

UFFICIO OPERATIVO DI MILANO

Via Taramelli 12, 20124 Milano

**MB-E-3 PROGETTAZIONE DEFINITIVA
 E REDAZIONE DEL PIANO OPERATIVO DI BONIFICA
 PER LA REALIZZAZIONE DI UN'AREA DI LAMINAZIONE
 PER LE PIENE DEL TORRENTE SEVESO
 NEI COMUNI DI PADERNO DUGNANO (MI) E VAREDO (MB)
 C.I.G.: 6574175CD2 C.U.P.: B57B15000390003**

PROGETTO DEFINITIVO

RELAZIONE GEOTECNICA – OPERE IN TERRA

RESPONSABILE PROGETTAZIONE GENERALE:
 DOTT. ING. FULVIO BERNABEI

PROGETTAZIONE IDRAULICA E STRUTTURALE:
 DOTT. ING. FULVIO BERNABEI
 DOTT. ING. STEFANO ADAMI
COORD. DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE:
 DOTT. ING. LAURA GRILLI

GEOLOGIA E PROGETTAZIONE GEOTECNICA:
 PROF. GEOL. LAMBERTO LUCIANO GRIFFINI
 DOTT. ING. STEFANO GRIFFINI

PROGETTAZIONE PAESAGGISTICA E AMBIENTALE:
 DOTT. ING. MASSIMO SARTORELLI
 DOTT. MARIO PUZZI
 DOTT. STEFANIA TRASFORINI
 DOTT. CHIARA LUVIÈ
 DOTT. ANDREA SIBILIA

CONSULENZE SPECIALISTICHE
 ASPETTI PAESAGGISTICI E AMBIENTALI:
 PROF. ANGELO DAL SASSO
 PROF. GIUSEPPE CROSA

PIANO DI BONIFICA:
 PROF. GEOL. GIOVANNI PIETRO BERETTA
 DOTT. GEOL. MAURIZIO NESPOLI
 DOTT. ING. ADELIO PAGOTTO
 DOTT. GEOL. MONICA AVANZINI

DOTT. ING. PAOLO SANAVIA

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO:
 DOTT. ING. LUIGI MILLE

CAPOGRUPPO MANDATARIA:



MANDANTE:



MANDANTE:



MANDANTE:



MANDANTE: Ing. Paolo Sanavia

ELAB. N°

5

DATA **GIUGNO 2017**

COMMESSA N° 017/2016	REDATTO SM
CODICE COMMESSA DEFAIPOVAREDO	CONTROLLATO GS
NOME FILE	APPROVATO GL

Mod.7.3 F - Rev.01

REV.	DATA	DESCRIZIONE MODIFICA	REDATTO	CONTR.	APPR.
01	FEBB. 2019	REVISIONE A SEGUITO RAPPORTO DI VERIFICA			

INDICE

1	Premesse	3
2	Riferimenti	4
2.1	Normativa	4
2.2	Elaborati di progetto	4
2.3	Bibliografia	4
2.4	Codici di calcolo	4
3	Dimensionamento argine interno	5
3.1	Descrizione dell'opera	5
3.2	Geometria	6
3.2.1	Sponda lato Vasca 1	6
3.2.2	Sponda lato Vasca 2	7
3.3	Caratterizzazione geotecnica	7
3.4	Condizioni di carico	8
3.5	Approcci progettuali e valori di progetto dei parametri geotecnici	9
3.6	Descrizione modello numerico	10
3.6.1	Step di analisi	11
3.7	Risultati analisi numeriche	13
3.7.1	Step 1	13
3.7.2	Step 2	14
3.7.3	Step 3	15
3.7.4	Step 4	16
3.7.5	Step 5	17
3.7.6	Step 6	18
3.7.7	Step 7	19
3.7.8	Step 8	20
3.7.9	Step 9	21
3.7.10	Step 10	22
3.7.11	Step 11	23
3.7.12	Step 12	24
3.7.13	Step 13	25
3.8	Conclusioni	26
4	Verifiche scarpate vasche	27
4.1	Descrizione dell'opera	27
4.2	Condizioni di carico	28

4.2.1	Carichi gravitazionali	28
4.2.2	Carico stradale accidentale	28
4.2.3	Carico sismico	28
4.2.4	Carico idraulico	28
4.2.5	Livello di falda	28
4.3	Verifiche di sicurezza	29
4.3.1	Approccio metodologico	29
4.3.2	Risultati	32
4.3.2.1	<i>Analisi statiche</i>	32
4.3.2.2	<i>Analisi sismica</i>	35

1 Premesse

La presente relazione illustra le verifiche geotecniche eseguite per il dimensionamento delle opere in terra previste **nell'ambito dell'appalto "progettazione definitiva, nonché della redazione del Piano operativo di Bonifica per la realizzazione di un'area di laminazione per le piene del torrente Seveso nei Comuni di Paderno Dugnano (MI) e Varedo (MB)."**

Sono riportate nello specifico i seguenti interventi:

- Argine intermedio sito tra la prima e la seconda vasca di laminazione;
- Scarpate delle vasche;

Ai fini delle verifiche e del dimensionamento in fase di progettazione definitiva, sono state analizzate le sezioni tipo più rappresentative **del comportamento globale dell'opera.**

Le verifiche sono state condotte adoperando il metodo degli Stati Limite, così come prescritto dal D.M. 14/01/2008.

2 Riferimenti

2.1 Normativa

- (1) Decreto Ministeriale 14.01.2008 – Norme Tecniche per le Costruzioni
- (2) Circolare 02.02.2009 n. 617 del Consiglio Sup. LL.PP. – Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2009

2.2 Elaborati di progetto

- (3) Elab.N.3 - Relazione geologica, geotecnica e sismica
- (4) Tav.N.11A - Planimetria di ubicazione indagini geognostiche Lotto 1
- (5) Tav.N.11B - Planimetria di ubicazione indagini geognostiche Lotto 2
- (6) Tav.N.12 - Sezioni geologiche
- (7) Tav.N.13A - Sezioni geotecniche
- (8) Tav.N.13A - Sezioni geotecniche

2.3 Bibliografia

- (9) Griffiths, D.V. and Lane, P.A. (1999). - "Slope Stability Analysis by Finite Elements" - Geotechnique, 49(3), 387-403
- (10) Matsui, T. & San, K. C., Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique. Soils Found. 32, No. 1, 59-70, 1992.
- (11) Morgenstern N.R., Price V.E., "The analysis of the stability of general slip surface" Geotechnique, Vol. 15, pp. 79-93, 1965.
- (12) Van Genuchten, M. Th. 1980. "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." Soil Science Society of America Journal 44:892-898.

2.4 Codici di calcolo

- (13) MIDAS GTS NX 2015 v. 1.2
- (14) Geoslope International Ltd. – GeoStudio 2007 v.7.23

3 Dimensionamento argine interno

3.1 Descrizione dell'opera

L'area di laminazione per il torrente Seveso è stata suddivisa in due vasche in modo tale da non interessare tutta la superficie disponibile nel caso di piene di modesta entità. Per questo motivo è stato inserito un elemento di divisione costituito da un argine interno all'area dell'altezza di 8 metri. Nel caso di riempimento della Vasca 1 di dimensioni ridotte, l'acqua sfiora lungo la sommità dell'argine e va a riempire l'area di maggiori dimensioni (Vasca 2). In Figura 3.1 è riportato uno stralcio planimetrico dell'opera e sua ubicazione.

Il reflusso delle acque dalla Vasca 2 alla Vasca 1 al termine della piena è garantito da 3 scatolari in C.A. che permettono di tenere alla medesima quota il livello dell'acqua nelle due vasche durante le fasi di svuotamento. Il flusso dalla Vasca 1 alla Vasca 2 è impedito dalla presenza di valvole a clapet poste all'imbocco di ciascuno scatolare.

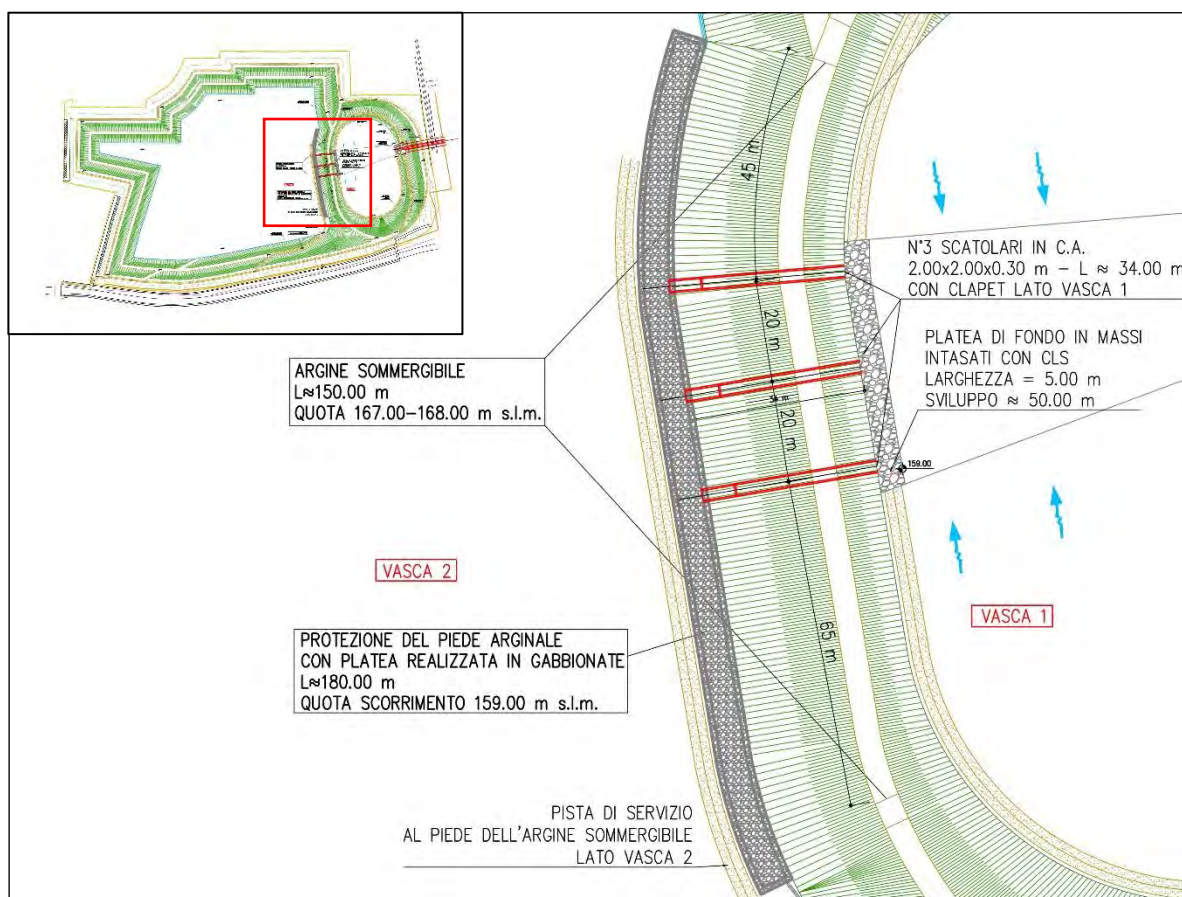


Figura 3.1 – Planimetria area di laminazione e dettaglio argine intermedio.

3.2 Geometria

L'argine intermedio ha una altezza pari a 8 metri con una geometria asimmetrica: la sponda argine della Vasca 1 ha una pendenza 1:1 mentre la sponda argine della Vasca 2 ha una pendenza 3:1, come mostrato nella sezione in Figura 3.2. Tale geometria presuppone due differenti soluzioni di rinforzo per le scarpate, presentate nei paragrafi successivi.

Il rilevato verrà realizzato con materiale proveniente dagli scavi o da altro sito con specifiche caratteristiche di permeabilità (vedi capitolo §3.3). Esso sarà posato e compattato meccanicamente in strati di spessore compreso tra i 50 e 60 cm.

Il fondo delle vasche verrà impermeabilizzato attraverso la posa di materiale limoso/argilloso (vedi capitolo §3.3) dello spessore pari ad un metro.

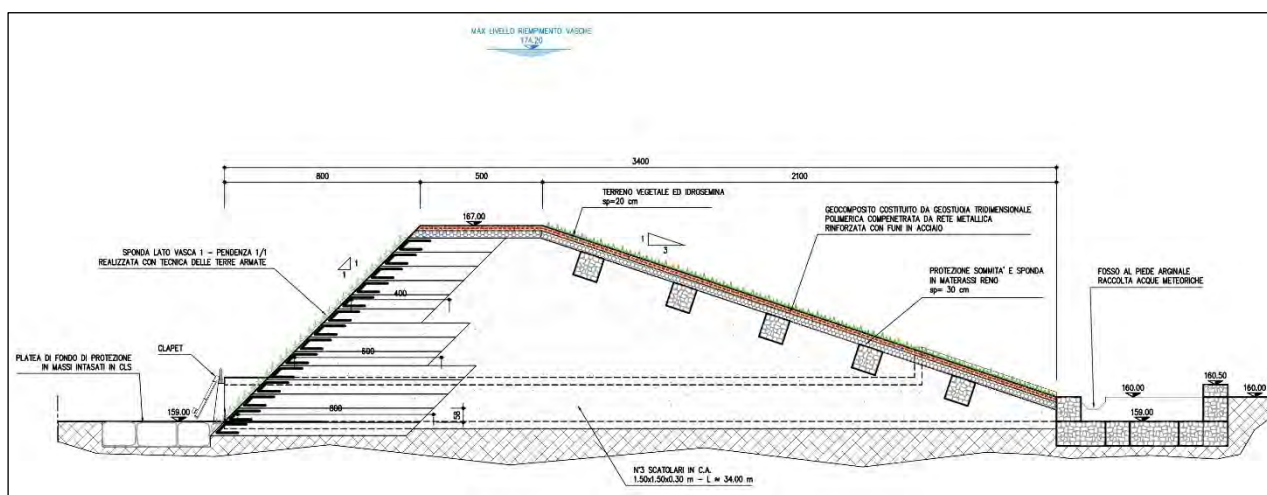


Figura 3.2 – Sezione argine intermedio.

3.2.1 Sponda lato Vasca 1

Questo lato dell'argine ha la pendenza più elevata, pari a 45°. Esso verrà realizzato con la tecnica delle terre rinforzate che prevede la posa di teli in materiale polimerico o metallico in grado di conferire al terreno proprietà di resistenza superiori. I teli verranno stesi in strati successivi di terreno **posato e rullato con spessori compresi tra i 50 e 60 cm.** Data l'acclività della scarpata, oltre al risvolto del telo, viene posata sul paramento una rete in materiale **geotessile che, oltre ad impedire l'erosione superficiale, consente il rinverdimento della superficie.**

Nel caso di verifica di scarpate realizzate mediante terre rinforzate è necessario eseguire sia le verifiche di stabilità globale delle scarpate, sia quelle di stabilità interna e di resistenza del rinforzo.

Tali verifiche dipendono in maniera significativa dalle caratteristiche dei materiali utilizzati per il rinforzo e quindi dal produttore scelto.

In questa fase progettuale è stato effettuato il dimensionamento preliminare e la verifica delle terre rinforzate secondo le norme NTC2008 ipotizzando di utilizzare materiali di due differenti produttori.

I risultati, del tutto analoghi tra di loro, hanno identificato l'adozione di teli con lunghezze decrescenti in altezza:

- Lunghezza 8 metri da quota 158.5 m s.l. a quota 160.8 m s.l.;
- Lunghezza 6 metri da quota 160.5 m s.l. a quota 162.8 m s.l.;
- Lunghezza 4 metri da quota 162.5 m s.l. a quota 166.5 m s.l.;

In questa relazione vengono presentate le sole **verifiche di stabilità globale dell'argine interno** impiegando le geometrie delle terre rinforzate identificate. Il dimensionamento e le verifiche di stabilità interna saranno **dettagliate in fase di progetto esecutivo, nell'ambito del quale sarà definita l'esatta tipologia di rinforzo da utilizzare.**

3.2.2 Sponda lato Vasca 2

Il lato adiacente alla vasca 2 presenta una pendenza minore. Durante l'esercizio, in caso di allagamento completo della Vasca 1, esso sarà interessato dallo scorrimento superficiale delle acque che tracimeranno nella Vasca 2. Per questo motivo, al fine di impedire qualsiasi tipo di erosione superficiale, esso sarà completamente rivestito con dei materassi reno. Questa tecnologia prevede l'impiego di casseri metallici con una grande superficie ma con una altezza limitata (17-30 cm) riempiti con materiale lapideo. La loro stabilità viene garantita dall'accoppiamento con gabbioni metallici legati ai materassi reno. Sulla superficie verrà posata una rete in geocomposito atta a contenere un leggero strato di terreno superficiale in grado di consentire il rinverdimento dell'intero argine. L'adozione dei materassi reno si estende anche alla sommità del rilevato, anch'essa interessata dal flusso d'acqua superficiale.

