

INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO DELLA DIGA DROVE DI CEPPARELLO



PROGETTO DEFINITIVO

Codice elaborato: ET10	Nome Elaborato: RELAZIONE GEOTECNICA STABILITA' DIGA	Scala: -
		Data: 30/10/2020

Settore:

 **INGEGNERIE TOSCANES**

Sede Firenze Via de Sanctis, 49 Cod. Fiscale e P.I. 06111950488

Organizzazione dotata di Sistema di Gestione Integrato certificato in conformità alla normativa ISO9001 - ISO14001 - OHSAS18001 - SA8000

PROGETTAZIONE :

PROGETTISTA :

ING. GIOVANNI SIMONELLI

GEOLOGO :

GEOL. FILIPPO LANDINI

ESPROPRI :

GEOM. ANDREA PATRIARCHI

COLLABORATORI :

GEOL. CARLO FERRI

PER. AGR. DAVIDE MORETTI

GEOM. ANDREA BERNARDINI

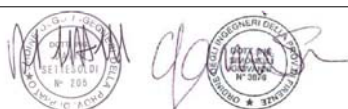
CONSULENTI TECNICI :

 **WEST Systems**

PROGETTISTA OPERE IDRAULICHE E STRUTTURALI : ING. DAVID SETTESOLDI

COMMESSA I.T. :

INGT-TPLPD-ACQAC159



RESPONSABILE COMMITTENTE :

GEOM. ALESSANDRO PIOLI

DELEGATO DEL DIRETTORE TECNICO :

ING. GIOVANNI SIMONELLI

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO :



ING. ROBERTO CECCHINI

Rev.	Data	Descrizione / Motivo della revisione	Redatto	Controllato / Approvato
02	30 / 10 / 2020	Seconda Emissione (Richieste pervenute e revisione costi)	Catella	Settesoldi
01	18 / 04 / 2019	Prima Emissione	Catella	Settesoldi

INDICE

1	PREMESSA	5
2	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	6
3	INDAGINI GEOGNOSTICHE	7
4	INDAGINI TERRE RINFIANCO	12
5	MODELLO GEOTECNICO	14
6	RIEPILOGO PARAMETRI GEOTECNICI	19
7	PERICOLOSITÀ SISMICA.....	21
7.1	RISPOSTA SISMICA LOCALE	21
7.1.1	<i>Spettri di risposta IN ACCELERAZIONE E Accelerogrammi.....</i>	<i>22</i>
8	AZIONI INERZIALI DELL'ACQUA CONTENUTA NEL SERBATOIO	25
9	IDENTIFICAZIONE E CLASSIFICAZIONE DELLE OPERE ACCESSORIE.....	27
10	COMPORAMENTO DELLA DIGA IN ESERCIZIO	28
10.1	COMPORAMENTO DELLA DIGA DURANTE I TERREMOTI.....	29
11	VERIFICHE GEOTECNICHE DEL CORPO DIGA.....	33
12	VERIFICHE DEGLI STATI ULTIMI IDRAULICI	35
13	STIMA DEI CEDIMENTI	36
14	LIQUEFAZIONE	37

ELENCO FIGURE

Figura 3-1 – Planimetria dei sondaggi delle campagne geognostiche condotte negli anni 2005/2006 e 2016.	11
Figura 4-1 – Planimetria dei saggi effettuati nell'invaso.....	12
Figura 5-1 – Profilo stratigrafico sezione A_CO_03.....	15
Figura 5-2 – Profilo stratigrafico sezione A_CO_05.....	15
Figura 5-3 – Profilo stratigrafico sezione A_CO_08.....	16
Figura 7-1 – Spettri di risposta in accelerazione SLO (Tr = 1950 anni).....	22
Figura 7-2 – Spettri di risposta in accelerazione SLD (Tr = 1950 anni).....	23
Figura 7-3 – Spettri di risposta in accelerazione SLV (Tr = 1950 anni).....	23
Figura 7-4 – Spettri di risposta in accelerazione SLC (Tr = 1950 anni).....	24
Figura 10-1 – Epicentri sismi dal 1985 a oggi (Fonte: ISIDe working group (2016) version 1.0, DOI: 10.13127/ISIDe).....	29
Figura 10-2 – Spostamenti in z coronamento monte verso monte.....	31
Figura 10-3 – Spostamenti in z coronamento valle verso monte.....	31
Figura 10-4 – Spostamenti in z coronamento valle verso valle.....	32
Figura 10-5 – Spostamenti in z berma verso valle.....	32

ELENCO TABELLE

Tabella 3-1 – Sintesi analisi di laboratorio eseguite sui campioni prelevati dai sondaggi S1 e S2 ottobre 2006.	8
Tabella 3-2 – Sintesi prove campioni sondaggio S3 febbraio-marzo 2016.....	8
Tabella 3-3 – Sintesi prove campioni sondaggio S4 febbraio-marzo 2016.....	8
Tabella 3-4 – Sintesi prove campioni sondaggio S5 febbraio-marzo 2016.....	9
Tabella 3-5 – Sintesi prove campioni sondaggio S6 febbraio-marzo 2016.....	9
Tabella 3-6 – Sintesi prove campioni sondaggio S7 febbraio-marzo 2016.....	9
Tabella 4-1 – Parametri dei terreni presenti all’interno dell’invaso.	13
Tabella 6-1 – Sintesi dei risultati delle indagini sui campioni dei vari sondaggi prelevati nella sub-unità 1a del corpo diga.....	17
Tabella 6-2 – Sintesi dei risultati delle indagini sui campioni dei vari sondaggi prelevati nella sub-unità 1b del corpo diga.....	18
Tabella 6-1 – Parametri geotecnici caratteristici.....	20
Tabella 6-2 – Parametri geotecnici verifiche di filtrazione e sismiche.	20
Tabella 7-1 – Parametri sismici di base SLO, SLD, SLV e SLC.	21
Tabella 7-2 – Parametri dello spettro di risposta normalizzato ottenuto dalla risposta sismica locale.	24
Tabella 8-1 – Azioni inerziali verifiche sismiche con invaso pieno per stati limite di esercizio SLO e SLD per le sezioni A_CO_03 e A_CO_05.....	25
Tabella 8-2 – Azioni inerziali verifiche sismiche con invaso pieno per stati limite ultimi SLV e SLC per le sezioni A_CO_03 e A_CO_05.....	25
Tabella 8-3 – Azioni inerziali verifiche sismiche con invaso pieno per stati limite di esercizio SLO e SLD per la sezione A_CO_08.....	26
Tabella 8-4 – Azioni inerziali verifiche sismiche con invaso pieno per stati limite ultimi SLV e SLC per la sezione A_CO_08.....	26
Tabella 9-1 – Classificazione delle opere accessorie della diga di Cepparello.	27
Tabella 10-1 – Sismi dal 1985 a oggi.....	30
Tabella 11-1 – Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza delle dighe di materiali sciolti ai sensi del cap. E.5.1 del D.M. 26/06/2014.	33
Tabella 13-1 – Parametri per il paramento di monte per il calcolo dei cedimenti	36
Tabella 13-2 – Calcolo cedimenti paramento di monte	36
Tabella 13-3 – Parametri per il paramento di valle per il calcolo dei cedimenti.....	36
Tabella 13-4 – Calcolo cedimenti paramento di valle	36

1 PREMESSA

La presente relazione geotecnica è parte integrante del progetto definitivo degli interventi di miglioramento della diga di Cepparello ubicata nel Comune di Poggibonsi (Prov. SI).

La diga sbarra il Borro di Cepparello nel bacino del Fiume Arno, determinando un serbatoio con capacità originaria di invaso di 0.65 Mm³ ai sensi del D.M. 24/03/1982 e con capacità utile originaria di regolazione di 0.52 Mm³ (FCEM vigente approvato con prot. n. RID/4009/UCCE del 23/12/2003).

La relazione geotecnica è redatta in conformità delle normative e raccomandazioni di riferimento elencate al successivo paragrafo.

Nella relazione si riportano le valutazioni ed i calcoli effettuati per la definizione del modello geotecnico di riferimento per il corpo diga e per i terreni del substrato.

2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

La normativa di riferimento è la seguente:

- **Legge n. 64 del 02/02/1974**
Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche.
- **D.M. LL.PP. del 11/03/1988**
Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione.
- **D.M. 16 Gennaio 1996**
Norme Tecniche per le costruzioni in zone sismiche.
- **Circolare Ministero LL.PP. 15 Ottobre 1996 N. 252 AA.GG./S.T.C.**
Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche di cui al D.M. 9 Gennaio 1996.
- **Circolare Ministero LL.PP. 10 Aprile 1997 N. 65/AA.GG.**
Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni in zone sismiche di cui al D.M. 16 Gennaio 1996.
- **Norme Tecniche per le Costruzioni 2008 (D.M. 14 Gennaio 2008)**
- **Circolare 617 del 02/02/2009**
Istruzioni per l'applicazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008.
- **Norme Tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (D.M. 26 Giugno 2014)**
- **Norme tecniche per le costruzioni (D.M. 17 Gennaio 2018)**
- **Istruzioni MIT DG Dighe Luglio 2019**
Istruzioni per l'applicazione della normativa tecnica di cui al D.M. 26 Giugno 2014 e al D.M. 17 Gennaio 2018 in merito alle verifiche sismiche delle grandi dighe, degli scarichi e delle opere accessorie.
- **Procedura MIT DG Dighe Marzo 2019**
Procedura per la rivalutazione sismica delle grandi dighe, degli scarichi e delle opere accessorie.

3 INDAGINI GEOGNOSTICHE

Il modello geotecnico del corpo diga e dei terreni del substrato è ricostruito utilizzando i risultati delle campagne geognostiche condotte negli anni 2005/2006 e 2016. Nella relazione geologica allegata al progetto (elaborato ET.05) sono riportati gli esiti delle indagini geognostiche svolte.

Nella Figura 3-1 è rappresentata l'ubicazione delle indagine eseguite con le campagne geognostiche condotte negli anni 2005/2006 e 2016.

Nel mese di luglio 2005 sono stati eseguiti n. 2 carotaggi continui con aste e carotiere, di cui uno (sondaggio S1) esteso fino alla profondità di -30.0 m dal coronamento della diga (quota di 189.7 m s.l.m.) e uno (sondaggio S2) esteso fino alla profondità di -15.0 m dalla banca intermedia del paramento di valle (quota di 178.7 m s.l.m.).

Il materiale carotato è stato sistemato in apposite cassette catalogatrici e sottoposto a prove di caratterizzazione geotecnica in situ mediante penetrometro tascabile e scissometro.

Nel mese di ottobre 2006 sono stati eseguiti n. 2 carotaggi continui a rotazione ubicati entrambi sul coronamento della diga ed estesi fino alla profondità di -27.0 m dal p.c..

Dal sondaggio S1 sono stati prelevati n. 7 campioni, di cui n. 2 indisturbati (S1C1 e S1C2), contenuti in fustella metallica tipo *Shelby*, e n. 5 semi-disturbati (S1Cr3; S1Cr4; S1Cr5; S1Cr6; S1Cr7), mentre dal sondaggio S2 sono stati prelevati n. 2 campioni, uno indisturbato (S2C2) e uno semi-disturbato (S2Cr2).

Nella

n (porosità)		0.37	0.35	0.30	0.35
--------------	--	------	------	------	------

Tabella 6-1 è riportata la sintesi delle analisi eseguite sui campioni prelevati dai suddetti sondaggi. All'interno del sondaggio S1 è stata eseguita una prova penetrometrica in foro (*Standard Penetration Test*) estesa fino a profondità comprese tra -3.0 m e -21.45 m dal p.c., finalizzata a verificare il grado di consistenza degli orizzonti litologicamente significativi ma non campionabili. I fori dei sondaggi S1 e S2 sono stati attrezzati con piezometri, in particolare il piezometro S2 è stato provvisto di piezometro di Casagrande.

Sondaggio campione	Profondità prelievo [m d.p.c.]	Analisi granulometrica ¹	Peso di volume	Limiti Atterberg ²	Limite ritiro	Prova edometrica ³	Prova triassiale CU	Prova di taglio CD ⁴	Prova di compressione uniassiale ⁵	Point load test ⁶
S1C1	-3.00/-3.50	•	•	•	•	•	•			
S1C2	-6.00/-6.50	•	•	•	•	•	•			
S1Cr3	-9.70/-10.2	•	•	•	•	•		•		
S1Cr4	-14.0/-15.0	•	•	•	•	•		•		
S1Cr5	-15.0/-15.3	•	•	•	•	•		•		
S1Cr6	-25.7/-26.0		•							•
S1Cr7	-26.0/-26.2		•						•	
S2C1	-12.0/-12.5	•	•	•	•	•	•			

¹ Per setacciatura (via umida) e per sedimentazione (metodo densimetro)

² Limite liquido W_L e limite plastico W_p

³ Prova a gradini di carico costante con determinazione dei coeff. di consolidazione C_v e permeabilità k

⁴ Prova di taglio consolidato drenato

⁵ Determinazione di σ a rottura

⁶ Resistenza a compressione uni assiale esercitata con carico puntuale

Sondaggio campione	Profondità prelievo [mdap.c.]	Analisi granulometrica ¹	Peso di volume	Limiti Atterberg ²	Limite ritiro	Prova edometrica ³	Prova triassiale CU	Prova di taglio CD ⁴	Prova di compressione uniassiale ⁵	Point load test ⁶
S2Cr2	-20.4/-20.6	•	•	•	•	•		•		

Tabella 3-1 – Sintesi analisi di laboratorio eseguite sui campioni prelevati dai sondaggi S1 e S2 ottobre 2006.

