


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



PROGETTO DEFINITIVO

Elaborato	Nome Elaborato:	Scala:
ET08	RELAZIONE VERIFICHE DI STABILITÀ STATICHE E SISMICHE CORPO DIGA	-
		Data: 09/10/2020

Settore:  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 - PROJECT MANAGER : ING. GIOVANNI SIMONELLI GEOLOGO: DOTT. GEOL. FILIPPO LANDINI ESPROPRI: GEOM. ANDREA PATRIARCHI	COLLABORATORI : DOTT. GEOL. CARLO FERRI GEOM. MATTEO MASI
CONSULENTI TECNICI :  ING. DAVID SETTESOLDI  DOTT. GEOL. SIMONE FIASCHI  ING. GIOVANNI CANNATA	COMMESSA I.T. : INGT-TPLPD-PBAAC252 RESPONSABILE COMMITTENTE : ING. CRISTIANO AGOSTINI
DIRETTORE TECNICO INGEGNERIE TOSCANE : ING. ANDREA DE CATERINI	RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO : ING. LEONARDO ROSSI

Rev.	Data	Descrizione / Motivo della revisione	Redatto	Controllato / Approvato
02	09/10/2020	Seconda Emissione	Pianigiani	Settesoldi
01	27/12/2019	Prima Emissione	Catella	Settesoldi

INDICE

1	PREMESSA	1
2	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	2
3	PARAMETRI GEOTECNICI CARATTERISTICI	5
4	PROFILO DELLA LINEA DI FILTRAZIONE	6
4.1	VERIFICHE ALLA FILTRAZIONE, AL SOLLEVAMENTO E AL SIFONAMENTO	6
4.1.1	<i>Risultati modellazione e verifica alla filtrazione</i>	8
4.1.2	<i>Verifiche al sollevamento ed al sifonamento</i>	11
4.2	PROFILO DELLA LINEA DI FILTRAZIONE IN REGIME DI MOTO PERMANENTE	12
5	PARAMETRI SISMICI	18
6	DESCRIZIONE DEI METODI DI CALCOLO	19
6.1	METODO DI BISHOP	19
6.2	VALUTAZIONE DEGLI SPOSTAMENTI CON IL METODO DI NEWMARK	20
7	CONDIZIONI DI VERIFICA	21
8	VERIFICHE DELLO STATO DI PROGETTO	25

ELENCO FIGURE

Figura 1-1 – Planimetria sezioni di verifica (scala 1:1'000).....	3
Figura 1-2 – Profilo stratigrafico sezioni di progetto.....	4
Figura 4-1 – Stratigrafie e condizioni al contorno modello VS2DI sezione CR_08	9
Figura 4-2 – Saturazione al termine della verifica	9
Figura 4-3 – Altezza piezometrica al termine della verifica.....	10
Figura 4-4 – Contenuto di umidità al termine della verifica.....	10
Figura 4-5 – Stratigrafie e mesh di calcolo modello SEEP/W sezione CR_08	14
Figura 4-6 – Condizioni al contorno modello SEEP/W sezione CR_08	14
Figura 4-7 – Linee equipotenziali a carico costante [m] da modello SEEP/W	15
Figura 4-8 – Linee equipotenziali a pressione costante [kPa] da modello SEEP/W	15
Figura 4-9 – Confronto tra la superficie freatica calcolata con il programma VS2DI (linea celeste) e quella stimata con il programma SEEP/W (linea blu). Rappresentazione distorta: scala orizzontale 1:1000; scala verticale 1:500.	16

ELENCO TABELLE

Tabella 3-1 – Parametri geotecnici caratteristici.....	5
Tabella 4-1 – Parametri dei terreni adottati per la verifica alla filtrazione e al sifonamento	7
Tabella 5-1 – Parametri sismici di base e dipendenti.....	18
Tabella 7-1 – Combinazioni di carico verifiche di stabilità	21
Tabella 8-1 – Verifiche di stabilità dello stato di progetto condotte secondo D.M. 26/06/2014 per la sezione CR_04	27
Tabella 8-2 – Verifiche di stabilità dello stato di progetto condotte secondo D.M. 26/06/2014 per la sezione CR_06	28
Tabella 8-3 – Verifiche di stabilità dello stato di progetto condotte secondo D.M. 26/06/2014 per la sezione CR_08	29
Tabella 8-4 – Verifiche di stabilità dello stato di progetto condotte secondo D.M. 26/06/2014	30

1 PREMESSA

Nel presente documento si riportano la metodologia ed i risultati ottenuti dalle verifiche di stabilità relative all'invaso nello stato di progetto svolte ai sensi del D.M. del 26 giugno 2014.

Gli interventi di progetto sono assimilabili ad interventi di adeguamento in quanto modificano la diga attuale mediante un insieme sistematico di opere tali da portare ad un'opera dal comportamento strutturale diverso da quello precedente, così come definito al cap. H.2.1 del D.M. 26/06/2014.

Per gli interventi di adeguamento occorre fare riferimento a quanto riportato nel cap. C del D.M. 26/06/2014 per le nuove realizzazioni.

Gli interventi volti a garantire la stabilità del corpo diga prevedono di **ridurre sia l'altezza dello sbarramento che la pendenza dei paramenti di monte e di valle.**

Il *modello geotecnico* del corpo diga e dei terreni del substrato è stato ricostruito nell'elaborato *ET.06* utilizzando i risultati riportati negli elaborati di natura geologica, geologico-tecnica e sulle campagne geognostiche dirette, indirette nonché sulle risultanze delle indagini di laboratorio condotte nei diversi anni di vita della diga.

La presente relazione espone i risultati delle seguenti verifiche condotte sullo sbarramento:

- *verifica alla filtrazione;*
- *verifica al sifonamento;*
- *verifiche di stabilità.*

Nella **Figura 1-1** si riporta la **planimetria del corpo diga di progetto** con la rappresentazione delle sezioni di verifica, mentre nella **Figura 1-2** sono rappresentati i **profili delle sezioni di progetto** con le stratigrafie dei terreni del corpo diga e della fondazione.

La **filtrazione nel corpo** diga è stata modellata per la sezione **CR_08** sia in condizioni di moto vario, con il programma *VS2DTI* del U.S *Geological Survey* che simula la **filtrazione bidimensionale** in un mezzo poroso, sia in condizioni di moto permanente con il programma *Seep/W* della *Geostudio*.

La **verifica alla filtrazione e al sifonamento** sono svolte con il programma *VS2DTI* del U.S *Geological Survey*, che simula la **filtrazione bidimensionale** in un mezzo poroso in condizioni di moto vario, ed è condotta per la sezione **CR_08**.

Le **verifiche di stabilità** sono condotte con il programma *Stap Terreni 14.0* della *Aztec* su n. **3** sezioni rappresentative del profilo di progetto dello sbarramento (codici: CR_04; CR_06; CR_08).

2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Tutte le verifiche sono condotte nel rispetto della normativa vigente:

- **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.
- **Circolare n. 7 del 21/01/2019**
Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 17 gennaio 2018.

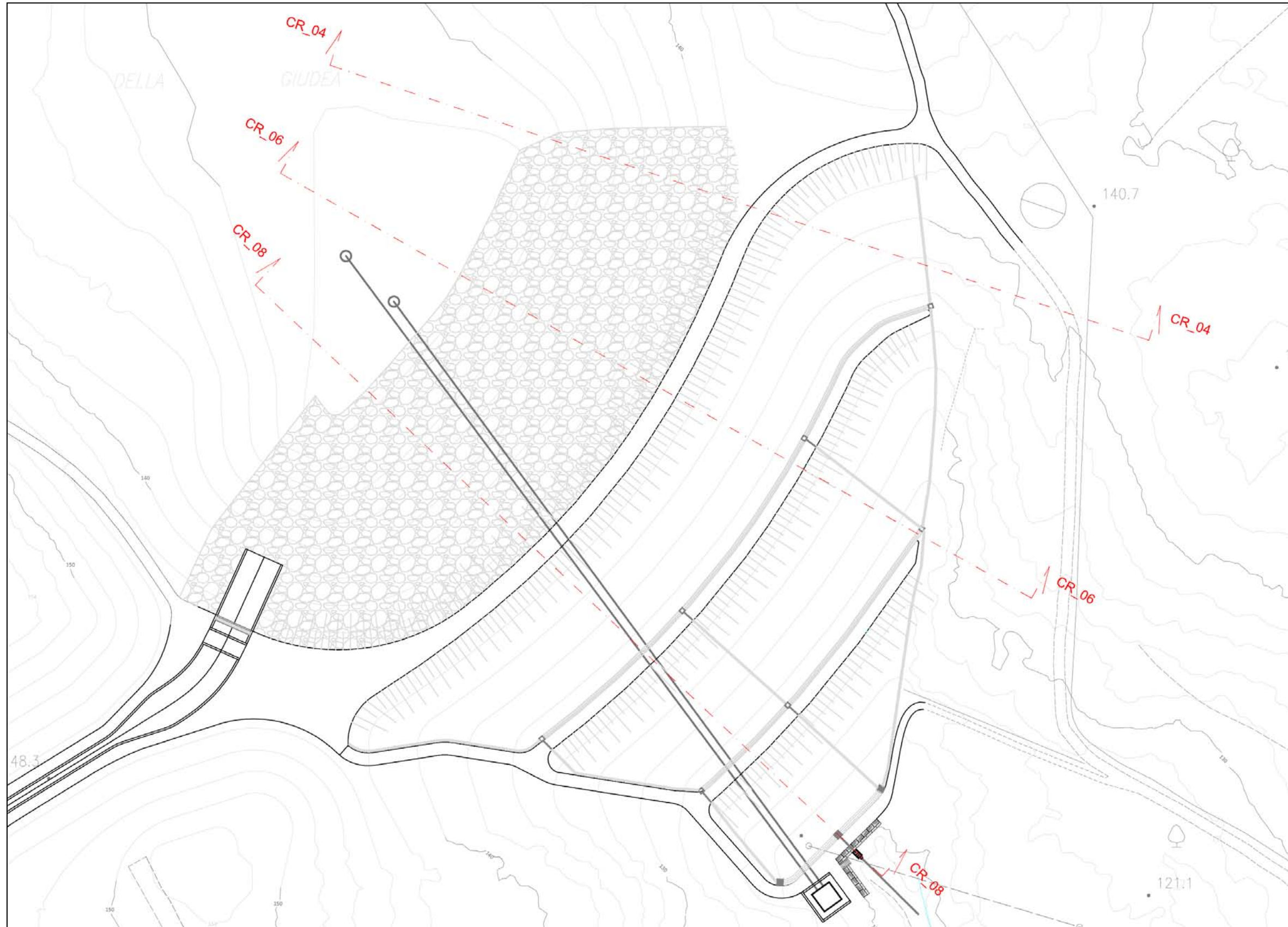


Figura 1-1 – Planimetria sezioni di verifica (scala 1:1'000)

