



# REGIONE TOSCANA

DIREZIONE DIFESA DEL SUOLO E PROTEZIONE CIVILE  
SETTORE GENIO CIVILE VALDARNO INFERIORE



## FSC

Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione

INTERVENTO DI CONSOLIDAMENTO DELLE ARGINATURE ESISTENTI  
NEL TRATTO TERMINALE DEL FIUME ERA IN CORRISPONDENZA DEL  
CENTRO ABITATO DI PONTEDERA  
CIG: 8999651AF0 | CUP: J87H21009160003

### PROGETTO DEFINITIVO

DIRIGENTE RESPONSABILE DEL CONTRATTO  
Ing. Francesco PISTONE

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO  
Ing. Francesco PISTONE

UFFICIO DI PROGETTAZIONE



Dir. Tec. (Art. 53 D.P.R 554 21 Dic. 1999)  
Dott. Ing. Pietro Bruscoli  
Ordine Ingegneri di Firenze n. 3894

**Dott. Ing. Stefano Monni**  
**Dott. Ing. Leonardo Furia**  
**Dott. Ing. Emilio Lucchesi**



GEOLOGIA

Studio INGEO  
Ingegneri e Geologi Associati  
Via Acquacalda 840/A - 55100 Lucca  
@MAIL luigi.giammattei@ingeo.it  
Tel: +39 0583 48682 Fax: +39 0583.464539



**Dott. Geol. Luigi Giammattei**  
**Dott. Geol. Marianna Genovesi**  
**Dott. Ing. Enrico Favilla**

ARCHEOLOGIA

Laboratori Archeologici San Gallo  
Società cooperativa  
Via dei Della Robbia 20 - 50132 Firenze  
@MAIL info@archeosangallo.com



**Dott. Chiara Marcotulli**  
**Dott. Marianna De Falco**

CODICE ELABORATO

Anno	Commessa	Progetto	Elaborato	Tipologia	n°	Revisione
2023	IN514	DEF	PRO	REL	024	B

OGGETTO ELABORATO

### RELAZIONE TECNICA

SCALA ELABORATO

-

	Soggetto competente	Data	Firma
Emesso	Progettista Ing. Leonardo Furia	Settembre 2023	
Visionato	R.U.P. Ing. Francesco Pistone		
Confermato	D.R.C. Ing. Francesco Pistone		

ELABORATO

PRO 4.1

Pisa - Via Emilia 448, 56121



## Sommario

1	Premessa .....	3
2	Normativa di riferimento .....	7
3	Caratteristiche geotecniche .....	8
3.1	Azioni sismiche .....	9
3.2	Vita nominale, classi d'uso e periodo di riferimento .....	9
3.3	Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche.....	10
3.4	Parametri sismici .....	11
4	Verifica di stabilità .....	12
4.1	Aspetti teorici .....	12
4.2	Inquadramento normativo.....	13
4.3	Tratto T19 a valle della SS67.....	14
4.4	Tratto T19 a monte della SS67 .....	17
4.5	Tratto T17 a valle della SS67.....	20
4.6	Tratto T17 a monte della SS67 .....	23
4.7	Tratto T18 della SS67 .....	26
4.8	Tratto T16 della SS67 .....	29
4.9	Tratto T15 della SS67 .....	32
4.10	Riepilogo risultati sulla stabilità dei versanti.....	35
5	Infissione delle palancole .....	36
5.1	Aspetti teorici .....	36
5.1.1	Calcolo della profondità di infissione .....	36
5.1.2	Calcolo delle spinte .....	37
5.1.3	Spinta in presenza di falda .....	38



5.1.4	Spinta in presenza di sisma .....	39
5.1.5	Verifica alla stabilità globale .....	39
5.2	Risultati delle verifiche .....	39
6	Verifiche al sifonamento .....	47
7	Verifiche di filtrazione .....	49

**FSC**Fondo per lo Sviluppo  
e la CoesioneIntervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

## 1 Premessa

Nell'ambito degli "Interventi di consolidamento delle arginature esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in corrispondenza del centro abitato di Pontedera" vengono affrontate in questa sede le problematiche legate al consolidamento delle arginature del Fiume Era nella parte terminale dello stesso, vale a dire nel centro abitato di Pontedera fino alla confluenza in Arno.

La necessità di questo intervento viene affrontata nello "Studio generale per la definizione di interventi di mitigazione del rischio idraulico nel bacino del Fiume Era" nel quale viene fatto notare che, sebbene la piena dell'Era sia contenuta nei rilevati arginali anche per tempi di ritorno di 200 anni nel caso in cui non si abbia piena nell'Arno, viste le rilevanti durate di pioggia che causano la piena, si può verificare collasso arginale per fenomeni di sifonamento e di sormonto.

Nel su citato Studio, che interessa il Fiume Era a scala di bacino, è stata redatta una scala di priorità del consolidamento arginale usando come criteri la vicinanza all'edificato e una stima qualitativa delle condizioni generali.

Si riporta in Figura 1-1 un estratto della Tavola "Planimetria degli interventi di consolidamento delle arginature nel tratto terminale" dello Studio.

I tratti oggetto della presente progettazione sono T15, T16, T17, T18 e T19 indicati nella Figura 1-1.

Tutti gli interventi sono con priorità di consolidamento Alta in funzione della stretta vicinanza al centro abitato di Pontedera.

L'intervento previsto per il consolidamento consiste nell'infissione di palancole metalliche ad una profondità media di 10 m, ad eccezione di una parte del tratto T17 in cui la profondità necessaria è di 13 m. La lunghezza totale del tratto di intervento è di circa 1150 m in destra e di 930 m in sinistra a causa della curvatura del Fiume nel tratto terminale. La lunghezza totale di infissione delle palancole invece è di 980 m in destra e di 710 m in sinistra.

A causa della vicinanza dell'intervento al centro abitato di Pontedera, si opta per il metodo di infissione mediante pressa idraulica. Questo metodo, oltre ad avere bisogno di limitati spazi per poter procedere all'infissione di palancole metalliche, non causa vibrazione e si distingue per la ridotta rumorosità rispetto al metodo "classico" per vibroinfissione.