Nel corso dell'indagine geognostica condotta tra febbraio e marzo 2016 sono stati eseguiti n. 5 carotaggi continui, di cui n. 3 sul coronamento (sondaggi: S3; S4; S5) e n. 2 (sondaggi: S6; S7) sulla banca intermedia del paramento di valle.

In totale sono stati prelevati n. 34 campioni, di cui n. 32 indisturbati contenuti in fustella metallica tipo *Shelby* e n. 2 disturbati contenuti in busta di cellophane sigillata.

Nella Tabella 3-2, nella Tabella 3-3, nella Tabella 3-4, nella Tabella 3-5 e nella Tabella 3-6 sono riportate la sintesi delle analisi eseguite sui campioni prelevati rispettivamente dai sondaggi S3, S4, S5, S6 e S7.

Sondaggio campione	Profondità prelievo [mdap.c.]	Analisi granulometrica ¹	Peso di volume	Limiti Atterberg ²	Prova E.L.L.	Prova triassiale UU	Prova triassiale CU	Prova di taglio CD ⁴
S316C1	-1.50/-1.80	•	•	•		•		•
S316C3	-4.20/-4.70	•	•	•			•	
S316C4	-5.40/-5.85	•	•	•		•		•
S316C5	-7.15/-7.65	•	•	•			•	
S316C6	-9.00/-9.50	•	•	•			•	
S316C7	-10.7/-11.2	•	•	•				
S316C8	-12.5/-13.0	•	•	•	•		•	
S316C9	-14.5/-14.8	•	•	•		•		
S316C10R	17.2/-17.7	•	•	•		•		•
S316C11R	-22.0/-22.5	•	•	•		•		•

Tabella 3-2 – Sintesi prove campioni sondaggio S3 febbraio-marzo 2016.

Sondaggio campione	Profondità prelievo [mdap.c.]	Analisi granulometrica ¹	Peso di volume	Limiti Atterberg ²	Prova E.L.L.	Prova triassiale UU	Prova triassiale CU	Prova di taglio CD ⁴
S416C1	-1.70/-2.00	•	•	•		•		•
S416C2	-3.00/-3.30	•	•	•			•	
S416C3	-4.10/-4.65	•	•	•		•		•
S416C4	-6.00/-6.50	•	•	•	•		•	
S416C5	-7.60/-8.10	•	•	•	•		•	
S416C6	-9.00/-9.50	•	•	•				•
S416C7	-11.85/-12.25	•	•	•		•		•
S416C8	-14.0/-15.0	•	•	•		•		•
S416C9	-16.0/-16.50	•	•	•		•		•

Tabella 3-3 – Sintesi prove campioni sondaggio S4 febbraio-marzo 2016.

Sondaggio campione	Profondità prelievo [mdap.c.]	Analisi granulometrica ¹	Peso di volume	Limiti Atterberg ²	Prova E.L.L.	Prova triassiale UU	Prova triassiale CU	Prova di taglio CD ⁴
S516C1	-1.50/-1.80	•	•	•		•		
S516C2	-3.30/-3.30	•	•	•			•	
S516C3	-7.40/-7.90	•	•	•			•	
S516C4	-9.00/-9.50	•	•	•	•		•	

Sondaggio campione	Profondità prelievo [mdap.c.]	Analisi granulometrica ¹	Peso di volume	Limiti Atterberg ²	Prova E.L.L.	Prova triassiale UU	Prova triassiale CU	Prova di taglio CD ⁴
S516C5	-12.0/-12.5	•	•	•				
S516C6	-13.1/-13.5	•	•	•		•		•
S516C7	-14.5/-15.0	•	•	•				

Tabella 3-4 – Sintesi prove campioni sondaggio S5 febbraio-marzo 2016.

Sondaggio campione	Profondità prelievo [mdap.c.]	Analisi granulometrica ¹	Peso di volume	Limiti Atterberg ²	Prova E.L.L.	Prova triassiale UU	Prova triassiale CU	Prova di taglio CD ⁴
S616C1	-1.10/-1.50	•	•	•		•		
S616C2	-3.20/-3.60	•	•	•				•
S616C3	-5.00/-5.40	•	•	•		•		

Tabella 3-5 – Sintesi prove campioni sondaggio S6 febbraio-marzo 2016.

Sondaggio campione	Profondità prelievo [mdap.c.]	Analisi granulometrica ¹	Peso di volume	Limiti Atterberg ²	Prova E.L.L.	Prova triassiale UU	Prova triassiale CU	Prova di taglio CD ⁴
S716C1	-1.50/-1.80	•	•	•				
S716C3	-2.80/-3.00	•	•	•	•			
S716C4	-3.00/-3.40	•	•	•	•	•		•
S716C5	-4.10/-4.60	•	•	•				
S716C6	-5.00/-5.35	•	•	•	•	•	•	•

Tabella 3-6 – Sintesi prove campioni sondaggio S7 febbraio-marzo 2016.

Nel sondaggio S3, spinto fino alla profondità di -36.5 m dal p.c., sono state eseguite prove penetrometriche in foro (*Standard Penetration Test*) e prove *Lefranc* a carico variabile in abbassamento e/o a carico costante (-5.5/-6.0 m; -10.5/-11.5 m; -14.5/-14.8 m; -17.8/-18.5 m; -21.0/-21.6 m).

Al termine della perforazione il foro di sondaggio è stato attrezzato con due piezometri di Casagrande a doppio tubo, con profondità di messa in opera dei filtri a -27.3 m e -18,1 m dal p.c..

Nel sondaggio S4, spinto fino alla profondità di -25.7 m dal p.c., sono state eseguite prove penetrometriche in foro (*Standard Penetration Test*) e prove *Lefranc* a carico variabile in abbassamento e/o a carico costante (-6.0/-6.6 m; -10.5/-11.0 m; -14.5/-15.0 m; -17.5/-18.0 m; -20.55/-21.1 m).

Al termine della perforazione il foro di sondaggio è stato attrezzato con due piezometri di Casagrande a doppio tubo, con profondità di messa in opera dei filtri a -23.7 m e -19.6 m dal p.c..

Nel sondaggio S5, spinto fino alla profondità di -24.0 m dal p.c., sono state eseguite prove penetrometriche in foro (*Standard Penetration Test*) e prove *Lefranc* a carico variabile in abbassamento e/o a carico costante (-6.0/-6.5 m; -10.5/-11.0 m; -13.0/-13.5 m; -17.5/-18.0 m).

Al termine della perforazione il foro di sondaggio è stato attrezzato con due piezometri di Casagrande a doppio tubo, con profondità di messa in opera dei filtri a -21.6 m e -18.2 m dal p.c..

Il foro del sondaggio S6, spinto fino alla profondità di -12.0 m dal p.c., è stato attrezzati con due piezometri di Casagrande a doppio tubo, con profondità di messa in opera dei filtri a -9.3 m e -6.7 m dal p.c..

Il foro del sondaggio S7, spinto fino alla profondità di -5.4 m dal p.c., è stato riempito con malta cementizia

Per quanto concerne le indagini geognostiche indirette sono state eseguite le seguenti analisi nel 2006:

- n.1 indagine mediante sismica *down-hole* con onde P e SH all'interno del foro di sondaggio S1 (coronamento diga);
- n.1 indagine mediante sismica a rifrazione con onde P nella porzione posta a monte della strada di accesso al corpo diga, mediante l'esecuzione n. 5 profili di sismica a rifrazione superficiale (di lunghezza pari a 46 m ciascuno) con una spaziatura di 2 m, per un totale di 230 m di stendi menti.

Infine, nel 2016 è stata eseguita un'indagine geoelettrica tridimensionale in due fasi del corpo diga:

- tomografia geoelettrica in 3D sull'intero rilevato (metodo *cross-cable*);
- tomografia geoelettrica in 2D sulla linea del coronamento.

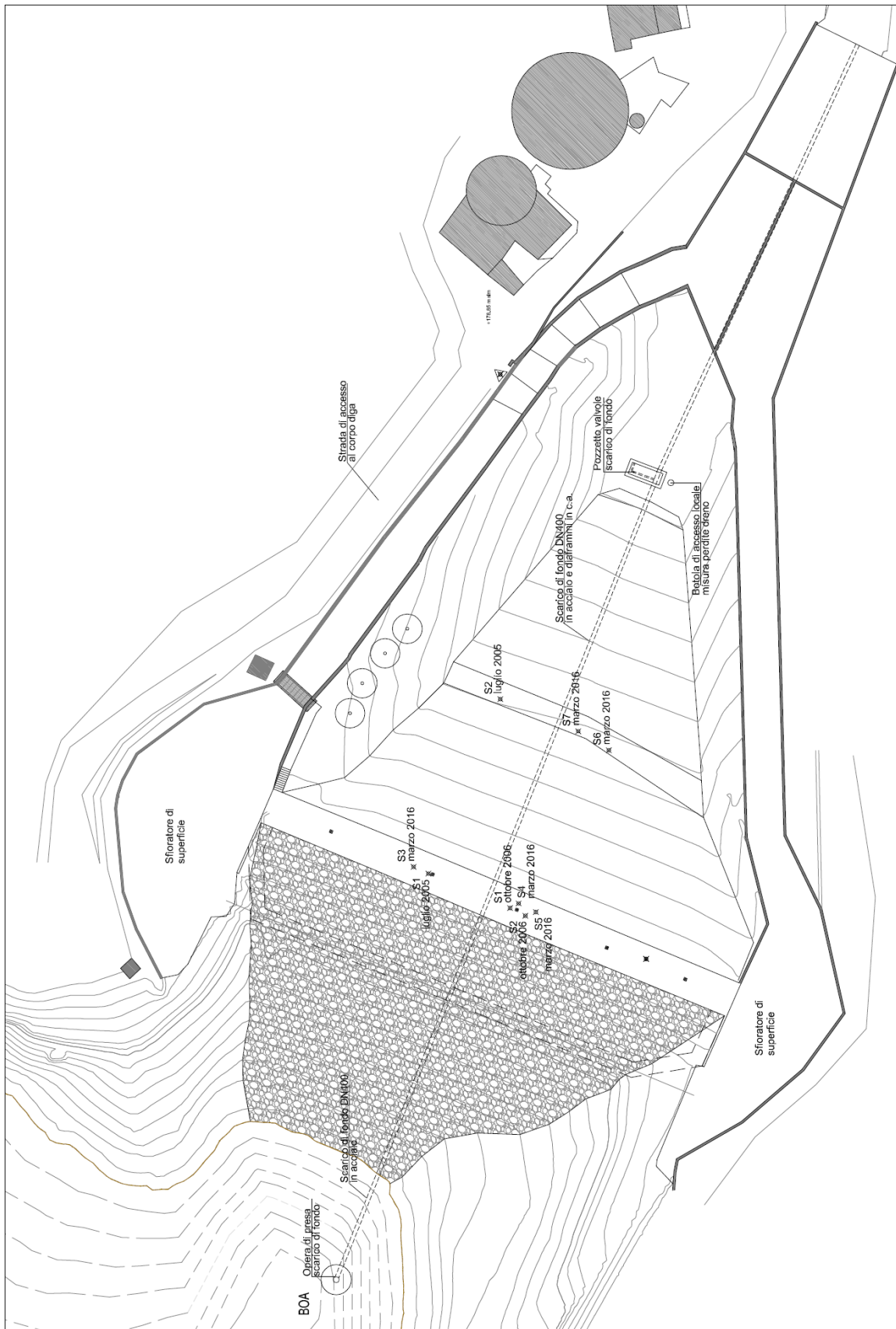


Figura 3-1 – Planimetria dei sondaggi delle campagne geognostiche condotte negli anni 2005/2006 e 2016.

4 INDAGINI TERRE RINFIANCO

Nel febbraio 2019 sono stati condotti alcuni saggi per la verifica delle caratteristiche geotecniche dei terreni presenti all'interno dell'invaso da utilizzarsi per il rinfianco della diga.

I prelievi sono stati effettuati come evidenziato nella Figura 4-1.

