



CONSORZIO DI BONIFICA PIANURA DI FERRARA

Sede legale e recapito postale:
44121 Ferrara - Via Borgo dei Leoni, 28 - C.F. 93076450381
web: www.bonificaferrara.it - e-mail: info@bonificaferrara.it
pec: posta.certificata@pec.bonificaferrara.it

aderente all'
Associazione Nazionale Bonifiche, Irrigazioni e Miglioramenti Fondiari

CANALE S. NICOLO' – MEDELANA

PROGETTO ESECUTIVO

RIPRISTINO DELLE CONDIZIONI DI STABILITÀ ARGINALE DEL CANALE SAN NICOLÒ – MEDELANA. II STRALCIO

RELAZIONI

RELAZIONE DI CALCOLO

Data

09/11/2021

Elab.

R-3820-SNMST2-PE-02-03

Rev.

00

IL PROGETTISTA
(Dott. Ing. Elisa Maniezzo)



IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO
(Dott. Ing. Marco Volpin)

**1. INDICE**

1.	INDICE	2
2.	PRINCIPALI FONTI BIBLIOGRAFICHE	3
3.	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	4
4.	PREMESSA	5
5.	PROGETTO E STRALCI FUNZIONALI	7
6.	ANALISI DI STABILITA' DEI CORPI ARGINALI.....	9
6.1	PREMESSA.....	9
6.2	BACK ANALYSIS PER LA DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI OPERATIVI.....	13
6.3	ANALISI DELLO STATO DI PROGETTO.....	21
6.3.1	<i>Analisi dei carichi.....</i>	<i>21</i>
6.3.2	<i>Combinazione di carico</i>	<i>22</i>
6.3.3	<i>Risultati delle analisi in condizioni di stato di progetto</i>	<i>23</i>
6.4	ANALISI DI STABILITÀ IN CONFIGURAZIONE "SECONDO STRALCIO".....	28
6.4.1	<i>Analisi dei carichi.....</i>	<i>29</i>
6.4.2	<i>Combinazione di carico</i>	<i>29</i>
6.4.3	<i>Risultati delle analisi in condizioni di stato di progetto secondo stralcio funzionale.....</i>	<i>30</i>
7.	VERIFICHE NEI CONFRONTI DEGLI STATI LIMITE ULTIMI IDRAULICI.....	39

ALLEGATI:

ALLEGATO A: Report del programma GeoSlope;



2. PRINCIPALI FONTI BIBLIOGRAFICHE

- [1] Lancellotta R., “*Geotecnica*” – Ed. Zanichelli, Bologna (2000).
- [2] Jaeger C., “*Rock Mechanics and Engineering*” – Ed. Cambridge, London (1979).
- [3] Anderson M.G., Richards S., “*Slope stability*” – Ed. JWS, New York (1992).
- [4] Farulla C. A., “*Analisi di stabilità dei pendii*” – Ed. Hevelius, Napoli (2000).
- [5] Bowles J., “*Foundation analysis and design*” – Ed. McGrawHill, London (1998).
- [6] Viggiani C., “*Fondazioni*” – Ed. Hevelius, Napoli (2000).
- [7] Atkinson J., “*Geotecnica*” – Ed. McGraw-Hill, Milano (1997).
- [8] Nova R., “*Fondamenti di meccanica delle terre*” - Ed. McGraw-Hill, Milano (1997).
- [9] Pozzati P., Ceccoli C.: “*Teoria e tecnica delle costruzioni*” – Ed. Utet, Torino (1997);
- [10] M. Corrao, G. Coco Geofisica Applicata 2009 Dario Flaccovio Editore
- [11] M. Mele Interazione terreno-struttura in prospettiva sismica 1990 Dario Flaccovio Editore
- [12] T. Crespellani, J. Facciorusso Dinamica dei terreni per le applicazioni sismiche 2010 Dario Flaccovio Editore
- [13] RUE Ferrara 2013 Relazione Geologico Sismica. Prof. Ing. Vincenzo Fioravante, ing. Daniela Giretti
- [14] Gruppo di lavoro CPTI (2004). Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2004 (CPTI04), INGV, Bologna
- [15] Gutenberg B., Richter C.F. (1944). Frequency of earthquakes in California. Bulletin of the Seismological Society of America, 34(4), 1985-1988.
- [16] Associazione Geotecnica Italiana AGI (2005). Linee Guida “Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica”, Patron, Bologna



3. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Le Normative di riferimento adottate sono le seguenti:

- D.M. 17 gennaio 2018 “Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”
- Circ. Ministero delle infrastrutture e dei trasporti n.7 del 21 gennaio 2019, “Istruzioni per l'applicazione dell'aggiornamento delle “Norme Tecniche per le Costruzioni” di cui al DM del 17 gennaio 2018”.
- D.P.R. 6 giugno 2001, n. 380; “Testo unico delle disposizioni legislative e regolamentari in materia edilizia”.
- LEGGE REGIONALE N. 19 DEL 30-10-2008 REGIONE EMILIA-ROMAGNA NORME PER LA RIDUZIONE DEL RISCHIO SISMICO
- D.Lgs. 50/2016. Attuazione delle direttive 2014/23/UE, 2014/24/UE e 2014/25/UE sull'aggiudicazione dei contratti di concessione, sugli appalti pubblici e sulle procedure d'appalto degli enti erogatori nei settori dell'acqua, dell'energia, dei trasporti e dei servizi postali, nonché per il riordino della disciplina vigente in materia di contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture. (16G00062) (GU Serie Generale n.91 del 19-4-2016 – Suppl. Ordinario n. 10);
- D.Lgs. 42/2004. Codice dei beni culturali del paesaggio;
- Decreto del Min. delle Infrastrutture 14/01/2008. Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni;
- D.Lgs. 81/2008. Testo unico sulla sicurezza;
- D.Lgs. 152/2006. Norme in materia ambientale;
- L.R. Emilia Romagna 9/99 sulla Valutazione di Impatto Ambientale;
- L.R. Emilia Romagna 31/2002. Disciplina generale dell'edilizia;
- D.M. 161/2012. Regolamento recante la disciplina dell'utilizzazione delle terre e rocce da scavo;
- L. 177/2012. Modifiche al decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, in materia di sicurezza sul lavoro per la bonifica degli ordigni bellici;
- D.P.R. 327 del 8/06/2001 Testo Unico sulle procedure espropriative per pubblica utilità;
- L.R. Emilia Romagna n. 37 del 19/12/2002. Disposizioni regionali sugli espropri.
- 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)”

4. PREMESSA

La presente relazione si inserisce nel **Progetto Esecutivo** denominato “**Ripristino delle condizioni di stabilità arginale del canale San Nicolò – Medelana. Il Stralcio.**”.

Il canale San Nicolò Medelana è una importante opera di difesa idraulica e di derivazione irrigua inserita nel territorio ferrarese nel sistema Po di Volano - Navigabile. E' un cavo pensile, posto pochi chilometri a sud est dal capoluogo estense, a sezione trapezia, lungo circa 14,6 chilometri, per la maggioranza del proprio corso dominante rispetto al territorio attraversato. La realizzazione, che risale agli anni 30 dello scorso secolo, nella propria primaria funzione, rispondeva alla duplice necessità di porre in sicurezza il sistema Burana-Volano, scolmando le portate effluenti nel primo tronco del Po di Volano attraverso un collegamento tra il Po di Primaro in località San Nicolò e il Po di Volano stesso a valle della traversa Valpagliaro in località Medelana, e consentire la derivazione irrigua per il fitto reticolo che il canale è andato ad intersecare.

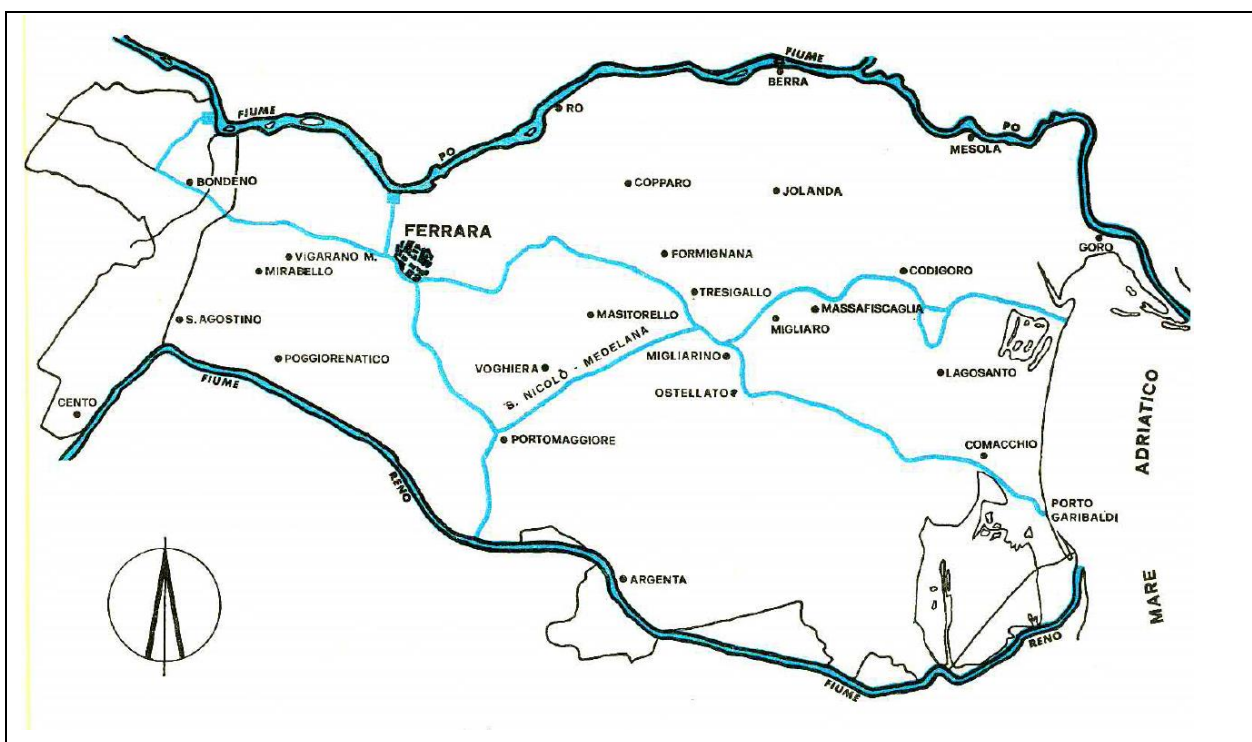


Figura 1. Il canale San Nicolò Medelana nel sistema idraulico principale del Ferrarese.

Purtroppo, come è noto, il canale è rimasto pressoché inutilizzato sin dal 1938, data delle sua ultimazione, a causa di difetti di tenuta lungo buona parte del suo sviluppo imputabile alla elevata permeabilità di arginature e fondo alveo.

Negli anni 80 del secolo scorso, per valorizzare ed utilizzare l'opera, sono stati progettati e realizzati degli interventi di impermeabilizzazione del fondo e delle sponde mediante un rivestimento in calcestruzzo.



Nonostante gli interventi di rivestimento ed impermeabilizzazione delle sponde, ultimati nel 2000, il canale ha presentato anche negli anni successivi e presenta tutt'ora problematiche di tenuta, riscontrate già in fase di collaudo nel 2003.

A seguito delle indagini e della analisi condotte, si sono riscontrate criticità legate alla carente impermeabilizzazione del canale affiancata dalla variabilità litologica dei corpi arginali e dell'immediato sottosuolo con presenza anche importante di limi sabbio e sabbie limose che possono generare importanti fenomeni di instabilità, filtrazione e sifonamento dei corpi arginali.

Il Progetto Esecutivo prevede di realizzare una nuova impermeabilizzazione del Canale mediante la realizzazione di un materasso flessibile in calcestruzzo di spessore 10cm da sovrapporre all'attuale rivestimento.

La presente relazione tratta delle verifiche di stabilità del Canale San Nicolò – Medelana.

5. PROGETTO E STRALCI FUNZIONALI

L'intervento complessivo si svilupperà a partire dall'opera di modulazione di San Nicolò (prog. 0+000) fino alla Sez. 73 (prog. 14+600) in prossimità della Chiusa Medelana per una lunghezza complessiva di **14.600 metri**.

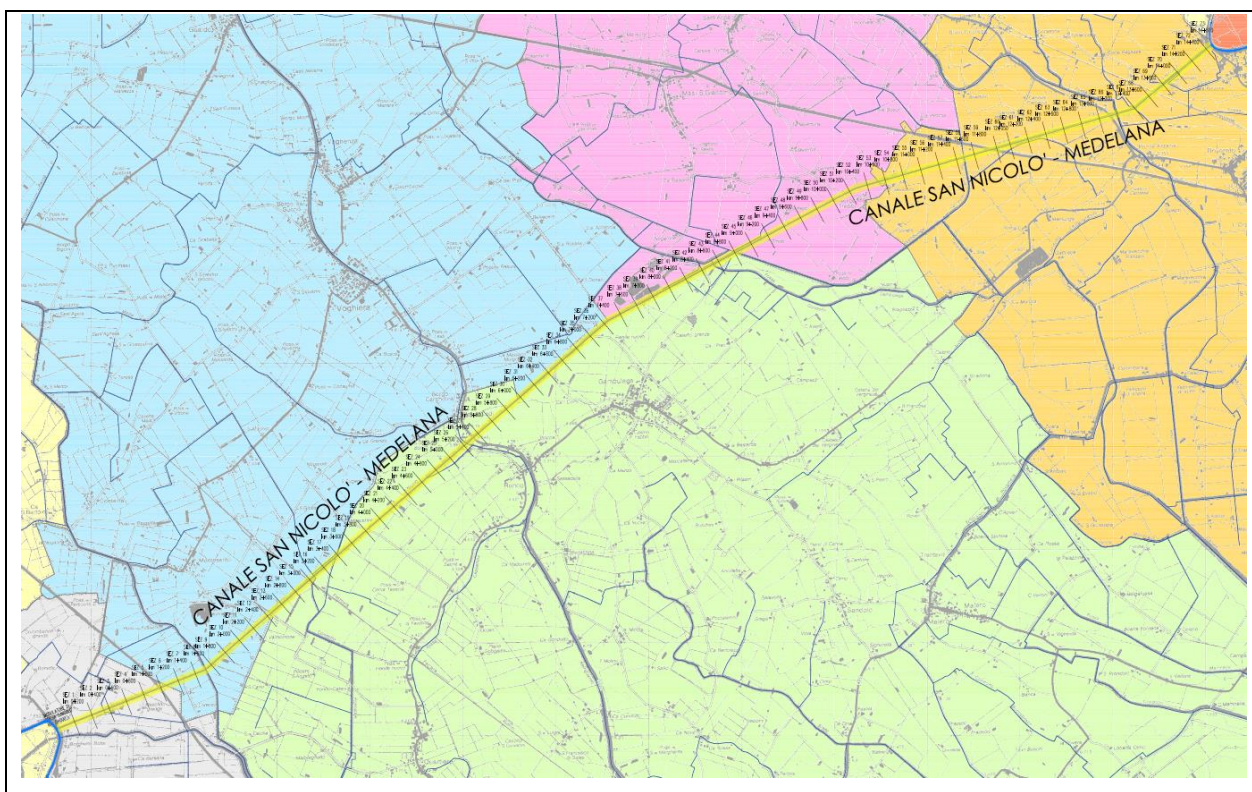


Figura 2. Tracciato del canale San Nicolò Medelana

Le **prestazioni** che si intendo raggiungere con gli interventi di progetto sono le seguenti:

- 1) come **opera di derivazione** si potrà contare sull'innalzamento delle quote irrigue:
 - Nel I Tronco (da San Nicolò prog. 0+000 alla Chiusa Rostra prog. 7+156.66) la quota irrigua di progetto sarà pari a **+12,80 m** (+2,80 mslm);
 - Nel II Tronco (dalla Chiusa Rostra prog. 7+156.66 alla chiusa Medelana prog. 14+600) la quota irrigua di progetto sarà pari a **+11,90 m** (+1.90 mslm)
- 2) In condizioni di emergenza si potrà utilizzare come **scolmatore** con le seguenti condizioni:
 - Portata massima **27 mc/s** e condizione di valle in corrispondenza della chiusa Medelana **+12,50 m** (+2.50 mslm)



Il presente Progetto Esecutivo rappresenta il **Secondo Stralcio Funzionale** e prevede di realizzare l'intervento di progetto dalla Opera di modulazione San Nicolò (prog. 0+000) alla Sez. 25 (prog. 5+000) per una lunghezza complessiva di **5.000 metri**.

Al termine della realizzazione degli interventi di progetto previsti per il Secondo Stralcio Funzionale vengono imposte le seguenti limitazioni:

- 1) Come opera di derivazione
 - Nel I Tronco (da San Nicolò alla Chiusa Rostra) la quota irrigua di progetto sarà pari a **+12,30 m** (+2.30 mslm)
 - Nel II Tronco (dalla Chiusa Rostra a Medelana) la quota irrigua di progetto sarà pari a **+10,90 m** (+0.90 mslm)
- 2) Non sarà possibile usare l'opera come scolmatore

Come si dimostra nel prosieguo della relazione, la messa in opera parziale del rivestimento nel tratto individuato come Secondo Stralcio non consente di raggiungere le prestazioni a scolmatore e di derivazione indicate come "Obiettivi Intervento Complessivo". Per raggiungere tali valori sarà necessario completare l'intero intervento, ovvero tutti i 14.600 metri tra l'opera di modulazione di San Nicolò (prog. 0+000) e la Sez. 73 (prog. 14+600).

6. ANALISI DI STABILITA' DEI CORPI ARGINALI

6.1 Premessa

Il canale San Nicolò Medelana è un canale artificiale a sezione trapezia con base minore circa 10 metri e sponde con pendenza 2/3, lungo 14.6 chilometri, per la maggioranza del proprio corso dominante rispetto al territorio attraversato.

Il Canale ha una pendenza di 8cm/km da San Nicolò verso Medelana ed è suddiviso in due tronchi separati dall'Opera Chiusa Rostra che si trova circa a metà del tracciato alla progressiva 7+156.66.

Allo stato attuale il canale risulta rivestito sul fondo e sulle sponde con una lastra di calcestruzzo di spessore medio pari a 15cm caratterizzata dalle problematiche di permeabilità ed ammaloramento dei giunti ampiamente descritte negli elaborati di progetto.

Le sponde hanno un'altezza di circa 3.70 metri rispetto al fondo canale ed il rivestimento non raggiunge mai la sommità arginale in quanto è stato progettato per avere un franco di 50cm rispetto al livello di massima piena. L'altezza del rivestimento è pari a circa 3.40 metri rispetto al fondo canale.

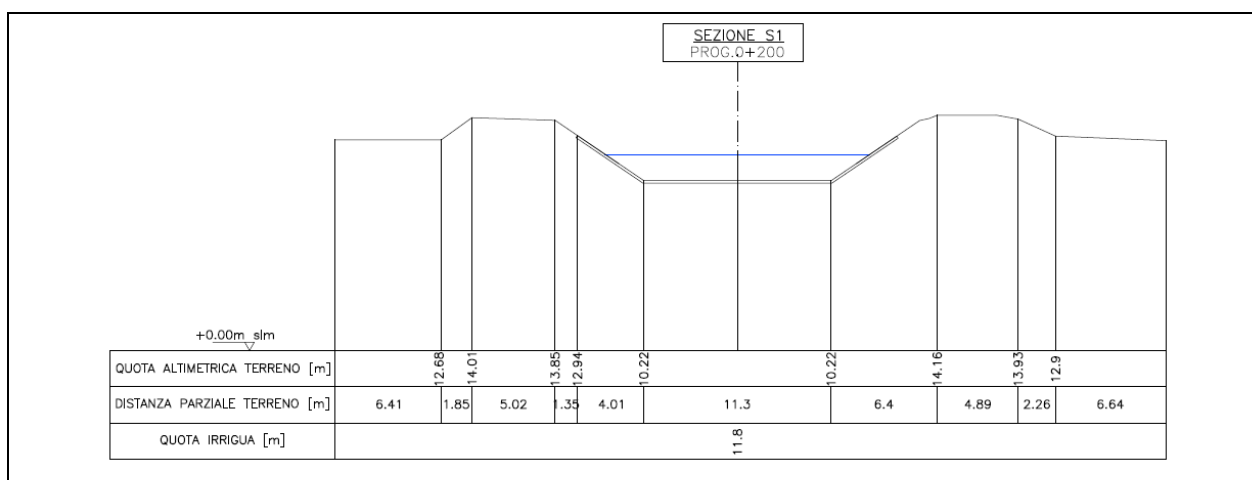


Figura 3: Sezione Stato di Fatto

Nel corso degli anni si è visto che i problemi di instabilità si registravano nel momento in cui il gestore del canale aveva necessità far passare il canale dal funzionamento come “distributore irriguo” al funzionamento come “scolmatore delle portate di piena”, in questi casi si verificavano possibili fenomeni di filtrazione e dunque di instabilità dell'argine.