In aggiunta agli interventi di consolidamento, a seguito di un sopralluogo con la Committenza è stata rilevata la necessità di ulteriori interventi:

- Unione dei tratti arginali T18 e T19 per mezzo della realizzazione di un argine di prolungamento del tratto T18 fino ad intersecare alla stessa quota il T19. La necessità di questo intervento è dovuta al fatto che attualmente l'argine del T18, nella parte più a valle, vira verso destra idraulica trovandosi a ridosso delle abitazioni per costeggiare il canale di scarico attualmente in disuso. Si riporta in Figura 1-2 una immagine della situazione attuale. Similmente verrà eseguito un ringrosso arginale subito a valle del Ponte Napoleonico nel tratto T18 in quanto ad ora è presente un'abitazione nell'area golenale. Si riporta in Figura 1-3 una immagine della situazione attuale.



FSC

Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione



Intervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

- Applicazione di guaina liquida elastobituminosa impermeabilizzante alle spalle del Ponte Napoleonico sia in dx che sx idraulica (situato tra i tratti T15-T17 e T16-T18) e del muro in sx idraulica nella zona più a monte del Tratto T17. Infatti, viste le condizioni attuali del ponte si è deciso di conferirgli caratteristiche di chiusura idraulica e resistenza all'azione del Fiume (attualmente le spalle non risultano "argine"). Si riporta in Figura 1-4 una immagine delle condizioni delle spalle del Ponte Napoleonico e del muro in questione.



Figura 1-1 – Estratto della Tavola "Planimetria degli interventi di consolidamento delle arginature nel tratto terminale" dello Studio a base della presente progettazione





Figura 1-2 – Sistemazione attuale del canale tra i tratti T18 e T19



Figura 1-3 – Sistemazione attuale del tratto T18 a valle del Ponte Napoleonico



# FSC

Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione



Intervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023



Figura 1-4 – Spalla del Ponte Napoleonico in sinistra idraulica e muro oggetto di intervento nel Tratto T17

Nella presente relazione verranno espone le verifiche di stabilità, al sifonamento e alla filtrazione, riferite al rilevato arginale. Inoltre, è stata determinata la profondità di infissione delle palancole in modo che, in seguito ad asportazione di parte dell'argine, esse siano in grado di sostenere la parte rimanente.

Nell'eseguire questo tipo di verifiche sono stati individuati i tratti con sezioni omogenee e quindi per ogni tratto omogeneo è stata analizzata una sezione tipo. In particolare, i tratti analizzati sono i seguenti:

- Tratto T19 a valle della Strada Statale 67;
- Tratto T17 a valle della Strada Statale 67;
- Tratto T19 a monte della Strada Statale 67;
- Tratto T17 a monte della Strada Statale 67;
- Tratto T18;
- Tratto T16;
- Tratto T15.



## 2 Normativa di riferimento

Normativa europea:

- EC7 – Progettazione geotecnica
- EC8 – Comportamento sismico

Normativa italiana:

- Decreto del Ministero delle Infrastrutture 17 gennaio 2018 “Aggiornamento delle nuove norme tecniche per le costruzioni”;
- Circolare del Ministero delle Infrastrutture n. 7 del 21 gennaio 2019 “Istruzioni per l'applicazione dell'aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni”;



**FSC**Fondo per lo Sviluppo  
e la CoesioneIntervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

### 3 Caratteristiche geotecniche

Dall'elaborazione delle prove geotecniche, di cui alla "Relazione geologica e caratterizzazione geotecnica del sottosuolo", sono emersi i valori dei parametri geotecnici e della stratigrafia poi utilizzati per redigere le verifiche di stabilità degli argini e dell'infissione delle palancole. Si riportano in Tabella 3-1 i risultati dei parametri geotecnici per ogni tipo di terreno adottato nelle verifiche. Questi tre tipi di terreno sono quelli più diffusi e con caratteristiche geotecniche peggiori rispetto agli altri omologhi riscontrati in maniera più sporadica. Ad esempio, non sono mai state utilizzate le unità litologiche "AA" riportate in "Relazione geologica e caratterizzazione geotecnica del sottosuolo" anche laddove presenti ma si è adottato "A".

Sigla U. geot.	Descrizione stratigrafica e litologica	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$K_{sbt}$ (m/s)	$M_o$ (MPa)	$D_r$ (%)	$C_u$ (Kpa)	$\phi$ (°)	$c'$ (Kpa)
SL	Sabbie limose e limi sabbiosi da poco a mediamente addensate/i di colore marrone	18.00	2.50E-05	42	39	100	32	12
AL	Argille, argille limose e limi argillosi da poco a mediamente consistenti di colore marrone	17.5	7.00E-07	24	-	80	20	15
LAS	Alternanza decimetriche di limi argillosi, limi argilloso-sabbiosi, argille e argille limose da mediamente consistenti a consistenti e sabbie e sabbie limose da poco a mediamente addensate talvolta con presenza di materiale organico e resti di molluschi	18.00	4.00E-06	50	37	100	29	15

Tabella 3-1 – Dati stratigrafici e geotecnici dei terreni utilizzati nelle verifiche

Il significato dei simboli adottati è il seguente:

- $\Phi$  è l'angolo d'attrito efficace;
- $C'$  coesione del terreno;
- $C_u$  coesione non drenata del terreno;
- $\gamma$  è il peso di volume del terreno;
- $K$  la permeabilità, adottata nelle verifiche a filtrazione;
- $M_o$  il modulo di compressibilità;
- $D_r$  la densità.

Per ogni tratto è stata eseguita la verifica sia di stabilità che di infissione della palancola e di filtrazione adottando una sezione tipo per tratto, adottando una stratigrafia tipica per tratto.

Si riporta in Tabella 3-2 la stratigrafia adottata per ogni sezione tipo. La quota di riferimento per la stratigrafia è la sommità arginale e a numero crescente di strato corrisponde maggiore profondità rispetto piano campagna

**FSC**Fondo per lo Sviluppo  
e la CoesioneIntervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

	Tratto T19 valle SS		Tratto T19 monte SS		Tratto T17 valle SS		Tratto T17 monte SS		Tratto T18		Tratto T16 = Tratto T15	
Strato n.	Sp. [m]	U. Geot.	Sp. [m]	U. Geot.	Sp. [m]	U. Geot.	Sp. [m]	U. Geot.	Sp. [m]	U. Geot.	Sp. [m]	U. Geot.
1	0.50	SL	1.00	SL	0.50	SL	1.10	SL	3.50	AL	1.50	AL
2	1.00	AL	3.50	AL	1.00	AL	3.50	AL	5.70	SL	2.00	SL
3	2.95	LAS	4.50	LAS	2.95	LAS	1.50	LAS	6.80	AL	4.00	LAS
4	10.55	AL	6.00	AL	5.50	AL	3.00	AL	1.90	SL	1.70	SL
5	3.00	SL	3.00	SL	5.05	SL	6.00	SL			6.80	AL
6					3.00	AL	3.50	AL			2.30	SL