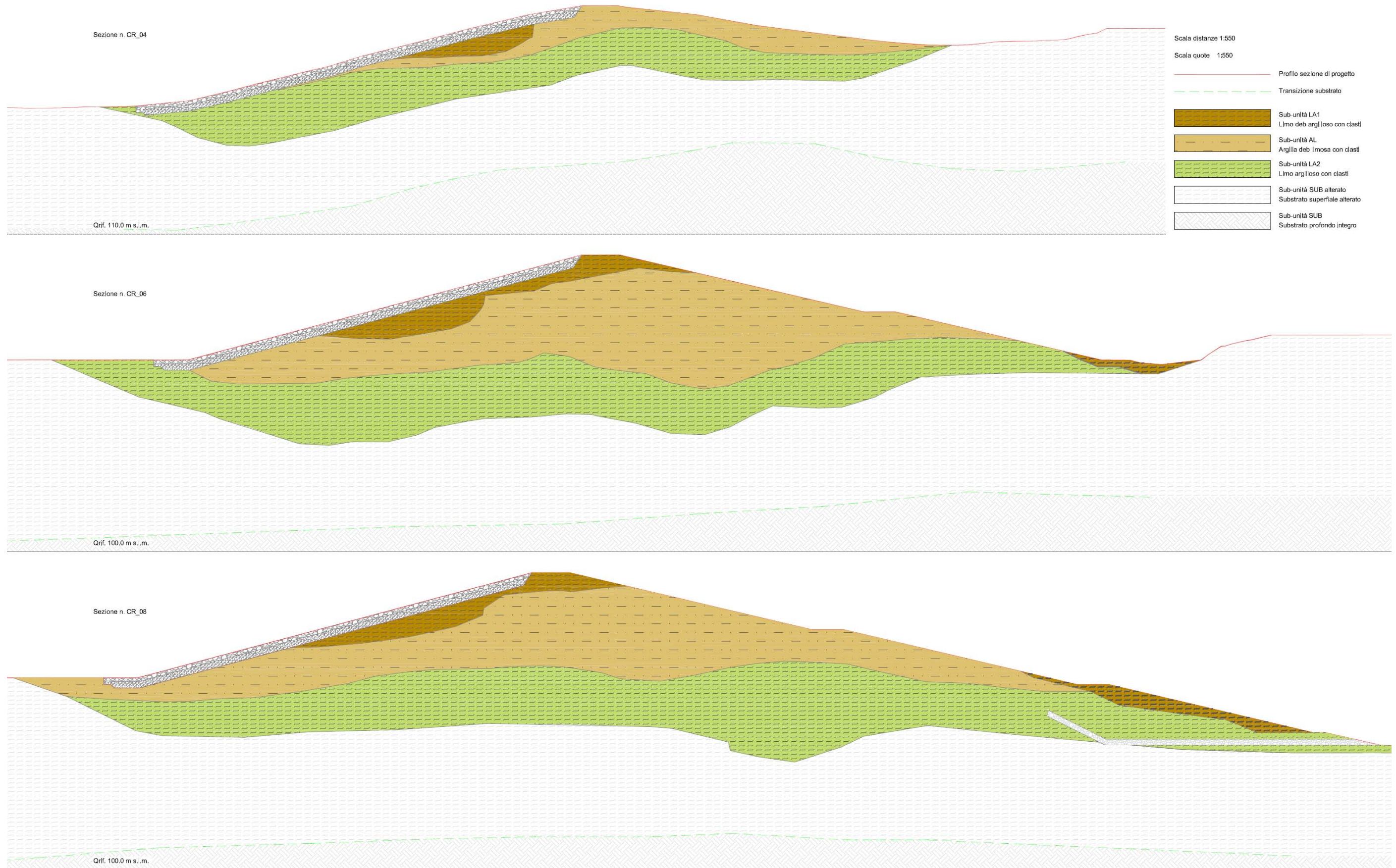


Figura 1-2 – Profilo stratigrafico sezioni di progetto

3 PARAMETRI GEOTECNICI CARATTERISTICI

Come riportato negli elaborati *ET.04a* ed *ET.06*, 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 e dal punto di vista geotecnico lo sbarramento della diga nello stato di progetto è suddiviso nelle seguenti sub-unità (Figura 1-2):

- **sub-unità LA1:** corpo diga costituito da limi debolmente argillosi con clasti;
- **sub-unità AL:** corpo diga formato da argille debolmente limose con clasti;
- **sub-unità LA2:** corpo diga composto da limi argillosi con clasti;
- **sub-unità SUB:** substrato corpo diga caratterizzato dalla presenta di argillite con livello marnoso.

Oltre ai terreni delle sub-unità, il corpo diga è composto, nello stato di progetto, dalla scogliera, di cui è rivestito il paramento di monte, e dal dreno inserito nel paramento di valle e che si estende fino al piede.

I parametri geotecnici caratteristici di tutti i materiali impiegati nelle verifiche di stabilità sono riassunti nella Tabella 3-1.

Parametri geotecnici	Unità di misura	Sub-unità LA1	Sub-unità AL	Sub-unità LA2	Sub-unità SUB	Sub-unità Scogliera	Sub-unità Dreno
<i>Peso di volume</i>	kg/m ³	2045	1936	2109	2169	1800	1800
<i>Peso di volume saturo</i>	kg/m ³	2045	1936	2109	2169	2000	2000
ϕ'	°	21.6	24.2	23.4	23.6	45	30
c'	kPa	24.0	23.0	22.0	24.0	–	–
ϕ_u	°	–	–	–	–	27.3	16.6
c_u	kPa	74.0	76.0	73.0	146.0	–	–

Tabella 3-1 – Parametri geotecnici caratteristici

4 PROFILO DELLA LINEA DI FILTRAZIONE

Dall'esame del progetto originale della diga si può desumere che esiste all'interno del corpo diga attuale un tappeto filtrante che copre la quasi totalità del paramento di valle, costituito da due tratti a differente pendenza.

Il primo tratto, che trae origine in prossimità del coronamento alla quota di circa 139.0 m s.l.m., si estende verso valle con una pendenza di circa 1:2 fino ad intercettare il secondo tratto posto nella sezione di imposta del rilevato e caratterizzato da pendenze inferiori pari a 1:15.

Come indicato nel progetto di massima per il consolidamento della diga del 1990, tale tappeto è indicato in maniera approssimativa solamente nei disegni dell'incartamento progettuale del 1963 e la sua esatta posizione non è stata appurata con un rilievo topografico nel corso delle fasi di costruzione dell'opera.

Gli interventi di progetto prevedono di realizzare un **nuovo dreno** in corrispondenza della sezione di imposta dell'ammorsamento necessario per il rinfiacco sul paramento di valle. Il nuovo dreno sarà raccordato a quello attuale realizzando uno strato drenante con pendenza di 1:2.

Le verifiche alla filtrazione, al sollevamento e al sifonamento, nonché la costruzione del profilo della linea di filtrazione all'interno dello sbarramento sono condotte cautelativamente considerando attiva solamente la parte di dreno, prevista nel presente progetto nella parte piana di separazione tra il substrato di fondazione ed il rinfiacco, escludendo dalla modellazione la parte inclinata di raccordo.

Pertanto, nel corso delle verifiche, il dreno è stato assunto con una lunghezza di 35.0 m, uno spessore di 80 cm e una quota di imposta di 118.2 m s.l.m..

4.1 VERIFICHE ALLA FILTRAZIONE, AL SOLLEVAMENTO E AL SIFONAMENTO

Le verifiche alla filtrazione sono eseguite in **regime di moto vario** con il modello *VS2DI* del *USGS U.S. Geological Survey*.

La verifica alla filtrazione è condotta assumendo i parametri riportati nella Tabella 4-1 per la schematizzazione dei terreni costituenti lo sbarramento e la fondazione.

I parametri riportati nella Tabella 4-1 hanno il seguente significato:

- K_z/K_h = rapporto tra la conducibilità idraulica verticale e orizzontale;
- K_h = conducibilità idraulica orizzontale [m/s];
- *Porosità* = porosità efficace;
- *RMC, alpha e beta* = parametri della formula di *Van Genuchten*.

Denominazione sub-unità	K_z/K_h	K_h [m/s]	Porosità	RMC	α	β	Retino
Sub-unità LA1	1.0	1.0E-07	0.32	0.10	1.0	5.0	
Sub-unità AL	1.0	1.0E-08	0.35	0.10	0.5	1.5	
Sub-unità LA2	1.0	1.0E-07	0.30	0.10	1.0	5.0	
Sub-unità SUB	1.0	1.0E-08	0.32	0.10	0.5	1.5	
Scogliera	1.0	1.0E-04	0.30	0.05	2.0	10.0	
Dreno	1.0	1.0E-03	0.30	0.05	2.0	10.0	

Tabella 4-1 – Parametri dei terreni adottati per la verifica alla filtrazione e al sifonamento

La formula di *Van Genuchten* fornisce i valori del grado di saturazione e della conducibilità idraulica nella parte di mezzo poroso insatura, secondo le seguenti espressioni:

$$s_e = 1 / \left(1 + |\alpha \times h|^\beta \right)^{\gamma}$$

$$K_r = \left(1 - C \times D^{-\gamma} \right)^2 / D^{\gamma/2}$$

$$C = |\alpha \times h|^{(\beta-1)}$$

$$D = 1 + |\alpha \times h|^\beta$$

dove:

s_e = saturazione effettiva (VMC-RMC)/(Porosità – RMC);

VMC = grado di umidità nel suolo;

RMC = grado di umidità residuo;

K_r = conducibilità idraulica relativa;

h = tensione capillare;

α e β = parametri empirici;

$\gamma = 1 - 1/\beta$.