Le indagini condotte hanno messo in evidenza che il rivestimento esistente non è in grado di garantire la necessaria impermeabilità e la litologia arginale si presenta alquanto variabile generando fenomeni di filtrazione e sifonamento che sono stati osservati nel corso degli anni nel momento in cui si tenta di innalzare la quota idrica dall'attuale livello irriguo a quote superiori.

L'obiettivo del progetto è quello di ripristinare la corretta impermeabilizzazione dell'alveo per tutta la lunghezza dell'opera al fine poterla utilizzare per lo scopo originario, ovvero sia come opera di **derivazione** che come **scolmatore**, migliorando di fatto anche la gestione della risorsa idrica e riducendo le perdite.

Gli interventi consistono nella realizzazione di un nuovo rivestimento in **calcestruzzo SCC** dello spessore di **10cm** da porre in opera sopra il rivestimento esistente portandolo fino alla sommità arginale. Nei tratti dove non è presente il rivestimento esistente verrà steso uno strato di terreno compattato.

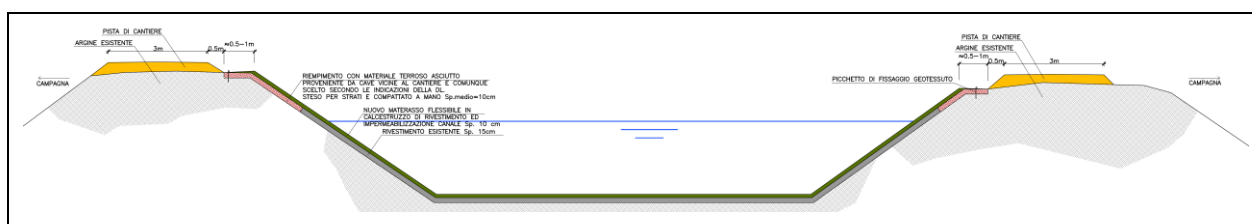


Figura 4: Sezione tipologica del Canale Stato di Progetto

L'intervento complessivo si svilupperà a partire dall'opera di modulazione di San Nicolò (prog. 0+000) fino alla Sez. 73 (prog. 14+600) in prossimità della Chiusa Medelana per una lunghezza complessiva di **14.600 metri**.

Il **Secondo Stralcio Funzionale** prevede di realizzare l'intervento di progetto dall'opera di modulazione San Nicolò (prog. 0+000) alla Sez. 25 (prog. 5+000) per una lunghezza complessiva di **5.000 metri**.

Le Verifiche di Stabilità sono state condotte con l'ausilio dei programmi GeoStudio, utilizzando due moduli differenti: SEEP/W e SLOPE/W.

- SEEP/W è un programma a elementi finiti che modella il flusso dell'acqua nel terreno; può modellare problemi in condizioni stazionarie o transitorie;
- SLOPE/W permette di eseguire delle verifiche di stabilità globale del terreno; le verifiche di stabilità globale sono state eseguite impiegando un modello semplificato che approssima le reali condizioni in sito, la geometria del sistema e le proprietà dei materiali: il modello si basa sulla teoria dell'equilibrio limite ed i terreni vengono caratterizzati attraverso un legame costitutivo rigido-plastico con il criterio di Mohr-Coulomb.

Nella presente relazione vengono condotte le verifiche di Stabilità in configurazione "Stato di progetto" ovvero con il rivestimento di progetto messo in opera per tutta la lunghezza del canale (14.600m), le sezioni scelte come rappresentative del Canale sono le seguenti:

Sezione 18 prog. 3+600	Tratto litrostratigrafico T1
Sezione 35 prog. 7+000	Tratto litrostratigrafico T2-T3
Sezione 65 prog. 13+000	Tratto litrostratigrafico T4



Nella presente relazione si dimostra inoltre che la messa in opera del rivestimento nel tratto individuato come Secondo Stralcio non consente il funzionamento a scolmatore in quanto nel tratto di valle (II tronco) il livello massimo raggiungibile per garantire la stabilità delle sponde è pari a +10,90.

Dal momento che tale valore è inferiore al livello minimo del Po di Volano, è evidente che il funzionamento a scolmatore non è consentito.

Si potrà tuttavia utilizzare l'opera come canale irriguo innalzando il livello nel I Tronco dagli attuali +11,80 a +12,30 m.

Le verifiche di stabilità denominate di "Secondo Stralcio Funzionale" sono state condotte sulle sezioni 35 e 65 in condizioni "Stato di fatto" con parametri derivanti dalle indagini geotecniche.

Verifiche di Stabilità in condizioni di Progetto:

Dal momento che si sono osservati fenomeni di instabilità e sifonamento e che il paramento è stato giudicato non sufficientemente impermeabile, si è proceduto con l'esecuzione di una back analysis per determinare i parametri operativi da adottare per le verifiche di Stabilità in configurazione di Progetto.

Per le verifiche di Stabilità si è proceduto come segue:

- Modellazione delle sezioni 18-35-65 in configurazione Stato di Fatto (SDF) con la stratigrafia da modello litostratigrafico;
 - Ai terreni sono stati affidati i parametri geotecnici e di permeabilità desunti dalle indagini;
 - Al rivestimento esistente sono stati affidati i parametri del terreno sottostante;
- Verifiche di stabilità dei corpi arginali nella condizione di funzionamento a scolmatore con livelli idraulici di Progetto (SDP) e filtrazione in regime stazionario (tempo infinito);
- Verifiche di stabilità dei corpi arginali nella condizione di rapido svuotamento dal livello precedente e filtrazione in regime stazionario (tempo infinito);
- Back Analysis: Riduzione progressiva dei parametri geotecnici fino all'ottenimento di superfici di scivolamento con FS prossimo ad 1;
- Modellazione delle sezioni 18-35-65 in configurazione Stato di Progetto (SDP) con la stratigrafia da modello litostratigrafico, filtrazione in regime transitorio, parametri operativi da Back Analysis ed rivestimento del canale in diverse configurazioni illustrate nei capitoli successivi.

Verifiche di Stabilità in condizioni Secondo Stralcio:

Per le verifiche di Stabilità si è proceduto come segue:

- Modellazione delle sezioni 18-35-65 in configurazione Stato di Fatto (SDF) con la stratigrafia da modello litostratigrafico;
 - Ai terreni sono stati affidati i parametri geotecnici e di permeabilità desunti dalle indagini;



- Al rivestimento esistente sono stati affidati i parametri del terreno sottostante;
- Verifiche di stabilità dei corpi arginali nella condizione di funzionamento a canale irriguo con livelli idraulici “irriguo 2°STR” e filtrazione in regime stazionario (tempo infinito);
- Verifiche di stabilità dei corpi arginali nella condizione di rapido svuotamento dal livello precedente e filtrazione in regime stazionario (tempo infinito).

Livelli adottati nel calcolo

	Sezione 18	Sezione 35	Sezione 65
Irriguo SDF	11.80 m	11.80 m	10.90 m
Irriguo 2° STR	12.30 m	12.30 m	10.90 m
Irriguo SDP	12.80 m	12.80 m	11.90 m
Scolmatore SDP	12.90 m	12.80 m	12.70 m



6.2 Back Analysis per la determinazione dei parametri operativi

Per procedere con le verifiche precedentemente descritte è necessario individuare dei parametri geotecnici operativi, partendo da quelli ricavati con la campagna di indagini e riportati nella Relazione Geotecnica.

Poiché nel corso degli anni si sono verificati diversi problemi di instabilità arginale si è proceduto con la determinazione dei parametri operativi da adottare per la valutazione dell'intervento di progetto mediante un'analisi di Stabilità Globale in back analysis condotta su sezioni rappresentative dello stato di fatto.

I parametri geotecnici di partenza della back analysis sono quelli determinati dalle indagini in sito, e sono stati via via ridotti fino al raggiungimento del FS prossimo ad 1.

Le condizioni di carico ipotizzate in questa fase sono "di esercizio" dunque non sono presenti carichi accidentali e tutti i coefficienti moltiplicativi sono posti pari a 1.

State considerate tre sezioni tipologiche rappresentative dei principali tratti del canale.

Sezione 18 prog. 3+600	Tratto litrostratigrafico T1
Sezione 35 prog. 7+000	Tratto litrostratigrafico T2-T3
Sezione 65 prog. 13+000	Tratto litrostratigrafico T4

Diagramma di flusso Back Analysis:

Step 1:

	parametri geotecnici da Relazione Geotecnica
	Terreni saturi e flusso in condizioni stazionarie (tempo infinito)
0 – Condizione Iniziale	Canale vuoto e falda a p.c.
1 – Condizione Irrigua	Quota irrigua SDF
2 – Scolmatore	Transizione istantanea da quota irrigua SDF a quota scolmatore SDP
	Verifiche di stabilità globale paramenti arginali esterni
3 – Svuotamento rapido	Svuotamento istantaneo da quota scolmatore SDP
	Verifiche di stabilità globale paramenti arginali interni

Step 2:

	parametri geotecnici da Back Analysis
	Terreni saturi e flusso in condizioni stazionarie (tempo infinito)
0 – Condizione Iniziale	Canale vuoto e falda a p.c.
1 – Condizione Irrigua	Quota irrigua SDF
2 – Scolmatore	Transizione istantanea da quota irrigua SDF a quota scolmatore SDP



Verifiche di stabilità globale paramenti arginali esterni

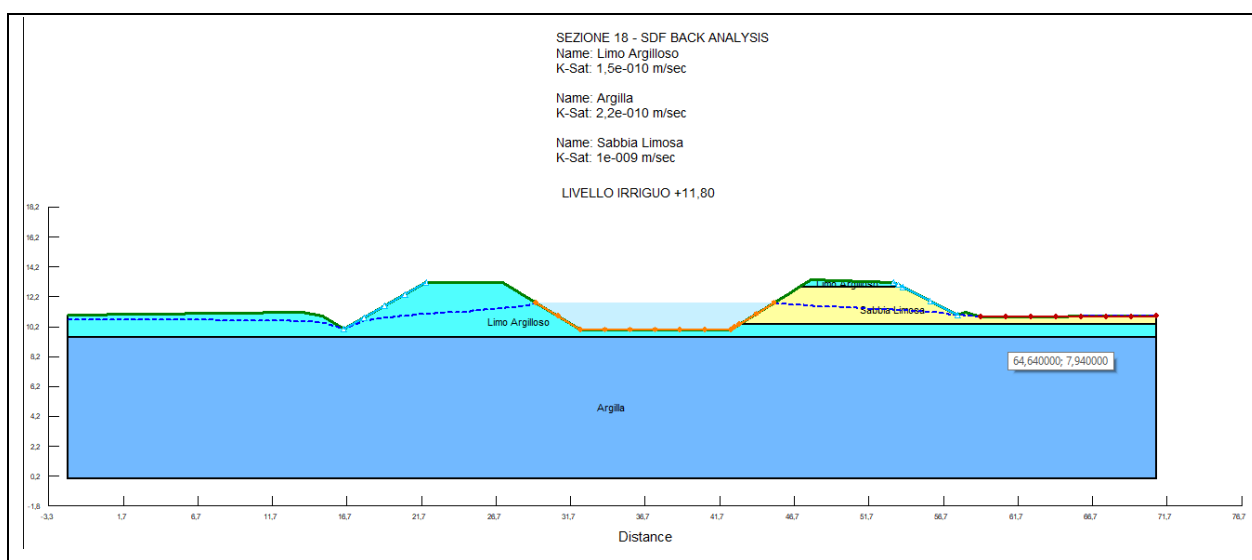
3 – Svuotamento rapido

Svuotamento istantaneo da quota scolmatore SDP

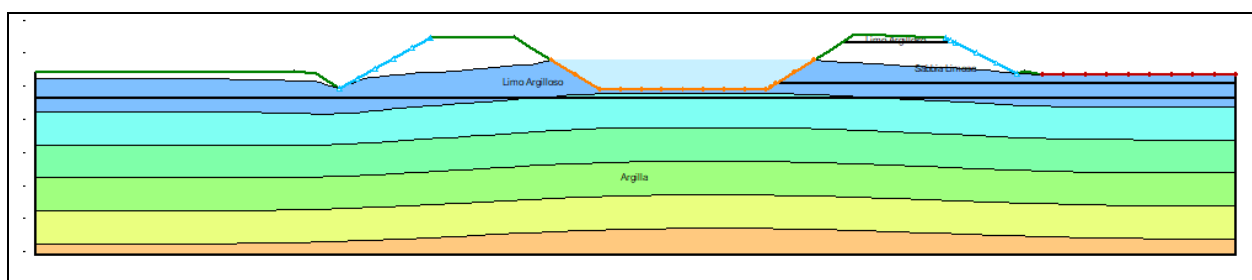
Verifiche di stabilità globale paramenti arginali interni

Di seguito si riportano i risultati delle analisi condotte.