3.3 Caratterizzazione geotecnica

Nella relazione geotecnica (rif.(3)) è riportata la caratterizzazione delle unità geotecniche individuate sulla base delle **indagini geognostiche. Per le verifiche dell'argine intermedio si fa riferimento alle unità geotecniche presenti a fondo scavo delle vasche, a partire da quota 159 m. s.m (circa 16 m di profondità dal piano campagna).**

Varedo - Lotto 1 e Lotto 2 - Caratterizzazione geotecnica									
Unità	Descrizione	Quota	Densità relativa	Angolo Resistenza al taglio	Coesione efficace	Modulo elastico piccole deformazioni	Modulo elastico operativo	Peso di Volume Naturale	Peso di Volume Saturo
		[m da p.c.]	Dr [%]	$\phi_k [^\circ]$	c'_k [kPa]	E_{01} [MPa]	E_{25} [MPa]	γ_N [kN/m ³]	γ_{SAT} [kN/m ³]
TV/R	Terreno Vegetale o Riporto	0.0÷2.0	-	30	0	-	5	18	20
GS	Ghiaia Sabbiosa	2.0÷7.5	60	35	0	70-100	15-30	18	20
SGL	Sabbia Ghiaiosa Limosa	7.5÷26.0	60-85	39.5	0	100-200	30-60	19.5	20.9
SL	Sabbia Limosa	26.0÷40.0	85-90	41	0	200	60	20	21.2

Tabella 3.1 – Caratteristiche geotecniche caratteristiche delle unità stratigrafiche.

Sono interessate le unità SGL ed SL, entrambe costituite da sabbia con una presenza di limo più **marcata con l'aumento della profondità.**

Le indagini e le prove Lefranc effettuate hanno consentito di caratterizzare la permeabilità delle unità stratigrafiche. I risultati ottenuti (Rif.(3)) indicano valori variabili da $k=10^{-4}$ m/s (valore tipico per sabbie) sino a $k=10^{-7}$ m/s (sondaggio SA2, prova LFK03 a 15 metri di profondità dal piano campagna). Nel progetto viene indicata la necessità di impedire **l'infiltrazione delle acque contenute**

nelle vasche all'interno della falda acquifera presente alla quota di progetto 152.5 m s.m. Per tanto, a favore di sicurezza, per le sabbie delle unità SGL è stata scelta una permeabilità pari $k=10^{-4}$ m/s. Tale caratterizzazione permette dunque la verifica dell'efficacia dello strato di impermeabilizzazione previsto in progetto.

Le proprietà e le caratteristiche di resistenza dei materiali costituenti l'argine interno e lo strato di impermeabilizzazione del fondo delle vasche saranno invece riportati in Tabella 3.2.

Per l'argine interno e lo strato di impermeabilizzazione del fondo delle vasche sono stati considerati i parametri riportati in Tabella 3.2.

Unità	Descrizione	Angolo Resistenza al taglio	Coesione efficace	Permeabilità	Peso di Volume Naturale	Peso di Volume Saturo
		$\phi'_k [^\circ]$	$c'_k [\text{kPa}]$	$k [\text{m/s}]$	$\gamma_N [\text{kN/m}^3]$	$\gamma_{\text{SAT}} [\text{kN/m}^3]$
AI	Argine Interno	35	0	10^{-6}	18	20
IF	Impermeabilizzazione Fondo	35	0	10^{-7}	18	20

Tabella 3.2 – Caratteristiche geotecniche delle terre impiegate per la realizzazione delle opere.

Le proprietà dei materiali con cui verranno realizzate le opere in terra indicate, verranno verificate attraverso specifiche indagini in fase di approvvigionamento del materiale e con prove durante la realizzazione. I materiali possono provenire dagli scavi eseguiti per la realizzazione delle vasche nel caso essi rispondano ai requisiti di resistenza (dopo la compattazione) e di permeabilità richiesti.

3.4 Condizioni di carico

L'argine interno alle vasche di laminazione ha lo scopo di separare le due vasche per impedire il completo allagamento dell'area in caso di modeste quantità d'acqua in entrata. I carichi ai quali esso è sottoposto sono:

- Carichi gravitazionali, legati al peso proprio del terreno
- Carichi idraulici derivanti dalle variazioni del livello di invaso.
- Carichi sismici

Durante l'esercizio dell'opera possono verificarsi le seguenti condizioni:

- Condizioni asciutte: condizioni ordinarie nelle quali si trova il rilevato con entrambe le vasche completamente vuote;
- Vasca 1 piena: condizione frequente in cui il carico idraulico grava sul lato più inclinato dell'argine;
- Vasca 1 e vasca 2 piene: condizione rara in cui l'acqua tracima dalla vasca 1 verso la vasca 2 riempiendola completamente. In questo caso il carico grava su entrambe le sponde;
- Raggiungimento del massimo invaso a quota 174.2 m s.m.: l'acqua supera la sommità dell'argine intermedio di 7.2 m.

Come descritto nella relazione geologica (rif.(3)) il livello di falda si trova mediamente alla quota di 152 m s.m.

3.5 Approcci progettuali e valori di progetto dei parametri geotecnici

Le verifiche di sicurezza per l'argine intermedio sono state eseguite in ottemperanza alle vigenti normative in materia di costruzioni NTC2008 (rif.(1)), prendendo in considerazione tutti i meccanismi di stato limite ultimo (SLU), a breve che a lungo termine, sia in condizioni statiche che in condizioni sismiche.

Sono state eseguite verifiche di stabilità globale del complesso opere di sostegno-terreno (SLU-GEO) con l'impiego di un modello numerico ad elementi finiti. Il valore minimo del fattore di sicurezza è stato definito in accordo con il §6.8.2 delle NTC2008 pari a 1.1 per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti.

Lo stesso modello numerico è stato utilizzato per eseguire analisi di filtrazione in regime transitorio, sulla base delle quali è stato definito il regime di pressioni interstiziali che governa l'andamento degli sforzi efficaci all'interno del rilevato.

Le verifiche, in ottemperanza a quanto prescritto dalle NTC2008 al §6.8.2, sono state effettuate secondo l'Approccio 1 in Combinazione 2 (A2+M2+R2) tenendo conto dei relativi coefficienti parziali.

I valori di progetto dei i parametri geotecnici adottati nella modellazione sono riportati in Tabella 3.3.

Unità	Descrizione	Peso di Volume Naturale	Peso di Volume Saturo	Modulo elastico	Angolo Resistenza al taglio	Coesione efficace	Permeabilità
		γ_N [kN/m ³]	γ_{SAT} [kN/m ³]	E_{01} [MPa]	ϕ'_{d_M2} [°]	c'_{d_M2} [kPa]	k [m/s]
TV/R	Terreno Veg. o Riporto	18	20	-	24.8	0	1.00E+04
GS	Ghiaia Sabbiosa	18	20	70-100	29.3	0	1.00E+04
SGL	Sabbia Ghiaiosa Limosa	19.5	20.9	100-200	33.4	0	1.00E+04
SL	Sabbia Limosa	20	21.2	200	34.8	0	1.00E+04
AI	Argine Interno	18	20	50	29.3	0	1.00E+06
TR	Terra Rinforzata	18	20	50	29.3	50	1.00E+06
IF	Impermeabilizzazione Fondo	18	20	50	29.3	0	1.00E+07

Tabella 3.3 – Parametri geotecnici di progetto.

Per le terre rinforzare si è considerata la stessa parametrizzazione dell'argine intermedio, considerando però anche un elevato valore di coesione efficace in modo da tenere conto della presenza dei rinforzi e forzare quindi le eventuali superfici di scivolamento all'esterno delle terre rinforzate stesse.

3.6 Descrizione modello numerico

Il modello numerico è stato implementato utilizzando un codice di calcolo appositamente sviluppato per applicazioni di tipo geotecnico (MIDAS GTS NX 2015 V.2.1), attraverso il quale è possibile tenere conto sia del comportamento elasto-plastico non lineare tipico dei materiali geotecnici, sia **dell'effettiva storia di carico cui essi sono sottoposti**.

Sono state sviluppate analisi non lineari per successivi passi di carico (staged construction) attraverso le quali sono state simulate le variazioni nello stato tensio-deformativo **dell'argine** per effetto delle successive fasi di riempimento e svuotamento delle vasche.

Le analisi di stabilità globale sono state condotte mediante l'approccio SRM (Strength Reduction Method, Griffith et. al. rif.(9); Matsui, rif.(10)) che consente di utilizzare il modello numerico ad elementi finiti per individuare le superfici di scivolamento caratterizzate dal minimo fattore di sicurezza.

Il metodo definisce come fattore di sicurezza (FoS) il minimo coefficiente riduttivo della resistenza al taglio delle unità geotecniche tale per cui si attiva un **cinematismo (i.e. l'analisi numerica non raggiunge convergenza)**.

L'approccio, basandosi sul modello numerico ad elementi finiti, consente di tenere conto non solo della resistenza dei materiali, ma anche della loro deformabilità, della presenza di elementi strutturali e della storia di carico.

Il modello geotecnico, mostrato in Figura 3.3, è stato impostato inserendo le terre armate e lo strato di impermeabilizzazione posto sul fondo della vasca. Non sono invece state inserite le opere di rinforzo corticale **del lato meno inclinato dell'argine** (materassi Reno) che ad ogni modo vanno a incrementare la stabilità del rilevato.

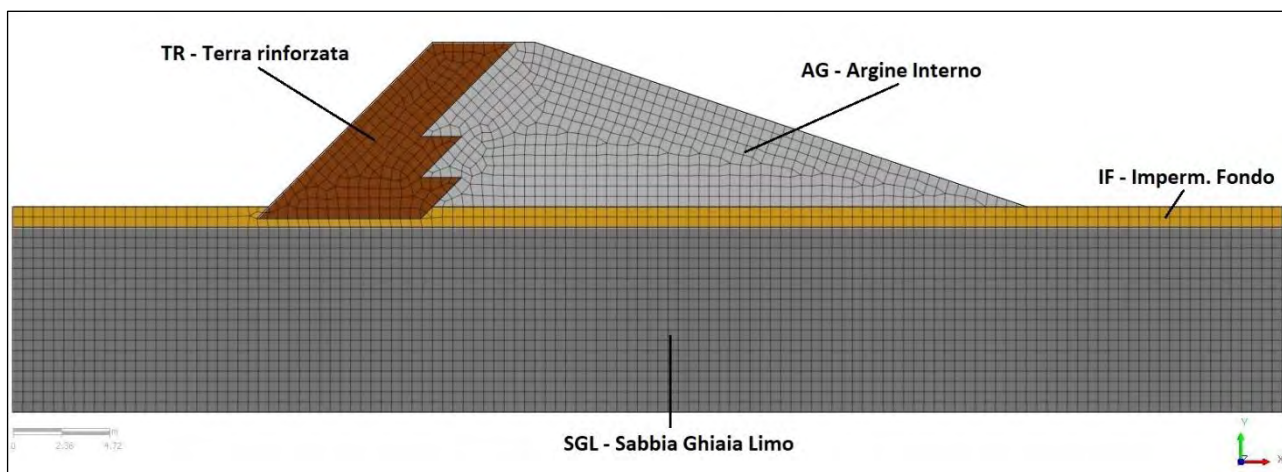


Figura 3.3 – Modello geotecnico argine intermedio agli elementi finiti.

Le analisi eseguite sono:

- Analisi statiche;

- Analisi sismiche;
- Analisi di filtrazione.

Il livello della falda, sulla base dei valori indicati nella relazione geologica (rif.(3)) e dai dati sperimentali raccolti nella campagna di indagine è stato posto alla quota di 152 s.m..

Per tenere conto degli effetti di parziale saturazione dei terreni sono state imposte nelle diverse unità geotecniche le curve di ritenzione idrica e di variazione del coefficiente di permeabilità secondo le formulazioni proposte da Van Genuchten (rif.(12)). In questo modo il software agli elementi finiti computa il livello di saturazione nei diversi punti della maglia in funzione della tipologia di materiale, del livello della falda e le relative variazioni in termini di permeabilità e resistenza al taglio.

I parametri caratteristici per la caratterizzazione delle curve che definiscono il comportamento dei terreni in condizioni di parziale saturazione sono stati definiti sulla base di valori tipici di letteratura per unità caratterizzate da granulometrie analoghe.

3.6.1 Step di analisi

Per le verifiche di stabilità globale è stata impostata un'analisi numerica per successivi step di carico (staged construction) che simulano le condizioni di riempimento e svuotamento delle vasche. Dopo le analisi in condizioni secche e sismiche, è stato simulato il caso più frequente in cui viene allagata solamente la Vasca 1.

Successivamente viene imposto il completo riempimento delle vasche fino alla quota massima prevista in progetto di 174.2 m s.m.. Alla fine di ciascun step di carico viene effettuata una verifica di stabilità globale mediante approccio SRM (Strength reduction method).

Le analisi sono state inoltre utilizzate per verificare l'efficacia del sistema di impermeabilizzazione del fondo vasca.

La durata delle varie condizioni transitorie di riempimento e svuotamento delle vasche è stata definita sulla base del funzionamento idraulico previsto a progetto.

I passi di analisi considerati sono descritti sinteticamente di seguito.

- STEP 0: equilibrio geostatico della situazione iniziale con modello completamente asciutto.
Una volta raggiunto l'equilibrio le deformazioni vengono eliminate.
- STEP 1: imposto il livello di falda alla quota di 152 m s.m. (Tempo = 0 giorni). Viene condotta una analisi di filtrazione in regime transitorio durante la quale vengono computate le variazioni di gradiente e le conseguenti variazioni di flusso e di pressioni interstiziale **all'interno dell'argine e dello strato impermeabilizzato;**
- STEP 2: analisi di stabilità in condizioni asciutte;
- STEP 3: analisi di stabilità in condizioni sismiche. Viene condotta una analisi di tipo pseudostatico imponendo al modello i coefficienti sismici verticali e orizzontali indicati nella relazione sismica (rif.(3));

- **STEP 4:** riempimento della Vasca 1 fino alla sommità dell'argine (Tempo = 0.5 giorni) e mantenimento del livello di invaso (Tempo = 0.75 giorni). Viene condotta l'analisi di filtrazione in regime transitorio;
- STEP 5: rapido svuotamento della Vasca 1 (Tempo = 1 giorni). **Viene condotta l'analisi di filtrazione in regime transitorio;**
- STEP 6: analisi di stabilità;
- STEP 7: entrambe le vasche di laminazione si riempiono e l'acqua sale fino alla quota massima prevista in progetto di 174.2 m s.m. (Tempo = 1.5 giorni). Viene condotta l'analisi di filtrazione in regime transitorio;
- **STEP 8:** il livello dell'acqua scende fino a raggiungere la sommità dell'argine interno a quota 167 m s.m. (Tempo = 3 giorni). Viene condotta l'analisi di filtrazione in regime transitorio;
- STEP 9: analisi di stabilità;
- STEP 10: entrambe le vasche si svuotano (Tempo = 4 giorni). Viene condotta l'analisi di filtrazione in regime transitorio;
- STEP 11: analisi di stabilità;
- **STEP 12:** l'area di laminazione resta asciutta per un intero mese dalla fine della piena eccezionale. Condizioni a lungo termine (Tempo = 34 giorni). Viene condotta l'analisi di filtrazione in regime transitorio;
- STEP 13: analisi di stabilità

3.7 Risultati analisi numeriche

Vengono di seguito riportati i risultati delle elaborazioni numeriche svolte con il modello di calcolo precedentemente descritto. Per tutti gli step in cui è stata effettuata una analisi di stabilità viene riportato il grafico degli spostamenti al raggiungimento delle condizioni di instabilità e il relativo fattore di sicurezza ottenuto. Per le analisi di filtrazione in regime transitorio vengono invece riportati i grafici relativi alla velocità di flusso e al grado di saturazione del modello.

