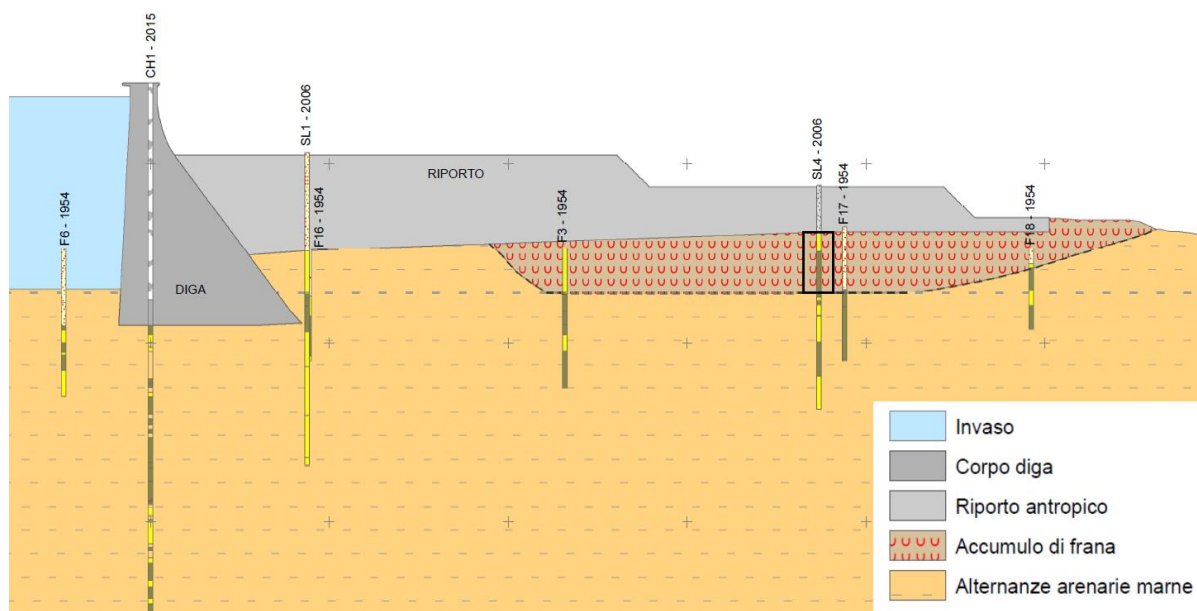


Figura 6.14 – Sezione B-B' (TAV.1) con interpretazione dell'andamento dell'accumulo di frana al di sotto del riparto del terrapieno a valle diga; per il dettaglio del sondaggio SL4, nel riquadro nero, si veda la figura seguente.

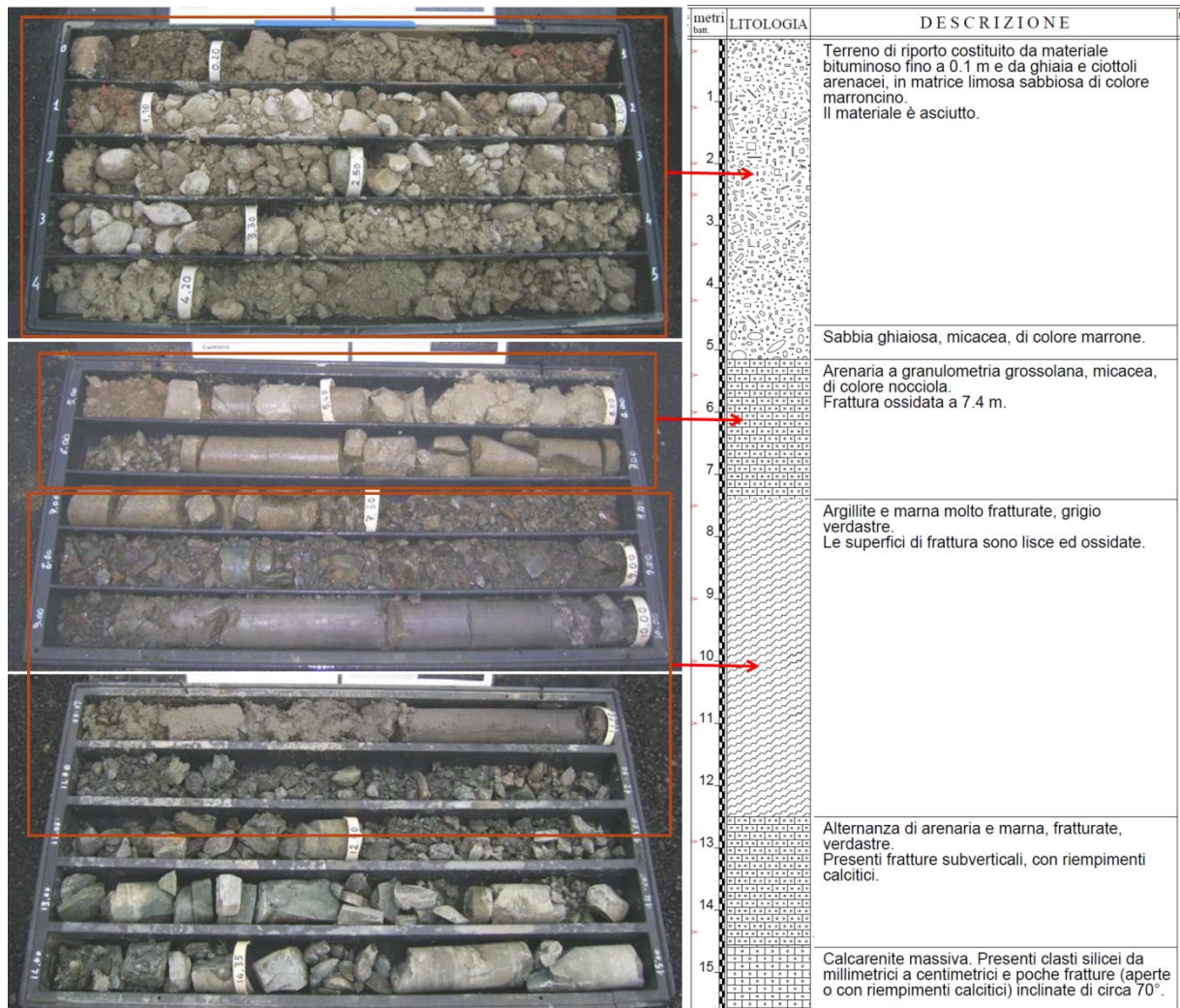


Figura 6.15 – Dettaglio sondaggio SL4: al di sotto del terreno di riporto (0-5m), sono indicate in stratigrafia prima arenarie (5-7m), poi argilliti-marne (7-12m) tutte molto fratturate. Dall’analisi delle carote si ritiene più compatibile un’interpretazione come materiale caotico ascrivibile ad un accumulo di frana, piuttosto che un substrato fratturato.

6.3 Geomorfologia di sito del versante destro

Il versante destro della Valle dell'Inferno, in corrispondenza dell'imposta della diga, si presenta acclive con versanti impostati prevalentemente nel substrato roccioso, a formare scarpate in roccia sub-verticali alte fino a 30m ed estese per circa 300m, da monte diga fino allo sbocco nella piana di Montevarchi (Figura 6.16). La continuità delle pareti rocciose è localmente interrotta da brevi incisioni impostate a partire dalle superfici terrazzate superiori e al cui interno sono presenti limitati accumuli di depositi detritico-colluviali. Piccoli accumuli di frane superficiali sono inoltre presenti sul fianco di tali incisioni.



Figura 6.16 – Viste panoramiche di valle (in alto) e di monte (in basso) del versante destro.

In particolare, l'incisione situata circa 20-30m a valle della centrale interrompe bruscamente la continuità della scarpata rocciosa presente a monte e a valle della diga; questa trae origine dalla superficie di terrazzo presso "Il Castellare" e si estende complessivamente per circa 60m di dislivello, allungandosi obliquamente in direzione circa N280°.

Attualmente si trova completamente vegetata ed è riconoscibile soltanto nella morfologia del versante; nel corso dei lavori di realizzazione della diga, il versante risultava invece completamente privo di vegetazione ed il substrato roccioso ben esposto, come visibile nella foto storica di Figura 6.17, in alto. Dall'immagine sembra inoltre di osservare un rigetto nella posizione delle bancate tra i due fianchi dell'incisione, ora non più visibile (Figura 6.17, in centro).

La presenza di tale faglia non trova altri riscontri se non di carattere morfologico, nella presenza nell'impluvio, né vi sono segni di attività; inoltre il sondaggio SL5, perforato pochi metri a Sud dell'incisione, presenta rocce di buona qualità, senza evidenze di una fascia di disturbo.

In ultimo, nella topografia non si riconoscono prosecuzioni morfologiche della struttura sia a monte del terrazzo che in sponda sinistra dell'Arno (Figura 6.17, in basso).

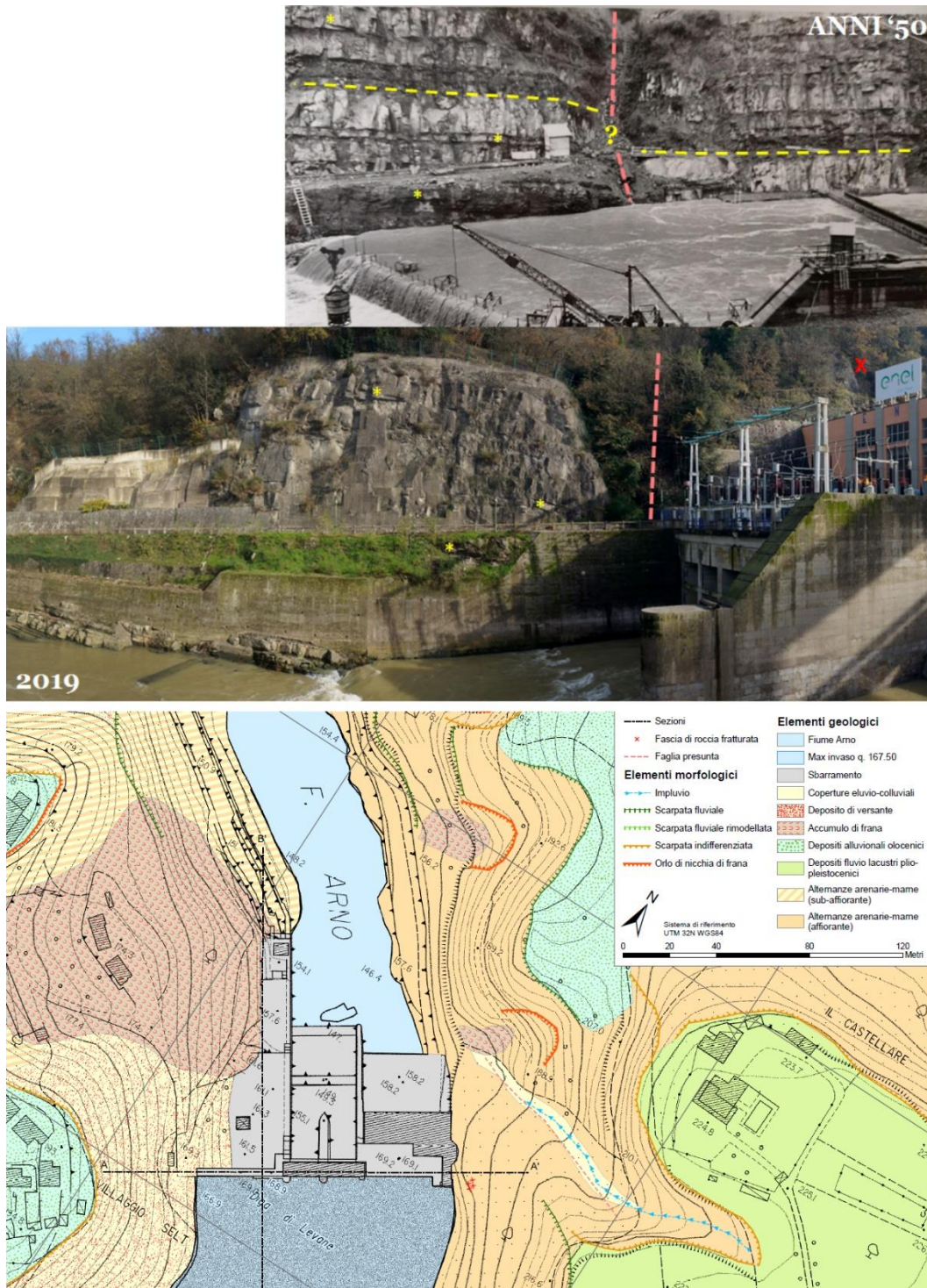


Figura 6.17 – Versante destro, foto storica scattata durante la costruzione della diga (in alto) nella quale è ben visibile l'incisione che interrompe la scarpata a valle della centrale, in confronto con la situazione attuale (in centro). In basso, stralcio della carta geologica-geomorfologica. In tutte le immagini, in tratteggio rosa è indicata la posizione della faglia lungo cui si è imposta l'incisione.

In corrispondenza della sezione di imposta, circa 10 metri a monte del coronamento, sopra il locale batterie, è presente una fascia di qualche metro di larghezza (Figura 6.17, retinato rosso) in cui la bancata rocciosa è assente lasciando presumere la presenza di roccia fratturata (Figura 6.18). Tale fascia ha un'orientazione stimata di circa N265/85, compatibile con la famiglia di discontinuità K1 misurate in loco. L'intesa copertura vegetale non consente di valutare la prosecuzione di questa fascia oltre la piccola area in cui affiora.



Figura 6.18 – Fascia fratturata con assenza della bancata rocciosa.

6.4 Geomorfologia dell'alveo di valle

L'alveo a valle dello sbarramento si presenta di morfologia piuttosto regolare, pressoché rettilineo fino allo sbocco nella piana di Montevarchi, per una lunghezza di 250m ed una larghezza di 40m.

Come descritto nei paragrafi precedenti, i fianchi sono asimmetrici: poco acclive e caratterizzato da estese coperture detritiche il sinistro, acclive e roccioso il destro. Al piede di questo gli affioramenti rocciosi sono seguibili con continuità per centinaia di metri a bordo alveo (Figura 6.19).

In occasione di livelli idrometrici ridotti, è stato possibile riconoscere la presenza di affioramenti rocciosi a valle dello sbarramento anche in asse alveo ed al piede del versante sinistro, come indicato in Figura 6.20.

Inoltre è possibile trarre informazioni sulla natura del sottosuolo dai sondaggi eseguiti negli anni '50 presumibilmente lungo la sezione di imposta e lungo la sezione in asse alveo (per l'ubicazione si veda la Figura 6.8 oppure la Tav. 1 allegata, per i sondaggi Figura 6.21 e Figura 6.22, pur rimanendo incertezze circa la georeferenziazione di tali informazioni, eseguita a partire dai pochi documenti cartacei disponibili, e circa la morfologia dell'alveo precedente ai lavori).

Da tali dati si evince, per le due sezioni interessate, la presenza di substrato roccioso sub-affiorante in alveo, parzialmente sepolto sul lato sinistro dal piede dei depositi di versante. I sondaggi 14 e 15 hanno attraversato nel primo metro delle gabbionate di cui ora non si ha più traccia.



Figura 6.19 – Vista dell'alveo di valle dallo sbarramento.



Figura 6.20 – Presenza di substrato roccioso affiorante (freccie rosse) immediatamente a valle dello sbarramento.

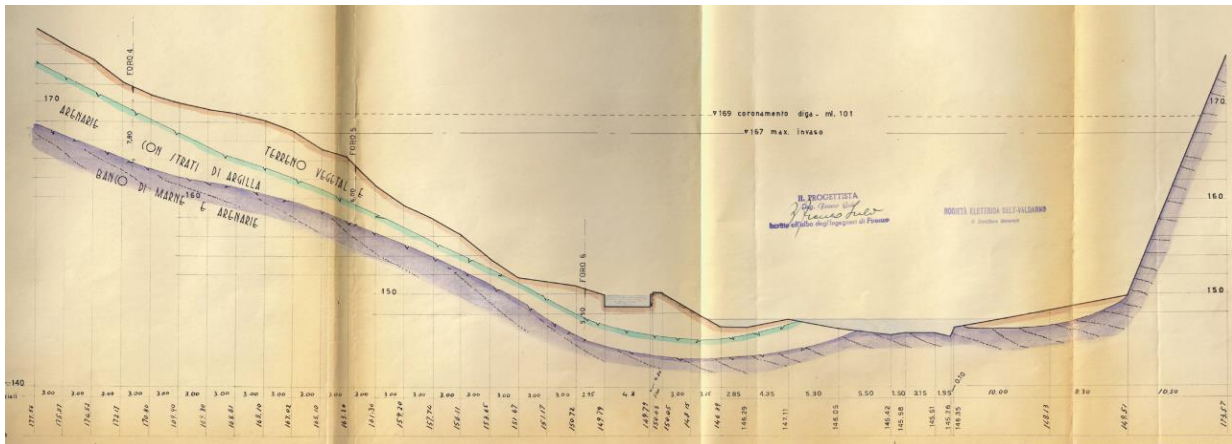


Figura 6.21 – Sezione trasversale al Fiume Arno lungo l'imposta, eseguita in fase di progettazione dell'opera.

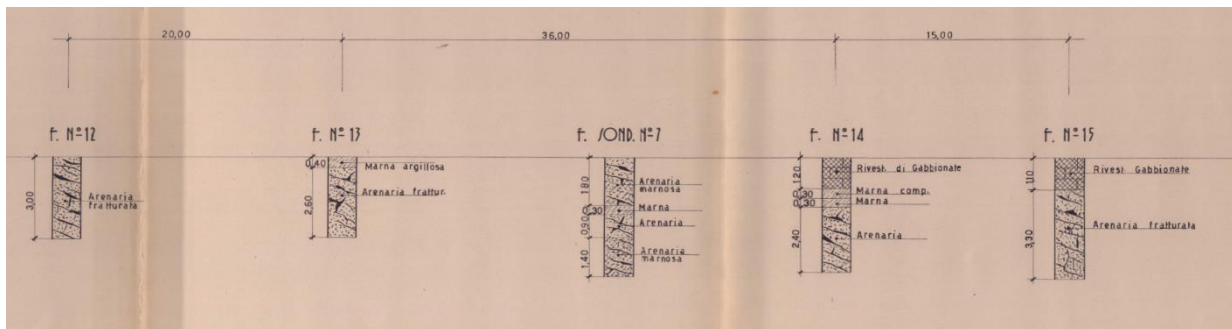


Figura 6.22 – Stratigrafie sondaggi F12-F15 eseguiti nel 1956.

EGP ha chiesto a CESI di valutare, sulla base delle informazioni esistenti, l'eventuale presenza di roccia in una precisa posizione dell'alveo del fiume Arno, cioè appena a valle dello sbarramento, in una porzione compresa tra la centralina Battagli ed il terminale delle vasche di dissipazione a valle dello scarico di fondo, laddove anche in recenti condizioni di magra l'osservazione diretta è impedita dalla presenza d'acqua.

Si è pertanto fatto ricorso, come descritto precedentemente, alle informazioni disponibili che sono consistite nella consultazione di:

- documentazione fotografica storica durante la realizzazione dell'opera;
- tavole storiche di progetto;
- sondaggi eseguiti nelle immediate vicinanze;
- distribuzione degli affioramenti nell'intorno dell'area in analisi;
- recente rilievo batimetrico eseguito da EGP nel 2019;
- recente rilievo geologico.

Si rammenta che le considerazioni che seguono sono necessariamente di carattere qualitativo, con particolare riferimento all'osservazione delle foto, in quanto, in assenza di possibilità di osservazione diretta, è possibile effettuare correlazioni con la condizione attuale solo attraverso riferimenti relativi, se non altrimenti ad indizi.

Per quanto concerne la documentazione fotografica storica si è fatto riferimento alle foto di Figura 6.23, Figura 6.24 e Figura 6.25

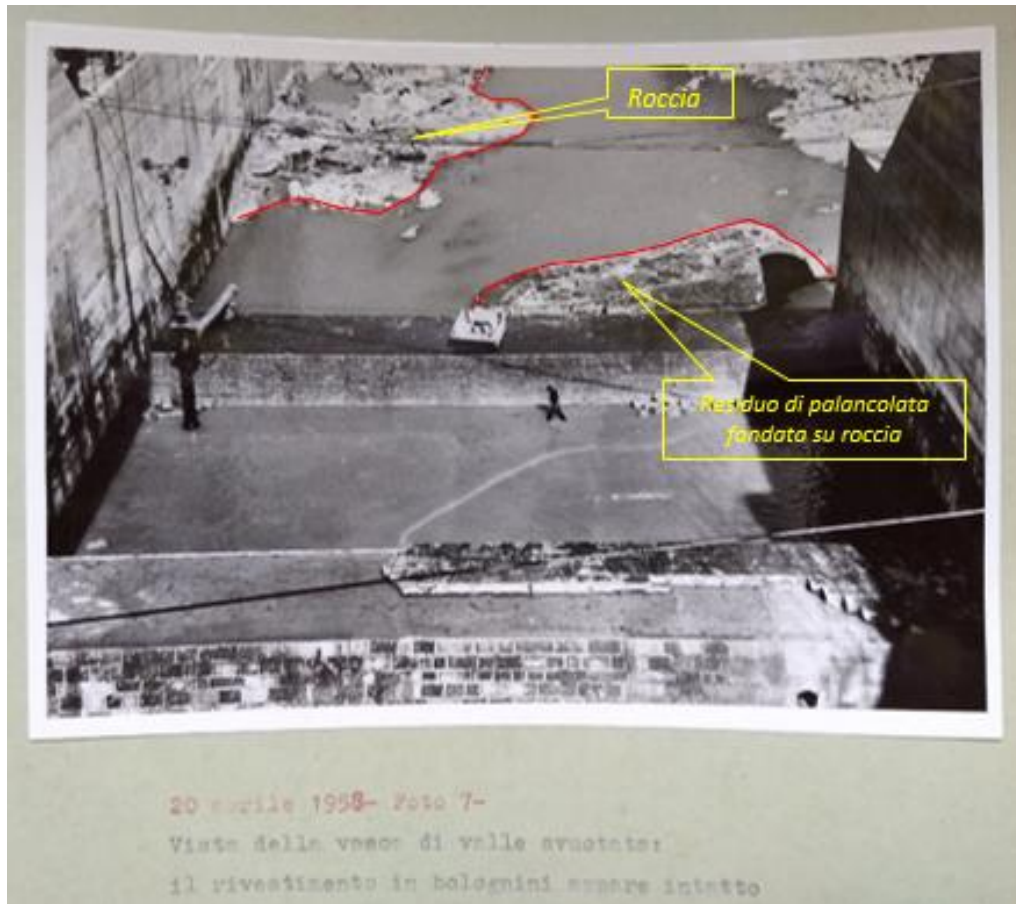


Figura 6.23 – Foto storica dell’anno 1958.

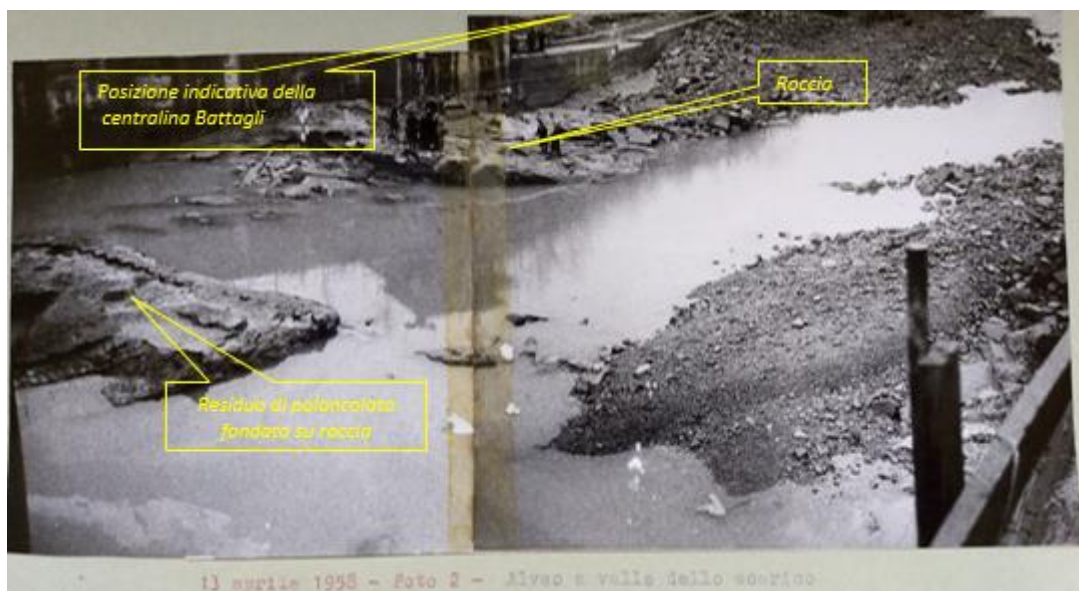


Figura 6.24 – Foto storica del 13 aprile 1958.

Nella prima figura (Figura 6.23) si può osservare (in alto a sinistra nella foto) un affioramento di roccia, attualmente non esistente, di cui una porzione residuale è affiorante a valle della centralina Battagli (cfr. Figura 6.20). Altro elemento riconoscibile è il residuo della palancoolata fondata in roccia, attualmente

visibile sempre nella Figura 6.20. Nella foto di Figura 6.25 si può vedere lo stesso affioramento da un'altra angolazione. Dalla quota della palancolata residuale di circa 145m, si deduce grossolanamente una pari quota o superiore dell'affioramento più a valle, in accordo alle informazioni dei sondaggi storici (1954) F14, F15, F17 ed F18 (cfr. Figura 6.26) che riconoscono le seguenti quote del tetto di substrato marnoso-arenaceo:

F14	145m
F15	145m
F17	146m
F18	148,50m

Anche il sondaggio SL4 (campagna 2006) ubicato nelle immediate vicinanze di F17, alla luce della rivisitazione dell'interpretazione stratigrafica (cfr. §6.2), riferisce la quota del substrato a 145,50m.

Per quanto concerne la sponda destra, le foto storiche non mostrano informazioni di valore aggiunto rispetto a quanto visibile tutt'oggi. In Figura 6.25 si scorge un limitato affioramento di roccia di substrato ed in Figura 6.27 gli stessi affioramenti di sponda destra, da una vista fotografica da valle più ampia.

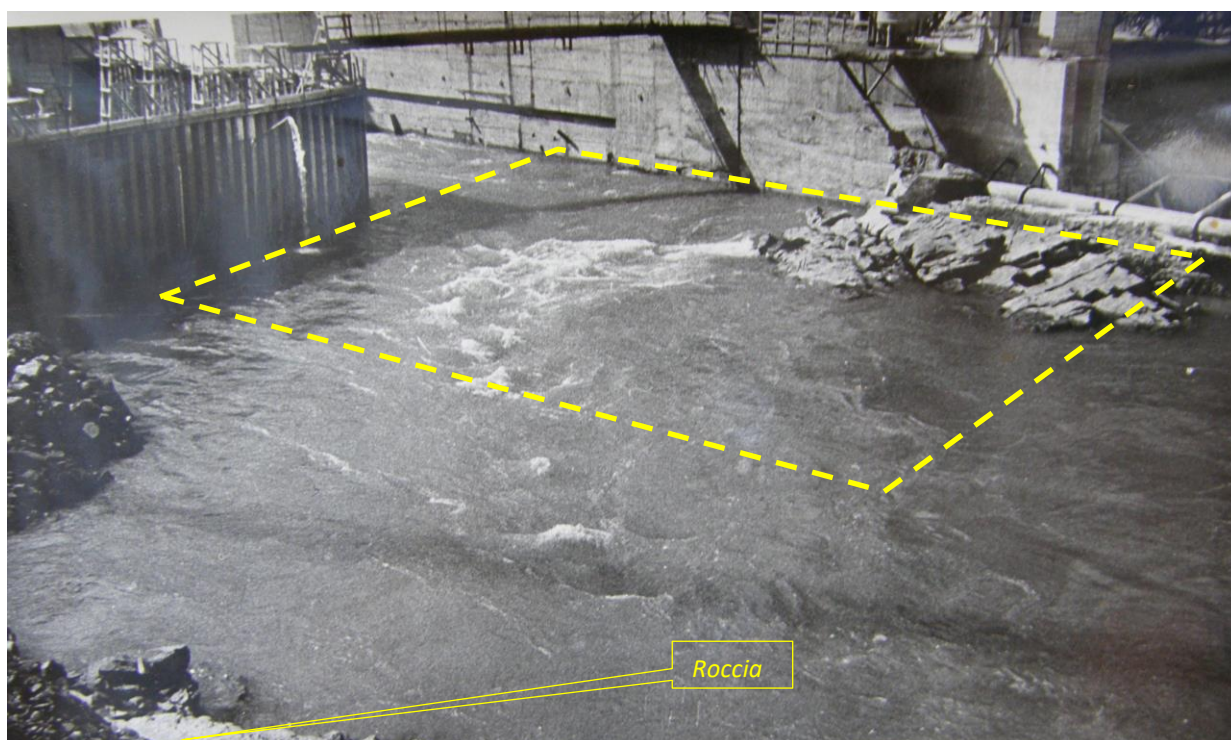


Figura 6.25 – Foto storica di una fase lavorativa antecedente alle precedenti, data la presenza della palancolata (in giallo l'area di interesse).

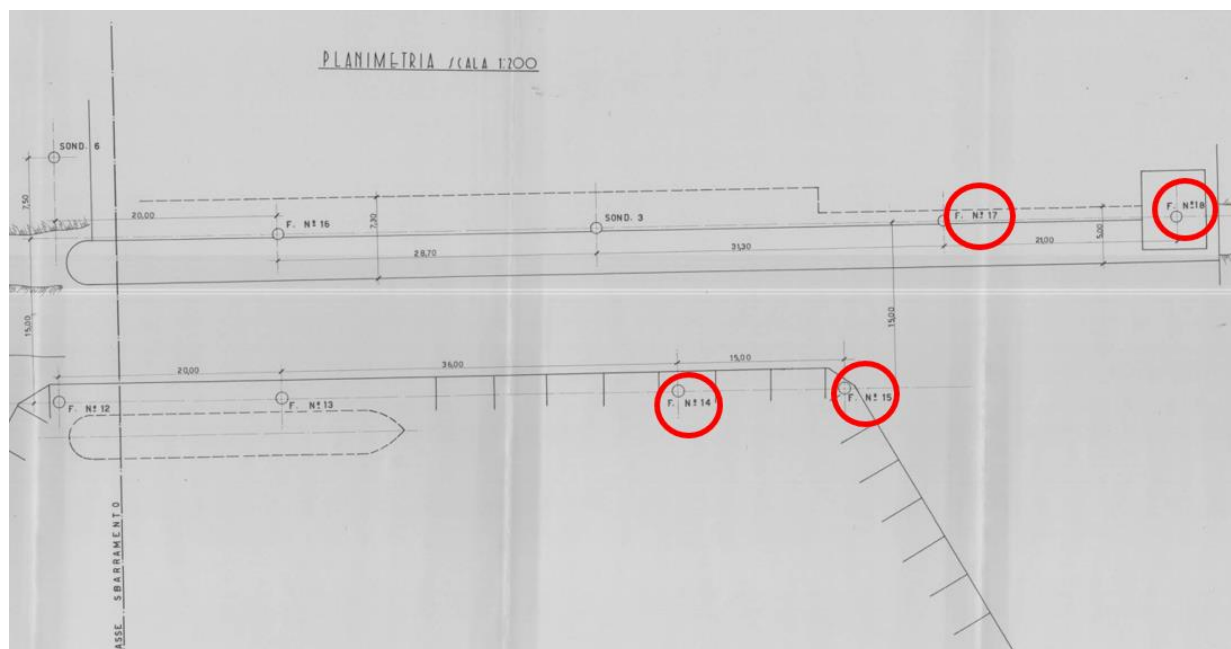


Figura 6.26 – Posizione dei sondaggi di riferimento F14-F15-F17-F18, da una planimetria del progetto originale.



Figura 6.27 – Vista da valle dello sbarramento. Si notano la palancoata, affioramenti di roccia in destra idrografica ed i riporti di materiali in sinistra idrografica addossati al muro d'ala.

In sintesi, dall'esame della documentazione fotografica esistente e dalle indagini succedutesi nel tempo, le evidenze sono in accordo alle recenti osservazioni geologiche del sito che riconoscono affioramenti o subaffioramenti del substrato arenaceo-marnoso lungo le due sponde dell'Arno. Manca invece evidenza della costituzione del talweg dell'alveo stesso, mai osservabile per la costante presenza d'acqua anche nei periodi di magra. Non è quindi stimabile la presenza e lo spessore dei sedimenti di fondo.

Tra la documentazione di progetto del 1954 sono state rintracciate diverse sezioni trasversali del fiume Arno antecedenti la costruzione della diga, di cui non è disponibile la planimetria e restano, quindi, di

incerta ubicazione. Si tratta delle *sezioni trasversali da IM a VM*, di cui la sezione di Figura 6.21 rappresenta la sezione *IVM* vestita con la geologia dell'originale progetto. Dall'osservazione di queste cinque sezioni, si evince che la quota di fondo alveo non risultava mai inferiore a 145m. In particolare, si osserva che la sezione geologica di Figura 6.21 mostra l'alveo dell'Arno con substrato parzialmente affiorante.

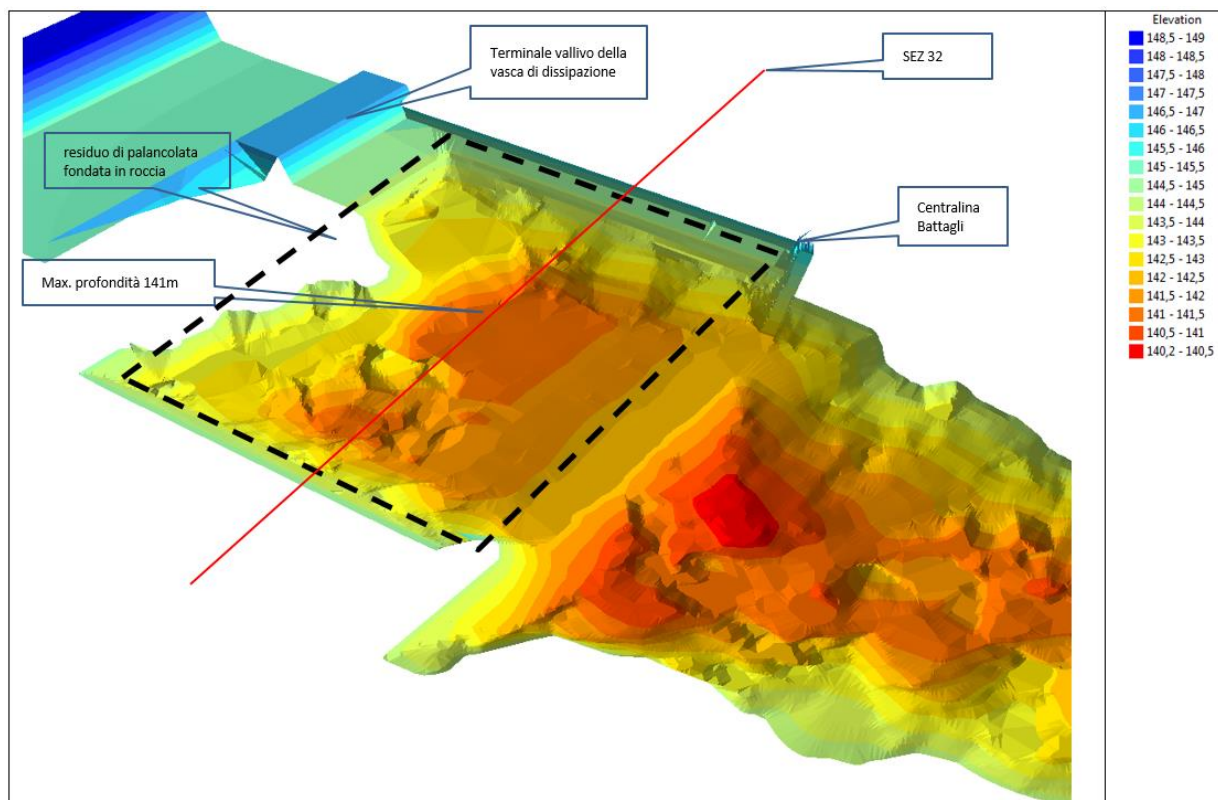


Figura 6.28 – DTM della zona di interesse (rettangolo a tratteggio nero) estratto dal rilievo batimetrico eseguito da EGP nel 2019.

Il DTM estratto dal rilievo batimetrico eseguito nel 2019 da EGP è rappresentato, per la zona di interesse, nella Figura 6.28, mentre nella Figura 6.29 è riportato il profilo del fondo alveo in corrispondenza della sezione trasversale n.32.

Rispetto alla ricostruzione della condizione originaria, con un fondo alveo alla quota di 145m, il DTM mostra un fondo alveo marcatamente più approfondito che raggiunge i 141m. Risultano mancare gli affioramenti di roccia al piede della centralina Battagli visibili nella Figura 6.23 e Figura 6.24. In assenza di una batimetria di riferimento antecedente, risulta impossibile valutare la ragione di queste modifiche morfologiche in parte dovute, probabilmente, alle lavorazioni residue ed in parte all'azione erosiva dell'acqua, il cui eventuale tasso di erosione non è quindi misurabile. A questo proposito, si ritiene importante sottolineare che la particolare giacitura della stratificazione e la variabilità delle caratteristiche litotecniche (direzione di strato parallela alla direzione di corrente, e resistenza al taglio del materiale molto variabile) possono determinare condizioni di resistenza all'erosione altrettanto variabili.

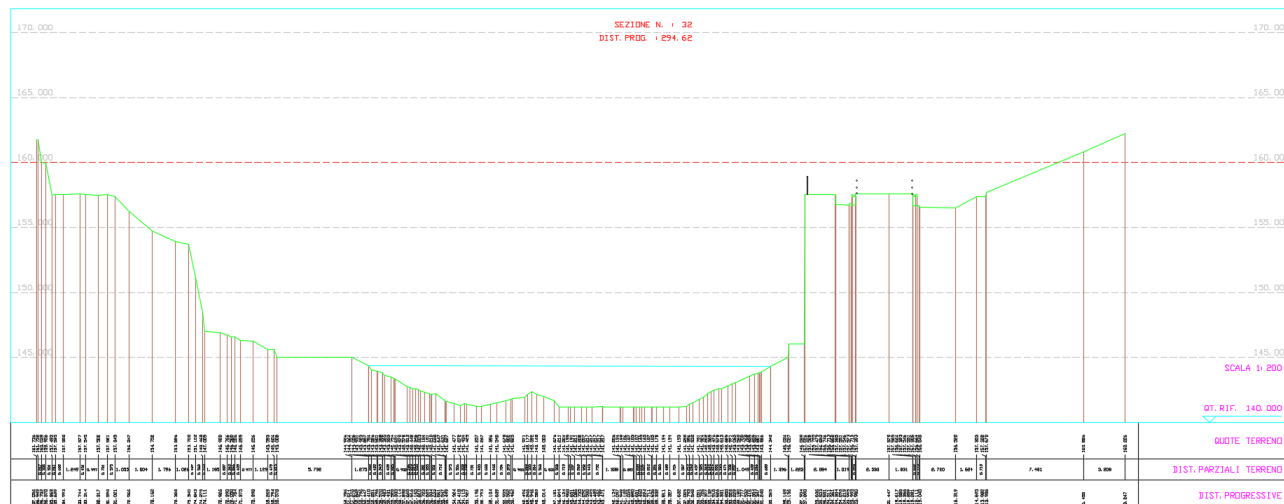


Figura 6.29 – Sezione n.32 trasversale, ricavata dal rilievo batimetrico.

In conclusione, occorre sottolineare che nel merito della verifica della natura litologica del fondo alveo del fiume Arno nel limitato tratto in esame, non si sono verificate le condizioni ottimali per un'osservazione diretta dell'area di interesse. La conformazione morfologica evidenziata dal rilievo batimetrico rileva la presenza di un piccolo bacino per cui la possibilità di poter osservare, senza interventi antropici, il fondo alveo sarà preclusa anche in condizioni di magra.

Il quadro conoscitivo disponibile ipotizza una condizione originaria del fiume Arno con alveo impostato, almeno a tratti, direttamente sul substrato roccioso e con limitati depositi di fondo.

Dal rilievo batimetrico del 2019 si evince un approfondimento dell'alveo limitatamente alla porzione centrale (Figura 6.29) mentre non vi sono evidenze di erosione al piede del muro d'ala e della vasca di dissipazione.

Anche nella condizione attuale, si ipotizza una minima o assente copertura detritica di fondo.

Ovviamente, dato il contesto, in fase di inizio lavori la consistenza delle ipotesi alla base di quanto ricostruito dovrà essere accertata.

7 ASSETTO IDROGEOLOGICO

Le caratteristiche idrogeologiche dell'ammasso roccioso presente nella zona di imposta della diga sono state evidenziate attraverso i risultati di prove idrauliche effettuate in sondaggi a carotaggio continuo eseguiti dal corpo diga o nella sezione di imposta, che hanno raggiunto ed hanno penetrato la roccia di fondazione. Con i carotaggi è stato possibile evidenziare anche le caratteristiche litologiche dei tratti dell'ammasso roccioso interessato dalle prove.

L'ammasso roccioso presente in fondazione è costituito da un'alternanza di strati arenacei e siltitico marnosi, interessati da una serie di fratture che si intersecano fra di loro e con le superfici di stratificazione. Per questo motivo, la permeabilità dell'ammasso roccioso è del tipo "secondario", cioè prevalentemente per fratturazione, ed il suo grado è funzione della frequenza delle discontinuità che lo interessano.

Per meglio caratterizzare la permeabilità dell'ammasso roccioso sono stati utilizzati i dati bibliografici delle indagini geognostiche precedenti e i dati derivati dalle prove condotte nei nuovi fori SS1 e SS2, riassunti nella Tabella 7.1.

Sondaggio	Un. Lugeon	k (m/s)	Classe	Prof. (m) da p.c.
SS1	95.00	8.70x10 ⁻⁶	Molto alta	14.5-16.2
SS1	28.00	2.90x10 ⁻⁶	Media	17-19.7
SS1	6.00	6.20x10 ⁻⁷	Moderata	19-21.7
SS1	4.00	4.00x10 ⁻⁷	Bassa	24.6-27
SS2	98.00	9.50x10 ⁻⁶	Molto alta	9.6-11.7
SS2	19.00	2.20x10 ⁻⁶	Media	17.5-21.4
CH2	6.00	10 ⁻⁷	Moderata	22-28.8
CH2	3.00	10 ⁻⁷ -10 ⁻⁸	Bassa	35-41
CH2	1.00	10 ⁻⁷ -10 ⁻⁸	Bassa	45-50
CH2	1.00	10 ⁻⁷ -10 ⁻⁸	Bassa	56.5-61.5
SL2	4.70	10 ⁻⁶	Bassa	27-31
SL2	7.50	10 ⁻⁶	Moderata	36.4-38.5
SL2	6.30	10 ⁻⁶	Moderata	42-45
SL3	2.90	10 ⁻⁷	Bassa	29-33
SL6	6.70	10 ⁻⁷	Moderata	20-23.4

Tabella 7.1 - Valori di permeabilità dell'ammasso roccioso misurati nei vari sondaggi.