Il modello risolve le equazioni di *Richard's* alle differenze finite in un dominio definito dall'utente con assegnate condizioni al contorno.

Le condizioni al contorno sono inserite con il seguente criterio:

- ai paramenti di monte e/o di valle a contatto con l'acqua e ai bordi del dominio a contatto con l'acqua è assegnato un carico totale costante nel tempo (linea blu Figura 4-1);
- ai paramenti di monte e/o di valle e ai bordi non a contatto con l'acqua è assegnata una condizione di superficie libera (linea arancione Figura 4-1);
- ai bordi verticali del dominio è assegnata una condizione di carico totale fissa pari al livelli di invaso a monte e di falda a valle (linea blu Figura 4-1);

- alla base del dominio e alla sommità dell'argine è assegnata la condizione di flusso nullo.

Per le verifiche alla filtrazione i livelli idrometrici sono mantenuti costanti per tutta la simulazione, la cui durata è assunta pari a 20 anni in modo da raggiungere le condizioni di regime.

Sul paramento di monte è applicata la quota di massima regolazione di 140.0 m s.l.m., mentre sul paramento di valle è assunto un carico nullo in corrispondenza sia del pozzetto di misura delle perdite sia del bordo al di sotto della platea della vasca di raccolta. La quota della falda sul bordo verticale del dominio di valle è assunta pari a 116.6 m s.l.m..

4.1.1 RISULTATI MODELLAZIONE E VERIFICA ALLA FILTRAZIONE

Nella Figura 4-1 si riportano i profili del piano campagna, le stratigrafie del terreno e le condizioni al contorno utilizzate nel programma *VS2DI* del *USGS U.S. Geological Survey* per la sezione CR_08.

Nella schematizzazione numerica adottata, l'origine delle coordinate del sistema di riferimento è posta in prossimità della sommità del dreno di valle a 118.77 m s.l.m. e, quindi, ad una profondità di -24.53 m dalla sommità della diga posta a 143.30 s.l.m..

Sulla base di questa schematizzazione il livello idrometrico di massima regolazione, pari a 140.0 m s.l.m., corrisponde ad un carico di 21.23 m.

La distribuzione della saturazione all'interno del corpo diga dopo 20 anni di simulazione è riportata nella Figura 4-2, mentre nella Figura 4-3 è rappresentata l'altezza piezometria e nella Figura 4-4 il contenuto di umidità.

Le verifiche hanno evidenziato che la linea di filtrazione (zona satura) a regime non interessa il piede esterno del paramento di valle della diga grazie alla presenza del dreno.

L'andamento della linea di filtrazione calcolata risente della presenza di orizzonti a differente permeabilità, compresi tra valori dell'ordine di $1E-07$ m/s e $1E-08$ m/s.

La velocità orizzontale massima corrisponde a $3.3E-07$ m/s, mentre nella direzione verticale è pressoché nulla. La velocità massima nella direzione orizzontale è ubicata in corrispondenza della sezione di sbocco del dreno.