3.7.1 Step 1

Viene imposto il livello di falda alla quota di 152 m s.m. (Tempo = 0 giorni). Come si vede da Figura 3.4 e da Figura 3.5 **allo stato iniziale l'argine è completamente asciutto** ed il terreno al di sotto della quota 152 m s.m. risulta saturo. Lo strato di impermeabilizzazione a quota 159 m s.m. mostra un leggero grado di saturazione ($\approx 30\%$) dovuto alla capacità di suzione con la quale è stato caratterizzato il materiale.

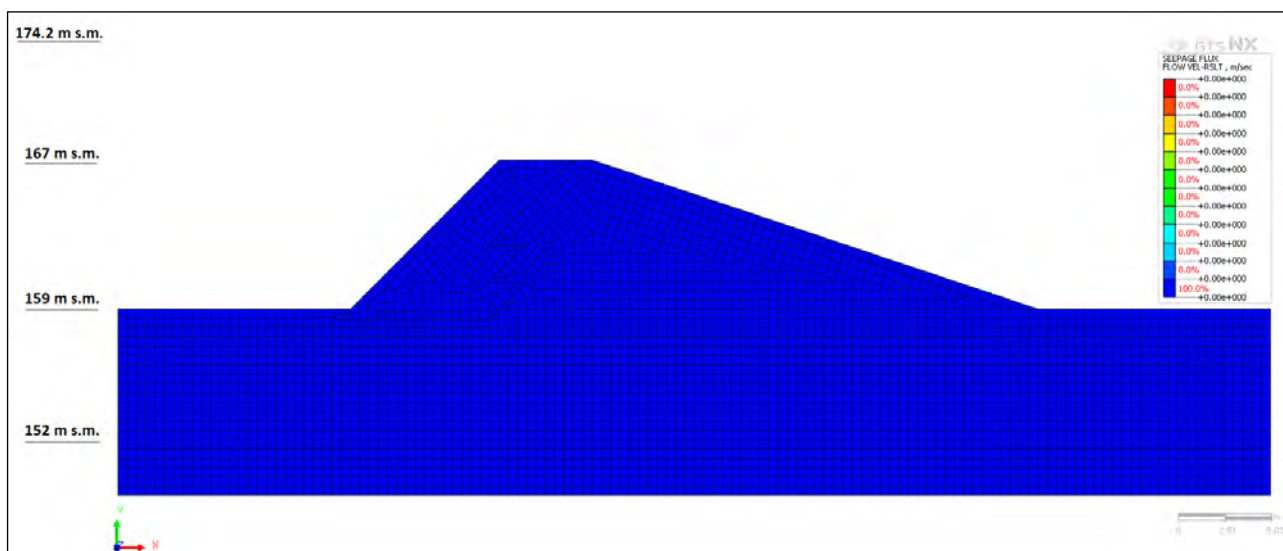


Figura 3.4 – Step 1 – Velocità di flusso

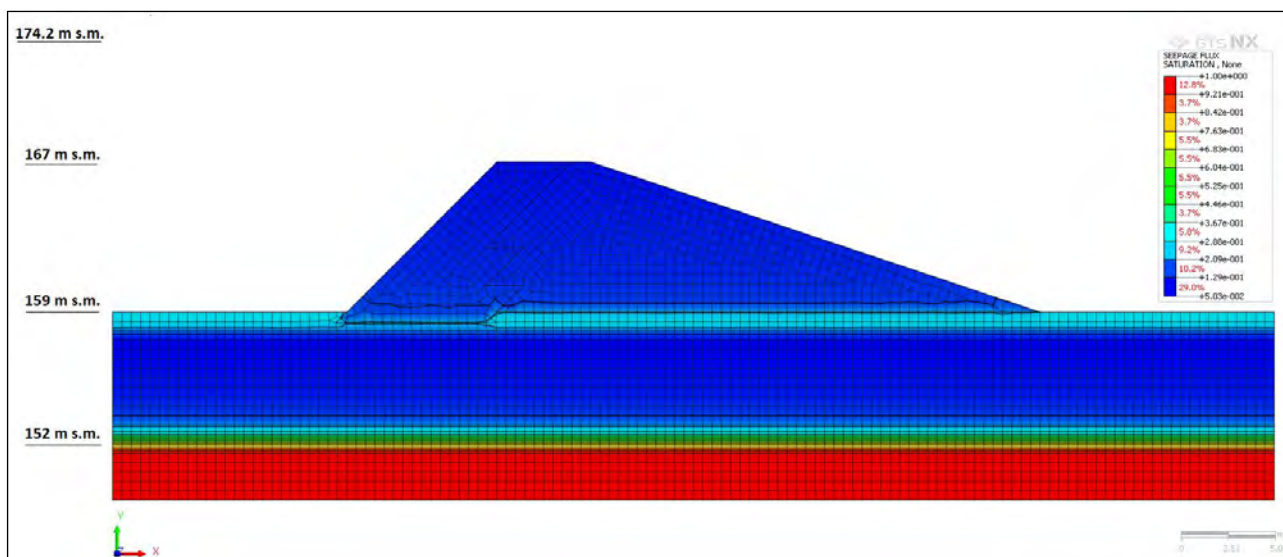


Figura 3.5 – Step 1 – Grado di saturazione

3.7.2 Step 2

Viene condotta l'analisi di stabilità in condizioni asciutte. La sponda dell'argine caratterizzata dal minimo fattore di sicurezza è quella di pendenza maggiore. La superficie di potenziale scivolamento è esterna alle terre rinforzate.

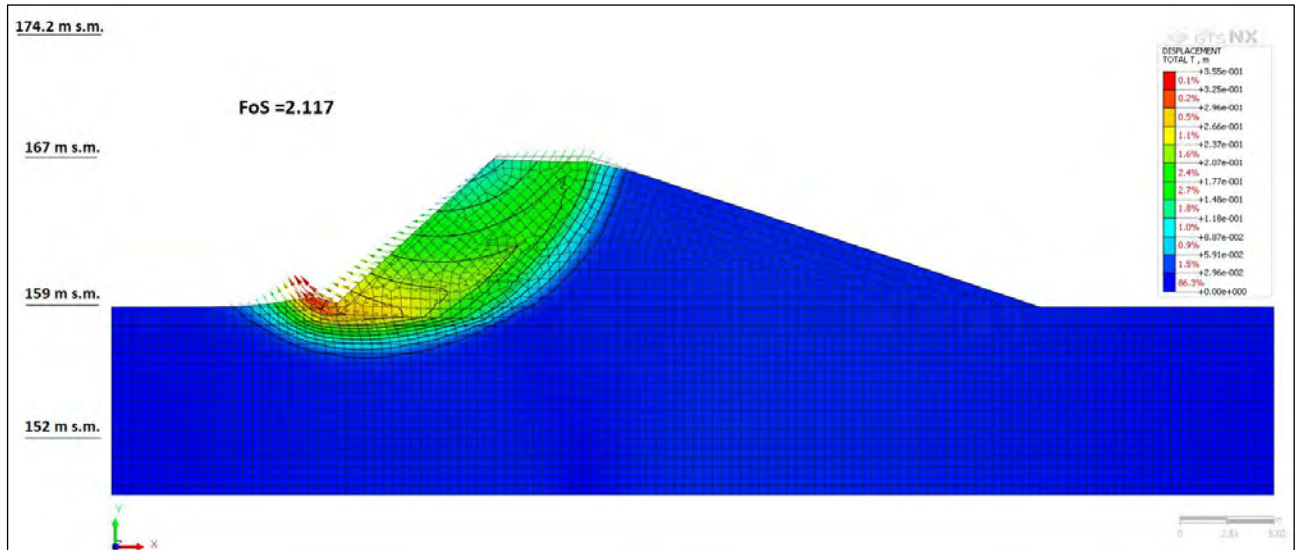


Figura 3.6 – Step 2 – Analisi di stabilità globale

Fattore di sicurezza = $2.117 > 1.1$

La stabilità globale dell'argine interno in condizioni asciutte è verificata.

3.7.3 Step 3

Viene condotta l'**analisi** di stabilità in condizioni sismiche applicando i seguenti coefficienti sismici al modello:

$$k_h = 0.014 \text{ g}$$

$$k_v = -0.007 \text{ g}$$

La **sponda dell'argine** caratterizzata dal minimo fattore di sicurezza è anche in questo caso quella di pendenza maggiore.

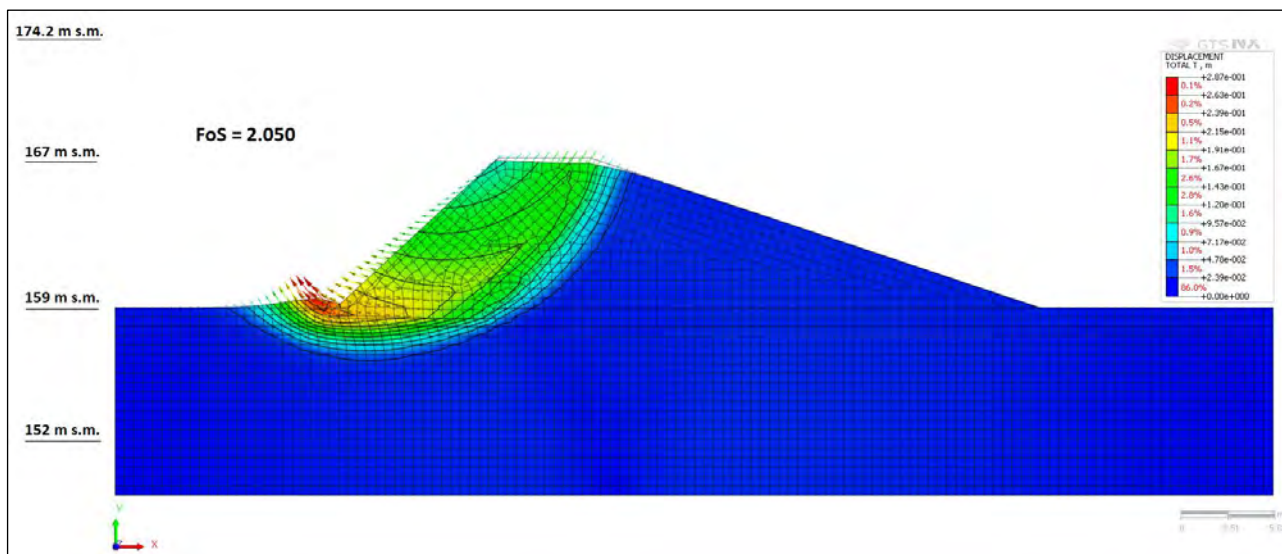


Figura 3.7 – Step 3 – Analisi di stabilità globale

Fattore di sicurezza = 2.050 > 1.1

La stabilità globale dell'argine interno in condizioni sismiche è verificata.

3.7.4 Step 4

In questa fase la Vasca 1 viene riempita fino alla sua sommità, e rimane nelle condizioni di massimo invaso per un tempo pari a 6 ore. I risultati delle analisi di filtrazione in regime transitorio riassunti in Figura 3.8 e Figura 3.9 evidenziano come il sistema di impermeabilizzazione sia in grado di evitare importanti infiltrazioni nei terreni naturali presenti al di sotto del fondo scavo. Risultano infatti saturate solamente le porzioni di terreno superficiali direttamente a contatto con la vasca.

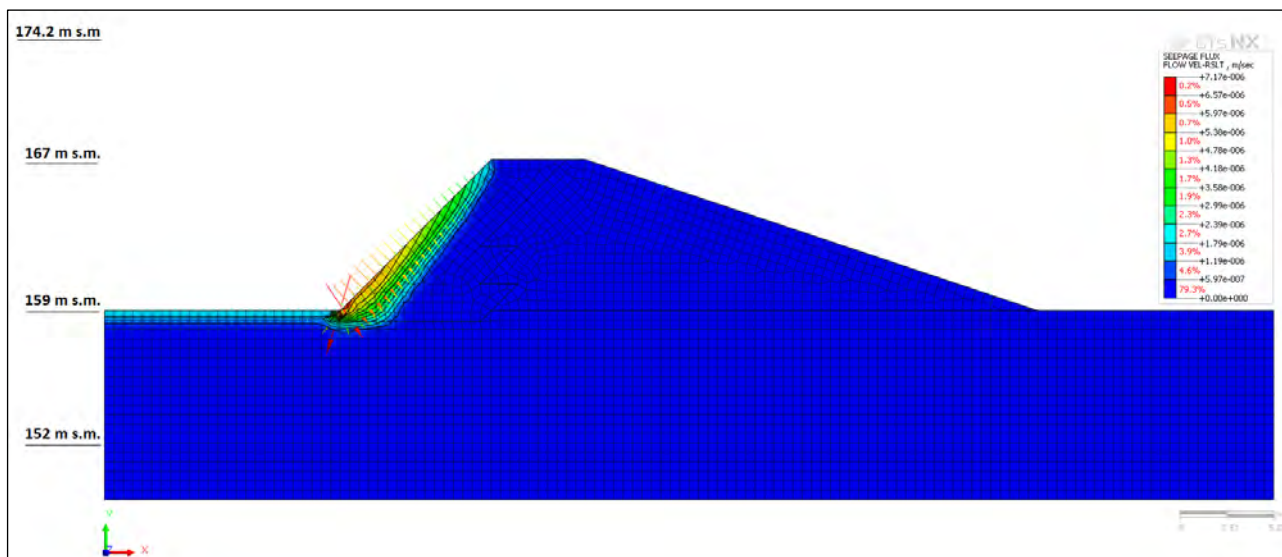


Figura 3.8 – Step 4 – Velocità di flusso

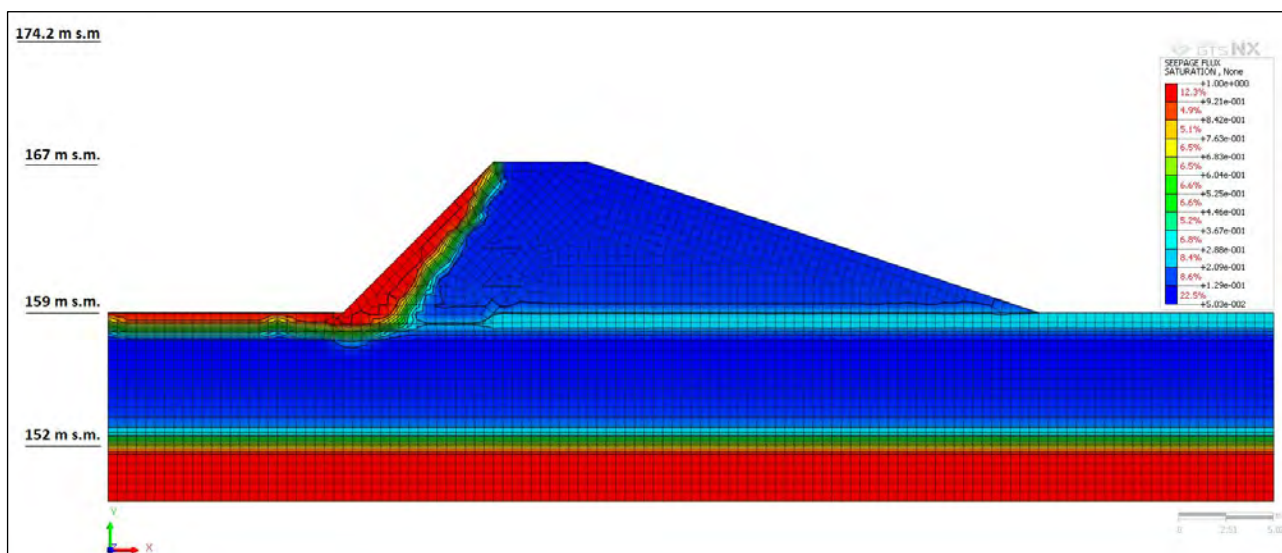


Figura 3.9 – Step 4 – Grado di saturazione

3.7.5 Step 5

In questa fase la Vasca 1 viene svuotata in maniera rapida andando a cambiare repentinamente **le condizioni di equilibrio statico e idraulico all'interno dell'argine: durante lo svaso si ha non solo la perdita di un contrasto alla scarpata (dovuto al carico idraulico), ma anche l'inizio di un fenomeno di filtrazione che porta all'instaurarsi** di significative pressioni neutre in eccesso. Esse vanno ad agire sulle condizioni di equilibrio diminuendo gli sforzi efficaci agenti nel terreno e diminuendo di conseguenza la resistenza al taglio disponibile. Tale condizione rappresenta una delle situazione più sfavorevoli per la stabilità **l'argine**.