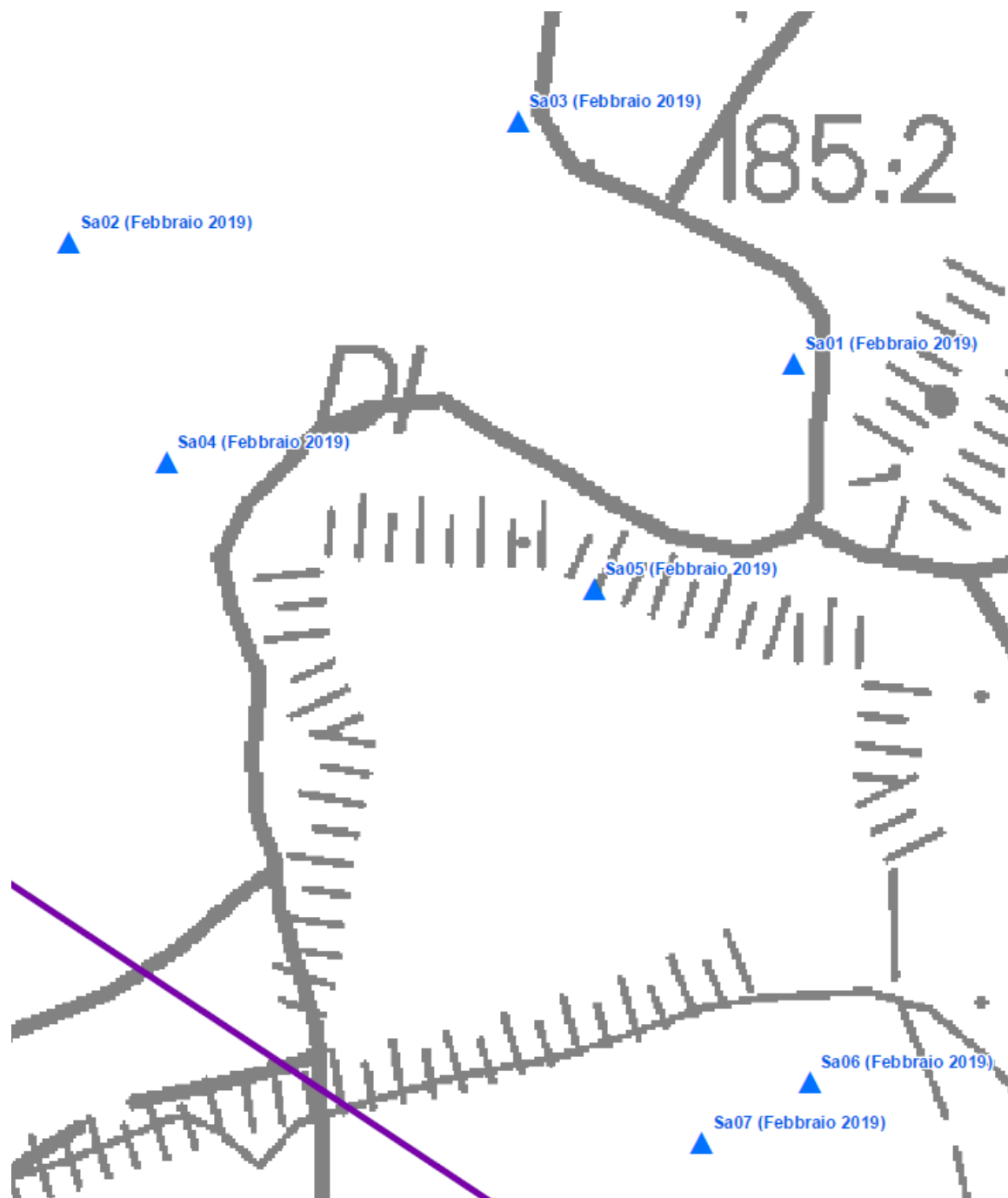


Figura 4-1 – Planimetria dei saggi effettuati nell'invaso.

Le indagini hanno fornito i risultati riportati nella Tabella 4-1.

CAMPIONE	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Limiti di Atterberg							
Umidità naturale (%)	7.91	36.34	33.57	24.23	29.89	9.79	12.81
Limite liquido (%)	36	39	53	40	45	36	39
Limite plastico (%)	22	26	27	22	30	21	21
Indice di plasticità (%)	14	13	26	18	15	15	18
Indice di consistenza	2.01	0.2	0.75	0.88	1.01	1.75	1.45
Indice di attività	0.55	0.36	0.64	0.67	0.62	0.4	0.59
Classificaz. Casagrande	CL	ML-OL	CH	CL	ML-OL	CL	CL
Granulometria							
Ghiaia (%)	66.5	17.5	2.1	21.9	34.9	36.1	34.8
Sabbia (%)	14.1	21.9	9.9	16.1	16.4	23.1	16.2
Limo (%)	13.1	34.4	49.5	42.5	35	20.8	30.9
Argilla (%)	6.3	26.2	38.5	19.5	13.7	20	18
Classificazione UNI 10006							
Gruppo	A2-6	A6	A7-6	A6	A7-5	A6	A6
Indice di gruppo	0	6	17	9	5	3	6
Parametri fisici							
Peso volume naturale (kN/m3)	20	18.8	18.6	19.3	19.4	20.4	20.2
Peso volume secco (kN/m3)	17.6	15.8	15.5	16.3	16.4	17.7	17.7
Prova triassiale non consolidata non drenata							
Coesione non drenata, Cu (kPa)	91.4	179.3	64.9	74.9	80.1	88.6	68.4
Prova di taglio diretto							
Coesione, C' (kPa)	13.7	19.3	15	12.2	19.7	8.7	24.2
Angolo di resistenza al taglio, f' (°)	33.9	34.2	26.5	29.9	28.9	33	24
Prova edometrica							
Rapporto di ricompressione, Rr	0.02604	0.01851	0.02652	0.03235	0.01589	0.01674	0.02162
Rapporto di compressione, Rc	0.10588	0.11204	0.12467	0.09652	0.10906	0.09171	0.0941
Rapporto di rigonfiamento, Rs	0.01958	0.01847	0.02948	0.02219	0.0248	0.02172	0.02875
Pressione di preconsolidazione, s'vmax (kPa)	257	274	189	208	243	280	243
Cv (cm2/sec)	2.60E-02	4.91E-03	4.98E-03	5.20E-03	8.53E-03	5.14E-03	4.99E-03
K (cm/sec)	8.29E-08	1.48E-08	3.66E-08	2.13E-08	2.33E-08	1.23E-08	2.06E-08
Cv (cm2/sec)	3.58E-02	2.36E-03	2.14E-03	5.86E-03	1.33E-02	1.24E-02	5.20E-03
K (cm/sec)	1.24E-07	6.08E-09	1.45E-08	2.21E-08	4.50E-08	2.86E-08	2.04E-08
Prova AASHTO Standard							
W(%)	13.4	18.5	20.8	19	18	14.8	14.5
gd (kN/m3)	17.63	15.98	15.38	16.24	16.35	17.83	17.73

Tabella 4-1 – Parametri dei terreni presenti all'interno dell'invaso.

5 MODELLO GEOTECNICO

Il modello geotecnico è stato ricostruito a partire dalla successione geologica delle varie sub-unità geotecniche, intese come parti omogenee sotto il profilo litologico, che compongono il corpo diga e i terreni del substrato.

Le indagini geognostiche dirette e indirette hanno permesso di individuare allo stato attuale tre differenti sub-unità:

- sub-unità 1a: corpo diga, costituita da limi argillosi e argille limose, debolmente sabbiose o sabbiose, con diffusi clasti di ghiaia fine;
- sub-unità 1b: corpo diga, costituita da ghiaia etero metrica in matrice limoso-argillosa con sabbia;
- sub-unità 2: basamento del corpo diga caratterizzato dalla presenza di siltiti scure alternate a Pietraforte.

Il profilo geotecnico è ricostruito componendo le successioni stratigrafiche individuate con i sondaggi geognostici condotti negli anni 2005/2006 e 2016 con la rappresentazione della resistività elettrica del sottosuolo dell'intero corpo diga ottenuta mediante l'indagine geoelettrica tridimensionale.

In questo modo sono ricostruiti i profili stratigrafici di n. 3 sezioni del corpo diga:

- sezione A_CO_03 (Figura 5-1);
- sezione A_CO_05 (Figura 5-2);
- sezione A_CO_08 (Figura 5-3).

Il profilo stratigrafico della sezione A_CO_03 è ricostruito a partire dai risultati dei sondaggi S3 e S7 (febbraio-marzo 2016), nonché dal profilo della resistività elettrica della sezione verticale B-10 ottenuto con l'indagine geoelettrica 3D.

Il profilo stratigrafico della sezione A_CO_05 è ricostruito a partire dai risultati dei sondaggi S1 (luglio 2005), S1 (ottobre 2005) e S7 (febbraio-marzo 2016), nonché dal profilo della resistività elettrica della sezione verticale B-8 dell'indagine geoelettrica 3D.

Il profilo stratigrafico della sezione A_CO_08 è ricostruito a partire dai risultati dei sondaggi S5 e S6 (febbraio-marzo 2016), nonché dal profilo della resistività elettrica della sezione verticale B-5 dell'indagine geoelettrica 3D.

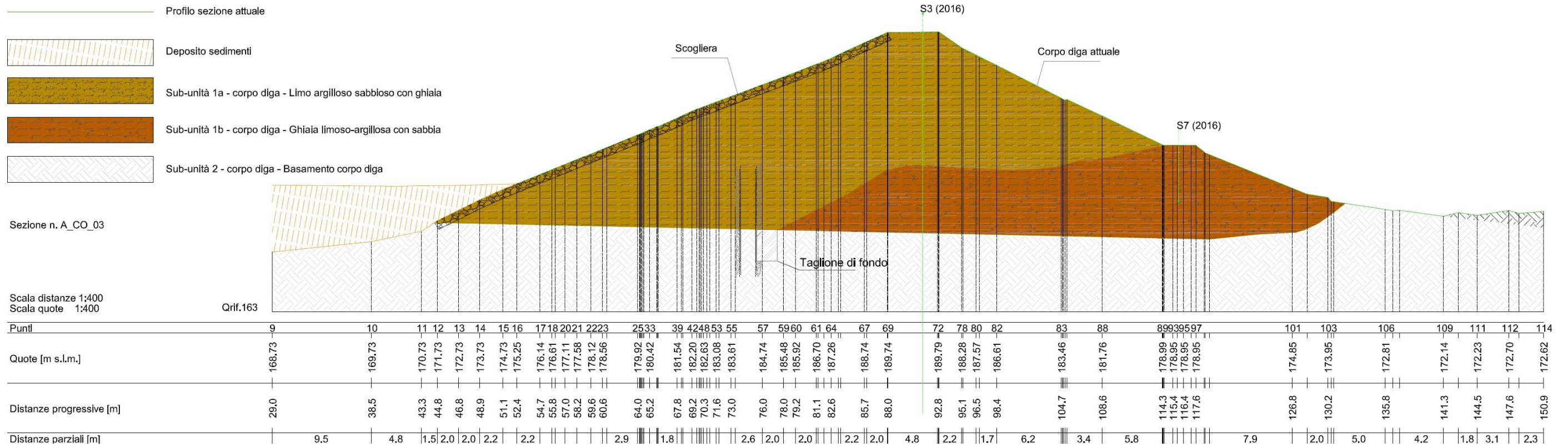


Figura 5-1 – Profilo stratigrafico sezione A_CO_03.

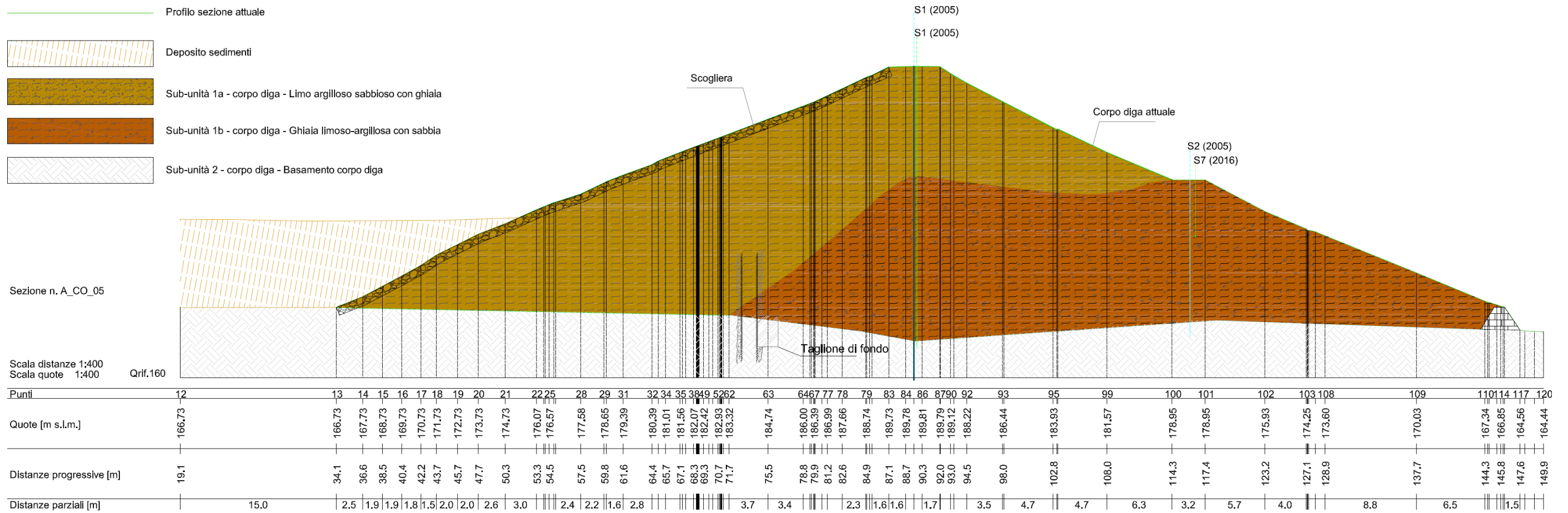


Figura 5-2 – Profilo stratigrafico sezione A_CO_05.