La Figura 7.1 rappresenta le classi di permeabilità ricavate nei vari sondaggi dalle prove Lugeon, in base alla classificazione della Tabella 7.2.

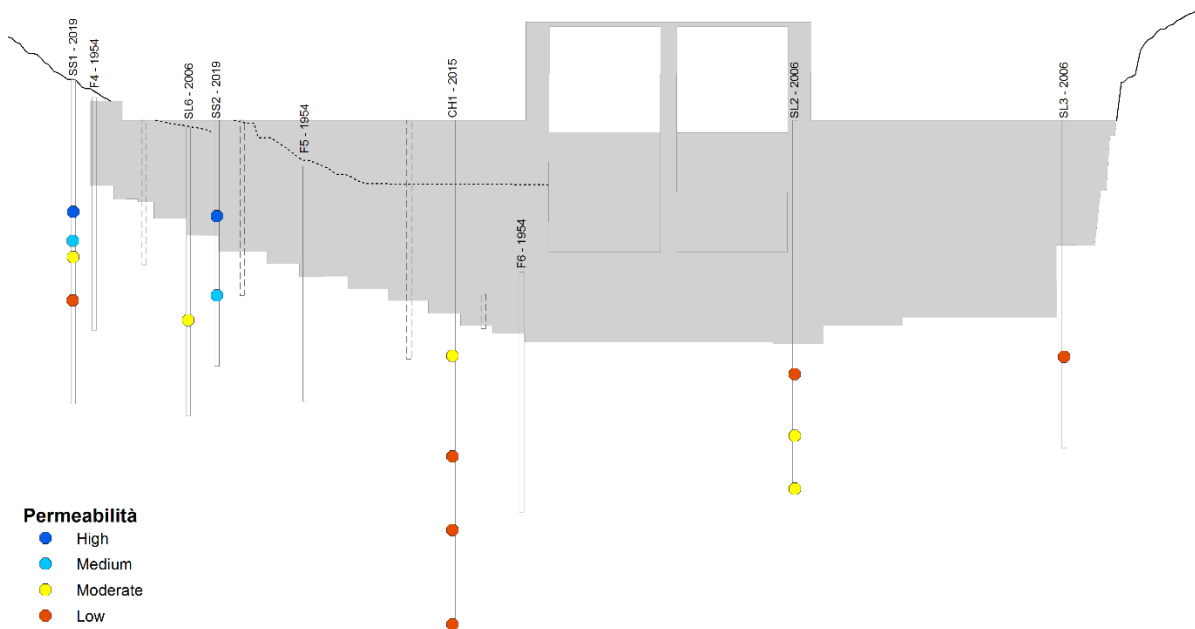


Figura 7.1 - Permeabilità dell'ammasso roccioso lungo la sezione d'imposta.

Lugeon Range	Classification	Hydraulic Conductivity Range (cm/sec)	Condition of Rock Mass Discontinuities	Reporting Precision (Lugeons)
<1	Very Low	$< 1 \times 10^{-5}$	Very tight	<1
1-5	Low	$1 \times 10^{-5} - 6 \times 10^{-5}$	Tight	± 0
5-15	Moderate	$6 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-4}$	Few partly open	± 1
15-50	Medium	$2 \times 10^{-4} - 6 \times 10^{-4}$	Some open	± 5
50-100	High	$6 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-3}$	Many open	± 10
>100	Very High	$> 1 \times 10^{-3}$	Open closely spaced or voids	>100

Tabella 7.2 - Classificazione della permeabilità rappresentata in Figura 7.1.

Come si può notare dalla Tabella 7.1, la porzione più superficiale dell'ammasso roccioso in sponda sinistra presenta valori di permeabilità alti, probabilmente correlati alla presenza di numerose fratture aperte, e/o con riempimento non cementato, e/o comunicanti.

Nella porzione più profonda dell'ammasso, oltre i 20 m da p.c., le permeabilità ottenute nelle nuove indagini sono simili a quelle delle indagini precedenti e sono dell'ordine di 10^{-6} - 10^{-7} m/s, ovvero tipiche di un ammasso scarsamente permeabile.

Per quanto riguarda i sondaggi in sponda sinistra, SS1 e SS2, la diminuzione della permeabilità con la profondità non sembra correlata al grado di fratturazione, che si mantiene elevato anche in profondità, come visibile in Figura 7.2. Ciò potrebbe essere correlato alla presenza di fratture chiuse, e/o con riempimenti cementati, e/o non comunicanti.

Analogamente per i sondaggi in destra idrografica, SL2 e SL3, la permeabilità ha valori da moderati a bassi non correlabili direttamente al grado di fratturazione risultato inferiore rispetto alla sponda sinistra.

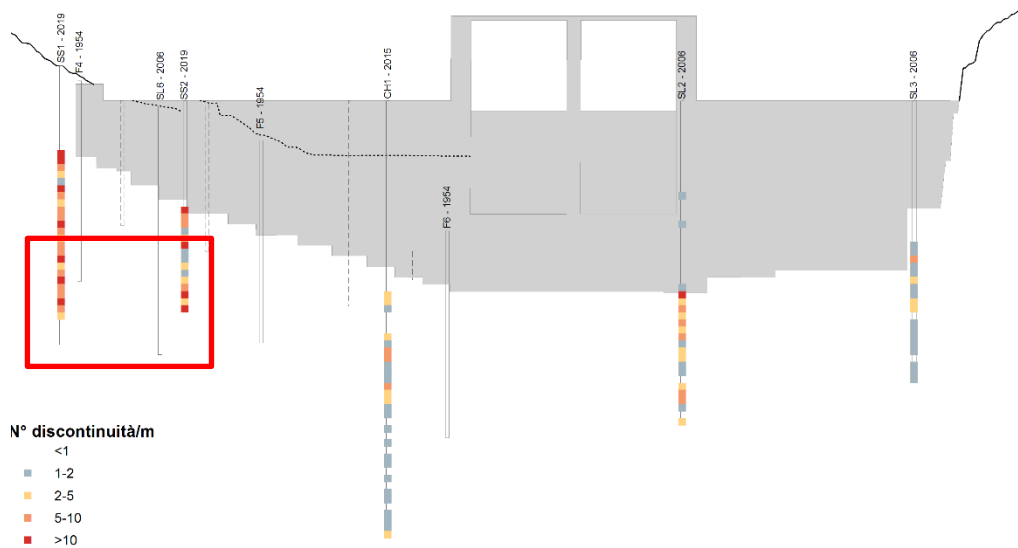


Figura 7.2 - Grado di fratturazione dell'ammasso roccioso (nel riquadro rosso la porzione più profonda dei sondaggi in sinistra idrografica).

In sinistra idrografica, nel foro del sondaggio SS1, dove sono presenti circa 8 metri di deposito superficiale, si è effettuata una prova di permeabilità Lefranc a -5.5m da p.c., che ha evidenziato un valore di permeabilità $K=6.8 \times 10^{-7}$ m/s, tipico dei limi-limi sabbiosi-argilla limosa, indice di una permeabilità da bassa a molto bassa. Quest'area sarà interessata dal soprizzo e quindi tale valore di permeabilità si può considerare significativo per i depositi sciolti presenti in quella zona del progetto. Per quanto riguarda la profondità della falda acquifera, nel sondaggio SS2 è stato installato un tubo piezometrico a tubo aperto nel quale il livello dell'acqua è stato misurato a -8.90 m da p.c. in data 05/12/2019, ovvero qualche giorno dopo il completamento del sondaggio.

8 SINTESI DELLE INDAGINI ESEGUITE

Nel seguente paragrafo si riassumono le indagini geognostiche effettuate a partire dagli anni '50 sino alla data odierna, in particolare:

- 1954, Sondaggi SELT
- 2006, Indagini geognostiche Provincia di Arezzo-Servizio Acque e Demanio Idrico
- 2009-2010, Esecuzione di canne drenanti, Enel
- 2014-2015, Indagini geognostiche Enel-CGT
- 2019, Indagini geognostiche Enel, CESI

A partire dalla progettazione della diga, all'inizio degli anni '50 del novecento, sono state collezionate numerose informazioni sulla natura del sottosuolo dell'area di imposta. In particolare, per determinare le caratteristiche delle formazioni rocciose della zona di imbasamento della diga fu eseguita una campagna di indagini geognostiche, integrata da 18 sondaggi per una lunghezza di perforazione superiore a 400 m ad una profondità massima di 64 m (sondaggi da F1 a F18) indicati in Tabella 8.4.

Nel 2006 si è condotta una campagna di indagini per conto della Provincia di Arezzo Servizio Acque e Demanio Idrico nelle aree delle dighe Enel di Levane e La Penna. Nei fori dei sondaggi si sono eseguite delle prove di permeabilità di tipo Lugeon, prelievo di campioni, installazione di piezometri a tubo aperto e riprese televisive dei fori di sondaggio. I carotaggi che hanno interessato la diga di Levane sono riassunti in Tabella 8.1.

Sondaggio	Profondità (m da p.c.)	Campioni Rimaneggiati (N°)	Piezometri Norton (m da p.c.)	Prove Lugeon (N°)
SL1	35.00	2	35.00	7
SL2	45.00	7		3
SL3	40.00	4		2
SL4	25.00	3	25.00	3
SL5	25.00	0	25.00	1
SL6	30.00	1	30.00	1

Tabella 8.1 - Riassunto sondaggi eseguiti nel 2006.

Tra il settembre 2009 ed il marzo 2010 si sono realizzate 39 canne drenanti nel corpo diga ed in fondazione come richiesto dall'Ufficio Tecnico per le Dighe di Firenze, allora Registro Italiano Dighe di Firenze, con prescrizione prot. n° 1081 del 6 agosto 2007. La Tabella 8.2 riassume le caratteristiche delle canne drenanti. Nei fori dei sondaggi si sono eseguiti dei prelievi di campioni sia di calcestruzzo che di roccia di fondazione.

Canne drenanti perforate dal cunicolo					
Canna drenante n.	Quota testa foro m s.l.m.	Quota contatto calcestruzzo-roccia m s.l.m.	Lunghezza foro di progetto m	Quota fondo foro di progetto m s.l.m.	Lunghezza foro misurata il 03/05/11 m
1	144,69	141,78	10,00	134,69	4,57
2	144,71	142,00	10,00	134,71	9,30
3	144,73	142,00	10,00	134,73	10,65
4	144,75	142,00	10,00	134,75	9,80
5	144,77	142,00	10,00	134,77	10,40
6	144,78	142,00	10,00	134,78	9,60
7	144,80	142,00	10,00	134,80	9,80
8	144,81	142,00	10,00	134,81	10,50
9	144,83	142,00	10,00	134,83	10,20
10	144,85	142,00	10,00	134,85	10,00
11	144,87	142,00	10,00	134,87	10,30
12	144,89	142,00	10,00	134,89	9,10
13	144,91	142,00	10,00	134,91	10,00
14	144,93	142,00	10,00	134,93	11,00
15	144,95	142,00	10,00	134,95	10,80
16	144,96	142,00	10,00	134,96	12,20
17	144,98	142,00	10,00	134,98	11,60
18	145,80	143,00	9,00	136,80	7,30
19	146,70	144,00	9,00	137,70	10,16
21	148,40	144,00	11,00	137,40	10,70

Canne drenanti perforate dal coronamento					
Canna drenante n.	Quota testa foro m s.l.m.	Quota contatto calcestruzzo-roccia m s.l.m.	Lunghezza foro di progetto m	Quota fondo foro di progetto m s.l.m.	Lunghezza foro misurata il 03/05/11 m
22	169,00	145,00	30,00	139,00	31,20
23	169,00	145,00	30,00	139,00	30,00
24	169,00	145,00	30,00	139,00	30,70
25	169,00	147,80	27,50	141,50	28,80
26	169,00	147,80	27,50	141,50	28,60
27	169,00	147,80	27,50	141,50	27,30
28	169,00	147,80	27,50	141,50	28,50
29	169,00	150,00	25,00	144,00	28,30
30	169,00	150,00	25,00	144,00	25,30
31	169,00	150,00	25,00	144,00	26,70
32	169,00	151,50	23,50	145,50	25,30
33	169,00	151,50	22,00	147,00	22,40
34	169,00	153,00	22,00	147,00	21,50
35	169,00	153,00	22,00	147,00	22,90
36	169,00	155,00	20,00	149,00	20,30
37	169,00	155,00	20,00	149,00	20,40
38	169,00	156,70	18,50	150,50	18,20
39	169,00	158,50	16,50	152,50	16,90

Tabella 8.2 – Elenco canne drenanti del 2009-2010.

Tra il novembre 2014 e il gennaio 2015 si realizzarono, per conto dell'ENEL U.B. Hydro Emilia-Toscana, 6 sondaggi geognostici con prelievo di campioni rimaneggiati, esecuzione di prove Lugeon, prove dilatometriche, installazione di piezometri a corda vibrante, esecuzione indagine simica Cross-Hole, misure HVSR ed esecuzione di rilievo strutturale in foro con telecamera acustica BHTV. Tali sondaggi sono riassunti in Tabella 8.3.

Sondaggio	Perforazione	Profondità metri	Campioni rimaneggiati	Prove in foro	Strumentazione
CH1	Carotaggio continuo	62.00	15		Tubo PVC 3" per Cross Hole
CH2	Distruzione di nucleo	62.00		4 Lugeon 2 Dilatom.	Tubo PVC 3" per Cross Hole
C1	Carotaggio elettrico	5.30	4		
C2	Carotaggio elettrico	5.20	4		
Pz1	Carotaggio elettrico	4.00			Piezometro a corda vibrante
Pz2	Carotaggio elettrico	4.15			Piezometro a corda vibrante

Tabella 8.3 - Riassunto sondaggi eseguiti nel 2014-15.

La Tabella 8.4 riepiloga tutti i sondaggi realizzati, indicando l'anno e la profondità (talora presunta per quelli pre-costruzione diga), inclusi i sondaggi della nuova campagna geognostica descritta nel §8.1. La Figura 8.1 mostra l'ubicazione dei vari sondaggi.

Sondaggio	Anno	Tipologia perforazione	Quota testa foro	Profondità (m da P.C.)
F0	1954	Carotaggio cont.	176,17	25,10
F1	1954	Carotaggio cont.	171,80	41,50
F2	1954	Carotaggio cont.	163,43	28,30
F3	1954	Carotaggio cont.	150,50	17,80
F4	1954	Carotaggio cont.	171,80	28,40
F5	1954	Carotaggio cont.	163,43	28,70
F6	1954	Carotaggio cont.	150,50	29,30
F7	1954	Carotaggio cont.	145,50	36,30
F8	1954	Carotaggio cont.	146,00	34,00
F9	1954	Carotaggio cont.	207,28	64,00
F11	1954	Carotaggio cont.	149,46	19,50
F12	1954	Carotaggio cont.	146,00	--
F13	1954	Carotaggio cont.	146,00	--
F14	1954	Carotaggio cont.	146,00	--
F15	1954	Carotaggio cont.	146,00	--
F16	1954	Carotaggio cont.	150,50	12,50
F17	1954	Carotaggio cont.	153,00	15,00
F18	1954	Carotaggio cont.	150,50	8,80
SL1	2006	Carotaggio cont.	161,30	35,00
SL2	2006	Carotaggio cont.	169,00	45,00
SL3	2006	Carotaggio cont.	169,00	40,00
SL4	2006	Carotaggio cont.	157,60	25,00
SL5	2006	Carotaggio cont.	158,20	25,00
SL6	2006	Carotaggio cont.	168,00	35,00
Ch1	2015	Carotaggio cont.	169,00	62,00
Ch2	2015	Distruzione	169,00	62,00
SS1	2019	Carotaggio cont.	174,00	40,00
SS2	2019	Carotaggio cont.	169,00	30,00

Tabella 8.4 - Riepilogo dei sondaggi effettuati nelle varie campagne geognostiche.

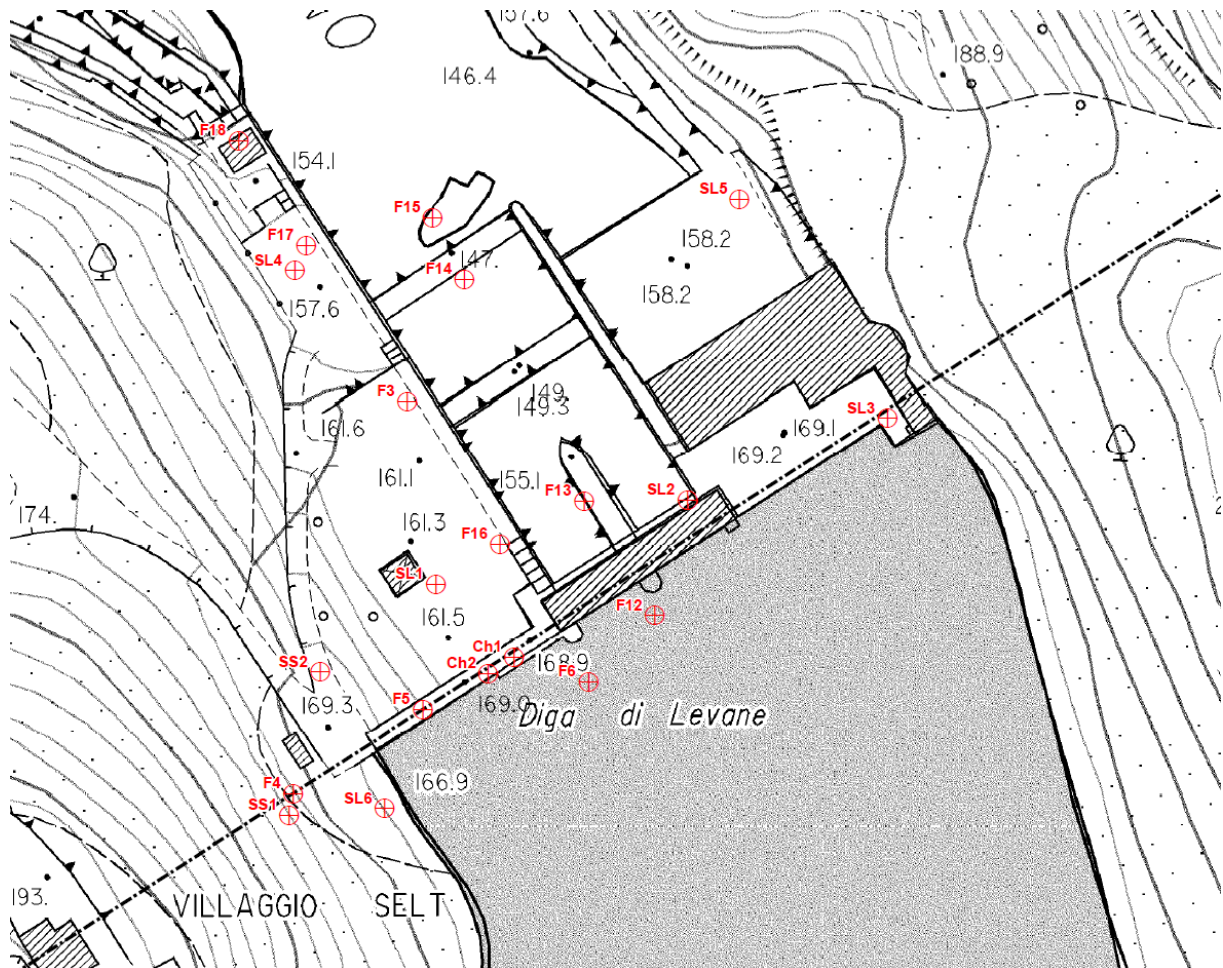


Figura 8.1 – Ubicazione sondaggi area diga.

Nelle varie fasi di indagine sono state inoltre effettuate diverse prove di laboratorio sui campioni lapidei prelevati, tra le quali prove di compressione uniassiale, prove triassiali, prove di taglio, tilt, indice di Point Load, determinazione della massa volumica, del coefficiente elastico, del coefficiente di Poisson, determinazione della velocità delle onde P.

Di seguito si riporta una tabella riepilogativa delle indagini storiche e recenti utilizzate nel presente studio per la caratterizzazione dell'ammasso roccioso (Tabella 8.5), mentre in Figura 8.2 sono indicati la posizione dei sondaggi ed i punti di prelievo dei campioni lapidei in corrispondenza della sezione lungo lo sbarramento.

Sondaggio	Prof. m da p.c.	Campione	Litologia	Massa volumica	Compr. uniassiale	Compr. triassiale	Trazione indiretta	Mod. Elastico	Taglio	Tilt	Point Load	Vel. onde P	Coeff. Poisson 50%
SS1	15	C1	Arenaria	X	X			X				X	X
SS1	21	C2	Marna	X	X			X				X	X
SS1	25	C3	Marna	X	X			X				X	X
SS1	34	C4	Arenaria	X	X			X				X	X
SS1	38	C5	Marna	X	X			X				X	X
SS2	12	C1	Arenaria	X	X			X				X	X
SS2	13	C2	Argillite										
SS2	19	C3	Arenaria	X	X			X				X	X
SS2	22	C4	Marna	X	X			X				X	X
SS2	25	C5	Marna	X	X			X				X	X
Ch1	29	Li1	Arenaria	X	X	X	X	X	X	X			
Ch1	30	Li2	Marna/Siltite	X	X		X	X					
Ch1	32	Li3	Marna/Siltite	X			X		X				
Ch1	34	Li4	Arenaria	X	X	X		X	X	X			
Ch1	48	Li6	Arenaria	X	X			X			X		
Ch1	49	Li7	Arenaria	X		X							
Ch1	51	Li8	Arenaria	X		X		X		X			
Ch1	59	Li9	Arenaria	X	X			X					
SL2	28	C5	Arenaria	X	X		X						
SL2	38	C6	Marna/Siltite	X	X		X						
SL2	44	C7	Arenaria	X	X		X						
SL3	22	C2	Arenaria	X	X		X						
SL3	32	C3	Marna/Siltite	X	X		X						
SL3	39	C4	Arenaria	X	X		X						
SL6	21	C1	Marna/Siltite	X	X		X						
N20		N	Arenaria	X	X								
N24	29	N	Arenaria	X	X								
N34	20	N	Arenaria	X	X								
N39	17	N	Arenaria	X	X								

Tabella 8.5 - Riepilogo delle prove effettuate sui campioni lapidei nelle varie campagne geognostiche.

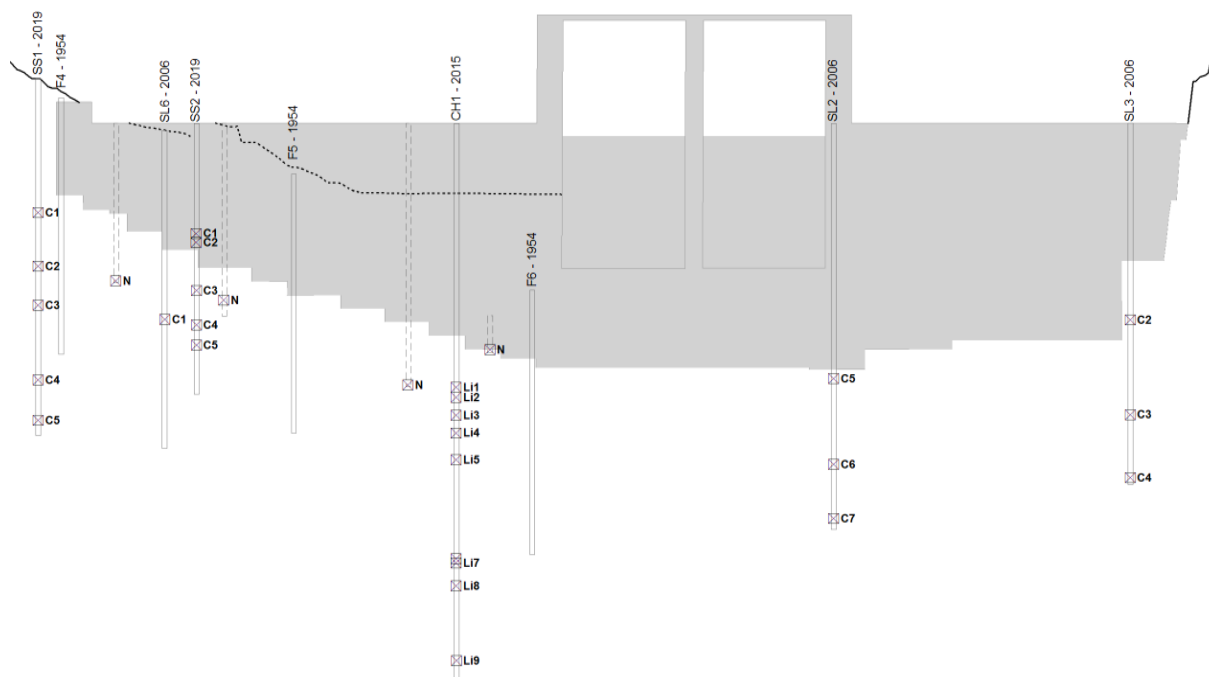


Figura 8.2 – Posizione sondaggi e punto di prelievo dei campioni lapidei in corrispondenza della sezione lungo lo sbarramento.

8.1 Nuove indagini

Per meglio indagare le caratteristiche geologiche e geotecniche della sponda sinistra nei pressi del rialzo in progetto, nei mesi di novembre e dicembre 2019 si sono eseguiti due sondaggi a carotaggio continuo (SS1 e SS2) con relative prove e prelievo di campioni riassunti nella Tabella 8.6. In ogni sondaggio è stato inserito un tubo piezometrico aperto del diametro di due pollici per la misurazione della quota piezometrica dell’acqua. Si sono eseguite sei prove di permeabilità Lugeon nell’ammasso roccioso ed una prova Lefranc nei depositi superficiali nel foro denominato SS1bis, perforato nei pressi del sondaggio SS1 a tale scopo. Si sono eseguite anche quattro prove SPT per la determinazione della resistenza alla penetrazione dei depositi sciolti (Tabella 8.7). In entrambi i fori si sono condotti due log con sonda ottica (OPTV) per verificare le condizioni geomeccaniche-strutturali dell’ammasso roccioso.

SOND.	PROF. (m)	PERFORAZIONE	SPT	CAMPIONI	LEFRANC	LUGEON	OPTV	PIEZOMETRO
SS1	40	Carotaggio	2	5 roccia 2 deposito		4	Da 12 a 35 m da p.c.	Tubo aperto 2"
SS1 bis	6,5	Distruzione			1			
SS2	30	Carotaggio	2	5 roccia 2 deposito		2	Da 15 a 30 m da p.c.	Tubo aperto 2"

Tabella 8.6 - Riepilogo dei sondaggi e relative prove eseguite nel 2019.

SONDAGGIO	PROFONDITA' (m da p.c.)	N. SPT
SS1	3.3	8-6-13
SS1	5.5	28-38-R
SS2	3	4-8-4
SS2	5	13-20-19

Tabella 8.7 – Riepilogo prove SPT eseguite nel 2019.

Le prove di laboratorio effettuate sui campioni lapidei sono elencate nella Tabella 8.5 mentre le prove di laboratorio sui depositi sciolti sono ancora in corso di elaborazione.

Per un maggiore approfondimento si veda il report *“Indagini geognostiche 2019”*, CESI prot. C0006135, aprile 2020. Per l’interpretazione dei dati si vedano i capitoli seguenti.

9 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA GEOMECCANICA

9.1 Caratterizzazione geotecnica dei terreni

Durante il rilievo del dicembre 2019 e dai sondaggi SS1 e SS2 del 2019, si è evidenziato che in sponda sinistra nei pressi della diga è presente una coltre detritica superficiale dello spessore di qualche metro. Durante lo scavo della pista di accesso al sondaggio SS1 si è trovato un primo strato di circa 2.6 m di spessore di blocchi anche decimetrici di arenaria con sabbia e/o in matrice argilloso sabbiosa di colore nocciola. Tale strato è già stato descritto nel §6.2 ed è visibile in Figura 6.4 e Figura 9.1.



Figura 9.1 – Blocchi arenacei in matrice presenti lungo la pista di accesso al sondaggio SS1.

Al di sotto di tale strato è presente della ghiaia eterometrica di natura arenacea ed argillitica in matrice limosa argillosa marroncino-grigiastro e ciottoli fino a circa -7.5 m da p.c.. I clasti si presentano perlopiù di forma angolare e subangolare ed i ciottoli hanno diametro massimo inferiore ai 10 cm. La percentuale di matrice tende ad aumentare con la profondità (Figura 9.2).



Figura 9.2 – SS1 depositi sciolti nel riquadro rosso.

In tale strato si sono eseguite due prove penetrometriche SPT in foro aventi i seguenti risultati:

SONDAGGIO	PROFONDITA' (m da p.c.)	N. SPT
SS1	3.3	8-6-13
SS1	5.5	28-38-R

Tabella 9.1 – Riepilogo prove SPT eseguite nel sondaggio SS1.

Il rifiuto della prova effettuata a 5.5 m è probabilmente imputabile alla presenza di ciottoli e non a terreni molto addensati, mentre la prova a 3.3m è indice di terreni mediamente addensati.

Da 7.5 a 8.3 m da p.c. nel sondaggio SS1 si sono trovati dei blocchi decimetrici di arenaria con un livello di sabbia limosa di circa 30 cm di spessore tra 8 e 8.3 m da p.c. (Figura 9.2).

Per quanto riguarda i depositi in sponda destra, nei pressi della diga la roccia è subaffiorante e non presenta spessori significativi di depositi sciolti sovrastanti.

Si sono inoltre prelevati quattro campioni di terreno nei sondaggi SS1 e SS2 alle seguenti profondità:

SONDAGGIO	PROFONDITA' (m da p.c.)	CAMPIONE
SS1	3.7-4.0	SS1-CR1
SS1	6.7-7.0	SS1-CR2
SS2	4.0-4.3	SS2-CR1
SS2	5.6-5.9	SS2-CR2

Tabella 9.2 – Riepilogo dei campioni di terreno prelevati per analisi di laboratorio.

Sui quattro campioni prelevati sono state eseguite prove di classificazione e limiti i cui risultati sono direttamente consultabili nel documento *CESI – prot. n° C0007830 - DIGA DI LEVANE (comune di Montevarchi e Terranuova Bracciolini AR) - Progetto di sovrizzo ai fini di laminazione – Progetto definitivo - PROVE DI LABORATORIO GEOTECNICO E GEOMECCANICO.*

9.2 Caratterizzazione geostrutturale della roccia di fondazione

9.2.1 Metodologia di lavoro

Nel presente capitolo sono descritte le elaborazioni eseguite allo scopo di fornire una caratterizzazione dell'ammasso roccioso presente nel sottosuolo della diga; i presupposti di partenza sono basati sia sull'ampia disponibilità di dati quantitativi che negli ultimi 15 anni sono stati raccolti attraverso le indagini geognostiche, sia sulla considerazione che i dati raccolti in superficie possono non essere necessariamente rappresentativi delle caratteristiche in profondità. La seguente tabella riepiloga le prove effettuate nei vari sondaggi, ove disponibili:

Sondaggio	Anno	Tipologia perforazione	Profondità (m da P.C.)	OPTV-BHTV	DILAT.	PIEZ.	CROSS HOLE
F0	1954	Carotaggio cont.	25,10				
F1	1954	Carotaggio cont.	41,50				
F2	1954	Carotaggio cont.	28,30				
F3	1954	Carotaggio cont.	17,80				
F4	1954	Carotaggio cont.	28,40				
F5	1954	Carotaggio cont.	28,70				
F6	1954	Carotaggio cont.	29,30				
F7	1954	Carotaggio cont.	36,30				
F8	1954	Carotaggio cont.	34,00				
F9	1954	Carotaggio cont.	64,00				
F11	1954	Carotaggio cont.	19,50				
F12	1954	Carotaggio cont.	--				
F13	1954	Carotaggio cont.	--				
F14	1954	Carotaggio cont.	--				
F15	1954	Carotaggio cont.	--				
F16	1954	Carotaggio cont.	12,50				
F17	1954	Carotaggio cont.	15,00				
F18	1954	Carotaggio cont.	8,80				
SL1	2006	Carotaggio cont.	35,00			35,00	
SL2	2006	Carotaggio cont.	45,00	si			
SL3	2006	Carotaggio cont.	40,00				
SL4	2006	Carotaggio cont.	25,00			25,00	
SL5	2006	Carotaggio cont.	25,00			25,00	
SL6	2006	Carotaggio cont.	35,00			35,00	
Ch1	2015	Carotaggio cont.	62,00				si
Ch2	2015	Distruzione	62,00	si	2		si
SS1	2019	Carotaggio cont.	40,00	si			
SS2	2019	Carotaggio cont.	30,00	si			

Tabella 9.3 – Riepilogo delle prove eseguite nei sondaggi e piezometri installati.

Nelle varie fasi di indagine sono state inoltre effettuate diverse prove di laboratorio sui campioni lapidei prelevati tra le quali prove di compressione uniassiale, prove triassiali, prove di taglio, tilt, indice di Point Load, determinazione della massa volumica, del coefficiente elastico, del coefficiente di Poisson, determinazione della velocità delle onde P.

Di seguito si riporta una tabella riepilogativa delle indagini storiche e recenti utilizzate nel presente studio per la caratterizzazione dell'ammasso roccioso (Tabella 9.4), mentre in Figura 9.3 sono indicati la posizione dei sondaggi ed i punti di prelievo dei campioni lapidei in corrispondenza della sezione lungo lo sbarramento.

Sondaggio	Prof. (m da p.c.)	Campione	Litologia	Massa volumica	Compr. uniassiale	Compr. triassiale	Trazione indiretta	Mod. Elastico	Taglio	Tilt	Point Load	Vel. onde P	Coeff. Poisson 50%
SS1	15	C1	Arenaria	X	X			X				X	X
SS1	21	C2	Marna	X	X			X				X	X
SS1	25	C3	Marna	X	X			X				X	X
SS1	34	C4	Arenaria	X	X			X				X	X
SS1	38	C5	Marna	X	X			X				X	X
SS2	12	C1	Arenaria	X	X			X				X	X
SS2	13	C2	Argillite										
SS2	19	C3	Arenaria	X	X			X				X	X
SS2	22	C4	Marna	X	X			X				X	X
SS2	25	C5	Marna	X	X			X				X	X
Ch1	29	Li1	Arenaria	X	X	X	X	X	X	X			
Ch1	30	Li2	Marna/Siltite	X	X		X	X					
Ch1	32	Li3	Marna/Siltite	X			X		X				
Ch1	34	Li4	Arenaria	X	X	X		X	X	X			
Ch1	48	Li6	Arenaria	X	X			X			X		
Ch1	49	Li7	Arenaria	X		X							
Ch1	51	Li8	Arenaria	X		X		X		X			
Ch1	59	Li9	Arenaria	X	X			X					
SL2	28	C5	Arenaria	X	X		X						
SL2	38	C6	Marna/Siltite	X	X		X						
SL2	44	C7	Arenaria	X	X		X						
SL3	22	C2	Arenaria	X	X		X						
SL3	32	C3	Marna/Siltite	X	X		X						
SL3	39	C4	Arenaria	X	X		X						
SL6	21	C1	Marna/Siltite	X	X		X						
N20		N	Arenaria	X	X								
N24	29	N	Arenaria	X	X								
N34	20	N	Arenaria	X	X								
N39	17	N	Arenaria	X	X								

Tabella 9.4 - Riepilogo delle prove effettuate sui campioni lapidei nelle varie campagne geognostiche.

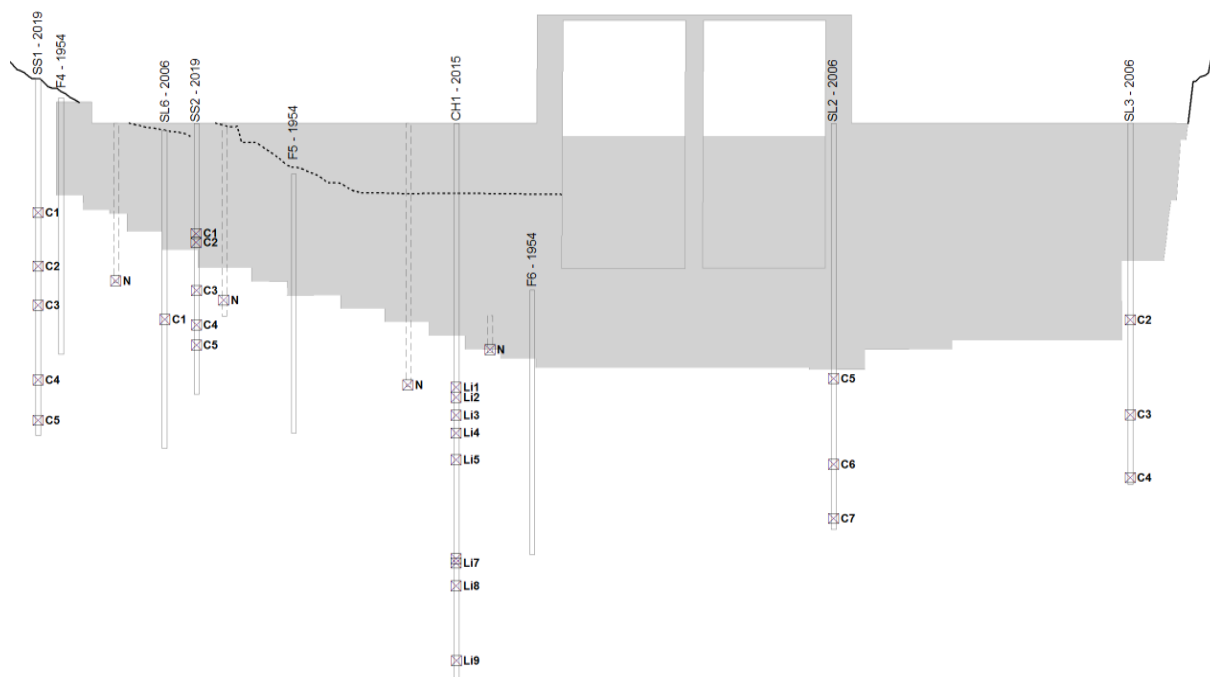


Figura 9.3 – Posizione sondaggi e punto di prelievo dei campioni lapidei in corrispondenza della sezione lungo lo sbarramento.

Le difficoltà incontrate sono state essenzialmente legate a problemi di disomogeneità dei dati dovute alla soggettività dell'operatore (ad esempio le stratigrafie di sondaggio) o all'evolvere delle tecnologie (ad esempio la sonda televisiva).

Le elaborazioni sono state precedute da un'analisi della stratigrafia indicata nei report dei sondaggi, al fine di definire la possibilità di trattare il substrato roccioso a livello di singola bancata arenacea/marnosa oppure come alternanza indistinta.

Allo scopo le descrizioni delle stratigrafie non sono risultate sufficienti in quanto troppo dipendenti dalla sensibilità del compilatore, ad esempio nel sondaggio CH1, la stratigrafia riporta indistintamente da 24m a 45m la presenza di "Substrato litoide costituito da alternanze di siltite di colore grigio scuro e arenaria fine di colore grigio-grigio verdastro", evidentemente troppo generico per il grado di dettaglio ricercato.

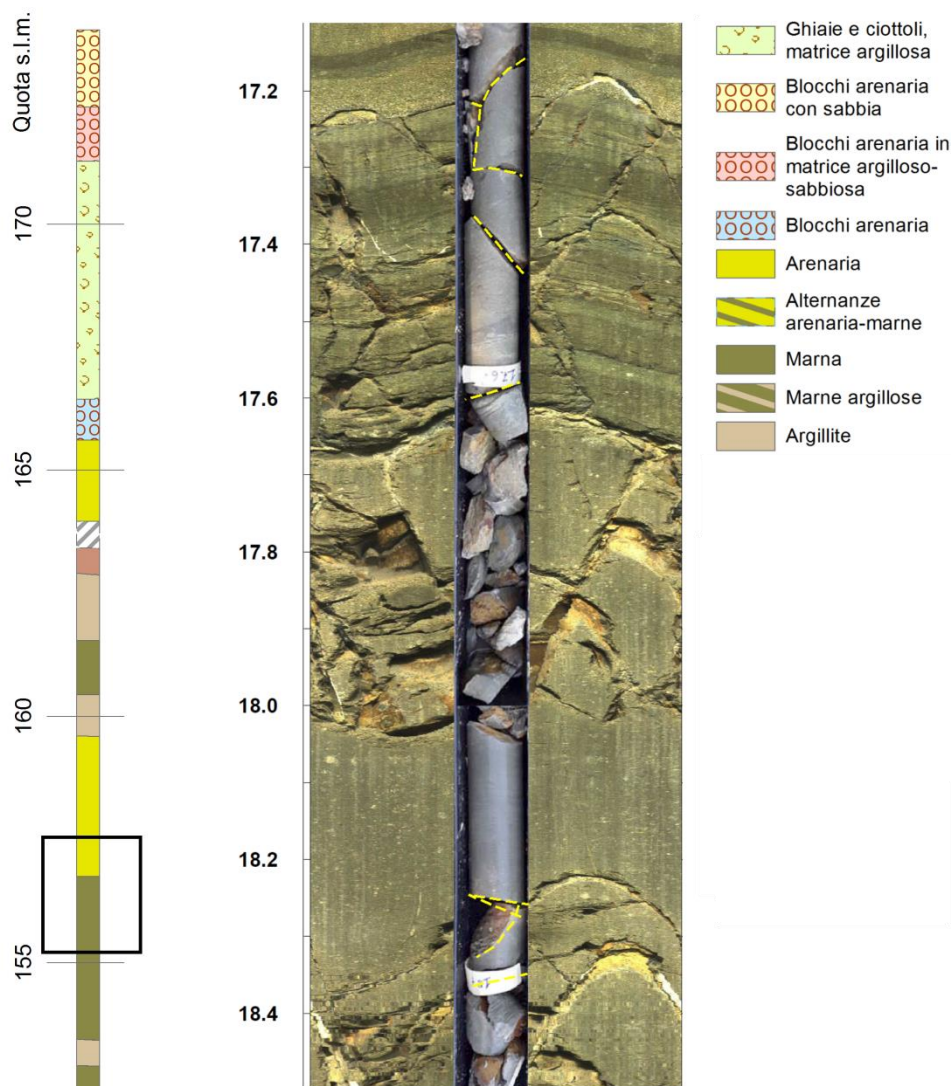


Figura 9.4 – Esempio di allineamento delle informazioni disponibili per ogni verticale di sondaggio.

Ne è seguito un lavoro di allineamento dei seguenti dati, lungo le verticali dei sondaggi:

- Stratigrafia descrittiva
- Foto delle carote
- Log della sonda televisiva

in cui quest'ultima è stata utilizzata come riferimento per la profondità, riallineando sia le stratigrafie, sia le foto delle carote. Tale elaborazione ha permesso di ridefinire le stratigrafie correggendone la quota ed uniformandone, per quanto possibile, la classificazione litologica (Figura 9.4).

Con lo stesso procedimento sono state esaminate le discontinuità e lo stato di fratturazione indicato nelle analisi della sonda televisiva e riconoscibili nelle carote, per la cui trattazione si rimanda al paragrafo 9.2.4.

9.2.2 Assetto stratigrafico

Utilizzando la metodologia sopra descritta, sono state uniformate le colonne stratigrafiche la cui legenda ridefinita è riportata in Figura 9.5 e i dati completi in Allegato 1.