In Figura 3.10 e Figura 3.11 si mostrata la direzione del flusso e il grado di saturazione residuo dopo lo svuotamento della vasca.

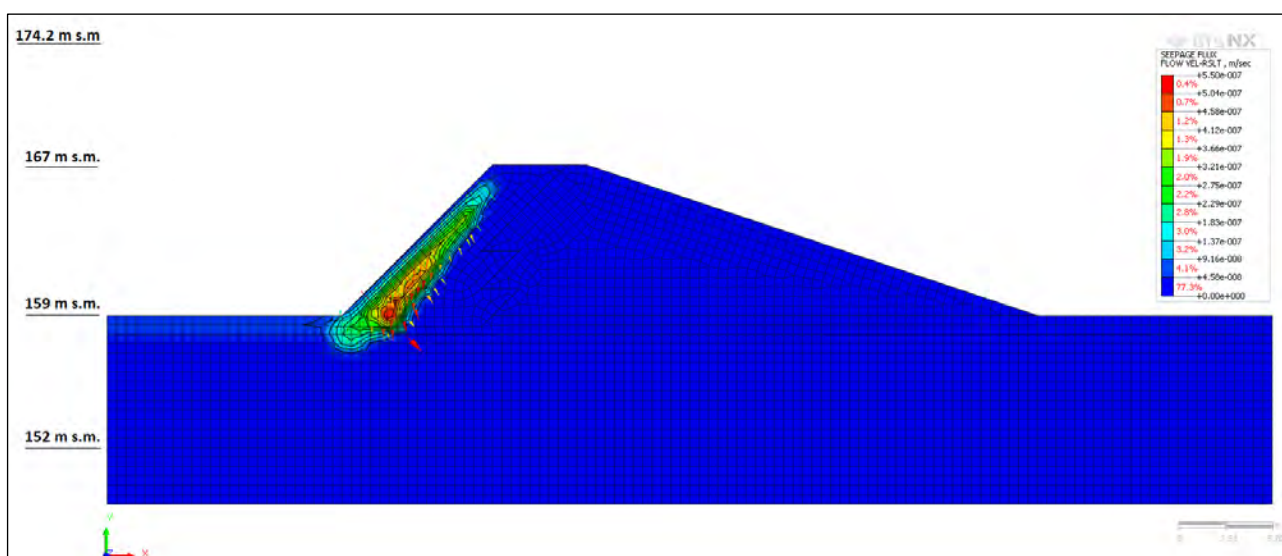


Figura 3.10 – Step 5 – Velocità di flusso

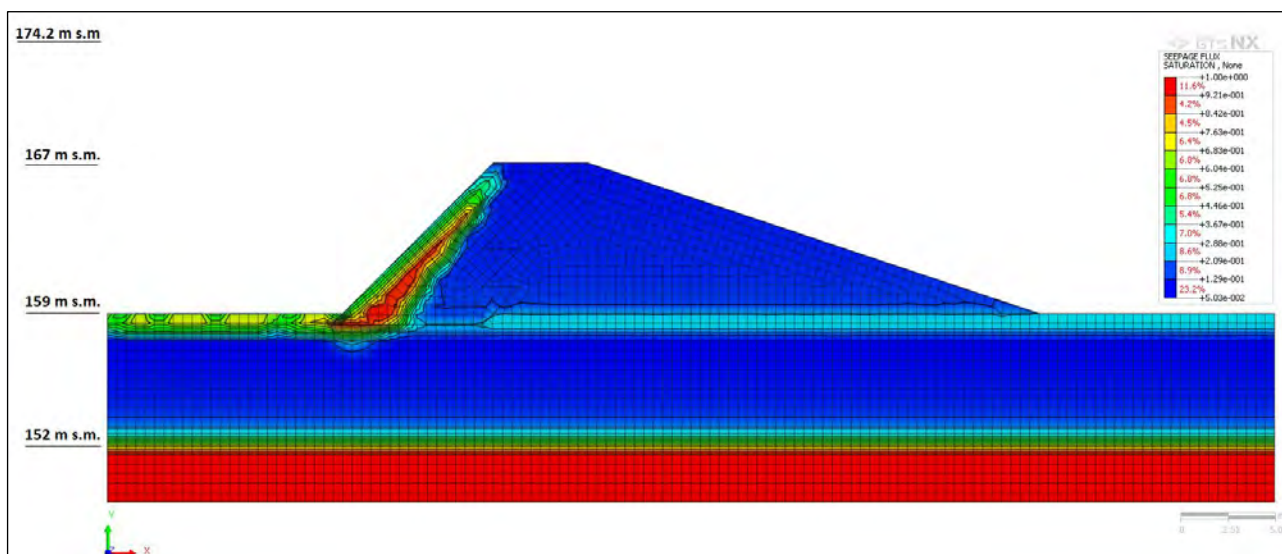


Figura 3.11 – Step 5 – Grado di saturazione

3.7.6 Step 6

Viene condotta una analisi per verificare la stabilità dell'argine nelle condizioni critiche descritte al punto precedente. Come si vede dalla Figura 3.12 la superficie di scivolamento rimane la stessa, ma il fattore di sicurezza diminuisce sensibilmente rispetto alle condizioni iniziali asciutte.

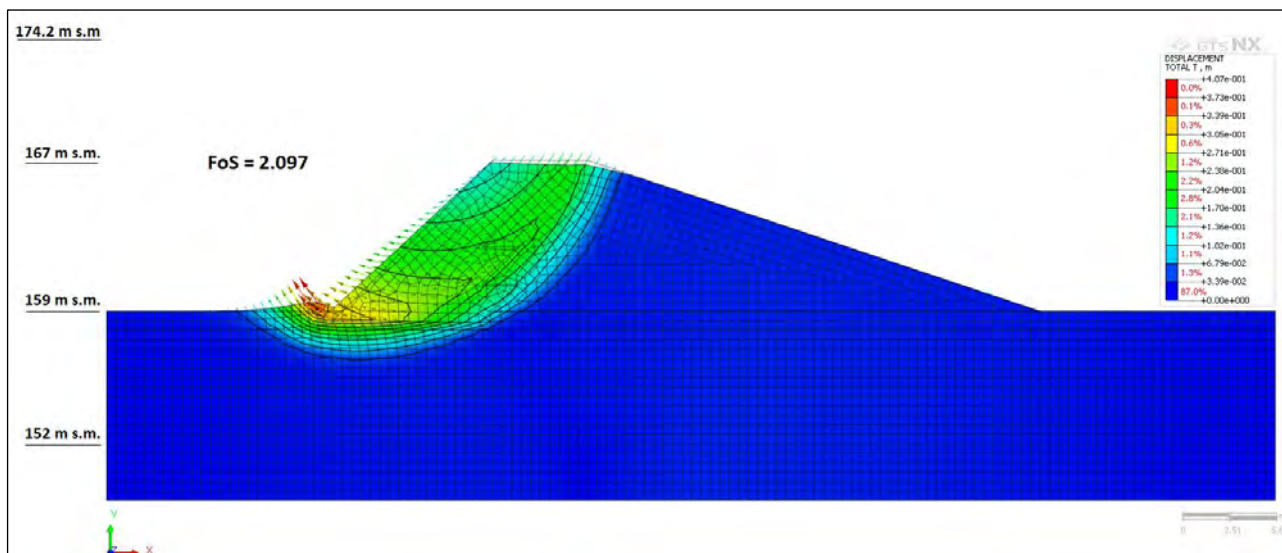


Figura 3.12 – Step 6 – Analisi di stabilità globale

Fattore di sicurezza = $2.097 > 1.1$

La stabilità globale dell'argine interno è verificata.

3.7.7 Step 7

In questa fase si hanno le condizioni estreme di esercizio dell'area di laminazione: la quota dell'acqua è la massima prevista in progetto (174.2 m s.m.). Come evidenziato dalla Figura 3.13 e dalla Figura 3.14 l'elevata pressione idrostatica che agisce su tutto il rilevato porta alla saturazione dei primi metri di rilevato. Le infiltrazioni nello strato di impermeabilizzazione, avendo una permeabilità inferiore, sono meno marcate e denotano un'ottima efficacia anche nella condizione di carico idrostatico più sfavorevole.

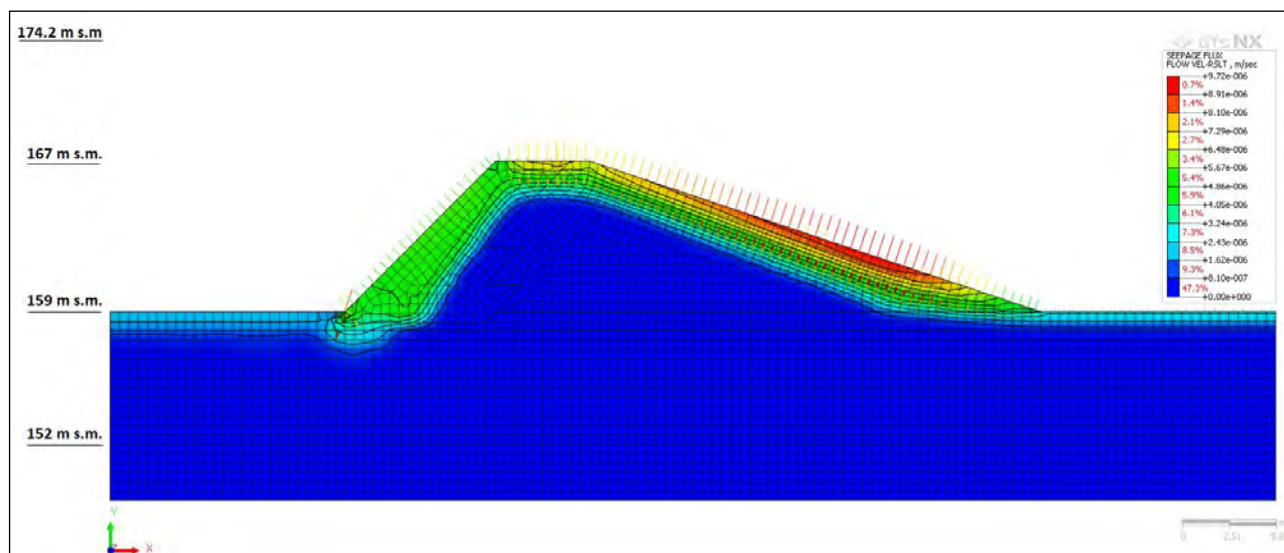


Figura 3.13 – Step 7 – Velocità di flusso

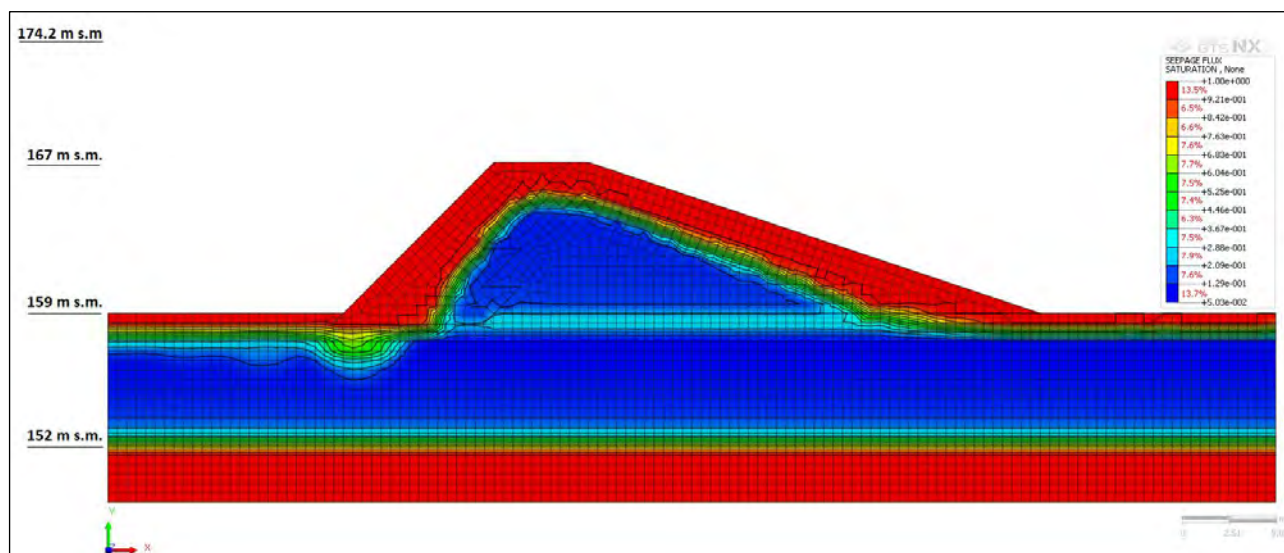


Figura 3.14 – Step 7 – Grado di saturazione

3.7.8 Step 8

In questa fase l'area di laminazione viene in svuotata fino alla sommità dell'argine interno a quota 167 m s.m.. Le analisi di filtrazione in regime transitorio mostrano una saturazione parziale dell'argine che però non arriva ad interessare il nucleo, così come mostrato in Figura 3.16.

Dopo 2 giorni dall'inizio dell'inondazione dell'area di laminazione si ha l'infiltrazione delle acque al di sotto dello strato di impermeabilizzazione del fondo. Il lato della vasca 1 (Figura 3.16) mostra infiltrazioni più significative del lato Vasca 2 rispetto alle condizioni di invaso e svaso degli Step 4-5.

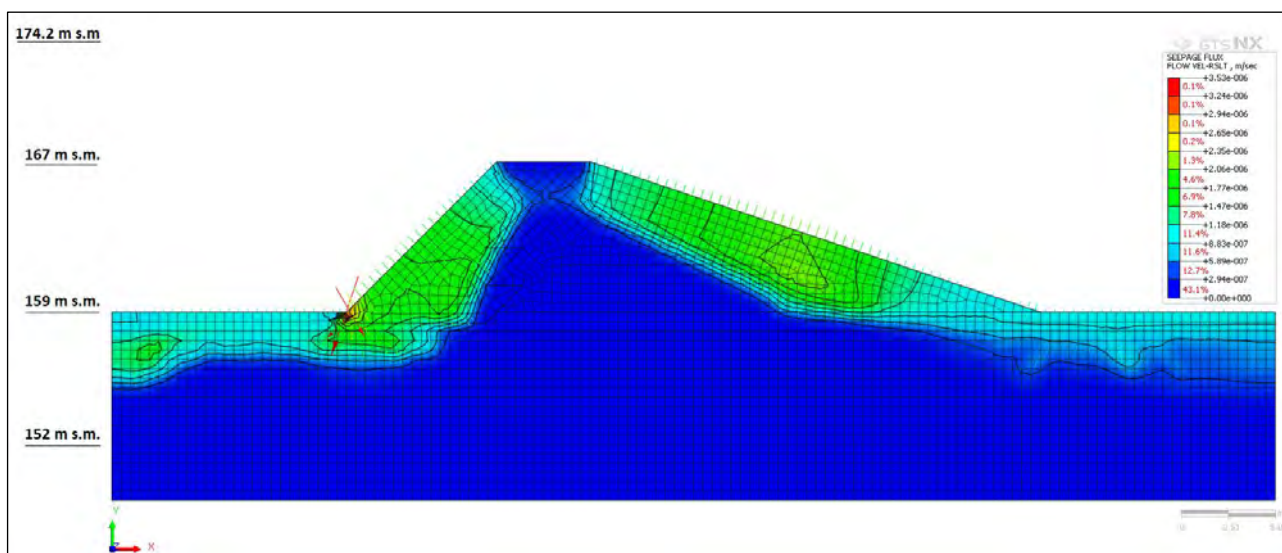


Figura 3.15 – Step 8 – Velocità di flusso

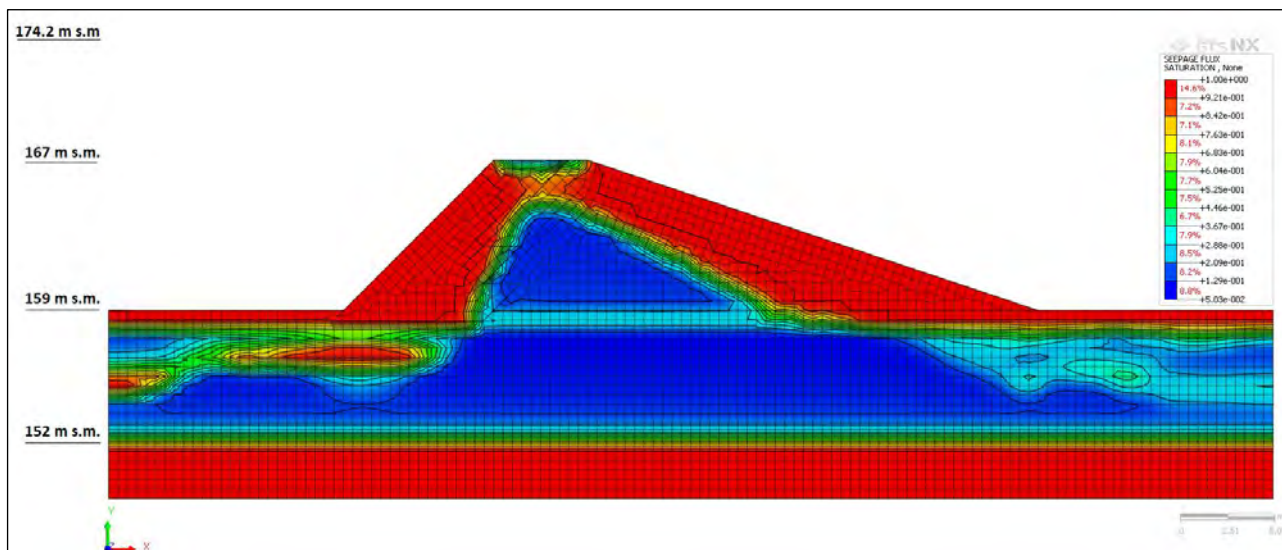


Figura 3.16 – Step 8 – Grado di saturazione

3.7.9 Step 9

Viene condotta una analisi per verificare la stabilità dell'argine nelle condizioni descritte al punto precedente. Essendo ancora presente il carico idrostatico che agisce stabilizzando le sponde dell'argine, il fattore di sicurezza ottenuto è molto elevato. In questa fase il lato Vasca 2 risulta quello caratterizzato dal minimo fattore di sicurezza a causa della marcata saturazione.