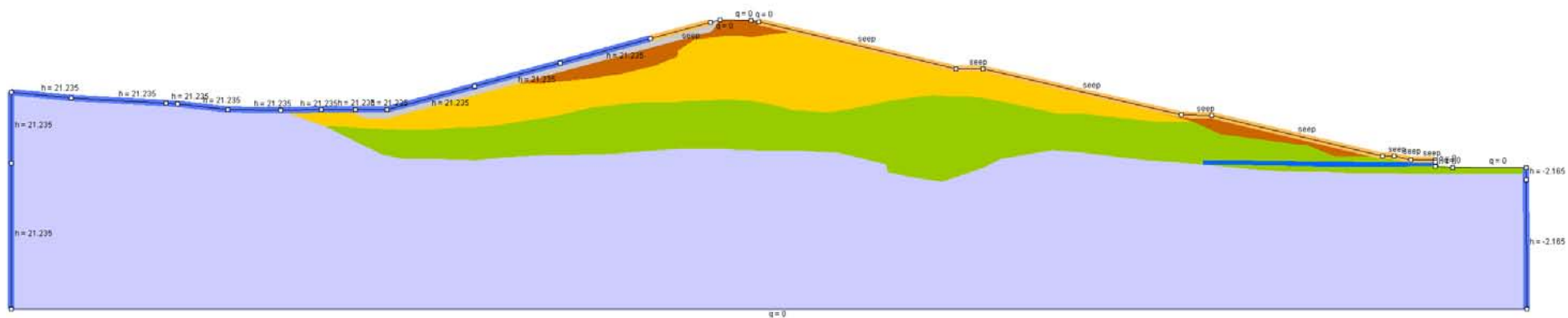


Figura 4-1 – Stratigrafie e condizioni al contorno modello VS2DI sezione CR_08

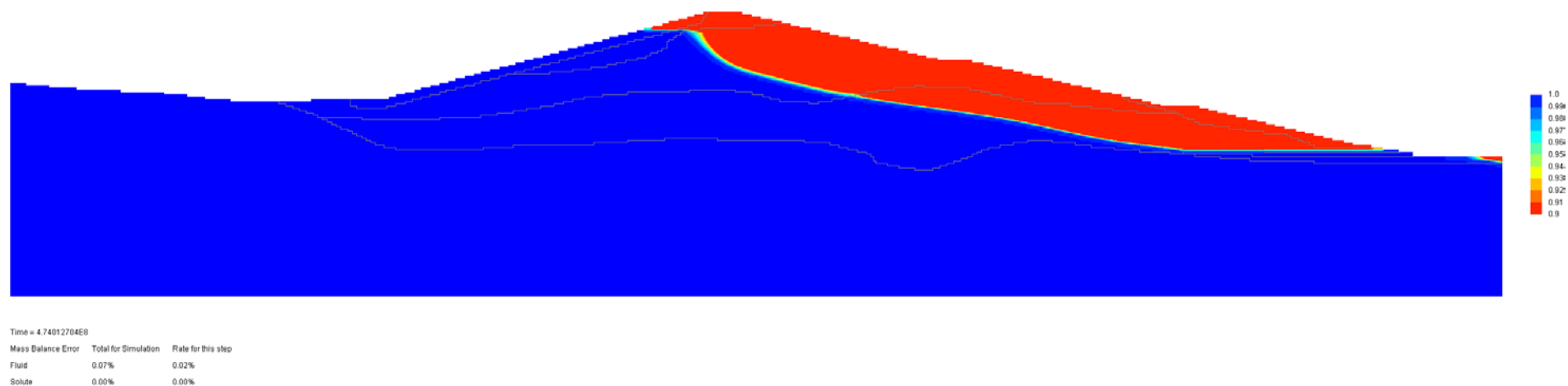


Figura 4-2 – Saturazione al termine della verifica

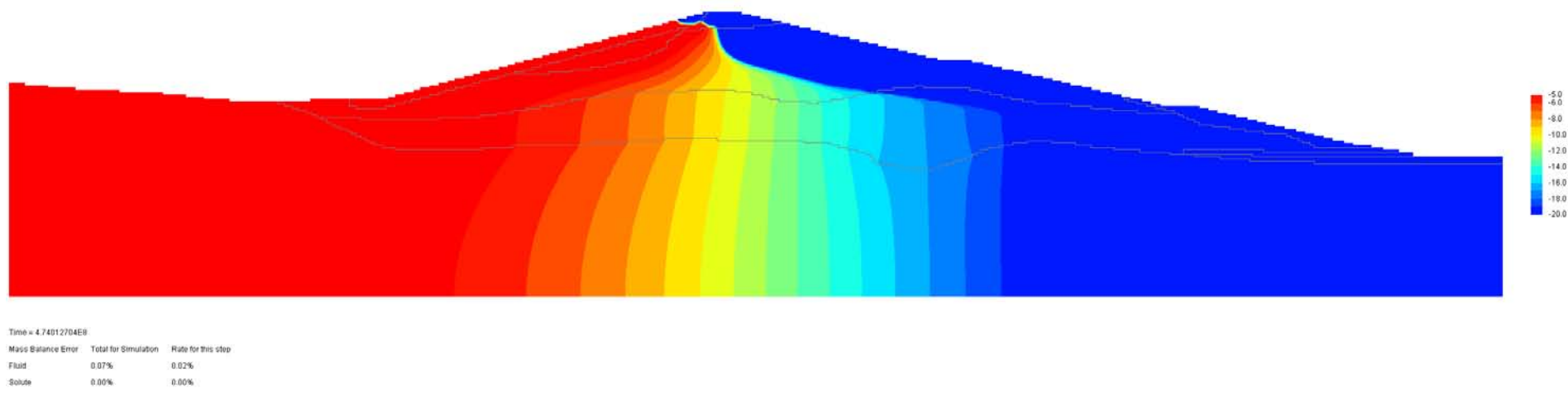


Figura 4-3 – Altezza piezometrica al termine della verifica

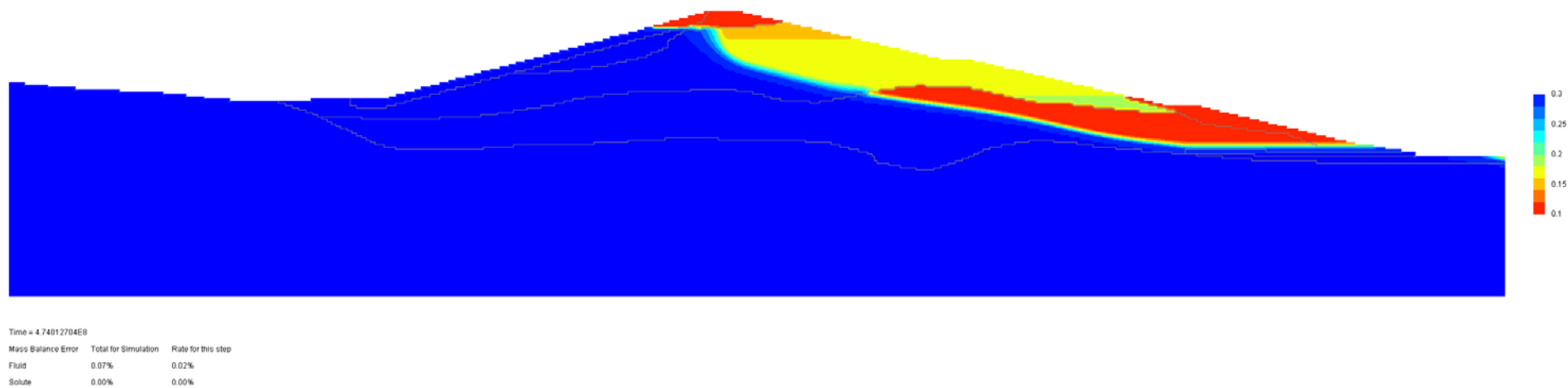


Figura 4-4 – Contenuto di umidità al termine della verifica

4.1.2 VERIFICHE AL SOLLEVAMENTO ED AL SIFONAMENTO

Le verifiche al sollevamento ed al sifonamento sono state condotte ai sensi delle NTC 2018 paragrafo 6.2.4.2, che si riporta di seguito.

“Le opere geotecniche devono essere verificate nei confronti dei possibili stati limite di sollevamento o di sifonamento. A tal fine, nella valutazione delle pressioni interstiziali e delle quote piezometriche caratteristiche, si devono assumere le condizioni più sfavorevoli, considerando i possibili effetti delle condizioni stratigrafiche. Per la stabilità al sollevamento deve risultare che il valore di progetto dell’azione instabilizzante $V_{inst,d}$, ovvero sia della risultante delle pressioni idrauliche ottenuta considerando separatamente la parte permanente ($G_{inst,d}$) e quella variabile ($Q_{inst,d}$), sia non maggiore della combinazione dei valori di progetto delle azioni stabilizzanti ($G_{stb,d}$) e delle resistenze (R_d):

$$V_{inst,d} < G_{stb,d} + R_d$$

dove

$$V_{inst,d} = G_{inst,d} + Q_{inst,d}$$

Per le verifiche di stabilità al sollevamento, i relativi coefficienti parziali sulle azioni sono indicati nella Tab. 6.2.III. Al fine del calcolo della resistenza di progetto R_d , tali coefficienti devono essere combinati in modo opportuno con quelli relativi ai parametri geotecnici (M2). Ove necessario, il calcolo della resistenza va eseguito in accordo a quanto indicato nei successivi paragrafi per le fondazioni su pali e per gli ancoraggi.

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

Carichi	Effetto	Coefficiente parziale γ_F (o γ_E)	Sollevamento UPL
Permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0.9
	Sfavorevole		1.1
Permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	γ_{G2}	0.0
	Sfavorevole		1.5
Variabili Q	Favorevole	γ_{Qi}	0.0
	Sfavorevole		1.5

⁽¹⁾ Per i carichi permanenti G_2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{G1}

In condizioni di flusso prevalentemente verticale:

a) nel caso di frontiera di efflusso libera, la verifica a sifonamento si esegue controllando che il gradiente idraulico i risulti non superiore al gradiente idraulico critico i_c diviso per un coefficiente parziale $\gamma_R = 3$, se si assume come effetto delle azioni il gradiente idraulico medio, e per un coefficiente parziale $\gamma_R = 2$ nel caso in cui si consideri il gradiente idraulico di efflusso;

b) in presenza di un carico imposto sulla frontiera di efflusso, la verifica si esegue controllando che la pressione interstiziale in eccesso rispetto alla condizione idrostatica risulti non superiore alla tensione verticale efficace calcolata in assenza di filtrazione, divisa per un coefficiente parziale $\gamma_R = 2$.

In tutti gli altri casi il progettista deve valutare gli effetti delle forze di filtrazione e garantire adeguati livelli di sicurezza, da prefissare e giustificare esplicitamente.

Si fa salvo, comunque, quanto previsto nel Decreto del Ministro delle Infrastrutture e dei Trasporti del 26 giugno 2014 recante "Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)", ove applicabile".

Per quanto riguarda la **verifica al sollevamento** si procede come segue:

- $V_{inst,d} = Q_{inst,d}$ è calcolato moltiplicando la pressione interstiziale (sfavorevole) per il coefficiente $\gamma_{Qi} = 1.5$;
- $G_{stb,d}$ è **calcolato** moltiplicando la tensione totale (favorevole) per il coefficiente $\gamma_{G1}=0.9$;
- R_d è assunto cautelativamente pari a zero.

In tal modo si perviene a un **coefficiente di sicurezza parziale $\gamma_R = 1.67$** .

Il coefficiente di sicurezza minimo in corrispondenza del piede di valle della diga vale 1.81.

Per quanto riguarda la **verifica al sifonamento** si deve verificare la seguente disuguaglianza:

$$i > i_c / \gamma_R$$

Avendo adottato un modello completo di filtrazione si ricade nel caso a) e si adotta un **coefficiente di sicurezza parziale $\gamma_R = 2$** .

Il coefficiente di sicurezza minimo è abbondantemente superiore a 2. In corrispondenza del piede di valle della diga, in ragione della presenza del dreno, la linea di filtrazione si mantiene abbondantemente al di sotto del paramento.

4.2 PROFILO DELLA LINEA DI FILTRAZIONE IN REGIME DI MOTO PERMANENTE

La verifica delle condizioni di stabilità del rilevato dello sbarramento è condotta considerando l'andamento della linea di filtrazione ottenuta nell'ipotesi di regime di moto permanente impiegando un algoritmo di calcolo integrato nel programma *SEEP/W* della *Geostudio*.

L'analisi di filtrazione si basa sull'applicazione della teoria classica di *Darcy*, che definisce la filtrazione in un mezzo poroso saturo nella seguente forma:

$$q = k \cdot i$$

dove q è la portata specifica [m^2/s], k la permeabilità del mezzo poroso [m/s], i il gradiente del carico idraulico totale [m/m].

Il carico idraulico totale rappresenta la principale incognita del problema che, nell'ipotesi di continuo bidimensionale, viene esplicitata dalla seguente equazione di continuità in forma differenziale:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

dove k_x e k_y sono i coefficienti di permeabilità nelle due direzioni planari ortogonali [m/s] e h è il carico idraulico totale [m], somma di carico potenziale e carico di pressione.

Occorre precisare che tale equazione è valida limitatamente all'ipotesi di fluido monofasico incompressibile in condizioni di regime di moto laminare e di suolo o roccia porosa.

La soluzione dell'equazione di Darcy è ottenuta con uno schema numerico alle differenze finite in corrispondenza dei vertici della mesh con cui viene discretizzato il dominio di calcolo. Gli elementi isoparametrici della mesh possono essere sia triangolari sia rettangolari.

Il metodo risolutivo, sviluppato da *Barrel e al. (1994)* è basato sulla soluzione del sistema di equazioni differenziali con un'integrazione gaussiana.

Le caratteristiche geotecniche dei materiali impiegati nel modello numerico sono quelli riportati nella Tabella 4-1. In particolare, il modello necessita per ciascun materiale utilizzato dei valori della permeabilità, del coefficiente di anisotropia K_z/K_h e del contenuto volumetrico d'acqua.

Le condizioni al contorno adottate per il sistema sono le seguenti:

- al paramento di monte a contatto con l'acqua e al bordo verticale del dominio di monte è assegnato un carico totale costante nel tempo (*linea blu* Figura 4-6);
- al paramento di valle non a contatto con l'acqua è assegnata una condizione di superficie libera (*linea arancione* Figura 4-6);
- al bordo verticale del dominio di valle è assegnata una condizione di carico totale fissa pari ai livelli di falda (*linea celeste* Figura 4-6);
- al paramento di valle in corrispondenza del dreno è attribuita una condizione di carico di pressione nullo, ovvero ad una pressione assoluta pari alla pressione atmosferica;
- alla base del dominio e alla sommità dell'argine è assegnata la condizione di flusso nullo.

La determinazione della superficie freatica all'interno del corpo diga è calcolata considerando tre differenti condizioni per il livello idrometrico all'interno del serbatoio:

- alla quota di 128.0 m s.l.m. corrispondente alla situazione di serbatoio vuoto;
- alla quota di massima regolazione di 140.0 m s.l.m.;
- alla quota di massimo invaso di 140.335 m s.l.m. relativo alla piena con TR = 3000 anni.