Figura 9.5 – Legenda uniformata delle stratigrafie dei sondaggi.

Nel tentativo di parametrizzare la stratigrafia si riporta di seguito una breve sintesi della statistica delle alternanze arenarie-marne lungo la sezione di imposta (Tabella 9.5). Il rapporto A/P è espresso come quantità media degli spessori arenacei / spessori pelitici (marne, argilliti, siltiti). Le potenze delle bancate sono state calcolate a partire dagli spessori misurati nelle colonne stratigrafiche trasformati in potenze ipotizzando un'inclinazione media degli strati di 20°.

Sondaggi	SS1	SS2	CH1	SL2	SL3
Rapporto A/P	0.39	0.67	0.43	2.13	1.44
Potenza principale bancata arenacea (m)	3.5	3.9	3.8	3.9	2.3
Potenza principale bancata pelitica (m)	15.0	>9.1	10.7	2.0	3.8

Tabella 9.5 – Statistiche stratigrafiche lungo la sezione d'imposta.

Al termine del confronto dei dati lungo le sezioni trasversali e longitudinali all'alveo, si è ritenuta non perseguibile la strada delle correlazioni laterali delle singole bancate, a causa delle variazioni di spessore alla mesoscala (Figura 9.6). Di conseguenza la trattazione delle caratteristiche dell'ammasso roccioso è avvenuta considerandolo come alternanza arenarie/peliti nel suo complesso, come riportato di seguito.

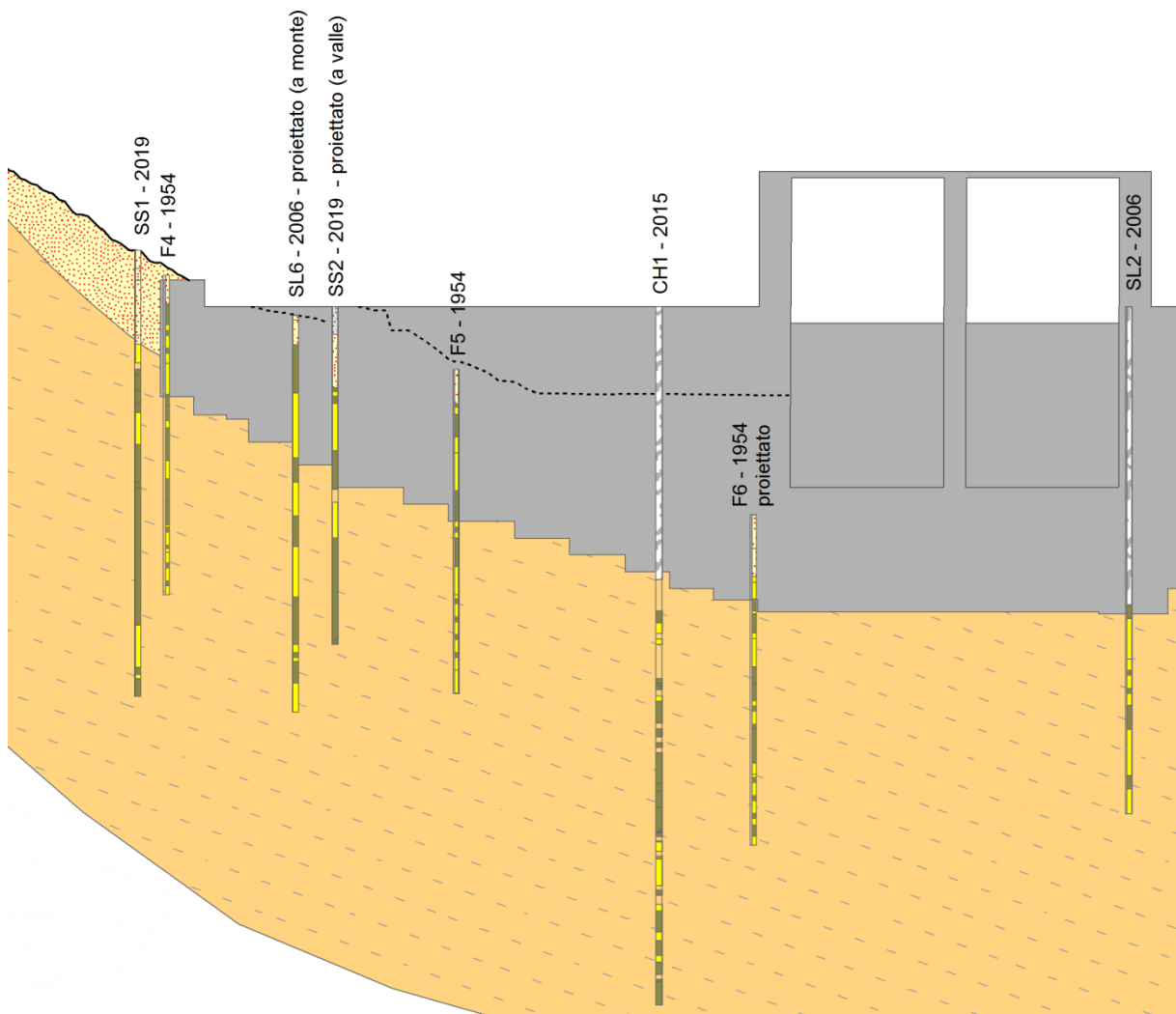


Figura 9.6 – Stralcio della sezione lungo lo sbarramento, in cui risulta la complessità della distribuzione delle bancate arenacee (in giallo) e pelitiche (in verdone), nonostante l'andamento monoclinale regolare della stratificazione (tratteggiato grigio).

9.2.3 Log di sondaggio

Per ogni sondaggio sono stati esaminati e diagrammati i seguenti parametri:

- stratigrafia, ridefinita come descritto sopra; quanto più possibile si è cercato di distinguere i singoli componenti litologici; i tipi riconosciuti sono riportati in Figura 9.5;
- rapporto Arenaria/Pelite, comprendendo in quest'ultima i litotipi marnosi, siltitici e argillitici. Il rapporto è espresso, metro per metro, normalizzato come quantità di Arenaria sul totale Arenaria + Pelite: il valore 0 indica totalità di pelite, il valore 1 indica totalità di arenaria;
- numero discontinuità per metro, comprendendo sia i piani di stratificazione, sia le fratture naturali riconosciute nei log della sonda televisiva ed in carota ed escludendo le rotture meccaniche (Figura 9.12);
- valore dell'indice RQD, sia ottenuto dall'analisi delle carote, sia dalla sonda televisiva (per i dettagli della modalità di calcolo si veda il paragrafo 9.3);
- valore dell'indice GSI (per i dettagli della modalità di calcolo si veda il § 9.5).

Tutti i parametri sono stati ricampionati con passo di un metro e riportati nei log che seguono.

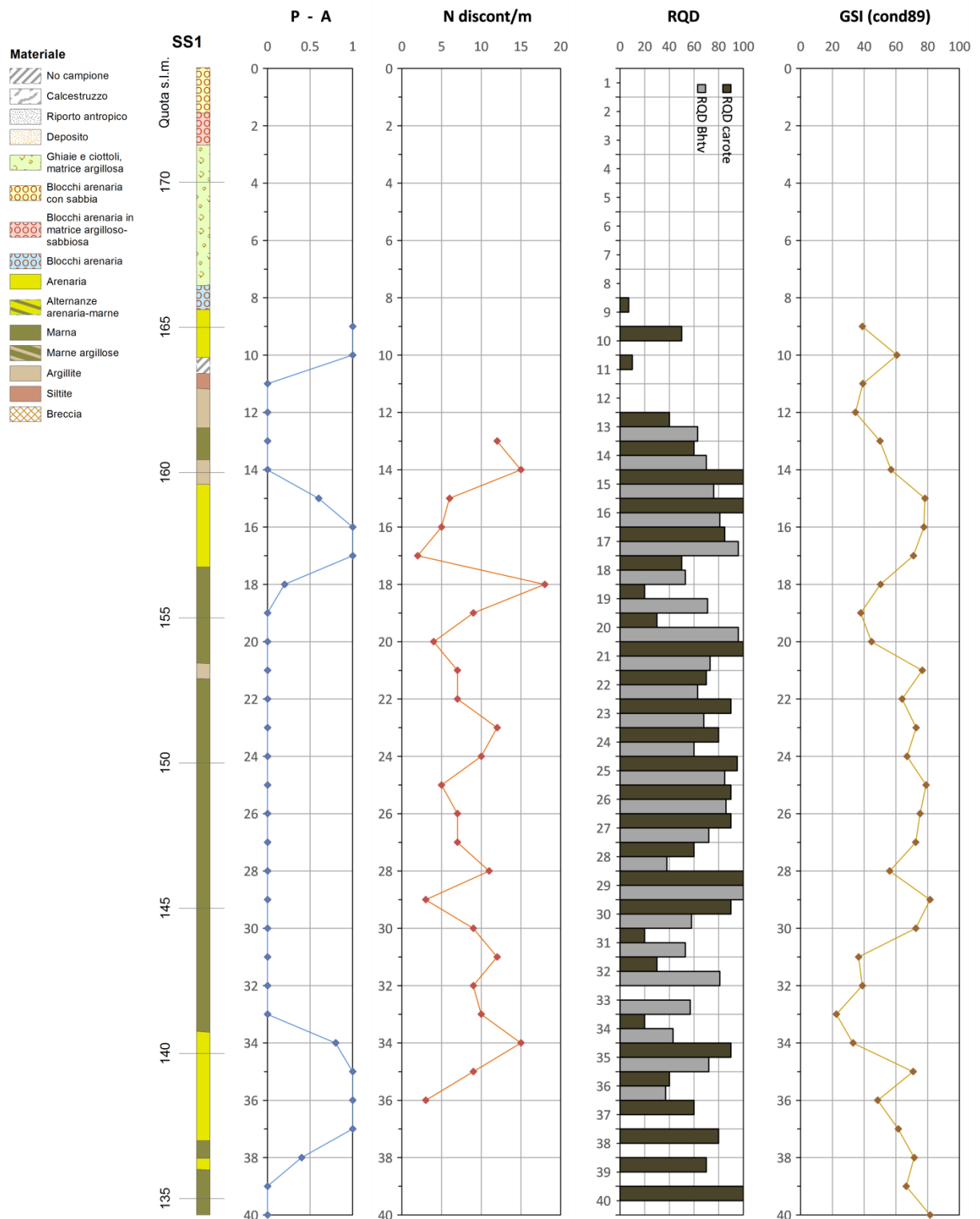


Figura 9.7 – Log sondaggio SS1.

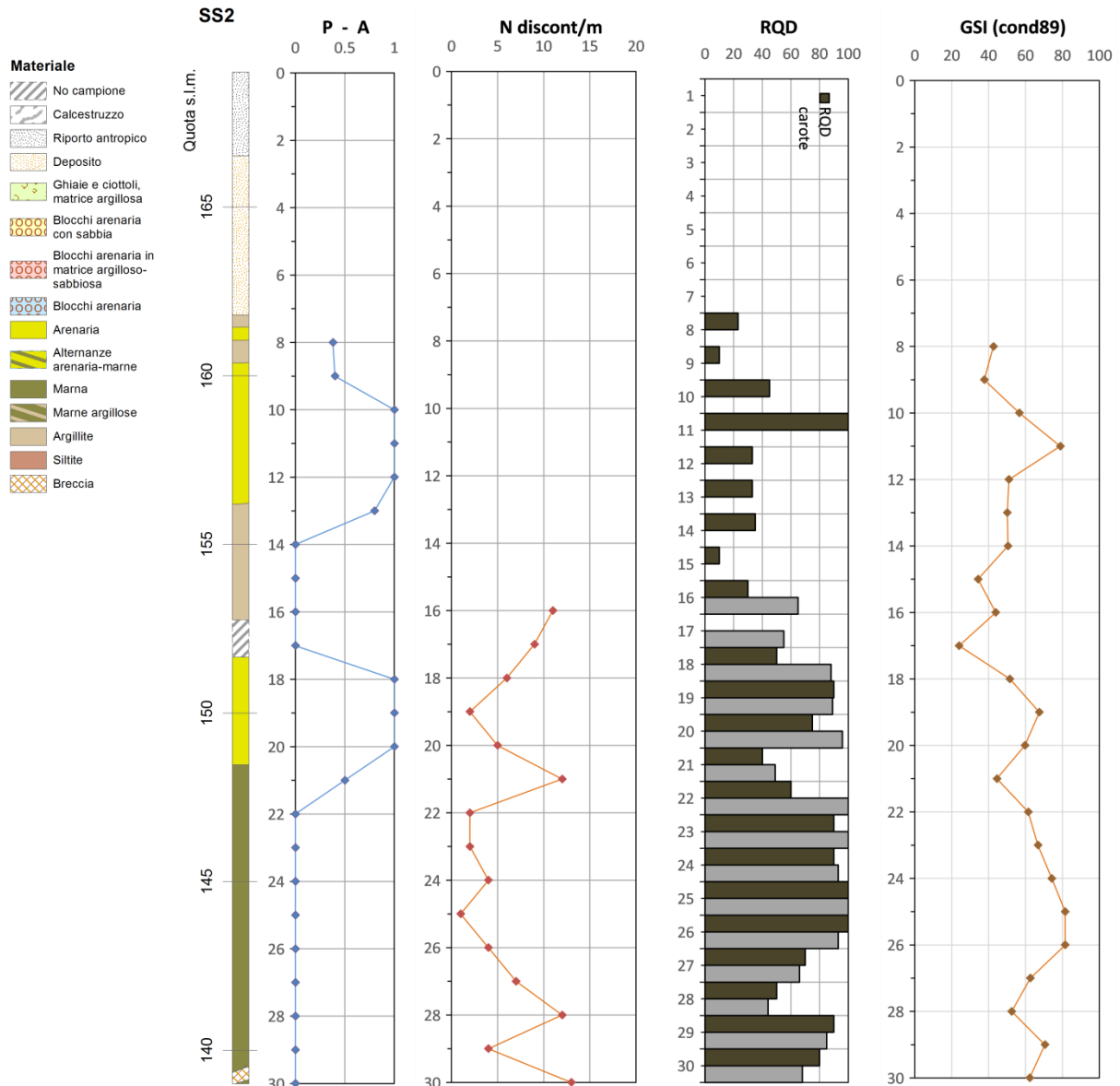


Figura 9.8 – Log sondaggio SS2.

RAPPORTO

USO RISERVATO

APPROVATO

C0006347

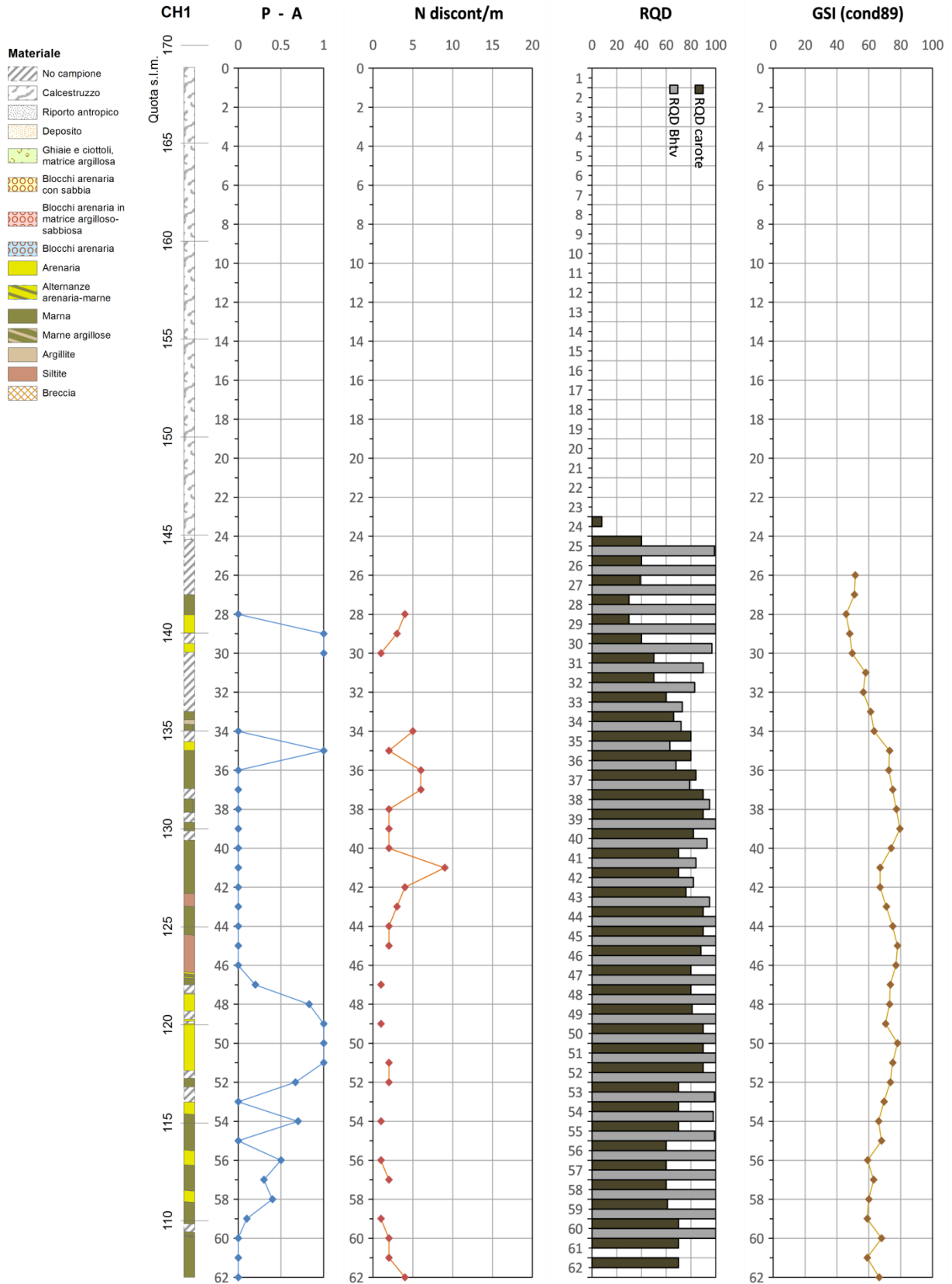


Figura 9.9 – Log sondaggio CH1.

RAPPORTO

USO RISERVATO

APPROVATO

C0006347

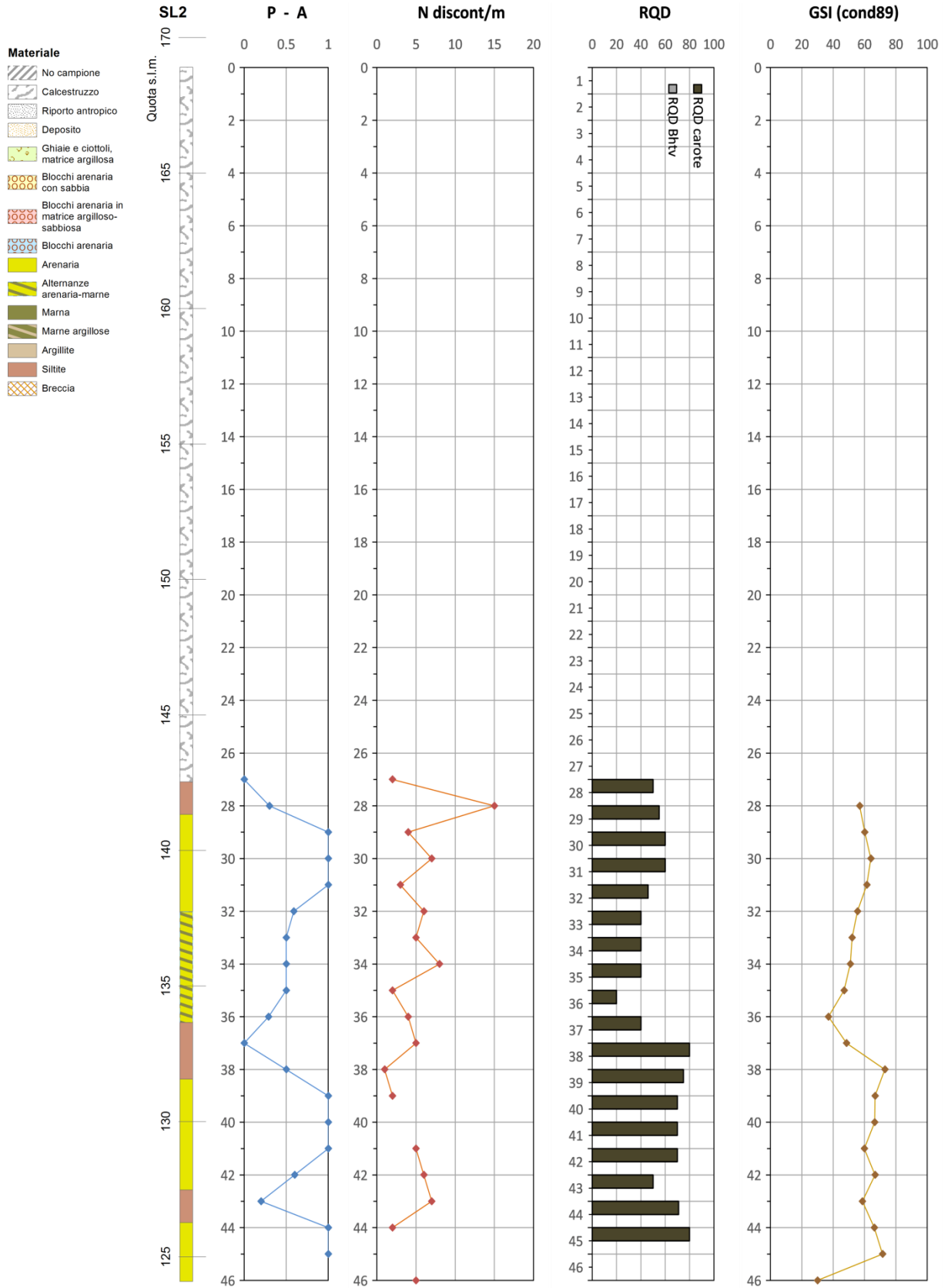


Figura 9.10 – Log sondaggio SL2.

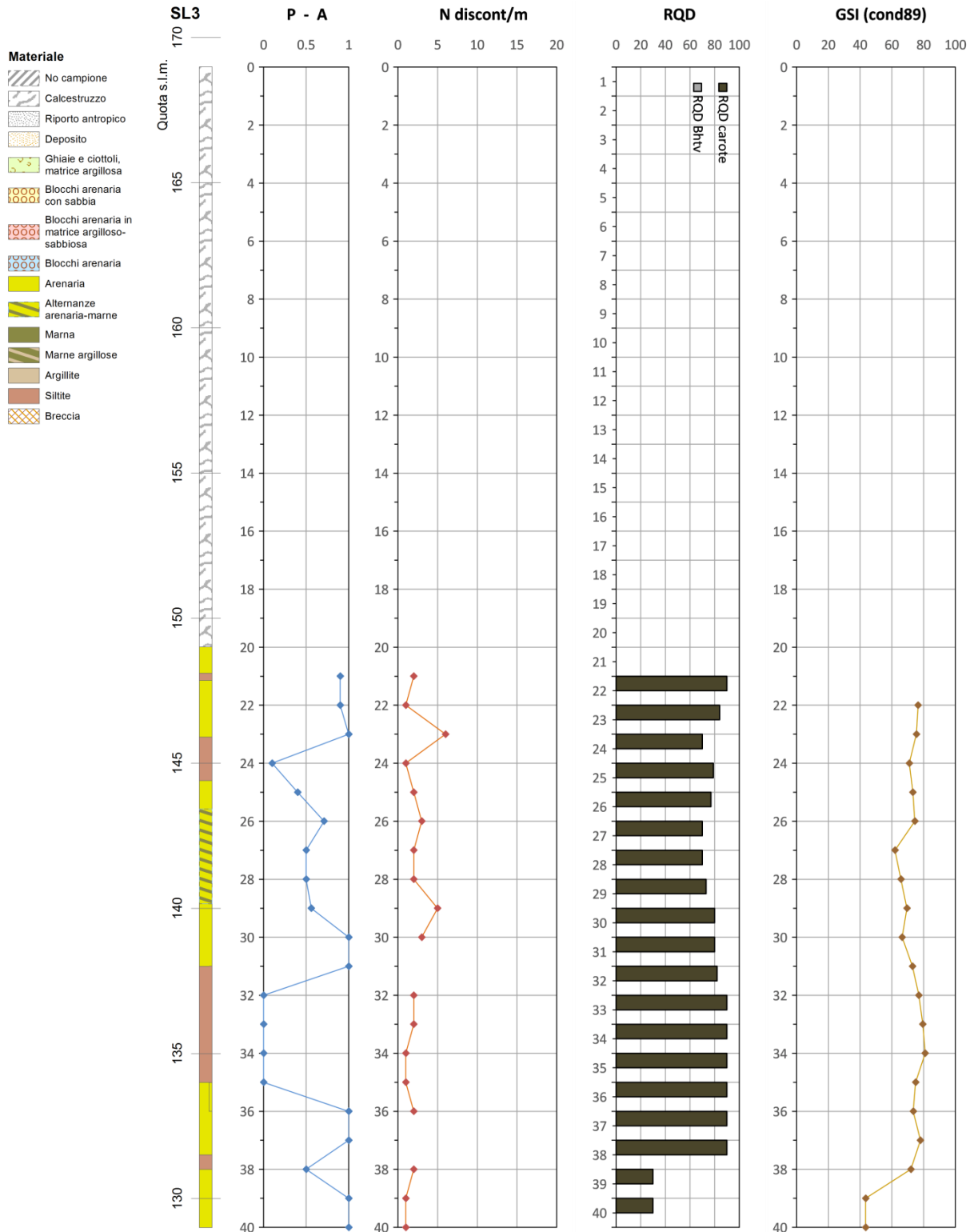


Figura 9.11 – Log sondaggio SL3.

9.2.4 Stato della fratturazione

Come anticipato al capitolo precedente si è provveduto ad approfondire l'analisi dello stato di fratturazione dell'ammasso roccioso nel sottosuolo, ad integrazione delle indagini di superficie svolte negli studi precedenti. Allo scopo sono stati utilizzati i dati disponibili comprendenti stratigrafie, immagini delle carote (l'analisi visiva diretta delle carote stesse è stata possibile per i sondaggi SS1, SS2 e parzialmente per il CH1), sonda televisiva.

Sono stati inoltre evidenziati i tratti caratterizzati da un grado di fratturazione elevato, distinguendoli per tipologia. Infine, si è provveduto ad un'analisi comparativa tra i dati strutturali misurati in superficie e quelli raccolti in profondità dalle indagini con sonda televisiva.

9.2.4.1 Discontinuità in pozzo

Per i sondaggi SS1, SS2, CH1, SL2, SL3, ritenuti significativi per la caratterizzazione della sezione di imposta, si è proceduto con l'analisi della fratturazione, sulla base dell'analisi delle carote e dalle indagini con sonda televisiva.

Come anticipato è stato preliminarmente conteggiato il numero di discontinuità per metro, comprendendo sia i piani di stratificazione, sia le fratture naturali ed escludendo le rotture meccaniche (Figura 9.12).

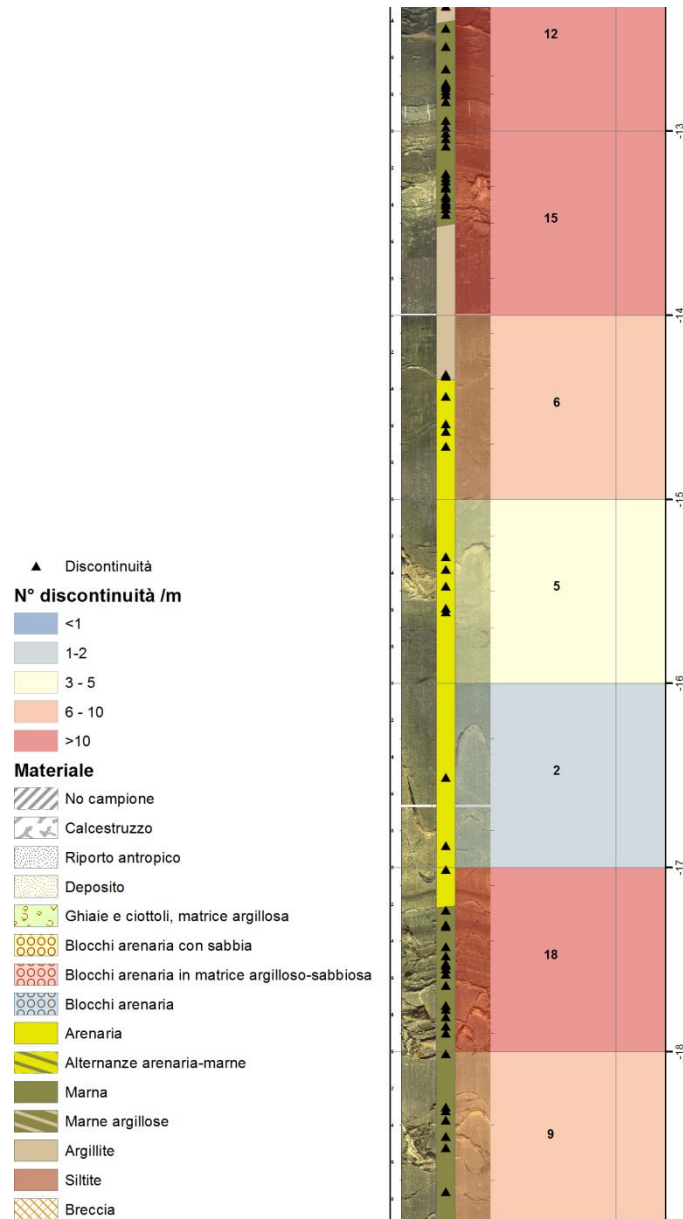


Figura 9.12 – Esempio del calcolo del N° di discontinuità per metro di sondaggio.

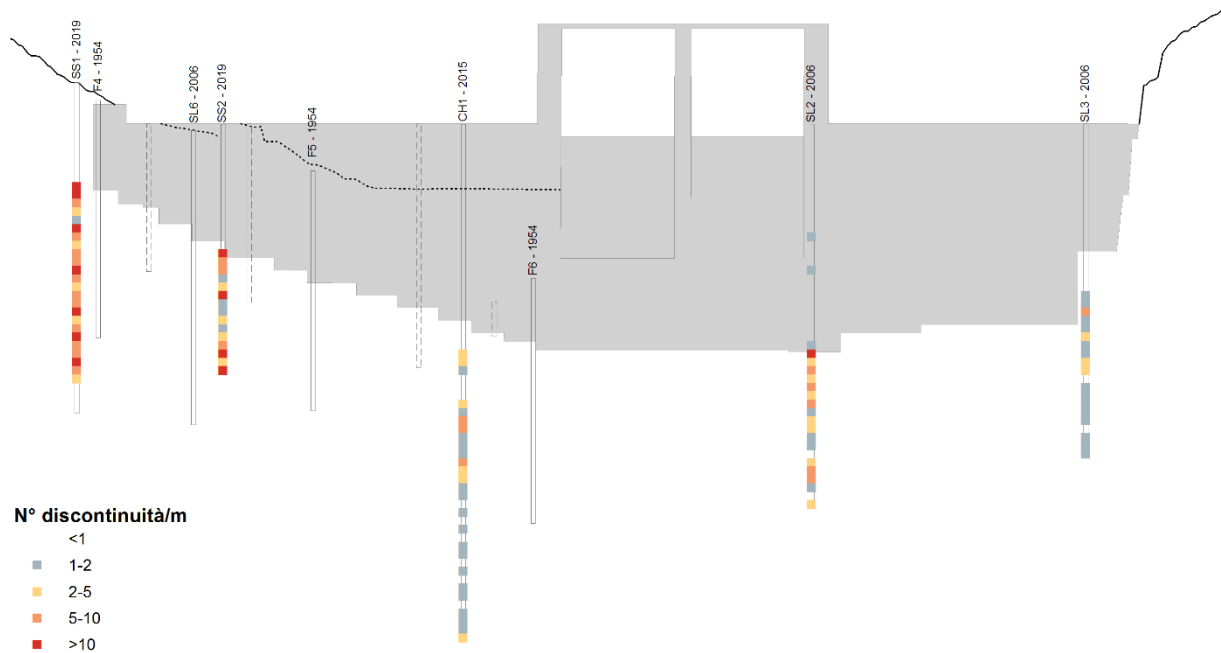


Figura 9.13 – Visione sinottica lungo la sezione di imposta della densità del numero di discontinuità.

Nella rappresentazione sinottica lungo lo sbarramento (Figura 9.13), si nota che i sondaggi in sponda sinistra presentano un maggior numero di discontinuità per metro rispetto ai sondaggi in sponda idrografica, perlomeno fino alle profondità indagate. Si nota anche una diminuzione del numero di discontinuità all'aumentare della profondità nel sondaggio CH1 che si è spinto fino a 62m da p.c.. Si è quindi proceduto all'identificazione delle zone più fratturate confrontando le foto delle carote estratte con i sondaggi televisivi al fine di identificare le principali tipologie e la loro ubicazione (Figura 9.14).

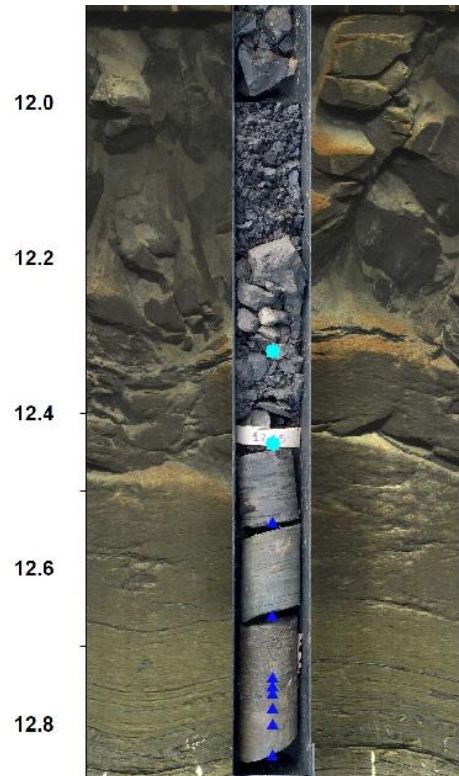


Figura 9.14 – Esempio di sovrapposizione delle foto dei campioni con le riprese OPTV.

In base alle discontinuità osservate sono state catalogate le zone più fratturate (rubble) in 3 tipi principali (Figura 9.15):

1. Rubble per stratificazione e fratturazione
2. Rubble per livelli caotici
3. Rubble per breccia tettonica

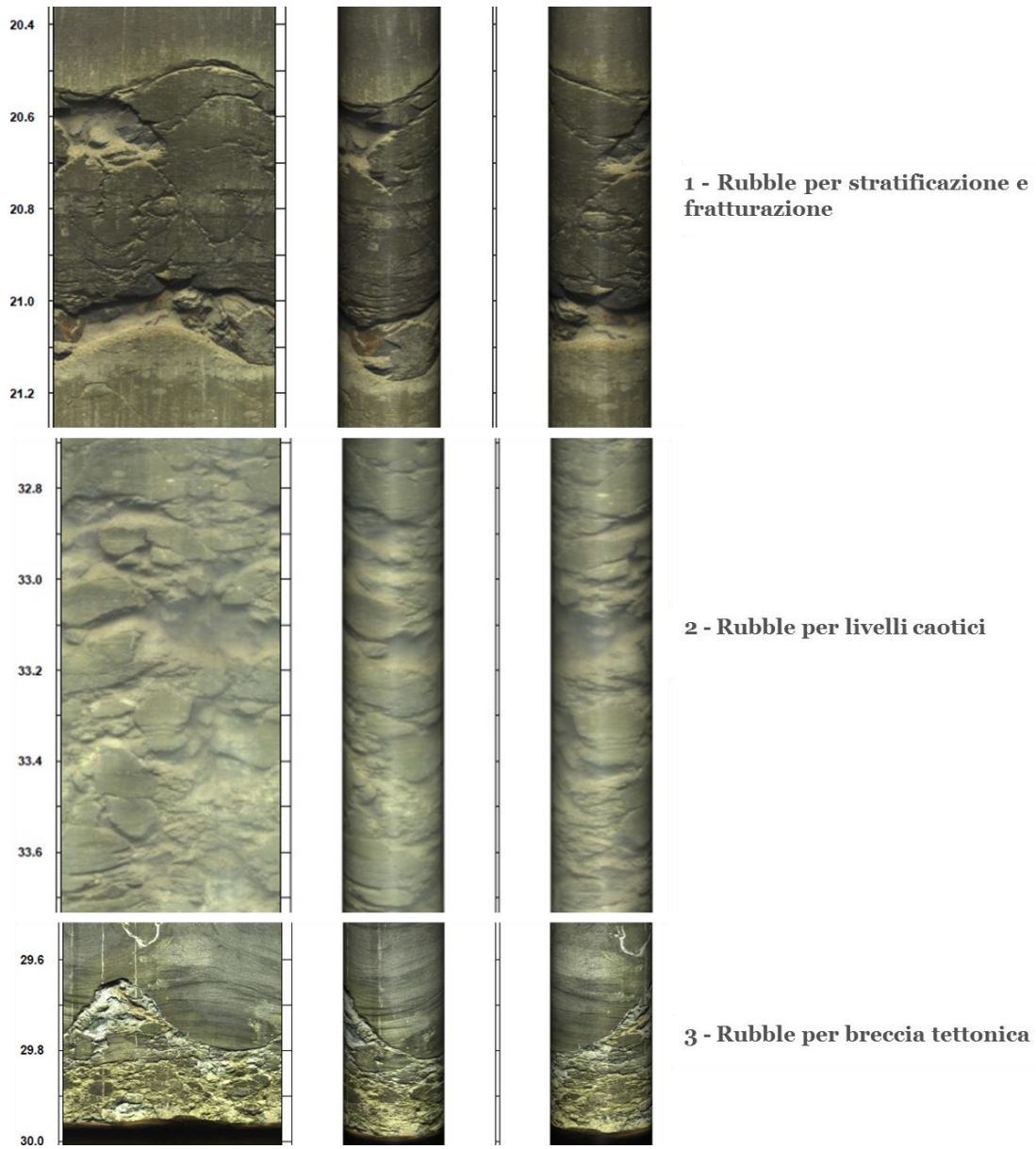


Figura 9.15 – Tipi di rubble identificati.

9.2.4.2 Considerazioni sul tipo di fratture

Dall'analisi delle carote dei sondaggi CH1, SS1 e SS2 si è cercato di riconoscere le fratture più recenti da quelle più antiche e la loro genesi. In particolare, sono state riconosciute delle fratture "giovani", legate a fenomeni gravitativi e/o compattazione differenziale, in una roccia non completamente litificata (o semi consolidata), caratterizzate dalla scarsa planarità, più o meno fini o con riempimenti polifasici (Figura 9.16).



Figura 9.16 – Esempi di fratture più "giovani".

Per contro, le fratture perfettamente planari o quasi, che secano la carota ad angoli di inclinazione più o meno elevati, e con immersioni solitamente associabili a poche e ben definite famiglie, con o senza riempimento sembrano fratture più tardive, e riconducibili maggiormente ad eventi tettonici (più o meno importanti) che ad altro (Figura 9.17).



Figura 9.17 – Esempi di fratture più tardive.

9.2.4.3 Sintesi dei risultati

I livelli fratturati riconosciuti lungo i sondaggi SS1, SS2 ed SL2 sono elencati in Tabella 6 e rappresentati in Figura 9.18; nelle figure successive ne è presentata una rassegna. Da notare la decrescita del numero di livelli fratturati dal lato sinistro (ad esempio si veda il sondaggio SS1) verso il lato destro (il sondaggio SL3 non presenta livelli molto fratturati).

Sondaggio	Profondità (m)	Fonte	Tipo criticità
SS1	11.8-12.5	OPTV	Livello caotico
SS1	17.2-18	OPTV	Livello molto fratturato (strat.+fratturazione)
SS1	18.3-18.6	OPTV /CASSETTA	Livello molto fratturato (strat.+fratturazione)
SS1	19.3-19.5	OPTV /CASSETTA	Livello molto fratturato (strat.+fratturazione)
SS1	20.5-21.1	OPTV /CASSETTA	Livello molto fratturato (strat.+fratturazione)
SS1	23.4-23.5	OPTV /CASSETTA	Livello molto fratturato (strat.+fratturazione)
SS1	27.2-27.5	OPTV /CASSETTA	Livello molto fratturato (strat.+fratturazione)
SS1	28.6-29	OPTV	Livello caotico
SS1	29.5-30	OPTV	Livello caotico
SS1	30.8-31	OPTV	Livello caotico
SS1	31.5-33	OPTV	Livello caotico
SS1	33.3-34	OPTV	Livello caotico
SS2	7.3-9.2	CASSETTA	Livello molto fratturato
SS2	11-11.7	CASSETTA	Livello molto fratturato
SS2	12.8-15	CASSETTA	Livello molto fratturato (forse caotico)
SS2	15-15.2	OPTV	Livello caotico
SS2	19.6-19.8	OPTV /CASSETTA	Livello molto fratturato (strat.+fratturazione)
SS2	20.5-20.8	OPTV /CASSETTA	Livello molto fratturato (strat.+fratturazione)
SS2	29.5-30	OPTV /CASSETTA	Breccia tettonica
SL2	27-27.6	BHTV/CASSETTA	Livello molto fratturato (strat.+fratturazione)
SL2	31.7-31.8	BHTV/CASSETTA	Livello molto fratturato (strat.+fratturazione)
SL2	33.8-34.4	BHTV/CASSETTA	Livello molto fratturato (strat.+fratturazione)

Tabella 9.6 - Ubicazione e tipo dei livelli più fratturati identificati.



Figura 9.18 – Rubble zones riconosciute nei sondaggi SS1, SS2 ed SL2.



Figura 9.19 – SS1 intervallo 11.8-12.3m da p.c. (livello caotico).



Figura 9.20 - SS1 intervalli 17.2-18m, 18.3-18.6m, 19.3-19.5m da p.c. (stratificazione+fratture).