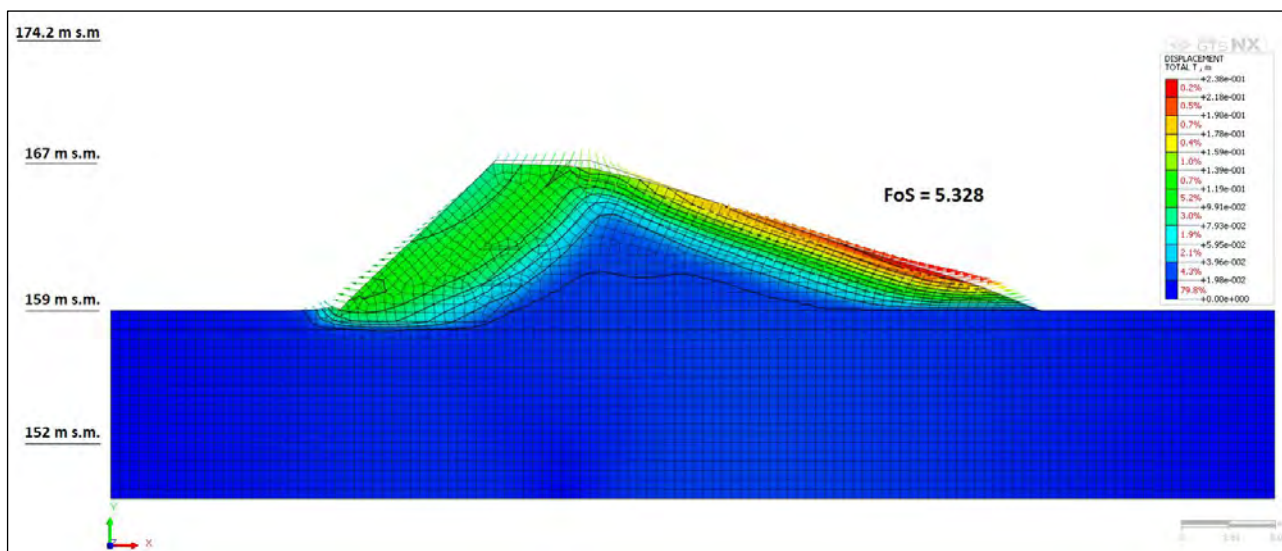


Figura 3.17 – Step 9 – Analisi di stabilità globale

Fattore di sicurezza = $5.328 > 1.1$

La stabilità globale dell'argine interno è ampiamente verificata.

3.7.10 Step 10

In questa fase entrambe le vasche vengono svuotate. Come si mostrato nella Figura 3.18 e nella Figura 3.19 il flusso delle acque è limitato **all'interno dell'argine** ed è legato alla progressiva migrazione verso il basso dell'acqua che era andata a saturare i terreni nelle precedenti condizioni di carico.

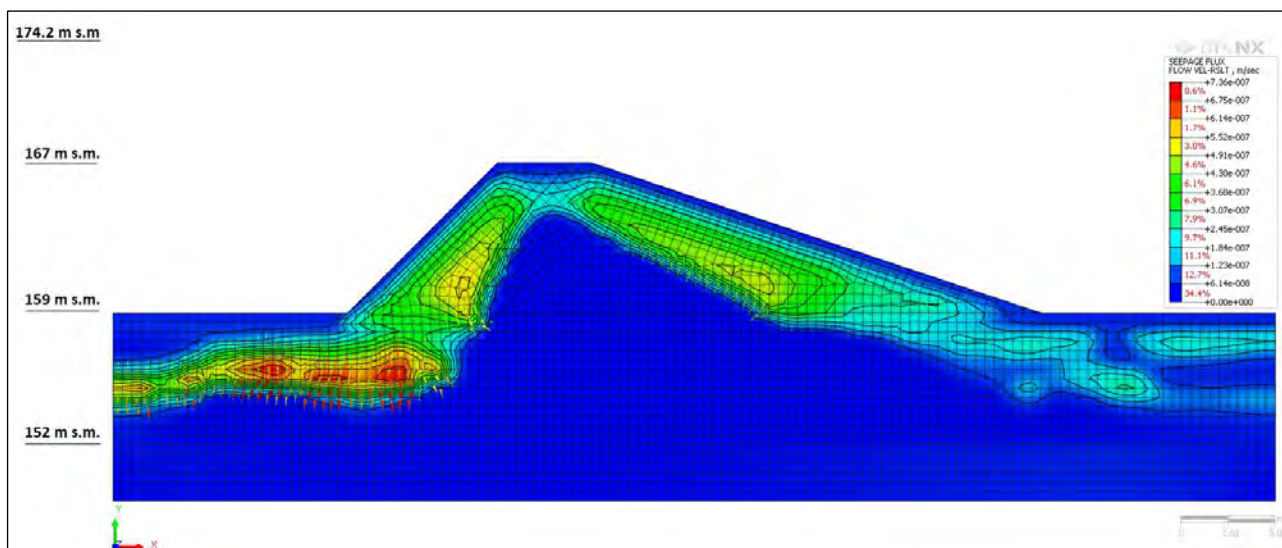


Figura 3.18 – Step 10 – Velocità di flusso

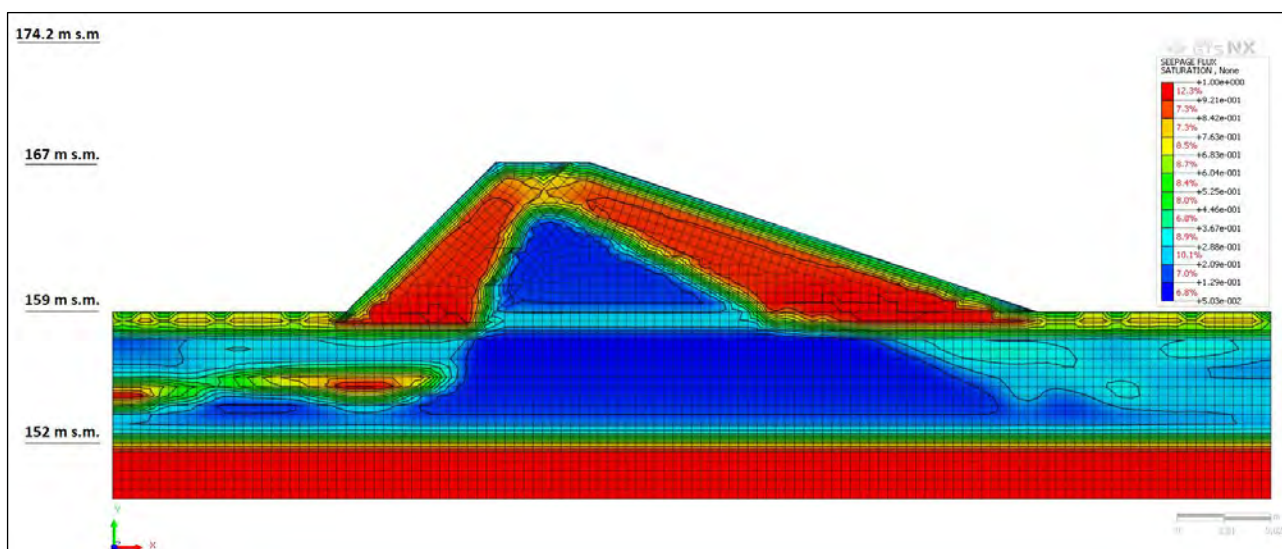


Figura 3.19 – Step 10 – Grado di saturazione

3.7.11 Step 11

Viene condotta una analisi per verificare la stabilità dell'argine nelle condizioni descritte al punto precedente. La superficie di scivolamento caratterizzata dal minimo fattore di sicurezza si trova sulla sponda della Vasca 1 (Figura 3.20). In questa fase l'argine è caratterizzato dalle condizioni di massima saturazione, si ottiene di conseguenza anche il minimo fattore di sicurezza di tutte le analisi.

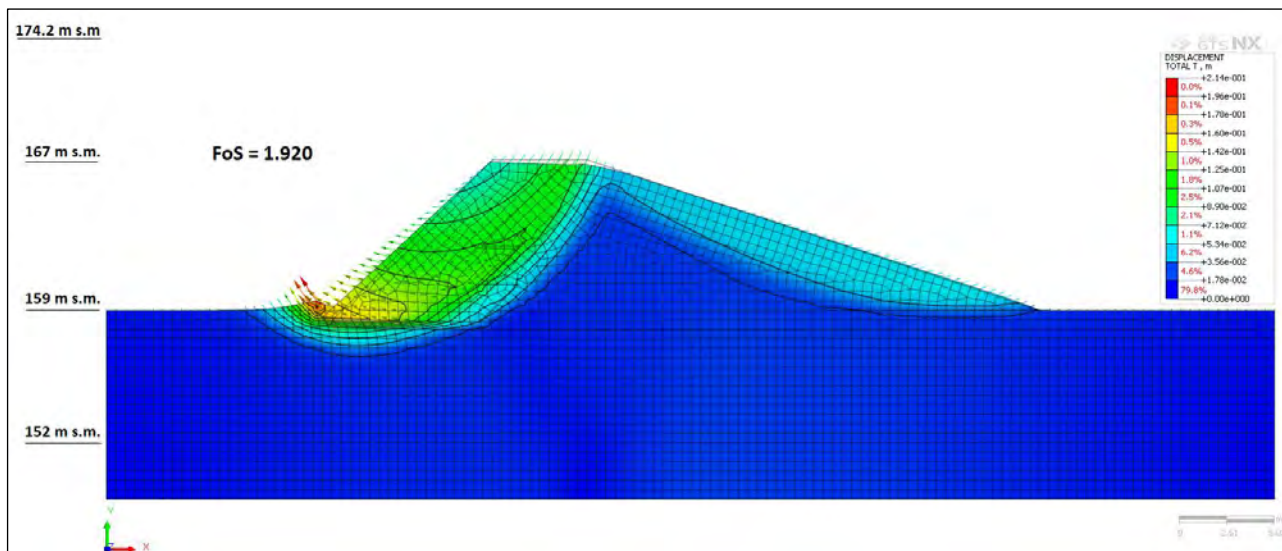


Figura 3.20 – Step 11 – Analisi di stabilità globale

Fattore di sicurezza = $1.920 > 1.1$

La stabilità globale dell'argine interno è verificata.

3.7.12 Step 12

Viene infine condotta una analisi di filtrazione in regime transitorio a lungo termine, ad un mese dal temine delle operazioni di svasso delle vasche di laminazione.

Il flusso residuale è solo quello relativo all'acqua che aveva saturato l'argine e che tende a migrare verso gli strati inferiori (Figura 3.21). Il grado di saturazione del modello mostrato in Figura 3.22 evidenzia come dopo un mese dallo svasso l'argine risulti ancora parzialmente saturato.

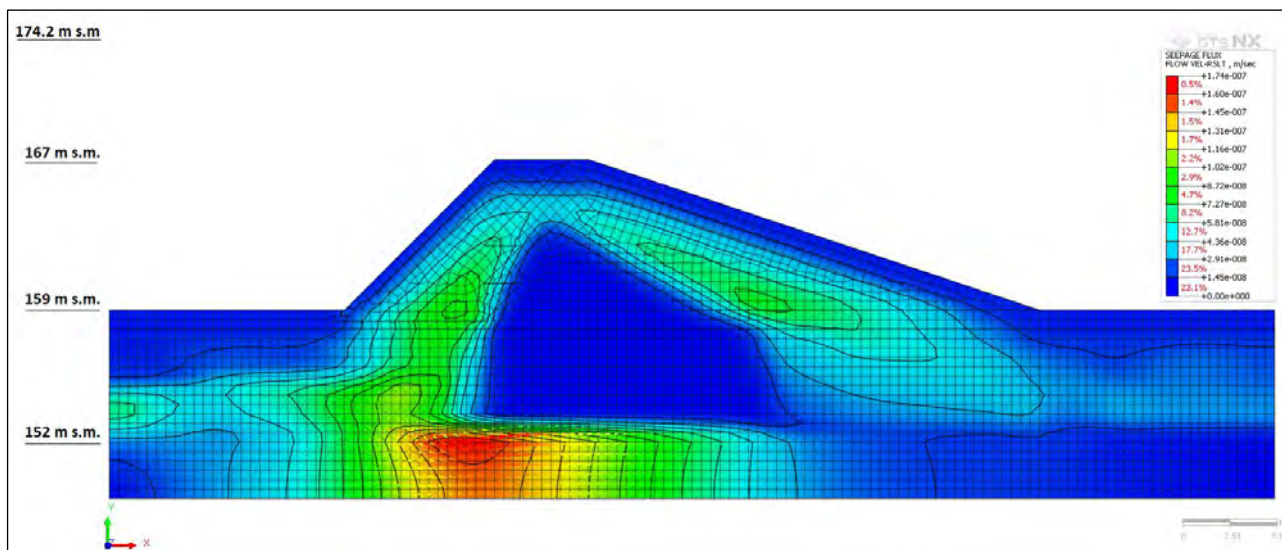


Figura 3.21 – Step 12 – Velocità di flusso

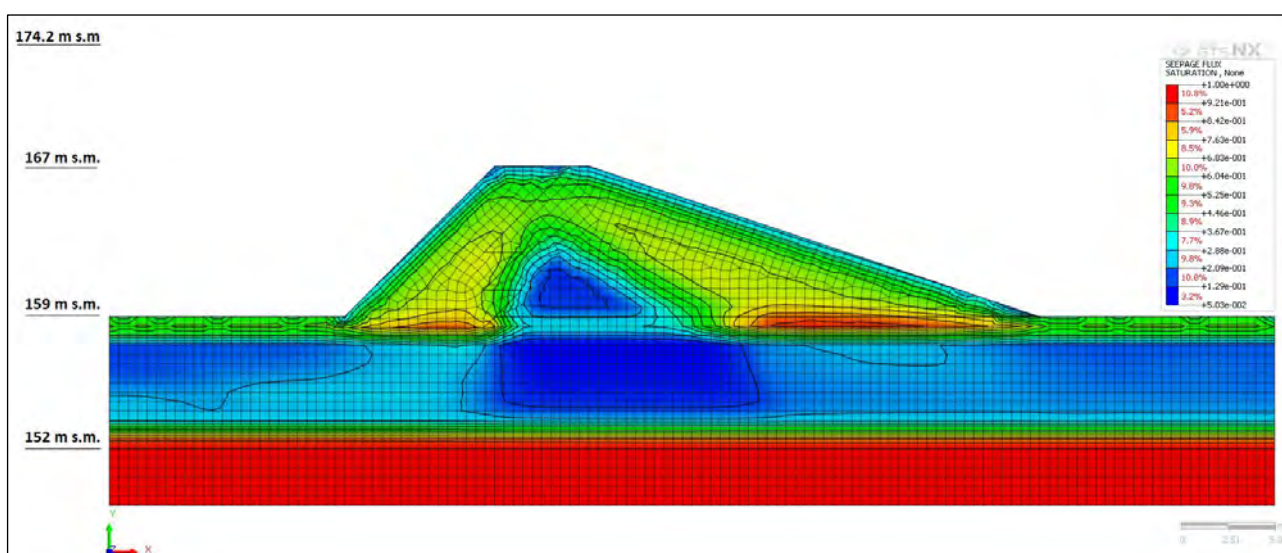


Figura 3.22 – Step 12 – Grado di saturazione

3.7.13 Step 13

Viene infine condotta una analisi per verificare la stabilità **dell'argine nelle condizioni a lungo termine** descritte al punto precedente. Essendo diminuito il grado di saturazione ed i processi di filtrazione **all'interno dell'argine**, il **fattore di sicurezza aumenta** (Figura 3.23).