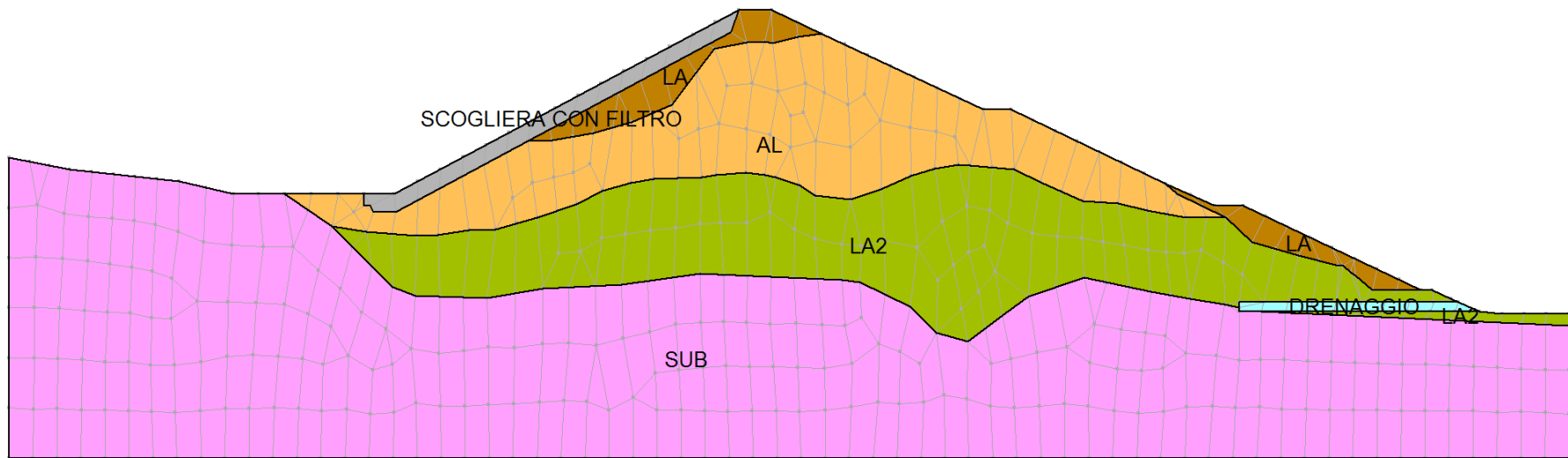


Figura 4-5 – Stratigrafie e mesh di calcolo modello SEEP/W sezione CR_08

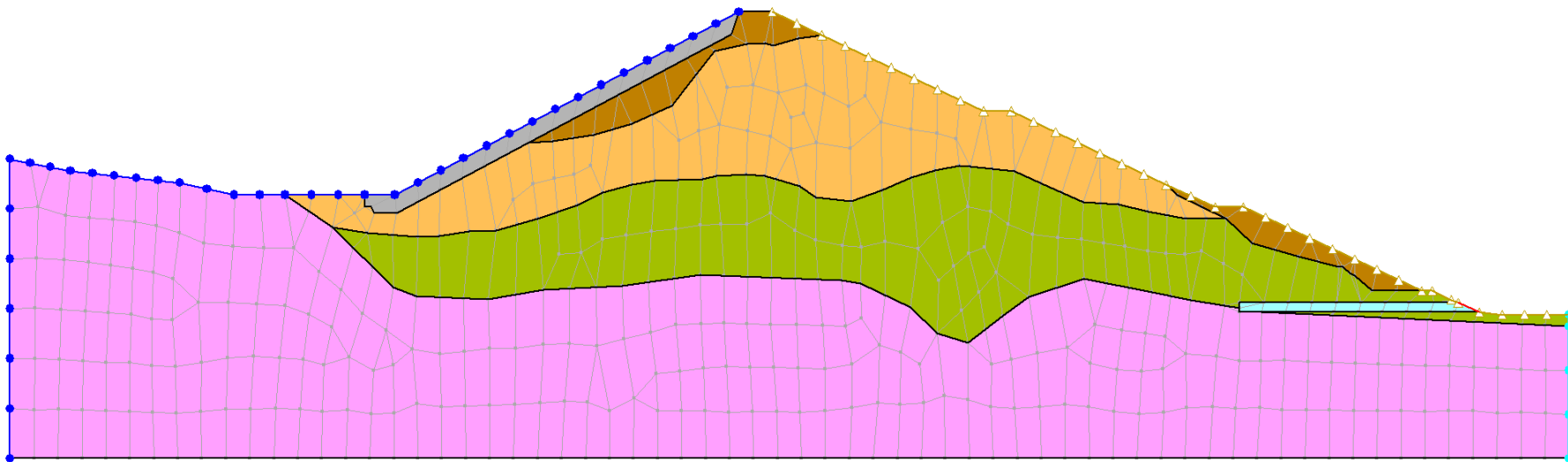


Figura 4-6 – Condizioni al contorno modello SEEP/W sezione CR_08

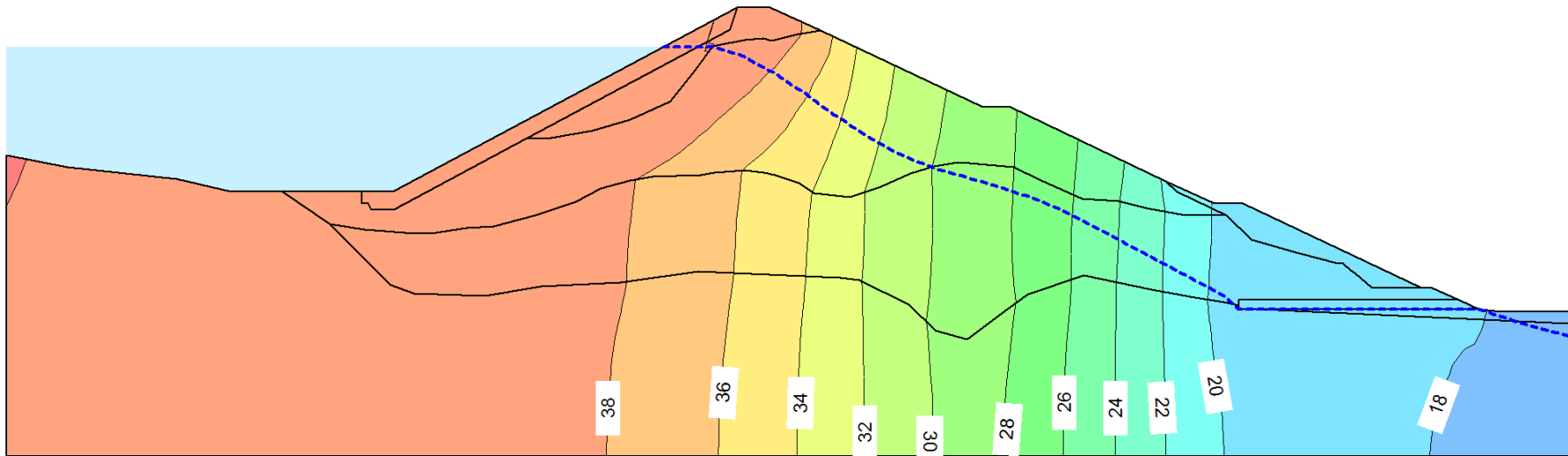


Figura 4-7 – Linee equipotenziali a carico costante [m] da modello SEEP/W

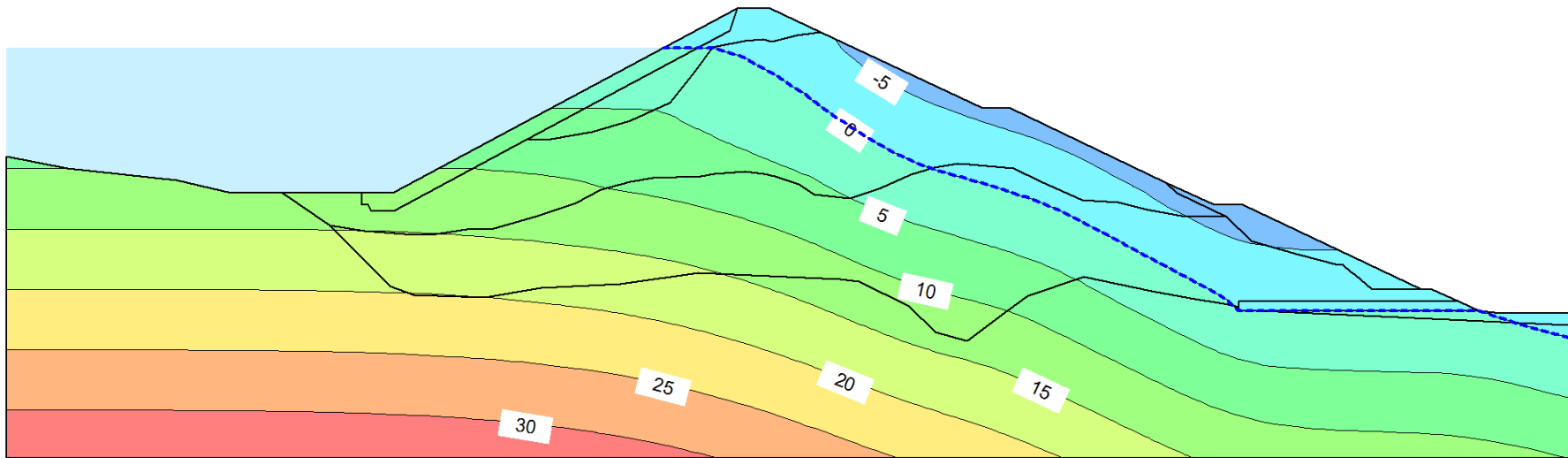


Figura 4-8 – Linee equipotenziali a pressione costante [kPa] da modello SEEP/W

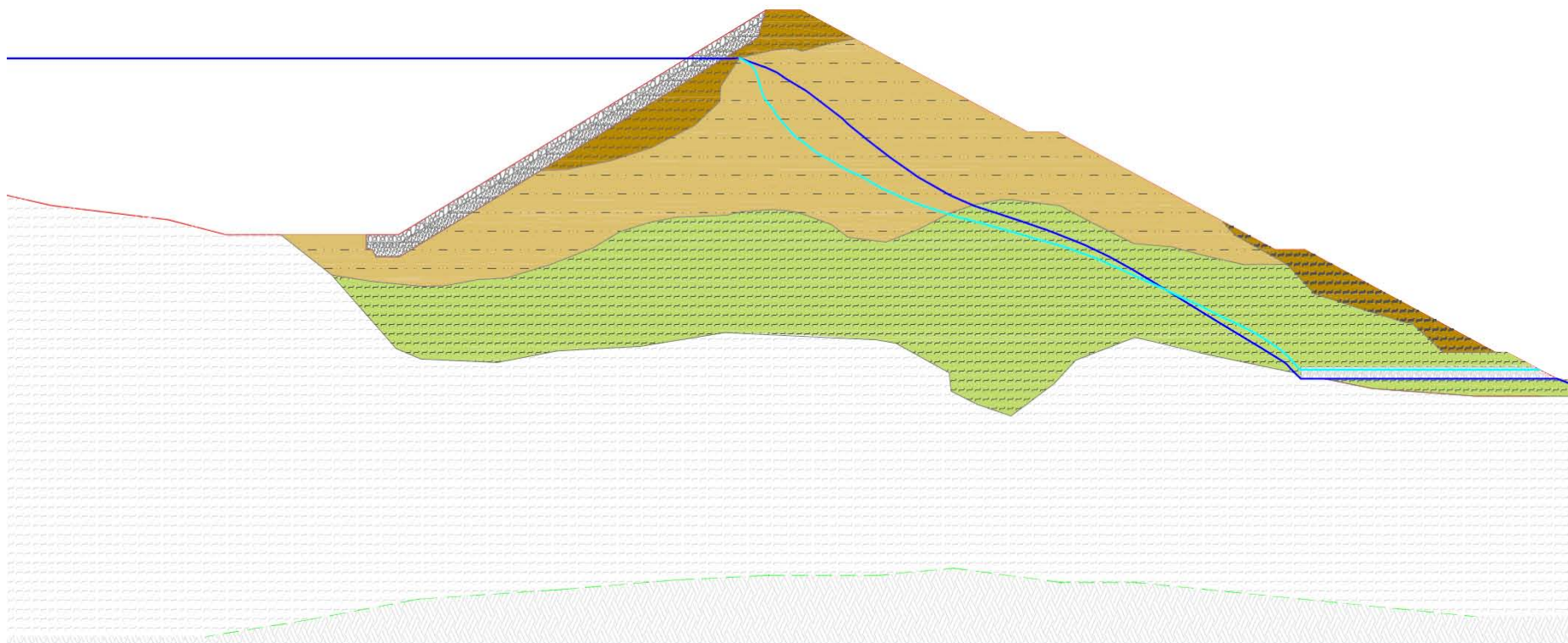


Figura 4-9 – Confronto tra la superficie freatica calcolata con il programma VS2DI (linea celeste) e quella stimata con il programma SEEP/W (linea blu).
Rappresentazione distorta: scala orizzontale 1:1000; scala verticale 1:500.

Nella schematizzazione numerica adottata, l'origine delle coordinate del sistema di riferimento è posta alla quota di 100 m s.l.m.. Sulla base di questa schematizzazione il livello idrometrico di massima regolazione corrisponde ad un carico di 40.0 m e il carico totale della falda sul bordo di valle è pari a 16.6 m.

Nella Figura 4-7 e nella Figura 4-8 sono rappresentate rispettivamente le linee equipotenziali a carico totale costante e a pressione costante.

Nella Figura 4-9 è riportata la linea di filtrazione calcolata in moto permanente con il programma *SEEP/W* assieme a quella ricavata a regime, per un grado di saturazione di 0.95, dalla verifica in moto vario con il programma *VS2DI* del *USGS U.S. Geological Survey*.

Come è possibile osservare dal confronto delle due modellazioni, si ritiene che i **risultati conseguiti nella modellazione in moto permanente siano maggiormente cautelativi per la stima del processo di filtrazione dello stato di piena con TR = 3000 anni.**

5 PARAMETRI SISMICI

Le verifiche sismiche sono condotte, per ogni stato limite, utilizzando i parametri sismici di base a_g , F_0 e T_c^* , i parametri sismici dipendenti S , T_B , T_C ed i 7 accelerogrammi rappresentativi della sismicità del sito, secondo quanto indicato nell'elaborato ET.04b.

Stato limite	P_{Vr} [%]	Tr [anni]	a_g/g	a_g [m/s ²]	F_0	T_c^* [s]	S	T_B [s]	T_C [s]
SLO	81	120	0.103	1.010	2.421	0.271	2.178	0.110	0.168
SLD	63	201	0.126	1.236	2.414	0.279	2.622	0.117	0.133
SLV	10	1898	0.274	2.687	2.398	0.309	2.395	0.158	0.174
SLC	5	2475	0.298	2.922	2.397	0.317	2.088	0.091	0.197

Tabella 5-1 – Parametri sismici di base e dipendenti

Il coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito β_s è assunto pari a **1**, secondo quanto riportato nel D.M. 26 Giugno 2014.

6 DESCRIZIONE DEI METODI DI CALCOLO

Le verifiche di stabilità sono condotte con il programma *STAP 14.0* prodotto dalla *Aztec Informatica*.

Le verifiche di stabilità sono eseguite con il **metodo di Bishop**.

Viene usata la **tecnica della suddivisione a strisce della superficie di scorrimento da analizzare**.

In particolare il programma esamina un numero di superfici che dipende dalle impostazioni fornite (impostazione delle superfici di rottura, condizioni di esclusione, numero di superfici analizzate) e che sono riportate nella corrispondente sezione negli elaborati ET.08a, ET.08b ed ET.08c "Tabulati delle verifiche di stabilità". Il processo iterativo permette di determinare il coefficiente di sicurezza di tutte le superfici analizzate.

Nella descrizione dei metodi di calcolo si adotterà la seguente simbologia:

- l lunghezza della base della striscia
- α angolo della base della striscia rispetto all'orizzontale
- b larghezza della striscia $b = l \times \cos(\alpha)$
- ϕ angolo di attrito lungo la base della striscia
- c coesione lungo la base della striscia
- γ peso di volume del terreno
- u pressione neutra
- W peso della striscia
- N sforzo normale alla base della striscia
- T sforzo di taglio alla base della striscia
- E_s, E_d forze normali di interstriscia a sinistra e a destra
- X_s, X_d forze tangenziali di interstriscia a sinistra e a destra
- E_a, E_b forze normali di interstriscia alla base ed alla sommità del pendio
- ΔX variazione delle forze tangenziali sulla striscia $\Delta X = X_d - X_s$
- ΔE variazione delle forze normali sulla striscia $\Delta E = E_d - E_s$

6.1 METODO DI BISHOP

Il coefficiente di sicurezza nel metodo di *Bishop* semplificato è espresso secondo la seguente formula:

$$F = \frac{\sum_i \left[\frac{c_i b_i + (N_i / \cos(\alpha_i) - u_i b_i) \tan(\phi_i)}{m} \right]}{\sum_i W_i \sin(\alpha_i)}$$

dove il termine m è espresso da:

