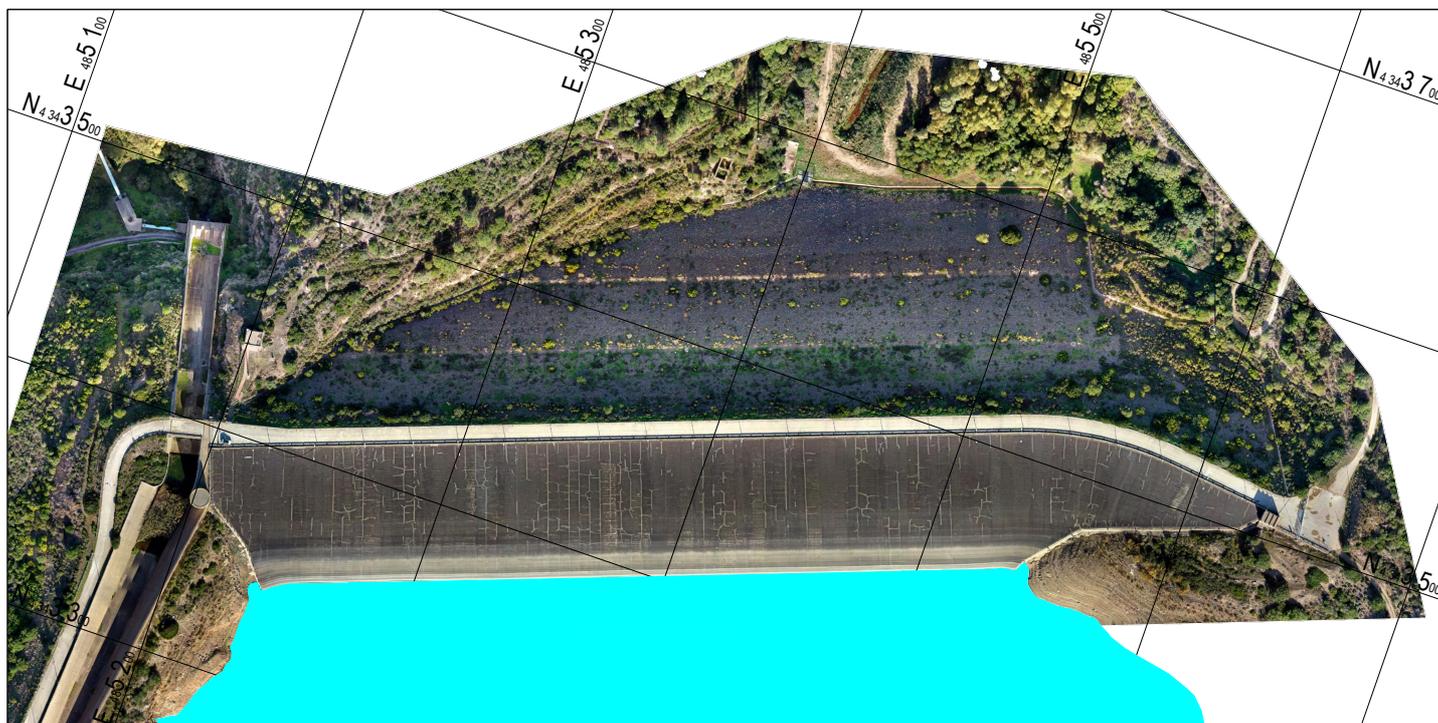




MEDAU

Intervento di ripristino del paramento di monte e della diga secondaria ed integrazione dello schermo di tenuta - Cig 82861868FF - Cup:E73E19002460001



FATTIBILITA' TECNICA - ECONOMICA

Relazione TECNICA Vol. 2 di 13

Tav./Elab. **E.02**

Rev. **F**

2 0 0 G E N R S P 0 0 1 F 19 Mar 2022
sezione - sub-sezione - tipo - ufficio - prog. n° - serie - rev. data

Il Progettista



**Ingegnere Progettista e Responsabile dell'Integrazione
tra le varie Prestazioni Specialistiche**

Dott. Ing. Antonio Brasca
Ordine degli ingegneri di Roma - Iscr. n° 19574 sez. A

Sicurezza in fase di Progettazione

Arch. Andrea Serafini
Ordine degli Architetti della Provincia di Roma -
n° 13448

Geologia

Dott. Andrea Cona
Ordine degli Geologi della Toscana - n° 795

**Il Direttore del Servizio Opere Idriche
e Idrogeologiche - RUP**
Ing. Costantino Azzena

Marzo 2022

INDICE

VOLUME	TITOLO
1 di 13	Relazione GENERALE
2 di 13	Relazione TECNICA
3 di 13	Relazione CAMPO PROVE
4 di 13	Relazione INDAGINI
5 di 13	Elaborati GRAFICI
6 di 13	Prime INDICAZIONI e disposizioni per la stesura dei PIANI della SICUREZZA
7 di 13	Calcolo Sommario della Spesa e QUADRO ECONOMICO
8 di 13	CRONO PROGRAMMA dell'intervento
9 di 13	Documento di FATTIBILITÀ delle ALTERNATIVE Progettuali
10 di 13	Studio Preliminare AMBIENTALE
11 di 13	Studio di INSERIMENTO URBANISTICO
12 di 13	Relazioni di INCIDENZA
13 di 13	Piano Preliminare UTILIZZO TERRE in Sito

<i>Paragrafo</i>	<i>Titolo</i>	<i>Pag.</i>
1	CONTENUTO	1
1.1	INTRODUZIONE.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
1.2	SCOPO dell'INCARICO	Errore. Il segnalibro non è definito.
1.3	CONTENUTO del PRESENTE ELABORATO	2
2	DEVIAZIONE delle ACQUE.....	3
2.1	INTRODUZIONE.....	3
2.2	OPERE ESISTENTI	3
2.3	PORTATE di DEVIAZIONE	4
2.4	DEVIAZIONE delle ACQUE.....	5
2.4.1	INTRODUZIONE	5
2.4.2	AVANDIGA	6
2.4.3	SARICO di ESAURIMENTO	6
2.4.4	SOGLIA SFIORANTE	7
3	SCHERMO IMPERMEABILE della FONDAZIONE	9
3.1	INTRODUZIONE.....	9
3.2	OBIETTIVI INTEGRAZIONE dello SCHERMO DI TENUTA	9
3.3	CALCOLI di FILTRAZIONE	10
3.3.1	METODOLOGIA	10
3.3.2	SCHERMO ESISTENTE.....	11
3.3.3	PROLUNGAMENTO SCHERMO ESISTENTE (100m).....	14
3.3.4	MIGLIORAMENTO DELLO SCHERMO ESISTENTE	16
3.3.5	BULBO di INIEZIONE.....	18
3.3.6	DIAFRAMMA (30m).....	21
3.4	CONCLUSIONI.....	24

<i>Lista delle Figure</i>	<i>pag.</i>
<i>Figura 2.2.1: Avandiga (durante la costruzione)</i>	3
<i>Figura 5.1.2: Scarico di Fondo, (foto a sinistra) Tubazione 500mm; (foto destra) Volantino saracinesca</i>	4
<i>Figura 2.4.1: AVANDIGA, Riabilitazione e Rialzo</i>	6
<i>Figura 2.4.2: Tubazione di esaurimento, Scala di deflusso</i>	7
<i>Figura 2.4.3: Soglia Sfiante scarico di fondo, Scala di deflusso</i>	8
<i>Figura 3.3.1: Schermo Esistente (quota invaso 146.7 m slm) - Modello di calcolo</i>	12
<i>Figura 3.3.2: Schermo Esistente (quota invaso 146.7 m slm) - Modello di calcolo - Dettaglio</i>	13
<i>Figura 3.3.3: Schermo Esistente (quota invaso 146.7 m slm) - Carico Totale</i>	13
<i>Figura 3.3.4: Analisi di riferimento (quota invaso 146.7 m slm) - Gradiente idraulico</i>	13
<i>Figura 3.3.5: Prolungamento schermo esistente 100 m (quota invaso 146.7 m slm) - Modello di calcolo</i>	14
<i>Figura 3.3.6: Prolungamento schermo esistente 100 m (quota invaso 146.7 m slm) - Modello di calcolo - Dettaglio</i>	15
<i>Figura 3.3.7: Prolungamento schermo esistente 100 m (quota invaso 146.7 m slm) - carichi totali</i>	15
<i>Figura 3.3.8: Prolungamento schermo esistente 100 m (quota invaso 146.7 m slm) - Gradiente idraulico</i>	15
<i>Figura 3.3.13: Sezione trasversale schermo integrativo</i>	16
<i>Figura 3.3.14: Pianta schermo integrativo</i>	16
<i>Figura 3.3.15: Miglioramento schermo esistente $k=2E-08$ m/s (quota invaso 146.7 m slm) - Modello di calcolo</i>	17
<i>Figura 3.3.16: Miglioramento schermo esistente $k=2E-08$ m/s (quota invaso 146.7 m slm) - Dettaglio</i>	17
<i>Figura 3.3.17: Miglioramento schermo esistente $k=2E-08$ m/s (quota invaso 146.7 m slm) - Carico Totale</i>	18
<i>Figura 3.3.18: Miglioramento schermo esistente $k=2E-08$ m/s (quota invaso 146.7 m slm) - Gradiente idraulico</i>	18
<i>Figura 3.3.15: Pianta bulbo integrativo</i>	19
<i>Figura 3.3.16: Bulbo (quota invaso 146.7 m slm) - Modello di calcolo</i>	20
<i>Figura 3.3.17: Bulbo (quota invaso 146.7 m slm) - Modello di calcolo - Dettaglio</i>	20
<i>Figura 2.3.3: Bulbo (quota invaso 146.7 m slm) - Risultato analisi di filtrazione - Total head</i>	21
<i>Figura 2.3.3: Bulbo (quota invaso 146.7 m slm) - Risultato analisi di filtrazione - Gradiente idraulico</i>	21
<i>Figura 3.3.9: Diaframma 30 m (quota invaso 146.7 m slm) - Modello di calcolo</i>	22
<i>Figura 3.3.10: Diaframma 30 m (quota invaso 146.7 m slm) - Modello di calcolo - Dettaglio</i>	22
<i>Figura 3.3.11: Diaframma 30 m (quota invaso 146.7 m slm) - Carichi Totali</i>	23
<i>Figura 3.3.12: Diaframma 30 m (quota invaso 146.7 m slm) - Gradiente idraulico</i>	23

<i>Lista delle Tabelle</i>	<i>pag.</i>
<i>Tabella 2.3.1: Portate al colmo per assegnato tempo di ritorno calcolate con i vari metodi</i>	4
<i>Tabella 2.3.2: Portate al colmo per assegnato tempo di ritorno calcolate per il periodo secco</i>	5
<i>Tabella 3.3.1: Schermo Esistente (quota invaso 146.7 m slm) - Caratteristiche materiali</i>	12
<i>Tabella 3.3.2: Prolungamento schermo esistente 100 m (quota invaso 146.7 m slm) - Caratteristiche materiali</i>	14
<i>Tabella 3.3.4: Miglioramento schermo esistente $k=2E-08$ m/s (quota invaso 146.7 m slm) - Caratteristiche materiali</i>	17
<i>Tabella 3.3.4: Bulbo (quota invaso 146.7 m slm) - Caratteristiche idrauliche dei materiali</i>	20
<i>Tabella 3.3.3: Diaframma 30 m (quota invaso 146.7 m slm) - Caratteristiche idrauliche dei materiali</i>	22
<i>Tabella 3.4.1: Risultati delle analisi di filtrazione</i>	24

DICHIARAZIONE DI ESCLUSIONE DI RESPONSABILITÀ

Le Società Studio Ing. G. Pietrangeli s.r.l. (SP) sottolinea che varie sezioni di questo rapporto si basano su dati forniti da o provenienti da fonti di terze parti. SP non si assume alcuna responsabilità per perdite o danni subiti dal cliente o da terzi a causa di errori o inesattezze in tali dati.

1 CONTENUTO

1.1 INTRODUZIONE

Il presente elaborato è stato redatto in conformità allo schema di contratto di Appalto per " AFFIDAMENTO DELLE ATTIVITÀ DI SERVIZI DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA PER LA PROGETTAZIONE DI FATTIBILITÀ TECNICO-ECONOMICA, ESECUTIVA, DIREZIONE DEI LAVORI E COORDINAMENTO DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE ED ESECUZIONE AFFERENTE ALL'INTERVENTO DENOMINATO "MEDAU ZIRIMILIS (7D.S3): INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PARAMENTO DI MONTE DELLA DIGA PRINCIPALE E DELLA DIGA SECONDARIA ED INTEGRAZIONE DELLO SCHERMO DI TENUTA", CON INCARICO OPZIONALE PER DIREZIONE DEI LAVORI E ASSISTENZA AL COLLAUDO, PROVE DI ACCETTAZIONE, CONTABILITÀ DEI LAVORI, COORDINAMENTO DELLA SICUREZZA IN ESECUZIONE" entrato in forza con verbale del 13 Novembre 2020.