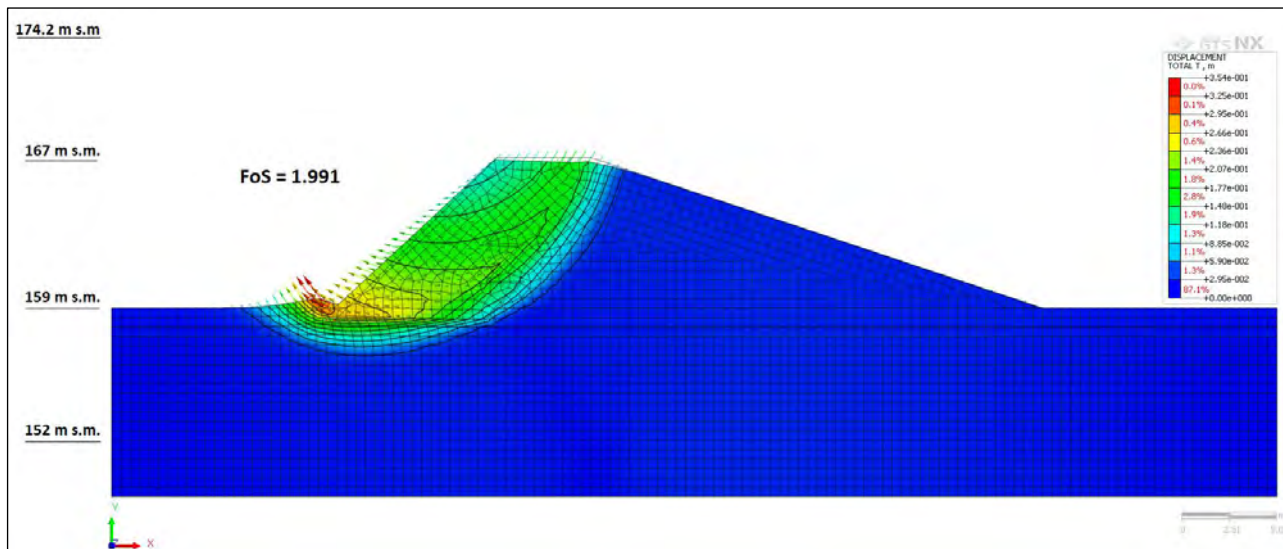


Figura 3.23 – Step 13 – Analisi di stabilità globale

Fattore di sicurezza = $1.991 > 1.1$

La stabilità globale dell'argine interno è verificata.

3.8 Conclusioni

Le analisi di **stabilità** eseguite con l'impiego di una modellazione numerica agli elementi di finiti hanno permesso di **verificare la sicurezza dell'argine intermedio in progetto** in tutte le fasi di esercizio dell'opera. **Tutte le verifiche** di stabilità globale delle sponde **dell'argine risultano** ampiamente soddisfatte, anche considerando le condizioni di svuotamento rapido delle vasche.

Attraverso le analisi **è stato inoltre possibile verificare l'efficacia del sistema di impermeabilizzazione del fondo dell'area di laminazione**.

4 Verifiche scarpate vasche

4.1 Descrizione dell'opera

Per la realizzazione dell'area di laminazione si prevede lo sbancamento del terreno in sito dalla quota attuale (compresa tra 173.5 m s.l. e 178 m s.l.) sino alla quota di 159 m s.l.

Le sponde laterali della vasca verranno sagomate con la geometria indicata nel tipologico di Figura 4.1.

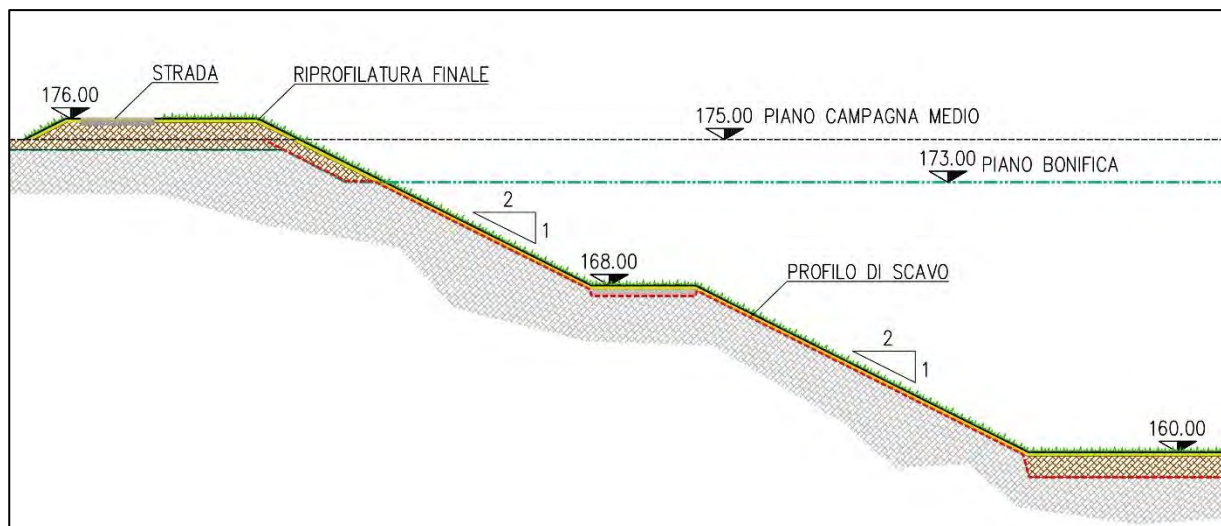


Figura 4.1 – Tipologico sponde laterali vasche di laminazione.

Gli scavi verranno eseguiti fino alla quota minima di 159 m s.l. per una profondità massima di 16 m. Verrà successivamente steso uno strato di impermeabilizzazione sul fondo della vasca di spessore pari a 1 m, realizzato con terreno di scavo vagliato e opportunamente costipato in sito in modo da ottenere una permeabilità massima di 10^{-7} m/s.

Per le opere spondali sarà realizzato un profilo costituito da due scarpate principali con una pendenza di 2:1. Esse saranno rivestite con un manto impermeabile successivamente ricoperto con terreno di coltivo per permettere il rinverdimento. In sommità alle opere di sponda verrà realizzata una strada di servizio che permetterà l'accesso all'area con mezzi idonei alla manutenzione della vasca di laminazione.

4.2 Condizioni di carico

4.2.1 Carichi gravitazionali

I carichi gravitazionali sono stati definiti sulla base dei pesi propri del terreno, così come riportati nella caratterizzazione geotecnica già riportata in Tabella 3.1.

4.2.2 Carico stradale accidentale

Nelle condizioni di esercizio verrà considerato il carico accidentale dovuto al passaggio di automezzi in sommità alle opere spondali. Esso è stato assunto come sovraccarico distribuito su una larghezza di 3.0 metri. Il sovraccarico, pari a 20 kPa, viene amplificato per il coefficiente parziale A2 relativo a carichi variabili sfavorevoli.

In accordo alle NTC2008, i sovraccarichi accidentali da traffico non sono stati combinati con le azioni sismiche, per tanto essi sono stati considerati nulli nelle verifiche in condizioni sismiche.

4.2.3 Carico sismico

Le verifiche in condizioni sismiche sono state condotte tenendo conto di una spinta pseudo statica equivalente, calcolata a partire dai seguenti valori dei coefficienti sismici orizzontale e verticale:

$$k_H = 0.014 g$$

$$k_V = - 0.007 g$$

I coefficienti sismici sono stati calcolati per il sito in esame sulla base di quanto definito al Par.7.11.3.5.2 delle NTC 2008.

4.2.4 Carico idraulico

In condizioni di esercizio la vasca di laminazione può arrivare ad un livello massimo d'invaso posto a quota 174.20 m s.l. In tale condizione il carico idraulico, esercitando una pressione sulle sponde, va a incrementare la **stabilità dell'opera e per tanto tale condizione non verrà verificata.**

4.2.5 Livello di falda

Dalle indagini effettuate in sito (rif.(3)) e dalla documentazione disponibile è stata identificata una quota di progetto della falda di 152.5 m s.m. con una escursione massima di 5 m. Per tanto vengono considerate condizioni asciutte per le analisi di stabilità delle opere di sponda (fondo scavo a 159 m s.m.).

4.3 Verifiche di sicurezza

4.3.1 Approccio metodologico

Per la verifica di stabilità globale delle sponde sono state considerate due fasi costruttive distinte, così come previsto dalla vigente normativa al §6.8.2 rif.(1):

- Fase di scavo – Da piano campagna 175 m s.l. alla quota minima 159 m s.l.;
- Opera ultimata – Stesa dello strato impermeabile sul fondo fino a quota 160 m s.l., stesa manto impermeabile e terreno di coltivo sulle scarpate e realizzazione del rilevato stradale in sommità.

E' stato adottato il noto approccio all'equilibrio limite, secondo il metodo di Morgenstern e Price (1965) (rif.(11)), basato su una procedura di risoluzione iterativa che consente di soddisfare sia l'equilibrio alla rotazione che quello alla traslazione orizzontale, tenendo conto sia delle forze normali che delle forze di taglio trasmesse tra i conci in cui il pendio viene discretizzato.

L'analisi è stata eseguita utilizzando il codice di calcolo GEO-SLOPE 2007 (rif.(13)), in grado di effettuare la ricerca automatica delle superfici di scivolamento caratterizzate dal rapporto minimo fra resistenze e azioni di progetto.

Tutte le nuove verifiche sono state eseguite ai sensi delle vigenti NTC2008 (rif.(1)).

In accordo con quanto riportato al §6.8.1 delle citate norme tecniche, le verifiche sono state eseguite **secondo l'Approccio 1 – Combinazione 2 (A2+M2+R2).**

In generale nelle NTC2008 (§6.2.3) è richiesto che sia soddisfatta la condizione:

$$E_d \leq R_d$$

dove E_d **è il valore di progetto dell'azione o degli effetti delle azioni** e R_d è il valore di progetto della resistenza del sistema geotecnico, ovvero:

$$E_d = E \left[\gamma_F \times F_K; \frac{X_K}{\gamma_M}; a_d \right]$$

$$R_d = \frac{1}{\gamma_R} \times R \left[\gamma_F \times F_K; \frac{X_K}{\gamma_M}; a_d \right]$$

Nelle formulazioni di cui sopra, il valore degli effetti delle azioni (E) e della resistenza (R) dipendono dai seguenti fattori:

- Azioni di progetto ($\gamma_F \times F_K$): dove F_K rappresenta il valore della generica azione caratteristica e γ_F il relativo coefficiente amplificativo (nel caso specifico appartenente al gruppo A2);

- Parametri di progetto (X_k/γ_M): dove X_k rappresenta il generico parametro meccanico caratteristico del terreno/roccia e γ_M il relativo coefficiente riduttivo (nel caso specifico appartenente al gruppo M2);
- Geometria di progetto (a_d).

Inoltre nella formulazione delle resistenze di progetto (R_d), compare il coefficiente riduttivo della resistenza del sistema geotecnico (γ_R , nel caso specifico appartenente al gruppo R2), da applicare alla resistenza (R).

L'analisi di stabilità globale all'equilibrio limite viene eseguita calcolando il coefficiente riduttivo della resistenza del sistema geotecnico ($\gamma_{R_CALC} = R/E_d$) e valutando che quest'ultimo sia maggiore o uguale al coefficiente parziale minimo imposto dalla normativa (γ_R), funzione della tipologia di sistema geotecnico studiato (nel caso specifico $\gamma_{R2} = 1.1$).

Le analisi sono state eseguite sia in condizioni statiche (SLU) sia in condizioni sismiche (SLV).

I parametri di progetto utilizzati per le analisi sono stati calcolati partendo dai valori caratteristici ottenuti dalle specifiche indagini in sito. Essi sono riportati in Tabella 4.1.

Unità Geotecnica	Peso di volume	Angolo di resistenza al taglio	Coesione efficace
	γ_N (kN/m ³)	ϕ'_{d_M2} (°)	c'_{d_M2} (kPa)
TV – Terreno vegetale	18.0	24.8	0.0
GS – Ghiaia Sabbiosa	18.0	29.6	0.0
SGL – Sabbia Ghiaiosa Limosa	19.5	33.4	0.0
SL – Sabbia Limosa	20	34.8	0.0
Finitura	20	29.3	4.0

Tabella 4.1 - Parametri di resistenza di progetto utilizzati per le analisi

L'ultimo strato denominato "Finitura" fa riferimento al terreno impiegato per la sagomatura finale del terreno. Per tale strato si considera un angolo di resistenza al taglio caratteristico non inferiore ai 35° ed una coesione efficace caratteristica di 5 kPa, da verificare durante la posa in opera mediante un'adeguata campagna sperimentale e prove di corretta posa in opera.

In Figura 4.2 e Figura 4.3 sono riportati i modelli geometrici con le caratteristiche meccaniche importati nel software Geoslope nelle due sequenze costruttive.

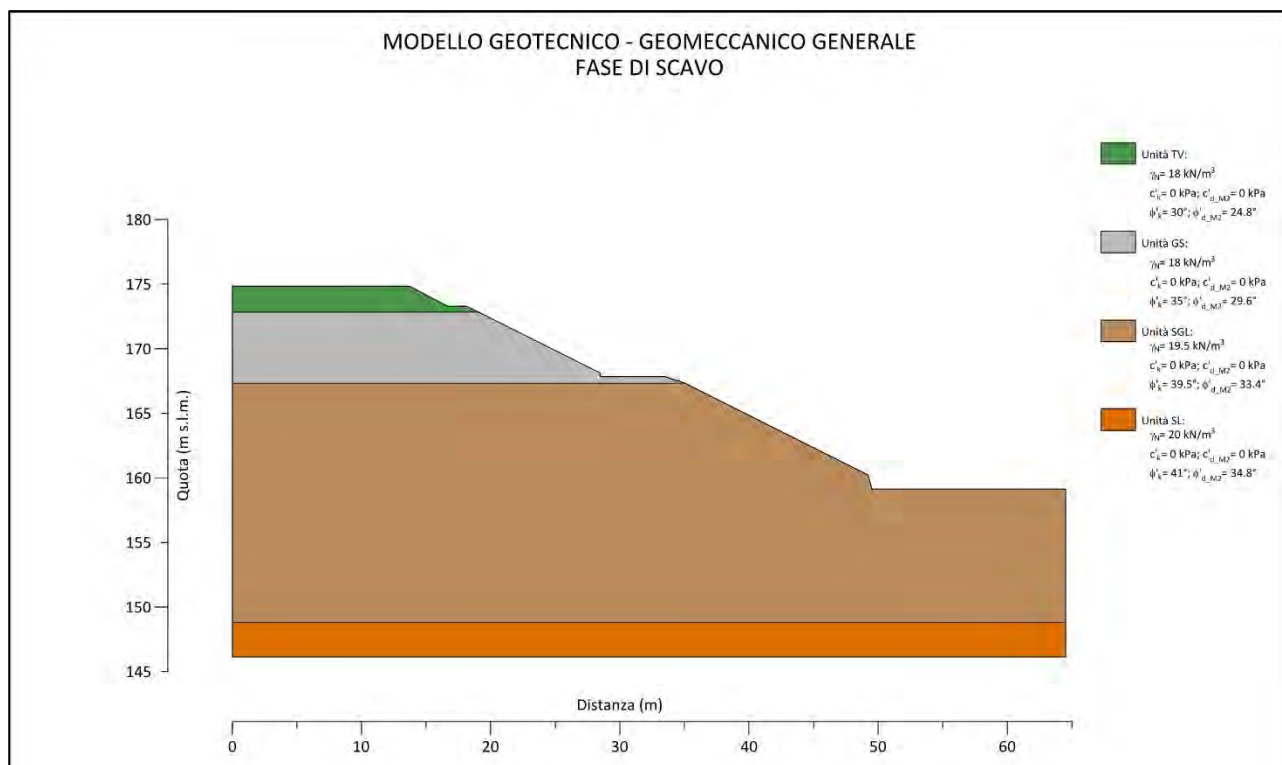


Figura 4.2 – Modello geotecnico e geomeccanico durante la fase di scavi.