Tabella 3-2 – Dati stratigrafici per ogni tratto oggetto di verifica

### 3.1 Azioni sismiche

Per quanto riguarda il sisma, ai fini delle Norme Tecniche per le Costruzioni, le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento nel periodo di riferimento  $P_{vr}$ , a partire dai valori dei seguenti parametri su sito rigido orizzontale:

- $a_g$  accelerazione orizzontale massima al sito;
- $F_o$  valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale
- $T_c^*$  periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale

I valori dei parametri sono definiti sui vertici di un reticolo, per un qualunque punto del territorio non ricadente nei nodi del reticolo di riferimento, i valori dei parametri di interesse per la definizione dell'azione sismica di progetto possono essere calcolati come media pesata dei valori assunti da tali parametri nei quattro vertici della maglia.

### 3.2 Vita nominale, classi d'uso e periodo di riferimento

Le azioni sismiche su ciascuna costruzione vengono valutate in relazione ad un periodo di riferimento  $V_R$  che si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicandone la vita nominale  $V_N$  per il coefficiente d'uso  $C_u$ :

$$V_R = V_N \times C_u$$

Nel nostro caso si ha:

Tabella 2.4.I – Vita nominale  $V_N$  per diversi tipi di opere

TIPI DI COSTRUZIONE		Vita Nominale $V_N$ (in anni)
1	Opere provvisorie – Opere provvisionali - Strutture in fase costruttiva <sup>1</sup>	≤ 10
2	Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale	≥ 50
3	Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica	≥ 100

**FSC**Fondo per lo Sviluppo  
e la CoesioneIntervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

*Classe I:* Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.

*Classe II:* Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.

**Classe III:** Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.

*Classe IV:* Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al D.M. 5 novembre 2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica.

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE $C_U$	0,7	1,0	1,5	2,0

$$V_R = V_N \times C_U = 50 \text{ anni} \times 1.5 = 75 \text{ anni}$$

### 3.3 Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche

Ai fini della definizione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale; in assenza di specifiche analisi, si può fare riferimento a un approccio semplificato, che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo:

Tabella 3.2.II – Categorie di sottosuolo

Categoria	Descrizione
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
E	<i>Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m</i> , posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).

**FSC**Fondo per lo Sviluppo  
e la CoesioneIntervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

Per la categoria topografica si adotta la seguente classificazione (Tab. 3.2.IV):

**Tabella 3.2.IV – Categorie topografiche**

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

### 3.4 Parametri sismici

Per ricavare i valori dei parametri dell'azione sismica locale per l'area di progetto, si è utilizzato il programma *Stap full 16* prodotto da *Aztec Informatica s.r.l., Casoli del Manco (CS)* assegnando il comune in cui è sito l'intervento. Da esso sono stati ricavati i valori di cui alla Figura 3-1.

**Opzioni sisma**

**D.M. 1996**

Coefficiente di intensità sismica %: 10.00

Intensità sismica verticale/Orizzontale: 0.50

**N.T.C. 2008/2018**

	SLV	SLD
Accelerazione al suolo $ag$ [m/s <sup>2</sup> ] <b>ag/g = 0.179</b>	1.759	0.809
Massimo fattore amplificazione spettro orizz. F0	2.495	2.527
Periodo inizio tratto spettro a velocità costante Tc*	0.288	0.266
Tipo di sottosuolo - Coefficiente stratigrafico S <sub>s</sub>	Tipo C	
Coef. amplificazione topografica S <sup>T</sup>	T1	
Coefficiente di riduzione (β <sub>s</sub> )	C	
Coefficiente di riduzione (β <sub>s2</sub> )		
<b>Coeff. di intensità sismica orizzontale (PC) - Kh [%] = 6.16</b>	<b>1.432</b>	<b>1.500</b>
<b>Coeff. di intensità sismica orizzontale (A2-M2) - Kh [%] = 9.76</b>	1.00	
	0.24	0.24
	0.38	0.47
<b>Coeff. di intensità sismica orizzontale (PC) - Kh [%] = 6.16</b>		<b>2.97</b>
<b>Coeff. di intensità sismica orizzontale (A2-M2) - Kh [%] = 9.76</b>		<b>5.82</b>
Intensità sismica Verticale/Orizzontale		0.50

Importa file dati sismici      Dettagli -->

Accetta      Annulla      Help

Figura 3-1 – Parametri sismici della zona di intervento

Per determinare gli spettri di risposta elastici del sito, tenuto conto degli effetti locali dovuti all'amplificazione sia stratigrafica che topografica, sono stati assegnati i seguenti parametri:

- vita nominale della struttura ( $V_N$ )  $\geq 50$  anni (Opere ordinarie);
- classe d'uso III (Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi);
- coefficiente d'uso ( $C_U$ ) pari a 1.5;
- vita o periodo di riferimento per l'azione sismica ( $V_R = V_N \cdot C_U$ ) pari a 75 anni.



**FSC**Fondo per lo Sviluppo  
e la CoesioneIntervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

## 4 Verifica di stabilità

Le verifiche di stabilità sono state eseguite su una sezione tipo per tratto, riferendosi all'argine. Per quanto riguarda invece la verifica di stabilità riferita alle sponde dell'alveo si riporta il risultato per lo scenario con coefficiente di sicurezza minore.

Gli scenari di verifica adottati per ogni sezione tipo sono:

- Stato attuale, in condizioni drenate;
- Rapido svaso, in condizioni non drenate;
- Stato attuale con il carico dei mezzi di manutenzione considerati pari a 10 KN/m, in condizioni drenate;
- Sisma, in condizioni non drenate.

Le verifiche degli scenari di stabilità sono state effettuate per mezzo del software *Stap full 16* prodotto da *Aztec Informatica s.r.l., Casoli del Manco (CS)*.

### 4.1 Aspetti teorici

La verifica alla stabilità del pendio deve fornire un coefficiente di sicurezza non inferiore a  $\gamma_R$ . Viene usata la tecnica della suddivisione a strisce della superficie di scorrimento da analizzare. In particolare, il programma esamina un numero di superfici che dipende dalle impostazioni fornite e che sono riportate nella corrispondente sezione. Il processo iterativo permette di determinare il coefficiente di sicurezza di tutte le superfici analizzate.