1.2 STUDIO di FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA

L'art. 3 dello Schema di Contratto di Appalto, così recita

"1. Il contratto ha ad oggetto l'incarico professionale relativo ai servizi di cui in premessa e di seguito indicati:

- *Prestazioni principali*
 - *Progettazione di fattibilità tecnica ed economica comprensiva del documento di fattibilità delle alternative progettuali (articolo 3, comma 1, lettera ggggg-quater del D.Lgs. 50/2016) dell'intero compendio delle opere, che individui nel dettaglio i due stralci previsti:*
 - *(I° stralcio) "Intervento di ripristino del paramento di monte della diga principale e integrazione dello schermo di tenuta";*
 - *(II° stralcio) "Intervento di ripristino del paramento di monte della diga secondaria" ;*
 - *progettazione esecutiva e prestazioni inerenti la sicurezza in fase di progettazione, ex D. Lgs. 81/2008, per l' "Intervento di ripristino del paramento di monte della diga principale e integrazione dello schermo di tenuta" (I° stralcio)*
 - *progettazione esecutiva e prestazioni inerenti la sicurezza in fase di progettazione, ex D. Lgs. 81/2008, per l' "Intervento di ripristino del paramento di monte della diga secondaria" (II° stralcio)"*

Inoltre, come attività opzionale:

*"Direzione dei lavori, assistenza al collaudo, prove di accettazione, contabilità dei lavori, prestazioni inerenti la sicurezza in fase di esecuzione, ex D. Lgs. 81/2008, dell' "Intervento di ripristino del paramento di monte della diga principale e integrazione dello schermo di tenuta" (I° stralcio);
Direzione dei lavori, assistenza al collaudo, prove di accettazione, contabilità dei lavori, coordinamento della sicurezza in esecuzione dell'Intervento di ripristino del paramento di monte della diga secondaria (II° stralcio)."*

1.3 CONTENUTO del PRESENTE ELABORATO

Il presente elaborato, che fa parte dello studio di Fattibilità Tecnica – Economica, contiene la relazione tecnica degli interventi di deviazione temporanea delle acque e i calcoli di filtrazione della fondazione della diga a seconda delle alternative studiate.

Il rapporto è suddiviso nei seguenti capitoli:

- OPERE di DEVIAZIONE delle ACQUE

In questo capitolo è illustrato lo schema di deviazione delle acque durante la costruzione, nonché i relativi calcoli idraulici eseguiti per il dimensionamento delle opere di deviazione.

- SCHEMA delle INIEZIONI

In questo capitolo sono illustrati i calcoli di filtrazione nella fondazione della diga in relazione alle diverse alternative dello schema integrativo delle iniezioni tra i conci n. 10 e 30 della galleria di ispezione della diga.

2 DEVIAZIONE delle ACQUE

2.1 INTRODUZIONE

Le opere di deviazione delle acque, che verranno realizzate per eseguire gli interventi di ripristino per piena funzionalità della diga, utilizzeranno parzialmente opere già esistenti.

La deviazione delle acque avverrà utilizzando le seguenti opere esistenti:

- L'AVANDIGA, riabilita e rialzata
- La TUBAZIONE di ESAURIMENTO per le basse portate (minori di 2 m³/s circa);
- La SOGLIA LIBERA di sfioro dello scarico di fondo per portate tra 2 m³/s e 20 m³/s.

2.2 OPERE ESISTENTI

Durante la costruzione dell'opera il sistema di deviazione delle acque era costituito da:

- AVANDIGA di MONTE

Le principali caratteristiche sono di seguito riportate:

- 118 m s.l. quota di coronamento;
- 260 m Sviluppo coronamento;
- 4 m Larghezza coronamento;
- 1 /2.5 *V/O* Pendenza paramento monte e valle

La tenuta era garantita da fogli di polietilene stesi sul paramento di monte.

- TUNNEL di SCARICO

Durante la costruzione della diga e delle opere ausiliari è stato utilizzato come via d'acqua per la deviazione il tunnel dello scarico di fondo. La quota di derivazione del manufatto di imbocco durante la costruzione era a quota 106.5 m s.l., successivamente, a fine costruzione, venne realizzato il torrino presidiato da griglie con la soglia sfiorante a quota 117.0 m s.l..

La figura sottostante mostra l'avandiga e il tunnel di deviazione:

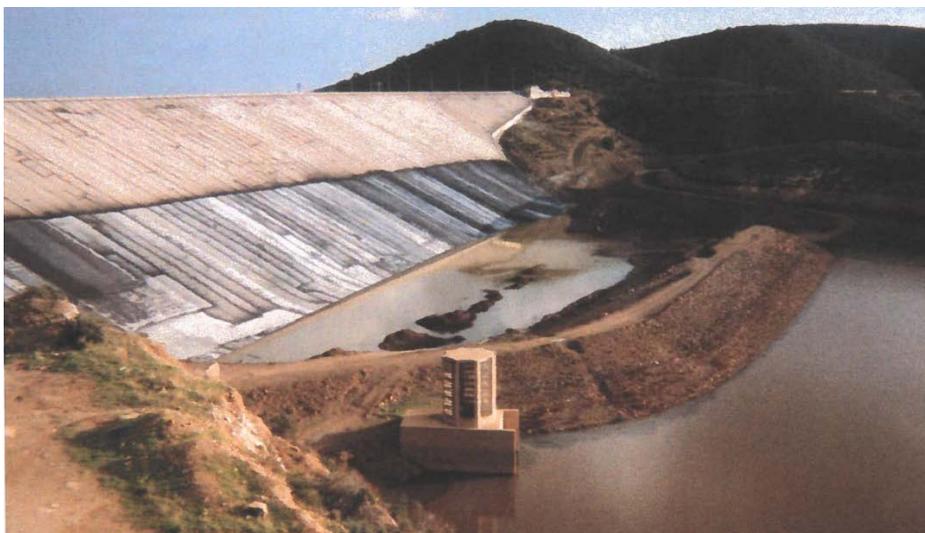


Figura 2.2.1: Avandiga (durante la costruzione)

Sulla base della relazione generale della perizia dei lavori integrativi sulle fondazioni del 1997 dell'Ing. Beretta risulta che:

“Nel frattempo, l'impresa completava i lavori dello scarico di fondo con la costruzione del torrino di imbocco che elevava la quota di minimo vaso a 117.00. Tuttavia, per motivi di sicurezza veniva disposto nel getto una tubazione del diam. di 500 mm. che dava la possibilità di tenere il livello del serbatoio, compatibilmente con la possibilità di scarico delle portate in arrivo, intorno a quota 106.50. È stato anche realizzato un ampio taglio trasversale dell'avandiga, per portare l'invaso a contatto con il paramento di monte della diga stessa.”

Dalle informazioni ricevute dal gestore questa tubazione risulta essere presidiata da una saracinesca comandata da un volantino posta circa a quota 117.0 m s.l., come si può osservare anche nella foto seguente.

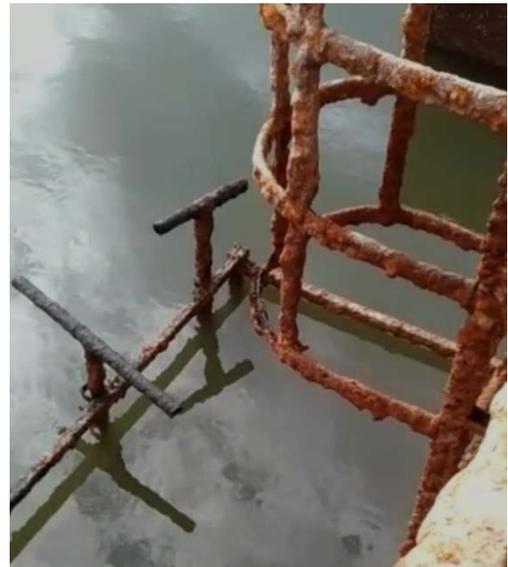
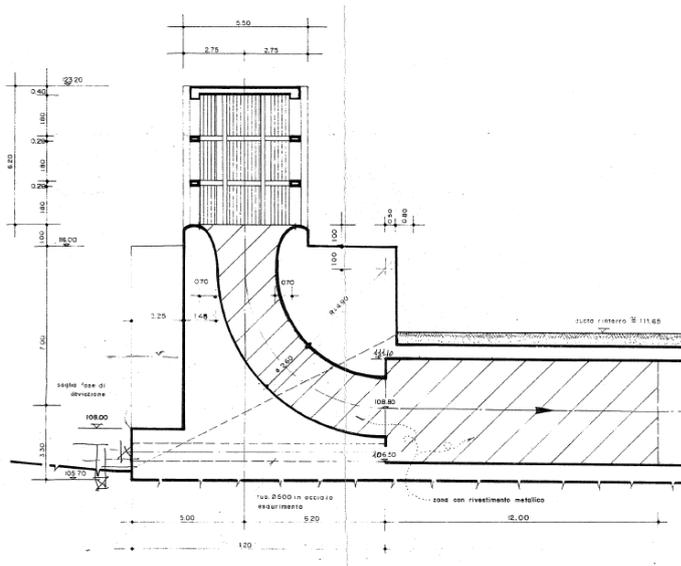


Figura 2.2.2: Scarico di Fondo, (foto a sinistra) Tubazione 500mm; (foto destra) Volantino saracinesca

2.3 PORTATE di DEVIAZIONE

Sulla base delle considerazioni e dei calcoli riportati nel documento 200GENRSP001, vol. 4 di 12 (Relazioni Indagini), risulta che le portate di piena, considerando l'intero anno idrologico, sono:

		Q _{piena} (T _r)				
		T _r				
		2	5	10	15	20
Metodo	u.m.					
Lazzari modificato (VAPI)	m ³ /s	11.05	19.34	25.90	29.97	32.98
Lazzari et al. 2000	m ³ /s	8.11	17.36	25.83	31.50	35.87
TCEV	m ³ /s	10.45	21.00	35.21	44.24	50.63
Metodo Razionale	m ³ /s	15.66	36.90	56.49	69.81	81.03

Tabella 2.3.1: Portate al colmo per assegnato tempo di ritorno calcolate con i vari metodi

Dall'analisi si evince che i valori di portata di piena determinati con i diversi metodi restituiscono valori simili. Ad ogni modo si ritiene che il metodo razionale, tenendo conto di una più ampia gamma di parametri

caratteristici degli aspetti geomorfologici e idrogeologici del bacino in esame, fornisce tra i vari metodi, valori della portata di piena più affidabili.

Se si considera invece la stagione di secca, cioè tra Aprile e Ottobre, le portate di piena per i diversi tempi di ritorno sono:

		Q _{piena} (T _r)				
		T _r				
		2	5	10	15	20
Metodo	u.m.					
Metodo Razionale	m ³ /s	2.22	11.39	15.66	17.15	18.88

Tabella 2.3.2: Portate al colmo per assegnato tempo di ritorno calcolate per il periodo secco

2.4 DEVIAZIONE delle ACQUE

2.4.1 INTRODUZIONE

Durante la realizzazione degli interventi sul manto bituminoso e dello schermo impermeabile dovrà essere mantenuto all'asciutto il piede di monte della diga.

La deviazione delle acque dovrà garantire un'adeguata sicurezza al personale che opererà nelle aree di lavoro.

Come portata di progetto per la deviazione viene assunto circa 20 m³/s pari a 20 anni di tempo di ritorno, considerando che gli interventi nella parte bassa del serbatoio potranno essere svolti nel periodo tra Aprile e Ottobre.

La deviazione delle acque avverrà utilizzando:

- L'AVANDIGA ESISTENTE

L'avandiga sarà RIALZATA e RIABILITATA, in particolare:

- rialzando il coronamento fino alla quota di 119.0 m s.l.;
- giustapponendo sul paramento di monte una MEMBRANA impermeabile in PVC o BITUMINOSA;
- TUBAZIONE di ESAURIMENTO
Le basse portate (minori di 2 m³/s circa) defluiranno attraverso la tubazione di esaurimento esistente che ha un diametro di 500 mm. La saracinesca dovrà essere sempre lasciata in posizione aperta durante tutte le fasi di costruzione;
- SOGLIA LIBERA
Le portate superiori a 2 m³/s defluiranno attraverso la soglia libera di sfioro dello scarico di fondo posta a quota 117.0 m s.l.

Il disegno 235 GEN D SP 001A - AVANDIGA, RIABILITAZIONE E RIALZO mostra la sezione tipica dell'avandiga.

2.4.2 AVANDIGA

Le condizioni dell'avandiga sono scarsamente desumibili dalla documentazione esistente e comunque non verificabili, poiché l'avandiga è attualmente sommersa.

Come riportato nei paragrafi precedenti, l'avandiga risulta essere stata parzialmente demolita, avendo creato una breccia lungo il coronamento. L'elemento di tenuta impermeabile (fogli in polietilene) è presumibilmente non più idoneo allo scopo.

Sulla base di queste informazioni la struttura dovrà essere riabilitata:

1. ricostituendo la geometria della diga e alzando il coronamento fino a quota 119 m s.l.
La quota di 119.0 m s.l. è stata selezionata per avere un franco di 1 m sopra il livello dell'acqua per un evento di piena, nel periodo Maggio-Ottobre, con un tempo di ritorno di 20 anni.
2. installando dei teli in PVC sul paramento di monte.