$$m = \left(1 + \frac{\tan(\phi_i) \cdot \tan(\alpha_i)}{F} \right) \cos(\alpha_i)$$

in cui n è il numero delle strisce considerate, b_i e α_i sono la larghezza e l'inclinazione della base della striscia i -esima rispetto all'orizzontale, W_i è il peso della striscia i -esima, c_i e ϕ_i sono le caratteristiche del terreno (coesione ed angolo di attrito) lungo la base della striscia e u_i è la pressione neutra lungo la base della striscia.

L'espressione del coefficiente di sicurezza di *Bishop* semplificato contiene al secondo membro il termine m che è funzione di F .

Quindi, essa viene risolta per successive approssimazioni assumendo un valore iniziale per F da inserire nell'espressione di m ed iterare fin quando il valore calcolato coincide con il valore assunto.

6.2 VALUTAZIONE DEGLI SPOSTAMENTI CON IL METODO DI NEWMARK

La stima degli spostamenti è condotta applicando l'analisi semplificata con i

I metodo di *Newmark*.

Il metodo di *Newmark* permette di calcolare lo **spostamento residuo di una scarpata sottoposta a sisma**.

Secondo il metodo originario di *Newmark*, la valutazione dello spostamento permanente della superficie di scorrimento rispetto alla formazione di base, dovuto ad un evento sismico, viene ottenuto mediante doppia integrazione dell'equazione del moto.

L'integrazione dell'accelerazione $a(t)$ viene effettuata negli intervalli temporali nei quali essa supera l'accelerazione critica K_c . L'accelerazione critica viene determinata utilizzando i metodi pseudo statici dell'equilibrio limite e corrisponde al valore minimo per il quale il fattore di sicurezza è unitario ($F_s = 1$).

Nelle ipotesi di *Newmark* l'accelerazione $a(t)$ è assunta costante lungo la superficie di scorrimento, mentre l'accelerazione critica è assunta costante nel tempo.

Lo spostamento finale della superficie (*corpo di frana*) è ottenuto per sommatoria degli spostamenti parziali calcolati negli intervalli temporali sopra menzionati ($a(t) > K_c$).

Gli accelerogrammi utilizzati per il calcolo dello spostamento residuo secondo *Newmark* sono rappresentativi del sito oggetto di analisi, essendo il risultato dell'analisi di risposta sismica locale.

7 CONDIZIONI DI VERIFICA

Le verifiche di stabilità sono condotte per entrambi i paramenti di monte e di valle dello sbarramento in n. 3 sezioni riportate nella planimetria di Figura 1-1.

Le condizioni indagate prendono in considerazione le combinazioni di carico riportate nella Tabella 7-1.

Azioni	Combinazioni fondamentali			Eccezionale	Combinazioni sismiche ¹			
	Serbatoio vuoto	Rapido svaso	Esercizio normale	Massima piena	SLO	SLD	SLV	SLC
<i>Peso proprio</i>	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
<i>Spinta idrostatica</i>			SI ²	SI ³	SI	SI	SI	SI
<i>Sovraccarico sommità 2'000 kg/m²</i>	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
<i>Azione sismica</i>					SI	SI	SI	SI

Tabella 7-1 – Combinazioni di carico verifiche di stabilità

Per ciascuna sezione sono individuate n. 29 verifiche, di cui n. 13 per il paramento di valle e n. 16 per il paramento di monte:

- **Verifica 01:** verifica paramento di **valle**; verifica a lungo termine tensioni efficaci; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; senza sisma; serbatoio vuoto.
- **Verifica 02:** verifica paramento di **valle**; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; senza sisma; serbatoio vuoto.
- **Verifica 03:** verifica paramento di **valle**; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLO; serbatoio vuoto.
- **Verifica 04:** verifica paramento di **valle**; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLD; serbatoio vuoto.
- **Verifica 05:** verifica paramento di **valle**; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLV; serbatoio vuoto.
- **Verifica 06:** verifica paramento di **valle**; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLC; serbatoio vuoto.
- **Verifica 07:** verifica paramento di **valle**; verifica a lungo termine tensioni efficaci; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; senza sisma; invaso alla quota di massima regolazione.
- **Verifica 08:** verifica paramento di **valle**; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLO; invaso alla quota di massima regolazione.
- **Verifica 09:** verifica paramento di **valle**; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLD; invaso alla quota di massima regolazione.