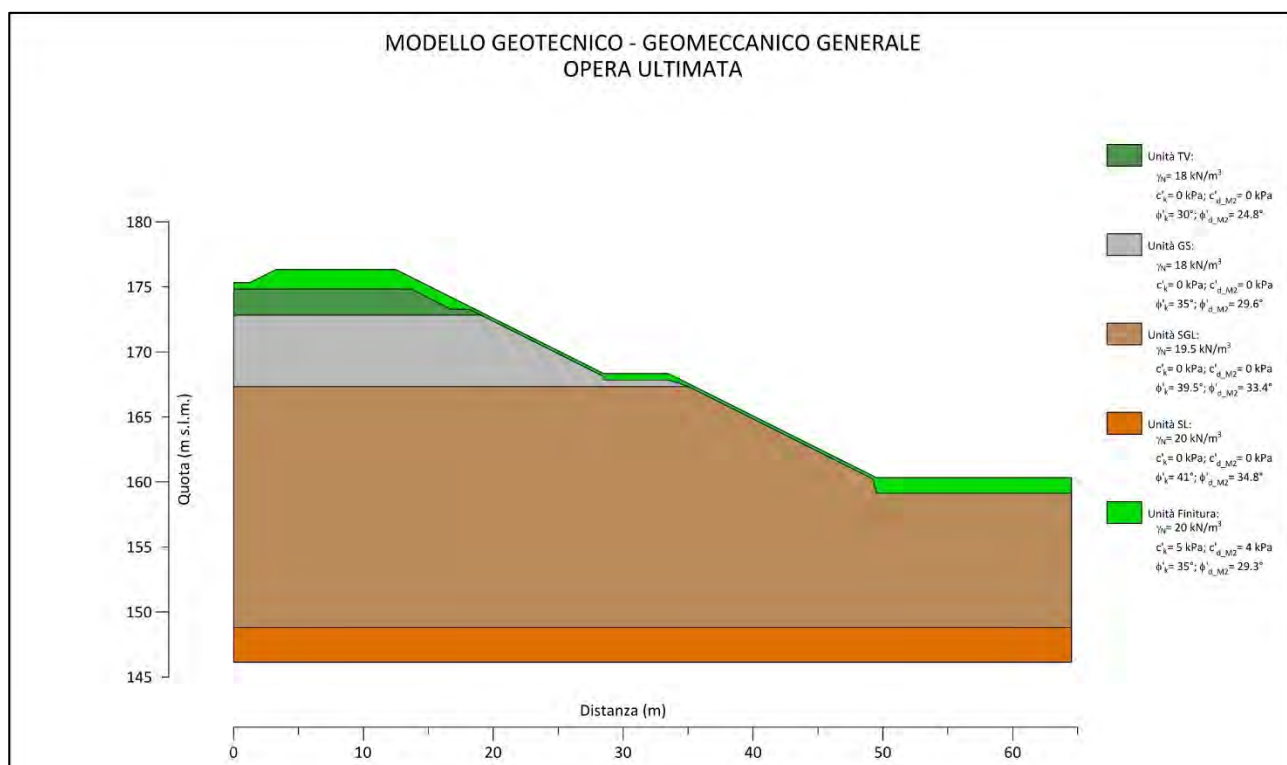


Figura 4.3 – Modello geotecnico e geomeccanico durante la fase di scavi.

4.3.2 Risultati

Per ciascuna verifica sono state condotte due differenti analisi data l'eterogeneità stratigrafica:

- Scarpata superiore
- Scarpata inferiore

Entrambe le superfici di scivolamento sono state ricercate andando ad imporre opportune zone di ingresso e di uscita delle potenziali superfici di scivolamento nelle analisi all'equilibrio limite.

4.3.2.1 Analisi statiche

In Figura 4.4 e Figura 4.6 sono riportati i risultati delle analisi condotte in condizione statiche per il profilo durante le operazioni scavo.

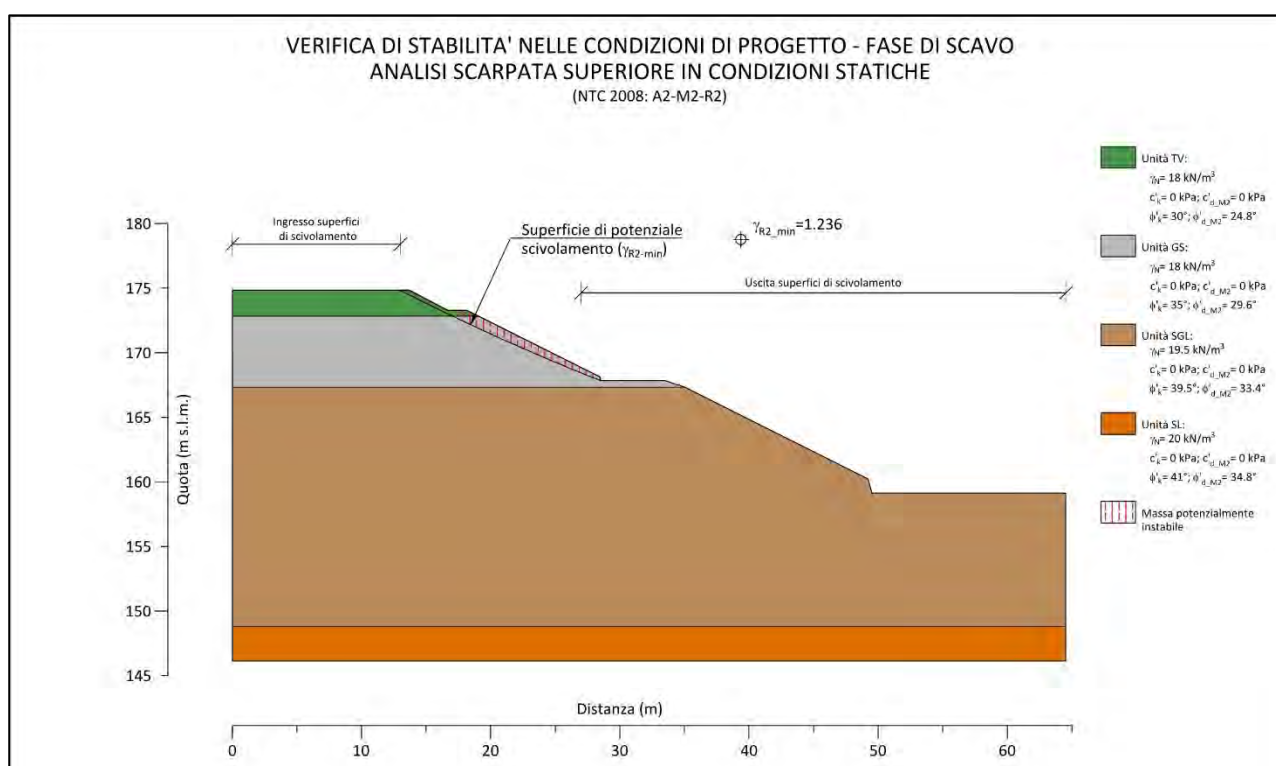


Figura 4.4– Risultati analisi statica scarpata superiore – Fase di scavo.

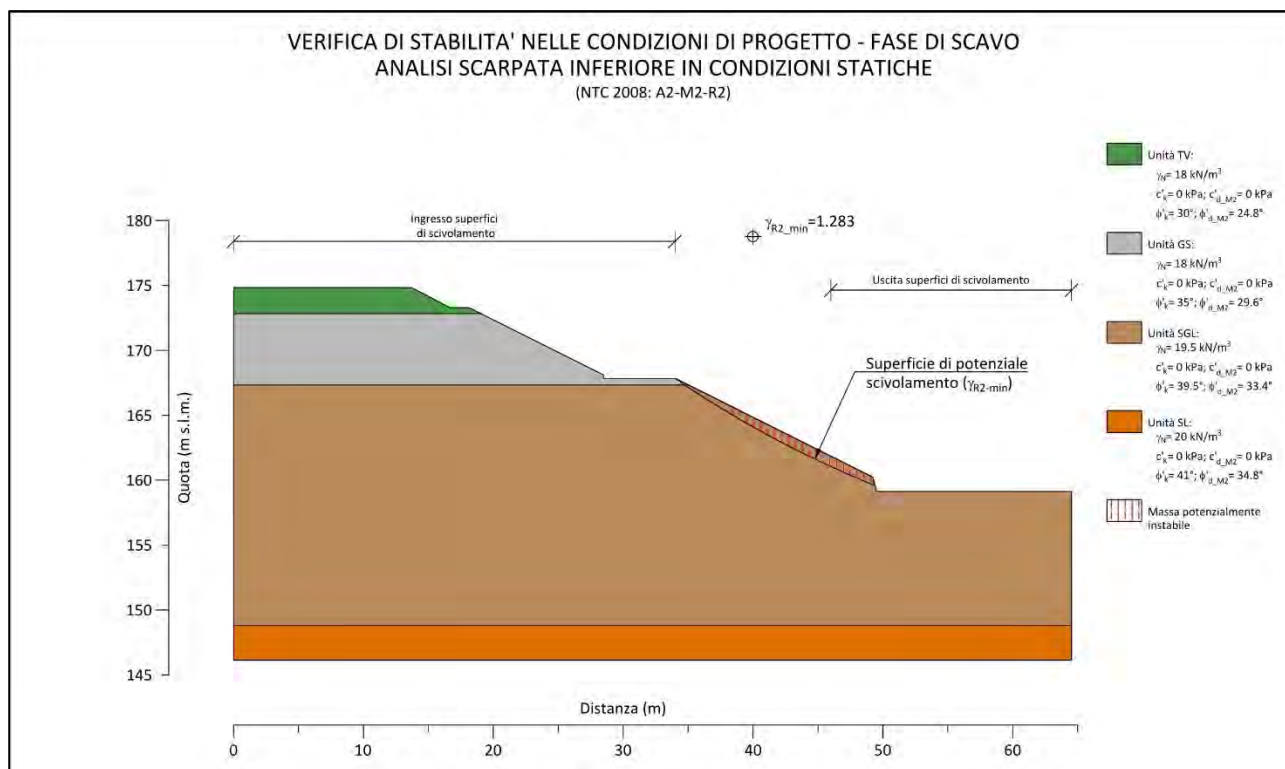


Figura 4.5– Risultati analisi statica scarpata inferiore – Fase di scavo.

In Figura 4.6 e Figura 4.7 sono riportati i risultati delle analisi condotte in condizione statiche per il profilo ad opera ultimata, con strada di servizio in esercizio.

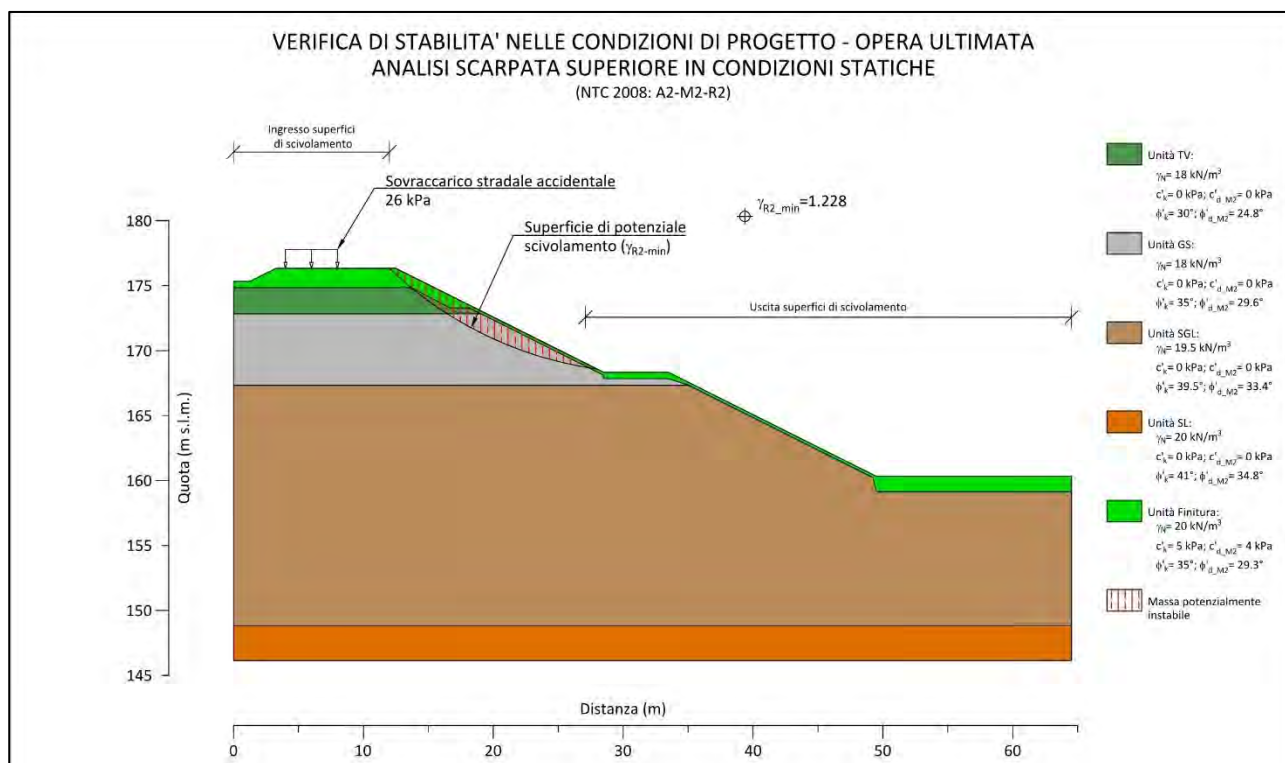


Figura 4.6– Risultati analisi statica scarpata superiore – Opera ultimata.

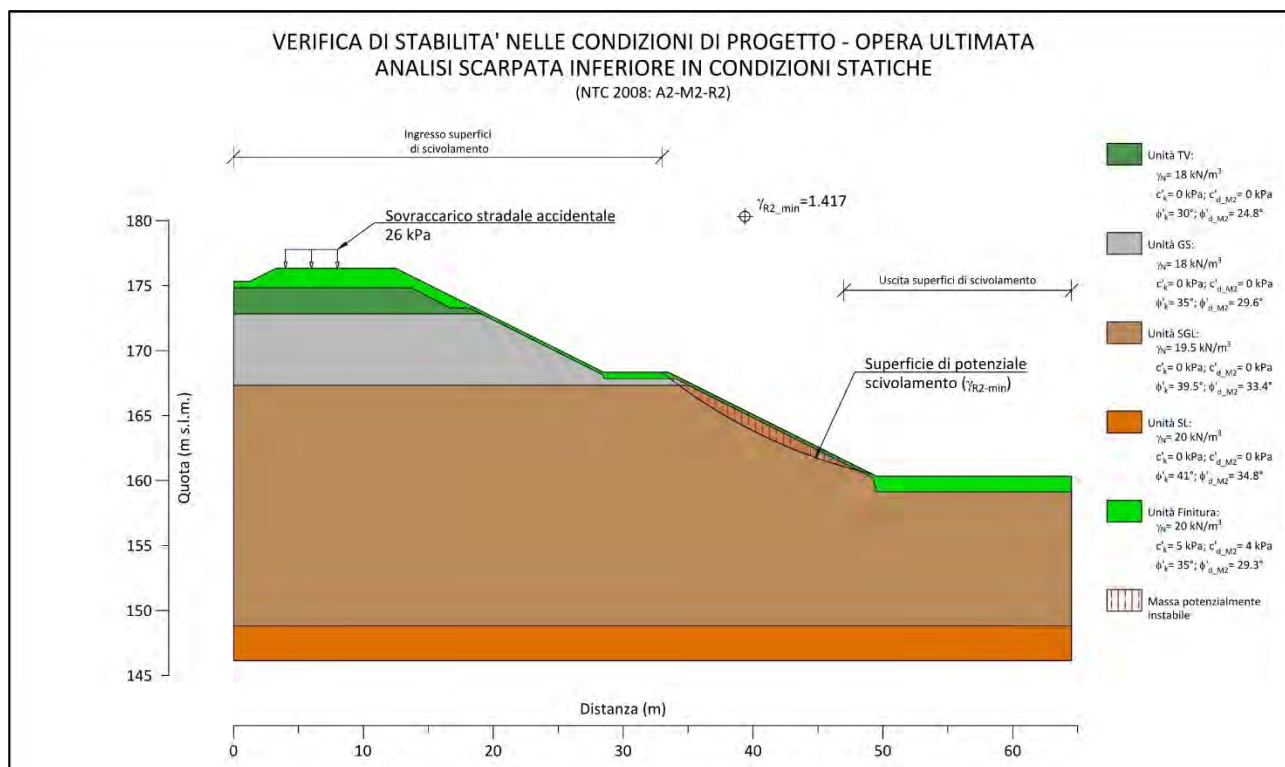


Figura 4.7– Risultati analisi statica scarpata inferiore – Opera ultimata.