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

$l$	lunghezza della base della striscia
$\alpha$	angolo della base della striscia rispetto all'orizzontale
$b$	larghezza della striscia $b=l \times \cos(\alpha)$
$\phi$	angolo di attrito efficace lungo la base della striscia
$c$	coesione (drenata o non, in funzione del tipo di verifica) lungo la base della striscia
$\gamma$	peso di volume del terreno
$U$	pressione neutra
$W$	peso della striscia
$N$	sforzo normale alla base della striscia
$T$	sforzo di taglio alla base della striscia
$E_s, E_d$	forze normali di interstriscia a sinistra e a destra
$X_s, X_d$	forze tangenziali di interstriscia a sinistra e a destra
$E_a, E_b$	forze normali di interstriscia alla base ed alla sommità del pendio
$\Delta X$	variazione delle forze tangenziali sulla striscia $\Delta X = X_d - X_s$
$\Delta E$	variazione delle forze normali sulla striscia $\Delta E = E_d - E_s$

Metodo di Janbu (semplificato)



Il coefficiente di sicurezza nel **metodo di Janbu** semplificato si esprime secondo la seguente formula:

$$F = \frac{\sum c_i b_i + \left( \frac{N_i}{\cos \alpha_i} - u_i b_i \right) \cdot \tan \varphi_i}{\sum W_i \cdot \tan \alpha_i}$$

dove il termine  $N_i$  è espresso da:

$$N_i = \frac{W_i - c_i l_i \sin \alpha_i / n + u_i l_i \tan \varphi \sin \alpha_i / F}{m}$$

dove il termine  $m$  è espresso da

$$m = \cos \alpha + \sin \alpha \tan \varphi / F$$

In questa espressione  $n$  è il numero delle strisce considerate,  $b_i$  e  $a_i$  sono la larghezza e l'inclinazione della base della striscia  $i_{esima}$  rispetto all'orizzontale,  $W_i$  è il peso della striscia  $i_{esima}$ ,  $c_i$  e  $\varphi_i$  sono le caratteristiche del terreno (coesione ed angolo di attrito) lungo la base della striscia ed  $u_i$  è la pressione neutra lungo la base della striscia.

L'espressione del coefficiente di sicurezza di **Janbu semplificato** contiene al secondo membro il termine  $m$  che è funzione di  $F$ . Quindi essa viene risolta per successive approssimazioni assumendo un valore iniziale per  $F$  da inserire nell'espressione di  $m$  ed iterare fino a quando il valore calcolato coincide con il valore assunto.

La semplificazione del metodo rispetto al procedimento completo consiste nel trascurare le forze tangenziali di interstriscia.

Si è adottato questo metodo di verifica in quanto, rispetto ad altri metodi diffusi per la verifica della stabilità dei versanti (es. Bishop, Bell, Morgenstern-Price e Spencer) è quello che dà coefficienti di sicurezza minori, risultando quindi più cautelativo.

## 4.2 Inquadramento normativo

Secondo quanto previsto dalle NTC 2018 per le verifiche di sicurezza allo stato limite ultimo delle opere in materiali sciolti deve essere rispettata la condizione  $Ed < Rd$  (dove  $Ed$  rappresenta il valore di progetto dell'azione e  $Rd$  il valore di progetto della resistenza del sistema geotecnico), verificando che non si raggiunga una condizione di stato limite ultimo con i valori di progetto delle azioni e dei parametri geotecnici. Le verifiche devono essere effettuate secondo l'Approccio 1 con la Combinazione 2: (A2+M2+R2) tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I, 6.2.II e 6.8.I. I coefficienti di riduzione parziali applicati nella combinazione 2 (A2+M2+R2) sono riportati nelle seguenti tabelle.

Per quanto riguarda la condizione sismica invece vengono assunti unitari tutti i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici mentre invece il coefficiente parziale delle verifiche deve essere pari a 1.2.

**FSC**Fondo per lo Sviluppo  
e la CoesioneIntervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

	Effetto	Coefficiente Parziale $\gamma_F$ (o $\gamma_E$ )	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti $G_1$	Favorevole	$\gamma_{G1}$	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	$\gamma_{Qi}$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

Tabella 4-1 – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale $\gamma_M$	(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	$c_{uk}$	$\gamma_{cu}$	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	$\gamma_\gamma$	$\gamma_\gamma$	1,0	1,0

Tabella 4-2 – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

COEFFICIENTE	R2
$\gamma_R$	1,1

Tabella 4-3 – Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti

### 4.3 Tratto T19 a valle della SS67

Si riportano di seguito, in Figura 4-1, Figura 4-2, Figura 4-3 e Figura 4-4 le verifiche eseguite per i diversi scenari di progetto, mentre in Tabella 4-4 una tabella riepilogativa con l'indicazione dei risultati ottenuti e i coefficienti di sicurezza raggiunti.

Si evidenzia che allo stato attuale non sono presenti criticità nella stabilità del rilevato arginale.