¹ Eseguite nei casi di serbatoio pieno, serbatoio vuoto e rapido svaso (solo per il paramento di monte).

² Quota di massima regolazione pari a 185.7 m s.l.m..

³ Quota di massimo invaso per la portata di piena millenaria pari a 187.35 m s.l.m. (solo per il paramento di valle).

- **Verifica 10:** verifica paramento di **valle**; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLV; invaso alla quota di massima regolazione.
- **Verifica 11:** verifica paramento di **valle**; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLC; invaso alla quota di massima regolazione.
- **Verifica 12:** verifica paramento di **valle**; verifica a lungo termine tensioni efficaci; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; senza sisma; invaso alla quota di massima piena.
- **Verifica 13:** verifica paramento di **valle**; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; senza sisma; invaso alla quota di massima piena.
- **Verifica 14:** verifica paramento di **monte**; verifica a lungo termine tensioni efficaci; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; senza sisma; serbatoio vuoto.
- **Verifica 15:** verifica paramento di **monte**; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; senza sisma; serbatoio vuoto.
- **Verifica 16:** verifica paramento di **monte**; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLO; serbatoio vuoto.
- **Verifica 17:** verifica paramento di **monte**; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLD; serbatoio vuoto.
- **Verifica 18:** verifica paramento di **monte**; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLV; serbatoio vuoto.
- **Verifica 19:** verifica paramento di **monte**; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLC; serbatoio vuoto.
- **Verifica 20:** verifica paramento di **monte**; verifica a lungo termine tensioni efficaci; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; senza sisma; invaso alla quota di massima regolazione.
- **Verifica 21:** verifica paramento di **monte**; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLO; invaso alla quota di massima regolazione.
- **Verifica 22:** verifica paramento di **monte**; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLD; invaso alla quota di massima regolazione.
- **Verifica 22:** verifica paramento di **monte**; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLV; invaso alla quota di massima regolazione.
- **Verifica 24:** verifica paramento di **monte**; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLC; invaso alla quota di massima regolazione.
- **Verifica 25:** verifica paramento di **monte**; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; senza sisma; rapido svaso del serbatoio.
- **Verifica 26:** verifica paramento di **monte**; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLO; rapido svaso del serbatoio.

- **Verifica 27:** verifica paramento di **monte**; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLD; rapido svaso del serbatoio.
- **Verifica 28:** verifica paramento di **monte**; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLV; rapido svaso del serbatoio.
- **Verifica 29:** verifica paramento di **monte**; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLC; rapido svaso del serbatoio.

Inoltre è stata analizzata la stabilità della protezione in scogliera del paramento di monte, in corrispondenza della sezione CR_08. In totale sono individuate n. **16 verifiche**:

- **Verifica 01:** verifica paramento di monte; verifica a lungo termine tensioni efficaci; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; senza sisma; serbatoio vuoto.
- **Verifica 02:** verifica paramento di monte; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; senza sisma; serbatoio vuoto.
- **Verifica 03:** verifica paramento di monte; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLO; serbatoio vuoto.
- **Verifica 04:** verifica paramento di monte; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLD; serbatoio vuoto.
- **Verifica 05:** verifica paramento di monte; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLV; serbatoio vuoto.
- **Verifica 06:** verifica paramento di monte; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLC; serbatoio vuoto.
- **Verifica 07:** verifica paramento di monte; verifica a lungo termine tensioni efficaci; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; senza sisma; invaso alla quota di massima regolazione.
- **Verifica 08:** verifica paramento di monte; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLO; invaso alla quota di massima regolazione.
- **Verifica 09:** verifica paramento di monte; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLD; invaso alla quota di massima regolazione.
- **Verifica 10:** verifica paramento di monte; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLV; invaso alla quota di massima regolazione.
- **Verifica 11:** verifica paramento di monte; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLC; invaso alla quota di massima regolazione.
- **Verifica 12:** verifica paramento di monte; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; senza sisma; rapido svaso del serbatoio.
- **Verifica 13:** verifica paramento di monte; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m²; con sisma SLO; rapido svaso del serbatoio.

- **Verifica 14:** verifica paramento di monte; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m^2 ; con sisma SLD; rapido svasso del serbatoio.
- **Verifica 15:** verifica paramento di monte; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m^2 ; con sisma SLV; rapido svasso del serbatoio.
- **Verifica 16:** verifica paramento di monte; verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m^2 ; con sisma SLC; rapido svasso del serbatoio.

8 VERIFICHE DELLO STATO DI PROGETTO

Gli interventi volti a garantire la stabilità del corpo diga prevedono di **ridurre sia l'altezza dello sbarramento che la pendenza dei paramenti di monte e di valle.**

In particolare, si prevede di:

- **abbassare la quota del coronamento di circa 7.0 m** dalla quota di circa 150.06 m s.l.m. alla quota di 143.30 m s.l.m.;
- **realizzare un paramento di monte con pendenza 1:3.75** nel tratto compreso tra il fondo del serbatoio di progetto a 128.0 m s.l.m. e la sommità dello sbarramento **senza prevedere banche intermedie**;
- **realizzare una protezione del paramento di monte in scogliera**;
- **realizzare un paramento di valle con pendenza 1:4.25** in ogni tratto in cui è suddiviso il pendio compreso tra il piano campagna di progetto a 118.20 m s.l.m. e la sommità dello sbarramento. Sul paramento di valle **sono previste due banche**, la prima alla quota di 127.0 m s.l.m. e la seconda alla quota di 135.0 m s.l.m..

Nella Tabella 8-1 sono riassunti i risultati conseguiti dalle verifiche di stabilità eseguite per la sezione CR_04, nella Tabella 8-2 quelli ottenuti per la sezione CR_06 e nella Tabella 8-3 quelli determinati per la sezione CR_08.

La **sezione CR 06** è quella risultata **maggiormente critica**, ovvero la sezione CR 06 risulta contraddistinta da valori di sicurezza minori e spostamenti maggiori a parità di verifica.

Dall'analisi dei risultati si evince che **a seguito degli interventi il corpo diga rispetta i coefficienti di sicurezza previsti dal D.M. del 26 giugno 2014** in assenza di azioni sismiche.

Nelle condizioni sismiche per gli stati limite di esercizio (SLO e SLD) si verificano spostamenti complessivamente trascurabili.

Nelle condizioni sismiche per gli stati limite ultimi (SLV e SLC) si verificano spostamenti complessivamente contenuti.

Per gli **stati limite di operatività** gli spostamenti sono dell'ordine del centimetro, mentre per gli stati limite di danno gli **spostamenti massimi sono inferiori a 3 cm.**

Per gli **stati limite di salvaguardia della vita** lo **spostamento massimo** è pari a circa **27 cm** (*paramento di monte sezione CR_06 in condizioni di serbatoio vuoto e rapido svaso*), mentre per gli **stati limite di collasso** lo **spostamento massimo** è di circa **33 cm** (*paramento di monte sezione CR_06 in condizioni di serbatoio vuoto e rapido svaso*).

Nella Tabella 8-4 sono riassunti i risultati conseguiti dalle verifiche di stabilità eseguite per la protezione del paramento di monte in scogliera.

Dall'analisi dei risultati si evince che **la protezione in scogliera rispetta i coefficienti di sicurezza previsti dal D.M. del 26 giugno 2014** in assenza di azioni sismiche.

Nelle condizioni sismiche per gli stati limite di esercizio (SLO e SLD) si verificano piccoli spostamenti.

Nelle condizioni sismiche per gli stati limite ultimi (SLV e SLC) si verificano spostamenti complessivamente contenuti.

Per gli **stati limite di operatività** gli **spostamenti massimi** sono **inferiori a 2 cm**, mentre per gli **stati limite di danno** gli **spostamenti massimi** sono **inferiori a 3 cm**.

Per gli **stati limite di salvaguardia della vita** lo **spostamento massimo** è pari a **19 cm** (*condizioni di rapido svaso*), mentre per gli **stati limite di collasso** lo **spostamento massimo** è di circa **28 cm** (*condizioni di rapido svaso*).

I tabulati delle verifiche di stabilità della sezione CR_04 sono riportati nell'elaborato *ET.08a*, quelli delle verifiche della sezione CR_06 sono riportati nell'elaborato *ET.08b* e quelli delle verifiche della sezione CR_08 sono riportati nell'elaborato *ET.08c*. I tabulati delle verifiche di stabilità della protezione del paramento di monte in scogliera sono riportati nell'elaborato *ET.08d*.