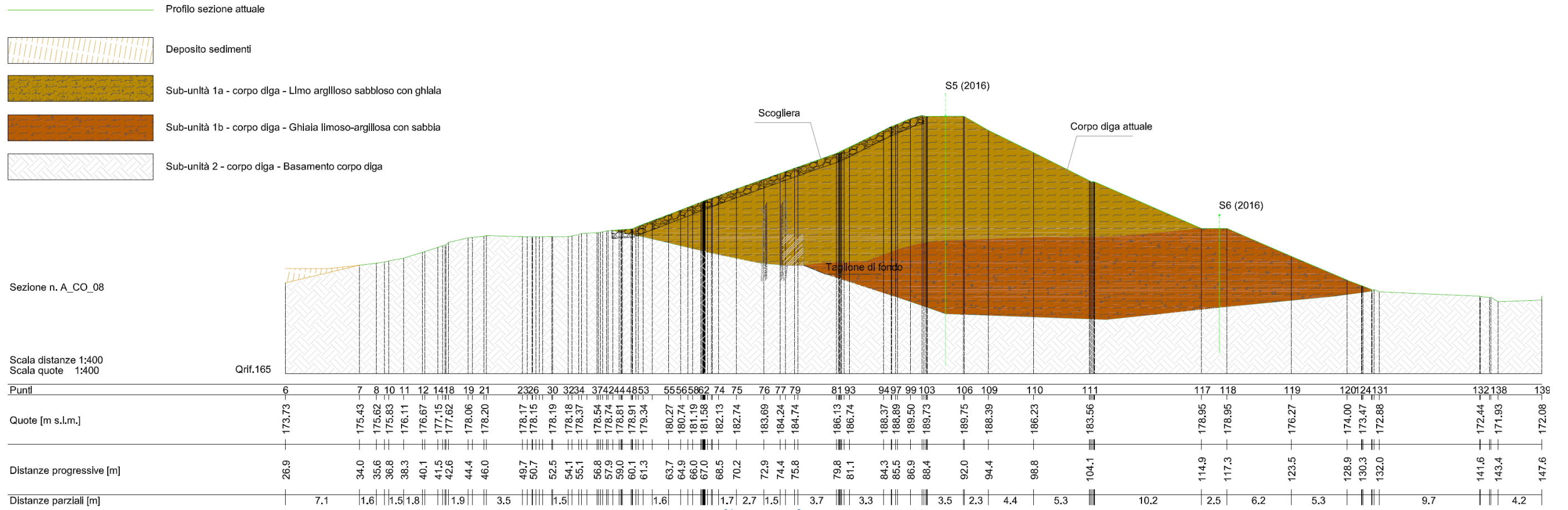


Figura 5-3 – Profilo stratigrafico sezione A_CO_08.

Nome campione (anno indagine)	Profondità da coronamento [m]	Tipologia di campione	N° colpi SPT a punta chiusa	Prova Lefranc	K carico variabile [m/s]	K carico costante [m/s]	Prova	Cu [kPa]	Prova	Phi'	c' [kPa]	W [%]	Gv [kN/m³]	Mv [Mg/m³]	Gs [kN/m³]	Gsat [kN/m³]
S1 (2005)	-10.0									14.0	32					
S1.C1 (2006)	tra 3.00m e 3.50m	Indisturbato								26.2	7.9					
S1.C2 (2006)	tra 6.00m e 6.50m	Indisturbato								28.9	4.5					
S2.C1 (2006)	tra 12.00m e 12.50m	Indisturbato								24.4	3					
S3.16 C3 (2016)	tra 4.20m e 4.70m	Indisturbato	-	-					TRCIU	23.4	27	22.63	20.30	2.72	16.57	20.35
S3.16 C4 (2016)	tra 5.40m e 5.95m	Indisturbato	-	da 5.5m a 6.00m (impermeabile)		1.00E-10	TRUU	29	TDCD	31.5	11	22.63	20.20	2.72	16.48	20.39
S3.16 C5 (2016)	tra 7.15m e 7.65m	Indisturbato	-	-					TRCIU	25.5	0	22.27	19.42	2.75	15.89	20.48
S3.16 C6 (2016)	tra 9.00m e 9.50m	Indisturbato	-	-					TRCIU	24.3	22	20.59	19.81	2.72	16.48	20.72
S3.16 C8 (2016)	tra 12.50m e 13.00m	Indisturbato	-	-			ELL	66	TRCIU	22.7	30	21.18	20.69	2.73	17.06	20.89
S4.16 C1 (2016)	tra 1.50m e 1.80m	Indisturbato		-			TRUU	175	TDCD	33	0	15.33	20.59	2.74	17.85	21.79
S4.16 C2 (2016)	tra 3.0m e 3.30m	Indisturbato		-					TRCIU	27.6	11	18.02	20.3	2.72	17.16	21.20
S4.16 C3 (2016)	tra 4.10m e 4.65m	Indisturbato		-			TRUU	38	TDCD	31.2	4	21.62	20.2	2.73	16.57	20.69
S4.16 C4 (2016)	tra 6.00m e 6.50m	Indisturbato		da 6.0m a 6.60m	1.10E-08		ELL	46	TRCIU	22.5	24	22.75	20.1	2.71	16.38	20.46
S4.16 C5 (2016)	tra 7.60m e 8.10m	Indisturbato		-			ELL	47	TRCIU	26.7	10	24.21	19.91	2.72	15.99	20.24
S4.16 C6 (2016)	tra 9.00m e 9.50m	Indisturbato		-					TDCD	34	0	23.24	20.3	2.62	16.48	20.13
(2016)	11.00m	Fallito a causa di trovante	-	da 10.5m a 11.0m	9.80E-07	3.30E-05										
S4.16 C7 (2016)	tra 11.85m e 12.25m	Indisturbato		-			TRUU	57	TDCD	30.8	0	25.33	20.59	2.71	16.48	20.27
S5.16 C1 (2016)	tra 1.50m e 1.80m	Indisturbato	-	-			TRUU	72				14.69	20.1	2.61	17.55	21.23
S5.16 C2 (2016)	tra 3.3m e 3.80m	Indisturbato	-	-					TRCIU	28	8	21.64	20.2	2.67	16.57	20.47
(2016)	5.50m	Fallito, terreno uscito dalla fustella	-	da 6.0m a 6.5m	2.20E-08											
S5.16 C3 (2016)	tra 7.40m e 7.90m	Indisturbato	-	-					TRCIU	23.7	17	21.77	20.01	2.69	16.48	20.51
S5.16 C4 (2016)	tra 9.00m e 9.50m	indisturbato	-	-			ELL	76	TRCIU	22.5	24	21.28	20.89	2.64	17.26	20.61

Tabella 6-1 – Sintesi dei risultati delle indagini sui campioni dei vari sondaggi prelevati nella sub-unità 1a del corpo diga.

Nome campione (anno indagine)	Profondità da coronamento [m]	Tipologia di campione	N° colpi SPT a punta chiusa	Prova Lefranc	K carico variabile [m/s]	K carico costante [m/s]	Prova	Cu [kPa]	Prova	Phi'	c' [kPa]	W [%]	Gv [kN/m³]	Mv [Mg/m³]	Gs [kN/m³]	Gsat [kN/m³]
S1.G3 (2006)	tra 9.70 m e 10.20 m	Ricostruito								31.5	1					
S1.G4 (2006)	tra 14.00 m e 15.00 m	Ricostruito								26.0	0.4					
S1.G5 (2006)	tra 15.00 m e 15.30 m	Ricostruito								24.6	9.5					
S2.G2 (2006)	tra 20.40 m e 20.60 m	Ricostruito								26.2	27					
S3.16 C1 (2016)	tra 1.50 m e 1.80 m	indisturbato	-	-			TRUU	43	TDCD	34.5	6	18.54	20.69	2.72	17.46	21.24
S3.16 C7 (2016)	tra 10.70 m e 11.20 m	indisturbato	-	da 10.5 m a 11.5 m - non si riesce a saturare								19.88	21.18	2.72	17.65	21.16
S3.16 C9 (2016)	tra 14.50 m e 14.80 m	indisturbato	-	da 14.5 m a 14.8 m	5.70E-06	4.50E-05	TRUU	131				14.91	21.58	2.67	18.73	21.83
S3.16 C10R (2016)	tra 17.20 m e 17.70 m	Ricostruito					TRUU	107	TDCD	30.9	0	22.76	19.42	2.72	15.79	20.30
(2016)																
S3.16 C11R (2016)	22.50 m	Fallito causa trovante	10/12/16	-			TRUU	105	TDCD	26.7	0	17.85	20.3	2.65	17.26	20.97
S4.16 C8 (2016)	tra 14.60 m e 15.00 m	indisturbato		da 14.5 m a 15.0 m	4.50E-06	3.50E-05	TRUU	59	TDCD	29.8	0	17.36	20.99	2.68	17.85	21.33
S4.16 C9 (2016)	tra 16.00 m e 16.50 m	indisturbato		-			TRUU	45	TDCD	35.7	0	16.82	21.48	2.74	18.34	21.78
(2016)	17.50 m	Fallito causa trovante	14/33/21	da 17.5 m a 18.0 m	4.00E-06											
S4.16 C10 (2016)	tra 20.60 m e 20.75 m	indisturbato - non eseguibile	-	da 20.55 m a 21.10 m		1.80E-04										
(2016)	11.00 m	Fallito causa trovante	-	da 10.5 m a 11.0 m	2.60E-05	2.20E-04										
S5.16 C5 (2016)	tra 12.00 m e 12.50 m	indisturbato	-	-								24.81	19.91	2.64	15.99	19.92
S5.16 C6 (2016)	tra 13.10 m e 13.50 m	indisturbato	-	da 13.0 m a 13.5 m	6.40E-06	9.20E-05	TRUU	28	TDCD	29	0	21.53	21.09	2.62	17.36	20.55
S5.16 C7 (2016)	tra 14.50 m e 15.00 m	indisturbato	-	-								14.33	21.18	2.7	18.54	21.97
(2016)	17.50 m	Fallito causa trovante	-	da 17.5 m a 18.0 m - non si riesce a saturare		4.00E-04										
S6.16 C1 (2016)	tra 1.10 m e 1.50 m	indisturbato	-	-			TRUU	111				11.67	22.07	2.8	19.71	23.12
S6.16 C2 (2016)	tra 3.20 m e 3.60 m	indisturbato	-	-					TDCD	32.2	0	20.15	20.4	2.78	16.97	21.14
(2016)	4.60 m	Fallito causa trovante	-	-												
S6.16 C3 (2016)	tra 5.00 m e 5.40 m	indisturbato	-	-			TRUU	41				18.86	19.71	2.76	16.57	21.07
S7.16 C4 (2016)	tra 3.00 m e 3.40 m	indisturbato	-	-			TRUU	31	TDCD	30.9	0	16.33	19.71	2.73	16.97	21.36
S7.16 C6 (2016)	tra 5.00 m e 5.35 m	indisturbato	-	-			TRUU	71	TDCD	31.3	0	26.71	19.81	2.61	15.59	19.55

Tabella 6-2 – Sintesi dei risultati delle indagini sui campioni dei vari sondaggi prelevati nella sub-unità 1b del corpo diga.

6 RIEPILOGO PARAMETRI GEOTECNICI

La caratterizzazione parametrica dei materiali delle singole sub-unità è basata sulle risultanze delle indagini geognostiche in sito e di laboratorio appositamente eseguite per l'intervento in oggetto. I parametri dei materiali adottati nel corso della presente progettazione definitiva sono rappresentati dai valori medi (V_m), avendo assunto che i parametri caratteristici (V_k) siano prossimi ai parametri nominali medi ($V_m \approx V_k$) per ciascuna sub-unità geotecnica individuata nel capitolo 5.

I dati sono disponibili sono ordinati criticamente in funzione delle successioni litologiche presenti nel sottosuolo dell'area in oggetto.

Nella Tabella 6-1 sono riportati i risultati ottenuti dalle analisi dei campioni dei vari sondaggi prelevati nella sub-unità 1a del corpo diga.

Nella Tabella 6-2 sono riportati i risultati ottenuti dalle analisi dei campioni dei vari sondaggi prelevati nella sub-unità 1b del corpo diga.

I parametri geotecnici della fondazione, costituita da materiale litoide facente parte della formazione della Pietraforte (PTF) caratterizzato da un'alternanza di orizzonti siltitici, arenacei e calcarei, sono definiti a partire da un rilievo geomeccanico eseguito sulla sponda destra del corpo di diga (vedi allegato ET.06.02 del presente elaborato). Dal rilievo è risultato un ammasso roccioso classificabile come discreto (indice RMR = 61) con un RQD del 73% e presenza di giunti asciutti aventi superfici scabre per i quali sono stati stimati i parametri utilizzati nelle verifiche.

Al momento della redazione del presente progetto definitivo sono in corso le analisi di laboratorio per la caratterizzazione dei campioni di materiale prelevati all'interno del bacino della diga nel mese di febbraio 2019.

Alla luce dei primi risultati sono stati adottati per i parametri geotecnici del terreno di rinfiacco parametri conservativi in ragione della eterogeneità del materiale e della necessità di procedere ad operazioni di vagliatura atte a ridurre la componente di scheletro e di miscelazione dei vari terreni.

Dal punto di vista geotecnico lo sbarramento della diga nello stato di progetto è suddiviso nelle seguenti sub-unità:

- sub-unità 1a: corpo diga, costituita da limi argillosi e argille limose, debolmente sabbiose o sabbiose, con diffusi clasti di ghiaia fine;
- sub-unità 1b: corpo diga, costituita da ghiaia eterometrica in matrice limoso-argillosa con sabbia;
- sub-unità 2: basamento del corpo diga caratterizzato dalla presenza di siltiti scure alternate a Pietraforte;
- sub-unità 3 – terreno di rinfiacco.

I parametri geotecnici caratteristici dei materiali utilizzati sono riassunti nella

n (porosità)		0.37	0.35	0.30	0.35
--------------	--	------	------	------	------

Tabella 6-1.

Parametri geotecnici	Unità di misura	Sub-unità 1a Corpo diga	Sub-unità 1b Corpo diga	Sub-unità 2 Fondazione	Sub-unità 3 Rinfiango
Peso di volume	kg/m ³	2025	2063	2400	2000
Peso di volume saturo	kg/m ³	2069	2115	2450	2100
ϕ'	°	26.4	29.9	35.9	28.0
c'	kPa	12.4	3.4	2320	10.0
c_u	kPa	67.3	70.2	50'000	65
k	m/s	1.10E-05	1.46E-04	1.00E-07	1.10E-05
n (porosità)		0.37	0.35	0.30	0.35

Tabella 6-1 – Parametri geotecnici caratteristici.