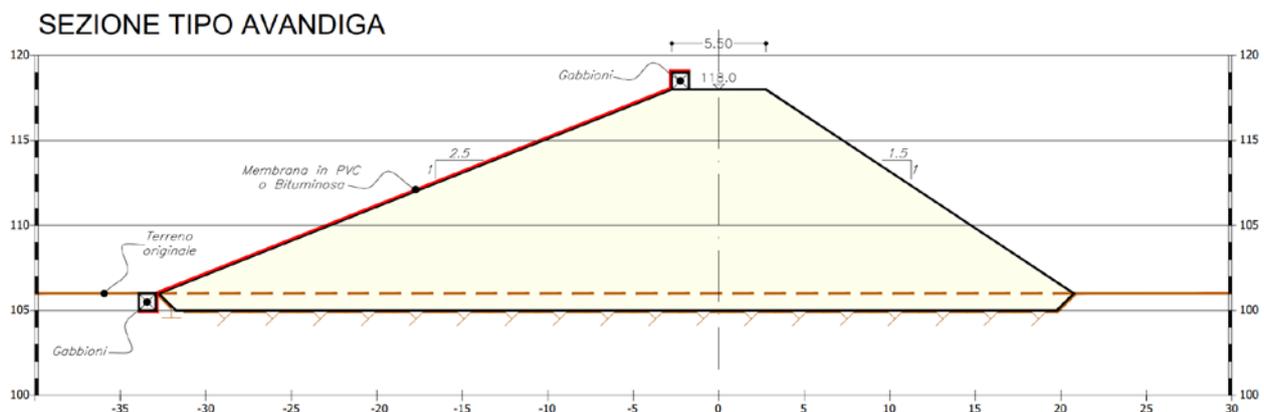


Figura 2.4.1: Avandiga, Riabilitazione e Rialzo

2.4.3 SARICO di ESAURIMENTO

A quota 106.5 m s.l. è inghisata all'interno della struttura del torrino di presa una tubazione in acciaio di diametro 500mm, lunga circa 11m che scarica direttamente nella galleria dello scarico di fondo. Questa tubazione risulta essere presidiata da una saracinesca comandata da un volantino a quota 117.0 m s.l.

Sulla base dei calcoli idraulici eseguiti è stata costruita la scala di deflusso della tubazione con saracinesca aperta. Dalla figura seguente si evince che alla quota di 117 m s.l., cioè un metro al disotto del coronamento dell'avandiga esistente, la portata evacuabile è di circa 2 m³/s.

Nella fase di ricostruzione dell'avandiga e relativo posizionamento dei teli in PVC o Bituminosi, la tubazione di esaurimento dovrà essere mantenuta aperta in modo da svuotare completamente il serbatoio nella stagione di secca e consentire le sopramenzionate lavorazioni.

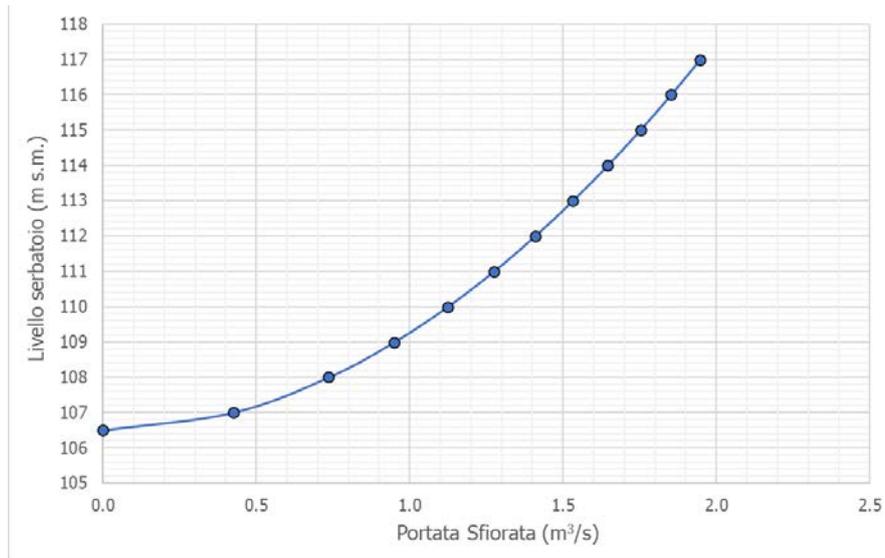


Figura 2.4.2: Tubazione di esaurimento, Scala di deflusso

2.4.4 SOGLIA SFIORANTE

Per poter eseguire le lavorazioni di riabilitazione della diga (manto e iniezione) in sicurezza, si è considerato una portata di progetto di circa 20m³/s.

Per poter evacuare questa portata è necessario che agisca la soglia sfiorante dello scarico di fondo.

L'imbocco dello scarico di fondo è costituito da una soglia sfiorante circolare con un raggio pari a 2 m e con soglia a quota 117.0.

La formulazione adottata per ottenere la scala di deflusso in condizioni di sfioro a luce libera è quella tipica di uno stramazzone circolare in parete sottile, ovvero:

$$Q = \mu \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{sf} \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{3/2}$$

dove:

- o Q rappresenta la portata sfiorata;
- o μ rappresenta il coefficiente di efflusso;
- o r_{sf} rappresenta il raggio dello sfioratore;
- o h rappresenta il carico sullo sfioratore.

Il funzionamento sotto battente dello sfioratore a calice è stato verificato mediante la scala di deflusso ottenuta attraverso la determinazione delle portate di saturazione, ovvero le portate defluenti sotto battente nella sezione terminale del pozzo, a valle del gomito, in corrispondenza dell'ingresso nella galleria sub-orizzontale di scarico.

La formulazione adottata, comprensiva delle perdite di carico nel gomito di collegamento tra il pozzo e la galleria di scarico e delle perdite di carico distribuite lungo il pozzo stesso è riportata di seguito.

$$\frac{Q_{st}^2}{1.805g\eta\mu_{bt}^2\pi^2} = r_p^4 \left[A_p + h_{st} - 0.975r_p - \frac{Q_{st}^2(A_p - 0.975r_p)}{2^{-4/3}k^2\pi^2r_p^{16/3}} \right]$$

dove:

- Q_{st} rappresenta la portata defluente sotto battente;
- h_{st} rappresenta il carico di saturazione sullo sfioratore;
- η rappresenta il coefficiente di rendimento che tiene conto delle perdite di carico nel gomito;
- μ rappresenta il coefficiente di deflusso sotto battente da determinare sperimentalmente (assunto pari a 0.9);
- A_p rappresenta l'altezza del pozzo;
- r_p rappresenta il raggio del pozzo, pari ad 1.3 m;
- k rappresenta il coefficiente di Strickler che tiene conto delle perdite distribuite lungo il pozzo.

Il punto di intersezione fra le due scale di deflusso rappresenta il punto di saturazione, in corrispondenza del quale si verifica l'ingolfamento dello sfioratore a calice. Nel grafico di seguito riportato, si osserva che tale condizione ha luogo quando il livello d'acqua del serbatoio raggiunge i 118.9 m.s.m. e la portata scaricata è pari a circa 54 m³/s.

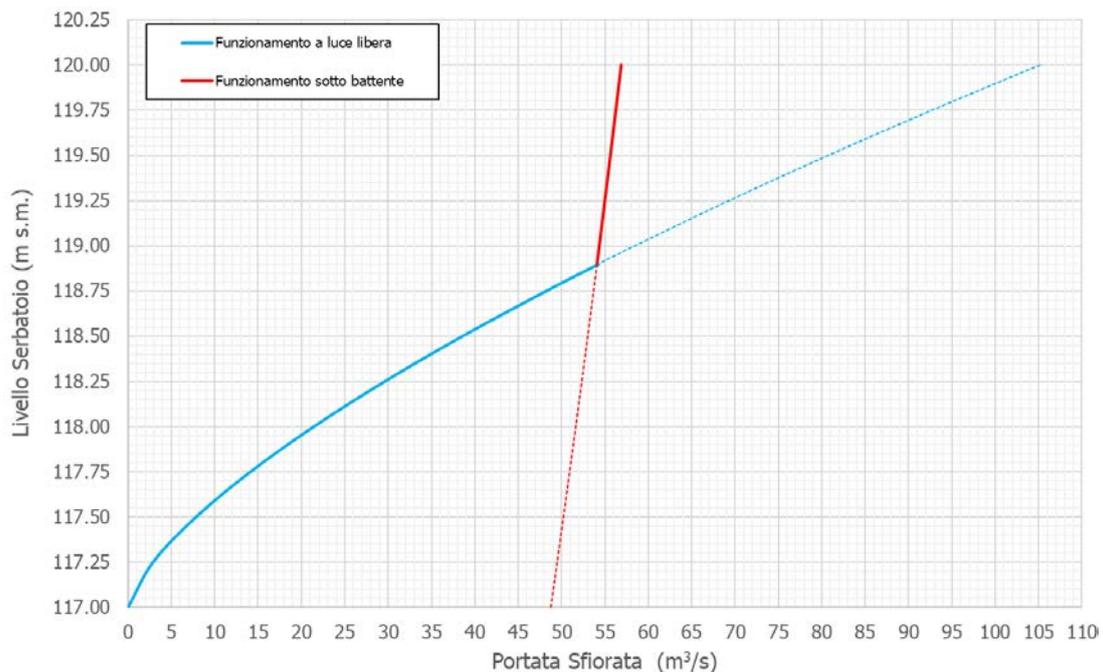


Figura 2.4.3: Soglia Sfiorante scarico di fondo, Scala di deflusso

Dal grafico si evince che per deviare 20 m³/s si deve stabilire un battente d'acqua di 1 m sulla soglia, pertanto il livello risulterebbe pari a 118.0 m s.l.

3 SCHERMO IMPERMEABILE della FONDAZIONE

3.1 INTRODUZIONE

Il presente capitolo illustra i calcoli di filtrazione adottati per le seguenti configurazioni studiate:

- o Schermo esistente;
- o Prolungamento schermo esistente (100 m);
- o Miglioramento Permeabilità dello schermo esistente;
- o Bulbo di iniezione;
- o Diaframma (30 m).

3.2 OBIETTIVI INTEGRAZIONE dello SCHERMO DI TENUTA

Come definito nel Documento di Indirizzo alla Progettazione (paragrafo 2.1.2) lo scopo dell'intervento di integrazione dello schermo di tenuta nella zona centrale della diga è: *"mantenere la stabilità dell'opera nei confronti del rischio di piping (erosione sotterranea) [...] l'approccio progettuale dovrà focalizzare l'attenzione sulla limitazione del valore del gradiente d'efflusso, sviluppando le alternative per il miglioramento dell'attuale schermo tramite nuove iniezioni opportunamente studiate in grado di diminuire la permeabilità attuale della zona trattata, pari a $2 \cdot 10^{-7}$ m/s, ad un valore almeno pari al 10% del valore attuale (ovvero con l'obiettivo finale di $2 \cdot 10^{-8}$ m/s)".*

A tal proposito il Documento di Indirizzo alla Progettazione fa esplicito riferimento alla relazione del 2003 redatta dal prof. Miliziano. I principali elementi e conclusioni di questa relazione sono richiamati di seguito:

- o Coefficiente di sicurezza rispetto al piping

La valutazione del coefficiente di sicurezza rispetto al fenomeno di *piping* è difficilmente ottenibile in via analitica. La strategia adottata nella suddetta relazione è quindi di tipo osservazionale e si basa sull'esame del comportamento dell'opera.

Nella situazione di riferimento, ossia:

- o 123 m slm quota di invaso
- o $2E-6$ m/s permeabilità ammasso
- o $2E-7$ m/s permeabilità schermo
- o 50 m profondità schermo

il gradiente di efflusso massimo (calcolato subito a valle del cunicolo di ispezione) risulta essere pari a 0.45. Tale valore è considerato ragionevolmente sicuro rispetto al fenomeno di *piping* in quanto, durante gli invasi sperimentali e in presenza di tale gradiente, non sono stati osservati fenomeni erosivi, aumento di torbidità nelle acque di filtrazione, assestamenti etc.

- o Gradiente massimo in corrispondenza della quota massima di invaso

Lasciando invariato la geometria e le caratteristiche dello schermo attuale, con il raggiungimento della

quota massima di invaso (i.e. 146 m slm) il gradiente massimo raddoppierebbe. Con un gradiente prossimo all'unità *"non si avrebbero garanzie sufficienti nei riguardi dei fenomeni erosivi"*, di conseguenza il progetto di miglioramento delle condizioni di tenuta dello schermo deve essere idoneo a *"consentire il mantenimento, o meglio, la riduzione del gradiente massimo presente nella situazione di riferimento allorquando la quota d'invaso raggiunga il massimo livello previsto"*.

o Possibili strategie progettuali

Le possibili strategie progettuali investigate nella relazione del prof. Miliziano per raggiungere gli obiettivi di cui sopra sono:

- o Migliorare l'attuale schermo tramite iniezioni opportunamente studiate in grado di diminuire la permeabilità della zona trattata da 2E-7 a 2E-8 m/s
- o Realizzare, immediatamente a monte dello schermo attuale un diaframma in calcestruzzo bentonitico dello spessore di 1,2 m per una profondità di 30 m.

Entrambi gli interventi, da un punto di vista numerico, permettono di raggiungere gli obiettivi relativi al massimo gradiente ammissibile (0.45). Il secondo intervento, ossia il diaframma in calcestruzzo bentonitico, è considerato più affidabile in quanto *"tecnicamente da le maggiori garanzie di riuscita"*. Non risulta efficace invece l'ipotesi di raddoppiare la lunghezza dello schermo esistente mantenendo una permeabilità pari a quella dello schermo attuale (i.e. 2E-7 m/s).