Sezione 18 Livello irriguo +11.80 – definizione materiali

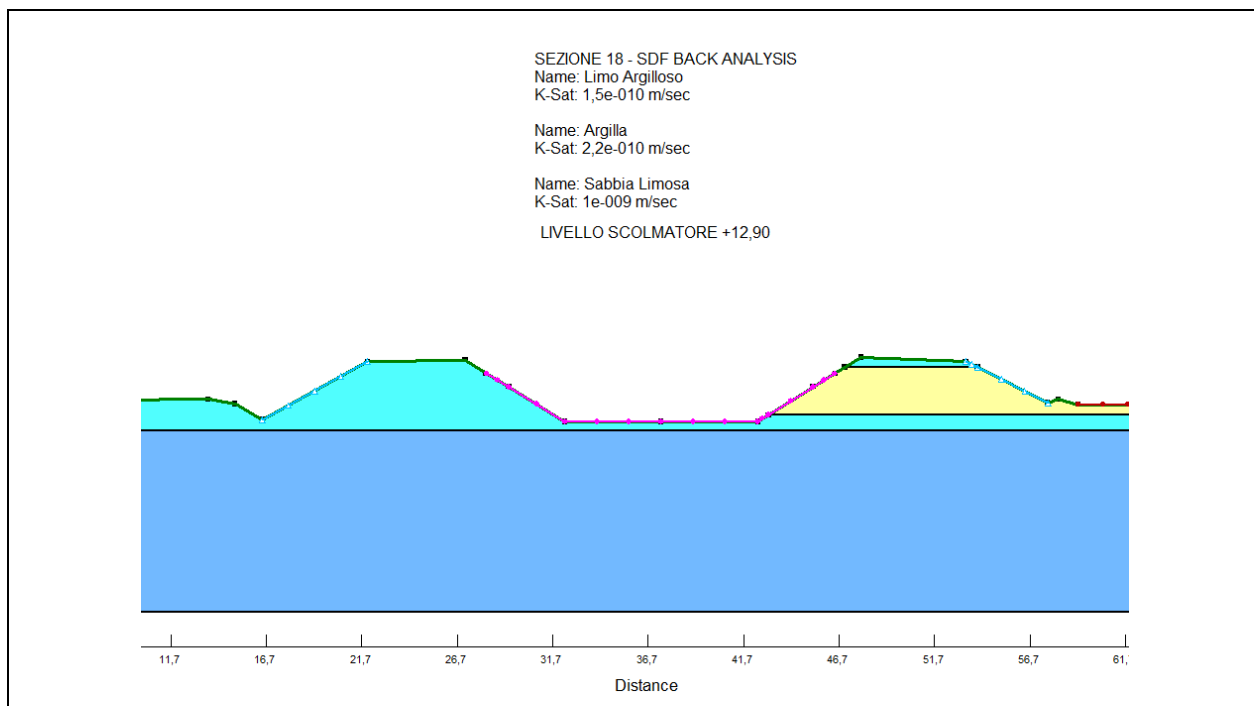


Sezione 18 Livello irriguo +11.80 – pressioni totali positive

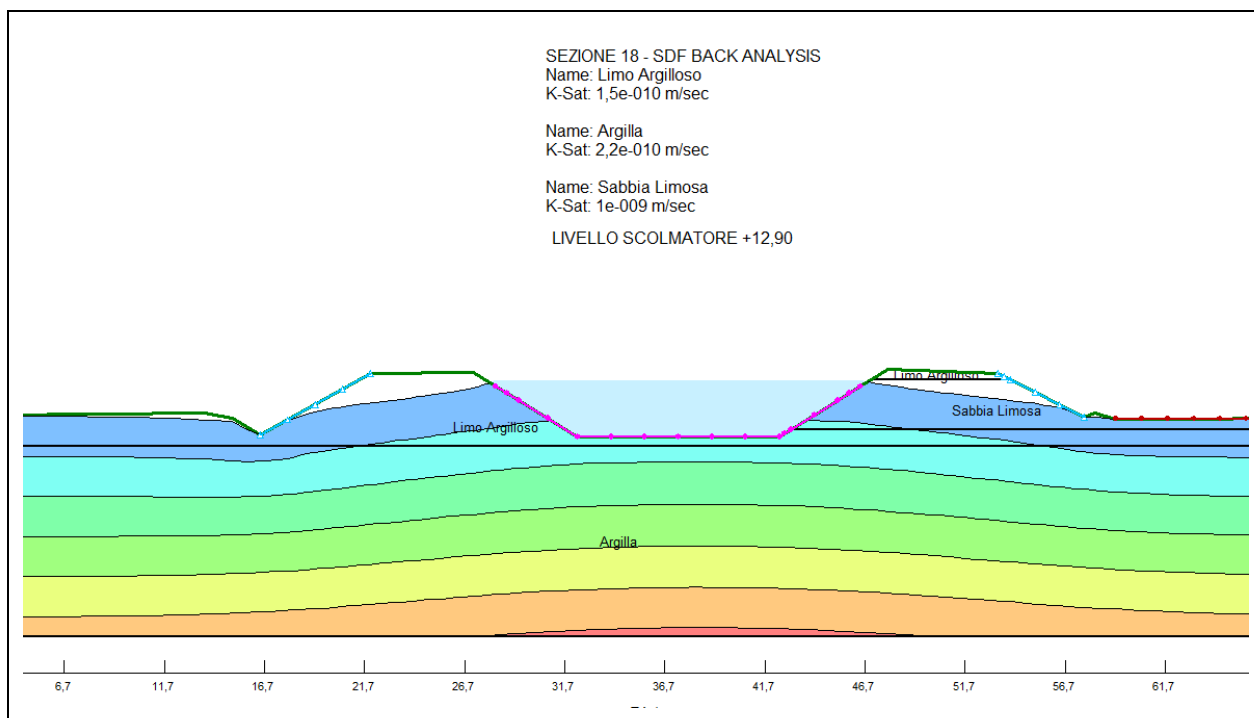




Sezione 18 Livello scolmatore +12.90 – definizione materiali

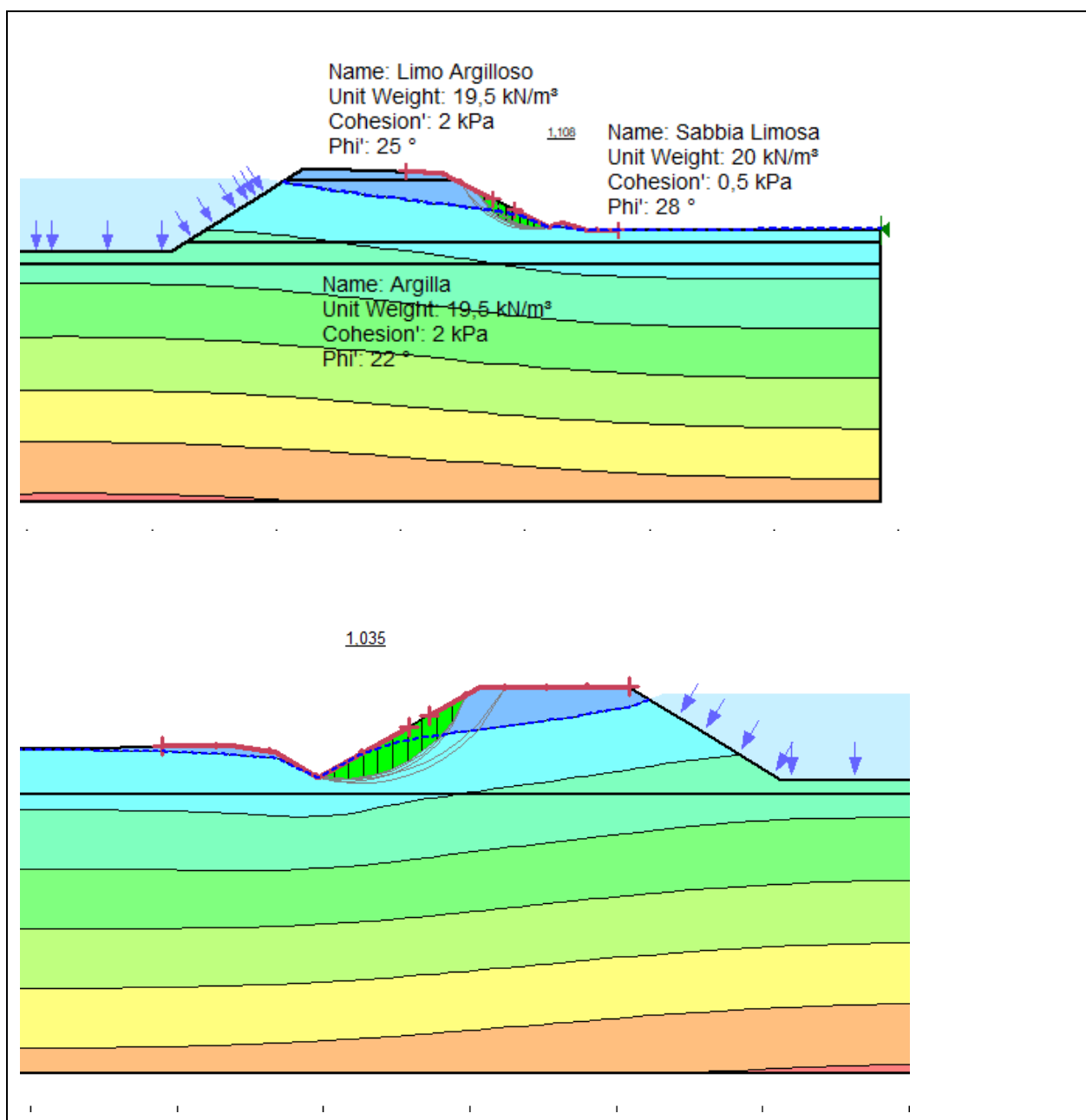


Sezione 18 Livello scolmatore +12.90 – pressioni totali positive



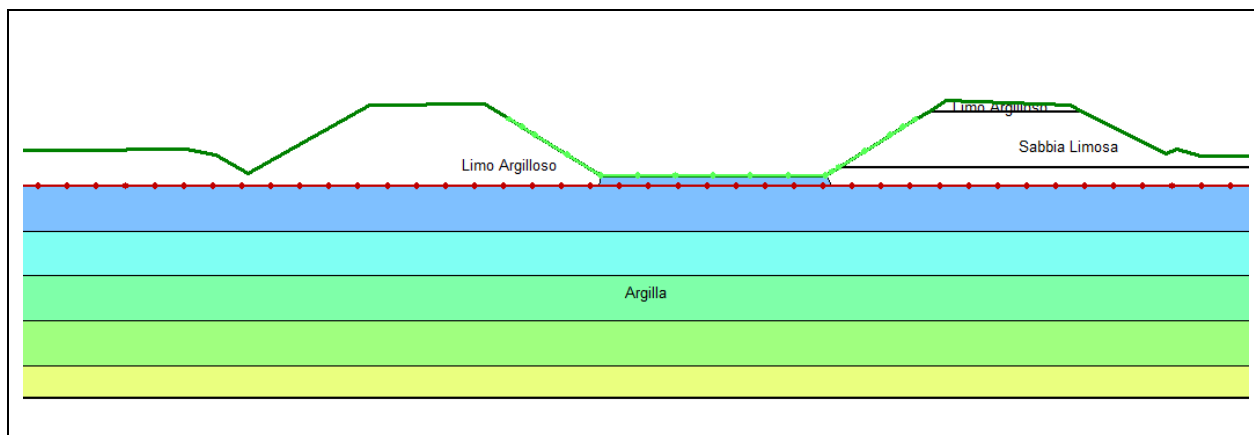


Sezione 18 Livello scolmatore +12.90 – verifiche di stabilità paramenti esterni

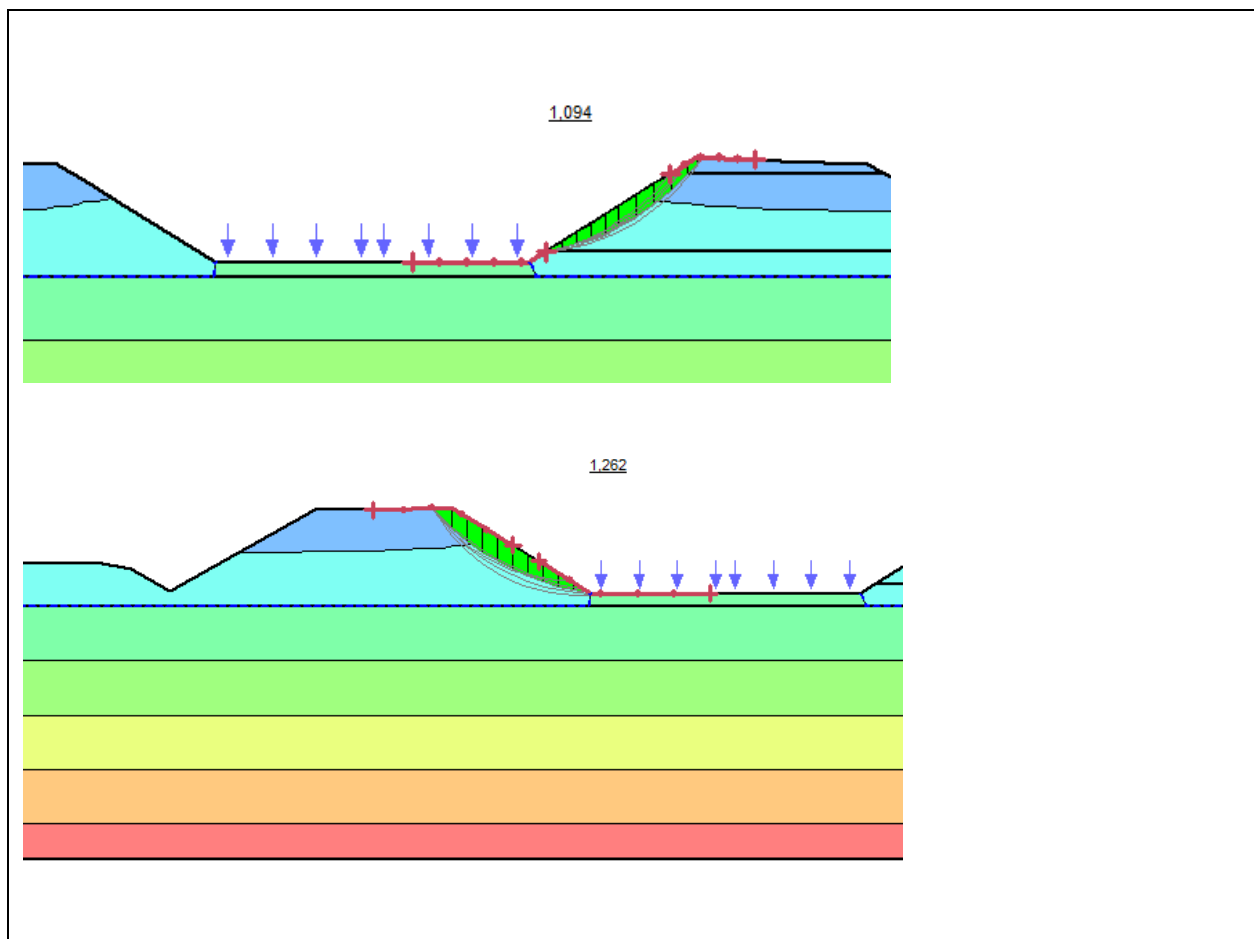




Sezione 18 Livello scolmatore +12.90 – rapido svuotamento – pressioni totali positive

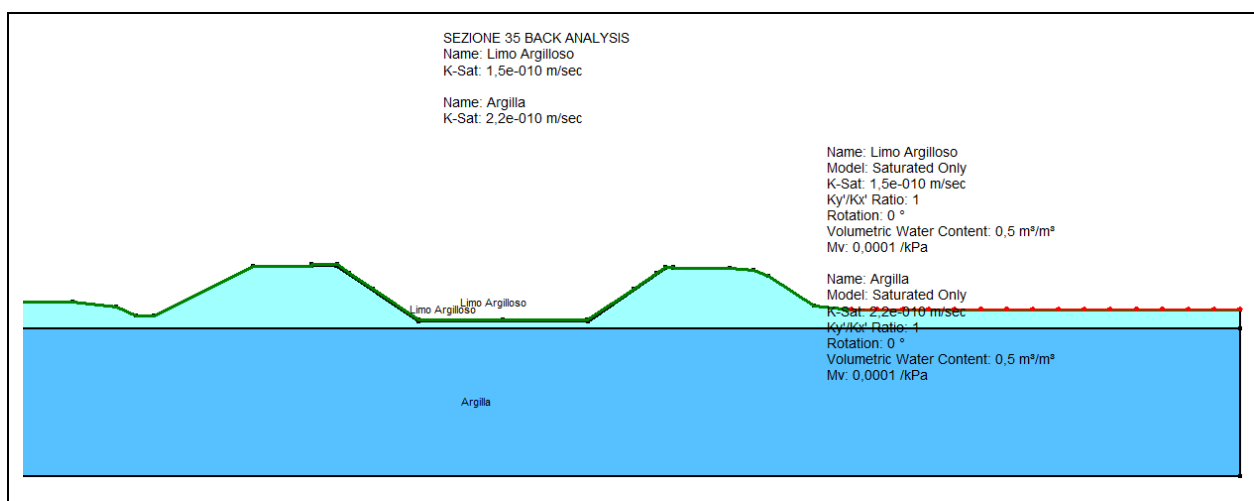


Sezione 18 rapido svuotamento – verifiche di stabilità paramenti esterni

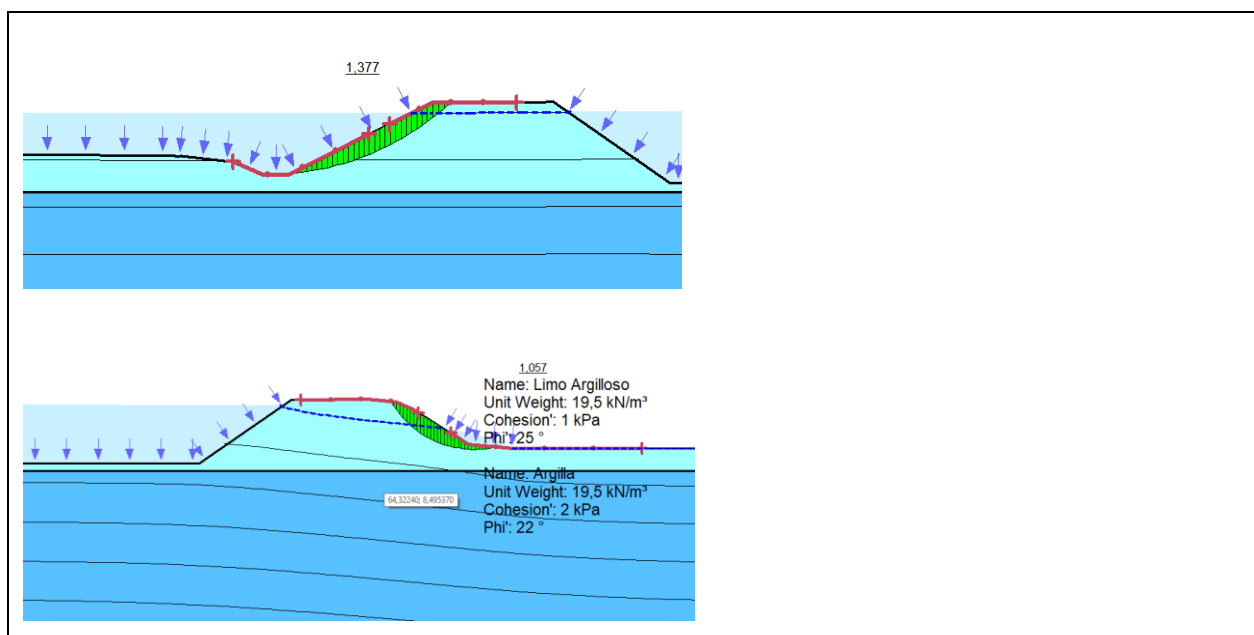




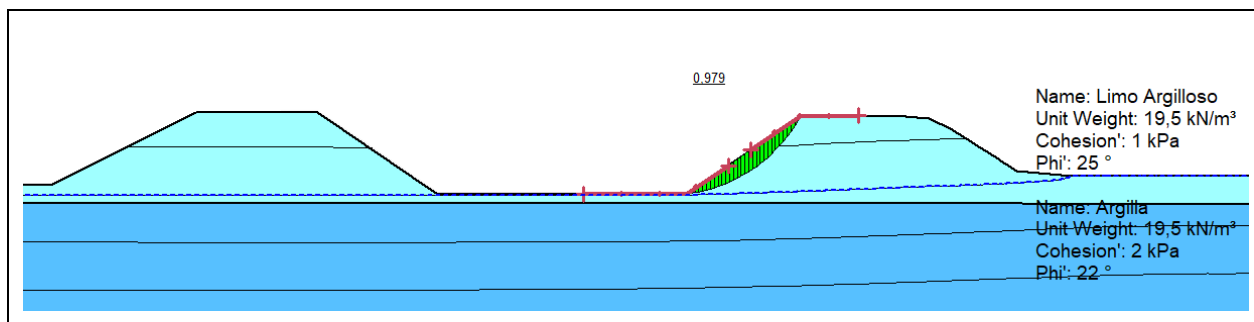
Sezione 35 definizione dei parametri

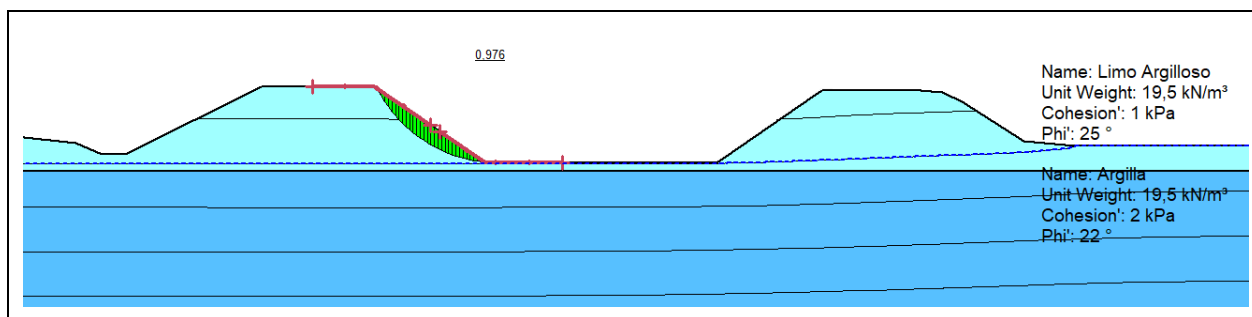


Sezione 35 da liv. Irriguo sdf +11.80 a scolmatore +12.80 verifiche di stabilità paramenti esterni