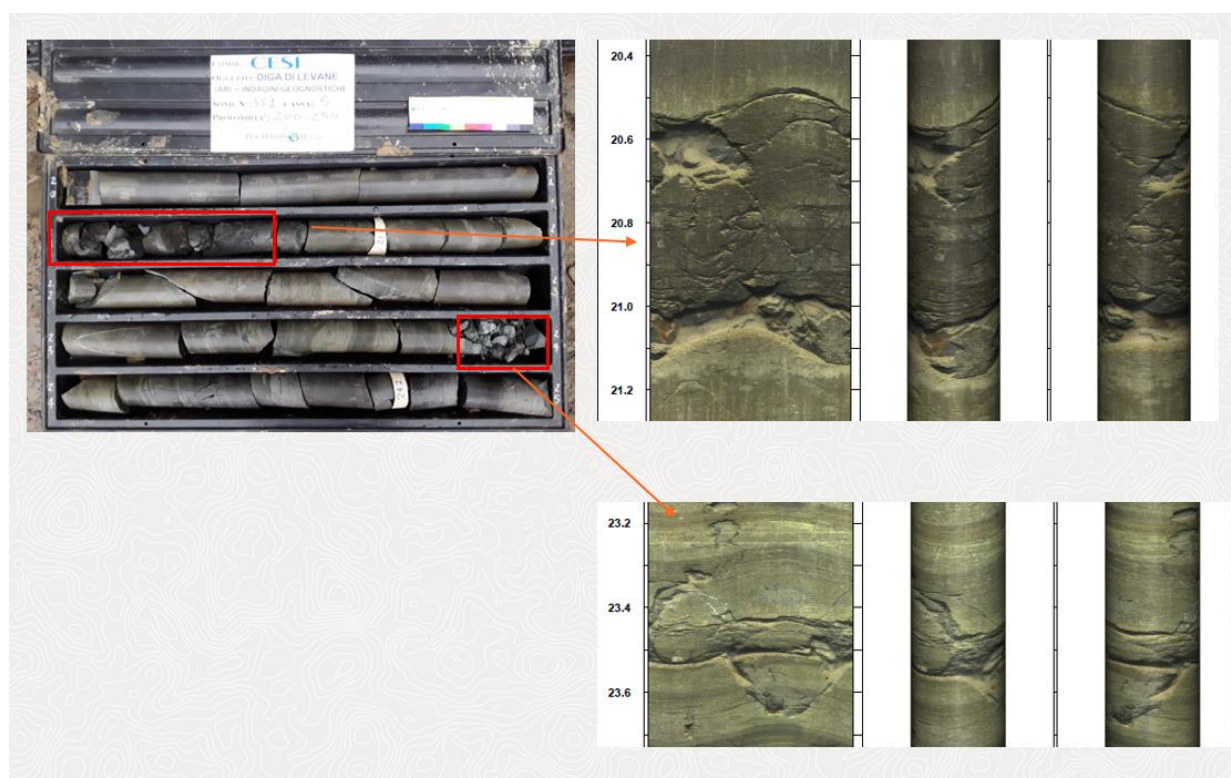


Figura 9.21 – SS1 intervalli 20.5-21.1 m, 23.4-23.5m da p.c. (stratificazione+fratture).

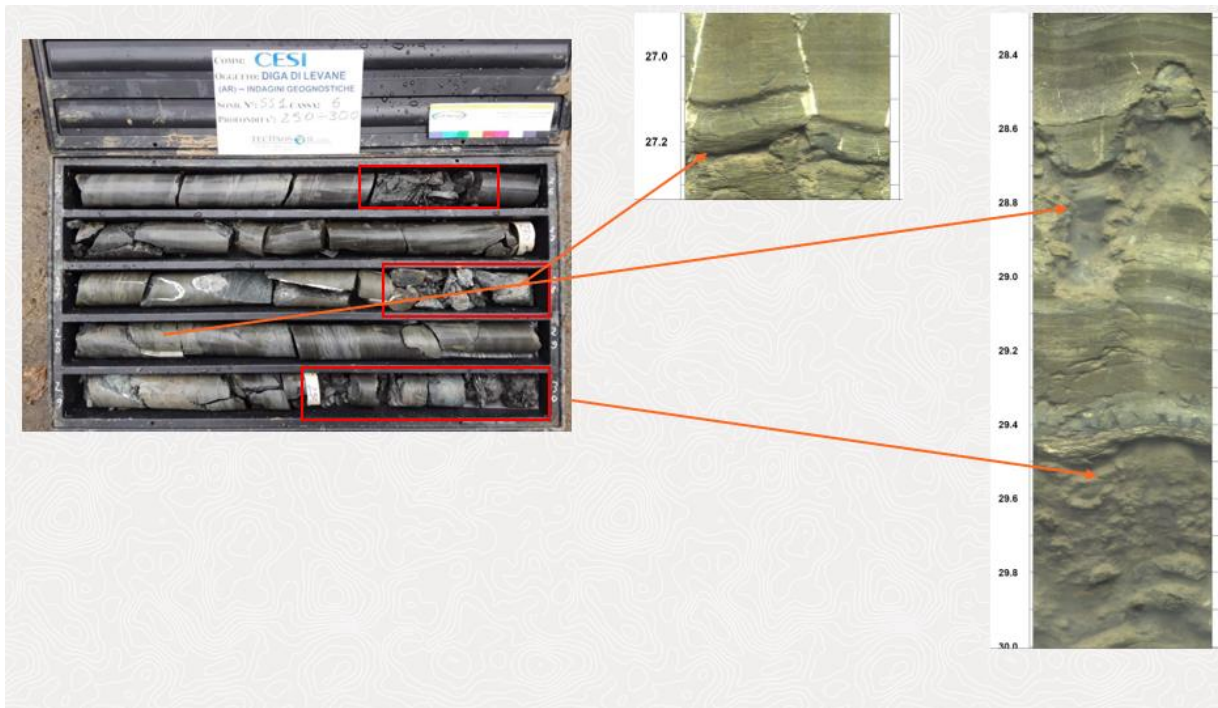


Figura 9.22 - SS1 intervalli 27.7-28m (stratificazione+fratture), 28.6-29m (livello caotico su OPTV), 29.5-30m da p.c. (livello caotico).

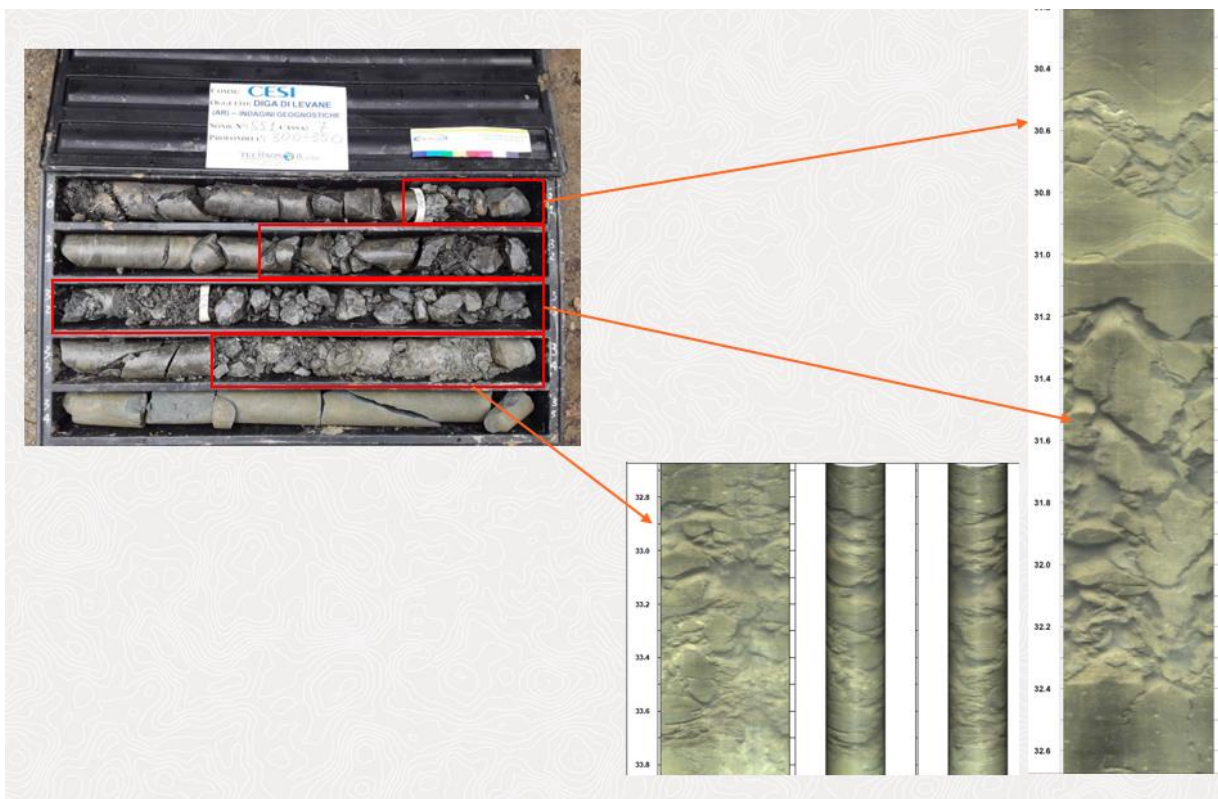


Figura 9.23 - SS1 intervalli 30.8-31m, 31.5-33m, 33.3-34m (livelli caotici).



Figura 9.24 – SS2 intervallo fratturato 7.3-9.2m da p.c..



Figura 9.25 – SS2 intervalli fratturati 11-11.7m, 12.8-15m da p.c..

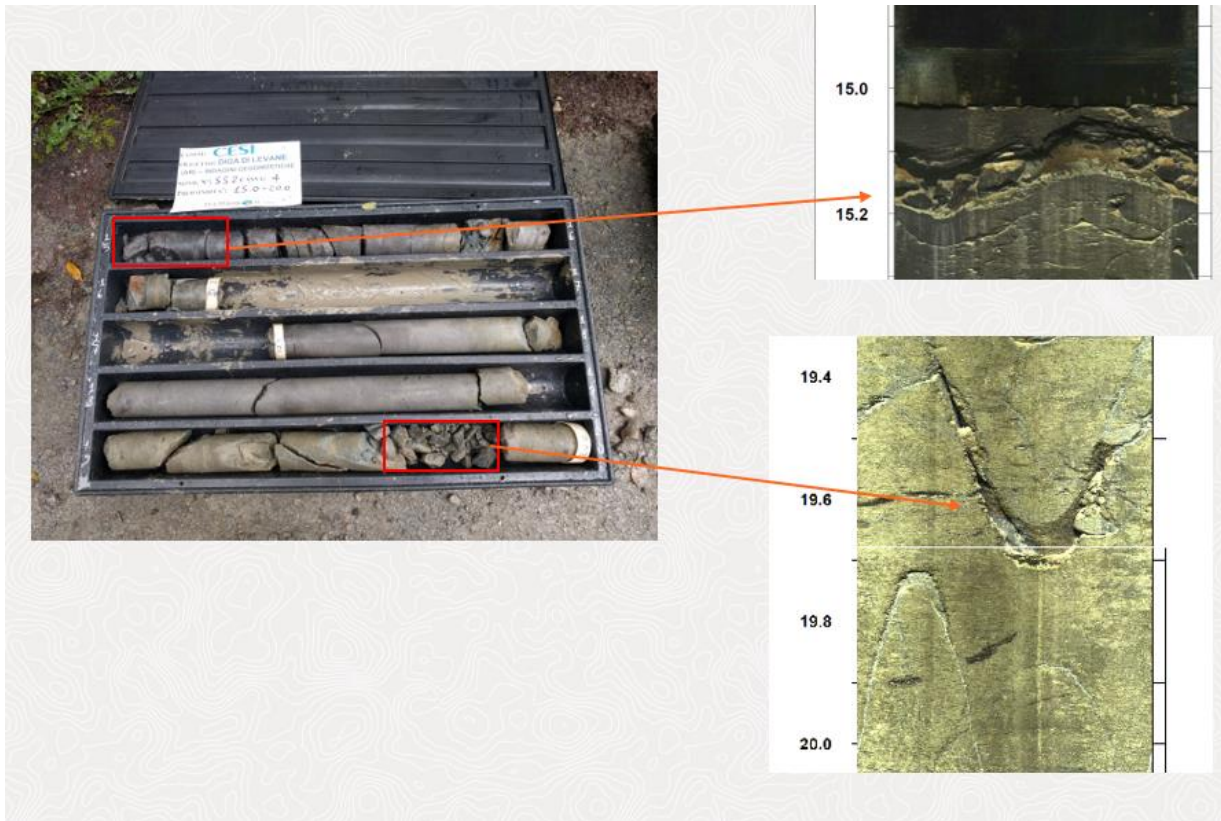


Figura 9.26 – SS2 intervalli fratturati 15-15.2m (livello caotico), 19.6-19.8m da p.c. (stratificazione+fratturazione).

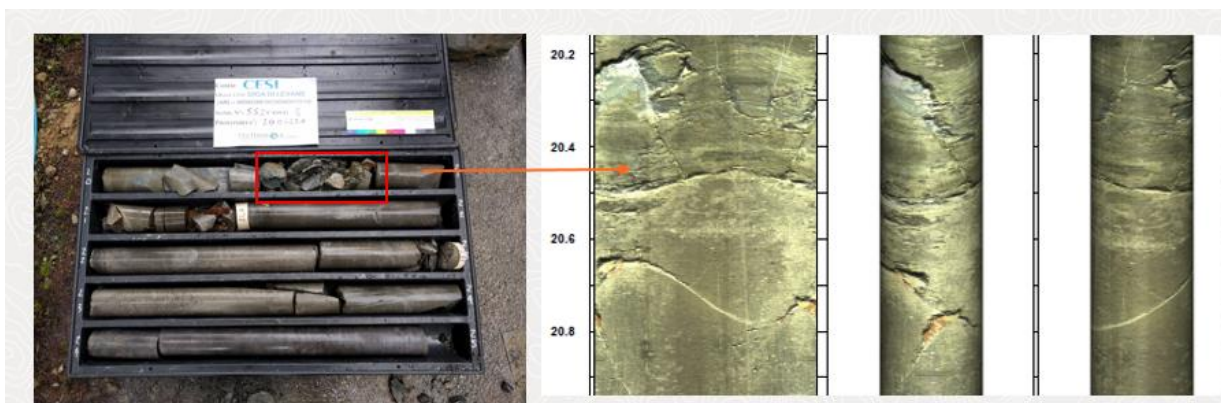


Figura 9.27 – SS2 intervallo 20.5-20.8m da p.c. (stratificazione+fratturazione).



Figura 9.28 – SS2 intervallo da 29.5-29.9m da p.c. (breccia tettonica).

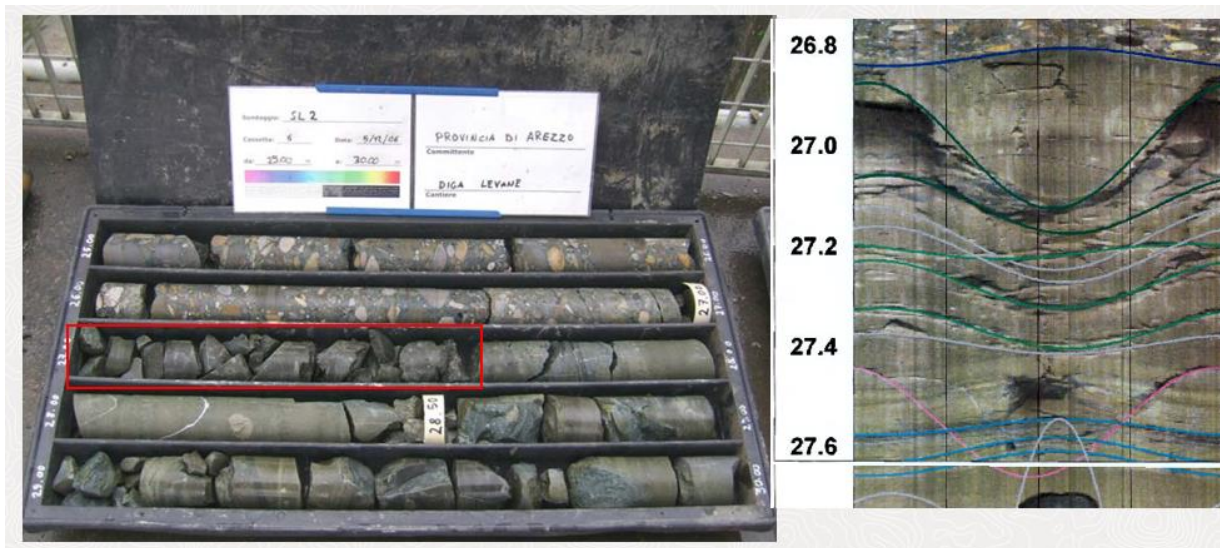


Figura 9.29 – SL2 intervallo 27-27.6m da p.c. (stratificazione+fratturazione).

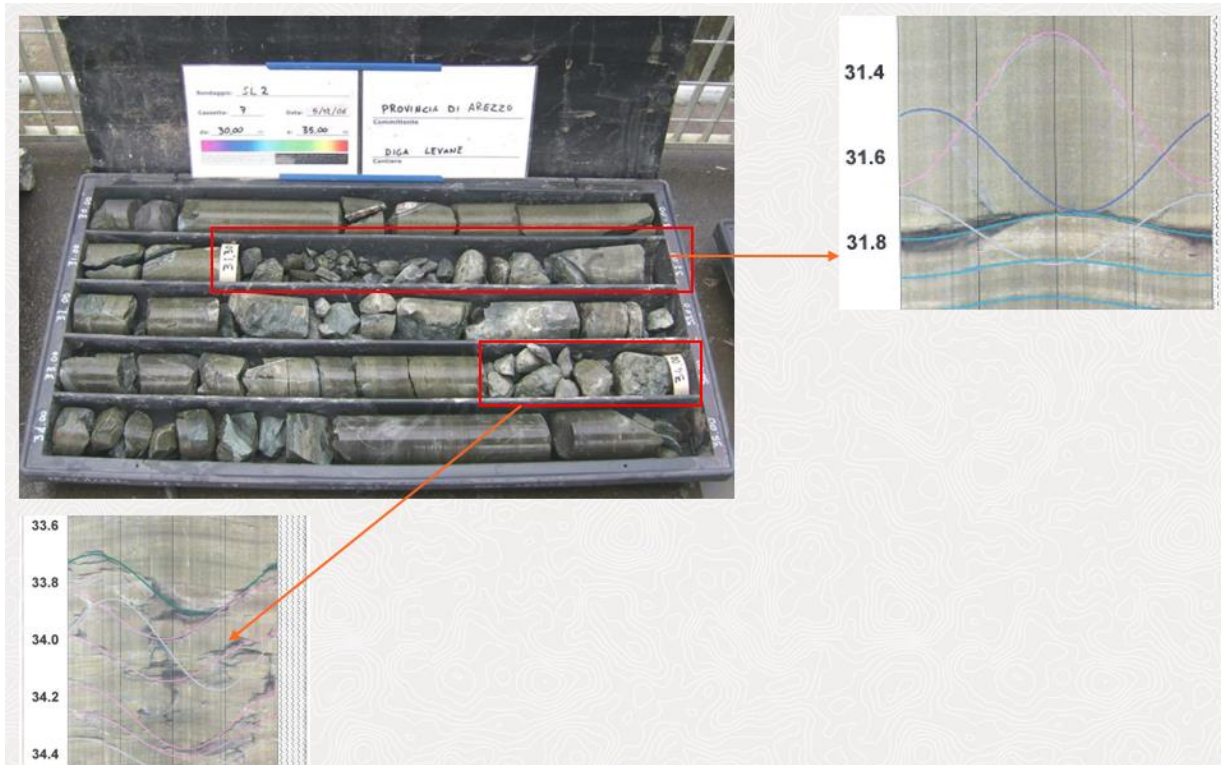


Figura 9.30 – SL2 intervalli 31.7-31.8m, 33.8-34.4m da p.c. . (stratificazione+fratturazione).

Oltre ai livelli sopra elencati, aventi un grado di fratturazione molto elevato, nel sondaggio SS2 si segnalano anche i seguenti intervalli dove si evidenziano fenomeni di probabile dissoluzione non sempre evidenti in carota.

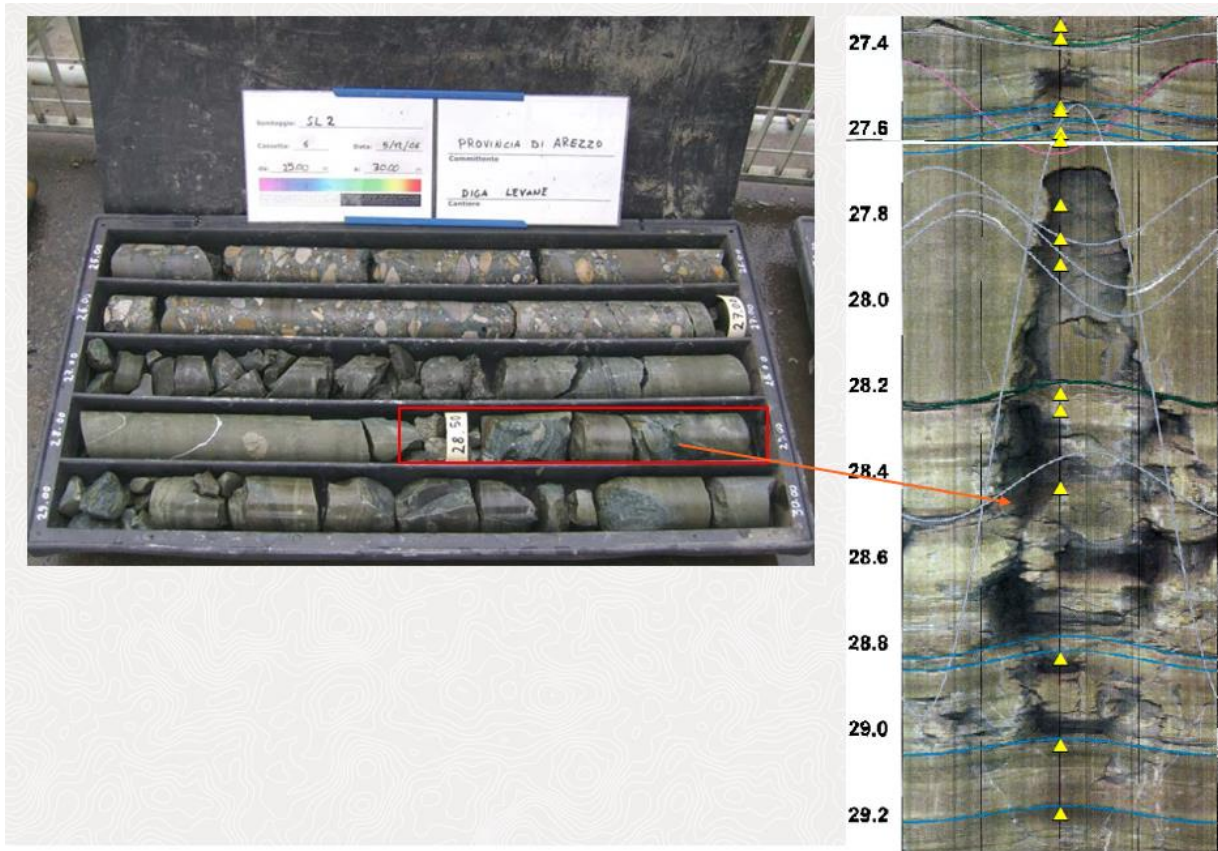


Figura 9.31 – SL2 intervallo 28.2-29m da p.c. indicante un probabile fenomeno di dissoluzione.



Figura 9.32 - SL2 intervallo 34.5-35m da p.c. indicante un probabile fenomeno di dissoluzione non evidente in carota.

Come evidenziato in Figura 9.28 nel sondaggio SS2, a circa 29.5m di profondità da p.c., si è attraversato un livello brecciato, orientato circa 275/60 (dato OPTV) in discordanza geometrica con le marne sovrastanti, di probabile genesi tettonica, che però non si è ritrovato in nessun altro sondaggio anche delle precedenti campagne di indagini.

Riepilogando si è notato che:

- I sondaggi in sponda sinistra presentano un grado di fratturazione maggiore rispetto a quelli in sponda destra evidenziati anche dalla presenza di livelli molto fratturati sia in OPTV che in carota;
- I livelli più fratturati tendenzialmente sono riscontrabili nelle litologie più marnose e siltitiche;
- Nel sondaggio SS2 si è attraversato un livello brecciato non individuato negli altri fori.

9.2.5 Analisi strutturale

A partire dai dati ricavati dalla sonda televisiva (eseguita nei sondaggi SS1, SS2, CH1, SL2, SL3), ovvero gli unici nel sottosuolo per cui siano disponibili informazioni sull'orientamento reale nello spazio, sono state analizzate statisticamente le giaciture delle discontinuità rappresentando i risultati sulle proiezioni standard di Schmidt utilizzando il programma Dips 6.0 (www.rocscience.com).

Si ricorda che le OPTV e BHTV sono state effettuate in tre campagne geognostiche differenti nell'arco di circa 15 anni, i risultati quindi sono influenzati dalle limitazioni legate ad attrezzature più datate e meno performanti di quelle attuali e dalle rielaborazioni dei dati effettuate da diversi operatori con criteri differenti. Si è infatti notata una minore sensibilità nella rappresentazione dei livelli attribuiti alla stratificazione specialmente nei sondaggi più vecchi (SL2 e SL3).

Malgrado questa disomogeneità dei dati di input, si è comunque cercato di riconoscere le principali famiglie di discontinuità evidenziando eventuali correlazioni con le 3 famiglie riconosciute in affioramento dagli studi precedenti (stratificazione, K1, K2).

La Tabella 9.7 riassume le principali famiglie riconosciute.

Famiglie	SS1	SS2	CH1	SL2	SL3
S0	49/24	43/30	62/32	5/24 (*)	12/28 (***)
				87/28 (**)	78/24 (****)
K1		287/47		301/65	
K2	229/56	220/67	222/64	201/55	
K3	253/60	257/55	262/46	249/67	252/66
K4		287/82	303/73		
K5	105/68	129/73	126/70		121/80
K6			332/72		0/66
K7			166/66		
K?	350/45				
K?					162/24

Tabella 9.7 – Famiglie di discontinuità ricavate da OPTV e BHTV (* profondità<41m; ** profondità>41m; * profondità<22m; **** profondità>22m).**

Come è evidente dalla tabella sopra, le famiglie di discontinuità ad alto angolo sono molto poche dato che in un foro di sondaggio di pochi centimetri di diametro è molto difficile intercettarle. Per questo motivo le famiglie K1 e K2, ben visibili in affioramento, sono difficilmente individuabili in foro. Le discontinuità ad angoli minori invece sono più facili da intercettare e meglio rappresentate.

I sondaggi in sinistra idrografica da un punto di vista dell'intensità di fratturazione sono più simili tra loro rispetto a quelli in destra idrografica, sulla base di questo criterio sono stati confrontati tra di loro.

Nei sondaggi in destra idrografica (SL2 e SL3) si è notata una diversa giacitura della stratificazione a seconda della profondità, una simile a quella di superficie, e una diversa non riscontrabile nei sondaggi in sponda sinistra.

Le seguenti figure rappresentano i plot dei diversi sondaggi con evidenziate le famiglie principali e i confronti tra i sondaggi in sinistra idrografica (SS1, SS2, CH1) e quelli in destra idrografica (SL2, SL3).

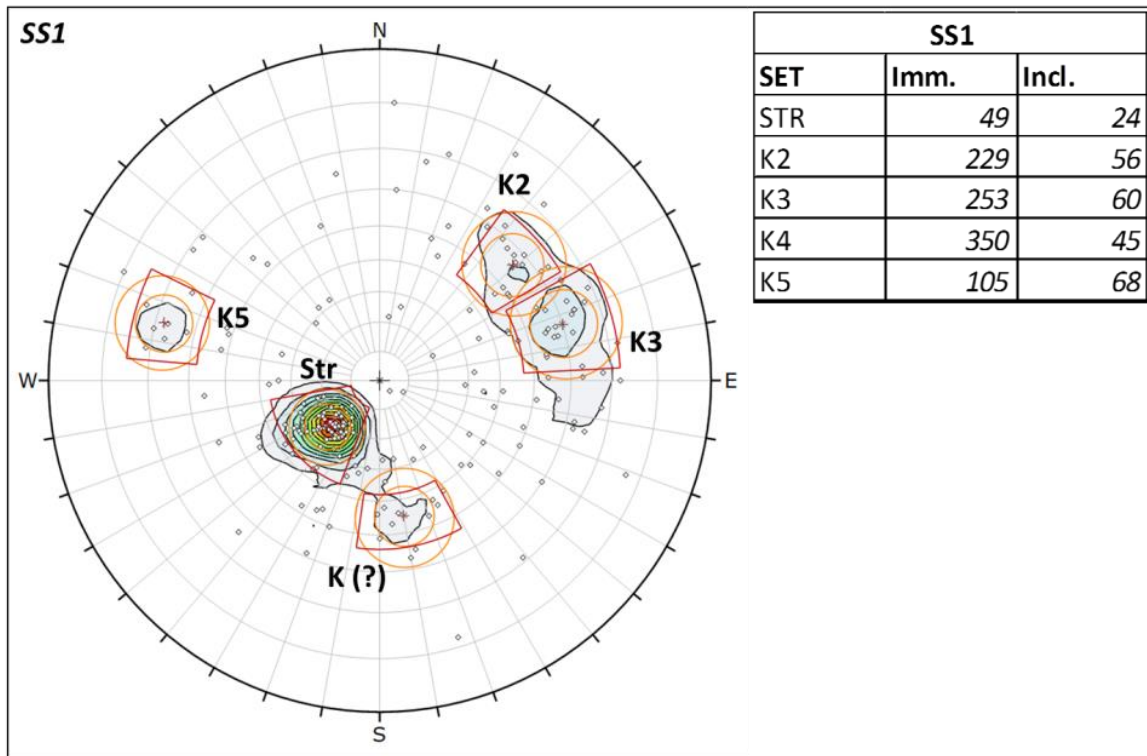


Figura 9.33 – SS1 plot discontinuità.

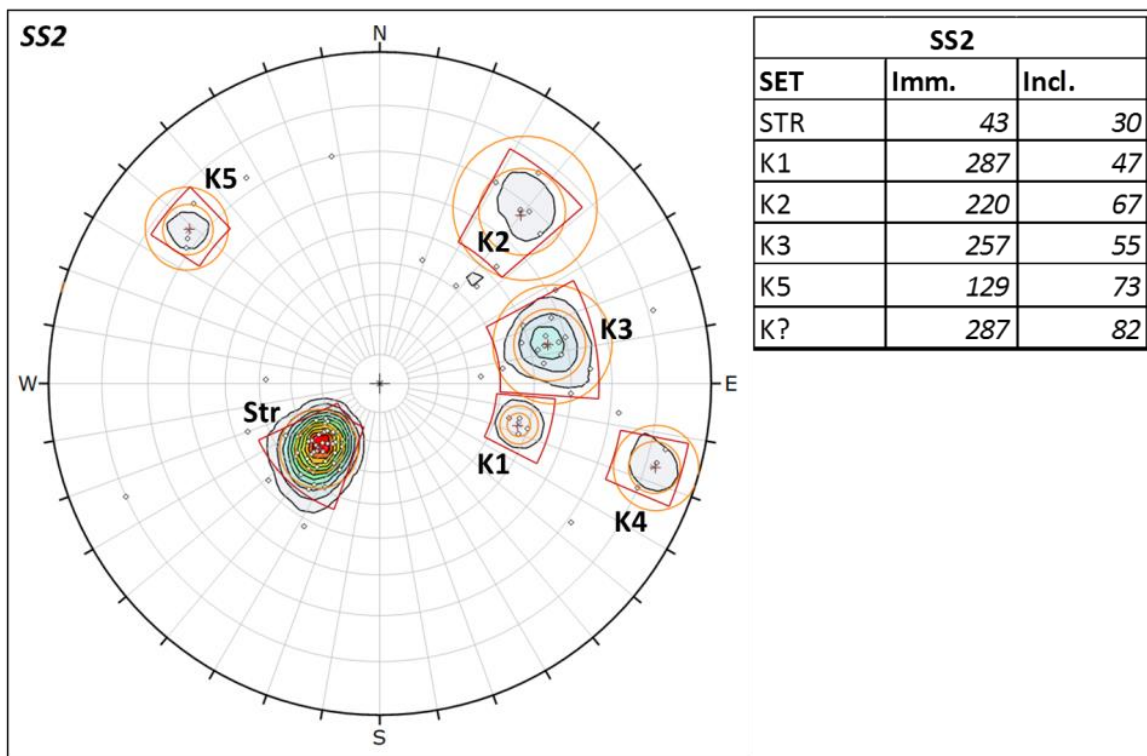


Figura 9.34 – SS2 plot discontinuità.

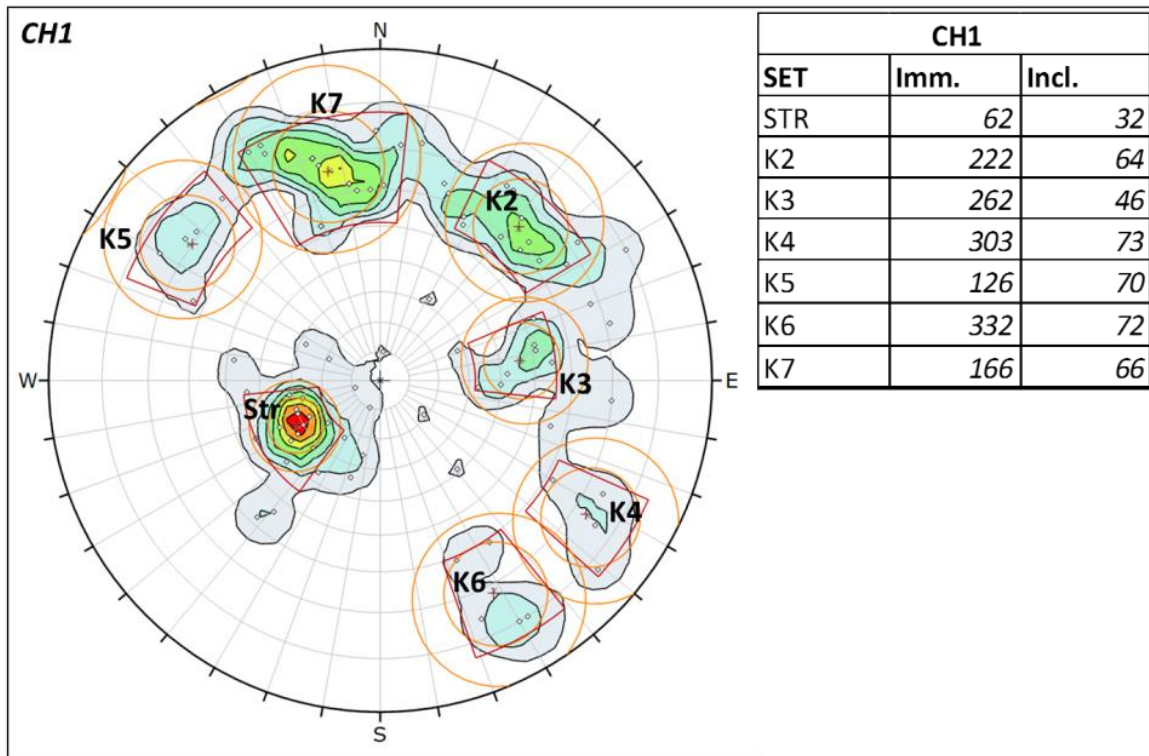


Figura 9.35 – CH1 plot discontinuità.

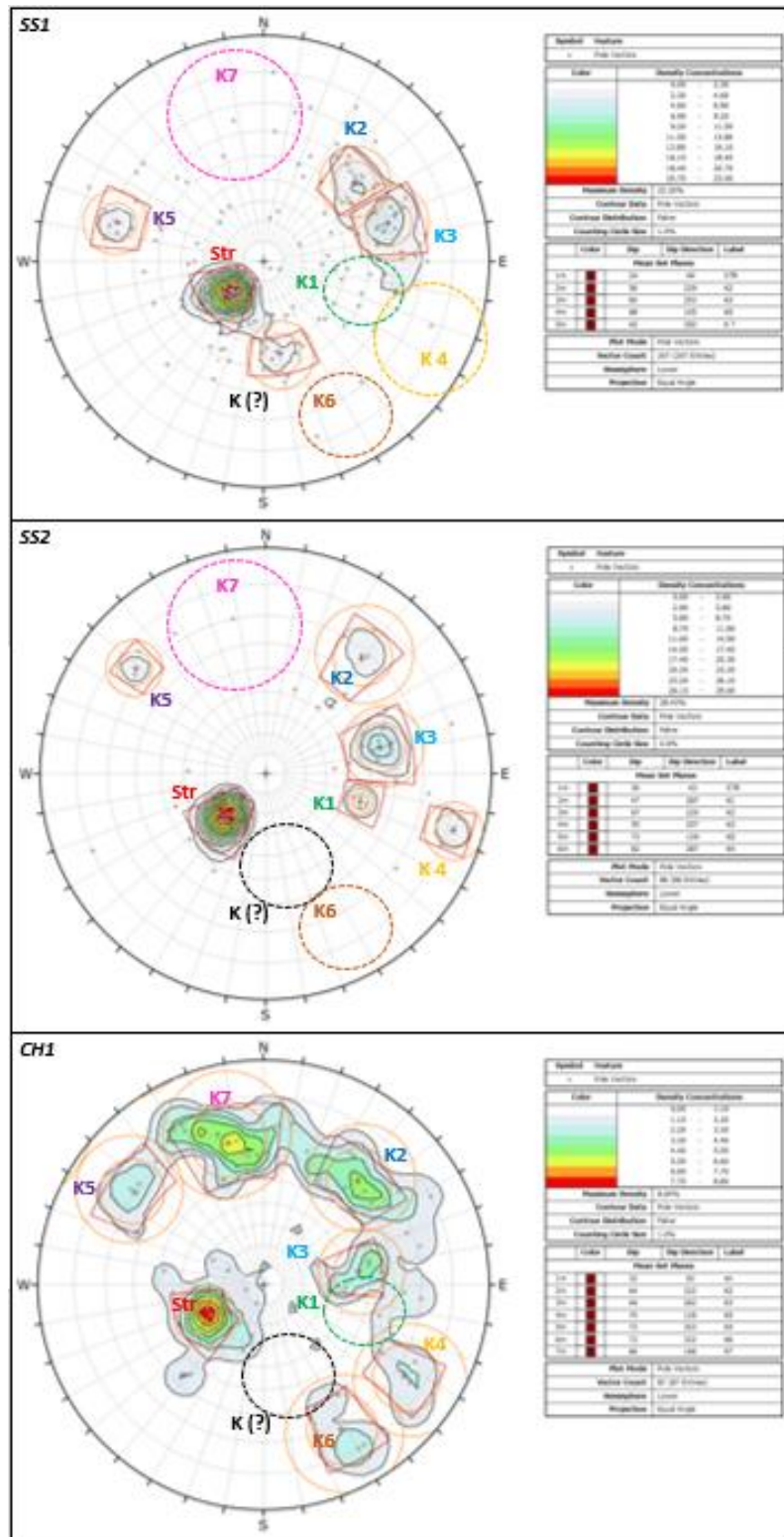


Figura 9.36 – Confronto tra sondaggi in sponda sinistra.

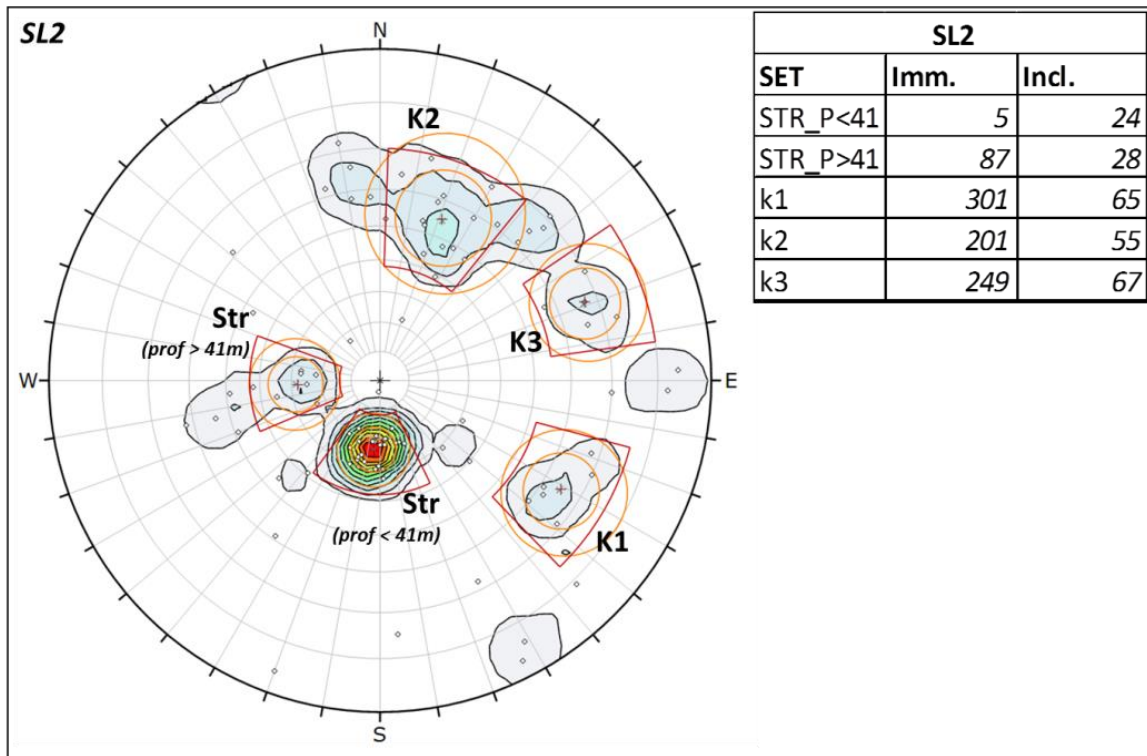


Figura 9.37 – SL2 plot discontinuità.

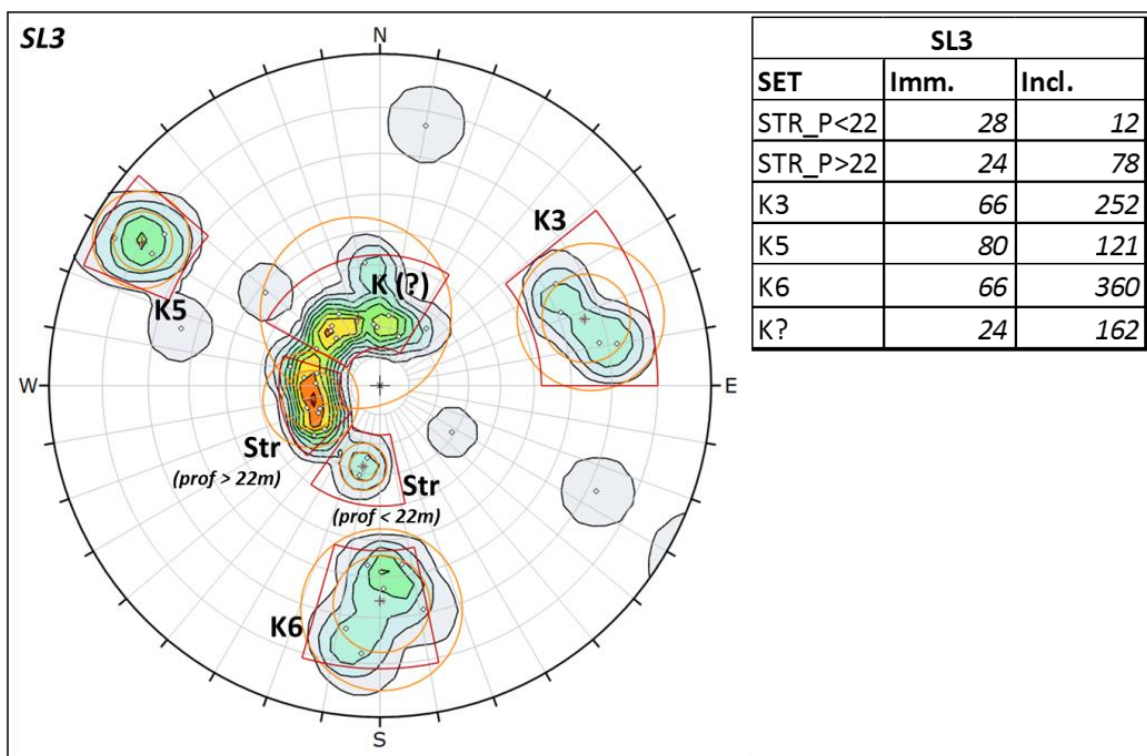


Figura 9.38 – SL3 plot discontinuità.