3.3 CALCOLI di FILTRAZIONE

3.3.1 METODOLOGIA

Le analisi di filtrazione sono state eseguite con il PHASE2, software 2-dimensionale agli elementi finiti in grado di eseguire analisi di filtrazione agli elementi finiti in condizioni stazionarie o non-stazionarie per condizioni sature o parzialmente sature.

In particolare, le verifiche eseguite per il DOC.F.A.P. sono state eseguite in condizioni stazionarie sulla base della:

- o la geometria della diga principale;
- o le proprietà idrauliche dei materiali (cioè la permeabilità idraulica);
- o le condizioni idrauliche al contorno.

I materiali costituenti il corpo diga e la fondazione sono stati assunti come omogenei e isotropi. Il moto di filtrazione, in condizioni stazionarie, è descritto dall'equazione di Laplace

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0$$

dove H è il carico idraulico totale.

Al fine di risolvere il problema di filtrazione (ovvero determinare la distribuzione della portata e della pressione all'interno del modello), l'analisi agli elementi finiti richiede la definizione delle funzioni di permeabilità dei materiali.

Questo può essere fatto definendo:

- o la permeabilità in condizioni sature K_s
- o modello che descrive il comportamento del materiale in condizioni di parziale saturazione

I seguenti modelli sono implementati in PHASE2 per descrivere la permeabilità nella zona non satura come funzione della suzione:

- o Brooks and Corey
- o Fredlund and Xing
- o Gardner
- o Simple
- o van Genuchten

Nelle analisi di filtrazione riportate di seguito, per tutti i materiali è la funzione di permeabilità p stata definita usando il modello "Simple", con il quale, la permeabilità in condizioni di parziale saturazione è automaticamente determinata sulla base del valore della permeabilità in condizioni sature K_s e del tipo di terreno selezionato (in tutte le analisi sempre tipo "General").

Ciò significa che la permeabilità in condizioni di parziale saturazione diminuisce di circa un ordine di grandezza all'interno dell'intervallo di suzione iniziale rimanendo costante per valori maggiori di suzione.

La soluzione dell'equazione di Laplace permette di determinare le linee equipotenziali, e quindi le linee di flusso, che insieme costituiscono il reticolo di filtrazione.

I risultati del programma comprendono:

- o livello di falda
- o distribuzione delle pressioni interstiziali
- o reticolo di filtrazione
- o calcolo del gradiente idraulico
- o portata di filtrazione

3.3.2 SCHERMO ESISTENTE

INTRODUZIONE

Lo schermo di tenuta esistente, nella zona centrale della diga (tra i conci 10 e 30), è costituito da due file di iniezioni spaziate 0.8 m costituite da fori con interasse pari a 2 m, inclinati di 30° verso la spalla sinistra e destra e profondità pari al locale carico idrostatico (circa 50 m). Lo schermo, realizzato dal plinto a monte del

cunicolo di ispezione, è stato realizzato con miscela acqua/cemento/bentonite con metodologia "a rifiuto".
Lo schermo, dopo il suo completamento avvenuto nel maggio 1987, è stato testato con prove d'acqua tipo Lugeon.

Queste prove hanno evidenziato una permeabilità massima inferiore a 2 unità Lugeon, corrispondente approssimativamente a $2E-7$ m/s ossia un ordine di grandezza in meno rispetto alla permeabilità media originale dell'ammasso (i.e. $2E-6$ m/s).

CALCOLI DI FILTRAZIONE, SCHERMO ESISTENTE

Di seguito di riportano i dati di input delle analisi di filtrazione e i risultati di interesse, in particolare il valore del gradiente idraulico. Questo, in condizioni di massimo invaso (quota 146.7 m slm), risulta più del doppio del valore massimo accettabile (0.45).

Material Name	Color	Air Entry (MPa)	Permeability Function	Soil Type	Ks (m/s)	K2 / K1	K1 Angle
ammasso		0	Simple	General	2e-006	1	0
corpo diga		0	Simple	General	1e-005	1	0
schermo		0	Simple	General	2e-007	1	0
calcestruzzo		0	Simple	General	1e-009	1	0
bitume		0	Simple	General	1e-009	1	0

Tabella 3.3.1: Schermo Esistente (quota invaso 146.7 m slm) - Caratteristiche materiali

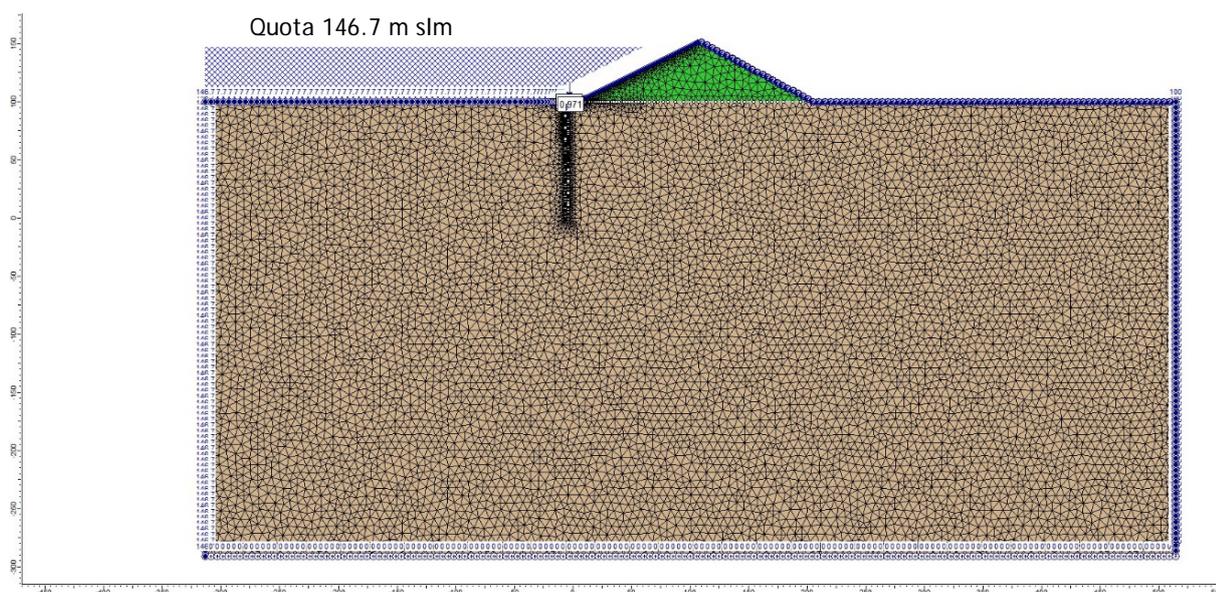


Figura 3.3.1: Schermo Esistente (quota invaso 146.7 m slm) - Modello di calcolo

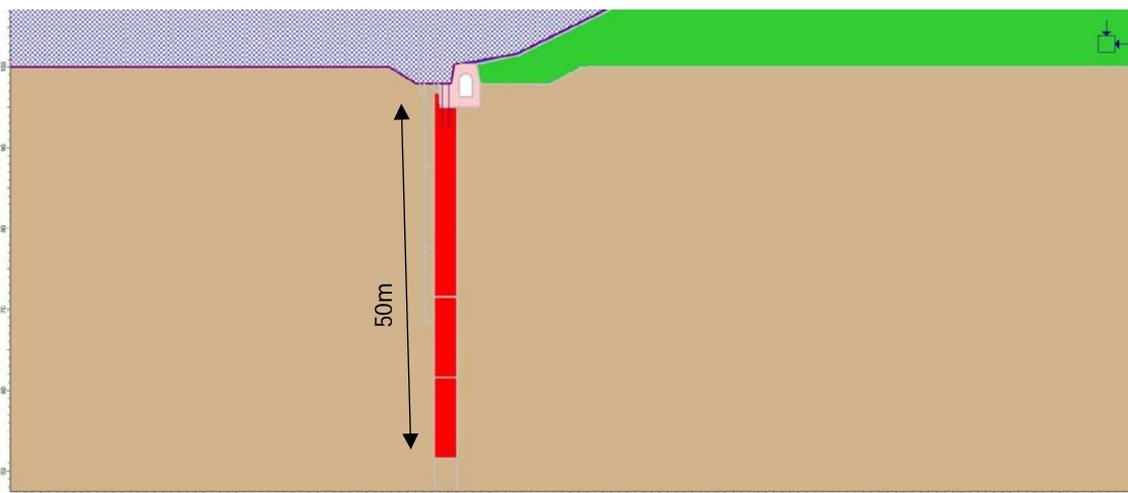


Figura 3.3.2: Schermo Esistente (quota invaso 146.7 m slm) - Modello di calcolo - Dettaglio

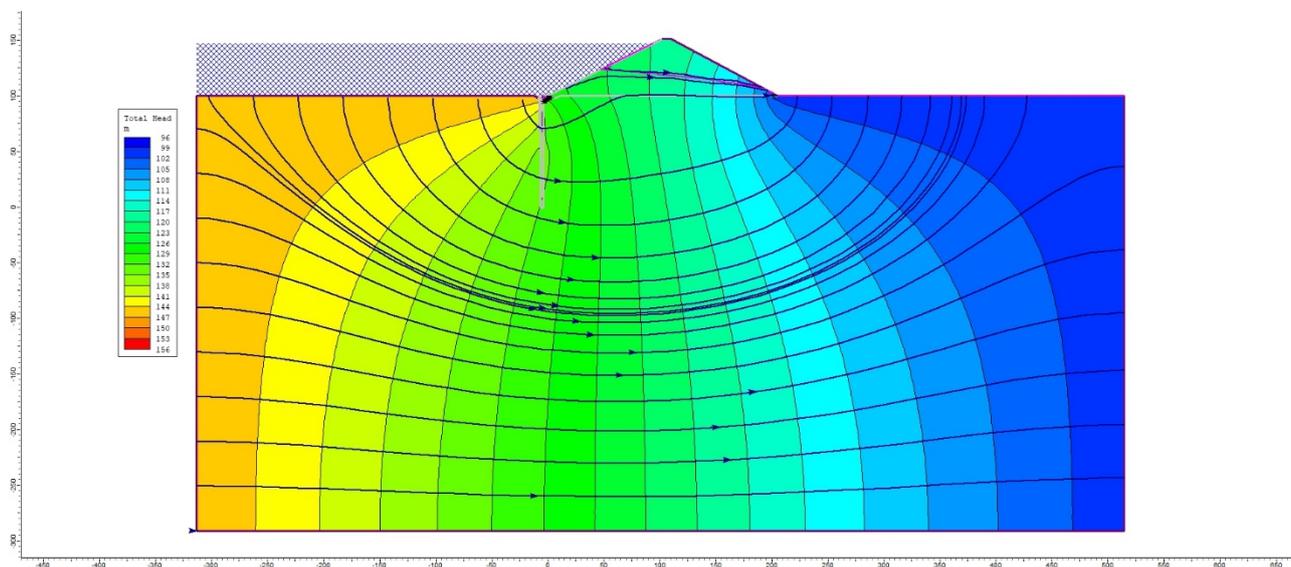


Figura 3.3.3: Schermo Esistente (quota invaso 146.7 m slm) - Carico Totale

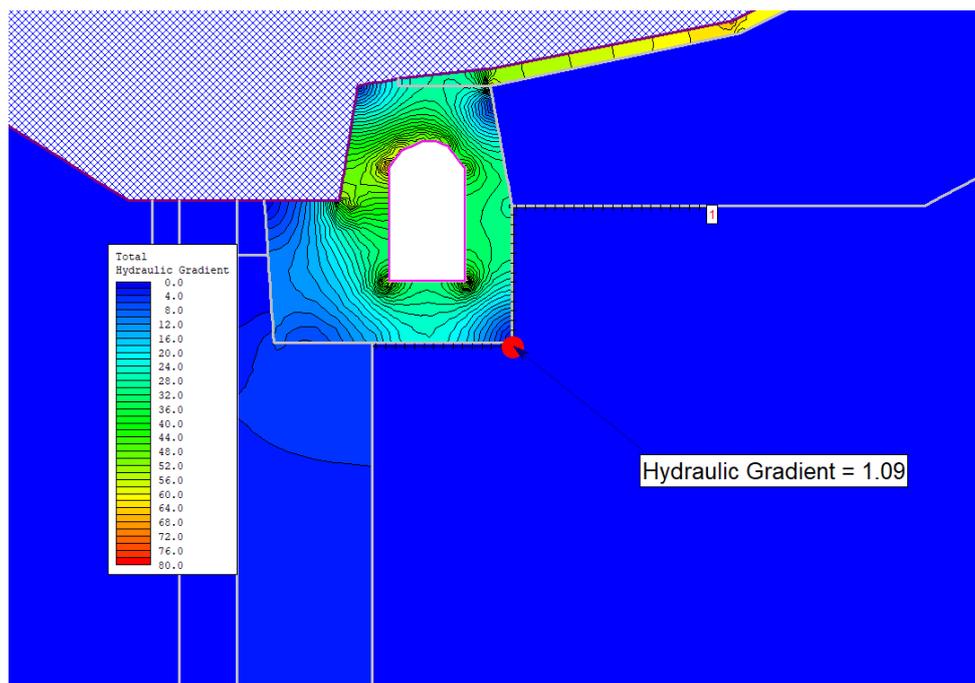


Figura 3.3.4: Analisi di riferimento (quota invaso 146.7 m slm) - Gradiente idraulico

3.3.3 PROLUNGAMENTO SCHERMO ESISTENTE (100m)INTRODUZIONE

La presente soluzione progettuale considera un allungamento dello schermo di iniezione dai 50 m di profondità esistenti a 100m. Le iniezioni saranno condotte attraverso la metodologia nota come GIN (*Grout Intensity Number*). Questa alternativa prevede l'esecuzione di iniezioni da realizzarsi dall'interno del cunicolo di ispezione. Le iniezioni verranno eseguite tra la profondità di 50 m a 100m, avendo un target di iniezione pari a 1 UL (1·E-7 m/s).