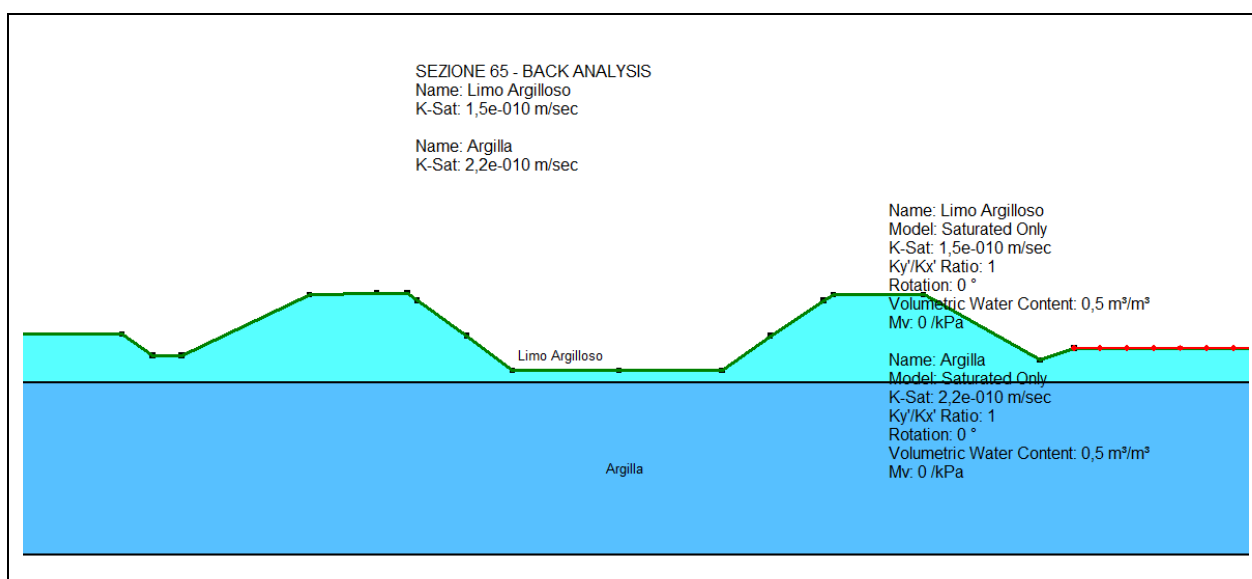


Sezione 35 rapido svuotamento verifiche di stabilità paramenti interni

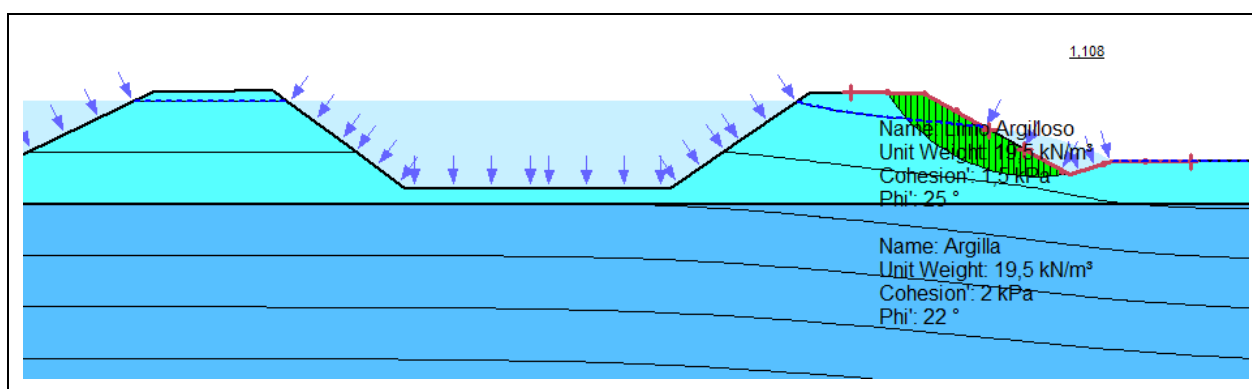


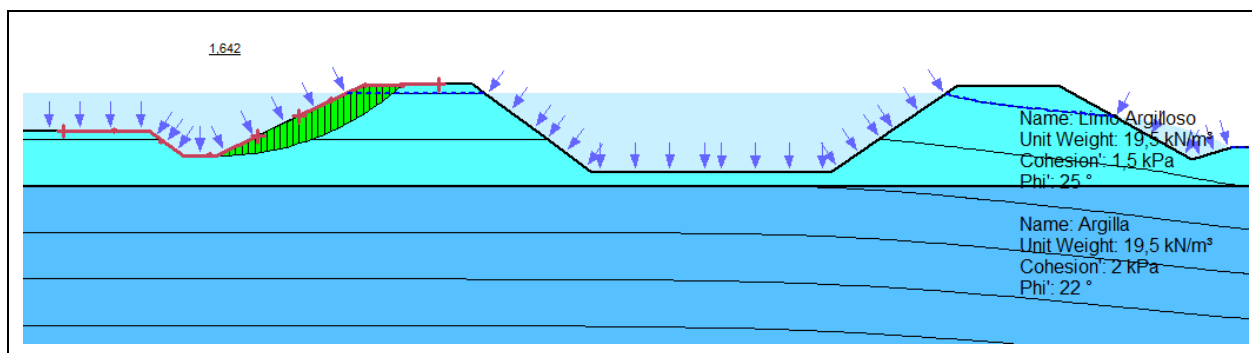


Sezione 65 definizione dei parametri

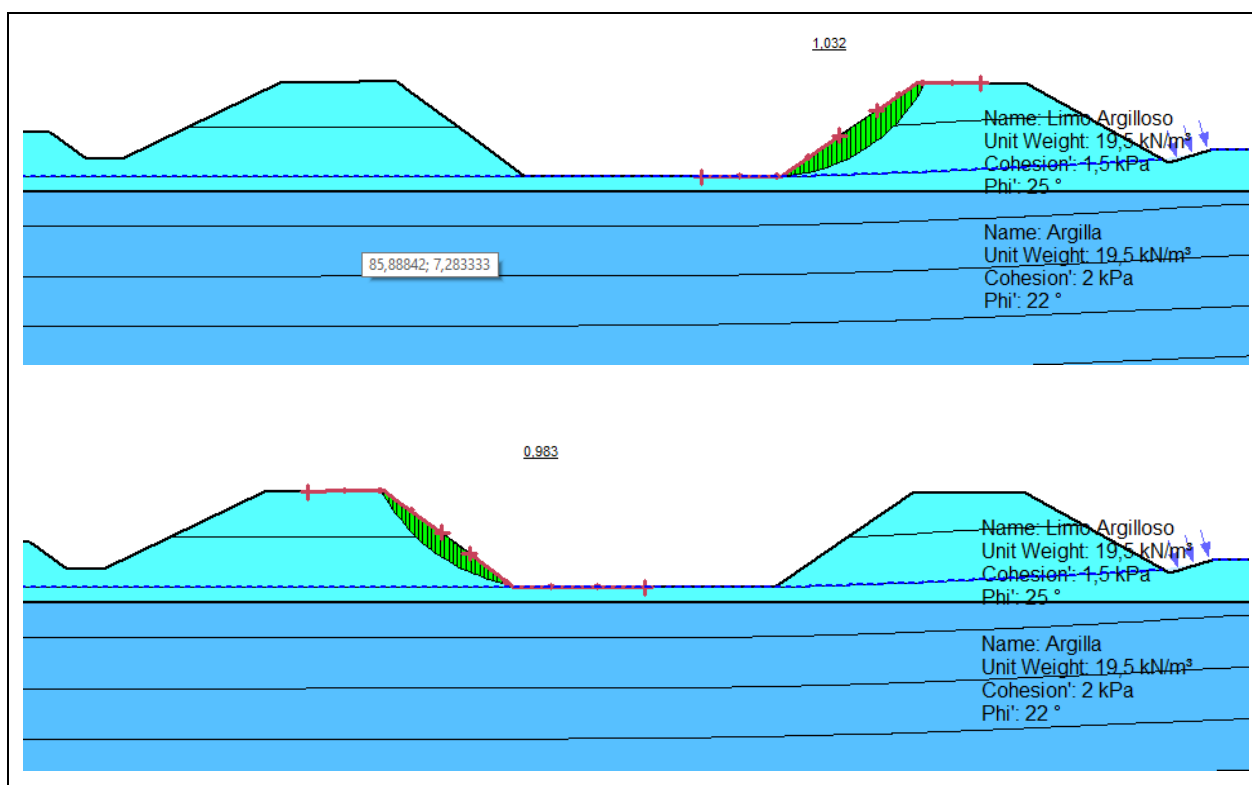


Sezione 65 da liv. Irriguo sdf +10.90 a scolmatore +12.70 verifiche di stabilità paramenti esterni





Sezione 65 rapido svuotamento verifiche di stabilità paramenti interni





6.3 Analisi dello stato di progetto

Nelle verifiche in condizioni di stato di progetto si è tenuto conto della presenza del materassino di calcestruzzo sp. 10cm messo in opera sopra l'esistente. Il calcestruzzo è stato trattato come un terreno equivalente assegnando le seguenti caratteristiche fisiche dedotte dal criterio di rottura di Mohr – Coulomb con un rapporto tra resistenza a compressione e resistenza a trazione pari a $m=1/10$ (tipico di calcestruzzi e rocce) e per un calcestruzzo con resistenza a compressione (in termini di tensioni efficaci) pari a $\sigma_c=9.75$ MPa. La permeabilità è quella propria del calcestruzzo SCC:

$$\gamma = 24 \text{ kN/mc}$$

$$c' = 1580 \text{ kPa}$$

$$\phi' = 54^\circ$$

$$k = 3,1 \times 10^{-12}$$

E' evidente che questa schematizzazione non tiene conto che il calcestruzzo è un materiale poroso ma incompressibile pertanto non varia il suo indice dei vuoti e le sue dimensioni durante il regime transitorio di filtrazione. Tuttavia si ritiene accettabile allo scopo di verificare la stabilità globale. Maggiori approfondimenti sono stati fatti nello studio di filtrazione e sifonamento presentato nel prosieguo della relazione.

Per le sezioni di progetto le verifiche di stabilità sono state condotte in condizioni statiche SLU secondo l'Approccio 1 Combinazione 2 (A2+M2+R2) come indicato dal D.M. 14/01/2018.

Le sezioni di progetto rappresentative analizzate sono le seguenti:

Sezione 18 prog. 3+600	Tratto litrostratigrafico T1
Sezione 35 prog. 7+000	Tratto litrostratigrafico T2-T3
Sezione 65 prog. 13+000	Tratto litrostratigrafico T4

6.3.1 Analisi dei carichi

I carichi agenti sulle sezioni in condizioni di stato di progetto sono le seguenti:

Pesi propri *Calcolati automaticamente dal programma*

6.3.2 Combinazione di carico

In riferimento al capitolo 6.8 delle NTC 2018 le verifiche di sicurezza agli SLU devono essere effettuate secondo la Combinazione 2 dell'Approccio 1 (A2+M2+R2) tenendo conto dei seguenti coefficienti di sicurezza.

Tab. 6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni

	Effetto	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_Q	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

⁽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}

Tab. 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ_γ	γ_γ	1,0	1,0

Tab. 6.8.I - Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti e di fronti di scavo

COEFFICIENTE	R2
γ_R	1,1



6.3.3 Risultati delle analisi in condizioni di stato di progetto

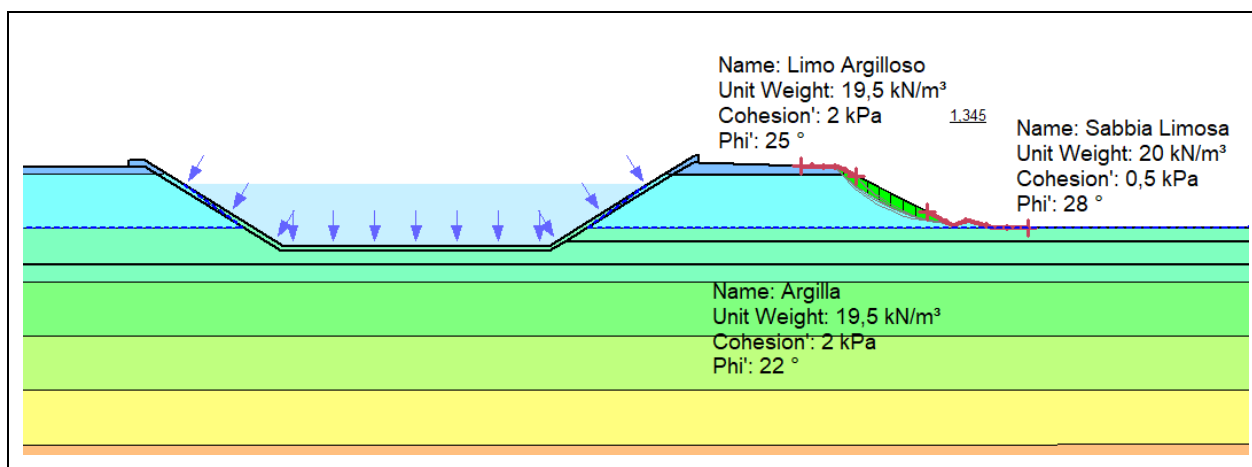
In condizioni di stato di progetto, oltre all'inserimento del nuovo materassino di rivestimento in calcestruzzo, sono stati aggiornati i livelli idrici di progetto in condizioni irrigue e come scolmatore. Le analisi di stabilità sono state condotte con la filtrazione in regime transitorio, periodo di osservazione 10 giorni.

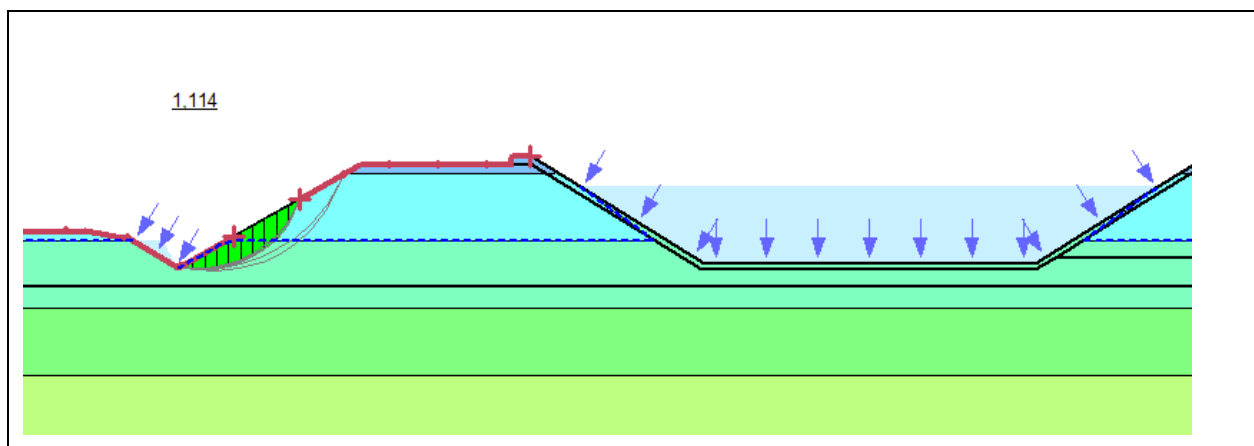
Diagramma di flusso Verifiche di Stabilità Globale – Stato di Progetto:

Verifica:	parametri geotecnici da Back Analysis
	Terreni NON saturi e flusso in regime transitorio
0 – Condizione Iniziale	Canale vuoto e falda a p.c.
1 – Condizione Irrigua	Quota irrigua sdp
2 – Scolmatore	Transizione istantanea da quota irrigua sdp a quota scolmatore sdp Verifiche di stabilità globale paramenti arginali esterni
3 – Svuotamento rapido	Svuotamento istantaneo da quota scolmatore sdp Verifiche di stabilità globale paramenti arginali interni

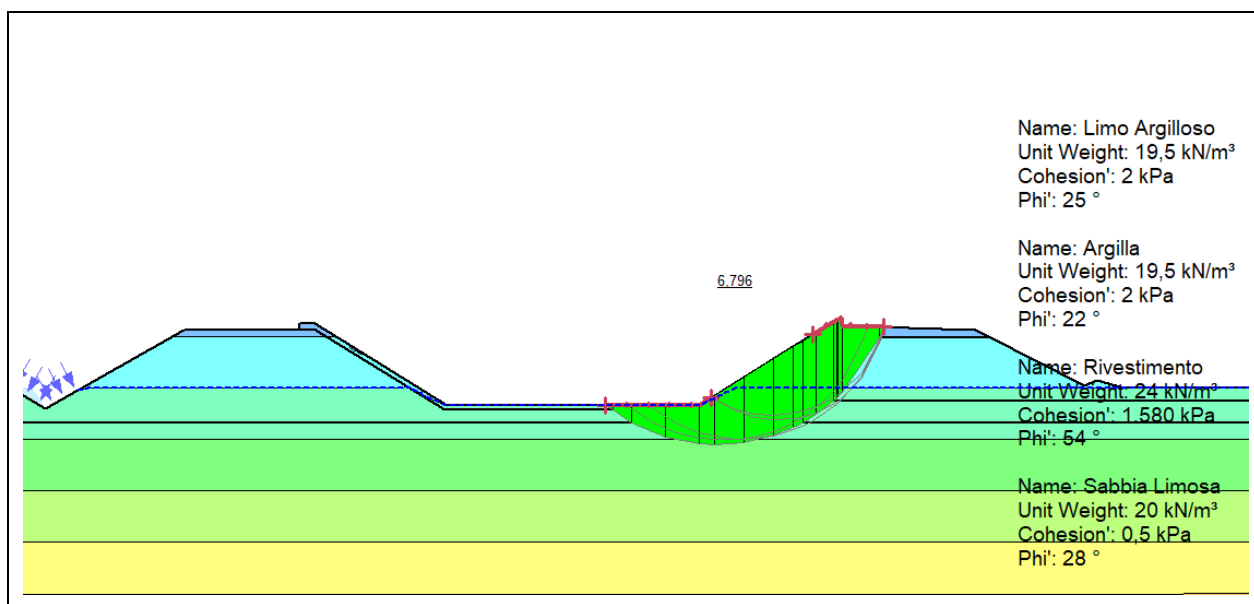
Di seguito si riportano i risultati delle analisi condotte.

Sezione 18 – Funzionamento Irriguo sdp e Scolmatore 12.90 – verifica di stabilità paramenti esterni

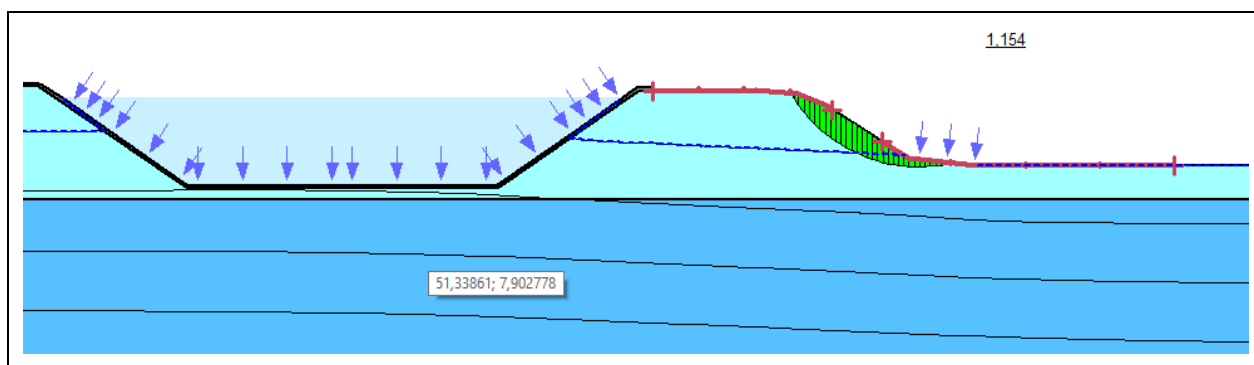


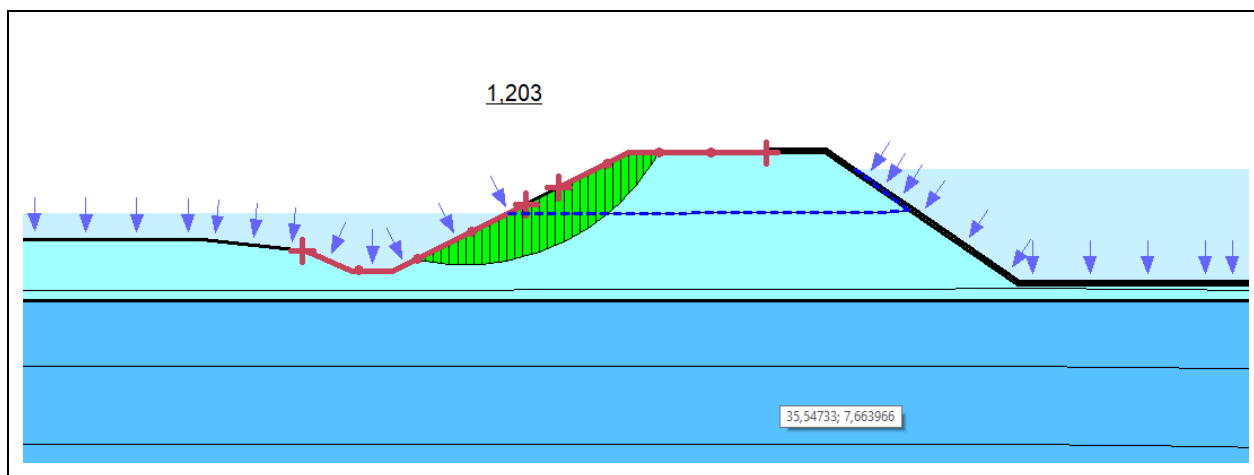


Sezione 18 – Rapido svuotamento – verifica di stabilità paramenti interni

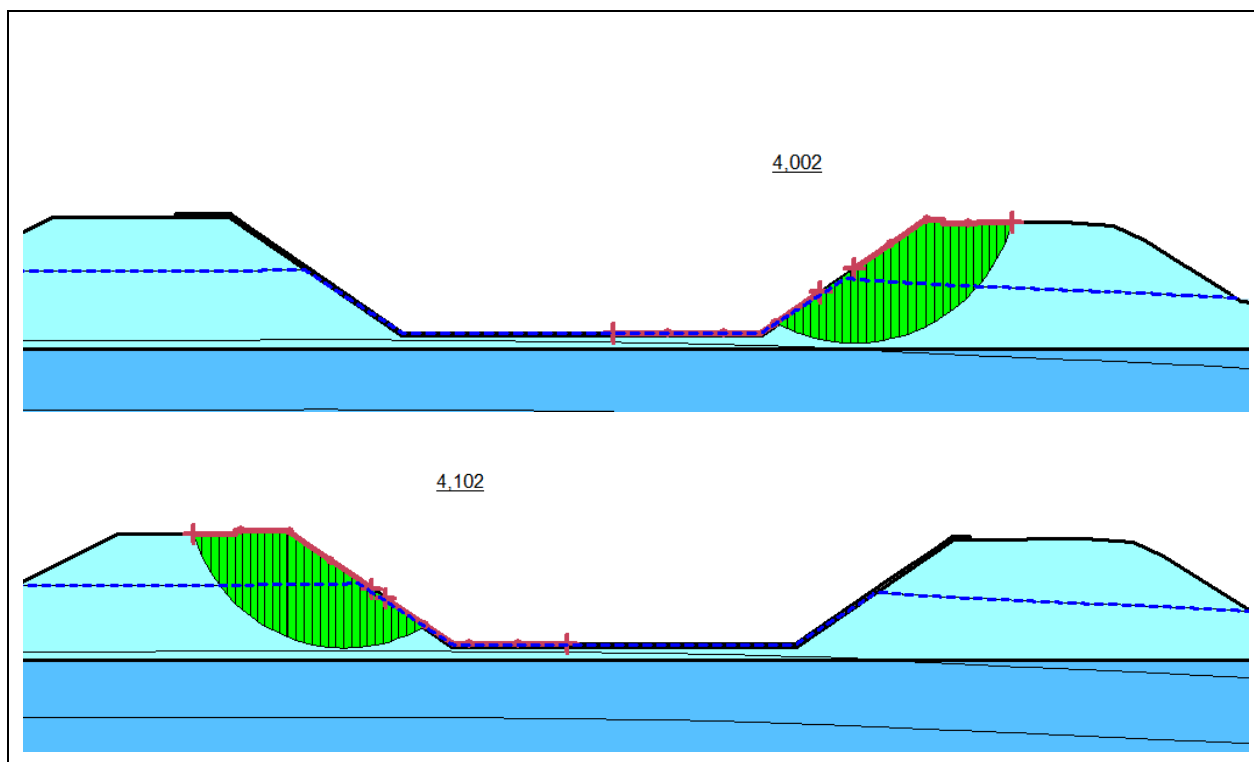


Sezione 35 – Funzionamento Irriguo sdp e Scolmatore 12.80 – verifica di stabilità paramenti esterni