In tutte le combinazioni esaminate i coefficienti di sicurezza minimi ($\gamma_{R_calc_MIN}$) risultano maggiori al valore di γ_R previsto dalla normativa, pari a 1.1, per cui le verifiche di stabilità globale in condizioni statiche sono soddisfatte. I risultati sono riportati in termini numerici sono riassunti nella Tabella 4.2.

TIPOLOGIA DI ANALISI	$\gamma_{R_calc_minimo}$
Fase di scavo – Scarpata superiore	1.236
Fase di scavo – Scarpata inferiore	1.283
Opera ultimata – Scarpata superiore	1.228
Opera ultimata – Scarpata inferiore	1.417

Tabella 4.2 - Risultati ottenuti dall'analisi all'equilibrio limite

4.3.2.2 Analisi sismica

In Figura 4.8 e Figura 4.9 vengono riportati i risultati delle analisi condotte in condizione sismiche per il profilo durante le operazioni scavo.

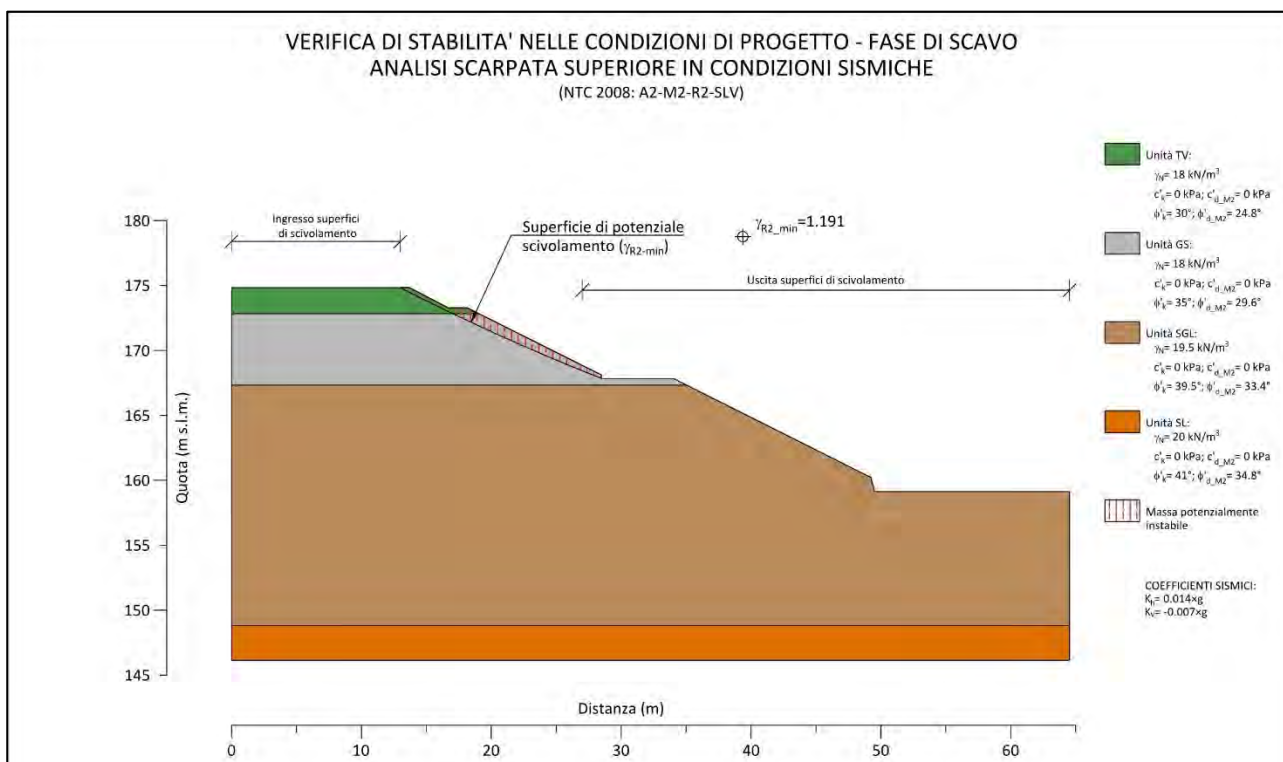


Figura 4.8 – Risultati analisi sismica scarpata superiore – Fase di scavo.

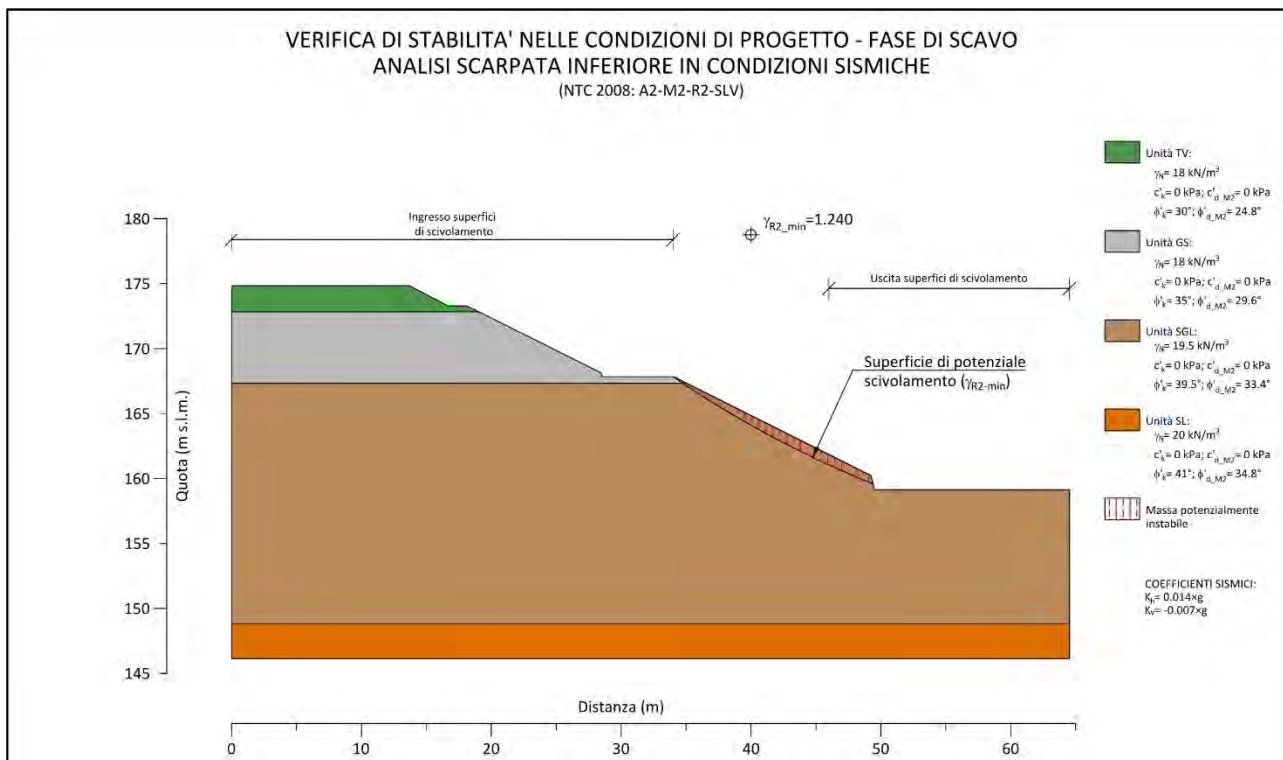


Figura 4.9 – Risultati analisi sismica scarpata inferiore – Fase di scavo.

In Figura 4.10 e Figura 4.11 vengono riportati i risultati delle analisi condotte in condizione sismiche per il profilo ad opera ultimata.

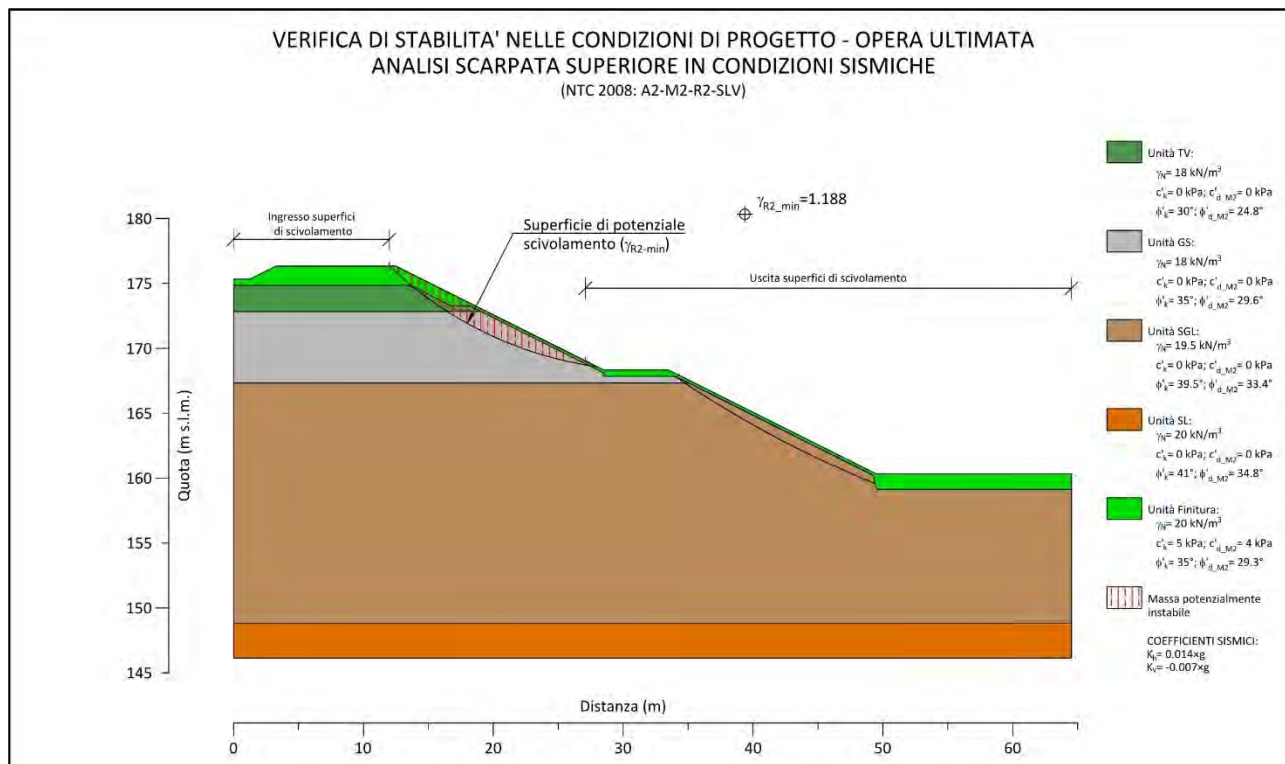


Figura 4.10 – Risultati analisi sismica scarpata superiore – Opera ultimata.

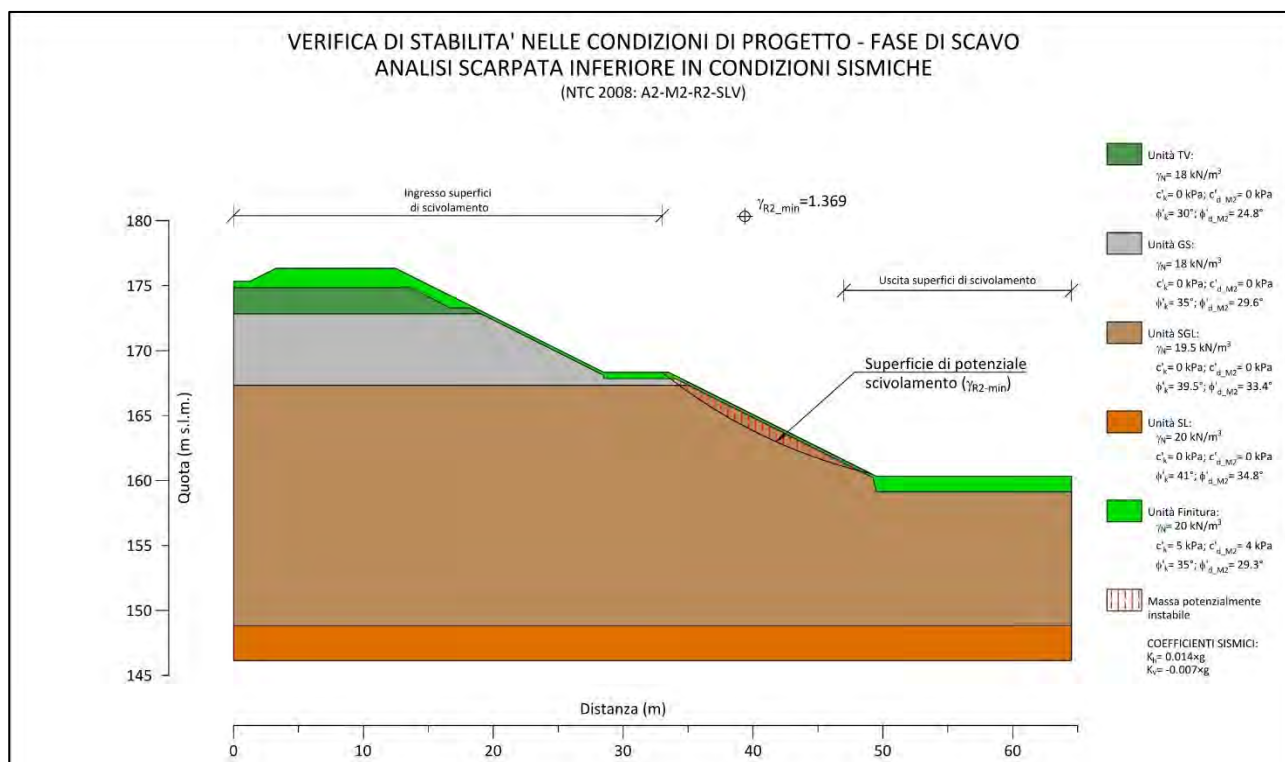


Figura 4.11 – Risultati analisi sismica scarpata inferiore – Opera ultimata.

In tutte le combinazioni esaminate i coefficienti di sicurezza minimi ($\gamma_{R_calc_MIN}$) risultano maggiori al valore di γ_R previsto dalla normativa, pari a 1.1, per cui le verifiche di stabilità globale in condizioni sismiche sono soddisfatte. I risultati sono riportati in termini numerici sono riassunti nella Tabella 4.3.

TIPOLOGIA DI ANALISI	$\gamma_{R_calc_minimo}$
Fase di scavo – Scarpata superiore	1.191
Fase di scavo – Scarpata inferiore	1.240
Opera ultimata – Scarpata superiore	1.188
Opera ultimata – Scarpata inferiore	1.369

Tabella 4.3 - Risultati ottenuti dall'analisi all'equilibrio limite

Milano, giugno 2017

Responsabile Progettazione Generale

Dott. Ing. Fulvio Bernabei

Responsabili geologia e progettazione geotecnica

Prof. Geol. Lamberto Luciano Griffini

Dott. Ing. Stefano Griffini