CALCOLI DI FILTRAZIONE, PROLUNGAMENTO SCHERMO ESISTENTE

Di seguito di riportano i dati di input delle analisi di filtrazione e i risultati di interesse, in particolare il valore del gradiente idraulico. Questo, in condizioni di massimo invaso (quota 146.7 m slm), risulta pari a circa 1.09 superiore al valore massimo accettabile (0.45).

Material Name	Color	Air Entry (MPa)	Permeability Function	Soil Type	Ks (m/s)	K2 / K1	K1 Angle
ammasso		0	Simple	General	2e-006	1	0
corpo diga		0	Simple	General	1e-005	1	0
schermo		0	Simple	General	2e-007	1	0
calcestruzzo		0	Simple	General	1e-009	1	0
bitume		0	Simple	General	1e-009	1	0

Tabella 3.3.2: Prolungamento schermo esistente 100 m (quota invaso 146.7 m slm) - Caratteristiche materiali

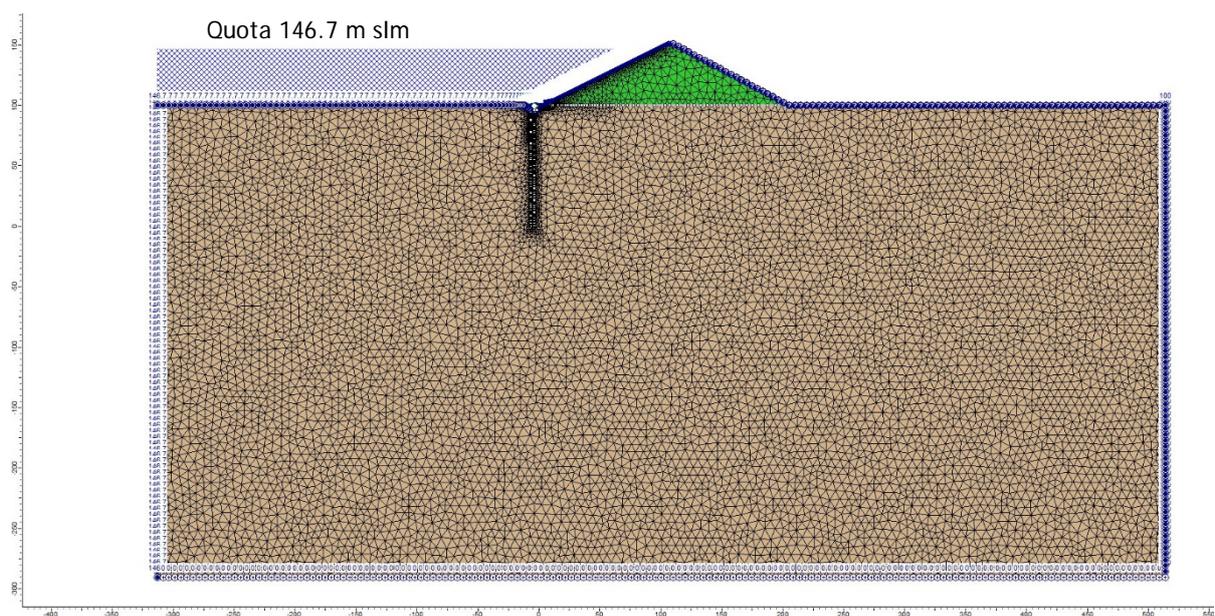


Figura 3.3.5: Prolungamento schermo esistente 100 m (quota invaso 146.7 m slm) - Modello di calcolo

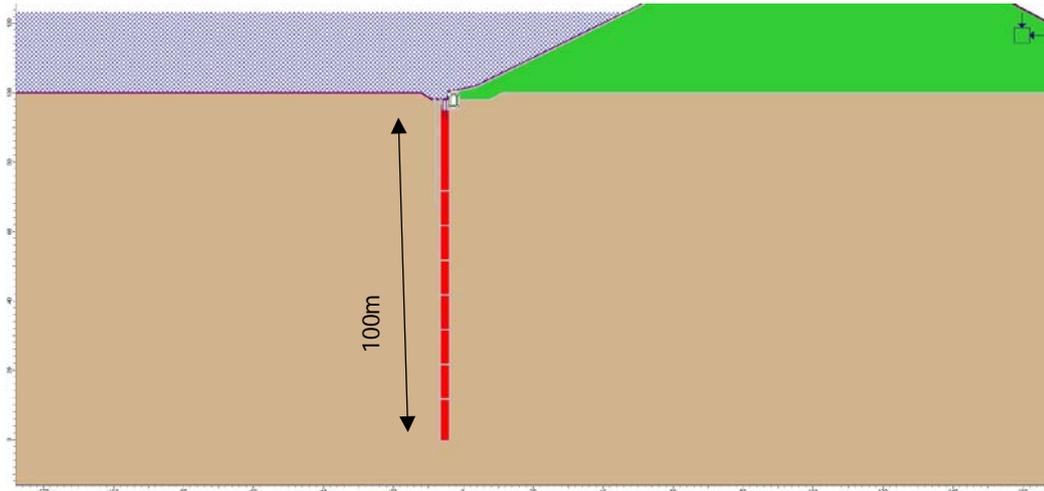


Figura 3.3.6: Prolungamento schermo esistente 100 m (quota invaso 146.7 m slm) - Modello di calcolo - Dettaglio

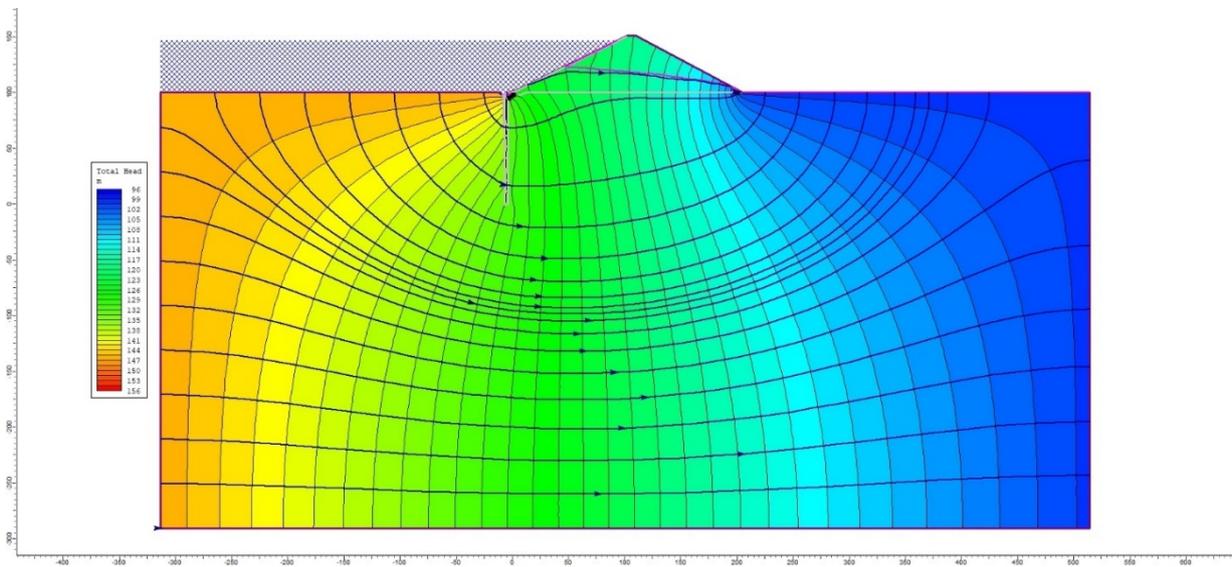


Figura 3.3.7: Prolungamento schermo esistente 100 m (quota invaso 146.7 m slm) – carichi totali

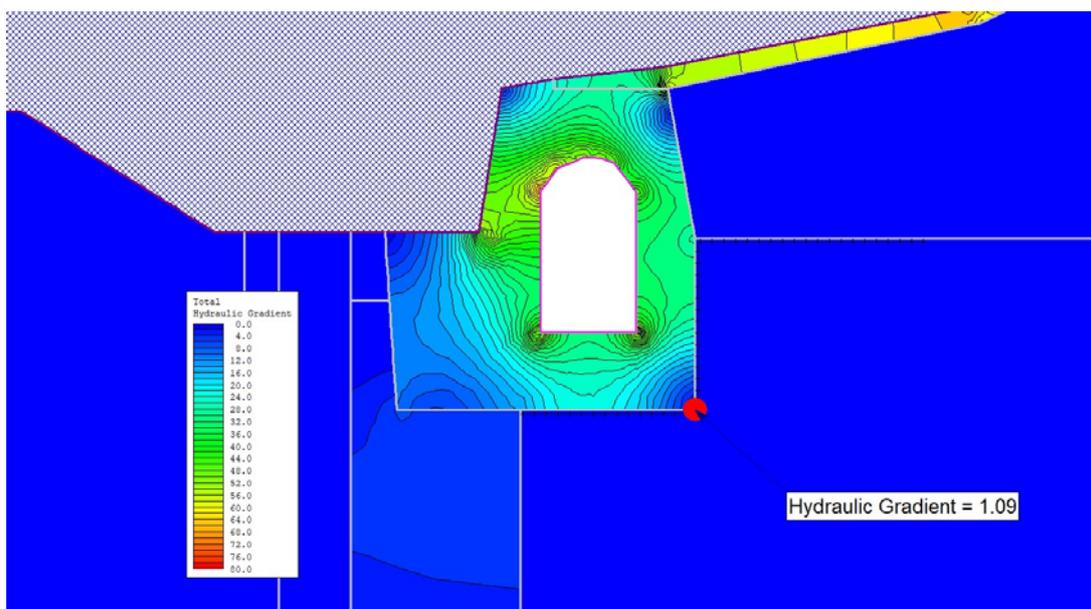


Figura 3.3.8: Prolungamento schermo esistente 100 m (quota invaso 146.7 m slm) - Gradiente idraulico

3.3.4 MIGLIORAMENTO DELLO SCHERMO ESISTENTE

INTRODUZIONE

Questa alternativa prevede l'abbattimento, tramite iniezioni opportunamente studiate, della permeabilità dell'attuale schermo sino a $2E-8$ m/s, in accordo con quanto indicato nel disciplinare di gara.

Le iniezioni saranno condotte attraverso la metodologia nota come GIN (*Grout Intensity Number*).

L'intervento di iniezioni integrative è concepito per essere eseguito dal plinto a monte del cunicolo, ossia nella stessa posizione in cui è stato eseguito lo schermo esistente, previo svuotamento dell'invaso parziale attualmente presente.

Lo schermo ha la stessa profondità di quello esistente (circa 50 m dal piano campagna), è costituito da 2 file di fori distanziate 80 cm e costituite da fori con interasse pari a 1.5 m. Tra le due file sono posizionati dei fori di controllo con interasse di 12 m, da testare dopo l'esecuzione dello schermo.

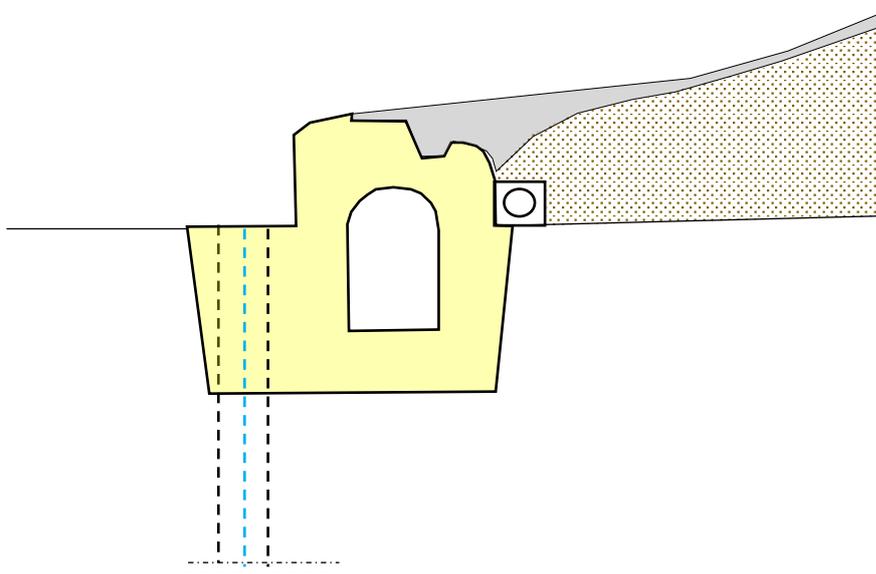


Figura 3.3.9: Sezione trasversale schermo integrativo

I fori di iniezione sono inclinati di 30 gradi verso le spalle (la fila di valle verso la spalla sinistra, quella di monte verso la spalla destra) per meglio intercettare i giunti sub-verticali che attraversano l'ammasso.