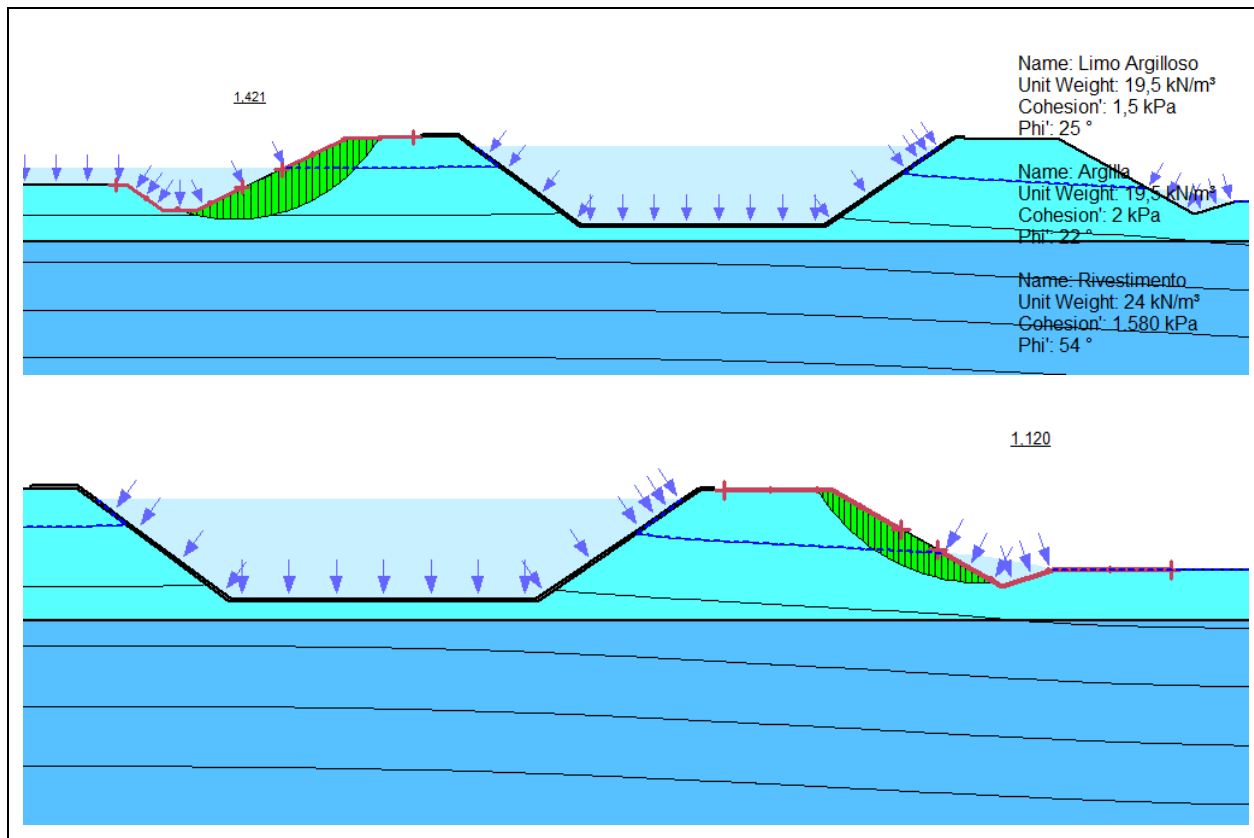


Sezione 35 – Rapido svuotamento – verifica di stabilità paramenti interni

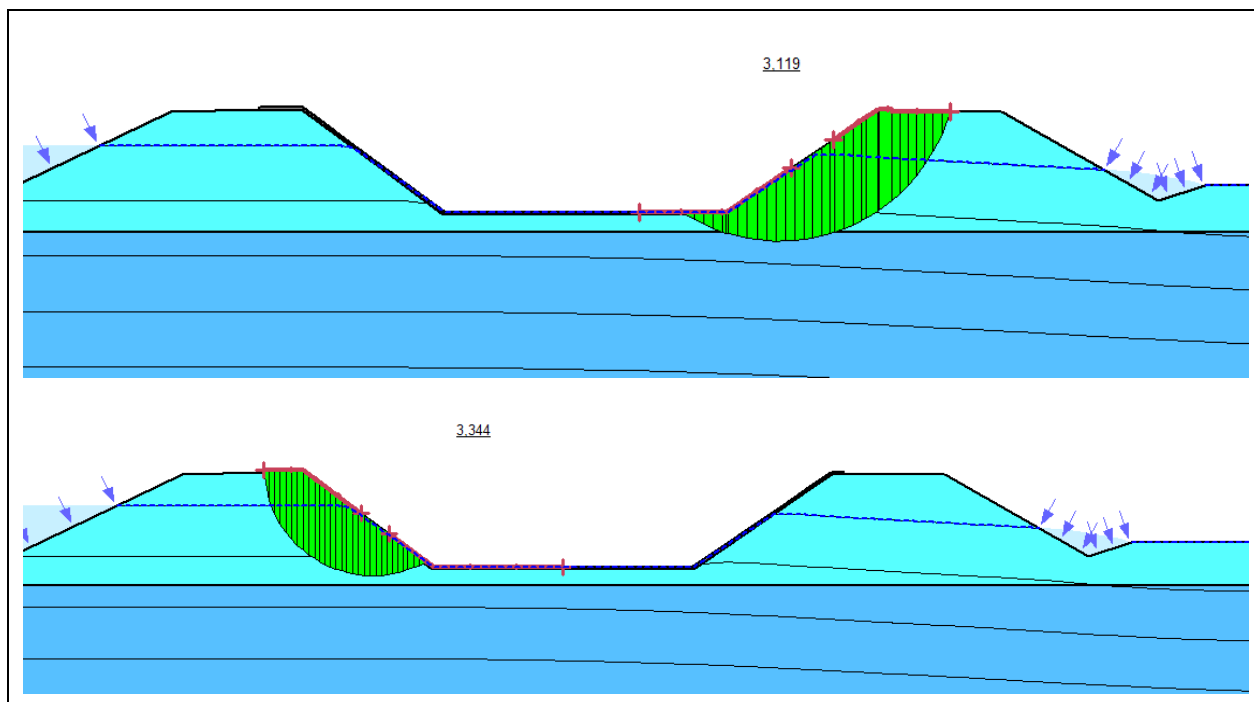




Sezione 65 – Funzionamento da irriguo sdf +11.90 a Scolmatore +12.70– verifica di stabilità paramenti esterni



Sezione 65 – Rapido svuotamento – verifica di stabilità paramenti interni





Le Verifiche di Stabilità Globale condotte dimostrano che il paramento di progetto è in grado di fornire stabilità ai paramenti arginali lato canale anche in condizioni di rapido svuotamento.

Le condizioni transitorie dimostrano che il grado di impermeabilità del rivestimento migliora la stabilità dei paramenti arginali lato campagna in quanto abbassa la linea di flusso nel corpo arginale.

Attenzione che per lo svuotamento canale saranno successivamente fornite delle indicazioni operative conseguenti alle verifiche di sollevamento/galleggiamento.



6.4 Analisi di stabilità in configurazione “Secondo Stralcio”

Il Secondo Stralcio Funzionale prevede di intervenire dall'opera di modulazione di San Nicolò (prog. 0+000) alla Sez. 25 (prog. 5+000) per una lunghezza complessiva di **5.000 metri**.

Nelle verifiche di stabilità si è tenuto conto della presenza del rivestimento esistente sp. 15cm sia in termini di resistenza che di permeabilità.

Il calcestruzzo è stato trattato come un terreno equivalente assegnando le seguenti caratteristiche fisiche dedotte dal criterio di rottura di Mohr – Coulomb con un rapporto tra resistenza a compressione e resistenza a trazione pari a $m=1/10$ (tipico di calcestruzzi e rocce) e per un calcestruzzo con resistenza a compressione (in termini di tensioni efficaci) pari a $\sigma_c=9.75$ MPa.

Dal momento che il rivestimento esistente è scarsamente impermeabile, si è assunta una permeabilità tipica di una sabbia fine/limo:

$$\gamma = 24 \text{ kN/mc}$$

$$c' = 1580 \text{ kPa}$$

$$\phi' = 54^\circ$$

$$k = 1,5 \times 10^{-8}$$

E' evidente che questa schematizzazione non tiene conto che il calcestruzzo è un materiale poroso ma incompressibile pertanto non varia il suo indice dei vuoti e le sue dimensioni durante il regime transitorio di filtrazione. Tuttavia si ritiene accettabile allo scopo di verificare la stabilità globale. Maggiori approfondimenti sono stati fatti nello studio di filtrazione e sifonamento presentato nel prosieguo della relazione.

Le verifiche di stabilità sono state condotte in condizioni statiche SLU secondo l'Approccio 1 Combinazione 2 (A2+M2+R2) come indicato dal D.M. 14/01/2018.

Le sezioni analizzate sono quelle NON interessate dagli interventi del Secondo Stralcio Funzionale:

Sezione 35 prog. 7+000 Tratto litrostratigrafico T2-T3

Sezione 65 prog. 13+000 Tratto litrostratigrafico T4



6.4.1 Analisi dei carichi

I carichi agenti sulle sezioni in condizioni di stato di progetto sono le seguenti:

Pesi propri *Calcolati automaticamente dal programma*

6.4.2 Combinazione di carico

In riferimento al capitolo 6.8 delle NTC 2018 le verifiche di sicurezza agli SLU devono essere effettuate secondo la Combinazione 2 dell'Approccio 1 (A2+M2+R2) tenendo conto dei seguenti coefficienti di sicurezza.

Tab. 6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni

	Effetto	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(4)}$	Favorevole	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_Q	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

⁽⁴⁾ 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}

Tab. 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ_γ	γ_γ	1,0	1,0

Tab. 6.8.I - Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti e di fronti di scavo

COEFFICIENTE	R2
γ_R	1,1



6.4.3 Risultati delle analisi in condizioni di stato di progetto secondo stralcio funzionale

Le analisi di stabilità sono state condotte con i livelli idrici in condizioni irrigue imposti per il secondo stralcio funzionale. Le analisi di stabilità sono state condotte con la filtrazione in regime transitorio, periodo di osservazione 10 giorni.

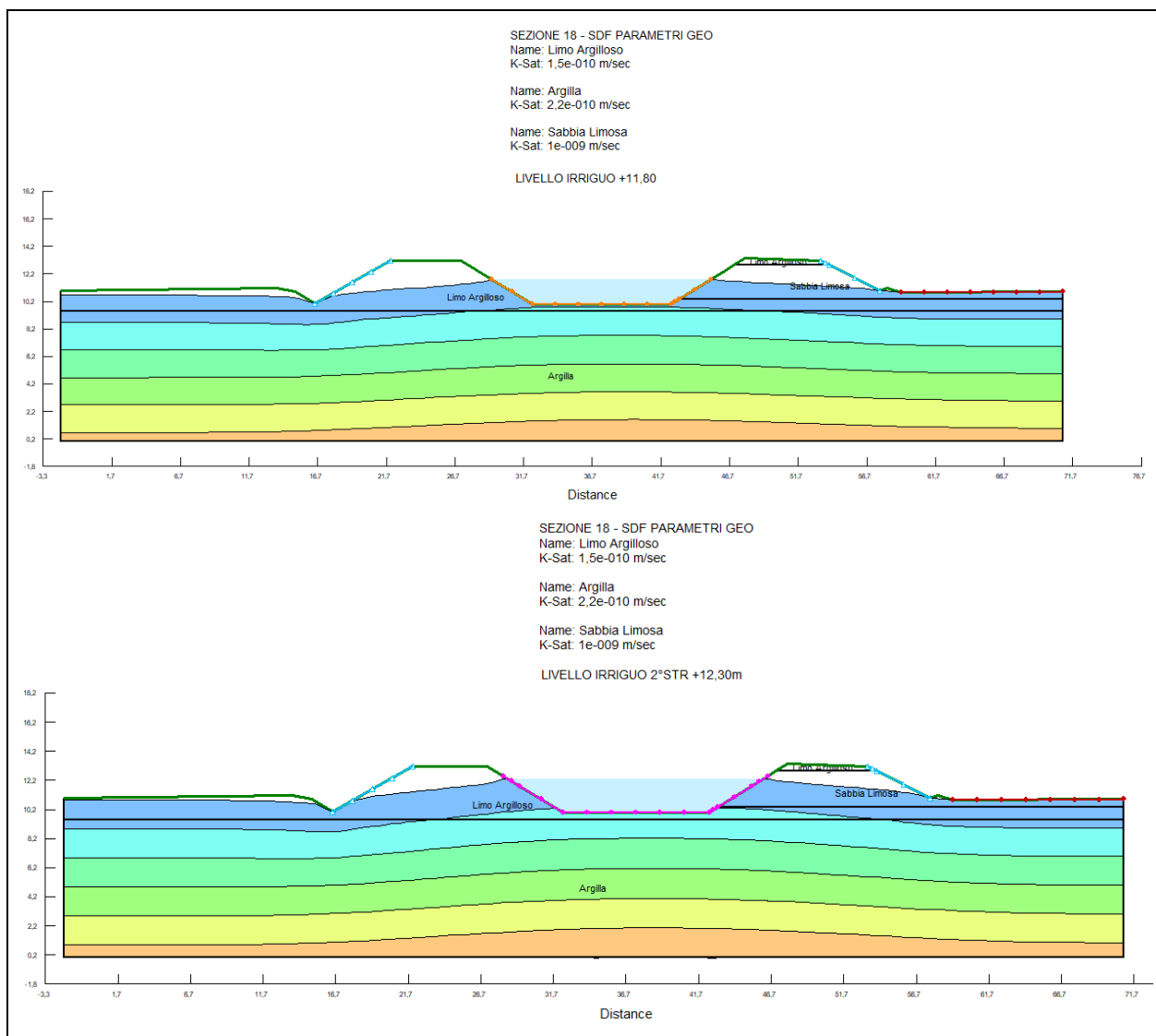
Diagramma di flusso Verifiche di Stabilità Globale – Stato di Progetto:

Verifica:	parametri geotecnici da modello litostratigrafico	
	Terreni parzialmente saturi e flusso in regime transitorio	
0 – Condizione Iniziale	Canale vuoto e falda a p.c.	
1 – Condizione Irrigua SDF	Quota irrigua SDF	Sez. 35 +11.80 Sez. 65 +10.90
2 – Condizione Irrigua 2°STR	Quota irrigua 2°STR	Sez. 35 +12.30 Sez. 65 +10.90
3 – Svuotamento rapido	Svuotamento istantaneo da quota irrigua 2° STR Verifiche di stabilità globale paramenti arginali interni	

Di seguito si riportano i risultati delle analisi condotte.