n. [#]	Paramento	Cond. idrauliche	Sisma	Condizioni	Fs Bishop	Newmark			D.M. 2014
						Vel. max [m/s]	Spost. max [m]	Superficie [#]	γ_R
01	Valle	Invaso vuoto	Senza	Drenate	4.140	-	-	-	1.2
02	Valle	Invaso vuoto	Senza	Non drenate	4.192	-	-	-	1.1
03	Valle	Invaso vuoto	SLO	Non drenate	1.447	-	-	-	1.1
04	Valle	Invaso vuoto	SLD	Non drenate	1.021	0.000000	0.000000	1	
05	Valle	Invaso vuoto	SLV	Non drenate	0.536	0.031089	0.001181	1	
06	Valle	Invaso vuoto	SLC	Non drenate	0.564	0.041650	0.002960	1	
07	Valle	Esercizio	Senza	Drenate	4.140	-	-	-	1.2
08	Valle	Esercizio	SLO	Non drenate	1.442	-	-	-	1.1
09	Valle	Esercizio	SLD	Non drenate	1.018	0.000000	0.000000	1	
10	Valle	Esercizio	SLV	Non drenate	0.535	0.031295	0.001214	1	
11	Valle	Esercizio	SLC	Non drenate	0.563	0.041865	0.002998	1	
12	Valle	Max piena	Senza	Drenate	4.140	-	-	-	1.2
13	Valle	Max piena	Senza	Non drenate	4.193	-	-	-	1.1
14	Monte	Invaso vuoto	Senza	Drenate	2.021	-	-	-	1.2
15	Monte	Invaso vuoto	Senza	Non drenate	1.887	-	-	-	1.1
16	Monte	Invaso vuoto	SLO	Non drenate	0.930	0.000000	0.000000	1	
17	Monte	Invaso vuoto	SLD	Non drenate	0.712	0.001983	0.000026	15	
18	Monte	Invaso vuoto	SLV	Non drenate	0.386	0.091160	0.011271	219	
19	Monte	Invaso vuoto	SLC	Non drenate	0.406	0.109440	0.019765	205	
20	Monte	Esercizio	Senza	Drenate	2.407	-	-	-	1.2
21	Monte	Esercizio	SLO	Non drenate	1.121	-	-	-	1.1
22	Monte	Esercizio	SLD	Non drenate	0.830	0.000000	0.000000	1	
23	Monte	Esercizio	SLV	Non drenate	0.453	0.055010	0.004701	22	
24	Monte	Esercizio	SLC	Non drenate	0.475	0.073289	0.008391	29	
25	Monte	Rapido svaso	Senza	Non drenate	1.861	-	-	-	1.1
26	Monte	Rapido svaso	SLO	Non drenate	0.923	0.000000	0.000000	1	
27	Monte	Rapido svaso	SLD	Non drenate	0.712	0.003204	0.000061	72	
28	Monte	Rapido svaso	SLV	Non drenate	0.385	0.091105	0.011258	229	
29	Monte	Rapido svaso	SLC	Non drenate	0.405	0.109350	0.019728	232	

Tabella 8-1 – Verifiche di stabilità dello stato di progetto condotte secondo D.M. 26/06/2014 per la sezione CR_04

n. [#]	Paramento	Cond. idrauliche	Sisma	Condizioni	Fs Bishop	Newmark			D.M. 2014
						Vel. max [m/s]	Spost. max [m]	Superficie [#]	γ_R
01	Valle	Invaso vuoto	Senza	Drenate	2.309	-	-	-	1.2
02	Valle	Invaso vuoto	Senza	Non drenate	1.799	-	-	-	1.1
03	Valle	Invaso vuoto	SLO	Non drenate	0.754	0.009597	0.000361	2	
04	Valle	Invaso vuoto	SLD	Non drenate	0.577	0.022024	0.001609	19	
05	Valle	Invaso vuoto	SLV	Non drenate	0.321	0.149950	0.036715	214	
06	Valle	Invaso vuoto	SLC	Non drenate	0.337	0.167005	0.055804	193	
07	Valle	Esercizio	Senza	Drenate	2.160	-	-	-	1.2
08	Valle	Esercizio	SLO	Non drenate	0.751	0.009918	0.000377	3	
09	Valle	Esercizio	SLD	Non drenate	0.570	0.022368	0.001678	46	
10	Valle	Esercizio	SLV	Non drenate	0.314	0.150843	0.037331	252	
11	Valle	Esercizio	SLC	Non drenate	0.329	0.167953	0.056595	239	
12	Valle	Max piena	Senza	Drenate	2.159	-	-	-	1.2
13	Valle	Max piena	Senza	Non drenate	1.791	-	-	-	1.1
14	Monte	Invaso vuoto	Senza	Drenate	1.865	-	-	-	1.2
15	Monte	Invaso vuoto	Senza	Non drenate	1.244	-	-	-	1.1
16	Monte	Invaso vuoto	SLO	Non drenate	0.597	0.047946	0.011338	76	
17	Monte	Invaso vuoto	SLD	Non drenate	0.451	0.077085	0.028299	8	
18	Monte	Invaso vuoto	SLV	Non drenate	0.264	0.443165	0.272900	189	
19	Monte	Invaso vuoto	SLC	Non drenate	0.277	0.512483	0.334202	175	
20	Monte	Esercizio	Senza	Drenate	2.273	-	-	-	1.2
21	Monte	Esercizio	SLO	Non drenate	0.747	0.006130	0.000210	3	
22	Monte	Esercizio	SLD	Non drenate	0.563	0.018777	0.001005	11	
23	Monte	Esercizio	SLV	Non drenate	0.316	0.141472	0.030981	25	
24	Monte	Esercizio	SLC	Non drenate	0.331	0.158961	0.048516	24	
25	Monte	Rapido svaso	Senza	Non drenate	1.246	-	-	-	1.1
26	Monte	Rapido svaso	SLO	Non drenate	0.602	0.047430	0.011027	64	
27	Monte	Rapido svaso	SLD	Non drenate	0.452	0.076283	0.027500	8	
28	Monte	Rapido svaso	SLV	Non drenate	0.265	0.438714	0.267717	195	
29	Monte	Rapido svaso	SLC	Non drenate	0.278	0.508031	0.328551	176	

Tabella 8-2 – Verifiche di stabilità dello stato di progetto condotte secondo D.M. 26/06/2014 per la sezione CR_06

n. [#]	Paramento	Cond. idrauliche	Sisma	Condizioni	Fs Bishop	Newmark			D.M. 2014
						Vel. max [m/s]	Spost. max [m]	Superficie [#]	γ_R
01	Valle	Invaso vuoto	Senza	Drenate	2.021	-	-	-	1.2
02	Valle	Invaso vuoto	Senza	Non drenate	1.499	-	-	-	1.1
03	Valle	Invaso vuoto	SLO	Non drenate	0.645	0.025459	0.002298	9	
04	Valle	Invaso vuoto	SLD	Non drenate	0.502	0.044650	0.008424	27	
05	Valle	Invaso vuoto	SLV	Non drenate	0.294	0.235429	0.097730	59	
06	Valle	Invaso vuoto	SLC	Non drenate	0.307	0.304624	0.135347	55	
07	Valle	Esercizio	Senza	Drenate	1.874			-	1.2
08	Valle	Esercizio	SLO	Non drenate	0.644	0.025734	0.002352	9	
09	Valle	Esercizio	SLD	Non drenate	0.500	0.045185	0.008609	33	
10	Valle	Esercizio	SLV	Non drenate	0.292	0.239919	0.100299	65	
11	Valle	Esercizio	SLC	Non drenate	0.306	0.309040	0.138142	61	
12	Valle	Max piena	Senza	Drenate	1.874	-	-	-	1.2
13	Valle	Max piena	Senza	Non drenate	1.495	-	-	-	1.1
14	Monte	Invaso vuoto	Senza	Drenate	1.872	-	-	-	1.2
15	Monte	Invaso vuoto	Senza	Non drenate	1.367	-	-	-	1.1
16	Monte	Invaso vuoto	SLO	Non drenate	0.676	0.026371	0.002523	37	
17	Monte	Invaso vuoto	SLD	Non drenate	0.532	0.046379	0.009028	107	
18	Monte	Invaso vuoto	SLV	Non drenate	0.293	0.230262	0.094844	145	
19	Monte	Invaso vuoto	SLC	Non drenate	0.309	0.299726	0.132272	37	
20	Monte	Esercizio	Senza	Drenate	2.255	-	-	-	1.2
21	Monte	Esercizio	SLO	Non drenate	0.834	0.000863	0.000010	1	
22	Monte	Esercizio	SLD	Non drenate	0.633	0.008429	0.000298	38	
23	Monte	Esercizio	SLV	Non drenate	0.355	0.115800	0.019186	116	
24	Monte	Esercizio	SLC	Non drenate	0.372	0.133814	0.031686	117	
25	Monte	Rapido svaso	Senza	Non drenate	1.369	-	-	-	1.1
26	Monte	Rapido svaso	SLO	Non drenate	0.679	0.025901	0.002419	42	
27	Monte	Rapido svaso	SLD	Non drenate	0.528	0.045508	0.008721	116	
28	Monte	Rapido svaso	SLV	Non drenate	0.292	0.227016	0.093046	109	
29	Monte	Rapido svaso	SLC	Non drenate	0.305	0.296280	0.130120	117	

Tabella 8-3 – Verifiche di stabilità dello stato di progetto condotte secondo D.M. 26/06/2014 per la sezione CR_08

n. [#]	Paramento	Cond. idrauliche	Sisma	Condizioni	Fs Bishop	Newmark			D.M. 2014
						Vel. max [m/s]	Spost. max [m]	Superficie [#]	γ_R
01	Monte	Invaso vuoto	Senza	Drenate	1.871	-	-	-	1.2
02	Monte	Invaso vuoto	Senza	Non drenate	1.220	-	-	-	1.1
03	Monte	Invaso vuoto	SLO	Non drenate	0.593	0.055	0.016	1	
04	Monte	Invaso vuoto	SLD	Non drenate	0.452	0.075	0.027	1	
05	Monte	Invaso vuoto	SLV	Non drenate	0.301	0.168	0.050	1	
06	Monte	Invaso vuoto	SLC	Non drenate	0.316	0.180	0.067	1	
07	Monte	Esercizio	Senza	Drenate	2.005	-	-	-	1.2
08	Monte	Esercizio	SLO	Non drenate	0.834	0.001	0.000	-	
09	Monte	Esercizio	SLD	Non drenate	0.627	0.008	0.000	1	
10	Monte	Esercizio	SLV	Non drenate	0.351	0.107	0.016	1	
11	Monte	Esercizio	SLC	Non drenate	0.368	0.125	0.027	1	
12	Monte	Rapido svaso	Senza	Non drenate	1.194	-	-	-	1.1
13	Monte	Rapido svaso	SLO	Non drenate	0.602	0.046	0.010	1	
14	Monte	Rapido svaso	SLD	Non drenate	0.450	0.076	0.027	1	
15	Monte	Rapido svaso	SLV	Non drenate	0.207	0.368	0.190	1	
16	Monte	Rapido svaso	SLC	Non drenate	0.222	0.472	0.283	1	

Tabella 8-4 – Verifiche di stabilità dello stato di progetto condotte secondo D.M. 26/06/2014