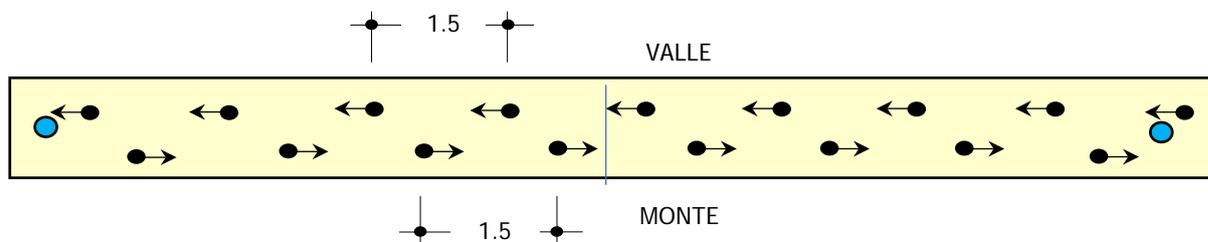


Figura 3.3.10: Pianta schermo integrativo

RISULTATI CALCOLI DI FILTRAZIONE

Di seguito di riportano i dati di input delle analisi di filtrazione e i risultati di interesse, in particolare il valore

del gradiente idraulico. Questo, in condizioni di massimo invaso (quota 146.7 m slm), risulta pari a circa 0.34 inferiore al valore massimo accettabile (0.45).

Material Name	Color	Air Entry (MPa)	Permeability Function	Soil Type	Ks (m/s)	K2 / K1	K1 Angle
ammasso		0	Simple	General	2e-006	1	0
corpo diga		0	Simple	General	1e-005	1	0
schermo		0	Simple	General	2e-008	1	0
calcestruzzo		0	Simple	General	1e-009	1	0
bitume		0	Simple	General	1e-009	1	0

Tabella 3.3.3: Miglioramento schermo esistente $k=2E-08$ m/s (quota invaso 146.7 m slm) - Caratteristiche materiali

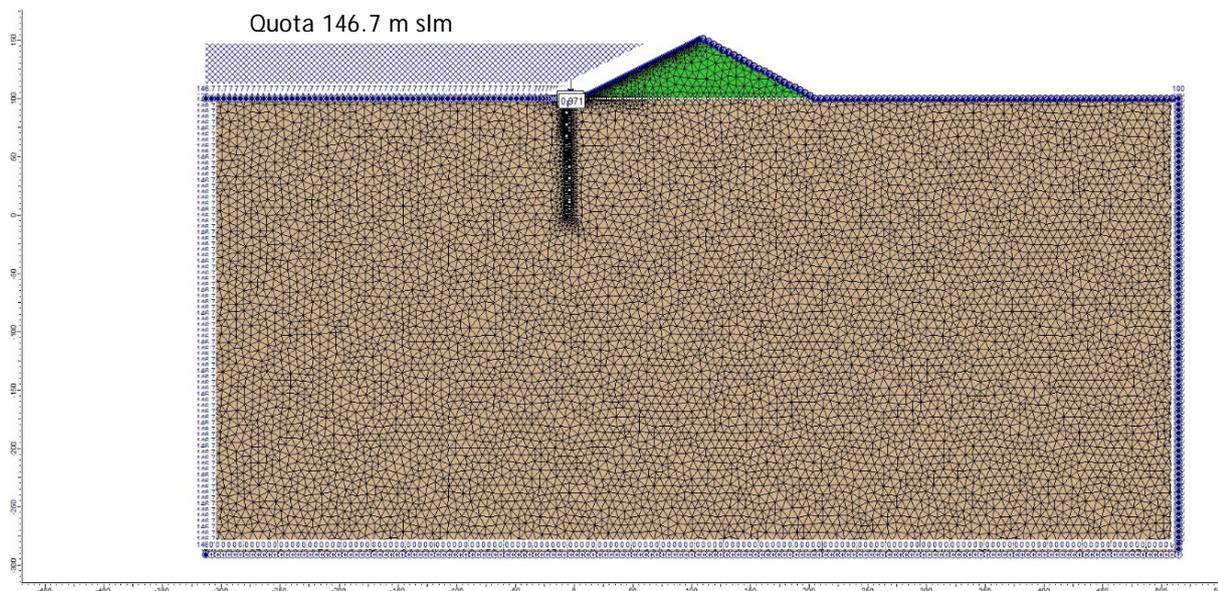


Figura 3.3.11: Miglioramento schermo esistente $k=2E-08$ m/s (quota invaso 146.7 m slm) - Modello di calcolo

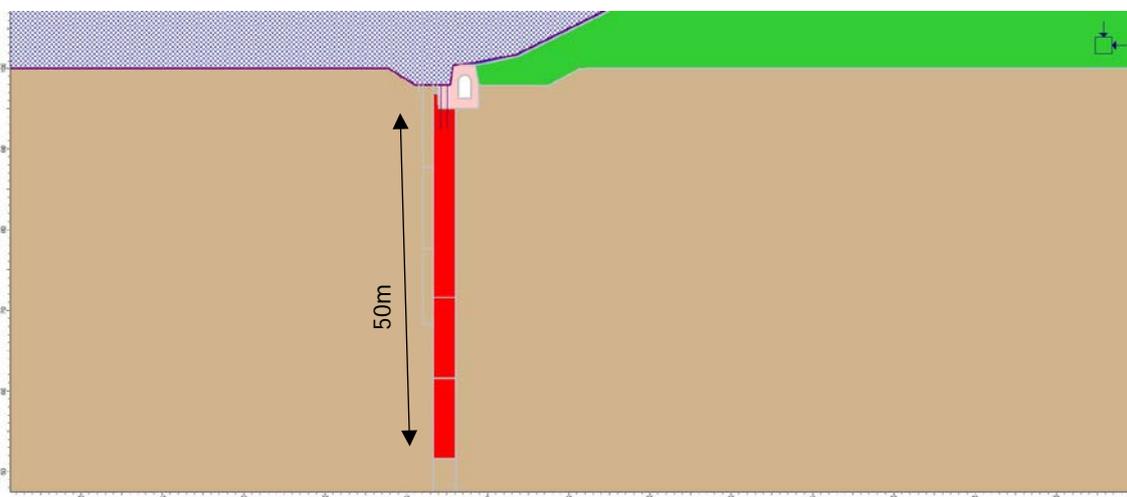


Figura 3.3.12: Miglioramento schermo esistente $k=2E-08$ m/s (quota invaso 146.7 m slm) - Dettaglio

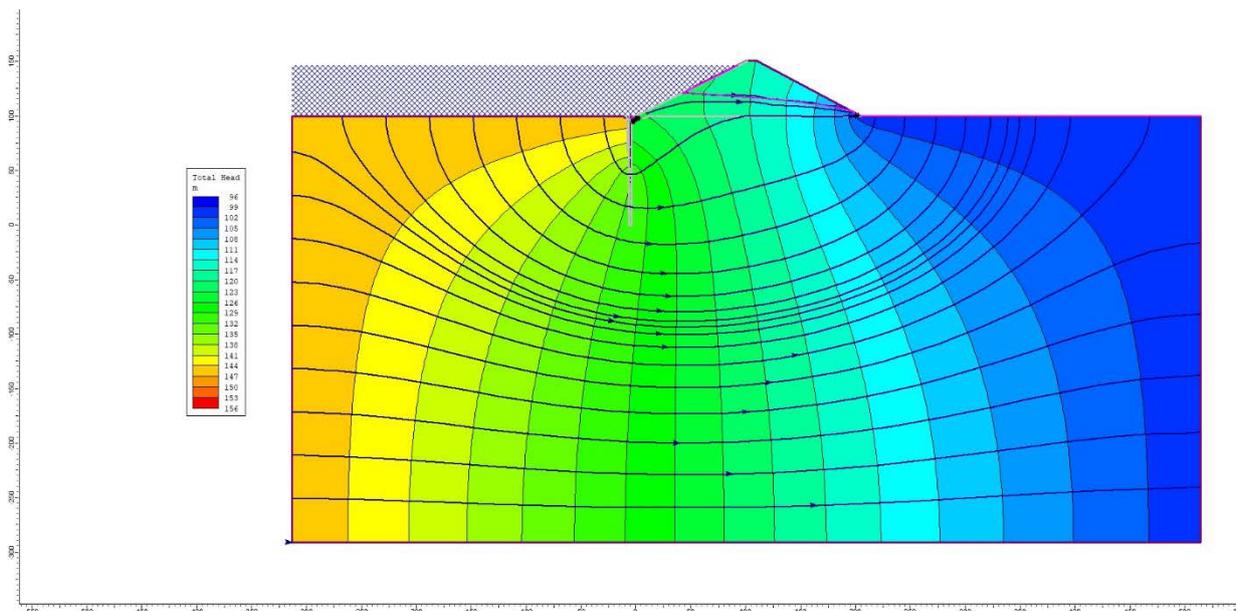


Figura 3.3.13: Miglioramento schermo esistente $k=2E-08$ m/s (quota invaso 146.7 m slm) – Carico Totale

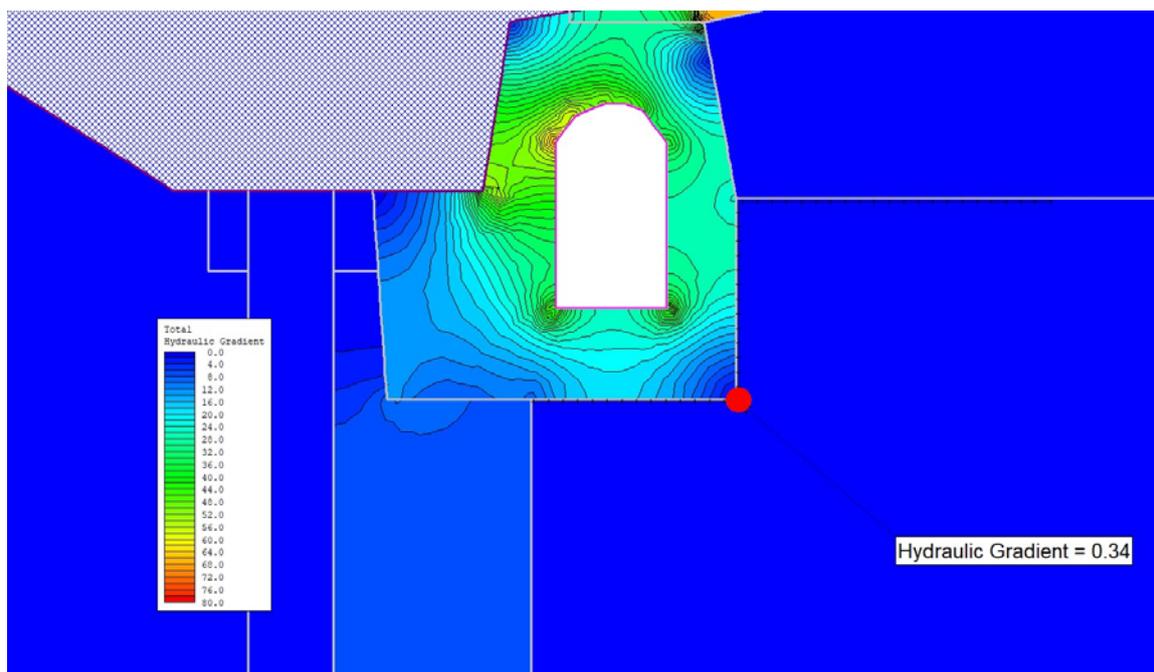


Figura 3.3.14: Miglioramento schermo esistente $k=2E-08$ m/s (quota invaso 146.7 m slm) – Gradiente idraulico

3.3.5 BULBO di INIEZIONE

INTRODUZIONE

Questa alternativa prevede l'esecuzione di iniezioni integrative sia dall'interno del cunicolo di ispezione che dal plinto a monte del cunicolo stesso, al fine di ottenere una zona trattata di maggior spessore (bulbo) profonda circa 20 m e con permeabilità pari a 1 UL ($1 \cdot E-7$ m/s).

Questa alternativa nasce dall'osservazione che i massimi gradienti di efflusso sono localizzati subito a valle del

cunicolo, lungo l'interfaccia tra il cunicolo e la fondazione e diminuiscono rapidamente in profondità e verso valle. È naturale quindi pensare di concentrare i massimi sforzi nel tentativo di migliorare la tenuta della zona sommitale della cortina, a contatto con il cunicolo, piuttosto che approfondire o migliorare la tenuta della cortina in profondità.

Inoltre, la presente alternativa permette di controllare il gradiente di efflusso (ottenendo valori numericamente simili a quelli indicati come accettabili nella relazione del prof. Miliziano), attraverso:

- inspessimento della zona superiore della cortina (bulbo)
- riduzione della permeabilità della zona trattata sino a E-7 m/s (i.e. 1 UL).