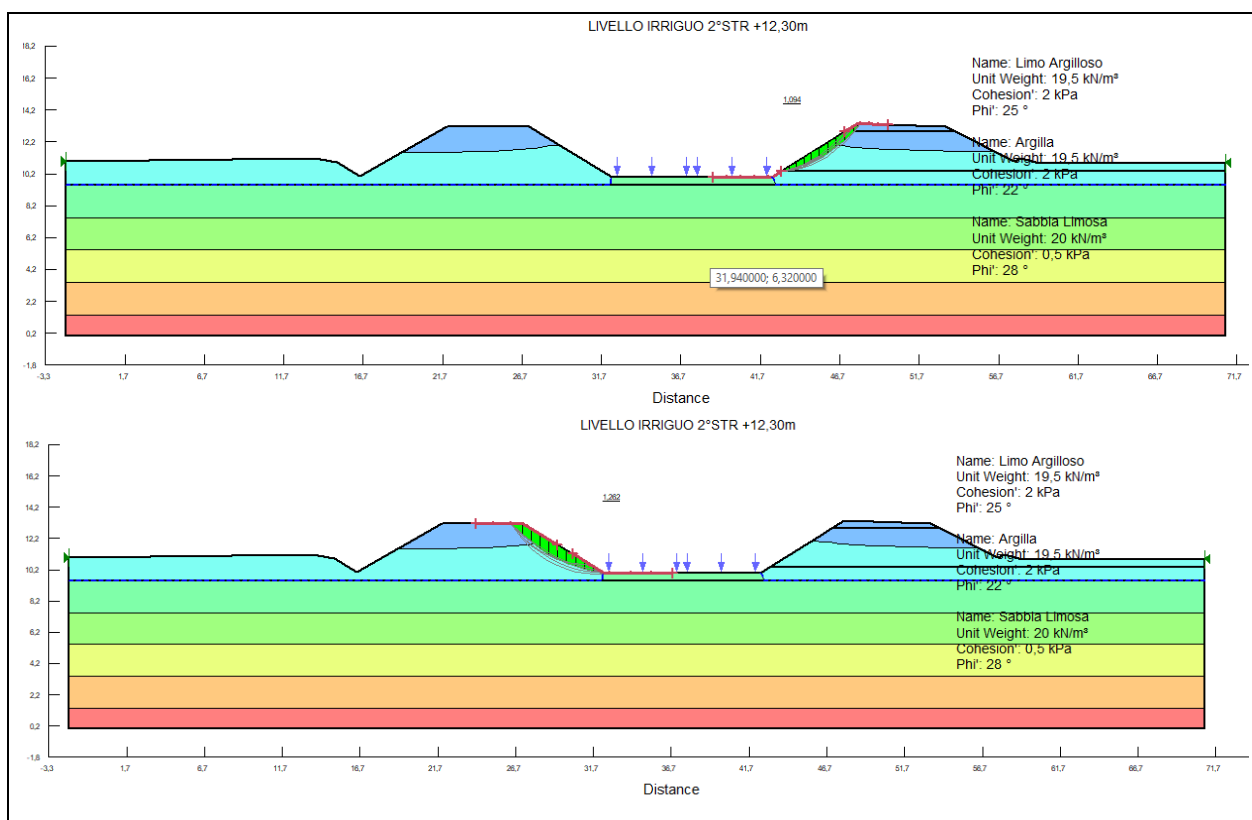


SEZ. 18 PARAMETRI E CONDIZIONI DI CARICO



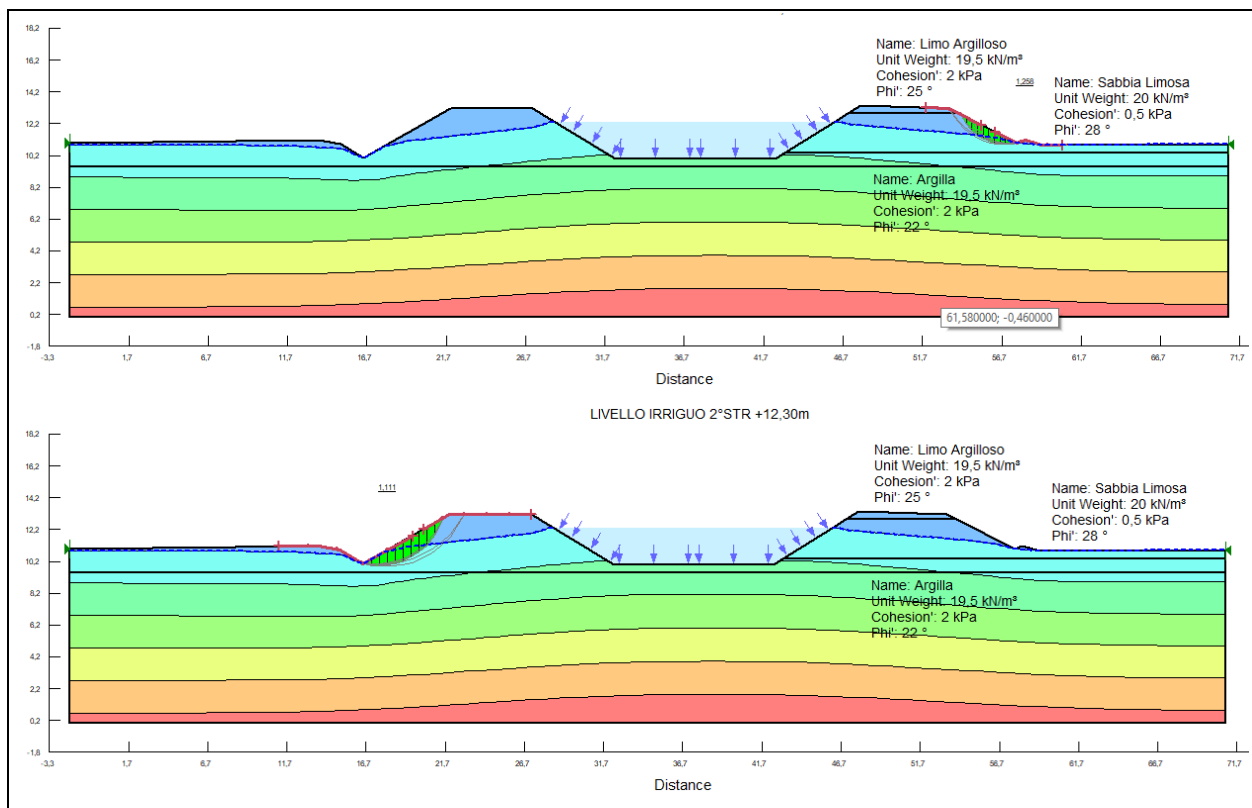


SVUOTAMENTO RAPIDO



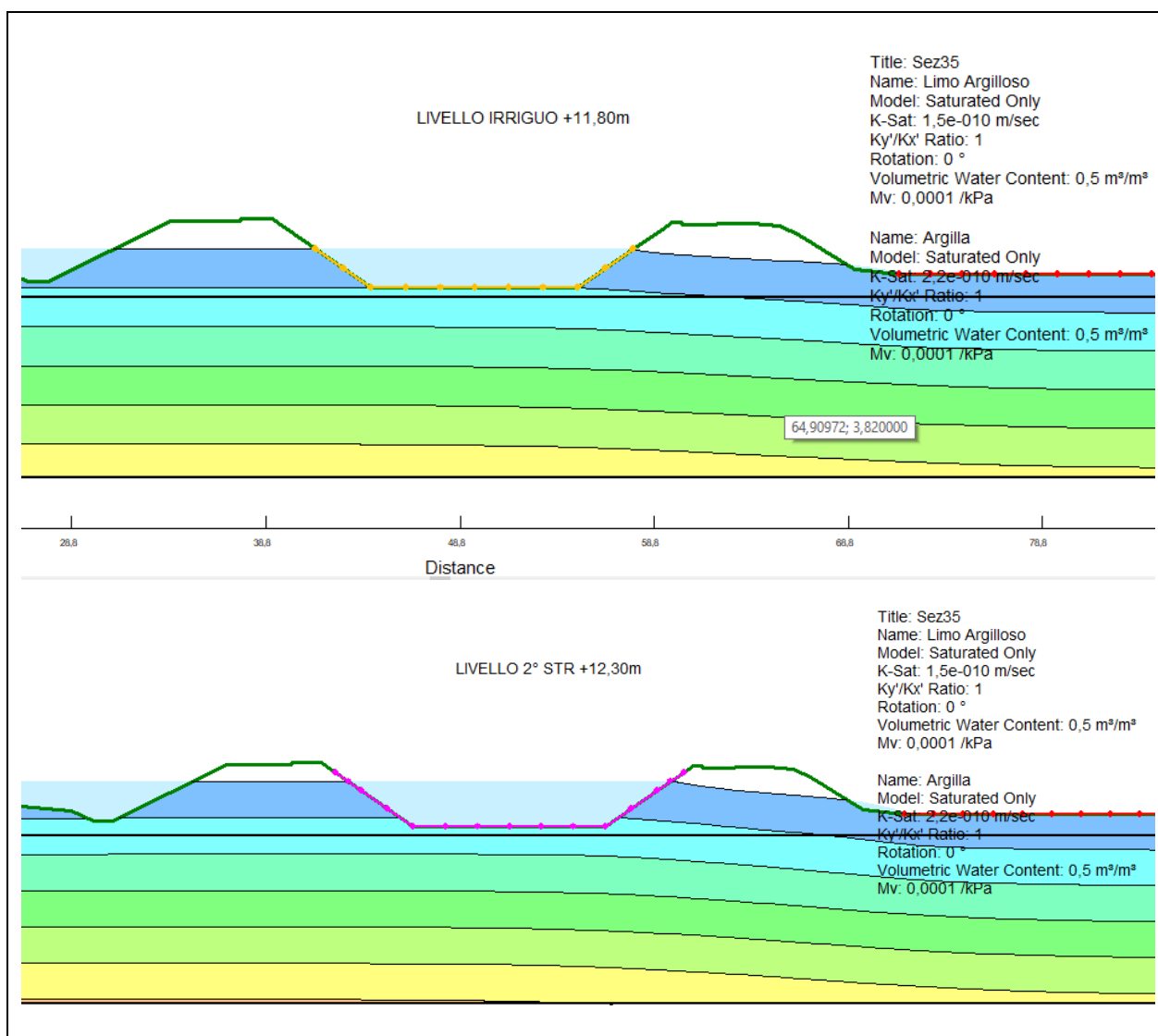


FILTRAZIONE



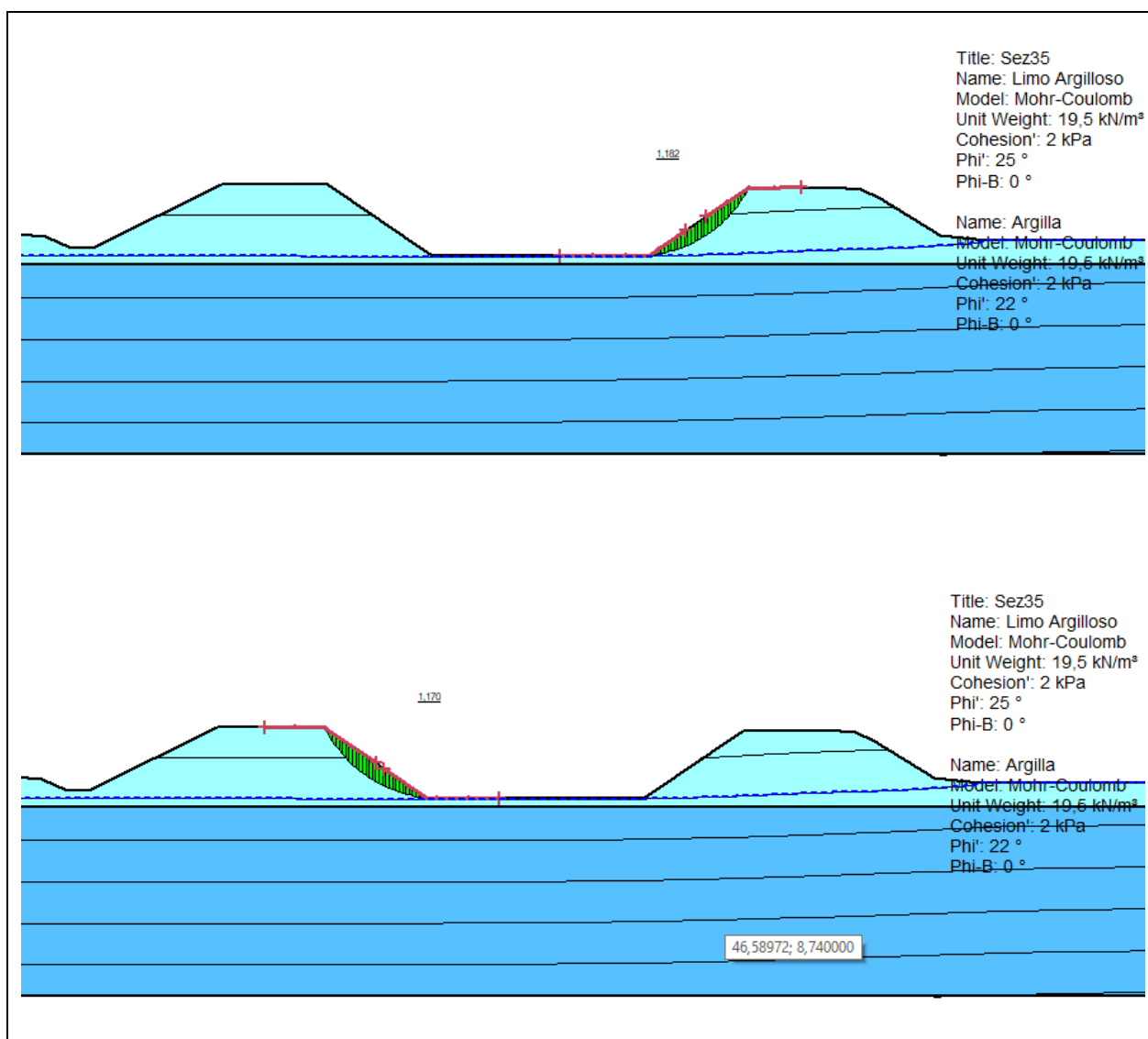


SEZ. 35 PARAMETRI E CONDIZIONI DI CARICO



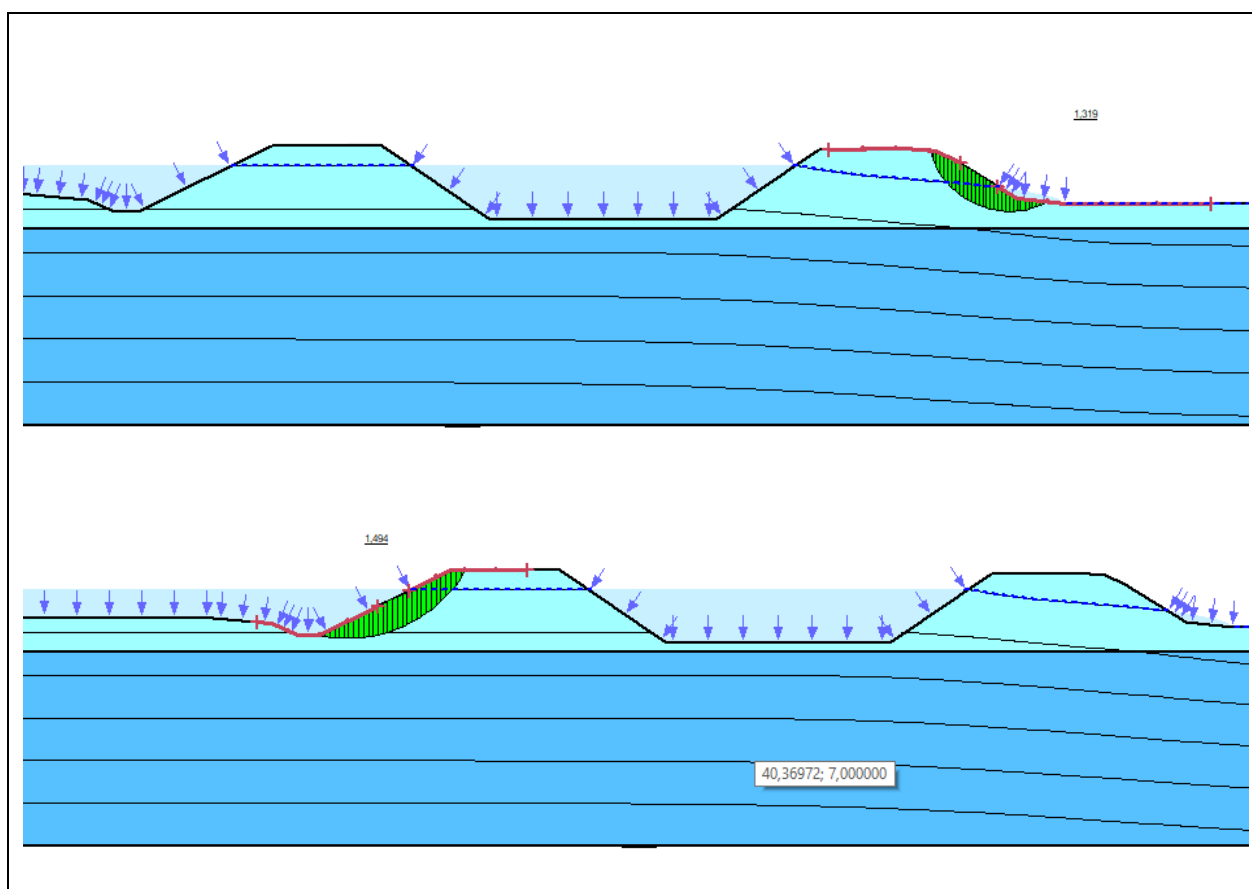


RAPIDO SVUOTAMENTO



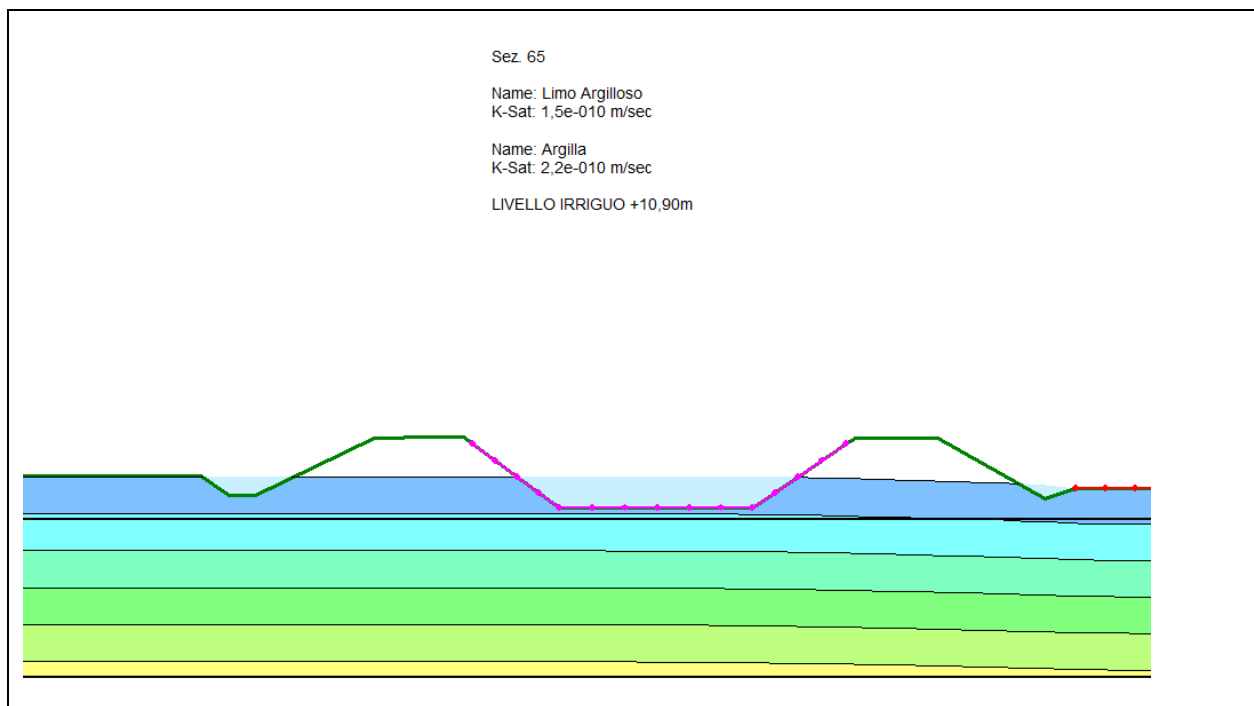


FILTRAZIONE

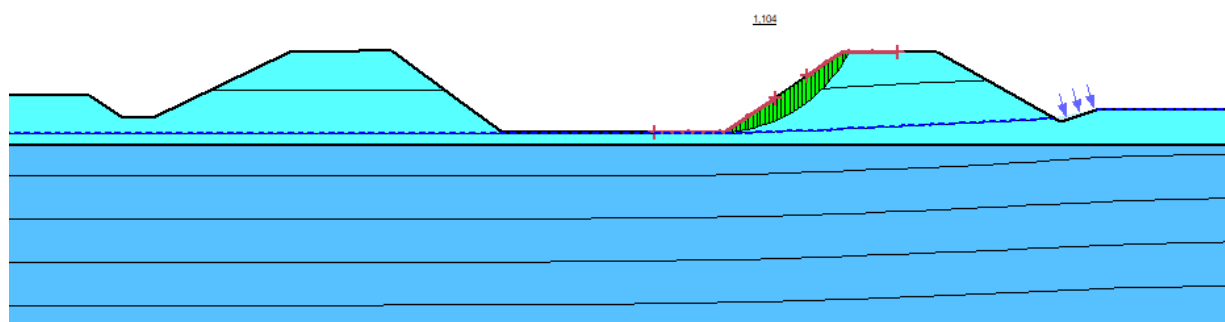




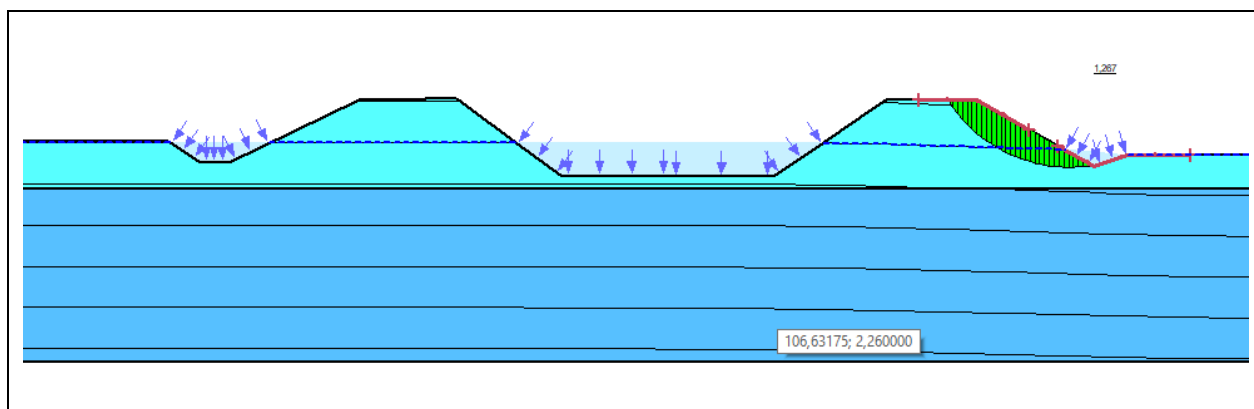
SEZ. 65 PARAMETRI E CONDIZIONI DI CARICO



RAPIDO SVUOTAMENTO



FILTRAZIONE





Le Verifiche di Stabilità Globale condotte dimostrano che il rivestimento esistente, sebbene con scarsa impermeabilità, nell'ipotesi che sia integro è in grado di fornire stabilità ai paramenti arginali lato canale anche in condizioni di rapido svuotamento con le limitazioni imposte ai livelli idrici nei due tronchi.

Attenzione che per lo svuotamento canale saranno successivamente fornite delle indicazioni operative conseguenti alle verifiche di sollevamento/galleggiamento.



7. VERIFICHE NEI CONFRONTI DEGLI STATI LIMITE ULTIMI IDRAULICI

L'opera deve essere verificata nei confronti di possibili stati limite di sollevamento e sifonamento.

A tal fine, nella valutazione delle pressioni interstiziali e delle quote piezometriche caratteristiche, si sono assunte 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 $V_{inst,d}$, ovverosia 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):

$$V_{inst,d} \leq G_{stb,d} + R_d$$

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

Nel caso in esame non ci sono elementi che possano sviluppare resistenza R_d (inclusioni, chiodi, pali, ecc.), pertanto si è fatto riferimento unicamente alle seguenti azioni:

G1: permanenti strutturali peso proprio rivestimento in calcestruzzo

G2: permanenti non strutturali favorevole peso proprio acqua interna al manufatto
sfavorevole sottospinta IDR della falda

Per le verifiche di stabilità al sollevamento, i relativi coefficienti parziali sulle azioni sono indicati nella Tab. 6.2.III delle NTC2018:

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

	Effetto	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	Sollevamento (UPL)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0,9
	Sfavorevole		1,1
Carichi permanenti $G_{2(D)}$	Favorevole	γ_{G2}	0,8
	Sfavorevole		1,5
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_{Qi}	0,0
	Sfavorevole		1,5

Le verifiche sono state condotte su 5 sezioni rappresentative del Canale, scelte tra quelle nelle quali si verificava la possibilità di un battente idraulico significativo in relazione alla posizione relativa tra il fondo canale ed il piano campagna.