Sono stati inoltre definiti i parametri riportati nella Tabella 6-2 utili per la valutazione dell'incremento delle pressioni interstiziali nel rilevato in caso di sisma.

Parametri geotecnici	Unità di misura	1A	1B	2	3
		Corpo diga fine	Corpo diga grossolano	Fondazione	Rinfiango
G	kPa	92000	247000	1818000	92000
OCR		1.00	1.00	1.00	1.00
Ip		24	23	100	15

Tabella 6-2 – Parametri geotecnici verifiche di filtrazione e sismiche.

I valori del modulo di taglio G sono stati assunti cautelativamente pari al percentile 25% dei valori ricavati per ciascuna formazione dalla prova down-hole del 2006. I valori di OCR e Ip sono stati desunti dalle analisi di laboratorio del 2006. Per i terreni di rinfiango si è fatto riferimento ai valori della formazione 1A del rilevato attuale.

7 PERICOLOSITÀ SISMICA

I parametri sismici del sito sono calcolati in base a quanto prescritto dal D.M. del 26 Giugno 2014 relativamente agli interventi eseguiti su dighe esistenti come indicato nel cap. H.3.4.1.

Per la definizione della azioni sismiche, l'invaso di Cepparello è considerato come una **diga strategica**.

La **vita nominale** V_N è assunta pari a **50 anni** e il coefficiente d'uso C_U pari a 2, di conseguenza la **vita di riferimento** V_R è pari a **100 anni** in coerenza con le tabelle H.1 e H.2 del succitato Decreto.

I parametri sismici di base a_g , F_0 e T_c^* , riportati nella Tabella 7-1, sono ricavati per le seguenti coordinate:

- Longitudine FI: 43.489594 (WGS84) 43.490559 (ED50)
- Latitudine LA: 11.190582 (WGS84) 11.191562 (ED50)

Stato limite	P_{vr} [%]	T_r [anni]	a_g [g]	a_g [m/s ²]	F_0	T_c^* [s]
SLO	81	60	0.06	0.585	2.555	0.259
SLD	63	101	0.074	0.722	2.535	0.266
SLV	10	949	0.164	1.604	2.518	0.286
SLC	5	1950	0.201	1.972	2.534	0.292
		475	0.131	1.280	2.510	0.281

Tabella 7-1 – Parametri sismici di base SLO, SLD, SLV e SLC.

Coerentemente a quanto indicato nel cap. C.7.7.1, per il sito in esame non è necessario effettuare uno studio sismotettonico da cui far derivare l'azione sismica di progetto, essendo l'accelerazione orizzontale massima a_g per $T_r = 475$ anni inferiore a 0.15 g.

7.1 RISPOSTA SISMICA LOCALE

Come richiesto al punto H.4.2 delle NTC2014 e al punto III.2.2. delle Istruzioni del luglio 2018 al fine di aumentare il grado di accuratezza nella previsione dei fenomeni di amplificazione, le azioni sismiche considerate nella presente progettazione sono determinate mediante un'analisi di risposta sismica locale.

Come riportato nell'elaborato ET.05, la risposta sismica locale ha permesso di definire le modifiche che il segnale sismico subisce, a causa delle caratteristiche topografiche e stratigrafiche del sito in oggetto, rispetto a quello di un sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale.

Si ricorda che la definizione degli input sismici relativi agli stati limite SLD, SLV e SLC sono ottenuti mediante il codice di calcolo SCALCONA 3.0 (Regione Toscana), mentre per lo stato limite SLO è utilizzato il codice di calcolo REXEL (Iervolino et al., 2010). Entrambi i codici consentono la ricerca di combinazioni di accelerogrammi naturali compatibili con gli spettri delle NTC 2018.

Si ricorda, inoltre, che il coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima β_s attesa al sito è assunto pari a **1**.

7.1.1 SPETTRI DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E ACCELEROGRAMMI

Nelle figure seguenti sono riportati i confronti tra lo spettro di risposta in accelerazione derivante dalla media degli spettri ottenuti dai n. 7 accelerogrammi utilizzati come input e gli spettri di normativa per le categorie di sottosuolo A e B, nonché lo spettro di risposta ottenuto dall'analisi di risposta sismica locale normalizzato.

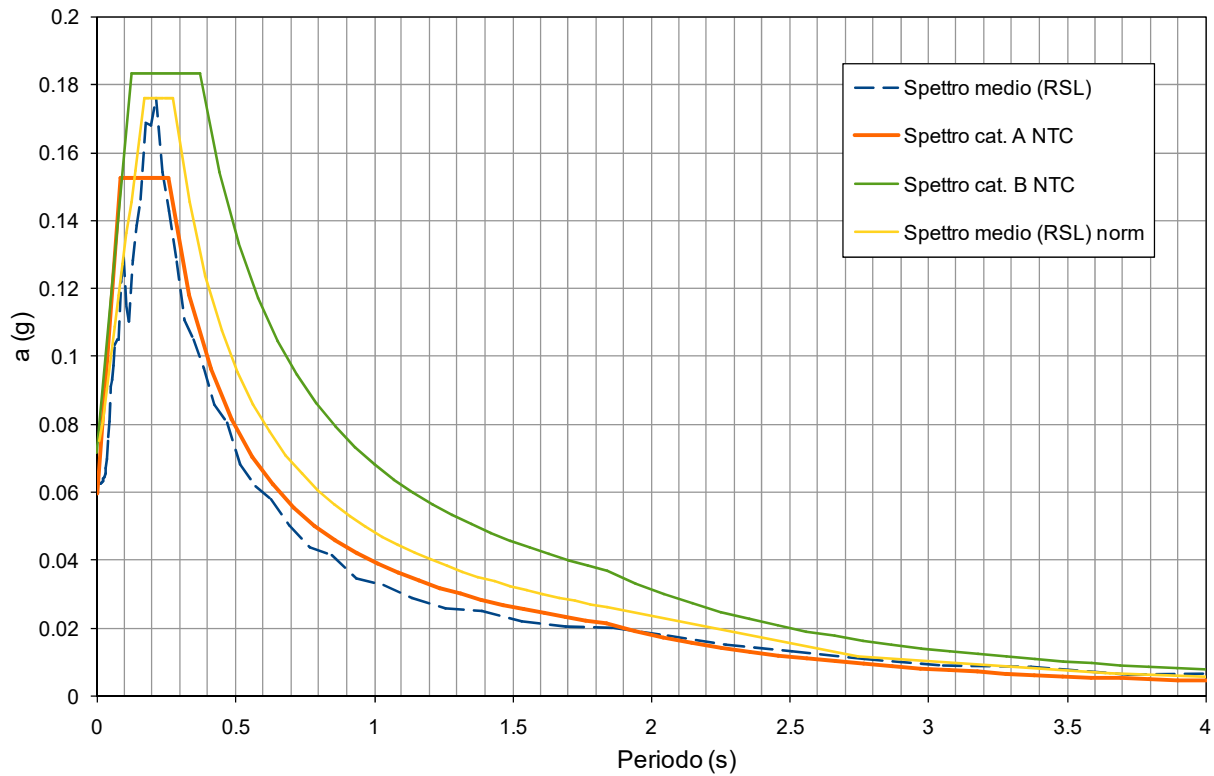


Figura 7-1 – Spettri di risposta in accelerazione SLO ($T_r = 1950$ anni).

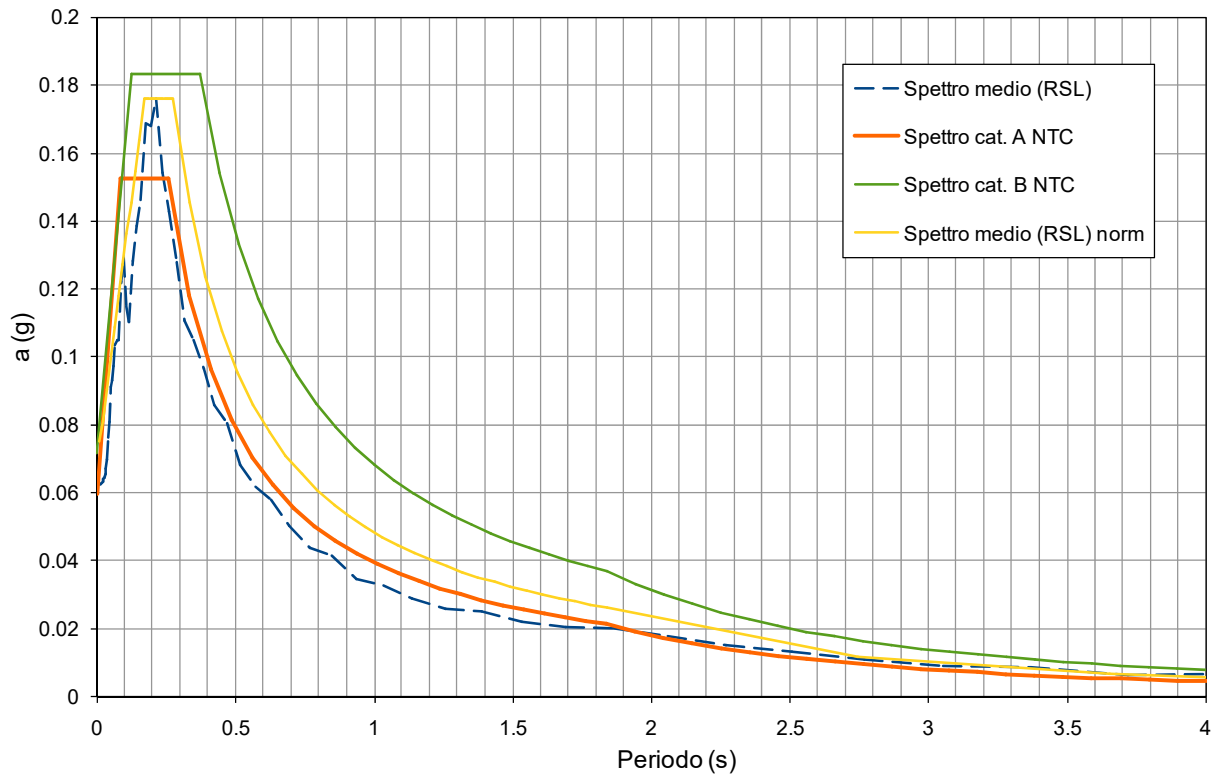


Figura 7-2 – Spettri di risposta in accelerazione SLD ($T_r = 1950$ anni).

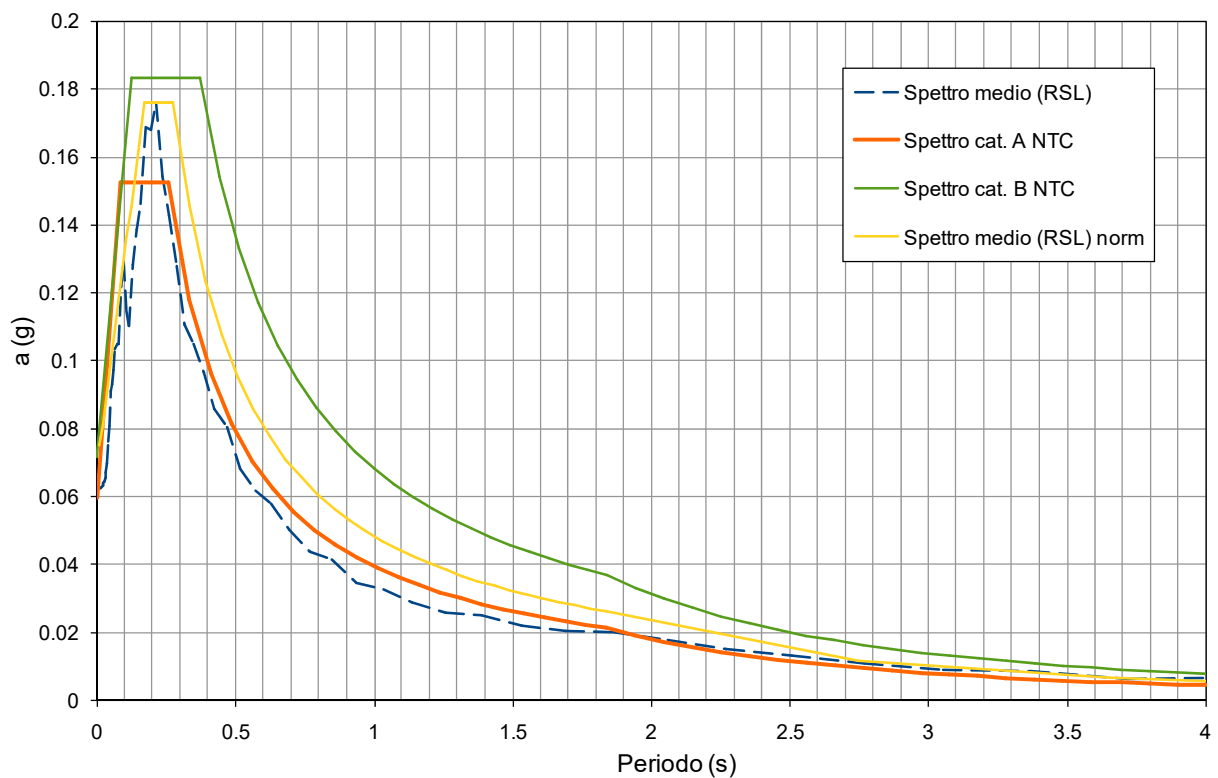


Figura 7-3 – Spettri di risposta in accelerazione SLV ($T_r = 1950$ anni).