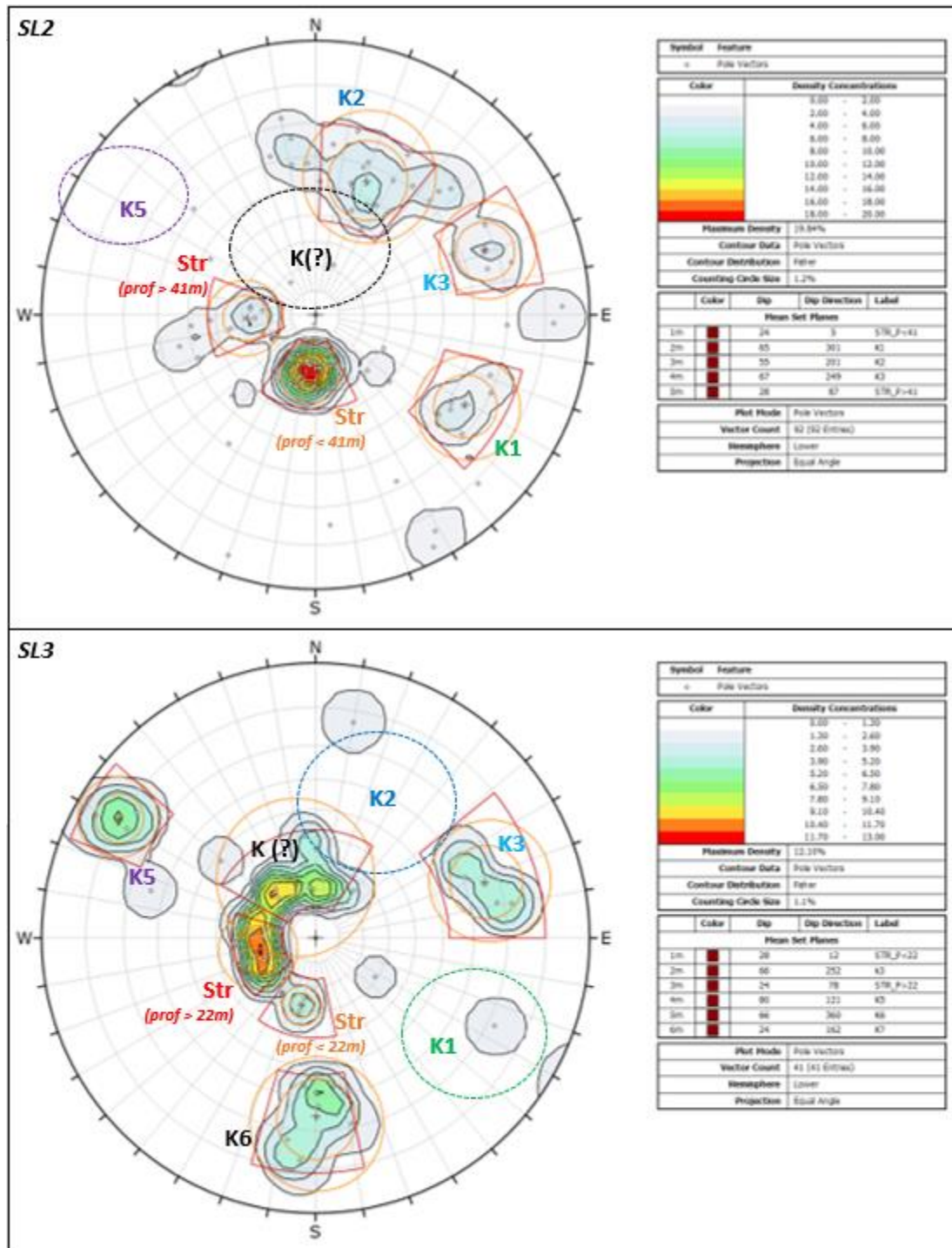


Figura 9.39 – Confronto tra sondaggi in sponda destra.

9.3 Qualità ammasso tramite RQD

Sviluppato da Deere nel 1964, il Rock Quality Designation Index (RQD) è stato uno dei primi metodi di classificazione della qualità dell'ammasso roccioso. Attualmente viene principalmente utilizzato quale parametro nelle principali classificazione di ammasso roccioso (es. RMR di Bieniawski - Q-system di Barton). E' stato utilizzato anche nel presente lavoro per la valutazione del GSI in accordo alla formula proposta da Hoek et alii (2013). È basato sulla percentuale di recupero delle carote estratte da un sondaggio, riferita alla somma degli spezzoni di carota di lunghezza maggiore od uguale a 10 cm, rapportata alla lunghezza della manovra di carotaggio.

$$RQD = \frac{(A)}{l_{tot}} * 100\%$$

(A) = Somma delle lunghezze dei campioni maggiori di 10 cm

l_{tot} = lunghezza totale della manovra di carotaggio

Si tratta di una metodologia standard applicata correntemente nella descrizione delle carote recuperate nei sondaggi e per quanto esistano procedimenti della valutazione della qualità dell'ammasso roccioso più sofisticati ed elaborati, seguita ad aver un ampio uso per la semplicità ed anche perché in alcuni casi costituisce uno dei dati di input nei procedimenti di classificazione più avanzati. Si riportano i dati complessivi dal recupero delle carote (Figura 9.40) e dall'elaborazione delle riprese OPTV e BHTV (Figura 9.41).

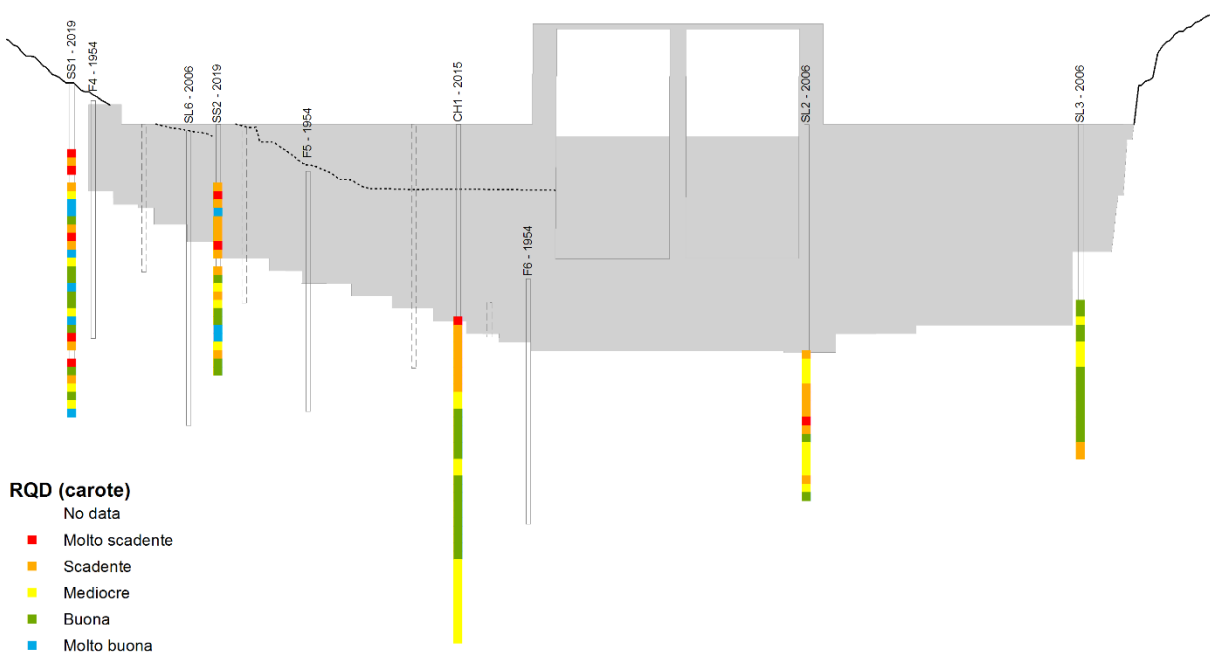


Figura 9.40 – RQD lungo la sezione di imposta diga ricavato dalle analisi delle carote.

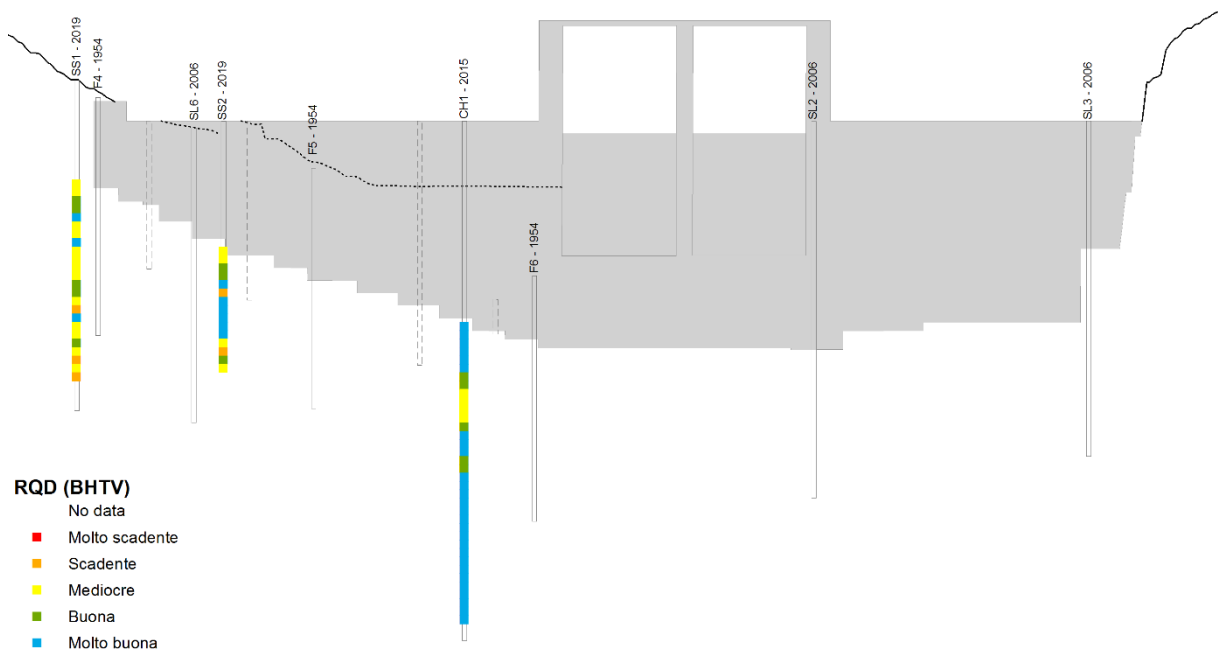


Figura 9.41 - RQD lungo la sezione di imposta diga ricavato dalle riprese televisive.

Nel complesso si osserva una discreta concordanza tra i due diversi set di dati, come riconoscibile anche nei Log dei singoli sondaggi (cfr. § 9.2.3), almeno negli andamenti relativi. Dall'analisi comparata è possibile osservare che l'RQD (entrambi i set) in sponda sinistra indicano una qualità peggiore rispetto alla sponda destra ed in generale la qualità non migliora sensibilmente in profondità tranne che nel CH1.

9.4 Correlazione tra le velocità Vp e l'indice Q di Barton

Come illustrato nella letteratura scientifica (Grimstad & Barton, 1993; Barton 2002), dalle velocità delle onde elastiche P ottenute dalle prove geofisiche in foro è possibile ottenere il valore dell'indice Q di Barton, applicando la formula:

$$Q=10^{((Vp-3500)/1000)}$$

PROF	Vp	T transito Sh	Vsh	Vp/Vs	Q	Classe
1	2036	3.841	807	2.52	0.03	Calcestruzzo
2	2056	3.64	847	2.43	0.04	Calcestruzzo
3	2045	3.997	768	2.66	0.04	Calcestruzzo
4	1870	3.483	879	2.13	0.02	Calcestruzzo
5	2232	5.136	593	3.76	0.05	Calcestruzzo
6	2287	2.568	1182	1.93	0.06	Calcestruzzo
7	2679	1.841	1641	1.63	0.15	Calcestruzzo
8	2456	3.774	799	3.07	0.09	Calcestruzzo
9	1928	3.684	821	2.35	0.03	Calcestruzzo
10	2613	2.478	1222	2.14	0.13	Calcestruzzo
11	2960	2.068	1464	2.02	0.29	Calcestruzzo
12	4121	1.818	1669	2.47	4.18	Calcestruzzo
13	4134	1.75	1739	2.38	4.31	Calcestruzzo
14	4484	1.636	1866	2.40	9.64	Calcestruzzo
15	4457	1.636	1857	2.40	9.06	Calcestruzzo
16	3339	1.773	1712	1.95	0.69	Calcestruzzo
17	3773	1.318	2295	1.64	1.87	Calcestruzzo
18	4175	1.295	2344	1.78	4.73	Calcestruzzo
19	4337	1.295	2353	1.84	6.87	Calcestruzzo
20	4101	1.227	2494	1.64	3.99	Calcestruzzo
21	4090	1.25	2454	1.67	3.89	Calcestruzzo
22	4086	1.227	2497	1.64	3.85	Calcestruzzo
23	3964	1.341	2285	1.73	2.91	Calcestruzzo
24	3538	2.159	1415	2.50	1.09	Calcestruzzo
25	3841	3.595	850	4.52	2.19	Scadente
26	3844	2.947	1037	3.71	2.21	Scadente
27	3962	1.675	1828	2.17	2.90	Scadente
28	3850	3.416	896	4.30	2.24	Scadente
29	3971	1.607	1910	2.08	2.96	Scadente
30	3845	1.674	1827	2.10	2.21	Scadente
31	3943	3.506	869	4.54	2.77	Scadente
32	4060	2.478	1229	3.30	3.63	Scadente
33	3433	3.081	988	3.47	0.86	Molto scadente
34	3434	3.148	967	3.55	0.86	Molto scadente
35	3626	2.389	1276	2.84	1.34	Scadente
36	3857	2.233	1374	2.81	2.28	Scadente
37	4103	2.233	1378	2.98	4.01	Discreta
38	4221	2.099	1463	2.89	5.26	Discreta
39	4218	2.166	1416	2.98	5.22	Discreta
40	4406	2.032	1510	2.92	8.05	Discreta
41	4246	2.144	1440	2.95	5.57	Discreta
42	4116	2.01	1536	2.68	4.13	Discreta
43	4452	2.121	1452	3.07	8.95	Discreta
44	4365	1.764	1743	2.50	7.33	Discreta
45	4439	1.662	1848	2.40	8.69	Discreta
46	4367	1.617	1902	2.30	7.36	Discreta
47	4214	2.813	1089	3.87	5.18	Discreta
48	3966	2.411	1271	3.12	2.92	Scadente
49	4081	2.411	1269	3.22	3.81	Scadente
50	4221	2.411	1273	3.32	5.26	Discreta
51	3872	2.724	1131	3.42	2.36	Scadente
52	4457	2.925	1054	4.23	9.06	Discreta
53	4420	1.92	1609	2.75	8.32	Discreta
54	3876	1.876	1644	2.36	2.38	Scadente
55	3150	1.898	1622	1.94	0.45	Molto scadente
56	3874	1.876	1643	2.36	2.37	Scadente
57	4375	1.629	1892	2.31	7.50	Discreta
58	4241	1.639	1882	2.25	5.51	Discreta
59	3880	1.651	1869	2.08	2.40	Scadente
60	3673	2.077	1487	2.47	1.49	Scadente
61	3882	1.876	1646	2.36	2.41	Scadente
62	3889	1.943	1592	2.44	2.45	Scadente

Q	Qualità
< 0,01	Eccezionalmente Scadente
0,01 - 0,10	Estremamente Scadente
0,10 - 1,00	Molto scadente
1 - 4	Scadente
4 - 10	Discreta
10 - 40	Buona
40 - 100	Molto Buona
100 - 1000	Estremamente Buona
400 - 1000	Eccezionalmente Buona

Tabella 9.8 – Calcolo dell'indice Q di Barton per il Cross Hole eseguito tra CH1 e CH2.

I dati di input utilizzati sono quelli del *Cross Hole* eseguito tra i sondaggi CH1 e CH2. I risultati di questo calcolo applicato alle velocità V_p sono proposti nella Tabella 9.8, dove sono anche riassunti i calcoli numerici relativi ai rapporti delle velocità V_p/V_s ed appunto agli indici Q-System di Barton Q, metro per metro.

Relativamente alla classificazione di Barton *et alii* (1974), si evidenzia come tali risultati siano fortemente vincolati al dato di partenza delle velocità delle onde V_p . Tuttavia, la formula consente di ancorare i risultati delle prospezioni geofisiche in foro ad una classificazione geomeccanica ampiamente riconosciuta a livello internazionale.

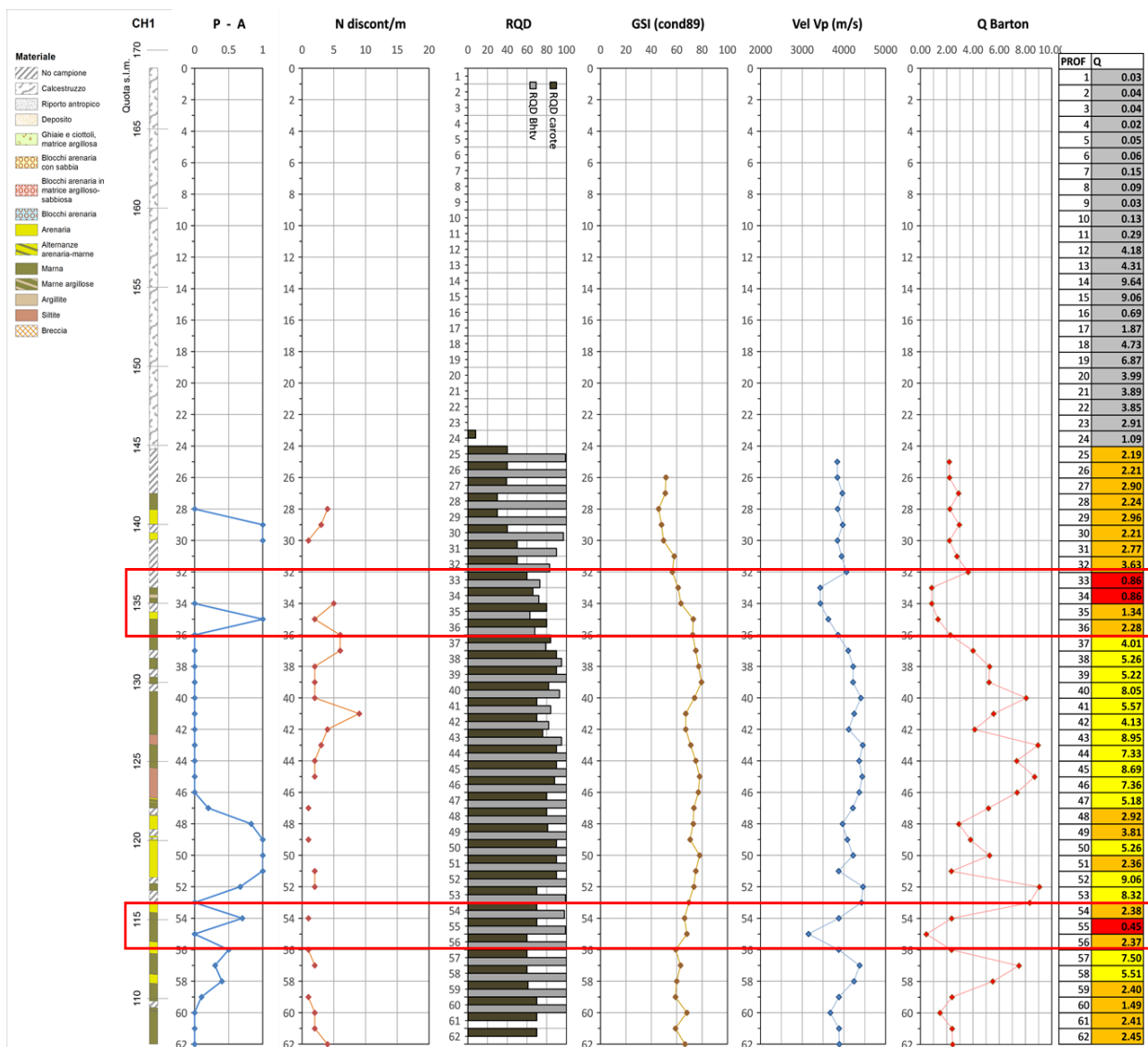


Figura 9.42 – Sondaggio CH1: variazione con la profondità di vari parametri descrittivi delle condizioni d'ammasso.

In Figura 9.42, secondo la classificazione Q di Barton si evidenziano due livelli con qualità “molto scadente” alle profondità di circa 33-34 m e 55 m dal piano campagna. Poiché l’approccio utilizzato deriva l’indice Q dalle onde V_p , risulta chiaramente che tali intervalli siano anche evidenziati dall’andamento di queste onde. Infatti, in questi livelli le onde V_p hanno velocità minori di 3500 m/s. Le basse velocità delle V_p registrate per questi spessori possono essere riconducibili alla presenza di

fratture aperte. La correlazione fra tutti gli abbassamenti dei valori delle Vp e quindi di Q e la presenza di fratture beanti è dimostrata dallo schema di Figura 9.43. In questo schema, al variare della profondità, è nuovamente proposta, ma con maggiore dettaglio rispetto alle figure precedenti, la classificazione dei vari intervalli metrici in base all'indice Q, evidenziando però tutti i livelli in cui dalle analisi delle immagini della BHTV (Figura 9.44) sono state rilevate fratture aperte maggiori di 5 mm. Nello schema di Figura 9.45 sono invece elencate tutte le fratture indipendentemente dal tipo o dall'apertura.

Dall'osservazione di Figura 9.43 si evidenzia quindi una buona corrispondenza fra tutti i livelli di più bassa qualità (non solo quelli "molto scadenti" sopra citati) e la presenza di fratture beanti. Con particolare riguardo ai due livelli sopra menzionati, ossia alle profondità di circa 33-34 m e 55 m dal p.c., la correlazione è ottima nel primo caso, meno nel secondo.

Tali intervalli non sono evidenziati come i più scadenti dall'indice GSI. Nella classificazione GSI dei sondaggi adottata in questo studio, mutuata dai lavori di Hoek et alii (2013), la presenza di fratture aperte è presa in considerazione dai parametri di apertura e riempimento mutuati dalla classificazione RMR (vedi al prossimo paragrafo il parametro JCond89 descritto al punto 4 dello schema di Figura 9.50). Ma la presenza di fratture aperte non riesce ad influenzare il valore finale di GSI, tanto quanto invece riesce a fare nella classificazione Q basata sulle Vp. Questo perché generalmente, nella formula di Hoek et alii (2013), nella determinazione del GSI ha maggiore peso il valore di RQD, quindi il numero delle fratture rispetto a come queste si presentano.

Nelle foto delle cassette catalogatrici dei sondaggi di Figura 9.46 e Figura 9.47, sono riportati gli spezzoni di carota relativi ai due principali intervalli di profondità in questione. Si osserva che le fratture in gran parte beanti, come denunciato dalle BHTV, disarticolano le carote in spezzoni generalmente nettamente superiori a 10 cm. Ciò implica RQD mediamente superiori al 60% e quindi valori discreti di GSI (vedi Figura 9.43). Anche se in queste posizioni si registrano comunque alcuni dei più bassi valori del parametro JCond89 (vedi ancora Figura 9.43), comunque non tanto scarsi da influenzare sensibilmente in modo negativo i rispettivi GSI.

Comunque, osservando Figura 9.42, si nota che al variare della profondità le curve del GSI (curva arancio) e delle Vp (curva blu) hanno andamenti tendenzialmente simili. Ossia all'inizio ed alla fine del sondaggio, ovvero rispettivamente prima dei 37 m dal p.c. e dopo i 53 m dal p.c., gli ammassi sono di qualità più scadente rispetto alla parte centrale. Questo non solo confrontando il GSI e l'RQD, ma bensì secondo tutti i parametri e le classificazioni prese in considerazione.

Quindi i due diversi approcci legati alle classificazioni degli indici Q derivati dalle Vp e GSI mutuati dalla combinazione di RQD e JCond89, talvolta esaltano diverse caratteristiche degli ammassi indagati. Proprio per tale ragione, questi due approcci risultano complementari e, quando possibile, dovrebbero essere usati congiuntamente.

RQD (%)	Qualità ammasso (Deere (1964))	Q	Qualità ammasso (Barton et al., 1974)
< 25	Molto scadente	< 0.01	eccezionalmente scadente
25 - 50	Scadente	0.01 - 0.1	estremamente scadente
50 - 75	Mediocre	0.1 - 1	molto scadente
75 - 90	Buona	1 - 4	scadente
90 - 100	Molto buona	4 - 10	discreta
		10 - 40	buona
		40 - 100	molto buona
		100 - 400	estremamente buona
		400 - 1000	eccezionalmente buona

RQD	JCond89	GSI	profondità da p.c. (m)	indice Q	dettaglio classe di qualità Q
40	21.0	52	26	2.2	1 - 4
39	21.0	51	27	2.9	
30	20.5	46	28	2.2	
30	22.0	48	29	3.0	
40	19.7	50	30	2.2	1 - 4
50	22.0	58	31	2.8	
50	21.0	57	32	3.6	< 1
60	20.8	61	33	0.9	
66	20.2	63	34	0.9	< 1
80	22.0	73	35	1.3	1 - 4
80	21.7	73	36	2.3	
84	22.0	75	37	4.0	4 - 6
90	21.5	77	38	5.3	
90	23.0	80	39	5.2	> 6
82	22.0	74	40	8.1	
70	21.4	67	41	5.6	4 - 6
70	21.4	67	42	4.1	
76	22.0	71	43	9.0	> 6
90	20.0	75	44	7.3	
90	22.0	78	45	8.7	
88	22.0	77	46	7.4	
80	22.3	74	47	5.2	4 - 6
80	22.0	73	48	2.9	1 - 4
81	20.0	71	49	3.8	
90	22.0	78	50	5.3	4 - 6
90	20.0	75	51	2.4	1 - 4
90	19.0	74	52	9.1	> 6
70	23.0	70	53	8.3	1 - 4
70	20.8	66	54	2.4	
70	22.0	68	55	0.4	< 1
60	19.5	59	56	2.4	1 - 4
60	22.0	63	57	7.5	> 6
60	20.0	60	58	5.5	4 - 6
61	19.0	59	59	2.4	1 - 4
70	22.0	68	60	1.5	
70	16.0	59	61	2.4	
70		67	62	2.4	

Figura 9.43 – Sondaggio CH1: confronto fra le variazioni di qualità d’ammasso classificate secondo i diversi indici (RQD, GSI e Q).

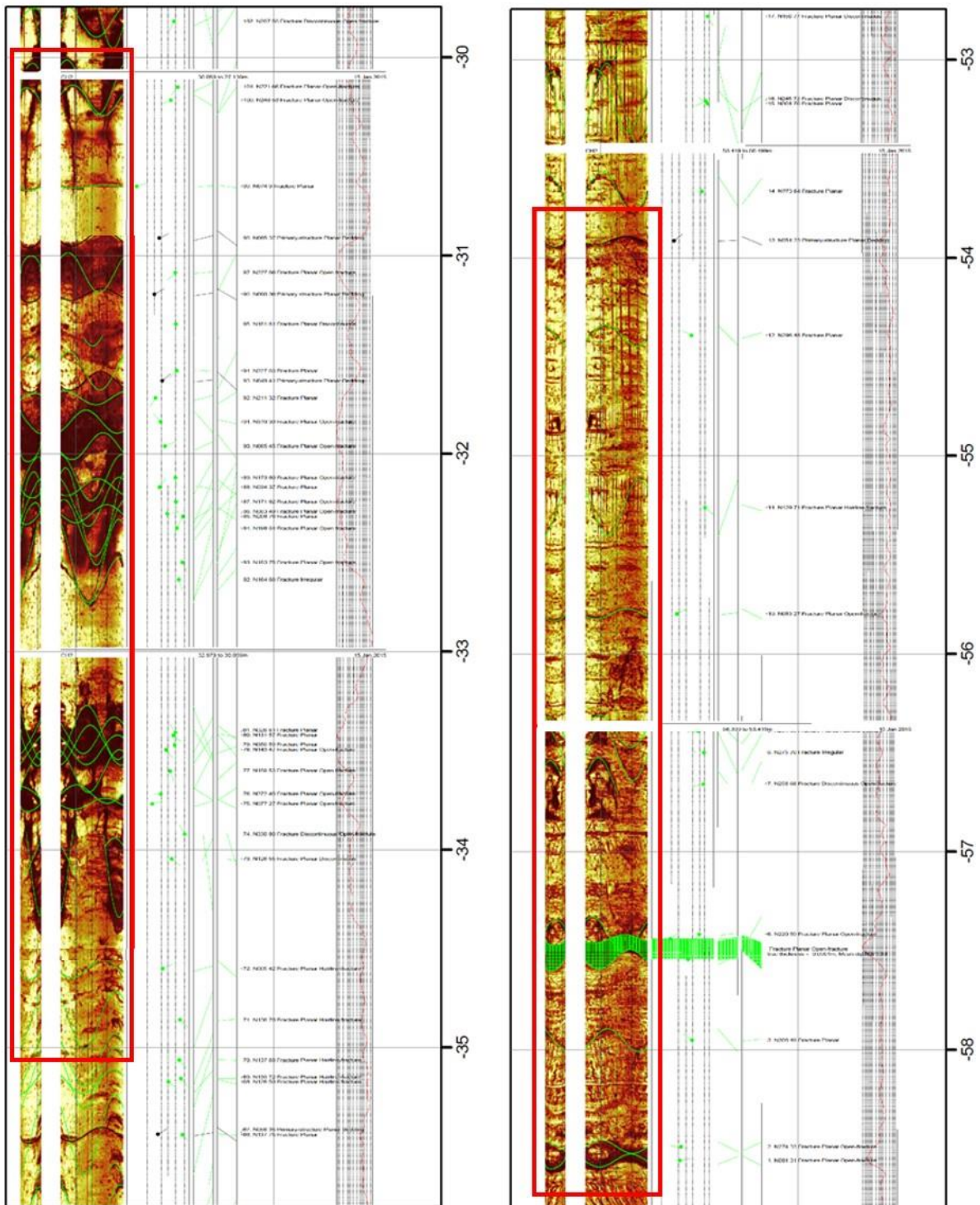


Figura 9.44 – Log della sonda televisiva BHTV per le profondità corrispondenti alla roccia di qualità “scadente” e “molto scadente” fra circa 30 e 35 m dal p.c. e tra circa 54 e 59 m nel sondaggio CH1.

Intervallo metrico di profondità (m da p.c.)	Profondità discontinuità (m da p.c.)	Immissione	Inclinazione	Descrizione frattura
28	27.9	116	28	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	28.3	185	71	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	28.4	256	71	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	28.5	249	28	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	28.7	300	62	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	28.8	39	54	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
30	29.0	208	56	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
	29.1	267	42	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
	29.5	120	75	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
	29.6	177	60	2 - Frattura semi-aperta < 5 mm, con riempimento
	29.7	297	74	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
	29.8	207	58	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
31	30.1	221	66	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
	30.2	248	53	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
	30.6	74	9	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
	30.9	65	37	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
32	31.1	227	60	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
	31.2	60	30	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
	31.4	181	61	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	31.6	227	63	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	31.6	49	41	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	31.7	211	32	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
33	31.8	319	39	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
	31.9	65	45	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
	32.1	173	60	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
	32.1	34	37	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	32.2	171	62	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
	32.3	171	62	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
	32.4	198	64	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
	32.5	153	75	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
34	32.6	164	68	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
	33.4	326	61	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	33.6	159	53	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
	33.6	159	53	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
	33.7	272	40	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
	33.8	77	27	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
35	/	/	/	/
36	35.1	139	72	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	35.8	163	70	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
37	36.0	163	70	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	36.2	163	70	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	36.9	42	58	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
38	37.1	17	34	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	37.6	45	32	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
39	38.6	235	72	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	38.7	186	10	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
40	39.9	238	67	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
41	40.0	21	10	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	40.3	32	23	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
	40.5	113	63	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
	40.6	113	19	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	40.8	213	70	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
42	41.0	257	51	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	41.0	200	62	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	41.1	56	36	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	41.2	13	26	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
43	41.7	242	80	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	42.0	328	80	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	42.0	190	72	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	42.4	179	74	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
44	/	/	/	/
45	44.6	126	72	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
46	/	/	/	/
47	46.0	337	76	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	46.8	337	61	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
48	47.0	233	62	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	47.0	259	51	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
49	48.3	311	82	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
	48.5	285	56	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
50	49.5	264	55	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	49.6	57	33	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	49.7	68	30	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
51	/	/	/	/
52	51.5	85	44	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
53	52.5	153	77	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	52.8	150	77	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	53.1	215	70	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
54	53.2	304	76	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	53.6	273	64	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	53.9	51	23	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
55	54.3	98	48	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
56	55.4	129	71	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	55.8	63	27	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
57	56.5	275	70	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	56.6	250	68	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
	57.4	220	59	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
58	57.5	71	30	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
	57.9	308	19	1 - Frattura semi-aperta < 5 mm, no riempimento
59	58.5	274	33	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento
	58.5	81	31	3 - Frattura aperta > 5 mm, no riempimento

Figura 9.45 – Fratture rilevate dalle analisi delle immagini BHTV del sondaggio Ch1.

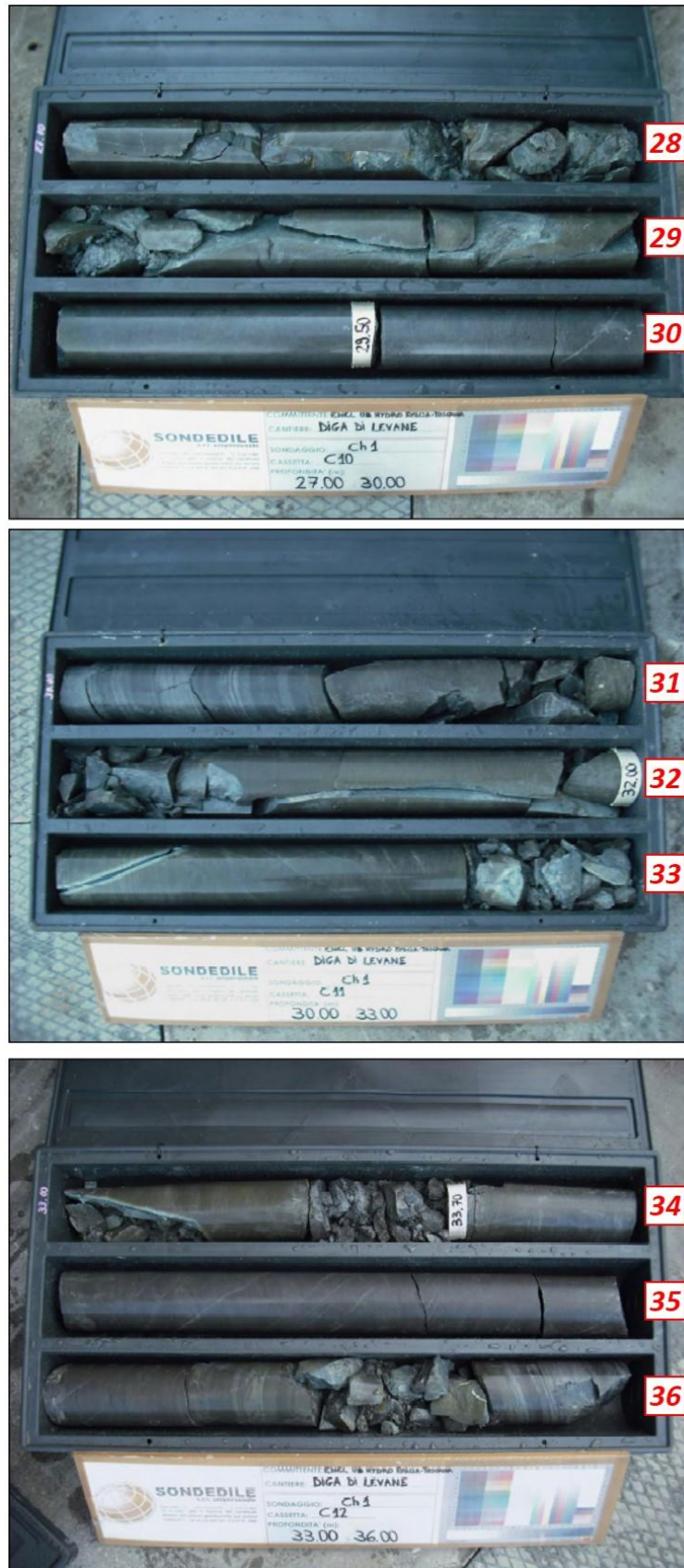


Figura 9.46 – Foto delle cassette catalogatrici del sondaggio CH1 fra 27 m e 36 m da p.c..



Figura 9.47 – Foto delle cassette catalogatrici del sondaggio CH1 fra 54 m e 60 m da p.c..

9.5 Indice GSI dei sondaggi

9.5.1 Formula di calcolo

L'indice GSI è usato in stretta congiunzione con il criterio di rottura di Hoek e Brown (1980) ed ha preso forma di classificazione nel 1994. Il concetto che sta alla base del GSI, sviluppato da Hoek, è quello di combinare l'assetto strutturale dell'ammasso con le caratteristiche della superficie delle discontinuità (Figura 9.48; Hoek e Marinos, 2000). Tale metodo di classificazione vede la sua valutazione affidata ad un semplice grafico in cui le caratteristiche strutturali dell'ammasso in termini di grado di fratturazione e disturbo tettonico sono intercorrelate con le caratteristiche della superficie delle discontinuità in termini di rugosità, alterazione e riempimento di fratture (Figura 9.48).







GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000) From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.		SURFACE CONDITIONS				
STRUCTURE		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40	30	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10
		← DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES				

Figura 9.48 – Schema per la determinazione parametri utili alla classificazione GSI (Marinos & Hoek, 2000).

Nell'ambito del presente studio, la stima dell'indice GSI degli ammassi attraversati dai sondaggi, è stata portata a termine grazie alla formula alla base del grafico di Figura 9.49. Tale formula è stata proposta da Hoek et alii (2013)¹ e lega l'indice GSI al valore di RQD ed alle condizioni delle discontinuità (JCond89) così come intese nella classificazione RMR di Bieniawski (1989):

$$GSI = 1.5JCond_{89} + RQD/2 \quad [5.3.4]$$

Il parametro JCond89 descrive le condizioni delle discontinuità così come intese nella classificazione RMR di Bieniawski (1989). Ovvero il valore di JCond89 è dato dalla somma dei punteggi secondo la classificazione RMR dei parametri relativi alle condizioni medie dei giunti riguardo (punto 4 dello schema di Figura 9.50):

- ✓ persistenza;
- ✓ apertura;
- ✓ rugosità;
- ✓ alterazione;
- ✓ riempimento.

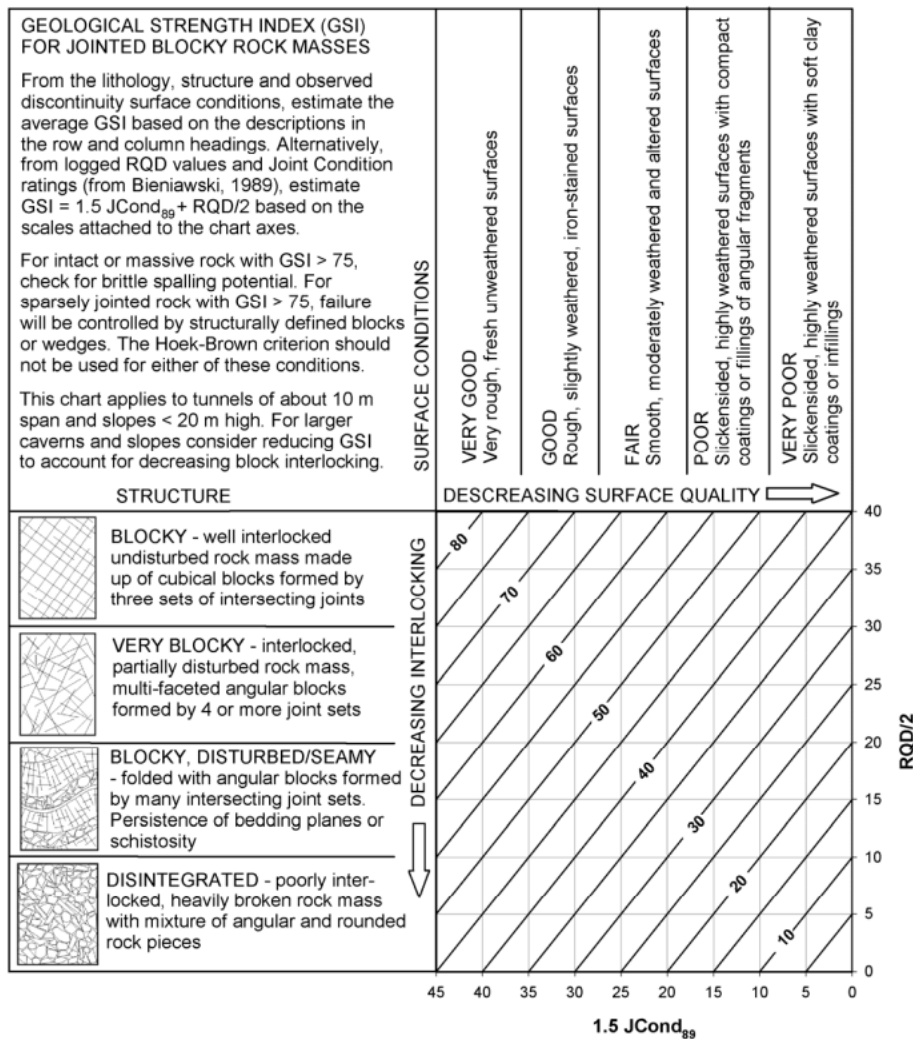


Figura 9.49 – Schema per la determinazione parametri utili alla classificazione GSI modificato per l'analisi delle carote di sondaggio (Hoek et alii (2013)).

¹ Hoek, E.; Carter, T.; Diederichs, M. 2013. Quantification of the geological strength index chart, in 47th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 23–26 June 2013, San Francisco, CA, USA, 13–672.