Questo ultimo valore è di poco inferiore a quello ottenuto in passato (i.e. 2 UL) per mezzo di iniezioni condotte con sistemi tradizionale ed è pertanto più facilmente raggiungibile per mezzo di iniezioni che fanno uso di miscele più penetrabili.

L'intervento è concepito per essere eseguito sia dal plinto a monte del cunicolo, (ossia nella stessa posizione in cui è stato eseguito lo schermo esistente) sia dall'interno del cunicolo.

Il bulbo è costituito da 5 file di iniezioni distanziate approssimativamente 80 cm e costituite da fori con interasse pari a 1.5 m e profondi 20 m dal piano campagna con l'eccezione della fila di monte che è lunga circa 15 m. La geometria indicativa dell'intervento è mostrata nei due schemi riportati in basso:

Come nella prima alternativa i fori sono inclinati di 30 gradi verso le spalle, per meglio intercettare i giunti sub-verticali che attraversano l'ammasso. La fila di monte è anche inclinata verso monte.

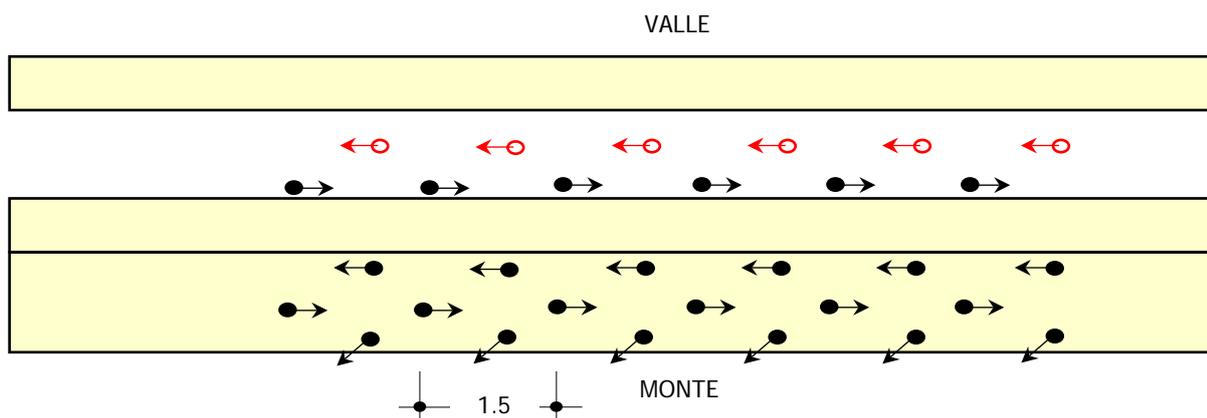


Figura 3.3.15: Pianta bulbo integrativo

RISULTATI CALCOLI DI FILTRAZIONE

Di seguito di riportano i dati di input delle analisi di filtrazione e i risultati di interesse, in particolare il valore del gradiente idraulico. Questo, in condizioni di massimo invaso (quota 146.7 m slm), risulta pari a circa 0.42

inferiore al valore massimo accettabile (0.45).

Material Name	Color	Permeability Function	Soil Type	Ks (m/s)	K2 / K1	K1 Angle
ammasso		Simple	General	2e-006	1	0
corpo diga		Simple	General	1e-005	1	0
schermo		Simple	General	2e-007	1	0
calcestruzzo		Simple	General	1e-009	1	0
bitume		Simple	General	1e-009	1	0
iniez. integrative		Simple	General	1e-007	1	0

Tabella 3.3.4: Bulbo (quota invaso 146.7 m slm) - Caratteristiche idrauliche dei materiali

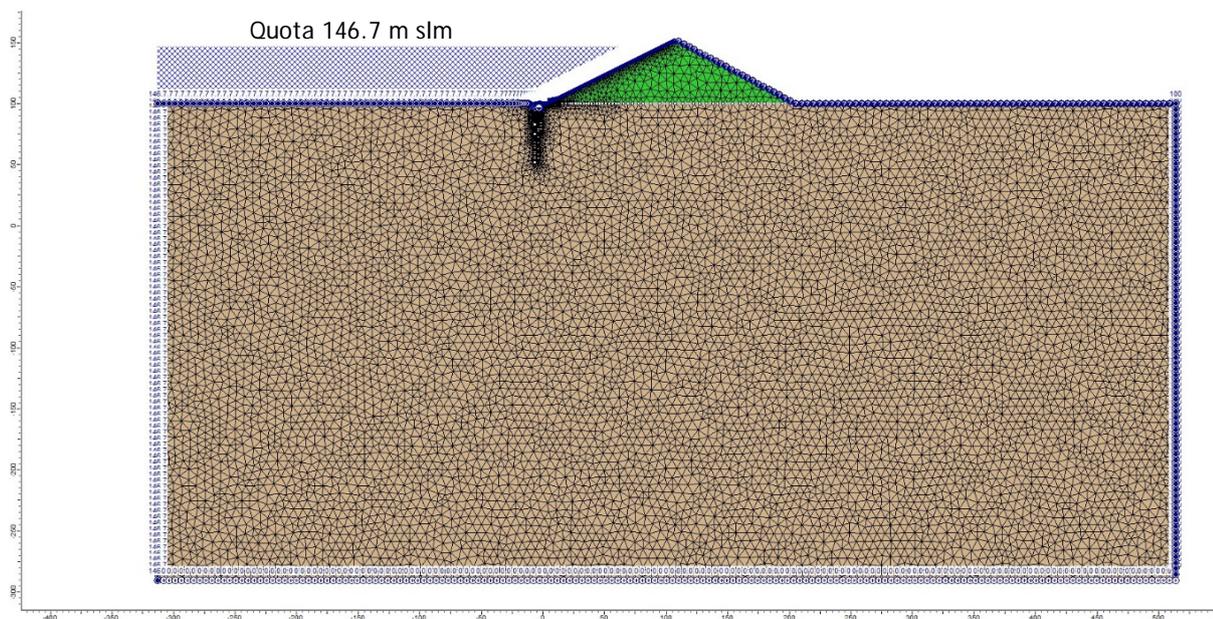


Figura 3.3.16: Bulbo (quota invaso 146.7 m slm) - Modello di calcolo

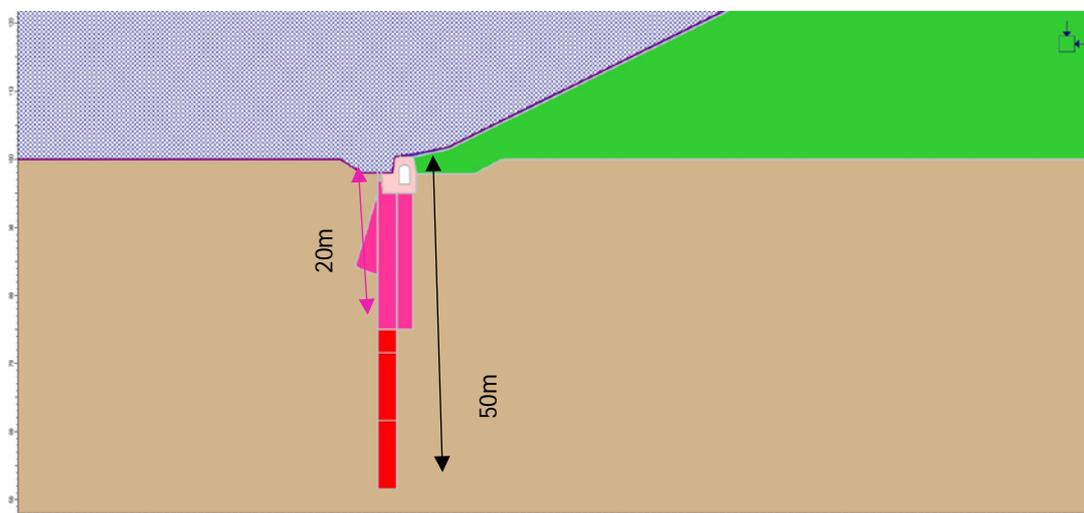


Figura 3.3.17: Bulbo (quota invaso 146.7 m slm) - Modello di calcolo - Dettaglio

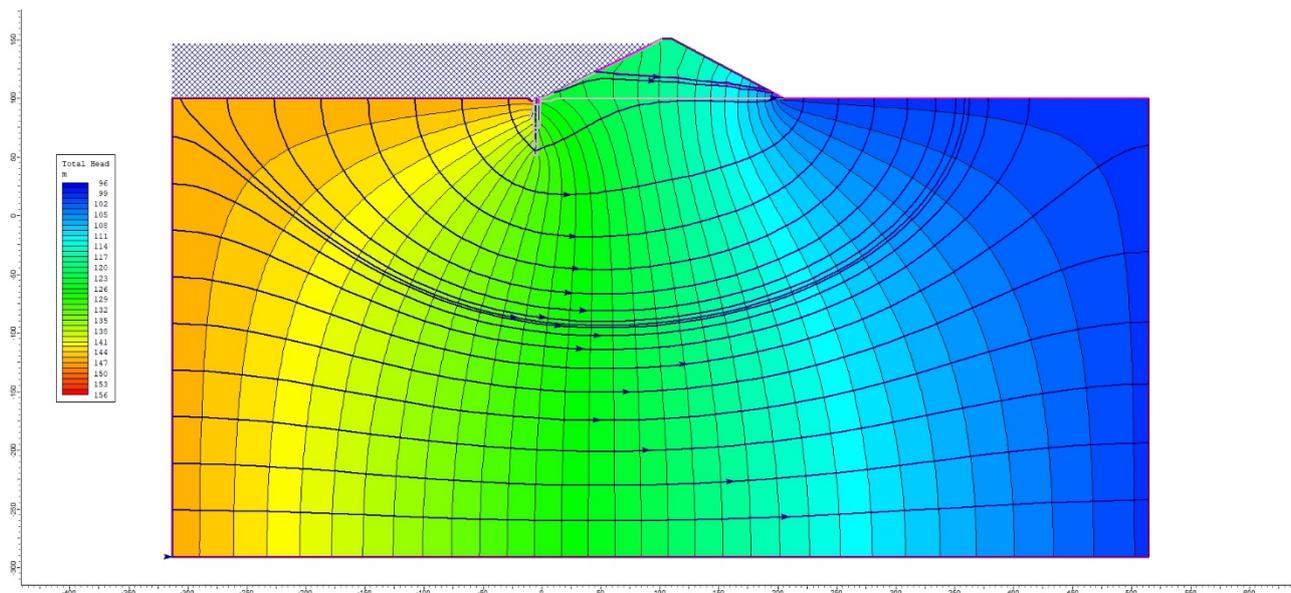


Figura 3.3.18: Bulbo (quota invaso 146.7 m slm) - Risultato analisi di filtrazione – Total head

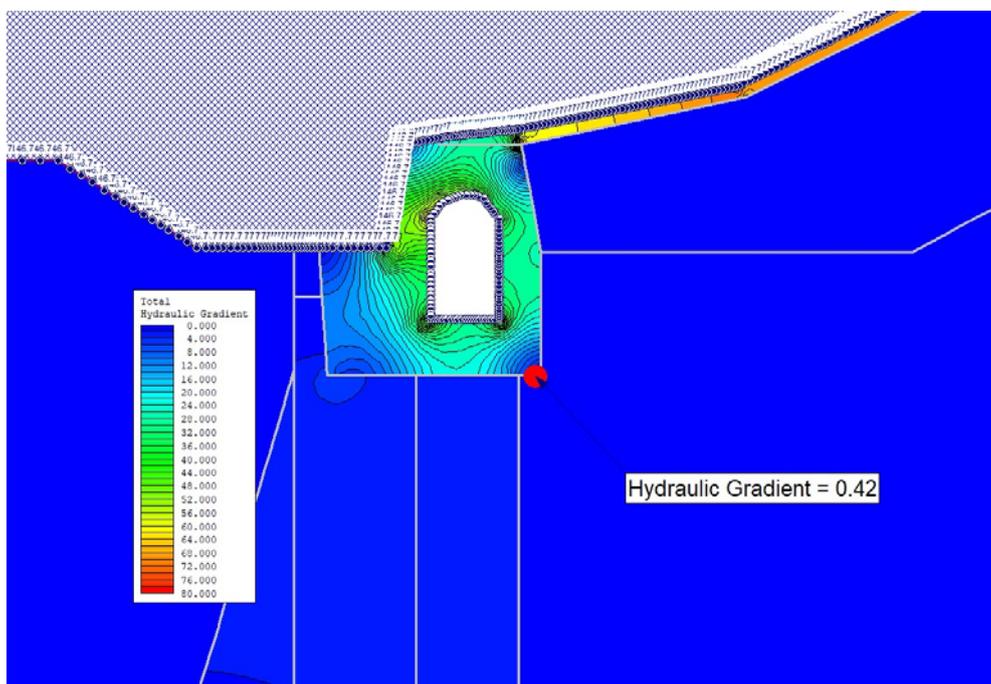


Figura 3.3.19: Bulbo (quota invaso 146.7 m slm) - Risultato analisi di filtrazione – Gradiente idraulico

3.3.6 DIAFRAMMA (30m)

INTRODUZIONE

La presente alternativa considera la realizzazione di un diaframma plastico.