In tutte le sezioni, a favore di sicurezza si è assunta la falda coincidente con piano campagna.

Le sezioni di calcolo sono le seguenti:

Sez. 6 prog. 1+200 assunta la configurazione da primo stralcio funzionale = rivest. esist.
Sez. 30 prog. 6+000 assunta la configurazione da primo stralcio funzionale = rivest. prog.
Sez. 50 prog. 10+000 assunta la configurazione da primo stralcio funzionale = rivest. prog.



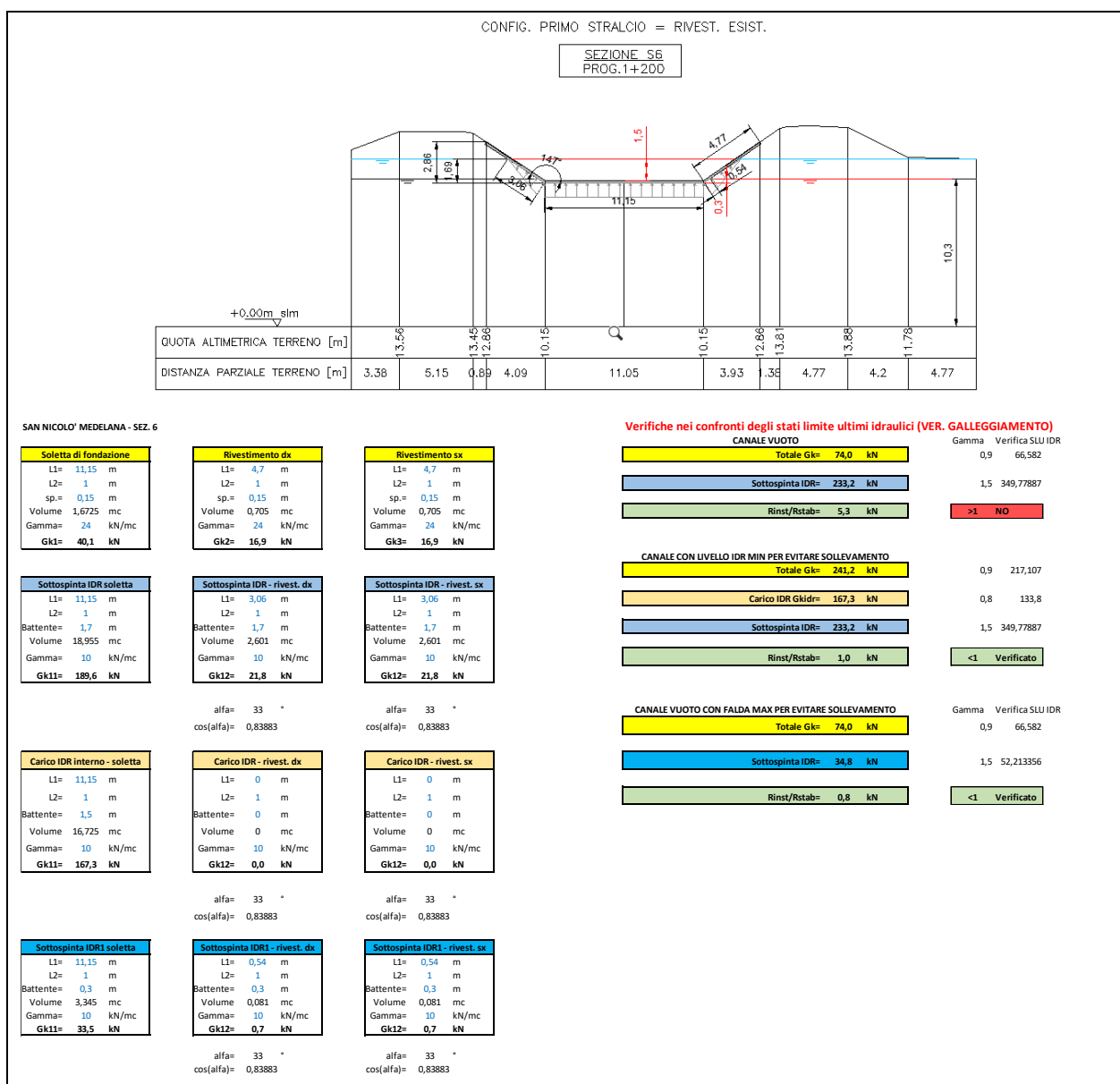
Sez. 65 prog. 13+000 assunta la configurazione da primo stralcio funzionale = rivest. prog.
Sez. 72 prog. 14+400 assunta la configurazione da primo stralcio funzionale = rivest. prog.

Come si vedrà nelle verifiche presentate di seguito, la verifica a galleggiamento con canale vuoto e falda a piano campagna non risulta mai soddisfatta.

Pertanto si è proceduto a verificare le seguenti 2 condizioni:

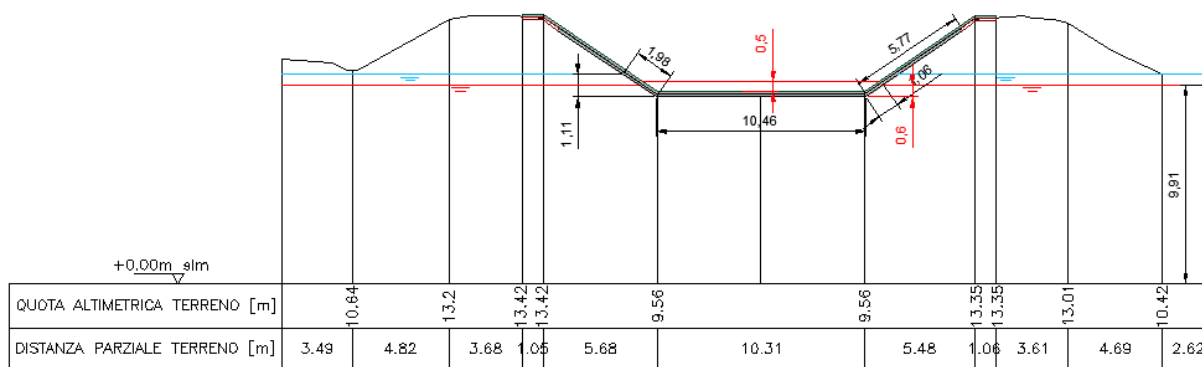
- Canale vuoto ricerca del valore minimo di acqua invasata nel canale per garantire la stabilità a sollevamento
- Canale vuoto ricerca del valore limite della falda che garantisca la stabilità a sollevamento

Di seguito le verifiche condotte





CONFIG. PROGETTO = RIVEST. PROG.

SEZIONE S50
PROG.10+000

SAN NICOLÒ MEDELANA - SEZ. 50

Soletta di fondazione	
L1=	10,46 m
L2=	1 m
sp.=	0,25 m
Volume	2,615 mc
Gamma=	24 kN/mc
Gk1=	62,8 kN

Rivestimento dx	
L1=	5,77 m
L2=	1 m
sp.=	0,25 m
Volume	1,4425 mc
Gamma=	24 kN/mc
Gk2=	34,6 kN

Rivestimento sx	
L1=	5,77 m
L2=	1 m
sp.=	0,25 m
Volume	1,4425 mc
Gamma=	24 kN/mc
Gk3=	34,6 kN

Sottospinta IDR soletta	
L1=	10,46 m
L2=	1 m
Battente=	1,11 m
Volume	11,6106 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk11=	116,1 kN

Sottospinta IDR - rivest. dx	
L1=	1,98 m
L2=	1 m
Battente=	1,11 m
Volume	1,0989 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk12=	9,2 kN

Sottospinta IDR - rivest. sx	
L1=	1,98 m
L2=	1 m
Battente=	1,11 m
Volume	1,089 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk12=	9,1 kN

alfa= 33 °
cos(alfa)= 0,83883alfa= 33 °
cos(alfa)= 0,83883

Carico IDR interno - soletta	
L1=	10,46 m
L2=	1 m
Battente=	0,5 m
Volume	5,23 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk11=	52,3 kN

Carico IDR - rivest. dx	
L1=	0 m
L2=	1 m
Battente=	0 m
Volume	0 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk12=	0,0 kN

Carico IDR - rivest. sx	
L1=	0 m
L2=	1 m
Battente=	0 m
Volume	0 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk12=	0,0 kN

alfa= 33 °
cos(alfa)= 0,83883alfa= 33 °
cos(alfa)= 0,83883

Sottospinta IDR1 soletta	
L1=	10,46 m
L2=	1 m
Battente=	0,6 m
Volume	6,276 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk11=	62,8 kN

Sottospinta IDR1 - rivest. dx	
L1=	1,06 m
L2=	1 m
Battente=	0,6 m
Volume	0,318 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk12=	2,7 kN

Sottospinta IDR1 - rivest. sx	
L1=	1,06 m
L2=	1 m
Battente=	0,6 m
Volume	0,318 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk12=	2,7 kN

alfa= 33 °
cos(alfa)= 0,83883alfa= 33 °
cos(alfa)= 0,83883

Verifiche nei confronti degli stati limite ultimi idraulici (VER. GALLEGGIAMENTO)

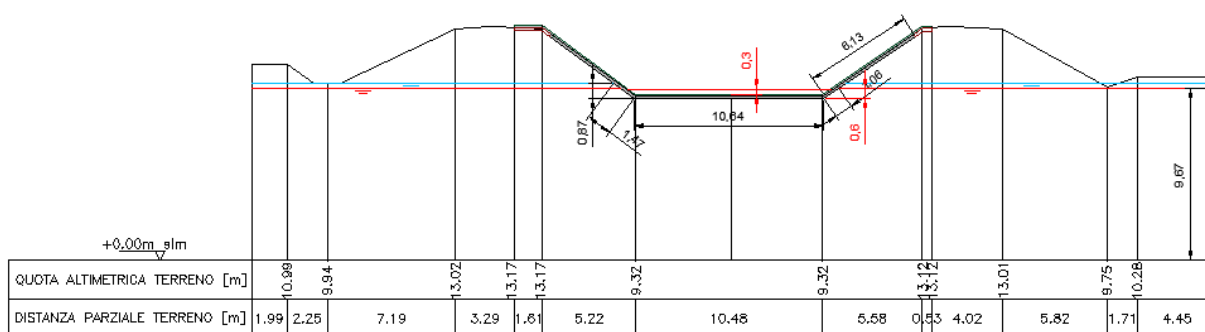
CANALE VUOTO		Gamma	Verifica SLU IDR
Totale Gk=	132,0 kN	0,9	118,8
Sottospinta IDR=	134,5 kN	1,5	201,6881
Rinst/Rstab=	1,7 kN	>1	NO

CANALE CON LIVELLO IDR MIN PER EVITARE SOLLEVAMENTO		Gamma	Verifica SLU IDR
Totale Gk=	184,3 kN	0,9	165,87
Carico IDR Gkid=	52,3 kN	0,8	41,84
Sottospinta IDR=	134,5 kN	1,5	201,6881
Rinst/Rstab=	1,0 kN	<1	Verificato

CANALE VUOTO CON FALDA MAX PER EVITARE SOLLEVAMENTO		Gamma	Verifica SLU IDR
Totale Gk=	132,0 kN	0,9	118,8
Sottospinta IDR=	68,1 kN	1,5	102,1424
Rinst/Rstab=	0,9 kN	<1	Verificato



CONFIG. PROGETTO = RIVEST. PROG.

SEZIONE S65
PROG.13+000

SAN NICOLÒ MEDELANA - SEZ. 65

Soletta di fondazione	
L1=	10,64 m
L2=	1 m
sp.=	0,25 m
Volume	2,66 mc
Gamma=	24 kN/mc
Gk1=	63,8 kN

Rivestimento dx	
L1=	6,13 m
L2=	1 m
sp.=	0,25 m
Volume	1,5325 mc
Gamma=	24 kN/mc
Gk2=	36,8 kN

Rivestimento sx	
L1=	6,13 m
L2=	1 m
sp.=	0,25 m
Volume	1,5325 mc
Gamma=	24 kN/mc
Gk3=	36,8 kN

Sottospinta IDR soletta	
L1=	10,64 m
L2=	1 m
Battente=	0,87 m
Volume	9,2568 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk11=	92,6 kN

Sottospinta IDR - rivest. dx	
L1=	1,47 m
L2=	1 m
Battente=	0,87 m
Volume	0,63945 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk12=	5,4 kN

Sottospinta IDR - rivest. sx	
L1=	1,47 m
L2=	1 m
Battente=	0,87 m
Volume	0,63945 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk12=	5,4 kN

alfa= 33 °
cos(alfa)= 0,83883alfa= 33 °
cos(alfa)= 0,83883

Carico IDR interno - soletta	
L1=	10,64 m
L2=	1 m
Battente=	0,3 m
Volume	3,192 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk11=	31,9 kN

Carico IDR - rivest. dx	
L1=	0 m
L2=	1 m
Battente=	0 m
Volume	0 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk12=	0,0 kN

Carico IDR - rivest. sx	
L1=	0 m
L2=	1 m
Battente=	0 m
Volume	0 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk12=	0,0 kN

alfa= 33 °
cos(alfa)= 0,83883alfa= 33 °
cos(alfa)= 0,83883

Sottospinta IDR1 soletta	
L1=	10,64 m
L2=	1 m
Battente=	0,6 m
Volume	6,384 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk11=	63,8 kN

Sottospinta IDR1 - rivest. dx	
L1=	1,06 m
L2=	1 m
Battente=	0,6 m
Volume	0,318 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk12=	2,7 kN

Sottospinta IDR1 - rivest. sx	
L1=	1,06 m
L2=	1 m
Battente=	0,6 m
Volume	0,318 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk12=	2,7 kN

alfa= 33 °
cos(alfa)= 0,83883alfa= 33 °
cos(alfa)= 0,83883

Verifiche nei confronti degli stati limite ultimi idraulici (VER. GALLEGGIAMENTO)

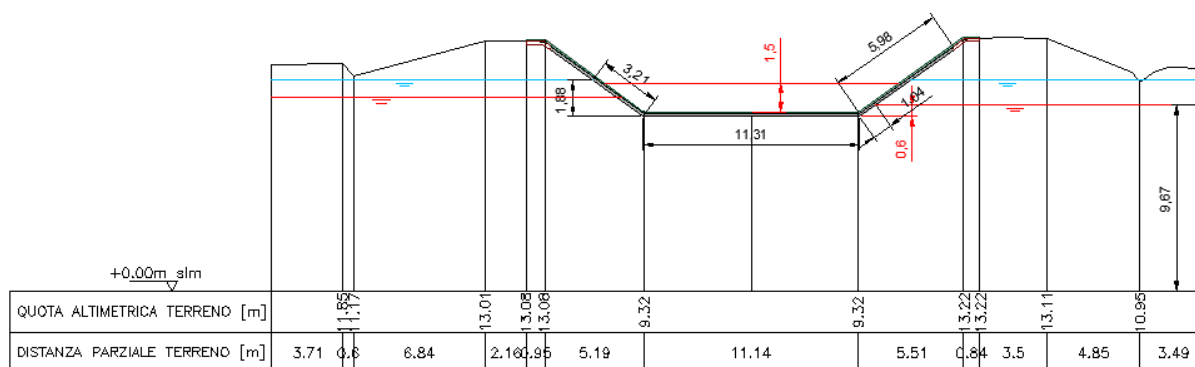
CANALE VUOTO		Gamma	Verifica SLU IDR
Totale Gk=	137,4 kN	0,9	123,66
Sottospinta IDR=	103,3 kN	1,5	154,9437
Rinst/Rstab=	1,3 kN	>1	NO

CANALE CON LIVELLO IDR MIN PER EVITARE SOLLEVAMENTO		Gamma	Verifica SLU IDR
Totale Gk=	169,3 kN	0,9	152,388
Carico IDR Gkidr=	31,9 kN	0,8	25,536
Sottospinta IDR=	103,3 kN	1,5	154,9437
Rinst/Rstab=	0,9 kN	<1	Verificato

CANALE VUOTO CON FALDA MAX PER EVITARE SOLLEVAMENTO		Gamma	Verifica SLU IDR
Totale Gk=	137,4 kN	0,9	123,66
Sottospinta IDR=	69,2 kN	1,5	103,7624
Rinst/Rstab=	0,8 kN	<1	Verificato



CONFIG. PROGETTO = RIVEST. PROG.

SEZIONE S72
PROG.14+400

SAN NICOLÒ MEDELANA - SEZ. 72

Soletta di fondazione	
L1=	11,31 m
L2=	1 m
sp.=	0,25 m
Volume	2,8275 mc
Gamma=	24 kN/mc
Gk1=	67,9 kN

Rivestimento dx	
L1=	5,98 m
L2=	1 m
sp.=	0,25 m
Volume	1,495 mc
Gamma=	24 kN/mc
Gk2=	35,9 kN

Rivestimento sx	
L1=	5,98 m
L2=	1 m
sp.=	0,25 m
Volume	1,495 mc
Gamma=	24 kN/mc
Gk3=	35,9 kN

Sottospinta IDR soletta	
L1=	11,31 m
L2=	1 m
Battente=	1,88 m
Volume	21,2628 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk11=	212,6 kN

Sottospinta IDR - rivest. dx	
L1=	3,21 m
L2=	1 m
Battente=	1,88 m
Volume	3,0174 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk12=	25,3 kN

Sottospinta IDR - rivest. sx	
L1=	3,21 m
L2=	1 m
Battente=	1,88 m
Volume	3,0174 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk12=	25,3 kN

$$\alpha = 33^\circ$$
$$\cos(\alpha) = 0,83883$$

$$\alpha = 33^\circ$$
$$\cos(\alpha) = 0,83883$$

Carico IDR interno - soletta	
L1=	11,31 m
L2=	1 m
Battente=	1,5 m
Volume	16,965 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk11=	169,7 kN

Carico IDR - rivest. dx	
L1=	0 m
L2=	1 m
Battente=	0 m
Volume	0 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk12=	0,0 kN

Carico IDR - rivest. sx	
L1=	0 m
L2=	1 m
Battente=	0 m
Volume	0 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk12=	0,0 kN

$$\alpha = 33^\circ$$
$$\cos(\alpha) = 0,83883$$

$$\alpha = 33^\circ$$
$$\cos(\alpha) = 0,83883$$

Sottospinta IDR1 soletta	
L1=	11,31 m
L2=	1 m
Battente=	0,6 m
Volume	6,786 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk11=	67,9 kN

Sottospinta IDR1 - rivest. dx	
L1=	1,04 m
L2=	1 m
Battente=	0,6 m
Volume	0,312 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk12=	2,6 kN

Sottospinta IDR1 - rivest. sx	
L1=	1,04 m
L2=	1 m
Battente=	0,6 m
Volume	0,312 mc
Gamma=	10 kN/mc
Gk12=	2,6 kN

$$\alpha = 33^\circ$$
$$\cos(\alpha) = 0,83883$$

$$\alpha = 33^\circ$$
$$\cos(\alpha) = 0,83883$$

Verifiche nei confronti degli stati limite ultimi idraulici (VER. GALLEGGIAMENTI)

CANALE VUOTO		Gamma	Verifica SI
Totale Gk=	139,6 kN	0,9	125,658
Sottospinta IDR=	263,2 kN	1,5	394,8745
Rinst/Rstab=	3,1 kN	>1	NO

CANALE CON LIVELLO IDR MIN PER EVITARE SOLLEVAMENTO		Gamma	Verifica SI
Totale Gk=	309,3 kN	0,9	278,343
Carico IDR Gkid=	169,7 kN	0,8	135,72
Sottospinta IDR=	263,2 kN	1,5	394,8745
Rinst/Rstab=	1,0 kN	<1	Verificato

CANALE VUOTO CON FALDA MAX PER EVITARE SOLLEVAMENTO		Gamma	Verifica SI
Totale Gk=	139,6 kN	0,9	125,658
Sottospinta IDR=	73,1 kN	1,5	109,6414
Rinst/Rstab=	0,9 kN	<1	Verificato

Le verifiche condotte forniscono pertanto dei parametri gestionali per poter svuotare il canale senza incorrere nel rischio che si manifestino fenomeni di sollevamento.