PARAMETER		Range of values // RATINGS								
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range uniaxial compr. strength is preferred			
		Uniaxial compressive strength	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa	
		RATING	15	12	7	4	2	1	0	
2	Drill core quality RQD		90 - 100%	75 - 90%	50 - 75%	25 - 50%	< 25%			
		RATING	20	17	13	8	5			
3	Spacing of discontinuities		> 2 m	0.6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm			
		RATING	20	15	10	8	5			
4	Condition of discontinuities	Length, persistence	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m			
			Rating	6	4	2	1	0		
		Separation	none	< 0.1 mm	0.1 - 1 mm	1 - 5 mm	> 5 mm			
			Rating	6	5	4	1	0		
		Roughness	very rough	rough	slightly rough	smooth	slickensided			
			Rating	6	5	3	1	0		
		Infilling (gouge)	none	Hard filling			Soft filling			
	Rating	6	4	2	2	0				
	Weathering	unweathered	slightly w.	moderately w.	highly w.	decomposed				
	Rating	6	5	3	1	0				
5	Ground water	Inflow per 10 m tunnel length	none	< 10 litres/min	10 - 25 litres/min	25 - 125 litres/min	> 125 litres /min			
			p_w / σ_1	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
			General conditions	completely dry	damp	wet	dripping	flowing		
			RATING	15	10	7	4	0		

p_w = joint water pressure; σ_1 = major principal stress

RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS

		Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very unfavourable
RATINGS	Tunnels	0	-2	-5	-10	-12
	Foundations	0	-2	-7	-15	-25
	Slopes	0	-5	-25	-50	-60

ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS

Rating	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Class No.	I	II	III	IV	V
Description	VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR

Figura 9.50 – Parametri di input della classificazione RMR (Bieniawski, 1989) e classi di ammasso roccioso determinate dal totale dei diversi parametri. In rosso sono evidenziati i parametri descrittivi delle condizioni delle discontinuità utili a definire il valore dell'indice JCond89.

I sondaggi analizzati con questa procedura sono SS1, SS2, CH1, SL2, SL3.

I valori di RQD utilizzati per l'applicazione della formula proposta da Hoek et alii (2013)², sono stati presi direttamente dalle stratigrafie dei sondaggi e sono illustrati al paragrafo 9.3.

Il valore di JCond89 è stato valutato metro per metro utilizzando le informazioni sulle discontinuità relativamente ai già menzionati parametri di apertura, rugosità, riempimento e alterazione. La classificazione dei giunti è avvenuta in funzione di quanto emerso sia direttamente in sito dall'osservazione delle cassette catalogatrici dei più recenti SS1 e SS2, che dall'analisi delle video ispezioni, stratigrafie ed annesse relazioni per tutti i sondaggi. Chiaramente la lunghezza e la tipologia di terminazione delle discontinuità non possono essere valutate dall'analisi delle carote. Quindi al parametro di persistenza è stato sempre attribuito un valore medio cautelativo di 3 punti, intermedio fra le due classi di persistenza 1-3m e 3-10m, secondo la classificazione RMR di Bieniawski (1989). Ciò è concorde con quanto emerso dalle osservazioni di superficie.

² Hoek, E.; Carter, T.; Diederichs, M. 2013. Quantification of the geological strength index chart, in 47th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 23–26 June 2013, San Francisco, CA, USA, 13–672.

9.5.2 Elaborazioni

Attraverso la procedura sintetizzata nel precedente paragrafo sono stati classificati metro per metro secondo l'indice GSI i sondaggi SS1, SS2, CH1, SL2, SL3, come raffigurato lungo lo schema della sezione d'imposta di Figura 9.51.

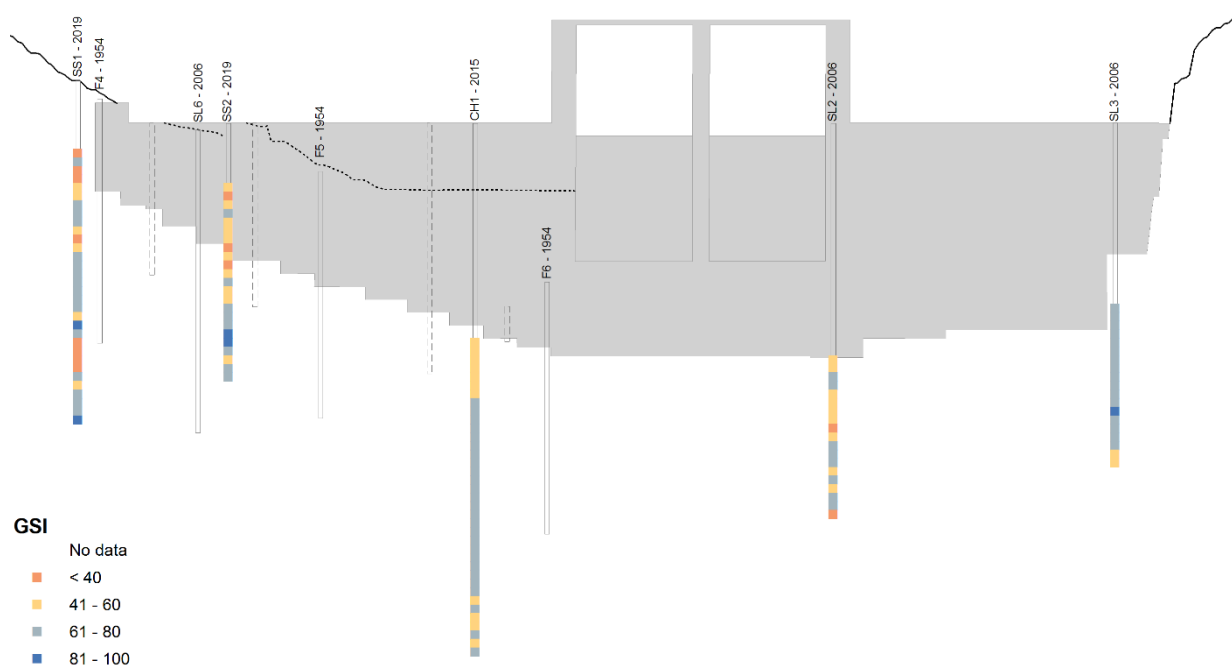


Figura 9.51 – Variazione dell'indice GSI lungo le verticali dei sondaggi SS1, SS2, CH1, SL2, SL3 proiettati su uno schema della sezione d'imposta.

In Figura 9.52 si possono visualizzare le variazioni metro per metro di RQD, del rapporto arenaria/siltite-marna (A/P) e dell'indice GSI lungo le verticali dei sondaggi. Dall'analisi di questo schema di sintesi emerge principalmente che i sondaggi SS1, SS2 e SL2 presentano i più bassi valori di RQD e GSI. In particolare, in SS2 si segnalano a 9, 15 e 17 metri dal piano campagna tre intervalli con valori di GSI e RQD rispettivamente inferiori a 40 e 10. Il primo intervallo è dato da alternanze fra arenarie e marne-siltose, con prevalenza di questi ultimi litotipi. I due intervalli più profondi sono invece costituiti da litotipi marnoso-siltosi. Intervalli metrici caratterizzati da valori di GSI minori di 40 ed associati bassi RQD si rilevano a varie profondità anche in SS1 e SL2.

In SS1, SS2 e SL2, se si considera il variare del GSI con la litologia, si nota che i valori medi più bassi si registrano nei tratti di sondaggio costituiti da marne-siltose o dall'alternanza di questi litotipi con le arenarie.

I sondaggi CH1 e SL3 hanno valori medi di GSI e RQD nettamente più elevati rispetto a SS1, SS2 e SL2.

SS1					SS2					CH1					SL2					SL3												
prof. (m)	RQD	GSI	A/P		prof. (m)	RQD	GSI	A/P		prof. (m)	RQD	GSI	A/P		prof. (m)	RQD	GSI	A/P		prof. (m)	RQD	GSI	A/P		prof. (m)	RQD	GSI	A/P				
9	7	39	1		8	23	43	0.4		26	40	52	0		28	50	57	0.3		22	90	77	0.9		22	84	76	1				
10	50	61	1		9	10	38	0.4		27	39	51	0		29	55	60	1		23	84	76	1		24	70	71	0.1				
11	10	39	0		10	45	57	1		28	30	46	0		30	60	64	1		24	70	71	0.1		25	79	73	0.4				
12	0	35	0		11	100	79	1		29	30	48	1		31	60	62	1		25	79	73	0.4		26	77	75	0.7				
13	40	50	0		12	33	51	1		30	40	50	1		32	46	56	0.6		26	77	75	0.7		27	70	62	0.5				
14	60	57	0		13	33	50	0.8		31	50	58	0		33	40	52	0.5		27	70	62	0.5		28	70	66	0.5				
15	100	78	0.6		14	35	51	0		32	50	57	0		34	40	51	0.5		28	70	66	0.5		29	73	70	0.6				
16	100	78	1		15	10	34	0		33	60	61	0		35	95	79	0		29	73	70	0.6		30	80	67	1				
17	85	71	1		16	30	44	0		34	80	73	0		36	90	75	0		30	80	67	1		31	80	73	1				
18	50	50	0.2		17	0	24	0		35	80	73	0.8		37	90	72	0		31	80	73	1		32	82	77	0				
19	20	38	0		18	50	52	1		36	80	74	0.2		38	80	72	0.4		32	82	77	0		33	90	80	0				
20	30	45	0		19	90	68	1		37	80	73	0.8		39	90	71	1		33	90	81	0		34	90	81	0				
21	100	77	0		20	75	60	1		38	90	77	0		40	100	82	0		34	90	81	0		35	90	75	0				
22	70	64	0		21	40	45	0.5		39	90	80	0		41	70	67	0		35	90	75	0		36	90	74	1				
23	90	73	0		22	60	62	0		40	82	74	0		42	70	67	0		36	90	74	1		37	90	78	1				
24	80	67	0		23	90	67	0		41	70	67	0		43	76	71	0		37	90	78	1		38	90	72	0.5				
25	95	79	0		24	90	74	0		42	90	75	0		44	90	75	0		38	90	72	0.5		39	30	44	1				
26	90	75	0		25	100	82	0		43	90	78	0		45	90	78	0		39	30	44	1		40	30	44	1				
27	90	72	0		26	100	82	0		44	90	75	0		46	88	77	0		40	30	44	1									
28	60	56	0		27	70	63	0		45	90	78	0		47	80	74	0.2														
29	100	82	0		28	50	53	0		46	80	74	0.2		48	80	73	0.8														
30	90	73	0		29	90	71	0		47	80	74	0.2		49	81	71	1														
31	20	37	0		30	80	62	0		50	90	78	1		50	90	78	1														
32	30	39	0		31	40	45	0.5		51	90	75	1		51	90	75	1														
33	0	23	0		32	60	62	0		52	90	74	0.7		52	90	74	0.7														
34	20	33	0.8		33	90	67	0		53	70	70	0		53	70	70	0														
35	90	71	1		34	90	74	0		54	70	66	0.7		54	70	66	0.7														
36	40	49	1		35	100	82	0		55	70	68	0		55	70	68	0														
37	60	62	1		36	100	82	0		56	60	59	0.5		56	60	59	0.5														
38	80	72	0.4		37	70	63	0		57	60	63	0.3		57	60	63	0.3														
39	70	67	0		38	50	53	0		58	60	60	0.4		58	60	60	0.4														
40	100	82	0		39	90	71	0		59	61	59	0.1		59	61	59	0.1														
					40	80	62	0		60	70	68	0		60	70	68	0														
					min	10	38	0.4		min	60.0	59	0.1		min	20	37	0.2														
					media	27	44	0.5		media	70.1	66	0.5		media	48	55	0.4														
					max	40	50	0.8		max	90.0	74	0.8		max	80	73	0.6														
					min	33	51			min	30.0	48			min	0	30															
					media	66	61			media	68.5	66			media	60	61															
					max	100	79			max	90.0	78			max	80	72															
					min	0	24			min	30.0	46			1	valore	40	49														
					media	62	59			media	72.2	67																				
					max	100	82			max	90.0	80																				
					min	0	24			min	30	46			min	0	30															
					media	57	57			media	69	66			media	54	58															
					max	100	82			max	90	80			max	80	73															

Figura 9.52 – Variazione metro per metro di RQD, del rapporto arenaria/siltite-marna (A/P) e dell'indice GSI lungo le verticali dei sondaggi SS1, SS2, CH1, SL2, SL3. In rosso sono evidenziati i metri di sondaggio con i più bassi valori di GSI, ovvero inferiori a 40. Con i colori marroncino, verde ed azzurro sono rispettivamente evidenziati i metri di sondaggio costituiti da arenarie, marne/siltiti e loro alternanze in rapporto variabile. In basso nel riquadro in grassetto, per ogni verticale è riportata la statistica dei vari parametri sia per litologia che relativa all'intero sondaggio.

9.6 Analisi delle prove di laboratorio

Nello schema di Figura 9.56 è riportato l'elenco dei risultati delle prove di laboratorio disponibili per i sondaggi in esame. In particolare, sono evidenziate le elaborazioni statistiche relative ai risultati delle prove di laboratorio utili a stimare le proprietà e le caratteristiche di resistenza delle rocce poste al di sotto del piano di fondazione della diga secondo la metodologia proposta da Hoek, Carranza-Torres & Corkum (2002). Nel presente lavoro si è concentrata l'attenzione sui parametri di resistenza alla compressione di picco (σ_c), peso di volume e modulo elastico tangente al 50 % della σ_c (Et_{50}). Le analisi statiche di questi dati sono state eseguite considerando vari insiemi di campioni e a seconda della litologia di appartenenza: arenarie e marne-siltose. L'unico campione di argillite noto (C2) è stato prelevato in SS2, ma su di esso non è stato possibile eseguire nessuna prova di laboratorio, a causa delle sue condizioni, connesse all'intrinseca scarsa qualità del materiale.

Relativamente ai tre parametri alla base delle future elaborazioni, si sottolinea che per solo una parte dei campioni sono disponibili contemporaneamente i valori di σ_c , Et_{50} , peso di volume.

I dati di σ_c e Et_{50} provengono da prove di resistenza alla compressione di tipo monoassiale, ad eccezione dei quattro campioni Li1, Li4, Li7 e Li8 tutti arenacei del sondaggio CH1 su cui sono state condotte prove triassiali. Mancano quindi dati di test triassiali per i litotipi marnoso-siltosi. I numerosi dati di resistenza alla compressione derivati dalle prove monoassiali rappresentano comunque un campione statistico più che sufficiente per caratterizzare la variabilità di σ_c e Et_{50} per le litologie in esame.

In sintesi, i valori ricavati dall'elaborazione statistica dei dati disponibili, variano a seconda che si stia analizzando un intervallo arenaceo o marnoso-siltoso e sono rispettivamente elencati nella sottostante Tabella 9.9.

parametri	litotipi	
	arenaceo	marnoso-siltoso
σ_c (Mpa)	36.30	33.90
Et_{50} (Mpa)	8555	7872
Peso Vol. reale (Mpa)	26.40	26.76

Tabella 9.9 –Valori di σ_c , Et_{50} e peso di volume caratteristici degli intervalli arenacei e marnoso-siltosi.

Questi risultati sono stati ottenuti dall'elaborazione dei dati dei campioni elencati nella sottostante Tabella 9.10.

sondaggio	campioni	
	arenaceo	marnoso-siltoso
CH1	Li4	Li2
	Li6	
	Li9	
SL2	C5	C6
	C7	
SL3	C2	C3
SL6	/	C1
SS1	C1	C2
	C4	C3
		C5
SS2	C1	C4
	C3	C5

Tabella 9.10 – Sondaggi e campioni utilizzati per ricavare i valori di σ_c , Et_{50} e peso di volume caratteristici degli intervalli arenacei e marnoso-siltosi.

Come si può notare, i valori di σ_c e E_{t50} dei litotipi arenacei sono solo lievemente maggiori rispetto a quelli dei litotipi marnoso-siltosi. Infatti, si è deciso di scartare i dati dei campioni della campagna geognostica terminata nel 2010 (sondaggi N20, N24, N34 e N39), poiché i valori di σ_c misurati sono tutti mediamente più elevati (valore medio 56.4 MPa) rispetto a quelli ricavati dai test sugli altri campioni. Si è anche optato per scartare il campione di arenaria C4 del sondaggio SL3, dato che il valore misurato di σ_c misurato (9.61 MPa) appare eccessivamente basso rispetto agli altri, in modo anomalo. Se si utilizzasse anche questo dato unitamente ai quattro campioni sopra menzionati, la resistenza alla compressione degli intervalli arenacei passerebbe da 36.3 MPa a 39.9 MPa. Si è deciso di scartare questa ipotesi per favorire un approccio più cautelativo, quindi adottando il valore minore di 36.3 MPa per la resistenza alla compressione dei litotipi arenacei.

Per la valutazione della costante m_i sono state consultate le tabelle allegate al programma RocData, che a seconda dei litotipi in oggetto consiglia i seguenti valori:

- ✓ Arenarie: 17 ± 4
- ✓ Marne: 7 ± 2
- ✓ Silt: 7 ± 2

Riguardo ai litotipi marnoso-siltosi è stato attribuito un valore di m_i pari a 7.

Anche alle alternanze di arenarie e marne-siltose è stato assegnato cautelativamente lo stesso valore di m_i pari a 7. Ciò è in accordo con le prescrizioni di Hoek & Marinos (2000) per la determinazione dei valori di σ_c e m_i tramite la classificazione GSI adeguata alle rocce flyschoidi (Figura 9.54) come quella in esame. Essi propongono di derivare valori di σ_c e m_i utilizzando dei valori medi proporzionali in funzione della classe di flysch di Figura 9.54 in cui ricade il caso in esame (Bruschi, 2004):

- ✓ A-B: usare i valori della roccia rigida;
- ✓ C: ridurre i valori della roccia rigida del 20% e usare i valori interi per gli interstrati pelitici;
- ✓ D-E: ridurre i valori della roccia rigida del 40% e usare i valori interi per gli interstrati pelitici;
- ✓ F: ridurre i valori della roccia rigida del 60% e usare i valori interi per gli interstrati pelitici;
- ✓ G-H: usare i valori degli interstrati pelitici.

A tal proposito, l'intervallo A del sondaggio SS2 (Figura 9.53) è dato da alternanze in cui prevale la parte fine e quindi potrebbero ricadere nelle classi D-E dello schema di Figura 9.54.

Riguardo alle arenarie si è deciso di adottare un valore di m_i cautelativo pari a 13, ovvero il minimo proposto per questo litotipo nelle tabelle allegate a RocData. Ciò sembra in parte essere confermato anche dal processamento dei dati di resistenza alla compressione delle prove monoassiali e triassiali (Figura 9.55). Infatti, interpolando con il metodo dei minimi quadrati la pressione di confinamento ed il quadrato dello sforzo deviatorico, si risale all'equazione della retta che rappresenta l'involuppo del criterio di resistenza di Hoek & Brown. Il parametro m_i è quindi dato da:

$$m_i = P_{RI} / \sigma_{ci} = P_{RI} / \sqrt{I_{RI}}$$

dove:

- ✓ P_{RI} è la pendenza della retta di interpolazione;
- ✓ σ_{ci} è la resistenza a compressione semplice della matrice rocciosa intatta
- ✓ I_{RI} è l'intercetta della retta di interpolazione con l'asse delle ordinate.

Se si elaborano con il metodo dei minimi quadrati tutti i dati delle prove di compressione monoassiale unitamente a quelle triassiali, otteniamo un valore di m_i pari a 12.6.

SS2											
Intervalli	prof. (m)	A/P	GSI			σ_c (Mpa)	Et50 (Mpa)	Peso Vol.	σ_3 max		
			m*m	medio	min				(Mpa)	Prof. rif. (m)	
A	8	0.4	43	40	38	7	33.9	7872	26.76	0.2275	8.5
	9	0.4	38								
B	10	1	57	59	50	13	36.3	8555	26.40	0.3036	11.5
	11	1	79								
	12	1	51								
	13	0.8	50								
C	14	0	51	38	24	7	33.9	7872	26.76	0.4148	15.5
	15	0	34								
	16	0	44								
	17	0	24								
D	18	1	52	56	45	13	36.3	8555	26.40	0.5148	19.5
	19	1	68								
	20	1	60								
	21	0.5	45								
E	22	0	62	68	53	7	33.9	7872	26.76	0.6958	26.0
	23	0	67								
	24	0	74								
	25	0	82								
	26	0	82								
	27	0	63								
	28	0	53								
	29	0	71								
	30	0	62								

Figura 9.53 – Schema inerente i dati di input necessari a RocData relativamente al sondaggio SS2.

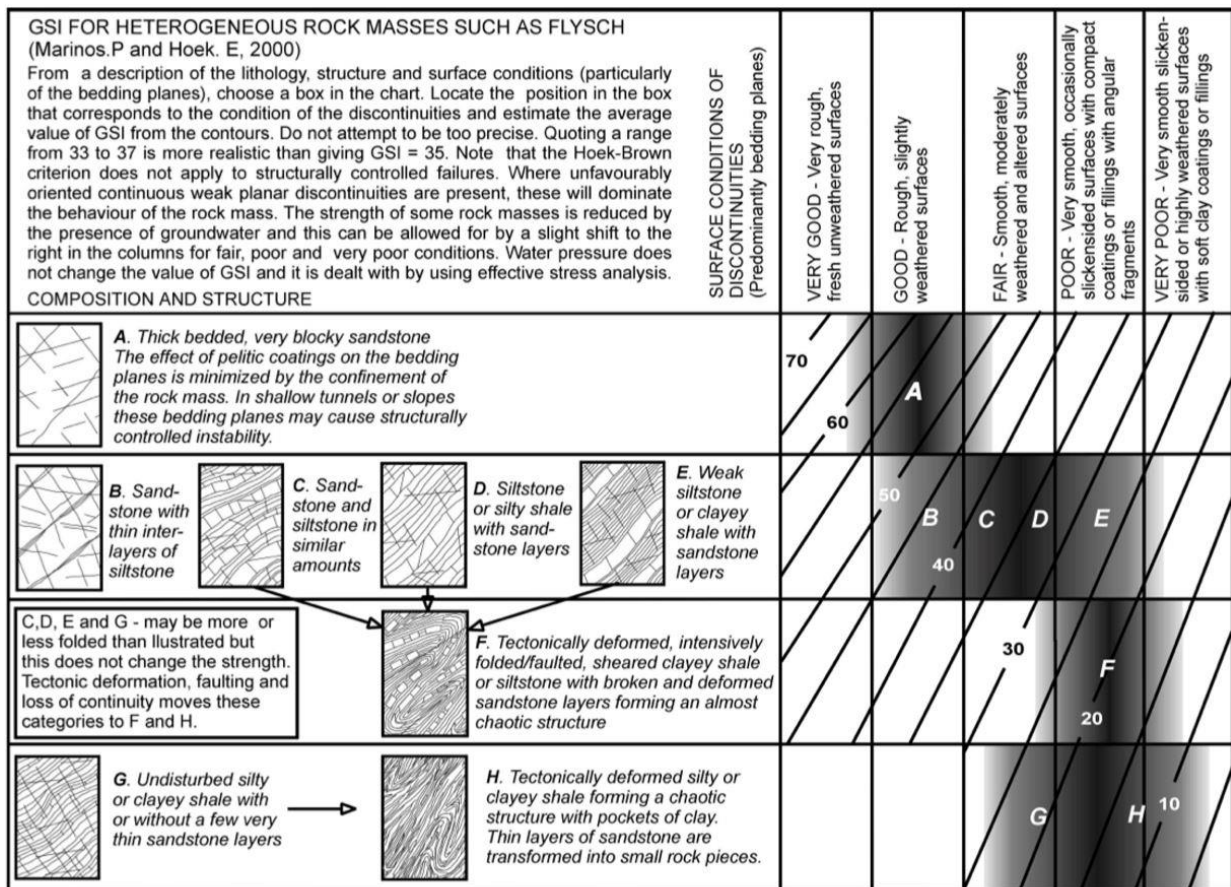


Figura 9.54 – Schema di classificazione GSI adeguato alle rocce flyschoidi (Hoek & Marinos, 2000).

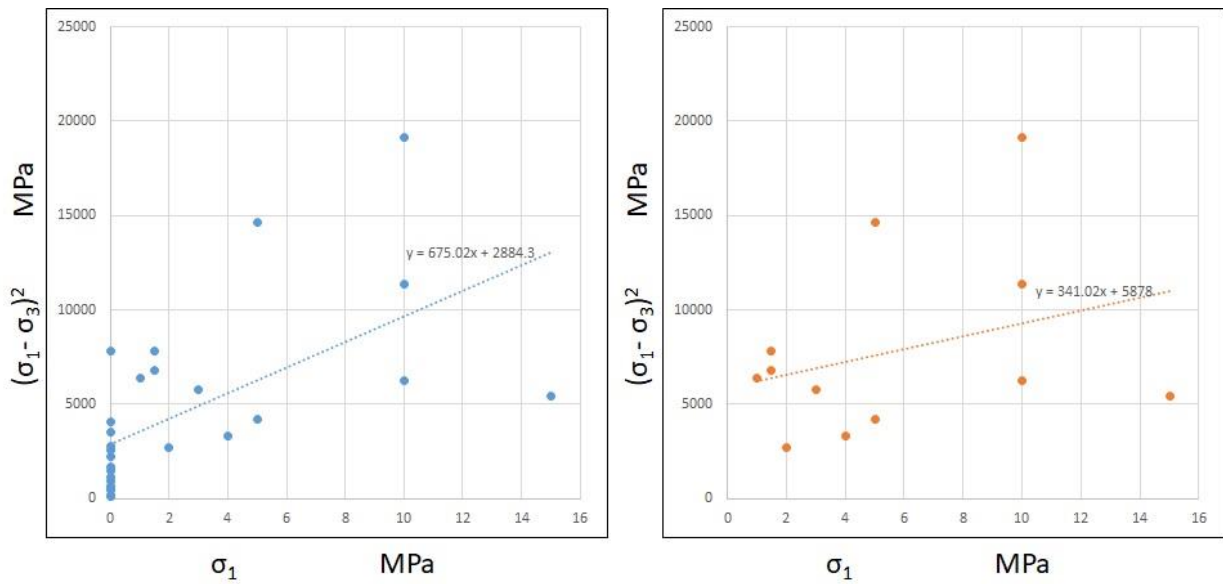


Figura 9.55 – A sinistra: involuppo con il metodo dei minimi quadrati della pressione di confinamento e del quadrato dello sforzo deviatorico dei dati di tutte le prove di compressione monoassiale e triassiale eseguite sui campioni arenacei. A destra: involuppo relativo solo ai dati dei test triassiali sempre sui soli campioni arenacei.

RAPPORTO

USO RISERVATO

APPROVATO

C0006347

Sond.	Camp.	Litologia	Compress. Monoass. σ (Mpa)	Compress. Triass.		Resit. Traz. (Mpa)	Peso di volume		Etg50 (Mpa)	Tilt Test (°)	Sforzo Taglio			Point Load Test	Por. (%)	Veloc. Sonica (m/s)	Prof. da p.c. (m)			
				σ (Mpa)	P Conten. (Mpa)		Apparente (kNm3)	Reale (kNm3)			Car. Norm. (Mpa)	Sf. Max (Mpa)	Sf. Residuo (Mpa)							
Ch1	Li1	arenaria	/	80.8	1	/	26.3	26.56	23800	37.5	0.51	0.78	0.55	/	/	/	29			
				53.7	2				17000		1.02	/	1.02							
				61.4	4				17000		2.04	/	1.49							
	Li2	Marna / Siltite	31.10	/	/	/	26.02	26.14	4100	/	0.51	0.52	0.47	/	/	/	30.4			
									1.02		/	0.81								
									2.04		/	1.51								
	Li3	Marna / Siltite	/	/	/	/	/	/	/	/	4.33	0.51	0.3	/	/	/	32			
											4.37	1.02	/					0.49		
											5.09	2.04	/					0.95		
Li4 (A)	arenaria	50.40	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	34				
																	69.6	5	14900	
																	89.2	10	13300	
Li4 (B)	arenaria	/	/	/	/	25.82	26.01	14000	37	/	/	/	/	/	/	34				
								88.8									15	14000		
								14900									13300	14000		
Li5	Marna / Siltite	/	/	/	/	/	/	/	/	0.51	0.54	0.45	/	/	/	37				
										1.02	/	0.78								
										2.04	/	1.7								
Li6	arenaria	63.70	/	/	/	25.6	25.78	15200	/	/	/	/	4.1	/	/	48				
								83.8									1.5	25.59	25.71	17700
								78.8									3	17700	19600	
Li7	arenaria	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	48.5				
																	116.7	10	19600	
																	90.1	1.5	25.82	25.97
Li8	arenaria	/	/	/	/	/	/	/	/	37	/	/	/	/	/	51				
																	125.9	5	23800	
																	148.3	10	22100	
Li9	arenaria	33.70	/	/	/	26.04	26.21	9700	/	/	/	/	/	/	/	59.25				
								26.04									26.21	9700		
								26.04									26.21	9700		
SL2	C5	arenaria	25.36	/	/	4.19	25.1	/	/	/	/	/	/	/	/	4769	28			
	C6	Marna/Silt.	34.87	/	/	4.12	25.5	/	/	/	/	/	/	/	/	3740	37.5			
	C7	arenaria	13.73	/	/	3.57	25.9	/	/	/	/	/	/	/	/	3993	43.5			
SL3	C2	arenaria	38.23	/	/	8.72	25.8	/	/	/	/	/	/	/	/	4720	21.5			
	C3	Marna/Silt.	13.86	/	/	3.97	26.1	/	/	/	/	/	/	/	/	3480	32			
	C4	arenaria	9.61	/	/	1.79	25.4	/	/	/	/	/	/	/	/	4294	39			
SL6	C1	Marna/Silt.	24.59	/	/	4.72	28.8	/	/	/	/	/	/	/	/	3899	20.5			
SS1	C1	arenaria	20.60	/	/	/	25.38	26.79	4900	/	/	/	/	5.3	2660	14.78				
	C2	Marna/Silt.	45.60	/	/	/	25.96	26.88	11460	/	/	/	/	3.4	3278	20.82				
	C3	Marna/Silt.	23.40	/	/	/	25.52	27.1	2310	/	/	/	/	5.8	1867	25.03				
	C4	arenaria	40.80	/	/	/	23.84	26.41	8160	/	/	/	/	9.7	3801	34.33				
	C5	Marna/Silt.	28.30	/	/	/	25.78	26.76	5520	/	/	/	/	3.7	1933	37.83				
SS2	C1	arenaria	24.30	/	/	/	24.71	26.56	3670	/	/	/	/	7	2400	12.22				
	C2	argillite	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	13				
	C3	arenaria	52.40	/	/	/	25.7	26.66	9700	/	/	/	/	3.6	3246	18.52				
	C4	Marna/Silt.	36.40	/	/	/	26.07	26.8	7130	/	/	/	/	2.7	2193	21.28				
	C5	Marna/Silt.	67.10	/	/	/	25.82	26.85	16710	/	/	/	/	3.8	3177	24.73				
N20	N	arenaria	30.80	/	/	/	25.72	/	/	/	/	/	/	/	/	/				
N24	N	arenaria	59.60	/	/	/	26.02	/	/	/	/	/	/	/	/	/				
N34	N	arenaria	88.30	/	/	/	26.06	/	/	/	/	/	/	/	/	/				
N39	N	arenaria	47.00	/	/	/	25.76	/	/	/	/	/	/	/	/	/				
STATISTICA	min		13.9				25.50	26.14	2310	Ch1 (Li2) - SL2 (C6) - SL3 (C3) - SL6 (C1) - SS1 (C2, C3, C5) - SS2 (C4,C5)						1867				
	media		33.9				26.17	26.76	7872							2946				
	max		67.1				28.80	27.10	16710							3899				
	dev.st.		15.3				1.01	0.32	5333							823				
	n° dati		9				9	6	6							8				
	min		13.7				23.84	25.78	3670	Ch1 (Li4, Li6, Li9) - SL2 (C5, C7) - SL3 (C2, C4) - SS1 (C1, C4) - SS2 (C1,C3)						2400				
	media		36.3				25.34	26.40	8555							3656				
	max		63.7				26.04	26.79	15200							4769				
	dev.st.		15.8				0.70	0.36	4103							935				
	n° dati		10				9	6	6							7				
	min		9.6				23.84	25.78	3670	Ch1 (Li4, Li6, Li9) - SL2 (C5, C7) - SL3 (C2, C4) - SS1 (C1, C4) - SS2 (C1,C3) - N20 (N) - N24 (N) - N34 (N) - N39 (N)						2400				
	media		39.9				25.50	26.40	8555							3735				
	max		88.3				26.06	26.79	15200							4769				
	dev.st.		21.0				0.61	0.36	4103							894				
	n° dati		15				14	6	6							8				
	min		30.8				25.7	/	/	N20 (N) - N24 (N) - N34 (N) - N39 (N)						/				
media		56.4				25.9	/	/							/					
max		88.3				26.1	/	/							/					
dev.st.		24.3				0.2	/	/							/					
n° dati		4				4	0	0							0					

Figura 9.56 – Elenco dei risultati delle prove di laboratorio disponibili per i sondaggi in esame. Con i colori marroncino, verde, azzurro e violetto sono rispettivamente evidenziati i campioni costituiti da arenarie, marne/siltiti, loro alternanze e argilliti. In basso è riportata la statistica per litologia di alcuni dei parametri includendo o meno certi campioni. I valori dei parametri sottolineati nei colori più accesi sono quelli caratteristici dei diversi litotipi.

10 SISMICITÀ DEL SITO

10.1 Sorgenti sismogenetiche e faglie capaci

Il recente database DISS 3.1.2, reso disponibile dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, non individua sorgenti sismogenetiche nelle immediate vicinanze del sito di progetto. Ampliando l'area di osservazione si individuano le seguenti sorgenti sismogenetiche indicate in Figura 10.1:

- ITCS037 – Mugello ÷ Città di Castello ÷ Leonessa (1)
- ITCS027 – Bore ÷ Montefeltro ÷ Fabriano ÷ Laga (2)

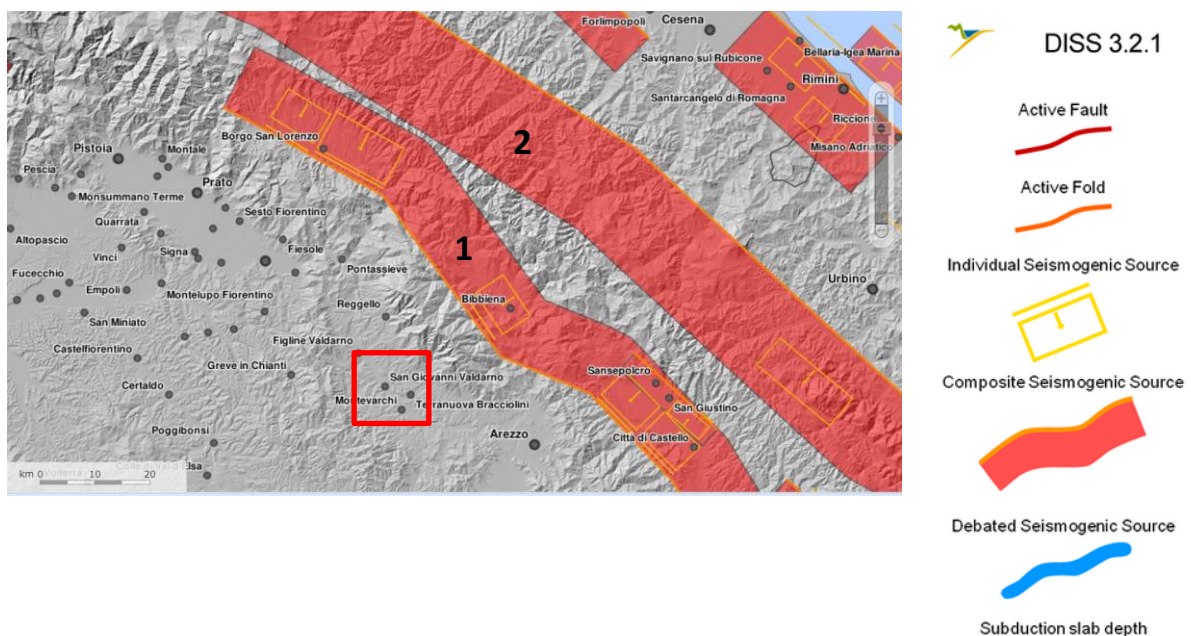


Figura 10.1 - Sorgenti sismogenetiche (da database DISS 3.1).

La consultazione del Catalogo delle Faglie Capaci – Database ITHACA ha infine consentito di escludere la presenza di elementi attivi noti in grado di dar luogo ad effetti di superficie in corrispondenza dell'area di progetto, come mostrato nella Figura 10.2.

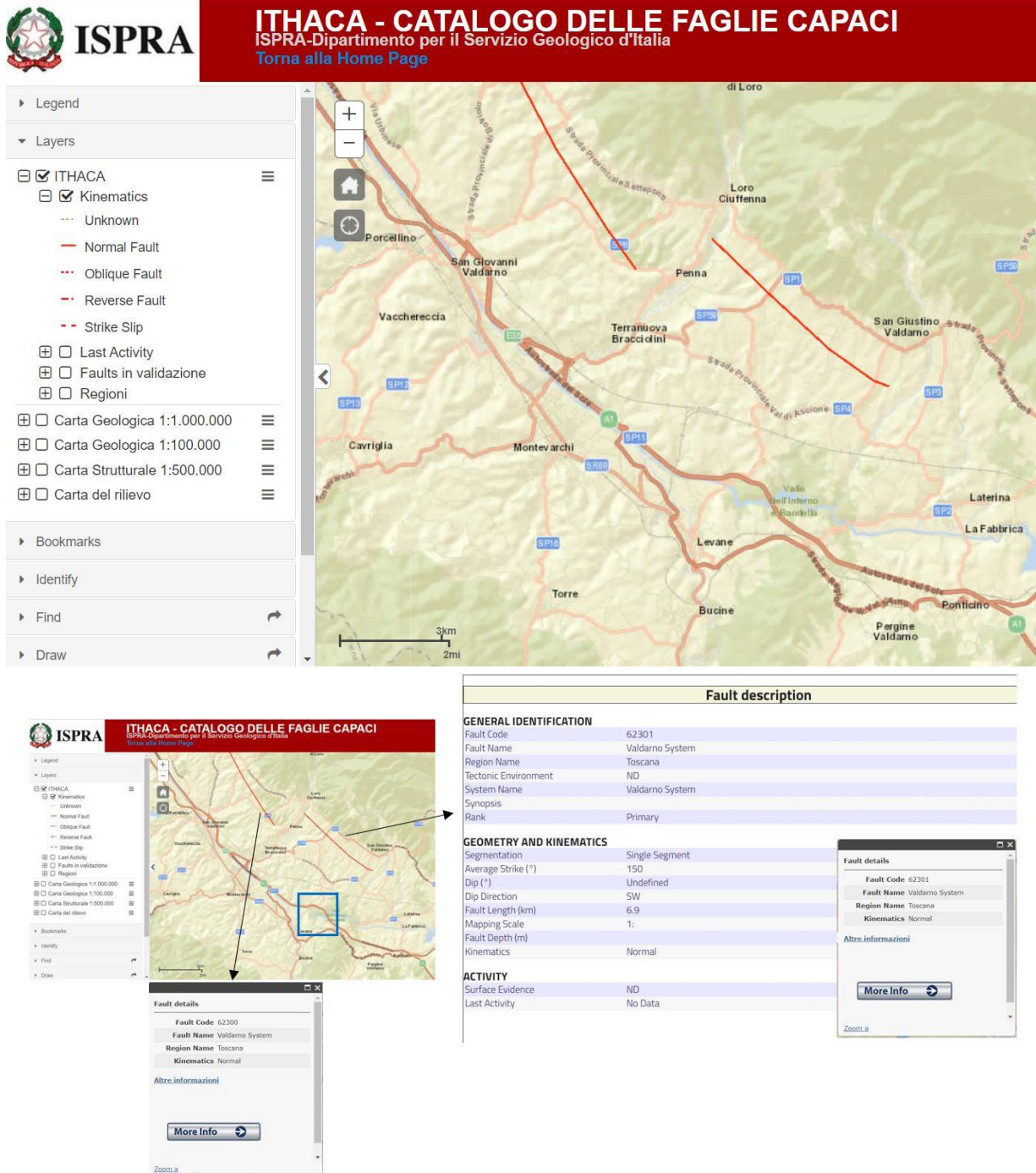


Figura 10.2 - Faglie capaci (da database ITHACA).

10.2 Sismicità storica

L'analisi della sismicità storica del comune di Montevarchi, ricavata dal Database Macrosismico Italiano del 2015 (DBMI15), ricostruisce la sismicità storica del territorio comunale di Montevarchi (AR), in un raggio di 10 km, ed evidenzia risentimenti con intensità macrosimica massima pari a 7, come mostrato in Tabella 10.1, Figura 10.3 e Figura 10.4.

Montevarchi



PlaceID IT_47300
 Coordinate (lat, lon) 43.523, 11.568
 Comune (ISTAT 2015) Montevarchi
 Provincia Arezzo
 Regione Toscana
 Numero di eventi riportati 43

Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
7	1558	04	13	09			Valdarno superiore	29	9	5.97
5-6	1781	06	03				Cagliese	157	10	6.51
2-3	1887	11	14	05	48	0	Fiorentino	101	6	4.47
F	1890	02	15	02	35	0	Valdelsa	12	5	4.52
3	1892	11	21				Alta Valtiberina	22	5-6	4.25
5	1895	05	18	19	55	1	Fiorentino	401	8	5.50
4-5	1895	10	25	00	24	5	Chianti	36	5-6	4.51
3	1897	09	06	03	10	4	Valdarno inferiore	104	5-6	4.59
6	1897	12	18	07	24	2	Alta Valtiberina	132	7	5.09
2	1901	09	22	21	42	1	Valdelsa	35	6	4.68
3-4	1904	11	17	05	02		Pistoiese	204	7	5.10
NF	1905	02	12	08	28		Monte Amiata	61	6	4.55
3	1906	04	21	06	35		Valdelsa	45	5-6	4.30
5	1909	01	13	00	45		Emilia Romagna orientale	867	6-7	5.36
5	1909	08	25	00	22		Crete Senesi	259	7-8	5.34
4	1911	02	19	07	18	3	Forlivese	181	7	5.26
5-6	1911	09	13	22	29	0	Chianti	115	7	5.08
2	1913	07	21	22	35		Appennino romagnolo	43	5-6	4.79
4-5	1913	07	29	22	24		Casentino	16	5-6	4.54
4	1914	10	27	09	22		Lucchesia	660	7	5.63
6	1915	01	13	06	52	4	Marsica	1041	11	7.08

RAPPORTO

USO RISERVATO

APPROVATO

C0006347

4	🔗	1916 05 17 12 50	Riminese	132	8	5.82
5	🔗	1917 04 26 09 35 5	Alta Valtiberina	134	9-10	5.99
5	🔗	1917 12 02 17 39	Appennino forlivese	32	6-7	5.09
5-6	🔗	1919 06 29 15 06 1	Mugello	565	10	6.38
3-4	🔗	1919 10 25 13 51	Alta Valtiberina	30	6	5.03
3-4	🔗	1920 09 07 05 55 4	Garfagnana	750	10	6.53
3	🔗	1920 11 24 04 20	Senese	15	4-5	4.07
2	🔗	1929 07 18 21 02	Mugello	56	6-7	4.96
2-3	🔗	1930 10 30 07 13	Senigallia	268	8	5.83
NF	🔗	1940 10 16 13 17	Val di Paglia	106	7-8	5.29
4	🔗	1948 06 13 06 33 3	Alta Valtiberina	142	7	5.04
NF	🔗	1951 09 01	Monti Sibillini	80	7	5.25
NF	🔗	1956 02 22 22 55 0	Senese	29	5	4.03
2	🔗	1957 04 30 06 05 0	Alta Valtiberina	57	5	4.23
2	🔗	1959 03 24 10 24	Fiorentino	28	7	4.85
NF	🔗	1960 04 15 02 45 1	Montefeltro	30	5-6	4.45
2	🔗	1983 11 09 16 29 5	Parmense	850	6-7	5.04
3-4	🔗	1997 09 26 00 33 1	Appennino umbro-marchigiano	760	7-8	5.66
4	🔗	1997 09 26 09 40 2	Appennino umbro-marchigiano	869	8-9	5.97
3	🔗	1997 10 14 15 23 1	Valnerina	786		5.62
3-4	🔗	2001 11 26 00 56 5	Casentino	211	5-6	4.63
NF	🔗	2003 12 07 10 20 3	Forlivese	165	5	4.18

Località vicine (entro 10km)

Località	EQs	Distanza (km)
Terranuova Bracciolini	12	3
Caposelvi	1	4
San Giovanni Valdarno	30	5
Galatrona	1	6
Cavriglia	4	6
Bucine	19	6
Montegonzi	1	6
Santa Barbara	1	8
Sereto	1	8
Loro Ciuffenna	11	9
San Pancrazio	1	9
Castelnuovo dei Sabbioni	1	9

Tabella 10.1 - Sismicità storica del territorio comunale di Montevarchi: dati parametrici macrosismici e strumentali, relativi ai terremoti con intensità massima ≥ 5 o magnitudo ≥ 4.0 nella finestra temporale 1000-2014. (mod. da Cat. Par. Ter. It. 2015-INGV).