# FSC

Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione



Intervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

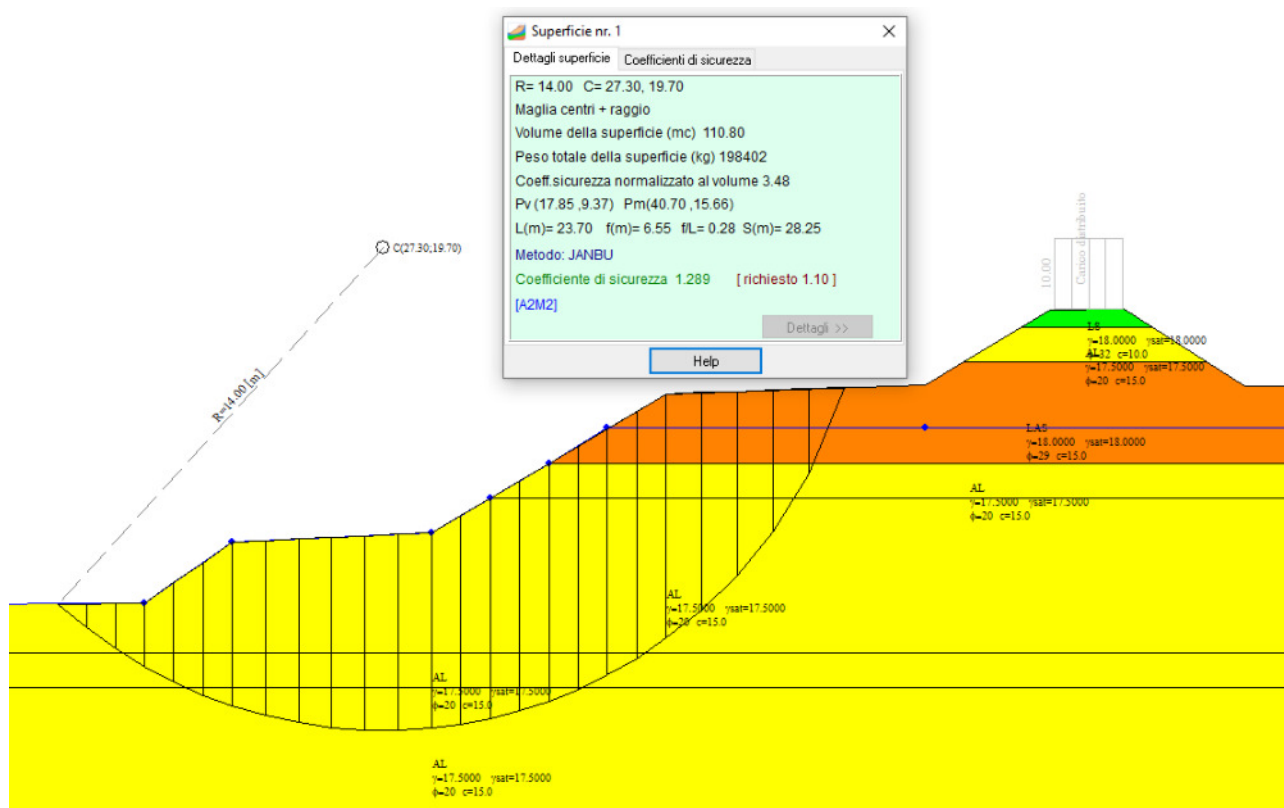


Figura 4-1 – T19 valle SS67, verifica stato attuale

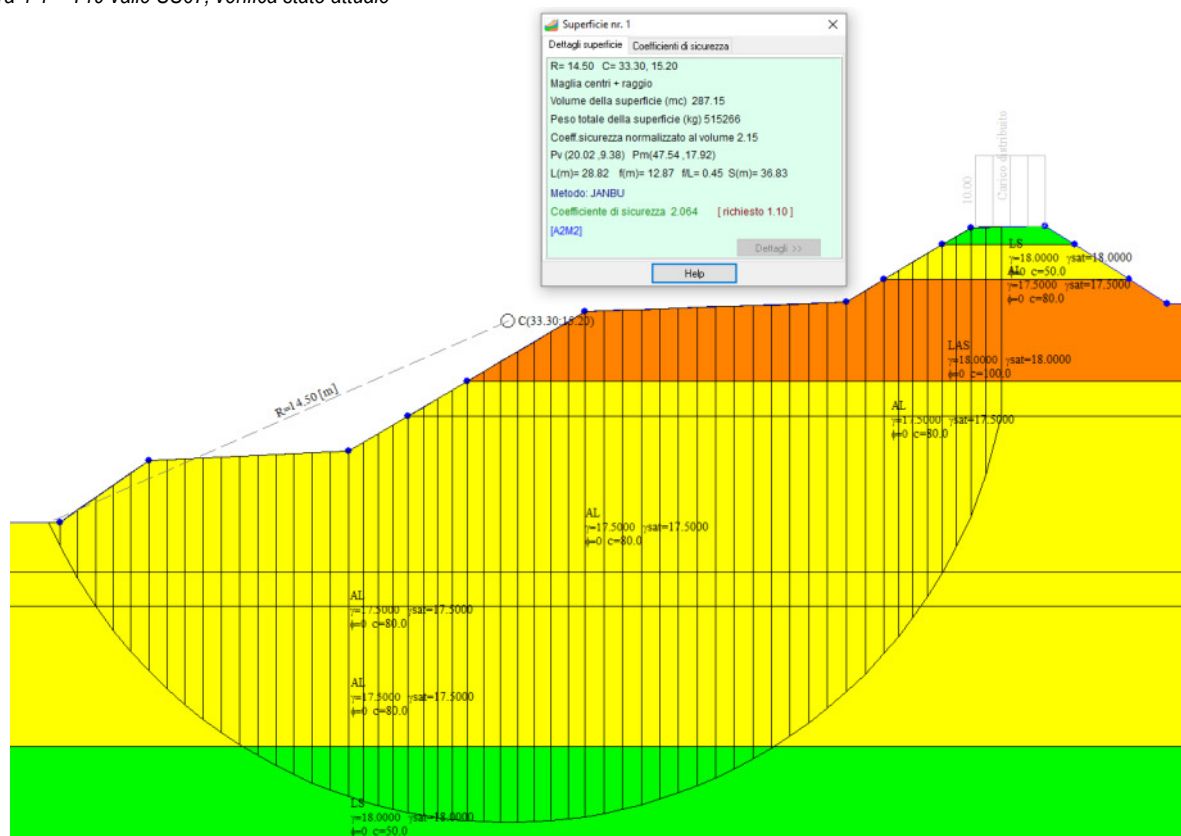


Figura 4-2 – T19 valle SS67, verifica rapido svasso







# FSC

Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione



Intervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

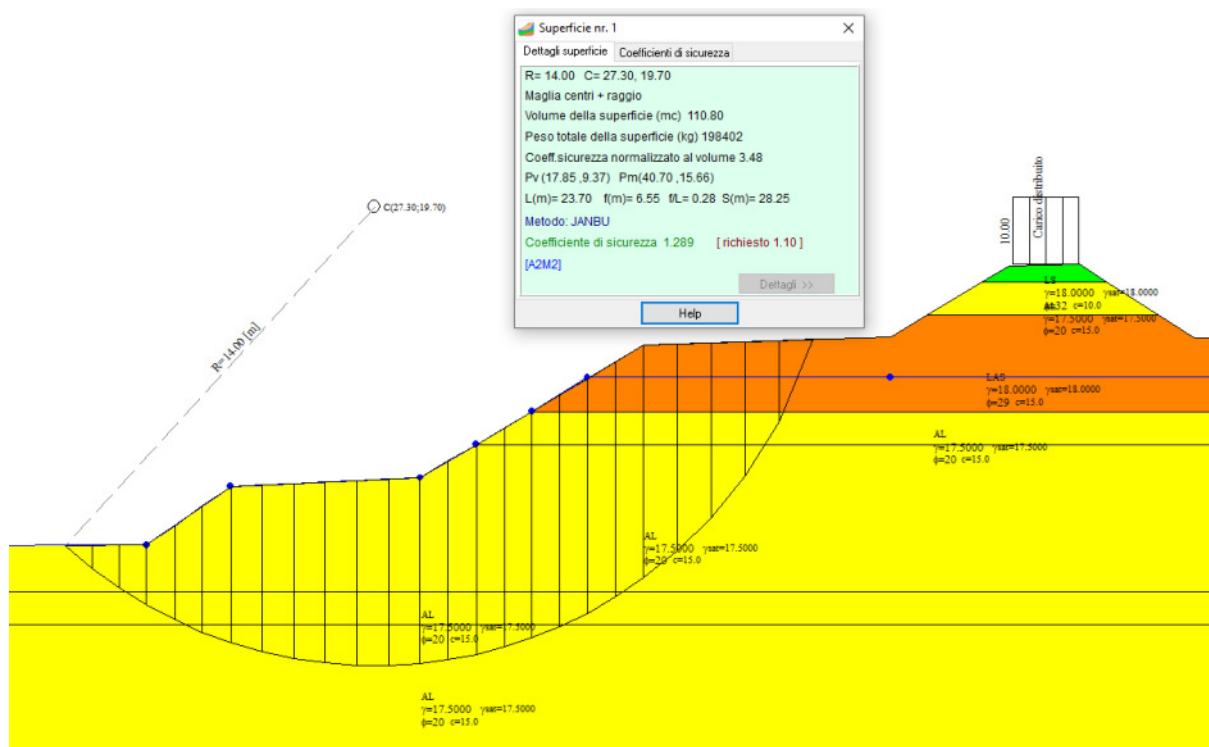


Figura 4-3 – T19 valle SS67, verifica con carico di manutenzione

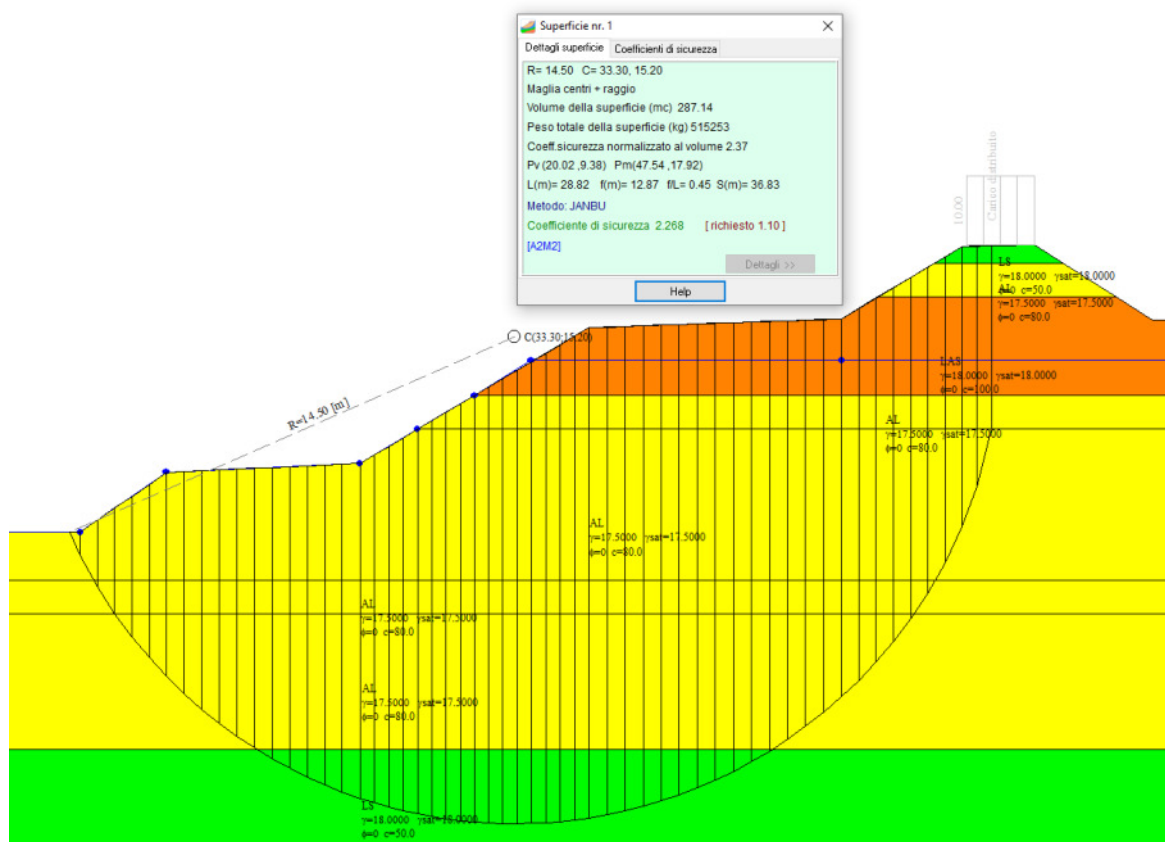


Figura 4-4 – T19 valle SS67, verifica sisma

**FSC**Fondo per lo Sviluppo  
e la CoesioneIntervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

Scenario	Fattore Sicurezza	Fattore sicurezza da Normativa
Stato Attuale Drenato	1.289	1.1
Rapido Svaso Non Drenato	2.064	1.1
Carico di manutenzione Drenato	1.289	1.1
Sisma Non Drenato	2.268	1.2

Tabella 4-4 – Tabella riepilogativa – Tratto T19 a valle della SS67

#### 4.4 Tratto T19 a monte della SS67

Si riportano di seguito, in Figura 4-5, Figura 4-6, Figura 4-7 e Figura 4-8 le verifiche eseguite per i diversi scenari di progetto, mentre in Tabella 4-5 una tabella riepilogativa con l'indicazione dei risultati ottenuti e i coefficienti di sicurezza raggiunti.

Si evidenzia che allo stato attuale non sono presenti criticità nella stabilità del rilevato arginale.