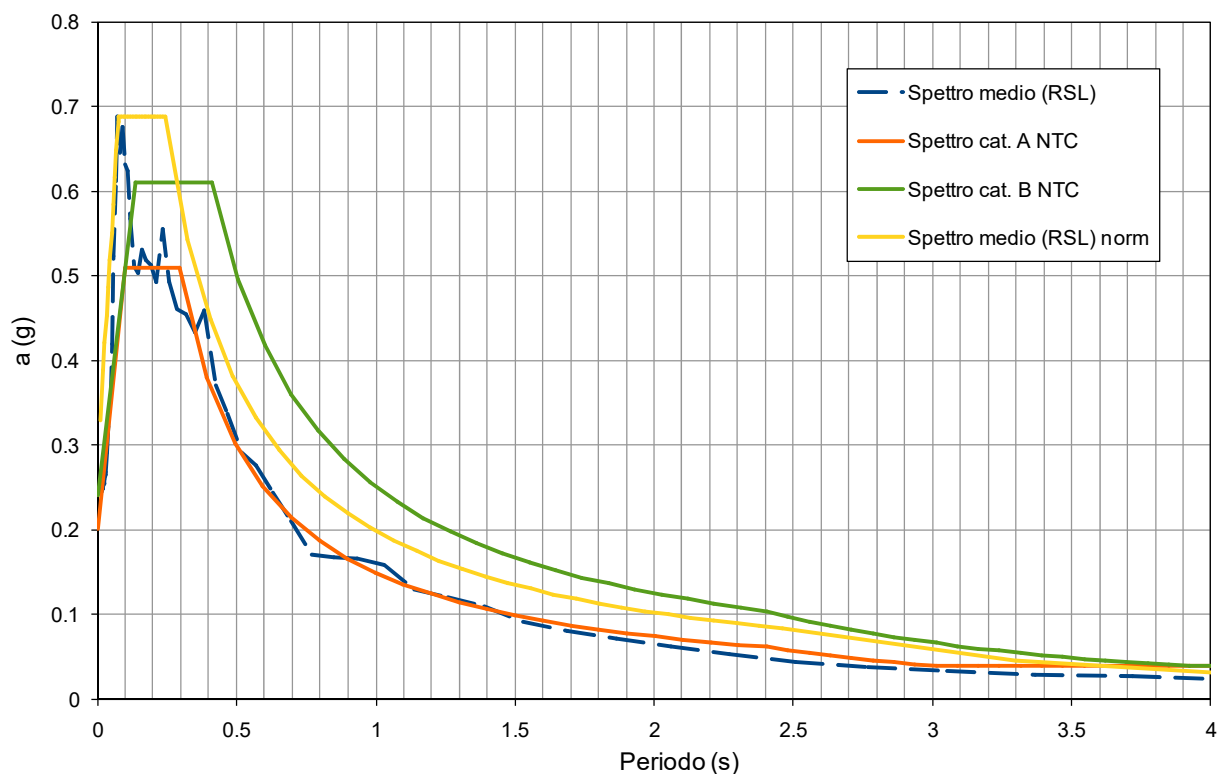


Figura 7-4 – Spettri di risposta in accelerazione SLC ($T_r = 1950$ anni).

Nella Tabella 7-2 sono riportati per ciascuno stato limite i principali parametri dello spettro di risposta normalizzato: il coefficiente amplificativo S che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche; il periodo T_B corrispondente all’inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante; il periodo T_C corrispondente all’inizio del tratto a velocità costante dello spettro.

Stato limite	S	T_b [s]	T_c [s]
SLO	1.148	0.172	0.275
SLD	1.108	0.105	0.300
SLV	1.100	0.105	0.317
SLC	1.350	0.071	0.293

Tabella 7-2 – Parametri dello spettro di risposta normalizzato ottenuto dalla risposta sismica locale.

Per ogni stato limite, la risposta sismica locale ha permesso la ricostruzione di n. 7 accelerogrammi rappresentativi della sismicità del sito.

Gli accelerogrammi forniti descrivono la sola componente orizzontale dell’azione sismica come indicato al punto 3.2.3.1 delle N.T.C. 2008.

8 AZIONI INERZIALI DELL'ACQUA CONTENUTA NEL SERBATOIO

Nelle verifiche sismiche è introdotto sul paramento di monte un carico aggiuntivo che rappresenta l'azione inerziale dell'acqua definito in coerenza con il cap. C.7.7.3 del D.M. 26 Giugno 2014.

Le azioni di inerzia dell'acqua sono calcolate assimilandole ad una distribuzione di pressione sul paramento di monte secondo la seguente espressione:

$$p = a \cdot \rho \cdot c \cdot y_0$$

dove a è l'accelerazione massima al sito, ρ la massa per unità di volume dell'acqua, y_0 la differenza di quota dell'acqua presente nella combinazione sismica e la quota del punto più depresso dell'alveo naturale al piede del paramento e il parametro c è calcolato tramite l'espressione:

$$c = \frac{c_m}{2} \left[\frac{y}{y_0} \left(2 - \frac{y}{y_0} \right) + \sqrt{\frac{y}{y_0} \left(2 - \frac{y}{y_0} \right)} \right]$$

in cui y è la differenza di quota dell'acqua presente nella combinazione sismica e la quota del punto generico del paramento a cui è associata la pressione p , mentre $c_m = -0.0073\alpha + 0.7412$ avendo indicato con α l'inclinazione del paramento rispetto alla verticale espresso in gradi sessagesimali. Per $\alpha \geq 60^\circ$ viene assunto $c_m = 0.3$.

L'accelerazione massima al sito tiene conto dei risultati dell'analisi di risposta sismica locale e, in particolare, del coefficiente amplificativo S funzione della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche.

La determinazione delle azioni sul paramento del corpo diga è calcolata considerando il livello idrometrico associato alla quota di massima regolazione di 185.7 m s.l.m. nelle verifiche sismiche con invaso pieno.

y [m]	c	p SLO [kg/m ²]	p_x SLO [kg/m ²]	p_y SLO [kg/m ²]	p SLD [kg/m ²]	p_x SLD [kg/m ²]	p_y SLD [kg/m ²]
0.0	0.00	0	0	0	0	0	0
4.3	0.16	192	186	47	229	222	55
8.5	0.24	282	274	68	336	326	82
12.8	0.29	333	323	81	396	384	96
17.0	0.30	349	339	85	416	403	101

Tabella 8-1 – Azioni inerziali verifiche sismiche con invaso pieno per stati limite di esercizio SLO e SLD per le sezioni A_CO_03 e A_CO_05.

y [m]	c	p SLV [kg/m ²]	p_x SLV [kg/m ²]	p_y SLV [kg/m ²]	p SLC [kg/m ²]	p_x SLC [kg/m ²]	p_y SLC [kg/m ²]
0.0	0.00	0	0	0	0	0	0
4.3	0.16	508	493	123	760	738	184
8.5	0.24	747	725	181	1118	1085	271
12.8	0.29	881	855	214	1319	1279	320
17.0	0.30	925	897	224	1384	1343	336

Tabella 8-2 – Azioni inerziali verifiche sismiche con invaso pieno per stati limite ultimi SLV e SLC per le sezioni A_CO_03 e A_CO_05.

y [m]	c	p SLO [kg/m ²]	p_x SLO [kg/m ²]	p_y SLO [kg/m ²]	p SLD [kg/m ²]	p_x SLD [kg/m ²]	p_y SLD [kg/m ²]
0.0	0.00	0	0	0	0	0	0
3.0	0.16	135	131	33	161	156	39
6.0	0.24	199	193	48	237	230	57
9.0	0.29	234	227	57	279	271	68
12.0	0.30	246	238	60	293	284	71

Tabella 8-3 – Azioni inerziali verifiche sismiche con invaso pieno per stati limite di esercizio SLO e SLD per la sezione A_CO_08.

y [m]	c	p SLV [kg/m ²]	p_x SLV [kg/m ²]	p_y SLV [kg/m ²]	p SLC [kg/m ²]	p_x SLC [kg/m ²]	p_y SLC [kg/m ²]
0.0	0.00	0	0	0	0	0	0
3.0	0.16	358	347	87	535	519	130
6.0	0.24	526	511	128	787	764	191
9.0	0.29	621	602	151	929	901	225
12.0	0.30	651	632	158	975	945	236

Tabella 8-4 – Azioni inerziali verifiche sismiche con invaso pieno per stati limite ultimi SLV e SLC per la sezione A_CO_08.

9 IDENTIFICAZIONE E CLASSIFICAZIONE DELLE OPERE ACCESSORIE

Nelle Tabella 9-1 si riporta la classificazione delle opere accessorie che compongono la diga di Cepparello in ottemperanza ai criteri di classificazioni individuati nel cap. I.5 della Procedura di rivalutazione sismica delle grandi dighe di marzo 2019.

Opera	Descrizione	Classe A	Classe B	Classe C
Sbarramento	Diga in materiali sciolti – altezza 25.17 m (L584/94)	–	–	–
Scarico di superficie sinistro	In spalla sinistra – opera in c.a. del tipo a becco d’anatra	A1	B1	C1
Canale di scarico sinistro	In spalla sinistra – opera in c.a.	A1	B2	C1
Passerella 1 scarico di superficie	Passerella pedonale in acciaio sostenuta dallo scarico	A2	B2	C1
Passerella 2 scarico di superficie	Passerella pedonale in acciaio sostenuta dallo scarico	A2	B2	C2
Scarico di superficie destro	In spalla destra – opera in c.a. del tipo a becco d’anatra	A1	B1	C1
Canale di scarico destro	In spalla destra – opera in c.a.	A1	B2	C1
Vasca di dissipazione	A valle della diga – opera in c.a.	A1	B2	C2
Condotta scarico di fondo	Al di sotto della spalla sinistra – tubazione in c.a.v. Ø2000	A4	B1	C2
Pozzetto manovra scarico di fondo	A valle della diga in sponda sinistra – opera in c.a.	A4	B1	C2
Pozzetto misura perdite	Al piede di valle della diga – opera in c.a.	A4	B2	C1
Sponde invaso	Naturali densamente boscate	A3	B1	C2

Tabella 9-1 – Classificazione delle opere accessorie della diga di Cepparello.

10 COMPORTAMENTO DELLA DIGA IN ESERCIZIO

I lavori di costruzione della diga sono stati ultimati nel 1962 sulla base di un progetto approvato nel 1959 e di successive varianti approvate nel 1959 e nel 1960.

La diga è del tipo in materiali sciolti con un andamento rettilineo e un dreno incluso nel corpo diga e nell'unghia di valle. Nella fondazione, ad una distanza dal piede di valle pari a circa due terzi della larghezza di fondazione, è stata realizzato un taglione di ammorsamento del rilevato 2.0 m di larghezza e 3.0 m di profondità.

Nel 1967 è stato realizzato, dal paramento di monte, un diaframma di impermeabilizzazione a mezzo di iniezioni cementizie nel rilevato e in fondazione in adiacenza al taglione succitato, con lo scopo di eliminare le sensibili perdite manifestatesi appena dopo il primo invaso, inizialmente attribuite a difetti di tenuta della fondazione.

Nel 1985 è stato eseguito il ripristino del canale fagatore destro in seguito alle lesioni causate dal cedimento del fondo provocato dall'erosione delle acque esitate nel corso degli eventi di piena del 1966. Contestualmente a tale intervento di ripristino è stata eseguita la realizzazione dell'attuale vasca di dissipazione che raccoglie entrambi gli scarichi dei canali scolmatori destro e sinistro, con il fine di evitare ulteriori fenomeni erosivi da parte della corrente.

Allo stato attuale le opere di scarico mostrano un degrado progressivo del calcestruzzo della platea e dei muri di contenimento degli sfioratori e dei canali fagatori.

Lo scarico di fondo è costituito da una tubazione in acciaio DN400, sottopassante l'asse dello sbarramento, annegata in un getto di calcestruzzo diaframmato ogni 5 metri, il cui scarico è regolato all'estremità di monte da una valvola a farfalla e all'estremità di valle da una saracinesca.

Nel 2003, a seguito dello svuotamento dell'invaso, è stata eseguita la revisione della valvola a farfalla di monte e il ripristino della prima parte della condotta di scarico in modo da tamponare la principale infiltrazione presente nella condotta posta circa 60.0 m a monte dalla valvola di valle, precedentemente identificata con una telecamera mobile.

A partire da agosto 2012 la valvola di monte è tenuta costantemente chiusa a causa della rottura del circuito oleodinamico collegato al compressore posto in sponda sinistra in corrispondenza dello scarico di superficie, le cui perdite potrebbero compromettere la qualità dell'acqua invasata e derivata.

Inoltre, la tubazione di scarico continua a presentare lesioni diffuse nonostante le iniezioni di resine di consolidamento e, pertanto, la valvola di valle è tenuta costantemente aperta da novembre 2003 come previsto dal vigente FCEM.

A causa delle problematiche connesse sia alle inadeguatezze degli scaricatori di superficie, che non sono in grado di fronteggiare eventi idrologici anche relativamente frequenti, sia alla incapacità di utilizzare lo scarico di fondo per la regolazione dei livelli di invaso, lo sbarramento è stato oggetto di due differenti limitazioni di invaso.