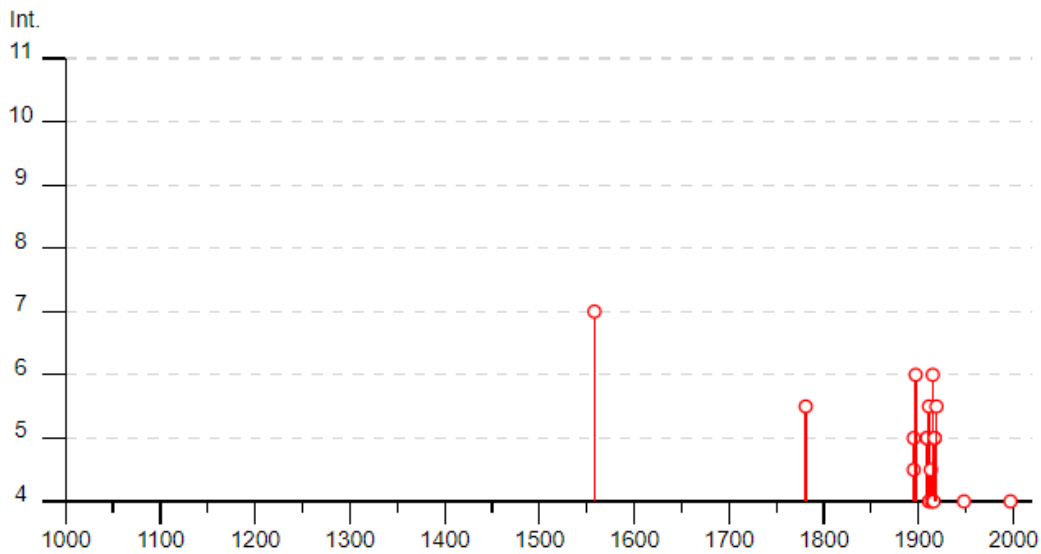


Figura 10.3 - Storia sismica di Montevarchi.

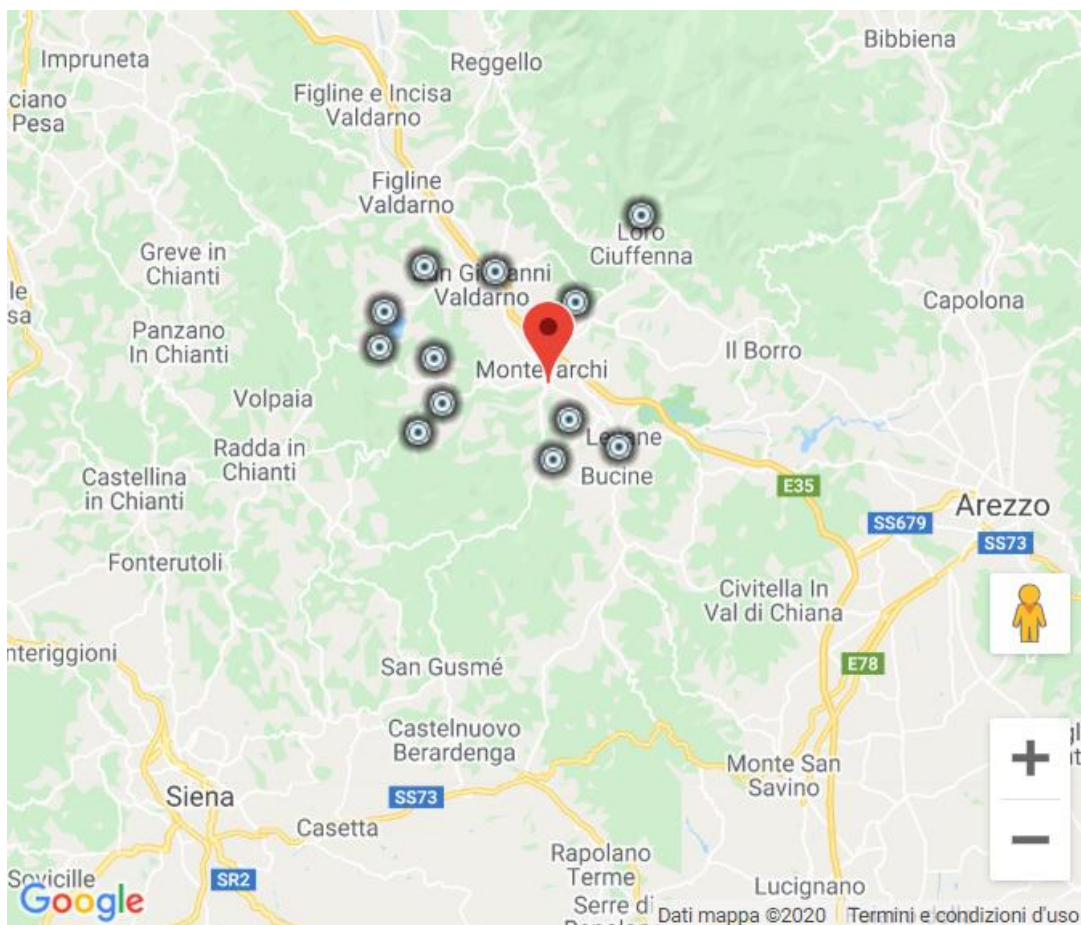


Figura 10.4 - Sismicità storica del territorio comunale di Montevarchi: dati parametrici macrosismici e strumentali, relativi ai terremoti con intensità massima ≥ 5 o magnitudo ≥ 4.0 nella finestra temporale 1000-2014. (mod. da Cat. Par. Ter. It. 2015-INGV).

10.3 Sismicità di base dell'area

In ragione dell'Aggiornamento della classificazione sismica del territorio della Regione Toscana 2014, il comune di Montevarchi risiede in Zona Sismica 3 dove, in accordo all'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3519 del 28 aprile 2006, è stata adottata la seguente suddivisione delle zone sismiche in relazione all'accelerazione di picco su terreno rigido (OPCM 3519/06):

Zona sismica	Accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni (ag)
1	$ag > 0.25$
2	$0.15 < ag \leq 0.25$
3	$0.05 < ag \leq 0.15$
4	$ag \leq 0.05$

Tabella 10.2 - Suddivisione delle zone sismiche.

Per quanto concerne la determinazione dei parametri di scuotimento sismico dell'area di progetto, facendo riferimento al D.M. 14/01/08 *Norme tecniche per le costruzioni*, la sismicità di base del sito è definibile in funzione del valore assunto dall'accelerazione orizzontale massima attesa a_g su suolo rigido per eventi con tempo di ritorno di 475 anni e probabilità di superamento del 10% in 50 anni definita nella tabella 1 allegata al citato D.M. come mostrato nella Figura 10.5 per il sito in esame.

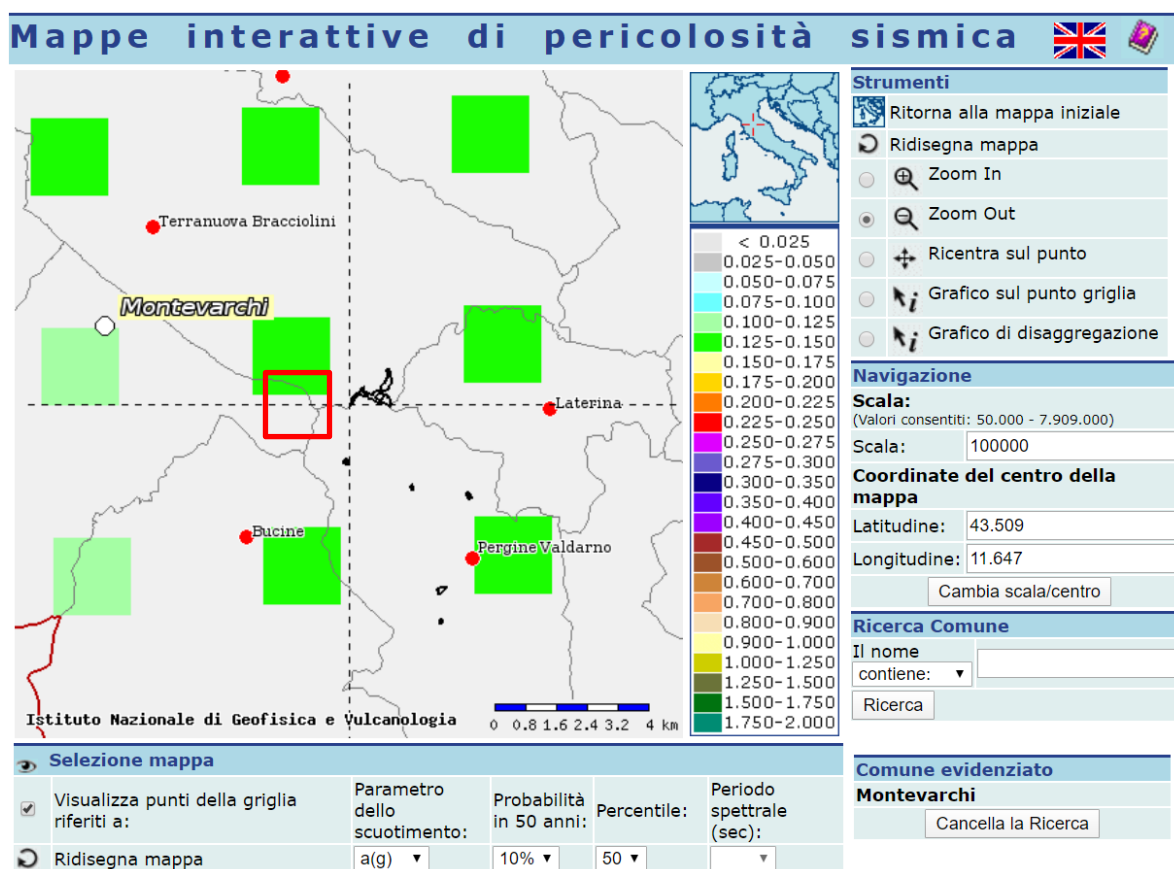


Figura 10.5 – Ubicazione del Sito nella carta di pericolosità sismica nazionale in termini di accelerazione di picco, attesa con probabilità di superamento al 10% in 50 anni (mod. da database macrosismico IT. 2015 - INGV).

10.4 Risposta sismica locale

Per la definizione della categoria di sottosuolo si sono utilizzati i dati ricavati dal carotaggio sismico Cross-Hole per una profondità di 62 m, effettuato nel 2015 nei fori di sondaggio Ch1 e Ch2, sul corpo diga (Figura 10.6).

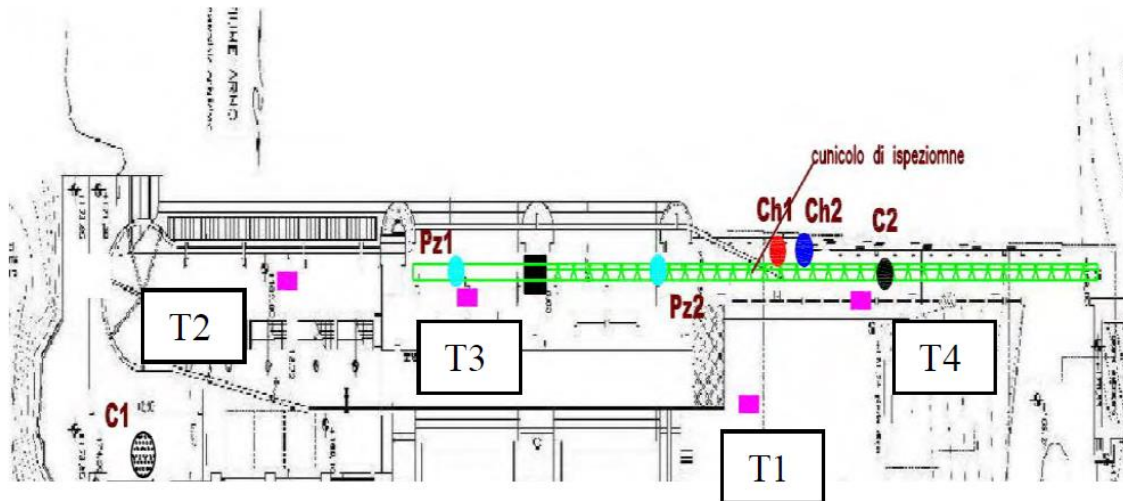


Figura 10.6 – Ubicazione Cross-Hole effettuato nei fori Ch1 e Ch2 sul corpo diga.

Tale carotaggio ha intercettato il substrato roccioso alla profondità di circa 23.4m da p.c. nel foro Ch2 (vedi linea tratteggiata in rosso nella Tabella 10.3) con valori di Vs compresi tra 850 e 1910 m/s come riportato in Tabella 10.3. Questi valori si ritengono identificativi dell'ammasso roccioso in sezione diga.

Profondità ricevitore da p.c. (m)	Distanza reale sorgente-ricevitore (m)	Tempo di transito onde P ($s \cdot 10^{-3}$)	Velocità sismica onde P (m/s)	Tempo di transito onde S_H ($s \cdot 10^{-3}$)	Velocità sismica onde S_H (m/s)
1	3.100	1.523	2036	3.841	807
2	3.084	1.500	2056	3.640	847
3	3.068	1.500	2045	3.997	768
4	3.061	1.636	1870	3.483	879
5	3.044	1.364	2232	5.136	593
6	3.036	1.327	2287	2.568	1182
7	3.020	1.127	2679	1.841	1641
8	3.014	1.227	2456	3.774	799
9	3.023	1.568	1928	3.684	821
10	3.029	1.159	2613	2.478	1222
11	3.027	1.023	2960	2.068	1464
12	3.035	0.736	4121	1.818	1669
13	3.044	0.736	4134	1.750	1739
14	3.053	0.681	4484	1.636	1866
15	3.039	0.682	4457	1.636	1857
16	3.035	0.909	3339	1.773	1712
17	3.025	0.802	3773	1.318	2295
18	3.037	0.727	4175	1.295	2344
19	3.048	0.703	4337	1.295	2353
20	3.060	0.746	4101	1.227	2494
21	3.067	0.750	4090	1.250	2454
22	3.064	0.750	4086	1.227	2497
23	3.063	0.773	3964	1.341	2285
24	3.056	0.864	3538	2.159	1415
25	3.055	0.795	3841	3.595	850
26	3.058	0.795	3844	2.947	1037
27	3.061	0.773	3962	1.675	1828
28	3.063	0.795	3850	3.416	896
29	3.068	0.773	3971	1.607	1910
30	3.058	0.795	3845	1.674	1827
31	3.047	0.773	3943	3.506	869

Limite CLS-
substrato roccioso

Profondità ricevitore da p.c. (m)	Distanza reale sorgente-ricevitore (m)	Tempo di transito onde P ($s \cdot 10^{-3}$)	Velocità sismica onde P (m/s)	Tempo di transito onde S_H ($s \cdot 10^{-3}$)	Velocità sismica onde S_H (m/s)
32	3.045	0.750	4060	2.478	1229
33	3.043	0.886	3433	3.081	988
34	3.044	0.886	3434	3.148	967
35	3.049	0.841	3626	2.389	1276
36	3.068	0.795	3857	2.233	1374
37	3.077	0.750	4103	2.233	1378
38	3.070	0.727	4221	2.099	1463
39	3.068	0.727	4218	2.166	1416
40	3.068	0.696	4406	2.032	1510
41	3.088	0.727	4246	2.144	1440
42	3.087	0.750	4116	2.010	1536
43	3.080	0.692	4452	2.121	1452
44	3.075	0.705	4365	1.764	1743
45	3.071	0.692	4439	1.662	1848
46	3.077	0.705	4367	1.617	1902
47	3.065	0.727	4214	2.813	1089
48	3.065	0.773	3966	2.411	1271
49	3.061	0.750	4081	2.411	1269
50	3.070	0.727	4221	2.411	1273
51	3.080	0.795	3872	2.724	1131
52	3.083	0.692	4457	2.925	1054
53	3.090	0.699	4420	1.920	1609
54	3.083	0.795	3876	1.876	1644
55	3.078	0.977	3150	1.898	1622
56	3.082	0.795	3874	1.876	1643
57	3.083	0.705	4375	1.629	1892
58	3.085	0.727	4241	1.639	1882
59	3.086	0.795	3880	1.651	1869
60	3.088	0.841	3673	2.077	1487
61	3.088	0.795	3882	1.876	1646
62	3.093	0.795	3889	1.943	1592

Tabella 10.3 – Misure di velocità sismica misurate con il Cross-Hole nei fori Ch1 e Ch2.

10.4.1 Corpo diga in alveo e spalla destra

Per quanto riguarda il corpo diga in alveo e la spalla destra, entrambi sono impostati direttamente in roccia. In base ai valori ricavati dal carotaggio Cross-Hole sopracitato si può attribuire a questi terreni di fondazione la categoria A tra quelle previste al punto 3.2.2 del D.M. 17 gennaio 2018 (Tabella 10.4), costituita da ammassi rocciosi affioranti caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s.

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

Tabella 10.4 - Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato (Tab. 3.2.II del D.M. 17 gennaio 2018).

La topografia del sito per quanto riguarda il corpo diga in alveo non presenta complessità particolari per cui ai fini della definizione delle caratteristiche della superficie topografica si ritiene adeguata la categoria T1 in accordo alla Tabella 10.5.

La topografia del sito per quanto riguarda la spalla destra invece ricade in categoria T2, ovvero pendii con inclinazione media $> 15^\circ$.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica	
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$	Alveo corpo diga
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$	Spalla destra diga
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$	
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$	

Tabella 10.5 - Caratteristiche della superficie topografica (Tab. 3.2.III del D.M. 17 gennaio 2018).

10.4.2 Spalla sinistra

Per quanto riguarda la spalla sinistra, durante le indagini geognostiche del 2019 nel sondaggio SS1 si sono evidenziati circa 8 m di deposito al di sopra del substrato roccioso, deposito evidenziato anche nel sondaggio SS2. Non essendoci a disposizione misurazioni dirette della velocità delle onde di taglio per questi depositi si può ipotizzare, in base ai dati geognostici disponibili, che tali terreni di fondazione appartengano alla categoria B (depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 e 800 m/s) od E (terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità substrato non superiore a 30m) tra quelle previste al punto 3.2.2 del D.M. 17 gennaio 2018 (Tabella 10.4).

Si consiglia di utilizzare la categoria E, più cautelativa, nei calcoli geotecnici, in attesa di verifiche di dettaglio tramite prospezioni sismiche di tipo MASW e HVSR (vedi § 12).

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

Tabella 10.6 - Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato (Tab. 3.2.II del D.M. 17 gennaio 2018).

La topografia del sito per quanto riguarda la spalla sinistra ricade in categoria T2, ovvero pendii con inclinazione media $> 15^\circ$.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

Tabella 10.7 - Caratteristiche della superficie topografica (Tab. 3.2.III del D.M. 17 gennaio 2018).

11 CONSIDERAZIONI SUGLI INTERVENTI DI PROGETTO

11.1 Sovralzo spalla sinistra della diga

Come indicato nella Specifica Tecnica ENEL del 13/08/2019, la nuova geometria della diga comporta un innalzamento del paramento di valle in direzione verticale di 4,50 m, pari all'innalzamento del vertice del triangolo fondamentale. Lo spessore del riporto di calcestruzzo sarà invece pari a 3,60 m in direzione orizzontale da realizzare mediante scavi a ridosso del paramento lato valle, per consentire il corretto ammorsamento dei nuovi getti di appesantimento con l'attuale corpo diga.

Per consentire la realizzazione dei suddetti interventi, sarà necessario quindi rimuovere il terrapieno esistente a valle della diga, compreso fra la sponda sinistra e il muro d'ala del canale di scarico.

Questo comporterebbe operazioni di scavo e sbancamento per una larghezza di circa 25 m verso valle a partire dalla proiezione del piede diga, nonché la rimozione e successiva sostituzione della condotta forzata della centralina Battagli, posizionata all'interno del terrapieno. Tale sbancamento avrebbe un'altezza di circa 14 m ed interesserebbe una parte del materiale di riporto ed una parte di depositi superficiali e roccia naturale più in profondità. La presenza di depositi superficiali sciolti e la litologia dell'ammasso roccioso, costituito dall'alternanza di bancate arenacee e livelli marnosi con intercalazioni di livelli siltitici-argillitici, con la giacitura degli strati a franapoggio debolmente inclinati, consiglierebbe di predisporre opportune opere di sostegno dello scavo (ad esempio una paratia di micropali multiancorata) onde evitare fenomeni di crollo sia nella parte rocciosa che quella dei depositi superficiali. Tale paratia, che fungerebbe anche da impermeabilizzazione del fronte di scavo, sarebbe consigliabile anche in considerazione del livello della falda acquifera misurata nel tubo piezometrico del sondaggio SS2 e posta a circa -8.9 m da p.c. in data 06/12/2019, ovvero ad una quota superiore a quella dello scavo previsto, mentre la recente misura piezometrica eseguita in SL1 posto nel terrapieno misura una soggiacenza di -3m da pc. È infatti probabile che parte dello scavo verrebbe eseguito in falda e che le eventuali venute d'acqua durante le operazioni di scavo potrebbero destabilizzarlo ulteriormente. Si consiglia inoltre di prevedere una rete di drenaggio delle acque piovane durante i lavori di scavo e/o un sistema wellpoint onde evitare fenomeni erosivi del fronte stesso ed allagamenti dello scavo.

La scelta progettuale in adozione è di diverso tipo e consiste nell'eseguire degli scavi il più limitati possibili ed il più possibile adiacenti al paramento lato valle della diga.

Le massime profondità di scavo sono di 16 metri dall'attuale piano del terrapieno in corrispondenza del muro d'ala fino ad arrivare a 3-4 metri di scavo nella zona di ammorsamento nella spalla sinistra. Le volumetrie di scavo subirebbero una considerevole riduzione previo consolidamento del terreno retrostante lo scavo con trattamento jet-grouting, consentito dalla granulometria ghiaiosa del riempimento del terrapieno (cfr. sondaggio SL1). In Figura 11.1 è mostrata la sezione geologico-geotecnica di riferimento da cui si evince un livello marcatamente elevato della piezometrica, peraltro confermato dalla recente misura del piezometro SL1 (-3m da pc). In prima analisi il livello sembra forzatamente elevato, considerando il fiume Arno quale livello di recapito naturale. È verosimile imputare tale comportamento al probabile irregolare funzionamento dei drenaggi del muro d'ala, che indurrebbe il sollevamento della piezometrica. Peraltro, la Figura 11.2 sembra evidenziare che già a breve distanza dalla realizzazione del muro d'ala, i drenaggi, anche di ordine superiore, sembravano già mostrare tracce di funzionamento.

Pertanto, occorre tenere presente che lo scavo, anche se ridotto di dimensioni, avverrà sostanzialmente sotto falda rendendo necessario l'aggottamento dell'acqua presente.

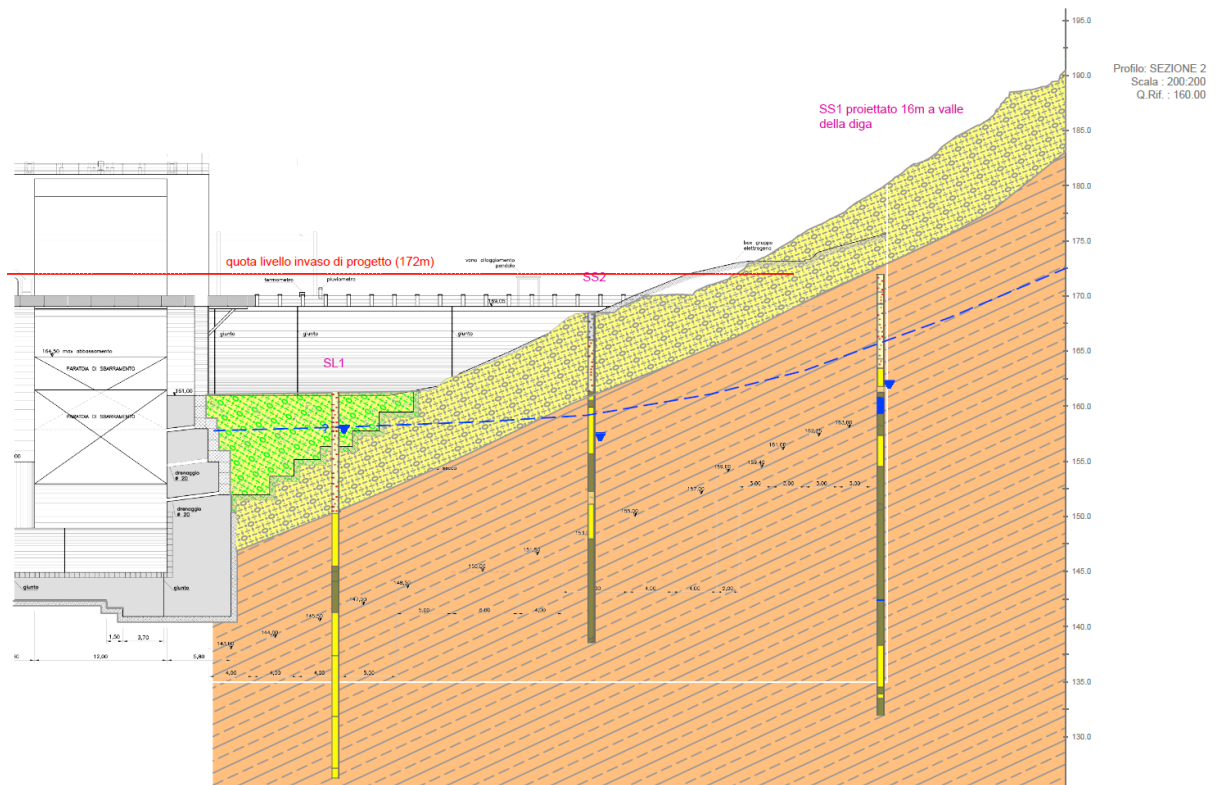


Figura 11.1 – Sezione geologica geotecnica di riferimento – spalla sinistra, lato valle.

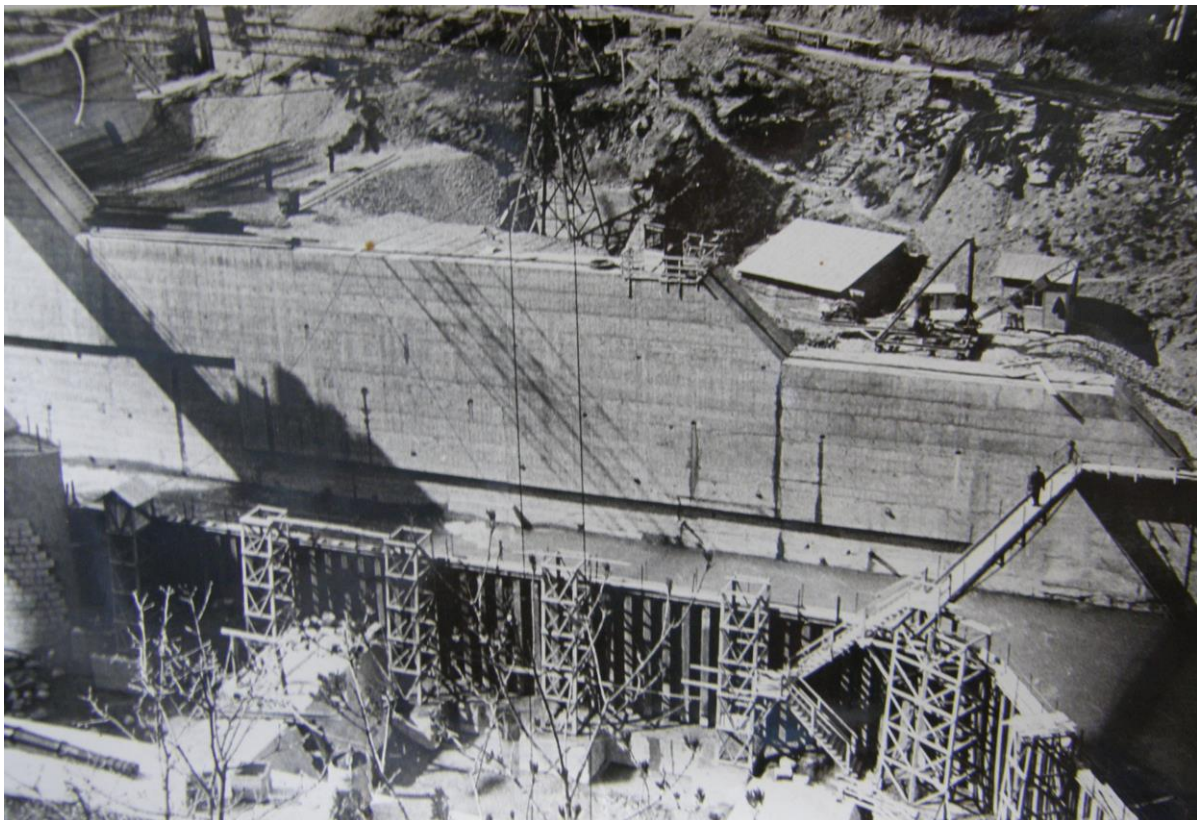


Figura 11.2 – Muro d'ala – si osservano tracce di funzionamento dei drenaggi.

Relativamente all'ammorsamento della spalla sinistra nel versante, la sezione geologico-geotecnica di riferimento è quella mostrata in Figura 11.3. La successione stratigrafica mostra una coltre superficiale detritica potente circa 8m, direttamente a contatto con il substrato marnoso arenaceo. In blu, nel sondaggio SS1 è evidenziato un livello di argilliti fratturate, verosimilmente permeabili, così come nel sondaggio storico F4 in blu è segnalato un livello in cui si è persa integralmente l'acqua di perforazione. I due livelli sono con forte probabilità correlabili (seguono la giacitura), identificando quindi un livello particolarmente permeabile cui prestare attenzione.

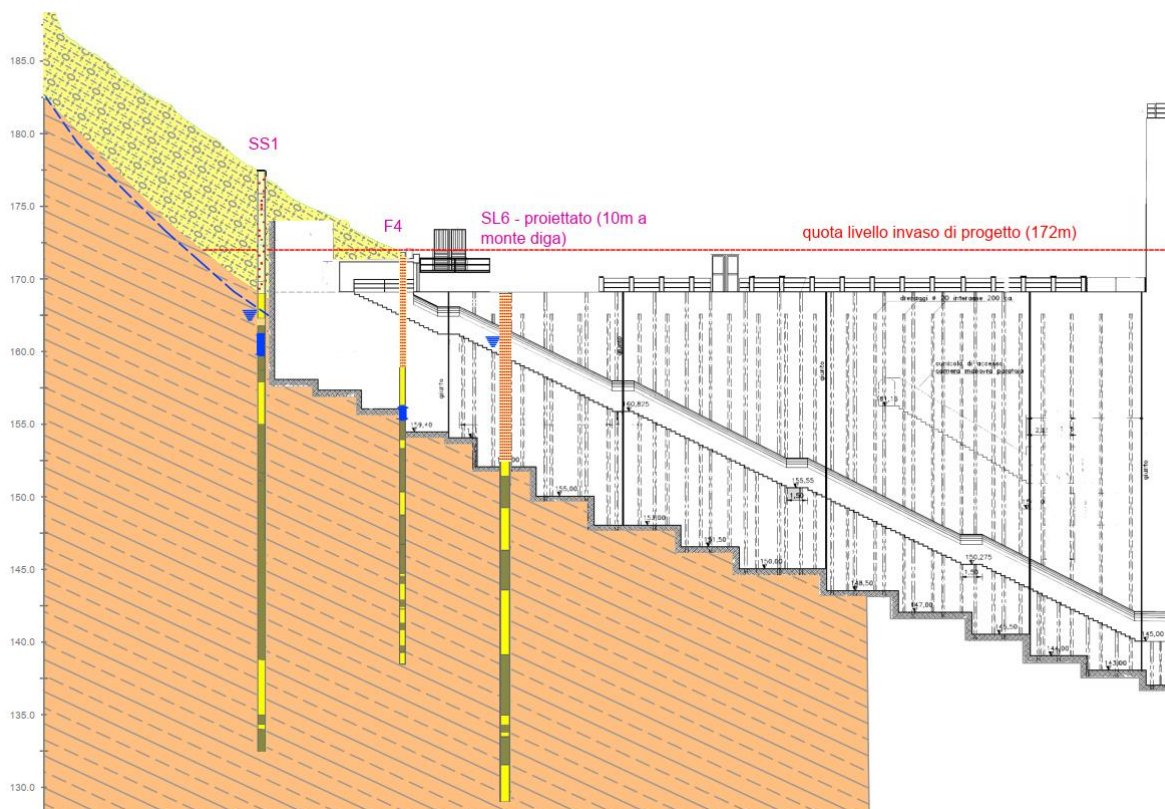


Figura 11.3 – Sezione geologico-geotecnica di riferimento – spalla sinistra, lato monte.

Le criticità principali sono rappresentate dalla tenuta idraulica dell'innesto della spalla nel versante e la stabilità dello stesso laddove si rendano necessari scavi per la fondazione della spalla.

Dalla sezione geologico-geotecnica si evince che il livello della piezometrica si attesta al contatto copertura substrato ed il recente livello piezometrico, misurato in giugno 2020 rileva il livello a -9,19m da testa tubo (-9,60 dicembre 2019). A titolo cautelativo si ritiene opportuno considerare che il livello possa risalire sino ad interessare anche la copertura detritica. Per quanto riguarda la permeabilità secondaria di ammasso, nella Tabella 7.1 sono riferiti i valori di conducibilità idraulica misurati nel sondaggio SS1 in funzione della profondità, da cui si deduce la diminuzione della permeabilità in profondità. Dal confronto tra le conducibilità idrauliche di depositi di copertura ($K=6,8 \times 10^{-7}$ m/s) e della porzione superiore del substrato marnoso-arenaceo ($K=8,7 \times 10^{-6}$ m/s), si evince una permeabilità inferiore nei depositi superficiali.

Per quanto concerne gli scavi occorre sottolineare che la coltre detritica superficiale presenta modeste caratteristiche meccaniche ($c'=0$; $\phi'=40^\circ$) che in caso di scavi, data l'elevata inclinazione del versante, richiedono ai fini della stabilità consistenti interventi di modellamento del lato di monte, rendendo comunque necessarie adeguate opere di sostegno.

La scelta progettuale adottata per garantire la tenuta idraulica dell'innesto prevede la realizzazione di una doppia paratia di micropali, evitando quindi il ricorso a scavi invasivi. Analoga attenzione dovrà comunque essere riposta nella realizzazione di eventuali piste di accesso per i macchinari da impiegarsi.

11.2 Sovralzo spalla destra

Come indicato nella Specifica Tecnica ENEL del 13/08/2019, il sopralzo di progetto prevede l'ammorsamento della nuova struttura in sponda destra direttamente nell'ammasso roccioso per circa, e 15 m di fronte, 5 m di profondità e circa 11m di altezza a partire dal piano di coronamento a quota 169m.

Come descritto nella *Relazione Geologica, Geotecnica e Geomeccanica* del progetto ENEL del 2015, la litologia della AMF affiorante nella zona di imposta della diga e sui versanti della Valle dell'Inferno, è formata da un'alternanza di strati di arenarie quarzoso feldspatiche a grana medio fine di spessore dell'ordine decimetrico, raramente dell'ordine metrico, e di livelli siltitico marnosi, che costituiscono, nelle sequenze torbiditiche, la parte sommitale ed a grana più fine degli strati arenacei, il cui spessore è, in generale, dello stesso ordine di grandezza dei precedenti. In questo settore analizzato il rapporto arenaria pelite risulta superiore ad 1 ($A/P > 1$). Dal tetto del locale batterie, l'ammasso roccioso è ben affiorante con pareti subverticali o molto inclinate, mentre la stratificazione è a reggipoggio a basso angolo.

Le famiglie di discontinuità principali che interessano l'ammasso in spalla destra sono riportate in Figura 11.4 (da ENEL 2015), laddove sono riconosciute tre famiglie principali (Tabella 11.1 – Principali famiglie di discontinuità che interessano la spalla destra (da ENEL 2015))

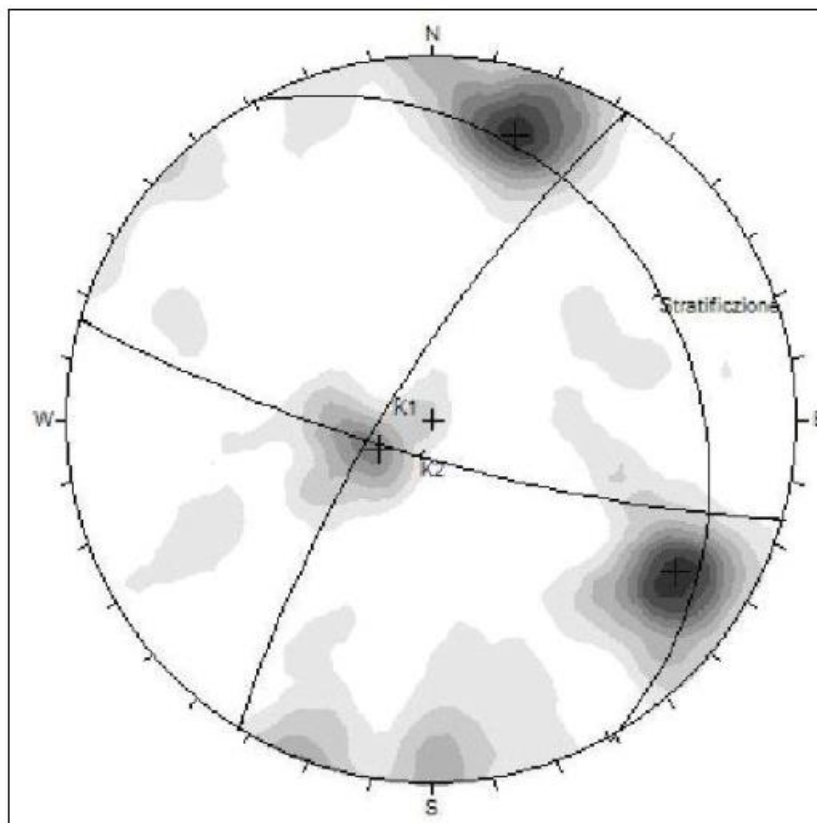


Figura 11.4 – Plot stereografico dell'ammasso in spalla destra (da ENEL 2015).

DISCONTINUITA'	DIREZIONE	INCLINAZIONE
Stratificazione	66°	19°
K1	301°	76°
K2	196°	78°

Tabella 11.1 – Principali famiglie di discontinuità che interessano la spalla destra (da ENEL 2015).



Figura 11.5 – Il cuneo di roccia mancante ben evidenzia le famiglie di discontinuità principali.

In Figura 11.5, sono rappresentate le famiglie di discontinuità principali lungo le quali è avvenuto il distacco del cuneo di roccia mancante; è stata riconosciuta una ulteriore famiglia K3 = 255°/55°, lungo la quale è avvenuto lo scivolamento del cuneo.

È interessante l'osservazione della Figura 11.6, relativa ad un probabile crollo durante le lavorazioni di risagomatura del versante. È un crollo compatibile con quanto si evince dall'assetto geostrutturale, con giacitura di strato reggipoggio, con intersezione delle 4 famiglie riconosciute.



Figura 11.6 – Probabile crollo durante le lavorazioni di costruzione dell'impianto.

Considerato quindi il grado di fratturazione dell'ammasso e la sua stratificazione in bancate da decimetriche a pluridecimetriche si consiglia durante le fasi di scavo di utilizzare opportune misure di sostegno, quali ad esempio la posa di tiranti, chiodi, bulloni, legature e/o rivestimento con calcestruzzo proiettato "spritz beton" e/o altri metodi.

Come precedentemente descritto al §6.3 il rilievo geologico eseguito ha evidenziato, in corrispondenza della sezione di imposta, circa 10 metri a monte del coronamento, sopra il locale batterie, una fascia di qualche metro di larghezza (Figura 6.17, retinato rosso) in cui la bancata rocciosa è assente lasciando presumere la presenza di roccia fratturata (Figura 6.18). Tale fascia ha un'orientazione stimata di circa N265/85, compatibile con la famiglia di discontinuità K1 misurate in loco. L'intensa copertura vegetale non consente di definire l'eventuale prosecuzione di questa fascia oltre la piccola area in cui affiora. Non è stato quindi possibile valutare l'eventuale prosecuzione in profondità di tale fascia, al fine di definirne le probabilità di interferenza con lo scavo previsto per l'immorsamento del sovrizzo.

Si ritiene consigliabile, ai fini della valutazione delle condizioni di fratturazione dell'ammasso interessato dal sovrizzo, e dal conseguente innalzamento del livello di invaso, accertare in fase di inizio lavori lo stato di fratturazione e quindi di permeabilità del settore interessato, mediante l'esecuzione di un sondaggio a carotaggio continuo suborizzontale, con esecuzione di prove di permeabilità di tipo *Lugeon*.

11.3 Viabilità

11.3.1 Pista di cantiere

Per consentire l'accesso al terrapieno di quota 161m si rende necessaria la costruzione di una pista di raccordo con la strada di accesso attuale, della lunghezza di circa 160 m. Il tratto di raccordo si sviluppa lungo il tratto di versante occupato dal citato (cfr § 6.2) accumulo di frana inattivo ed attualmente rimodellato al piede dalla dinamica fluviale dell'Arno (Figura 11.7) per cui si ritiene un'età di attivazione antica/preistorica.