Per monitorare le condizioni della falda sarà necessario inserire una rete di piezometri lungo l'asta del canale. Lo **svuotamento** potrà avvenire adottando i seguenti **criteri**:

Nel I Tronco (da San Nicolò prog. 0+000 alla Chiusa Rostra prog. 7+156.66):

- Se il livello della falda risulta $> +10,20\text{m}$ ($+1,20\text{ m.s.l.m.}$), sarà possibile svuotare il canale mantenendo all'interno almeno 1.5m di battente



- Se il livello della falda $< +10,20\text{m}$ ($+1,20$ m.s.l.m.), sarà possibile svuotare completamente il canale.

Nel II Tronco (dalla Chiusa Rostra prog. 7+156.66 alla chiusa Medelana prog. 14+600):

- Se il livello della falda risulta $> +9,70\text{m}$ ($-0,30$ m.s.l.m.), sarà possibile svuotare il canale mantenendo all'interno almeno 1.5m di battente
- Se il livello della falda $< +9,70\text{m}$ ($-0,30$ m.s.l.m.), sarà possibile svuotare completamente il canale.

Dal momento che il nuovo rivestimento verrà realizzato in continuità tra fondo e sponde, verrà portato fino alla testa dell'argine, non avrà giunti ed avrà una permeabilità di 5/6 ordini di grandezza inferiore a quella del terreno, le verifiche a sifonamento potrebbero risultare superflue.

Tuttavia si è ritenuto di analizzare delle potenziali situazioni che possono innescare dei moti di filtrazione, ad esempio l'effetto del rivestimento con la permanenza di carichi idraulici elevati per lunghi periodi e una eventuale rottura puntale (Crack) del rivestimento stesso.

Le sezioni di progetto analizzate sono quelle del tratto di intervento previsto nel Primo Stralcio Funzionale:

Sezione 35 prog. 7+000 Tratto litrostratigrafico T2-T3

Sezione 65 prog. 13+000 Tratto litrostratigrafico T4

Diagramma di flusso Filtrazione - Sifonamento:

Verifica 1:

	parametri geotecnici da Back Analysis
	Terreni parzialmente saturi e flusso in regime transitorio
0 – Condizione Iniziale	Canale vuoto e falda a p.c.
1 – Condizione Irrigua	Quota irrigua sdp
2 – Scolmatore	Transizione istantanea da quota irrigua sdp a quota scolmatore sdp-1sf
	Verifiche di stabilità globale paramenti arginali esterni
3 – Svuotamento rapido	Svuotamento istantaneo da quota scolmatore sdp-1sf
	Verifiche di stabilità globale paramenti arginali interni

Verifica 2:

	parametri geotecnici da Back Analysis
	Terreni parzialmente saturi e flusso in regime transitorio
	Rivestimento completamente impermeabile
0 – Condizione Iniziale	Canale vuoto e falda a p.c.
1 – Condizione Irrigua	Quota irrigua sdp
2 – Scolmatore	Transizione istantanea da quota irrigua sdp a quota scolmatore sdp-1sf



3 – Svuotamento rapido

Verifiche di stabilità globale paramenti arginali esterni

Svuotamento istantaneo da quota scolmatore sdp-1sf

Verifiche di stabilità globale paramenti arginali interni

In presenza di falda e in condizioni di innesco di un moto di filtrazione, si genera nel terreno una forza di filtrazione diretta verso l'alto che può annullare il peso del terreno e, se questo è privo di coesione, può trascinare le particelle e produrre un il collasso del terreno. Questo meccanismo di collasso è noto come sifonamento; esso si manifesta nel punto di sbocco della prima linea di flusso.

La tensione verticale si annulla al gradiente critico:

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$$

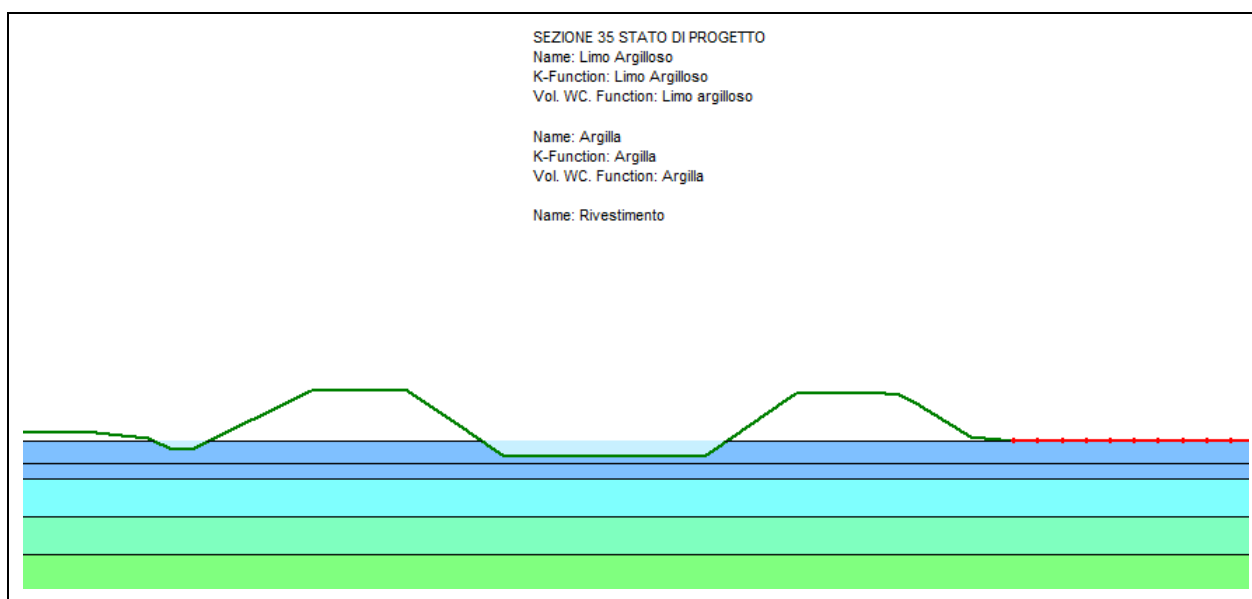
Il fattore di sicurezza nei confronti del sifonamento è dato dal rapporto tra il gradiente critico i_c e quello di efflusso i_E

$$F_s = \frac{i_c}{i_E}$$

Il fattore di sicurezza per le verifiche a sifonamento, ai sensi delle NTC2018 deve essere superiore a 3.

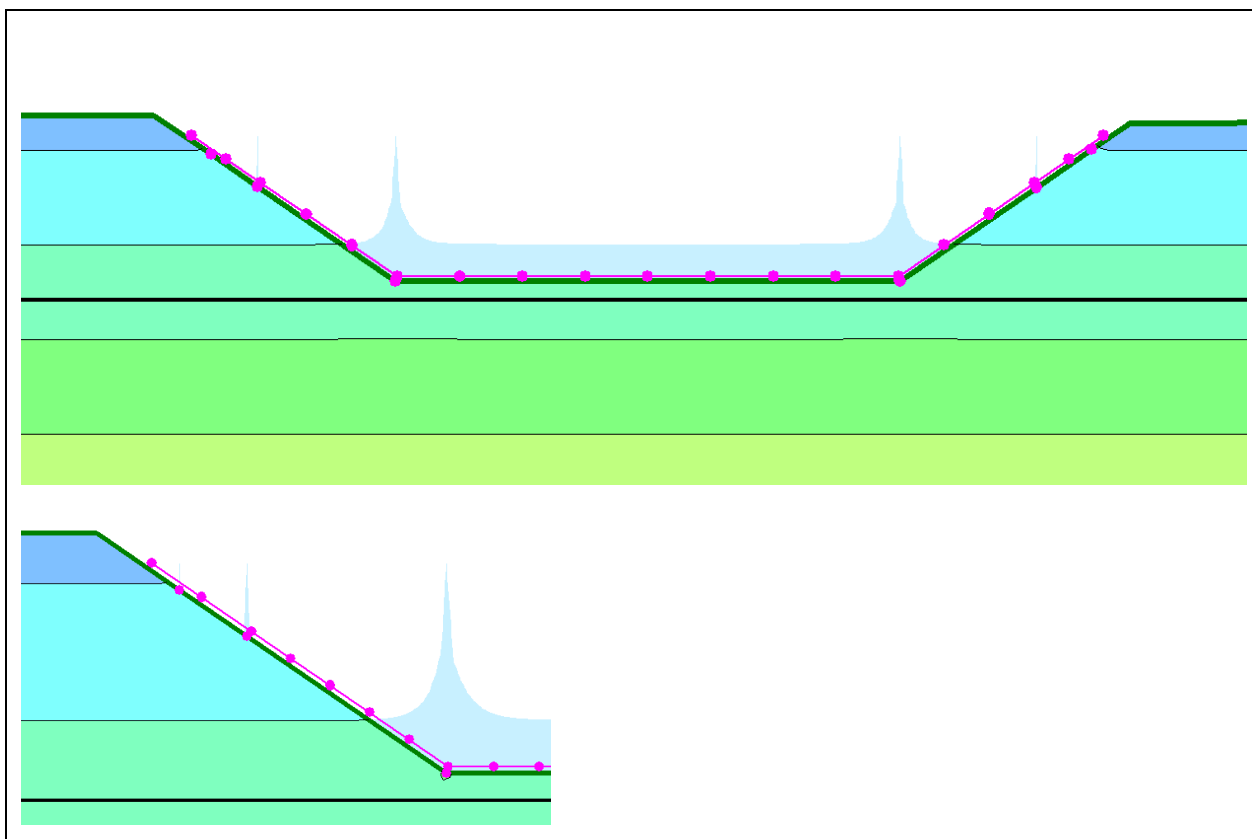
Di seguito le verifiche a sifonamento e qualche considerazione aggiuntiva sulla stabilità arginale

Sez. 35 rivestimento totalmente impermeabile – disconnessione idraulica tra interno ed esterno canale

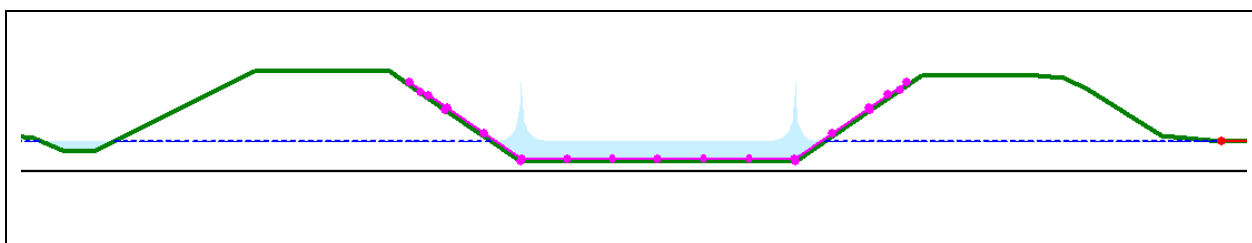




Sez. 35 rottura puntuale del rivestimento di progetto – innesco flusso



Sez. 35 linee di flusso da interno canale a falda



Verifica a sifonamento

$$H_c = 12.8 - 10.6 = 2.2 \text{ m}$$

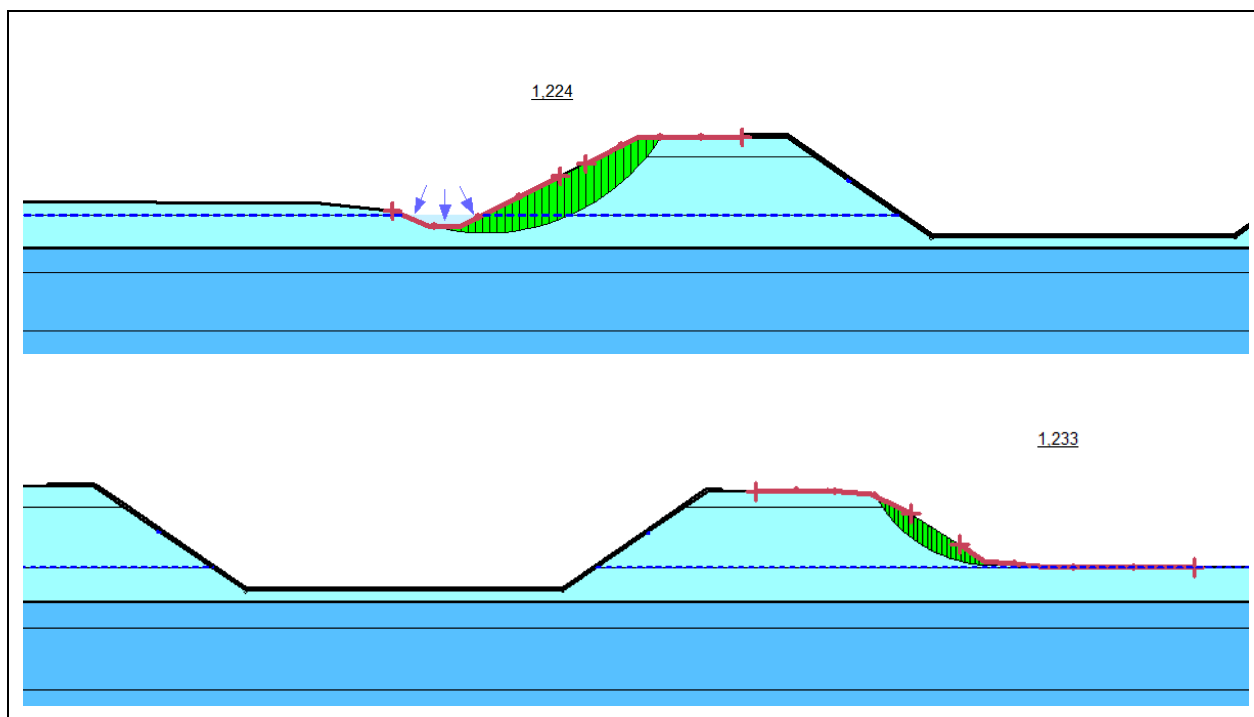
$$D = 15 \text{ m}$$

$$i_E = 0.15$$

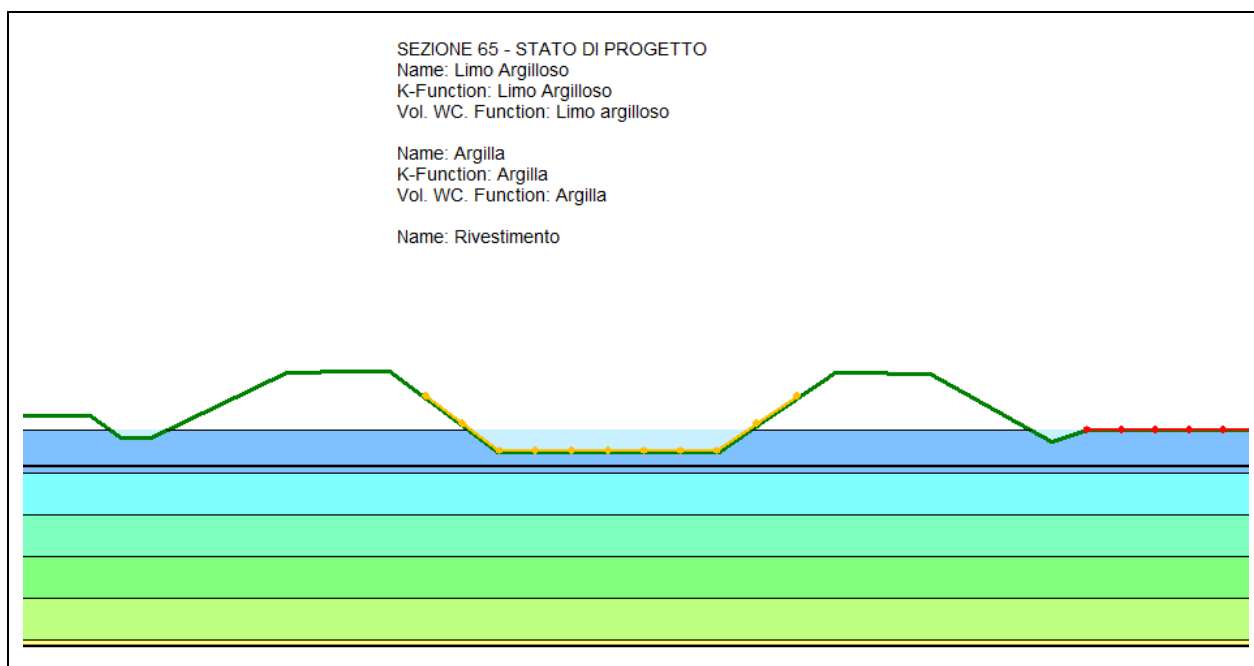
$$i_C = 0.95$$

$$F_s = 6.3 > 3 \quad \text{Verifica soddisfatta}$$

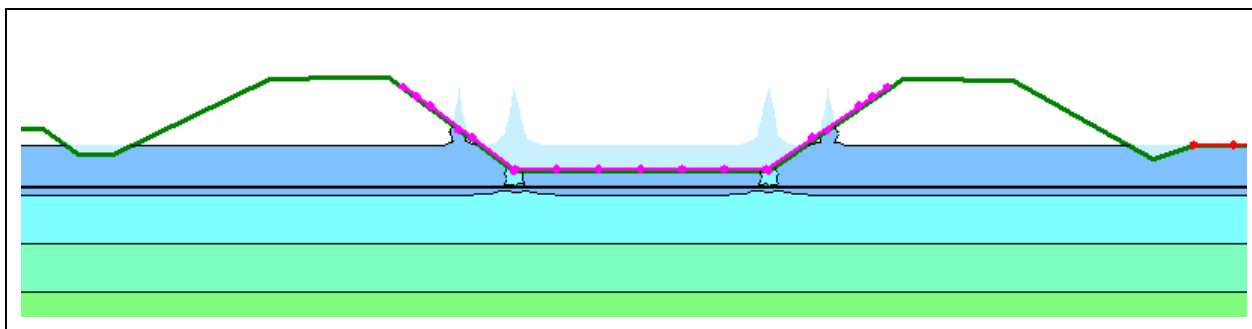
Sezione 35 – Stabilità paramenti arginali a seguito flusso per rottura rivestimento



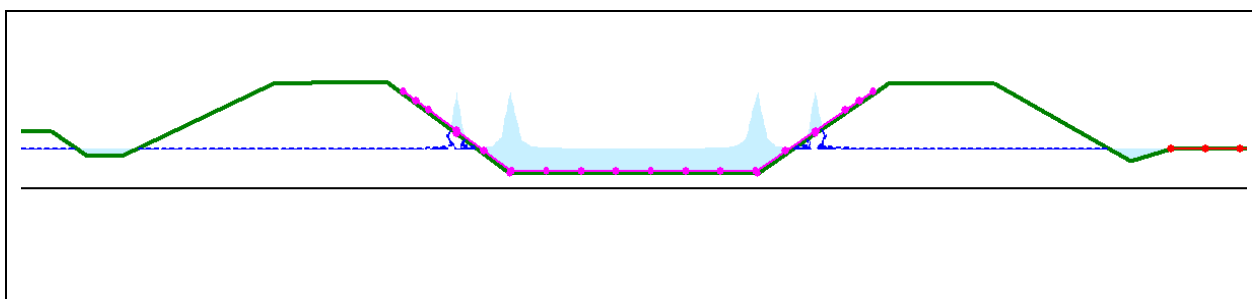
Sez. 65 rivestimento totalmente impermeabile – disconnessione idraulica tra interno ed esterno canale



Sez. 65 rottura puntuale del rivestimento di progetto – innesco flusso



Sez. 65 linee di flusso da interno canale a falda



Verifica a sifonamento

$$H_c = 12.7 - 10.4 = 2.3 \text{ m}$$

$$D = 13.5 \text{ m}$$

$$i_E = 0.17$$

$$i_C = 0.95$$

$$F_s = 5.5 > 3 \quad \text{Verifica soddisfatta}$$

Sezione 65 – Stabilità paramenti arginali a seguito flusso per rottura rivestimento