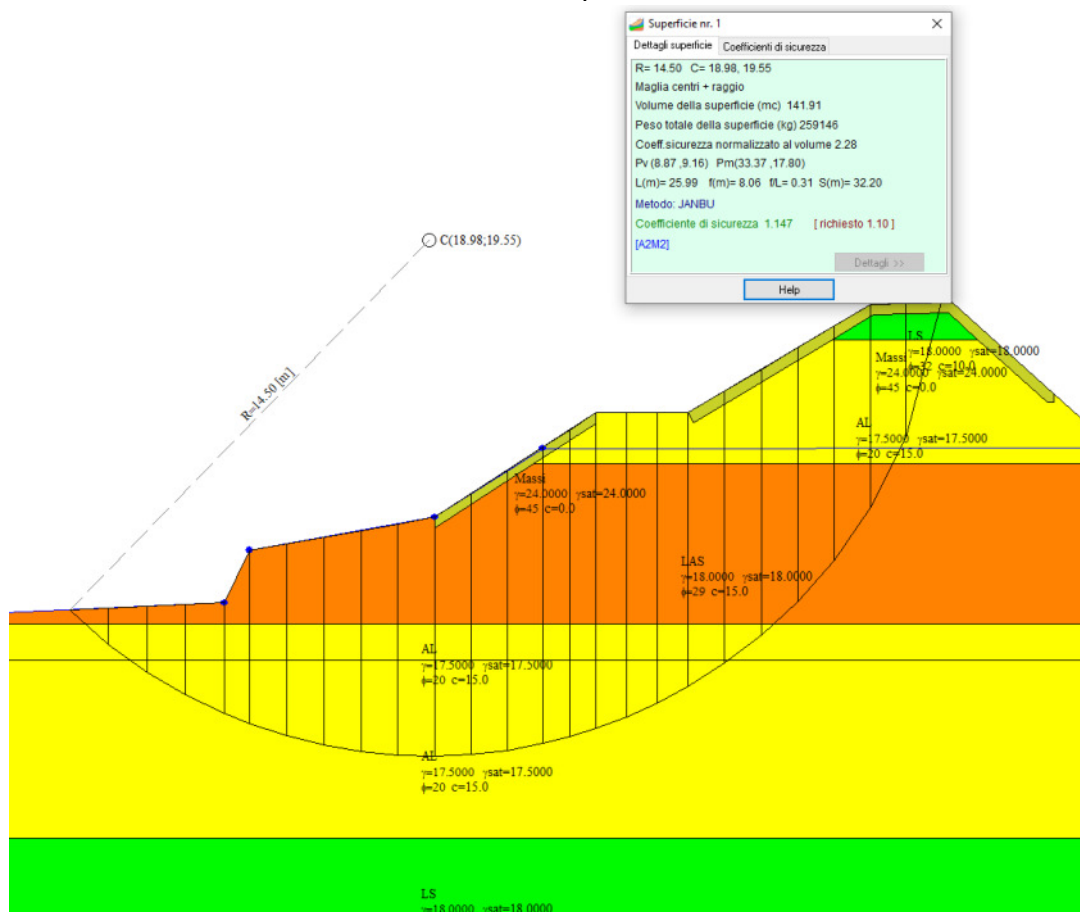


Figura 4-5 – T19 monte SS67, verifica stato attuale



# FSC

Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione



Intervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

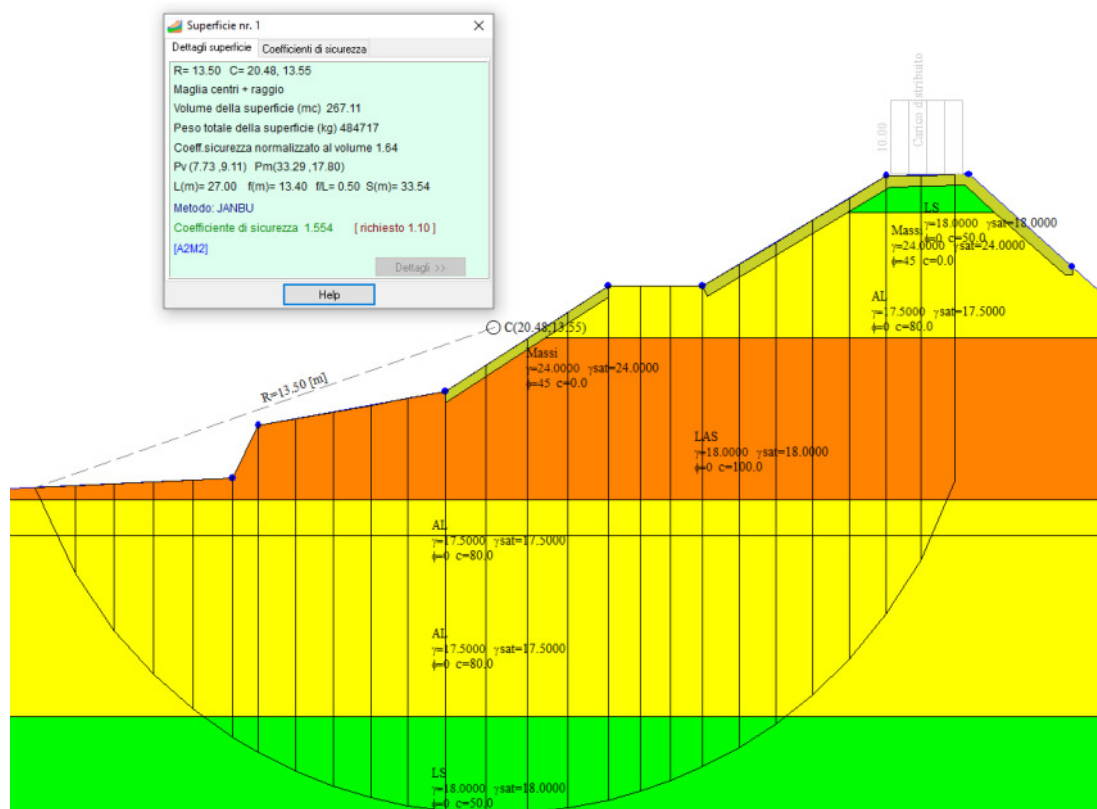


Figura 4-6 – T19 monte SS67, verifica rapido svaso

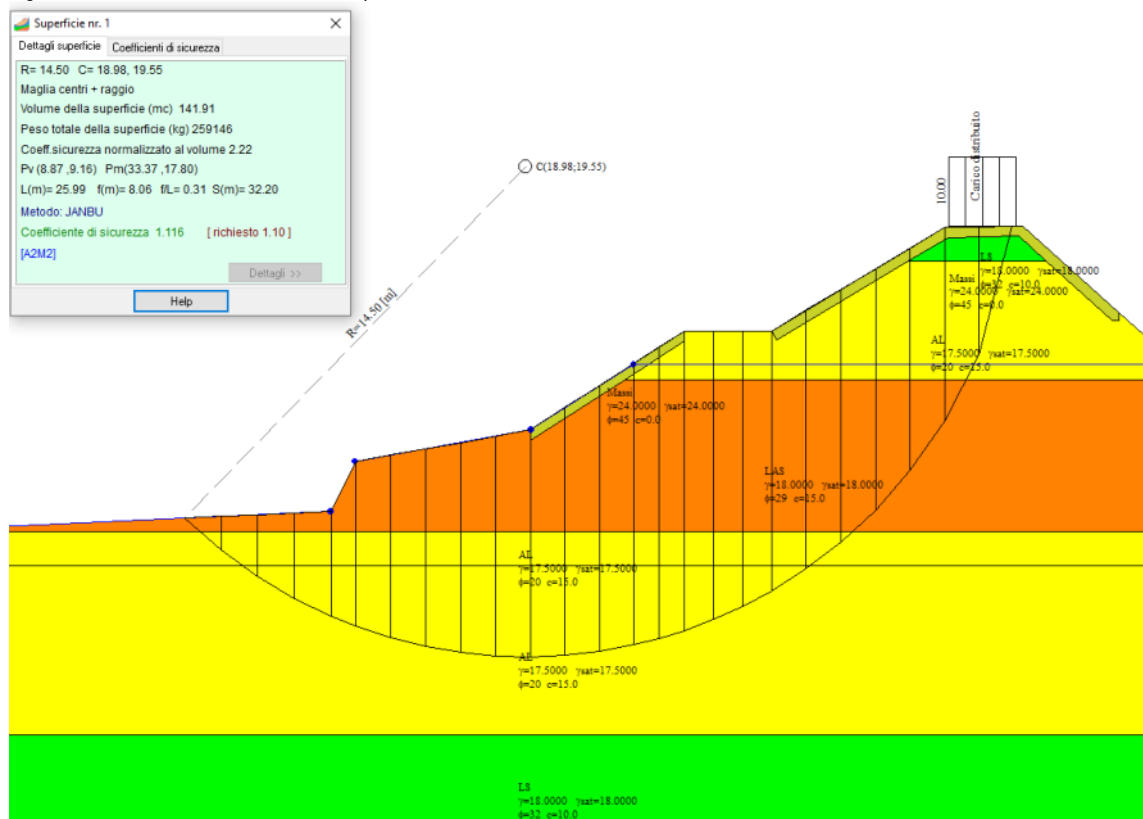