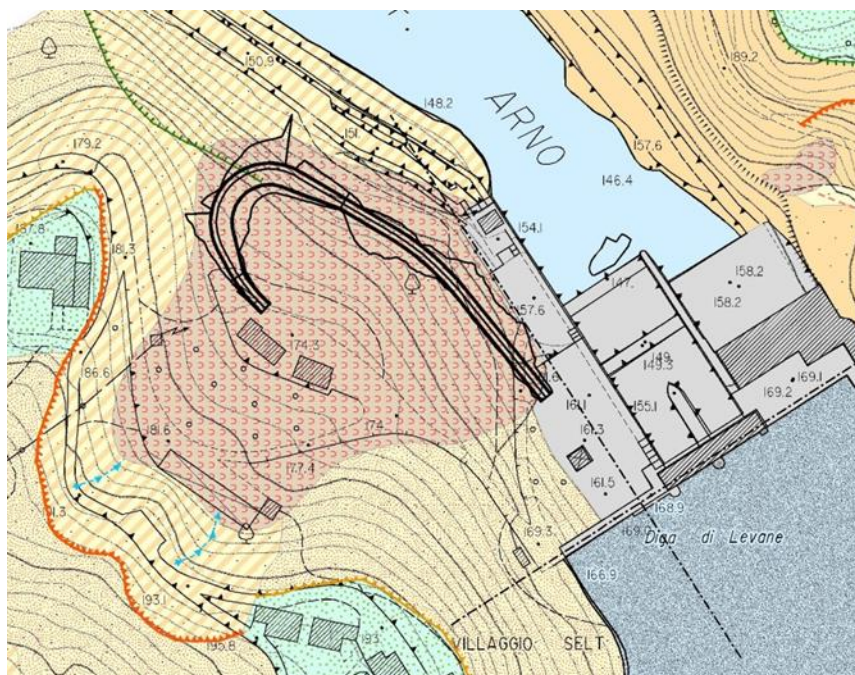


Figura 11.7 – Ubicazione della pista di accesso (in nero) sulla base geologica; per la legenda si veda la Tav. 1.

Nella progettazione della pista in oggetto saranno da tenere in considerazione le scarse qualità geotecniche del materiale attraversato, sia per quanto riguarda la stabilità degli sbancamenti, sia per la sua capacità portante.

Considerato il carico al quale sarà sottoposta la nuova pista, dovuto al passaggio frequente di automezzi pesanti durante i lavori in progetto, si consiglia di dimensionare opportunamente il sottofondo stradale in base ai carichi previsti per distribuire il carico impartito alla superficie stradale in modo tale che questo venga sorretto senza provocare deformazioni. Si consiglia anche di provvedere ad un efficace sistema di drenaggio delle acque piovane per evitare ristagni sia sul manto che sul ciglio stradale.

Come indicato nella Specifica Tecnica ENEL del 13/08/2019, per quanto riguarda il manto stradale, considerato il contesto ambientale si prevede di evitare il ricorso alla pavimentazione in asfalto preferendo una pavimentazione in misto granulare stabilizzato con cemento. Inoltre, a ridosso della diga si rende necessaria anche la realizzazione di opere di sostegno della sede stradale. Le scarpate interessate da scavi e riporti verranno stabilizzate con opere di ingegneria naturalistica.

Considerata la mancanza di indagini dirette nell'area oggetto della nuova pista, ai fini di meglio definire la geometria dell'antico dissesto ed al contempo caratterizzare nel dettaglio necessario i materiali del deposito di copertura, utile ai fini delle verifiche di stabilità necessarie, si consiglia di effettuare, delle indagini dirette (uno / due sondaggi spinti al raggiungimento del substrato) ed indirette (2 stendimenti sismici). Si segnala infine che i rilievi in sito effettuati hanno evidenziato una differenza tra la topografia

reale e la topografia riportata nella carta tecnica regionale scala 1:2000, in quanto la pendenza del versante è meno accentuato in carta che nella realtà.

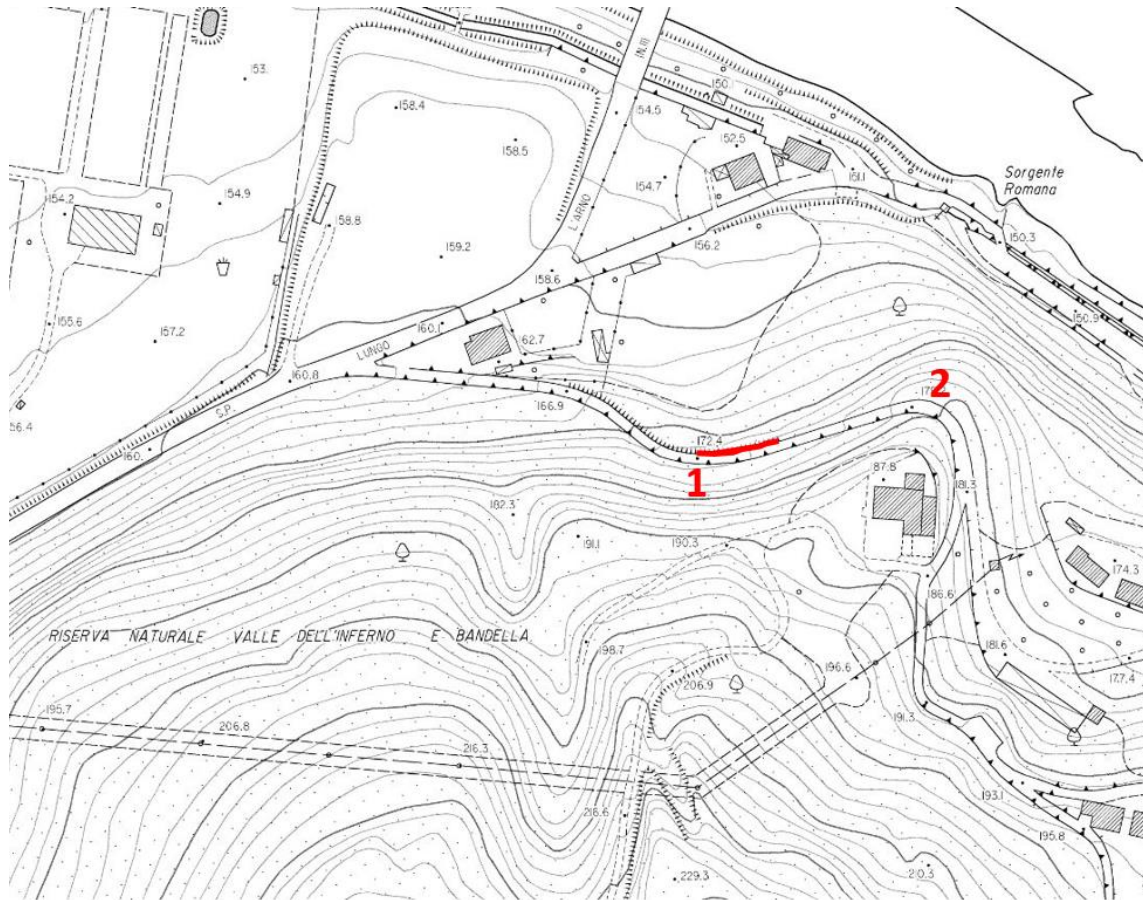
11.3.2 Adeguamento della viabilità di accesso

Nel tratto di strada di accesso che collega la S.P. Lungo Arno all'impianto EGP è previsto l'adeguamento di due curve indicate in Figura 11.8. Si sottolinea che non è stato possibile accedere al lato monte del versante per la presenza di una recinzione continua lungo il lato monte della strada. Il lato valle non è stato ispezionabile nemmeno visivamente data l'impenetrabile vegetazione.

La curva n. 1 presenta un cedimento verso valle della banchina di qualche centimetro di altezza con evidenti segni di ripristino del manto stradale non recenti (Figura 11.9). La parte di strada deformata è lunga circa 20 m procedendo verso monte e inizia in corrispondenza di un canale artificiale (probabile scarico fognario) (

Figura 11.10) proveniente dal versante e che passa sotto la carreggiata. La strada si presenta deformata verso valle per circa metà della larghezza della carreggiata nei punti più larghi con evidenti fessurazioni del manto stradale. Eventuali interventi di adeguamento della sede stradale interesserebbero anche il sottostante canale. Il lato a monte della strada non presenta deformazioni evidenti. Proseguendo lungo la strada si osservano gli alberi inclinati (Figura 11.11), segno verosimilmente di banchina cedevole. La fitta vegetazione sottostante il lato valle della strada, nonché la ripidità del versante, hanno impedito ulteriori analisi del dissesto.

La curva n. 2 non presenta fenomeni deformativi né sul lato a monte né sul lato a valle della carreggiata (Figura 11.12 e Figura 11.13). Il lato a monte presenta un'inclinazione di circa 30° con affioramenti rocciosi localizzati e copertura detritica di spessore inferiore a 1m.



**Figura 11.8 - Strada di accesso alla centrale con evidenziate le due curve da adeguare (da CTR scala 1:2.000).
Figura non in scala.**



Figura 11.9 - Carreggiata deformata nei pressi della curva n. 1. La linea tratteggiata indica la zona deformata.



Figura 11.10 - Canale artificiale in prossimità della curva n. 1.



Figura 11.11 – Alberi inclinati verso valle lungo la banchina stradale.



Figura 11.12 - Particolare della curva n. 2 vista da valle.



Figura 11.13 - Particolare della curva n. 2 vista da monte.

12 INDAGINI INTEGRATIVE

In questo capitolo vengono proposte indagini integrative ritenute consigliabili in fase di inizio lavori per ridurre quanto possibile le incertezze tutt'ora esistenti.

Come descritto nella relazione, la pista di accesso al terrapieno di quota 161m trova collocazione per gran parte del suo percorso su di un corpo di frana inattivo descritto al § 6.2.

Risulta importante, ai fini della corretta delimitazione geometrica del corpo detritico, con particolare riferimento al suo spessore, quindi a localizzare la profondità del substrato AFM, la realizzazione di uno/due sondaggi a carotaggio continuo spinti sino ad interessare i primi metri del substrato. Il risultato delle indagini e delle prove di laboratorio dovranno valutare le caratteristiche meccaniche dei materiali ai fini delle verifiche di stabilità. Unitamente a queste indagini dirette, è consigliabile altresì la realizzazione di uno/due stendimenti sismici per poter estendere arealmente le indicazioni fornite dai sondaggi.

Considerata la mancanza di indagini sismiche dirette in sponda sinistra, già evidenziate nel §10.4.2, per definire la classificazione sismica dei terreni di fondazione in spalla sinistra, ai sensi delle NTC2018, si consiglia di eseguire delle prospezioni sismiche di tipo MASW lungo il versante e un'analisi dei microtremitori con tecnica HVSR nei pressi dell'ammorsamento previsto.

In ultimo, come descritto ai § 6.3 e § 11.2 nel merito del sovrizzo in spalla destra, lo stato di fratturazione dell'ammasso roccioso oggetto dello scavo per l'ammorsamento stesso, unitamente alla possibile presenza di una fascia di roccia fratturata di incerta ubicazione, renderebbero consigliabile l'esecuzione di un sondaggio a carotaggio continuo, suborizzontale, al fine di descrivere lo stato di fratturazione e quindi di permeabilità nel tratto di versante che verrà interessato dall'innalzamento di livello del bacino.

13 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nell'ambito della progettazione definitiva dell'intervento di sopralzo della Diga di Levane (AR) è stato aggiornato il modello geotecnico longitudinale e trasversale della sezione d'imposta dell'opera, recependo le osservazioni sollevate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (Comunicazione Prot. 51/2016). Il presente rapporto tiene conto della storia delle indagini eseguite in sito a partire dalla progettazione degli anni '50 fino alle più recenti eseguite nel mese di dicembre 2019.

Nel dettaglio, sono state svolte attività di raccolta ed analisi di dati bibliografici, tecnici e specialistici; i dati sono stati confrontati con quanto riconosciuto sul terreno nell'ambito di un rilievo geologico di superficie di dettaglio, effettuato nel mese di dicembre 2019.

Nella parte introduttiva si riporta una sintesi essenziale delle caratteristiche geologiche, strutturali, geotecniche, evidenziate dagli studi generali e specialistici eseguiti negli anni precedenti e ai quali si rimanda per una trattazione completa.

In particolare, è stato approfondito l'assetto morfologico del versante in corrispondenza della spalla sinistra, in cui la morfologia è correlata all'assetto a franapoggio della stratificazione, dai cui risulta una coltre detritico-caotica superficiale direttamente poggiante sul substrato marnoso-arenaceo. Nella parte a valle dell'imposta, il versante risulta invece caratterizzato da morfologie riconducibili più nettamente ad un'evoluzione gravitativa, in quanto si riconosce sia morfologicamente, sia dal materiale di sottosuolo, un accumulo di frana. Sulla base degli elementi raccolti non vi sono evidenze di una dinamica in atto.

Nel merito della caratterizzazione dell'ammasso roccioso di fondazione della diga, i presupposti di partenza sono basati sia sull'ampia disponibilità di dati quantitativi, che negli ultimi 15 anni sono stati raccolti attraverso le indagini geognostiche, sia sulla considerazione che i dati raccolti in superficie possono non essere necessariamente rappresentativi delle caratteristiche in profondità. Allo scopo di uniformare le stratigrafie, è stato svolto un lavoro di allineamento con le foto delle carote e dei log della sonda televisiva, utilizzata come riferimento per la profondità. Con lo stesso procedimento sono state esaminate le discontinuità e lo stato di fratturazione indicato nelle analisi della sonda televisiva e riconoscibili nelle carote. L'analisi di dettaglio delle stratigrafie ha indicato come non perseguibile la strada delle correlazioni laterali delle singole bancate, a causa delle variazioni di spessore alla mesoscala. Di conseguenza la trattazione delle caratteristiche dell'ammasso roccioso è avvenuta considerandolo come alternanza arenarie/peliti nel suo complesso.

Si è provveduto ad approfondire l'analisi dello stato di fratturazione dell'ammasso roccioso nel sottosuolo, ad integrazione delle indagini di superficie svolte negli studi precedenti, evidenziando i tratti caratterizzati da un grado di fratturazione elevato e distinguendoli per tipologia ed evidenziando i livelli fratturati riconosciuti nei sondaggi SS1, SS2 ed SL2.

Da notare la decrescita del numero di livelli fratturati dal lato sinistro (ad esempio si veda il sondaggio SS1) verso il lato destro. I livelli più fratturati tendenzialmente sono riscontrabili nelle litologie più marnose e pelitiche.

A partire dai dati ricavati dalla sonda televisiva (eseguita nei sondaggi SS1, SS2, CH1, SL2, SL3) è stato analizzato statisticamente l'assetto strutturale: le famiglie K1 e K2, ben visibili in affioramento, sono difficilmente individuabili in foro in quanto ad alto angolo; sono invece riconoscibili altre famiglie di discontinuità, ad angoli minori di inclinazione ed orientazione varia. L'analisi comparata tra i dati dei diversi sondaggi sembra suggerire un assetto strutturale parzialmente differente tra il lato sinistro della valle e quello destro; inoltre nei sondaggi in destra (SL2 e SL3) si è notata una diversa giacitura della stratificazione a seconda della profondità, una simile a quella di superficie e una diversa, non riscontrabile nei sondaggi in sponda sinistra.

Per quanto riguarda l'RQD sono stati trattati i dati complessivi dal recupero delle carote e dall'elaborazione delle riprese OPTV e BHTV; nel complesso si osserva una discreta concordanza tra i due diversi set di dati, almeno negli andamenti relativi. Dall'analisi comparata è possibile osservare che l'RQD (entrambi i set) in sponda sinistra indicano una qualità peggiore rispetto alla sponda destra ed in generale la qualità non migliora sensibilmente in profondità tranne che nel sondaggio CH1.

Per gli ammassi attraversati dai sondaggi, è stato stimato l'indice GSI, utilizzando la formula proposta da Hoek et alii (2013) che lega questo indice al valore di RQD ed alle condizioni delle discontinuità (JCond89) così come intese nella classificazione RMR di Bieniawski (1989): dall'analisi emerge principalmente che i sondaggi SS1, SS2 e SL2 presentano i più bassi valori di RQD e GSI. Se si considera il variare del GSI con la litologia, si nota che i valori medi più bassi si registrano nei tratti di sondaggio costituiti da marne-siltose o dall'alternanza di questi litotipi con le arenarie. Infine, i sondaggi CH1 e SL3 hanno valori medi di GSI e RQD nettamente più elevati rispetto a SS1, SS2 e SL2.

A partire dalle prove geofisiche in foro (cross hole CH1-CH2) è stato calcolato il valore dell'indice Q di Barton: si osservano due livelli con qualità "molto scadente", alle profondità 33-34m e 55m; il confronto con le immagini della BHTV contribuisce ad ipotizzare che almeno nel primo caso (profondità 33-34m) la qualità sia da mettere in relazione con una fascia ad elevata fratturazione, per il secondo caso (55m) vi è maggiore incertezza.

Relativamente alle prove di laboratorio eseguite sui campioni di roccia, sono evidenziate le elaborazioni statistiche utili a stimare le proprietà e le caratteristiche di resistenza delle rocce poste al di sotto del piano di fondazione della diga secondo la metodologia proposta da Hoek, Carranza-Torres & Corkum (2002). Nel presente lavoro si è concentrata l'attenzione sui parametri di resistenza alla compressione di picco (σ_c), peso di volume e modulo elastico tangente al 50 % della σ_c (Et_{50}). Le analisi statiche di questi dati sono state eseguite considerando vari insiemi di campioni e a seconda della litologia di appartenenza: arenarie e marne-siltose. L'unico campione di argillite noto è stato prelevato in SS2, ma su di esso non è stato possibile eseguire nessuna prova di laboratorio, a causa delle sue condizioni, connesse all'intrinseca scarsa qualità del materiale. In estrema sintesi, i valori di σ_c e Et_{50} dei litotipi arenacei sono solo lievemente maggiori rispetto a quelli dei litotipi marnoso-siltosi, ma per i dettagli della caratterizzazione si rimanda al paragrafo 9.6.

Per meglio caratterizzare la permeabilità dell'ammasso roccioso sono stati utilizzati i dati bibliografici delle indagini geognostiche precedenti e i dati derivati dalle prove condotte nei nuovi fori SS1 e SS2; la porzione più superficiale dell'ammasso roccioso in sponda sinistra presenta valori di permeabilità alti, probabilmente correlati alla presenza di numerose fratture aperte, e/o con riempimento non cementato, e/o comunicanti.

Nella porzione più profonda dell'ammasso, oltre i 20 m da p.c., le permeabilità ottenute nelle nuove indagini sono tipiche di un ammasso scarsamente permeabile. Per quanto riguarda i sondaggi in sponda sinistra, SS1 e SS2, la diminuzione della permeabilità con la profondità non sembra correlata al grado di fratturazione, che si mantiene elevato anche in profondità. Ciò potrebbe essere correlato alla presenza di fratture chiuse, e/o con riempimenti cementati, e/o non comunicanti.

Analogamente per i sondaggi in destra idrografica, SL2 e SL3, la permeabilità ha valori da moderati a bassi non correlabili direttamente al grado di fratturazione dove è riconosciuto come inferiore rispetto alla sponda sinistra.

Nel foro del sondaggio SS1, in sinistra idrografica, dove sono presenti circa 8 metri di deposito superficiale, si è effettuata una prova di permeabilità *Lefranc*, che ha evidenziato un valore tipico di una permeabilità da bassa a molto bassa, in accordo alla natura granulometricamente fine della matrice di fondo.

In ragione dell'Aggiornamento della classificazione sismica del territorio della Regione Toscana 2014, il comune di Montevarchi risiede in Zona Sismica 3.

Per la definizione della categoria di sottosuolo si sono utilizzati i dati ricavati dal carotaggio sismico Cross-Hole per una profondità di 62 m, effettuato nel 2015 nei fori di sondaggio Ch1 e Ch2, sul corpo diga. Per quanto riguarda il corpo diga in alveo e la spalla destra, entrambi sono impostati direttamente in roccia. In base ai valori ricavati dal carotaggio Cross-Hole sopracitato si può attribuire a questi terreni di fondazione la categoria A tra quelle previste al punto 3.2.2 del D.M. 17 gennaio 2018 (Tabella 10.4), costituita da ammassi rocciosi affioranti caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s.

La topografia del sito per quanto riguarda il corpo diga in alveo non presenta complessità particolari per cui ai fini della definizione delle caratteristiche della superficie topografica si ritiene adeguata la categoria T1 in accordo alla Tabella 10.5.

La topografia del sito per quanto riguarda la spalla destra invece ricade in categoria T2, ovvero pendii con inclinazione media $> 15^\circ$.

Per quanto riguarda la spalla sinistra, durante le indagini geognostiche del 2019 nel sondaggio SS1 si sono evidenziati circa 8 m di deposito al di sopra del substrato roccioso, deposito evidenziato anche nel sondaggio SS2. Non essendo a disposizione misurazioni dirette della velocità delle onde di taglio per questi depositi si può ipotizzare, in base ai dati geognostici disponibili, che tali terreni di fondazione appartengano alla categoria B (depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 e 800 m/s) od E (terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità substrato non superiore a 30m) tra quelle previste al punto 3.2.2 del D.M. 17 gennaio 2018 (Tabella 10.4). Si consiglia di utilizzare la categoria E, più cautelativa, nei calcoli geotecnici, in attesa di verifiche di dettaglio tramite prospezioni sismiche di tipo MASW e HVSr (vedi § 12).

14 BIBLIOGRAFIA

- ✓ Anbalagan, R., Sharma, Sanjeev y Raghuvanshi, T.K. (1992): Rock Mass Stability Evaluation Using Modified SMR Approach. En: 6th National Symposium on Rock Mechanics. Proceedings, 1: 258-268.
- ✓ Barton N. (2002). Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. International. Journal of Rock Mechanics & Mining Science 39: 185-216.
- ✓ Berardi R., Bellingeri P. (1998): "Deformabilità degli ammassi rocciosi da approcci empirici: influenza della qualità del materiale roccioso e dello stato di sforzo in sito". Rivista Italiana di Geotecnica 1/98 (Gennaio-Marzo 1998): pp. 39-62.
- ✓ Bieniawski Z.T. (1989) - Engineering rock mass classification, Jhon & Sons Imc., NY, 251, pp.
- ✓ Bieniawski Z.T. (1976): "Rock mass classifications in rock engineering". Exploration for Rock Engineering, 107-115, Johannesburg.
- ✓ Bieniawski Z.T. (1978): "Determining rock mass deformability – experience from case histories". Int. J. Rock. Mech. Min. sci. Geomech. Abstr.
- ✓ Bruschi A. (2004). "Meccanica delle Rocce". Flaccovio Editore.
- ✓ Cherubini C., Giasi C.I. (2005): "L'applicazione dei sistemi di classificazione per la valutazione della capacità portante e dei cedimenti di fondazioni superficiali su rocce calcaree". Giornale di Geologia Applicata Vol. 2 (2005), pp. 255-259.
- ✓ Diederichs M.S., Kaiser P.K. (1999): "Stability of large excavations in laminates hard rockmasses: the Voussoir analogue revisited". Int. J. Rock Mech. Min. sci. 36: 97-117.
- ✓ Hoek E., Carranza-Torres - Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition Proc. North American Mechanics Society meeting in Toronto in July 2002
- ✓ Hoek E. & Bray J. W., (1981) – Rock Slope Engineering. Revised 3rd Edition. Institution of Mining and Metallurgy, London.
- ✓ Hoek E. & Brown E.T. (1997). "Practical estimates of rock mass strength". Submitted for publication to the Int. J. Rock Mech. Min. Sc.& Geomech. Abstr.
- ✓ Hoek E. & Diederichs M.S. (2006): "Empirical estimation of rock mass modulus". Int. J. Rock Mach. Min. sci. 43: 203-215.
- ✓ Hoek E. (1998): "Reliability of Hoek-Brown estimates of rock mass properties and their impact on design". Int. J. Rock Mech. Min. sci. 35: 63-68.
- ✓ Hoek E., Bray J. W. & Boyd J. W., (1974) – The stability of a rock slope containing a wedge resting on two intersecting discontinuities. Quarterly Journal Engineering Geology, London, 6.
- ✓ Hoek E., Brown E.T. (1997): "Practical estimates of rock strength". Int. J. Rock Mech. Min. sci. 34: 1165-1186.
- ✓ Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. (2002): "Hoek-Brown Failure Criterion - 2002 Edition". Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto, 2002, 1, 267-273.
- ✓ Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., and Corkum, B. (2002), HoekBrown failure criterion – 2002 edition. Proc. North American Rock Mechanics Society meeting in Toronto in July 2002.
- ✓ Hoek, Evert, (2002), A Brief History of the Hoek-Brown Failure Criterion, unpublished docum
- ✓ Marinos, P. and Hoek, E. (2001). Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as Flysch. Bull. Engng. Geol. Env. 60, 85-92.
- ✓ Mitri H.S., Edrissi R., Henning J. (1994): "Finite element modeling of cablebolted stopes in hard rock ground mines". Presenta t the SME annual meeting, New Mexico, Albuquerque, pp. 94-116.
- ✓ Nicholson G.A., Bieniawski Z.T. (1990): "A nonlinear deformation modulus based on rock mass classification". Int. J. Min. Geol. Eng. 8: 181-202.
- ✓ Palmstrom A., Broch E. (2006): "Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system". Tunnels and Underground Space Technology, vol. 21, pp. 575-593

- ✓ Read SAL, Richards LR, Perrin ND (1999): "Applicability of the Hoek-Brown failure criterion to New Zealand greywacke rocks". In Vouille G., Berest P. (editors). Proceedings of the ninth international congress on rock mechanics, Paris, August 1999, Vol. 2: 655-660.
- ✓ Romana, M. (1985): New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. En: International Symposium on the role of rock mechanics, ISRM. Proceedings: 49-53.
- ✓ Romana, M. (1993): A geomechanical classification for slopes: Slope Mass Rating. En: Comprehensive Rock Engineering (J.A. Hudson, Ed.). Pergamon Press, Oxford, 45 p.
- ✓ Romana, M. (1997): El papel de las clasificaciones geomecánicas en el estudio de la estabilidad de taludes. En: IV Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables. Comunicaciones, 3: 955-1011.
- ✓ Romana, M. (2005): Nota sobre la valoración del 5º parámetro (condiciones hidrogeológicas) del RMR básico en función de ru (razón de presiones intersticiales). En: VI Simposio de taludes y laderas inestables. Comunicaciones. 1: 221-226.
- ✓ Romana, M., Serón, J.B., Jordá, L. y Vélez, M.I. (2005): La clasificación geomecánica SMR para taludes: Estado actual, aplicación y experiencia internacional. En: VI Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables. Comunicaciones, 1: 239-250.
- ✓ Romana, M., Serón, J.B. y Montalar, E. (2001): La clasificación geomecánica SMR: Aplicación experiencias y validación. En: V Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables. Comunicaciones, 1: 393-404.
- ✓ Romana, M., Serón, J.B. y Montalar, E. (2003): SMR Geomechanics classification: Application, experience and validation. En: International. Symposium on the role of rock mechanics, ISRM. Proceedings: 1-4.
- ✓ Russo G., Kalamaras G & Grasso P. (1998): A discussion on the concepts of the geomechanical classes, behavior categories and technical classes for the underground project. Gallerie, nº 54.
- ✓ Serafim J.L., Pereira J.P. (1983): "Consideration of the geomechanical classification of Bieniawski". Proc. Int. Symp. Eng. Geol. Underground Construction (Lisbon) 1983; 1 (II): 33-44.
- ✓ Singh, B. y Goel, R.K. (1999): Rock Mass Classification. A Practical Approach in Civil Engineering. Elsevier, Amsterdam, 267 p.
- ✓ Somnez H., Gokceoglu C., Ulusay R. (2004): "Indirect determination of the modulus of deformation of rock masses based on the GSI system". Int. J. Rock Mech. Min. sci. 1: 849-857.
- ✓ Tahir M., Mohammad N. (2014): "Prediction performance and Generalization of the Empirical Estimation of Rockmass Deformation Modulus Based on Rockmass Classification Systems". International Journal of Scientific Engineering and Technology, Vol. n. 3, Issue n. 12, pp 1488-1495.
- ✓ Umrao R. K., Rajesh Singh, Ahmad M., Singh T.N. (2011). Stability Analysis of Cut Slopes Using Continuous Slope Mass Rating and Kinematic Analysis in Rudraprayag District, Uttarakhand, Geomaterials, 1: 79-87.

ALLEGATI

Tavola 1

Carta geologica e Sezioni geologiche



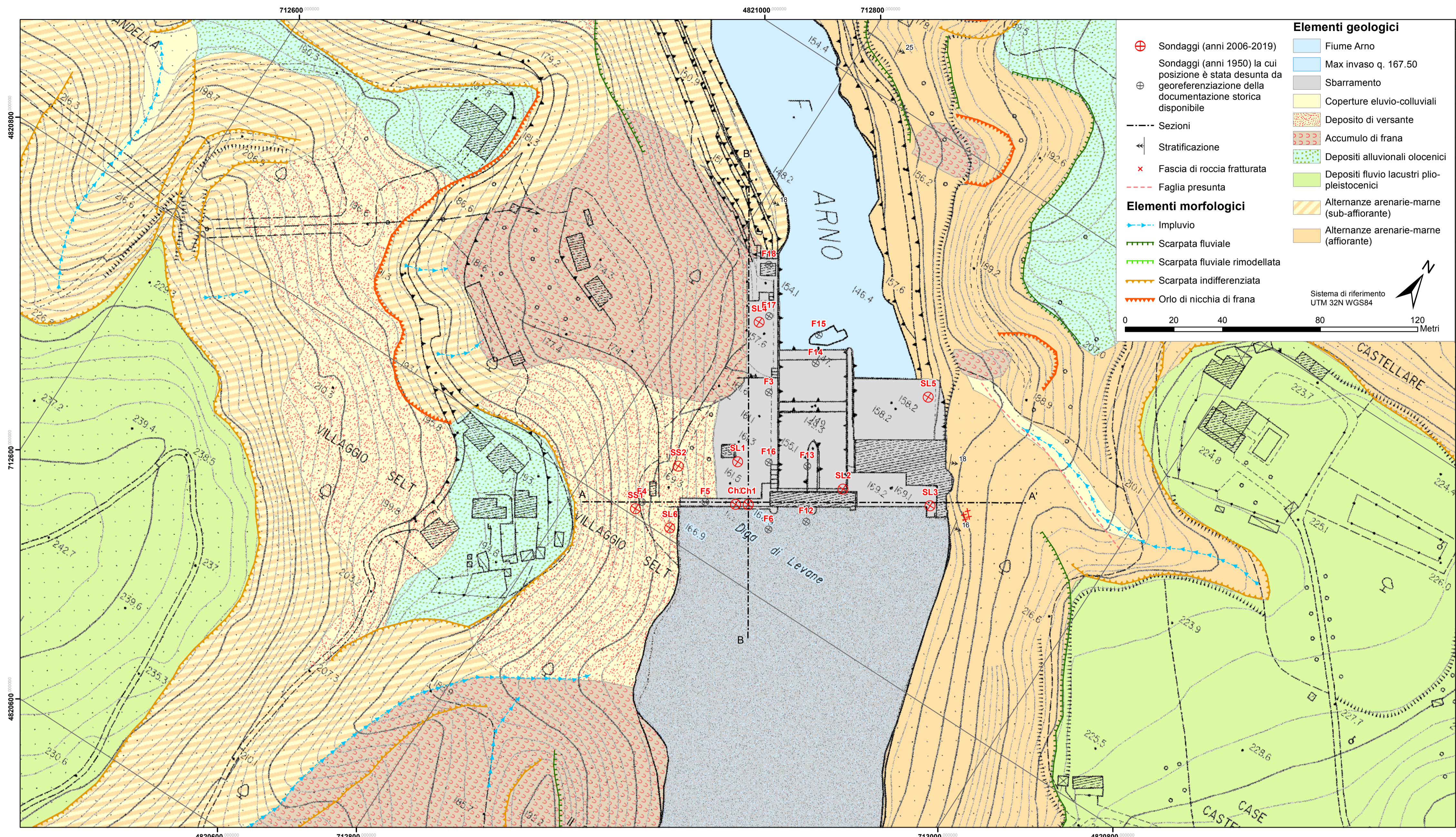
IMPIANTO	CODICE CKS
Impianto idroelettrico di Levane	Contratto Aperto di Servizi n. 350003854 del 25/09/2019 nell'ambito del Contratto Aperto di Servizi n. 840140299 del 07/05/2019
Diga di Levane: Progetto di Sovralzo ai fini di laminazione	

DIGA DI LEVANE
 Renewable Energies Italy - O&M Hydro Italy
 Northern Central Area - Territorial Unit Lucca - UE Levane
 Comune di Monteverchi - Provincia di Arezzo

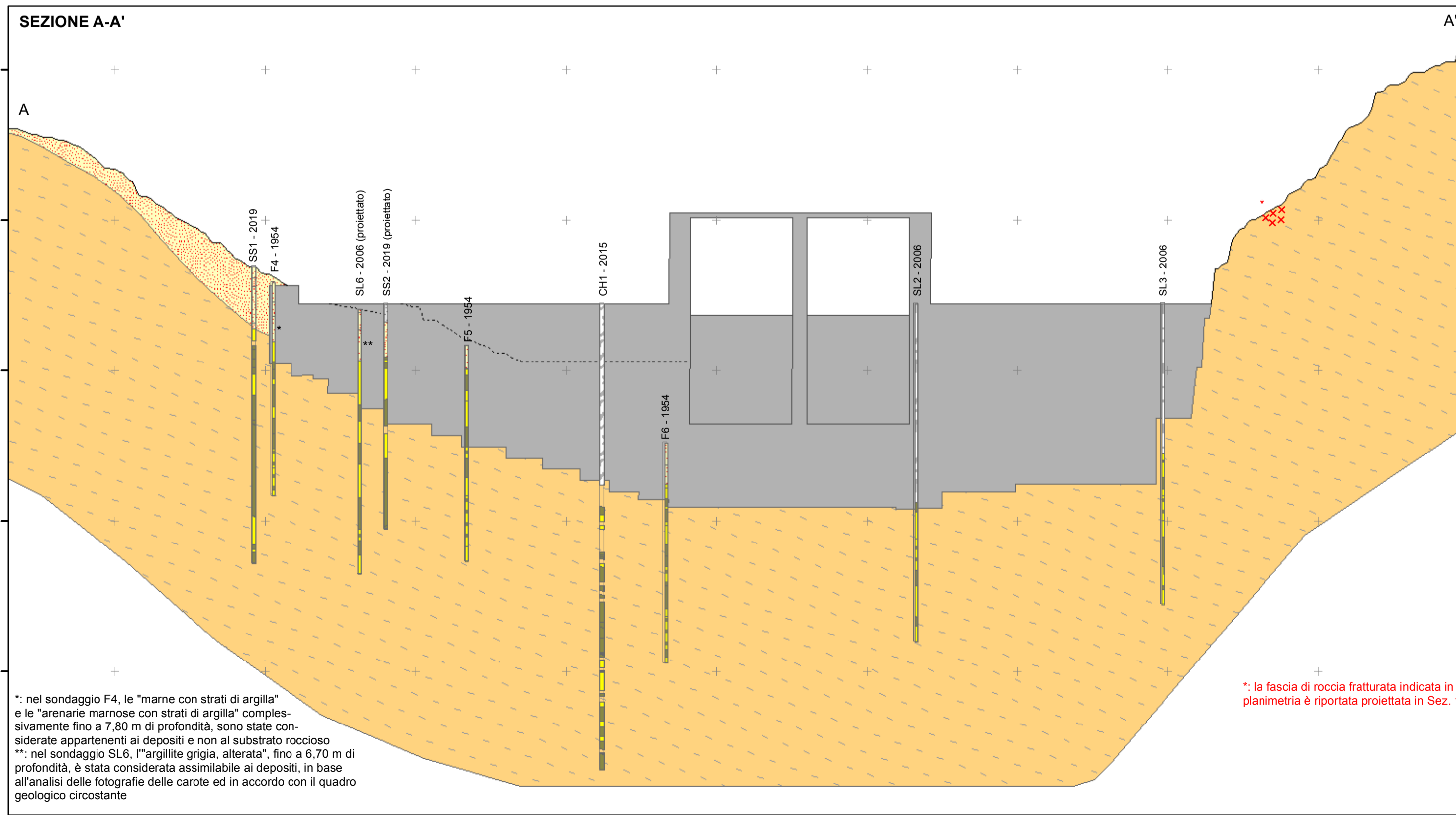
PROGETTO DI SOVRALZO AI FINI DI LAMINAZIONE - PROGETTO DEFINITIVO

CARTA GEOLOGICA - GEOMORFOLOGICA SEZIONI GEOLOGICHE

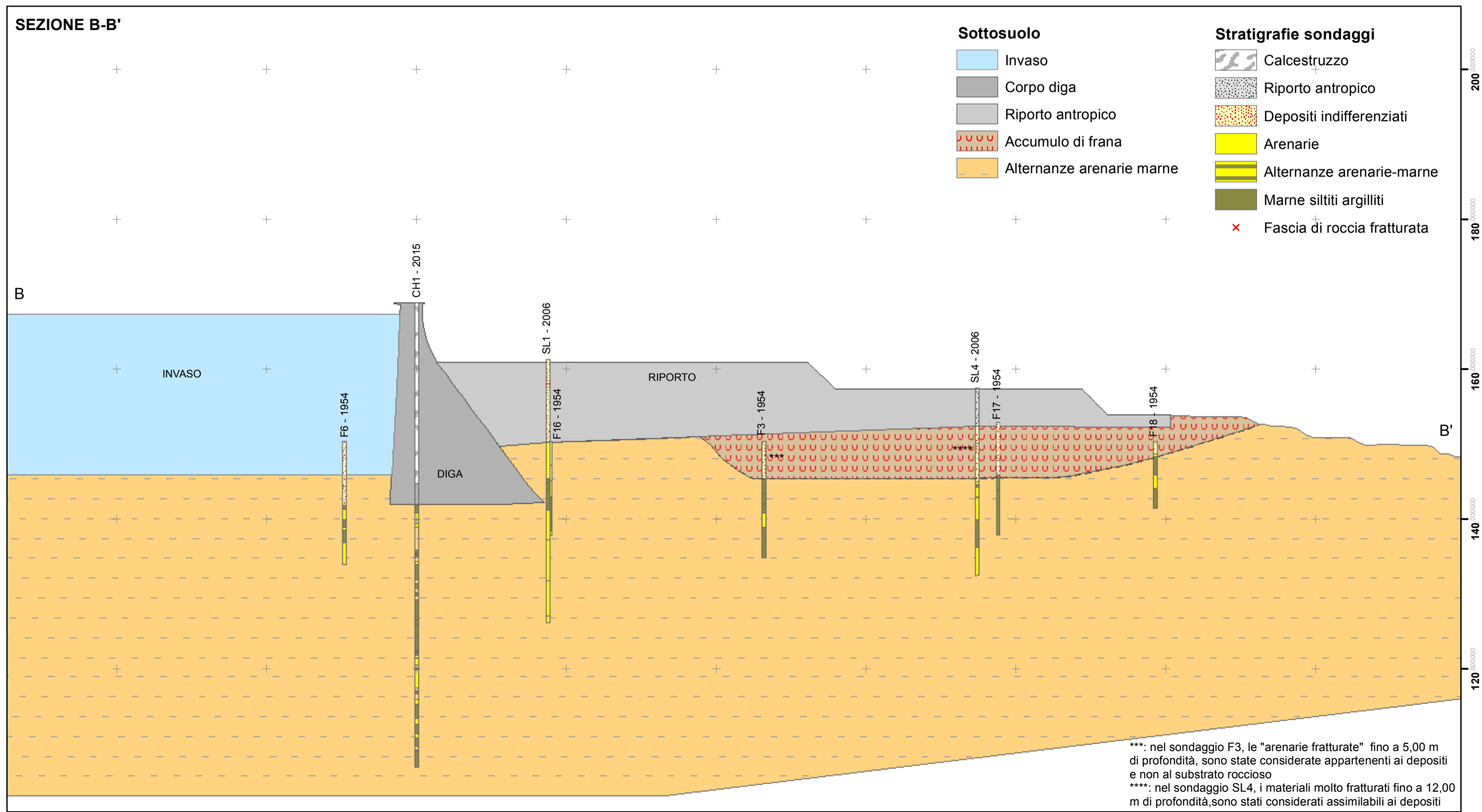
00	21/04/2020	Prima emissione	P.Vendrame	A.Norzi G.Ceroni	A.Moserc
REVISIONI	DATA	DESCRIZIONE REVISIONI	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO
ELABORATO CESI N.	00006347	NOME FILE	R05 Carta Geologica.dwg	SCALA	FOGLIO
				1:1000 Carta Geol. 1:500 Sezione Geol.	Tav 1
NUMERO E DATA ORDINE: 3500053942 del 28/09/2019					
IL PROGETTISTA					
CESI S.p.A. Via Russettino 54 I-20154 Milano - Italy Tel: +39 02 21251 Fax: +39 02 21254410 e-mail: info@cesi.it www.cesi.it Engineering & Environment - ISMES Division Structural & Civil Engineering Dott. Geol. Giovanni Cerri					
IL COMMITTENTE					
ENEL GREEN POWER SPA Renewable Energies Italy O&M Hydro Italy Northern Central Area					
PER PRESA VISIONE ING. RESPONSABILE					
No. HYD					
DATA ING. S. GABRIELLI					



- Elementi geologici**
- Sondaggi (anni 2006-2019)
 - Sondaggi (anni 1950) la cui posizione è stata desunta da georeferenziazione della documentazione storica disponibile
 - Sezioni
 - Stratificazione
 - Fascia di roccia fratturata
 - Faglia presunta
 - Impluvio
 - Scarpata fluviale
 - Scarpata fluviale rimodellata
 - Scarpata indifferenziata
 - Orlo di nicchia di frana
 - Fiume Arno
 - Max invaso q. 167.50
 - Sbarramento
 - Coperture eluvio-colluviali
 - Deposito di versante
 - Accumulo di frana
 - Depositi alluvionali olocenici
 - Depositi fluvio lacustri plio-pleistocenici
 - Alternanze arenarie-marne (sub-affiorante)
 - Alternanze arenarie-marne (affiorante)
- Elementi morfologici**
- Scarpata fluviale
 - Scarpata fluviale rimodellata
 - Scarpata indifferenziata
 - Orlo di nicchia di frana
- Sistema di riferimento UTM 32N WGS84
- 0 20 40 80 120 Metri



* nel sondaggio F4, le "marne con strati di argilla" e le "arenarie marnose con strati di argilla" complessivamente fino a 7,80 m di profondità, sono state considerate appartenenti ai depositi e non al substrato roccioso
 ** nel sondaggio SL6, l'"argillite grigia, alterata", fino a 6,70 m di profondità, è stata considerata assimilabile ai depositi, in base all'analisi delle fotografie delle carote ed in accordo con il quadro geologico circostante
 *** la fascia di roccia fratturata indicata in planimetria è riportata proiettata in Sez. 1



*** nel sondaggio F3, le "arenarie fratturate" fino a 5,00 m di profondità, sono state considerate appartenenti ai depositi e non al substrato roccioso
 **** nel sondaggio SL4, i materiali molto fratturati fino a 12,00 m di profondità, sono stati considerati assimilabili ai depositi

PIAD - C0006347 (2771689) - USO RISERVATO