La prima, prescritta con le note n. 360 del 22/03/2002 e n. 679 del 05/06/2003, che impone la quota di massima di regolazione (limitata) a 183.0 m s.l.m. in condizioni ordinarie di esercizio e la quota di massimo invaso a 186.5 m s.l.m. in occasione di eventi di piena eccezionali. La seconda, disposta con nota prot. UTDFI/919 del 27/06/2013, che impone la quota di massima di regolazione (limitata) a 177.0 m s.l.m. in condizioni ordinarie di esercizio e la quota di massimo invaso a 186.0 m s.l.m. in occasione di eventi di piena eccezionali.

L'analisi dei diagrammi storici delle misure mostrano:

- un assestamento delle perdite che allo stato attuale sono trascurabili. In passato sono state più volte osservate perdite provenienti da piccole lesioni nel muro di monte del pozzetto di

misura, oltre che dal contatto tra tubazione di scarico e corpo diga. Tali perdite non sono state più osservate dal 2008;

- lo spostamento di alcuni capisaldi negli ultimi 5 anni è dell'ordine di alcuni centimetri;
- una linea di filtrazione all'interno del corpo diga stabile e ben contenuta all'interno del drenaggio presente al piede di valle, anche in relazione ai bassi livelli di invaso imposti dalla vigente limitazione.

Complessivamente, allo stato attuale, non si rilevano problematiche particolari della diga ad esclusione di quelle oggetto della presente progettazione.

10.1 COMPORTAMENTO DELLA DIGA DURANTE I TERREMOTI

Non corso della vita della diga di Cepparello non si sono registrati terremoti che abbiano comportato cedimenti apprezzabili del corpo diga.

Nella Figura 10-1 e nella Tabella 10-1 si riportano i sismi registrati dalla data di realizzazione ad oggi in un raggio di 30 km dalla diga. Per i terremoti precedenti al 1985 è stato consultato il DBMI 15 (https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/description_DBMI15.htm) da cui non risultano eventi successivi al 1962 e nel raggio di 30 km che abbiano avuto effetti macrosismici a Poggibonsi o Barberino v.E..

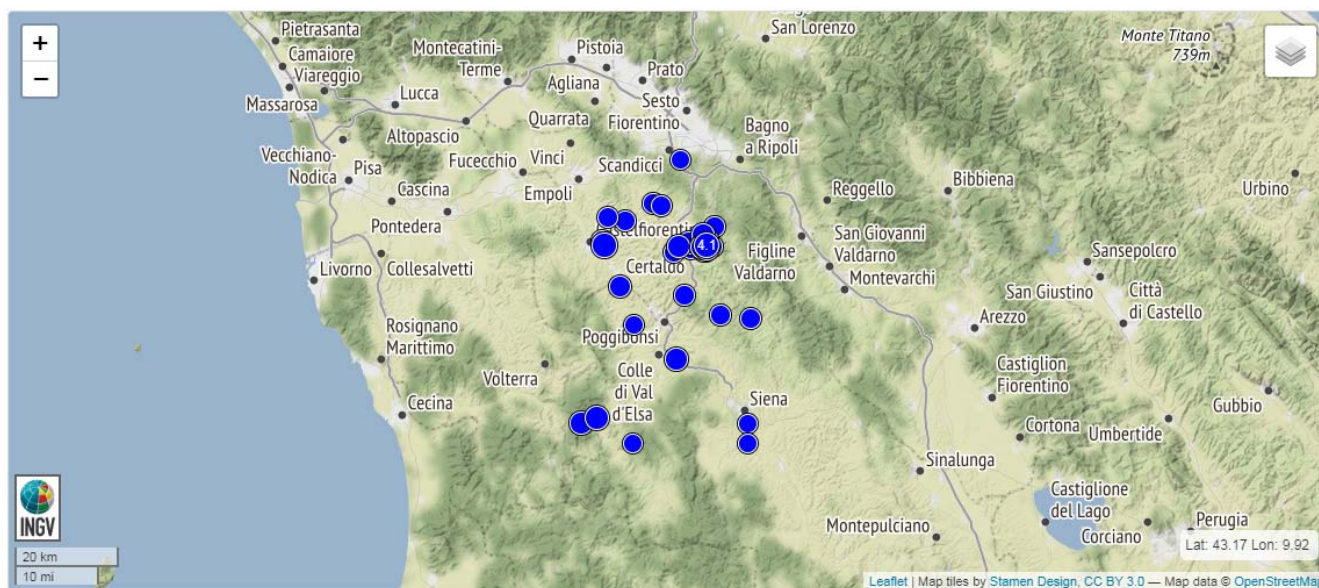


Figura 10-1 – Epicentri sismi dal 1985 a oggi (Fonte: ISIde working group (2016) version 1.0, DOI: 10.13127/ISIde)

Data	Lat	Long	Profondità (km)	Magnitudo	Localizzazione evento
24/10/1985	43.267	11.339	10	3	6 km S Siena (SI)
18/11/1988	43.302	11.339	5	3	2 km S Siena (SI)
27/11/1989	43.268	11.066	8.7	3	2 km E Radicondoli (SI)
18/05/1991	43.653	11.008	5	3.3	6 km W Montespertoli (FI)
20/03/1993	43.302	10.944	5	3.5	6 km E Pomarance (PI)
06/08/1993	43.311	10.981	9.8	3.8	6 km SW Casole d'Elsa (SI)

Data	Lat	Long	Profondità (km)	Magnitudo	Localizzazione evento
25/03/1994	43.48	11.347	5	3.3	2 km W Radda in Chianti (SI)
14/12/1996	43.487	11.276	5	3.1	2 km NW Castellina in Chianti (SI)
27/06/1997	43.47	11.069	5	3	2 km E San Gimignano (SI)
03/01/2001	43.638	11.26	0.6	3.1	5 km S Impruneta (FI)
02/08/2003	43.248	11.363	8.7	3.2	5 km W Monteroni d'Arbia (SI)
10/12/2003	43.648	11.049	5	3.2	2 km W Montespertoli (FI)
13/05/2011	43.521	11.189	11.3	3.1	3 km SE Barberino Val d'Elsa (FI)
17/04/2013	43.6783	11.115	5.3	3.1	5 km NE Montespertoli (FI)
17/04/2013	43.6747	11.1338	9	3.3	5 km W San Casciano in Val di Pesa (FI)
09/08/2014	43.5367	11.0358	9.9	3.4	1 km SW Certaldo (FI)
19/12/2014	43.6032	11.2295	9.2	3.3	6 km NE Tavarnelle Val di Pesa (FI)
19/12/2014	43.6027	11.2405	8.9	3.8	7 km W Greve in Chianti (FI)
19/12/2014	43.612	11.2367	7.9	3	7 km SE San Casciano in Val di Pesa (FI)
19/12/2014	43.6058	11.2405	8.6	4.1	7 km W Greve in Chianti (FI)
19/12/2014	43.6023	11.243	8.4	3.4	6 km W Greve in Chianti (FI)
19/12/2014	43.6158	11.2452	7.3	3.2	7 km SE San Casciano in Val di Pesa (FI)
19/12/2014	43.6202	11.2447	7.3	3	6 km SE San Casciano in Val di Pesa (FI)
19/12/2014	43.6242	11.2323	7.3	3.6	5 km SE San Casciano in Val di Pesa (FI)
19/12/2014	43.6097	11.2005	8.3	3.5	5 km S San Casciano in Val di Pesa (FI)
19/12/2014	43.6183	11.2265	7.3	3	5 km SE San Casciano in Val di Pesa (FI)
19/12/2014	43.6043	11.2558	7.7	3.1	5 km W Greve in Chianti (FI)
20/12/2014	43.5977	11.2372	7.4	3.5	6 km NE Tavarnelle Val di Pesa (FI)
20/12/2014	43.6138	11.2458	7.1	3	7 km W Greve in Chianti (FI)
20/12/2014	43.6008	11.203	8.5	3	5 km NE Tavarnelle Val di Pesa (FI)
20/12/2014	43.5967	11.2397	8.6	3.1	6 km W Greve in Chianti (FI)
21/12/2014	43.6122	11.2282	7.6	3	6 km SE San Casciano in Val di Pesa (FI)
03/03/2015	43.5942	11.1642	9	3.3	4 km N Tavarnelle Val di Pesa (FI)
04/03/2015	43.6038	11.1753	9.2	3.7	5 km N Tavarnelle Val di Pesa (FI)
27/03/2015	43.6232	11.2385	7.6	3	6 km SE San Casciano in Val di Pesa (FI)
13/09/2015	43.6047	11.2303	8.9	3.8	7 km NE Tavarnelle Val di Pesa (FI)
04/03/2016	43.4117	11.17	8.4	3.5	4 km E Colle di Val d'Elsa (SI)
25/10/2016	43.6063	11.0007	10.2	3.9	2 km E Castelfiorentino (FI)
01/11/2016	43.6138	10.9935	8.3	3.2	2 km E Castelfiorentino (FI)
02/06/2017	43.6002	11.1708	8.4	3	4 km N Tavarnelle Val di Pesa (FI)

Tabella 10-1 – Sismi dal 1985 a oggi.

Nella Figura 10-2 ,Figura 10-3 ,Figura 10-4 e Figura 10-5 si riportano gli spostamenti in altezza dei punti di monitoraggio presenti sulla diga dal 2011. Si osserva la mancanza di una correlazioni fra i sismi verificatesi in tale periodo e lo spostamento dei punti di monitoraggio.