Il diaframma plastico verrà eseguito immediatamente a monte del plinto della galleria di iniezione, realizzati linearmente da una successione di elementi contigui a sezione rettangolare di spessore 0.8 m e profondità di 30m. Il taglio della roccia fessurata verrà eseguita con l'utilizzo di ruote fresanti.

Il diaframma plastico creare una barriera con una permeabilità che si stima essere di circa $1 \cdot E-9$ m/s.

RISULTATI CALCOLI DI FILTRAZIONE

Di seguito di riportano i dati di input delle analisi di filtrazione e i risultati di interesse, in particolare il valore del gradiente idraulico. Questo risulta pari a circa 0.26 inferiore al valore massimo accettabile (0.45).

Material Name	Color	Air Entry (MPa)	Permeability Function	Soil Type	Ks (m/s)	K2 / K1	K1 Angle
ammasso		0	Simple	General	2e-006	1	0
corpo diga		0	Simple	General	1e-005	1	0
schermo		0	Simple	General	2e-007	1	0
diaframma		0	Simple	General	1e-009	1	0
calcestruzzo		0	Simple	General	1e-009	1	0
bitume		0	Simple	General	1e-009	1	0

Tabella 3.3.5: Diaframma 30 m (quota invaso 146.7 m slm) - Caratteristiche idrauliche dei materiali

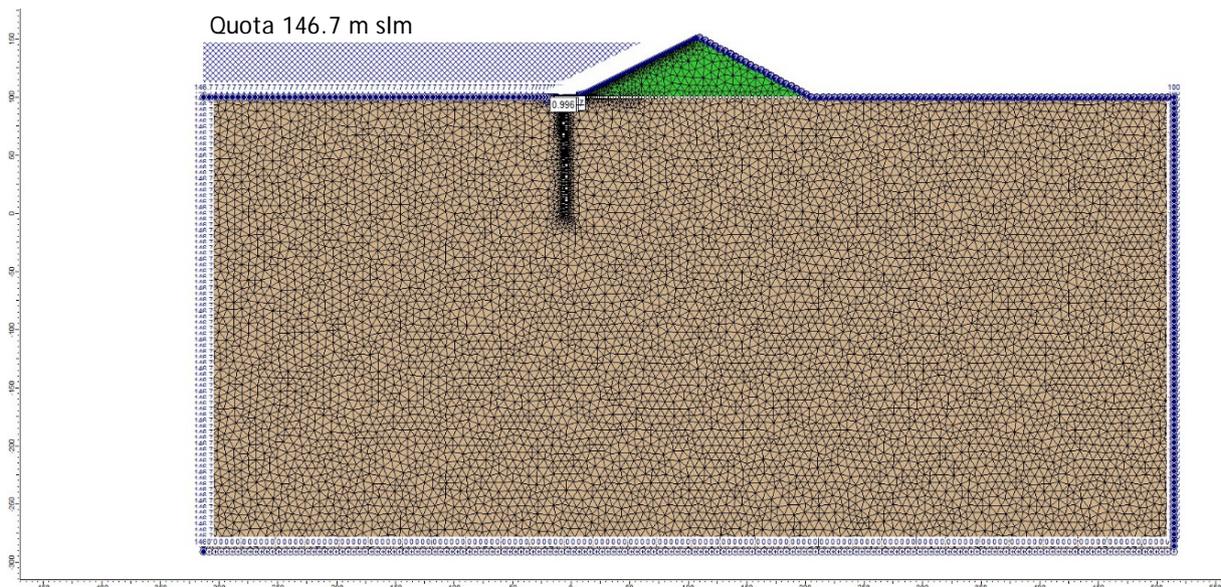


Figura 3.3.20: Diaframma 30 m (quota invaso 146.7 m slm) - Modello di calcolo

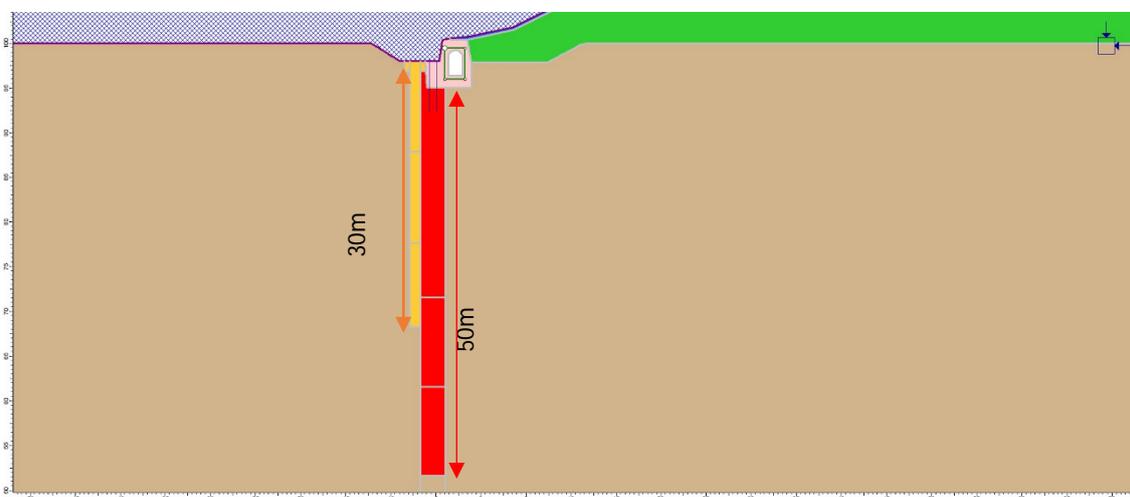


Figura 3.3.21: Diaframma 30 m (quota invaso 146.7 m slm) - Modello di calcolo - Dettaglio

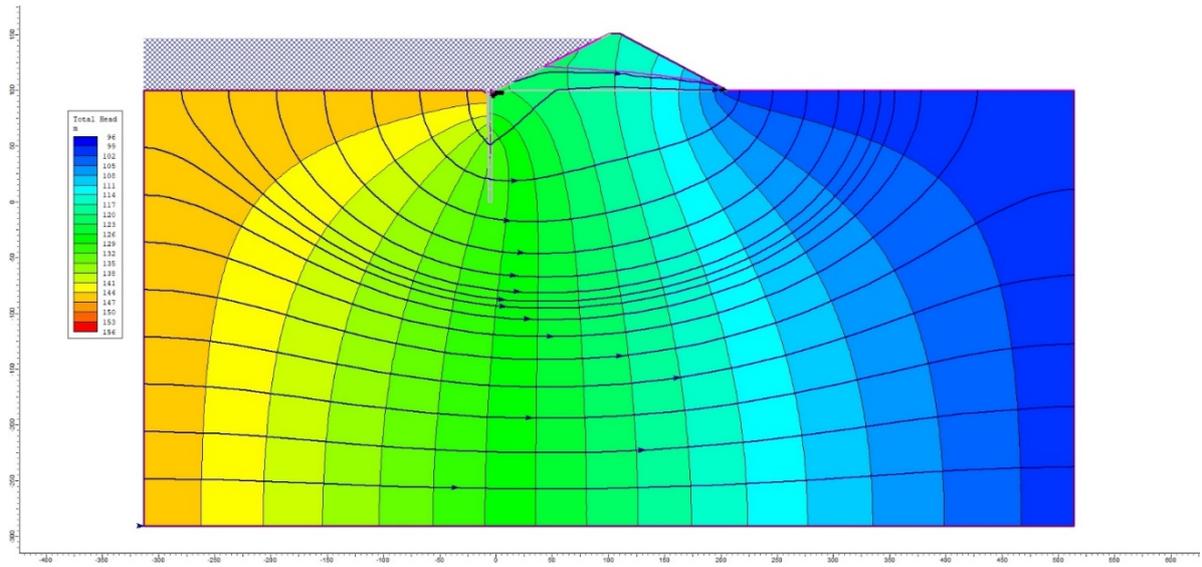


Figura 3.3.22: Diaframma 30 m (quota invaso 146.7 m slm) – Carichi Totali

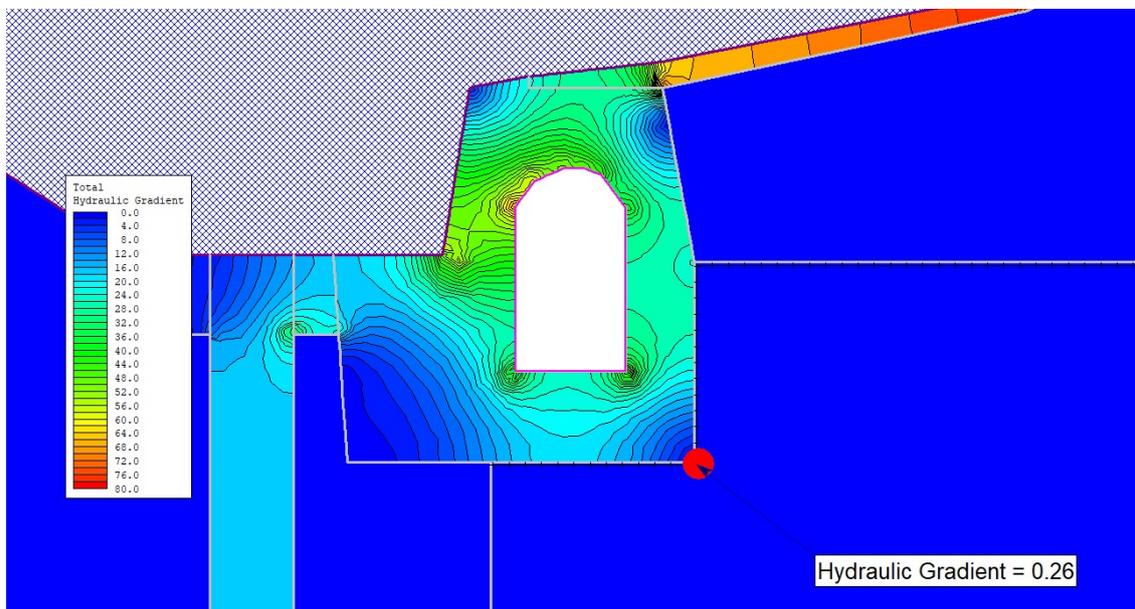


Figura 3.3.23: Diaframma 30 m (quota invaso 146.7 m slm) - Gradiente idraulico

3.4 CONCLUSIONI

Sulla base dei calcoli di filtrazione illustrati nei paragrafi precedenti, si riporta la tabella di sintesi dei gradienti massimi ottenuti.

ALTERNATIVE STUDIATE	QUOTA di INVASO	GRADIENTE
	m a.s.l.	-
Schermo Esistente	146.7	1.09
Prolungamento schermo esistente (100m)	146.7	1.09
Miglioramento schermo esistente	146.7	0.34
Bulbo di Iniezione	146.7	0.42
Diaframma (30m)	146.7	0.26

Tabella 3.4.1: Risultati delle analisi di filtrazione

Da questo confronto si evince che la soluzione più efficace è rappresentata dal Diaframma (gradiente = 0.26), mentre quello meno efficace è il prolungamento a 100 m dello schermo esistente (gradiente = 1.09).

Le alternative denominate "miglioramento dello schermo esistente" e "bulbo di iniezione" appaiono simili ottenendo un gradiente idraulico di 0.34 e 0.42 rispettivamente.

Da un punto di vista realizzativo, scartando la soluzione del prolungamento dello schermo a 100 m. che non appare migliorativa, il progettista fa le seguenti considerazioni:

- MIGLIORAMENTO SCHERMO ESISTENTE

Questa soluzione consiste nel ridurre la permeabilità dell'ammasso roccioso di circa due ordini di grandezza, cioè da una permeabilità pari a $1 \cdot E^{-6}$ m/s a $1 \cdot E^{-8}$ m/s.

Questo target, benché possibile da un punto di vista fisico, potrebbe risultare difficile da raggiungere. Questa soluzione trascina in sé il rischio di richiedere una performance dello schermo, che dopo la sperimentazione sul campo, potrebbe risultare non raggiungibile, aprendo lo spazio a possibili riserve da parte dell'impresa.

- BULBO di INIEZIONI

Questa soluzione sembra quella più facilmente realizzabile, sia da un punto di vista di performance dello schermo di iniezione, che dovrà raggiungere una permeabilità di circa a $1 \cdot E^{-7}$ m/s, che realizzativa. Si consideri infatti che questa soluzione permette di rispettare i vincoli idrologici che costringono l'esecuzione dei lavori all'interno del serbatoio solo nella stagione di secca (Aprile - Ottobre).

- DIAFRAMMA

Benché questa soluzione sia la più efficace, il progettista ritiene che la realizzazione del cut-off, profondo 30 m, con ruote fresanti, possa presentare difficoltà costruttive, infatti, sulla base dei

sondaggi, l'alternanza di areniti e siltiti, seppur fratturate, potrebbero avere un RQD > 70% per circa il 20% della profondità del diaframma. Generalmente le ruote fresanti sono più idonee per un suolo o per una roccia soffice, più che per una roccia che potrebbe presentare dei banchi duri e compatti, fresabili con maggiore difficoltà.

Infine, questa alternativa verrebbe eseguita all'interno del serbatoio e quindi le tempistiche potrebbero non sarebbero compatibili con i vincoli idrologici, che come riportato in precedenza permettono l'esecuzione dei lavori solo nella finestra tra Aprile - Ottobre.