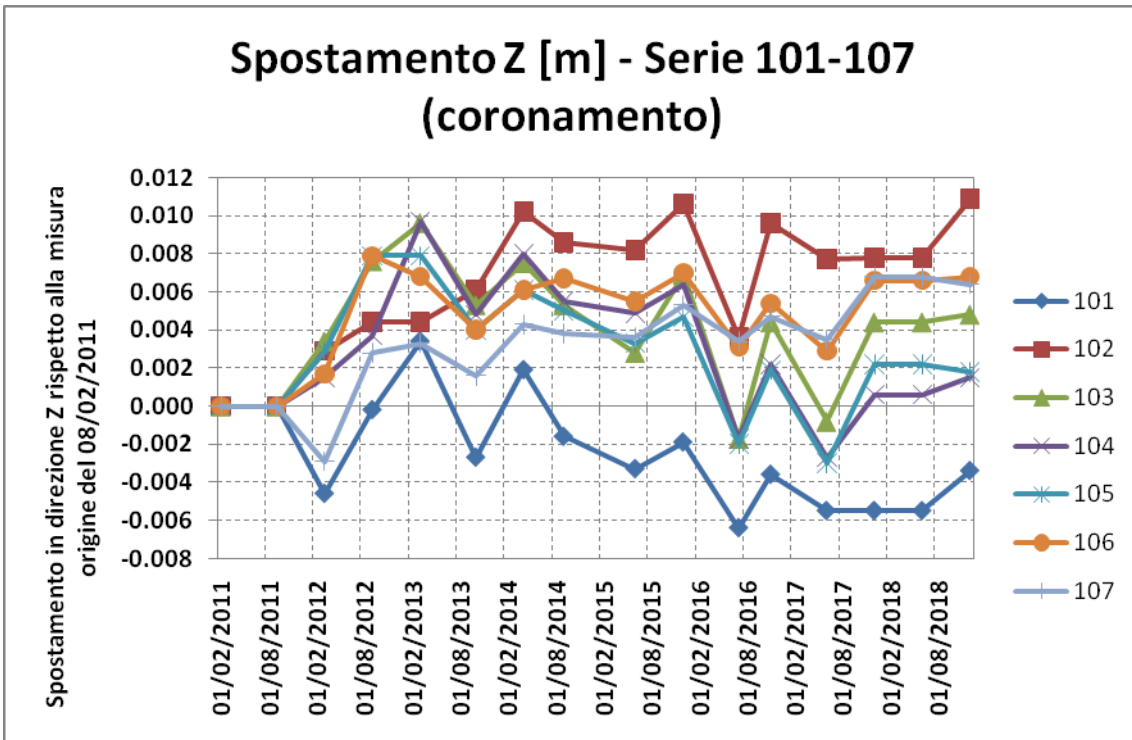


Figura 10-2 – Spostamenti in z coronamento monte verso monte

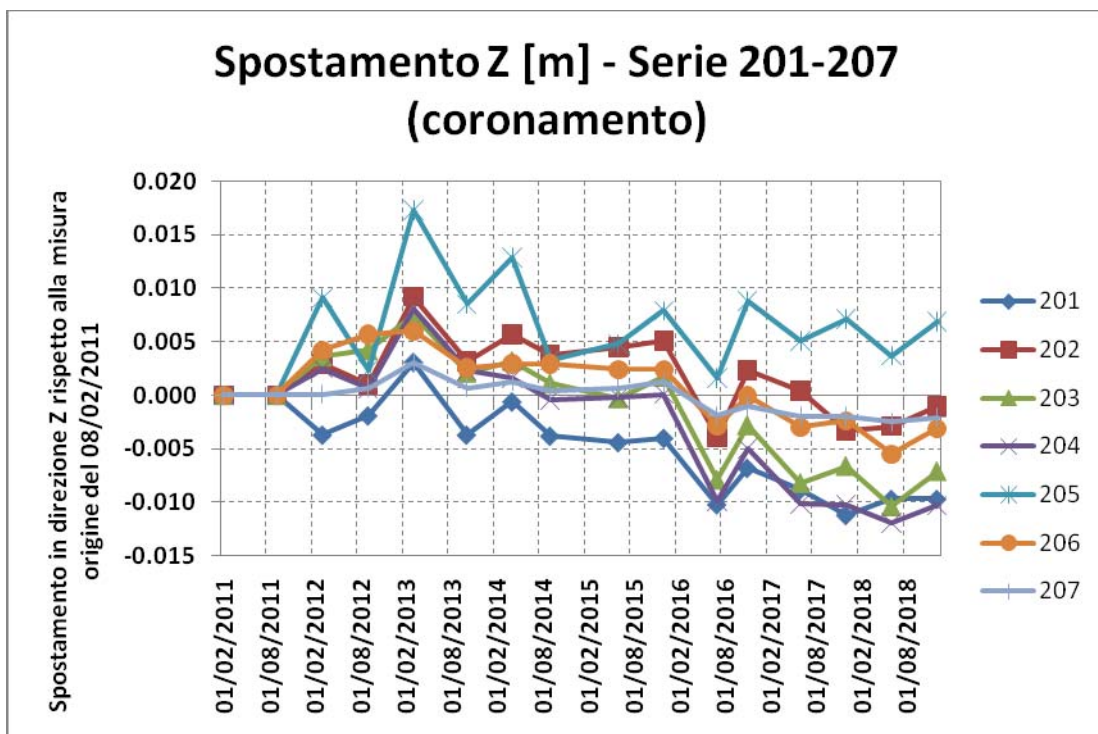


Figura 10-3 – Spostamenti in z coronamento valle verso monte

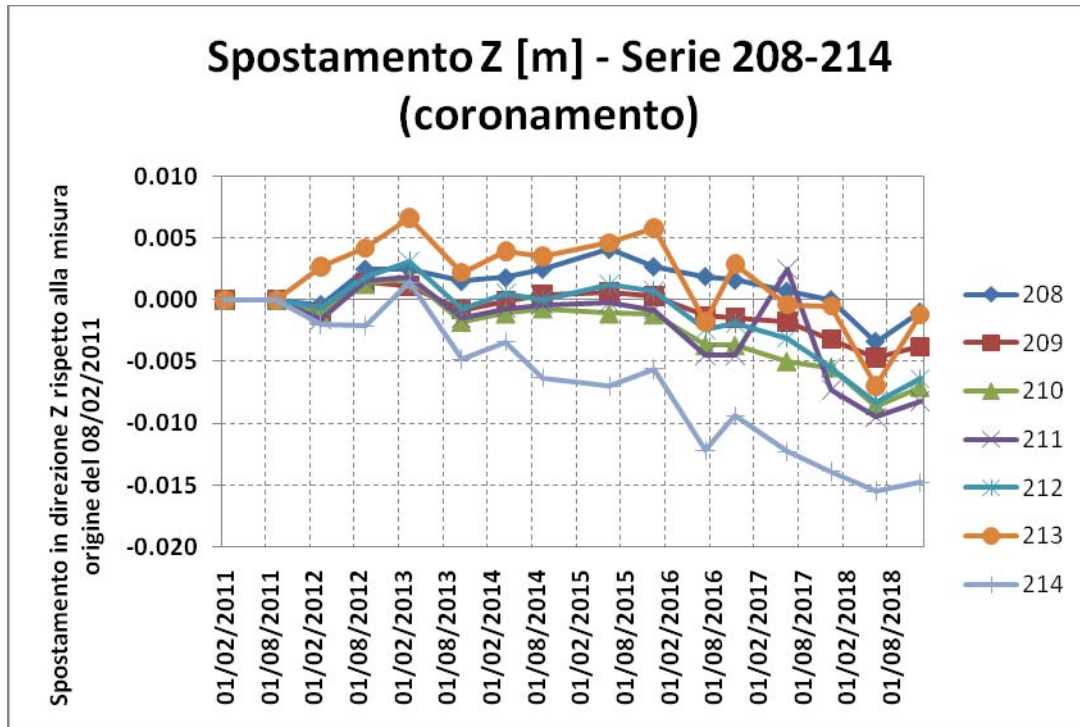


Figura 10-4 – Spostamenti in z coronamento valle verso valle

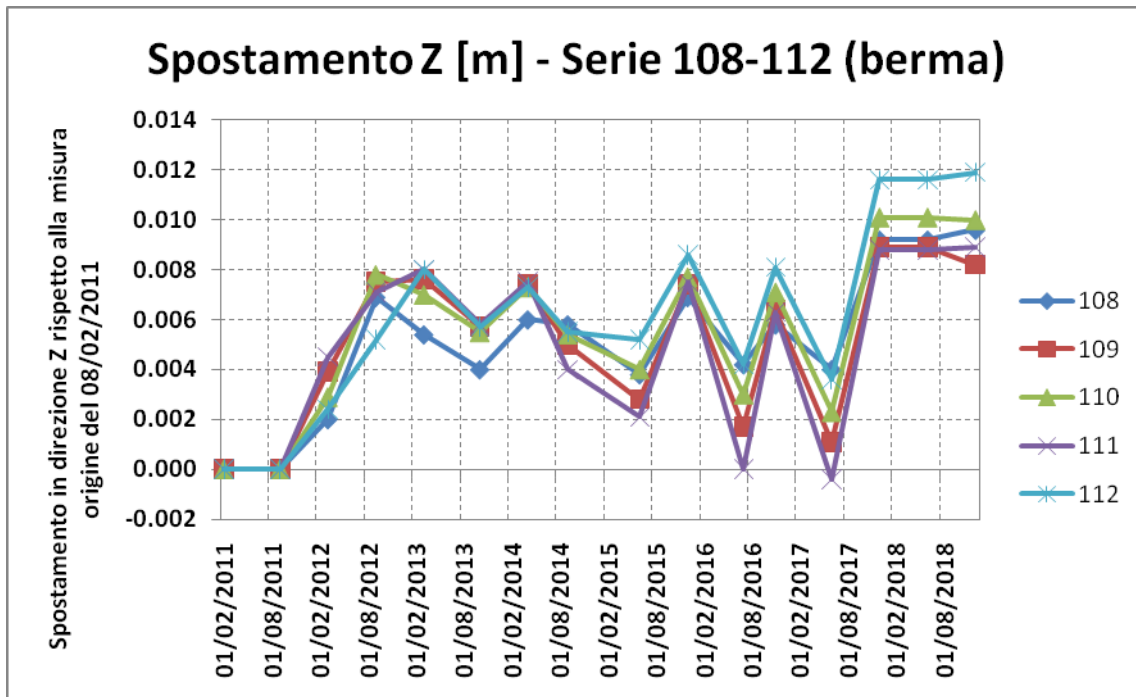


Figura 10-5 – Spostamenti in z berma verso valle

11 VERIFICHE GEOTECNICHE DEL CORPO DIGA

Le verifiche per la sicurezza e le prestazioni sono svolte conformemente ai principi contenuti nel cap. 2 delle NTC 2018.

In accordo con il cap. E.5.1 del D.M. 26 Giugno 2014, le verifiche nei confronti degli stati limite ultimi (SLU) sono svolte con il solo **Approccio 1**, con riferimento alla **Combinazione 2 (A2+M2+R2)**, tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nella Tabella 2.6.I, nella Tabella 2.6.II e nella Tabella 11-1.

Carichi	Effetto	Coefficiente parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1)	(A2)
Permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Permanenti G_2	Favorevole	γ_{G2}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Variabili Q	Favorevole	γ_{Qi}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

(1) Per carichi permanenti G2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{G1} .

Tabella 6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni (N.T.C. 2018).

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,40
Peso dell'unità di volume	γ	γ_γ	1,0	1,00

Tabella 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno (N.T.C. 2018).

Verifica	Coefficiente parziale (R2)
Fasi costruttive	$\gamma_R = 1,1$
Rapido svaso	$\gamma_R = 1,1$
Serbatoio pieno	$\gamma_R = 1,2$

Tabella 11-1 – Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza delle dighe di materiali sciolti ai sensi del cap. E.5.1 del D.M. 26/06/2014.

La verifica dello sbarramento in condizioni simiche è condotta applicando i coefficienti parziali per le azioni e per i parametri geotecnici definiti dalle N.T.C. 2008, in quanto maggiormente cautelativi.

Infatti, come indicato al punto 7.11.1 delle N.T.C. 2008, le verifiche agli stati limite ultimi devono essere effettuate ponendo pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni e impiegando i parametri

geotecnici e le resistenze di progetto, con i valori dei coefficienti parziali indicati nel Cap. 6 (Tabella 2.6.II).

Viceversa, nelle N.T.C. 2018 al punto 7.11.1 indica che le verifiche agli stati limite ultimi in presenza di azioni sismiche devono essere eseguite ponendo pari a 1 i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici.

12 VERIFICHE DEGLI STATI ULTIMI IDRAULICI

Le opere geotecniche sono verificate nei confronti dei possibili stati limite di sollevamento secondo quanto indicato al punto 6.2.4.2 N.T.C. 2008.

Per la stabilità al sollevamento deve risultare che il valore di progetto dell'azione instabilizzante sia non maggiore della combinazione dei valori di progetto delle azioni stabilizzanti e delle resistenze. I coefficienti parziali sulle azioni sono indicati nella Tabella 6.2.III e devono essere combinati in modo opportuno con quelli relativi ai parametri geotecnici (M2).

In particolare, incrementando la pressione interstiziale di un coefficiente di 1.5, essendo un carico variabile sfavorevole, e riducendo la tensione totale di un coefficiente di 0.9, essendo un carico permanente favorevole, si perviene per le verifiche al sollevamento ad un coefficiente di sicurezza parziale $\gamma_R = 1.67$.

Carichi	Effetto	Coefficiente parziale γ_F (o γ_E)	Sollevamento UPL
Permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0,9
	Sfavorevole		1,1
Permanenti G_2	Favorevole	γ_{G2}	0,0
	Sfavorevole		1,5
Variabili Q	Favorevole	γ_{Qi}	0,0
	Sfavorevole		1,5

Tabella 6.2.III – Coefficienti parziali sulle azioni per le verifiche nei confronti degli stati limite di sollevamento.

La verifica idraulica al sifonamento è compiuta controllando che il gradiente idraulico risulti non superiore al gradiente critico diviso per un coefficiente parziale uguale a 2, avendo considerato il gradiente idraulico di efflusso.

In questo caso il coefficiente di sicurezza parziale $\gamma_R = 2$.

13 STIMA DEI CEDIMENTI

La verifica dei cedimenti a lungo termine è stata condotta sul paramento di monte e sul paramento di valle della diga.

Il calcolo è stato condotto considerando un carico sul rilevato esistente pari al terreno di rinfiacco per uno spessore medio (circa 3.6 m a valle e circa 4.0m a monte).

Per il paramento di monte sono stati adottati i parametri riportati nella Tabella 13-1 . Nella Tabella 13-2 si riporta il calcolo dei cedimenti che risultano complessivamente di circa 26.5cm.

Spessore strato	Peso unità di volume	Peso unità di volume saturo	Modulo Elastico	Modulo Edometrico	Coeff. consolidaz. primaria	Coeff. consolidazione secondaria
[m]	[kN/m ³]	[kN/m ³]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[cmq/s]	
13.19	20.25	20.69	100000	4000	0.000594	0.037
30	24	24.5	3000000	250000	0.1	0.1

Tabella 13-1 – Parametri per il paramento di monte per il calcolo dei cedimenti

Strato	Z	Tensione	Dp	Metodo	Wc	Ws	Wt
	(m)	(kN/m ²)	(kN/m ²)		(cm)	(cm)	(cm)
1	6.595	133.549	78.108	Edometrico	25.7561	--	25.7561
2	28.19	627.098	62.7	Edometrico	0.7524	--	0.7524

Tabella 13-2 – Calcolo cedimenti paramento di monte

Per il paramento di valle sono stati adottati i parametri riportati nella Tabella 13-3. Nella Tabella 13-4 si riporta il calcolo dei cedimenti che risultano complessivamente di circa 14.8 cm.

Spessore strato	Peso unità di volume	Peso unità di volume saturo	Modulo Elastico	Modulo Edometrico	Coeff. consolidaz. primaria	Coeff. consolidazione secondaria
[m]	[kN/m ³]	[kN/m ³]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[cmq/s]	
13.81	20.63	21.15	250000	7000	0.0009	0.042
30	24	24.5	3000000	250000	0.1	0.1

Tabella 13-3 – Parametri per il paramento di valle per il calcolo dei cedimenti

Strato	Z	Tensione	Dp	Metodo	Wc	Ws	Wt
	(m)	(kN/m ²)	(kN/m ²)		(cm)	(cm)	(cm)
1	6.905	142.45	71.61	Edometrico	14.1276	--	14.1276
2	28.81	644.9	56.901	Edometrico	0.6828	--	0.6828

Tabella 13-4 – Calcolo cedimenti paramento di valle

14 LIQUEFAZIONE

E' stata condotta una verifica alla liquefazione del corpo diga.

Per la verifica della liquefacibilità del corpo diga nelle condizioni di progetto sono stati utilizzati i seguenti metodi:

- **Metodi basati su prove SPT**
 - Youd & Idriss (2001)
 - Iwasaki et al. (1978;1984)
 - Tokimatsu & Yoshimi (1983)
 - Seed & Idriss (1982)
 - Seed et al. (1985)
 - Rauch (1998)
 - Eurocodice 8

- **Metodi basati sull'andamento delle Vs**
 - Andrus & Stokoe (1997)

Le verifiche condotte indicano come il rilevato di progetto sia in grado di soddisfare positivamente le verifiche alla liquefazione.

Per i dettagli si rimanda alla relazione *ET.05 Relazione geologica, geologico tecnica sulle indagini e sismica*.