Figura 4-7 – T19 monte SS67, verifica con carico di manutenzione

HYDEA

IN-EO

SAN GALLO  
Laboratori  
archeologici



# FSC

Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione



Intervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

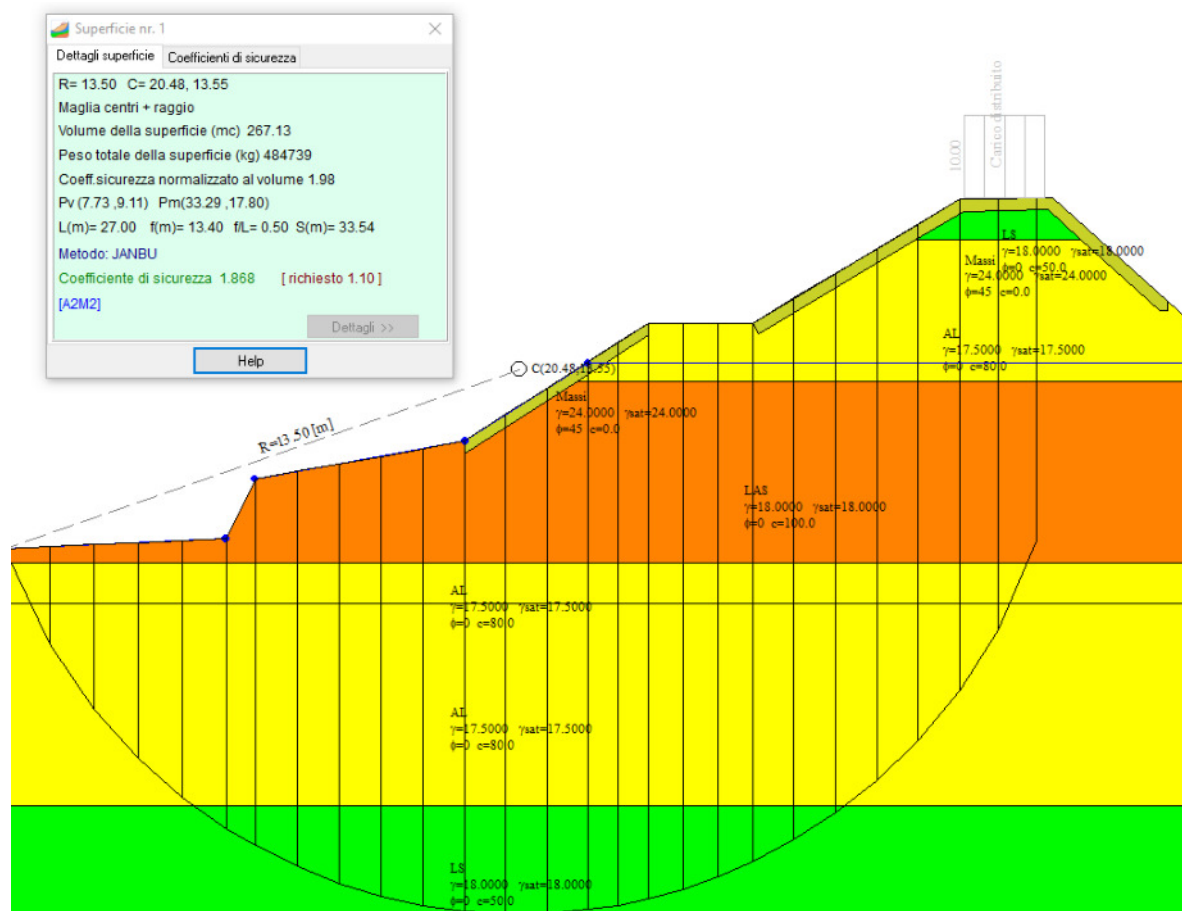


Figura 4-8 – T19 monte SS67, verifica sisma

Scenario	Fattore Sicurezza	Fattore sicurezza da Normativa
Stato Attuale Drenato	1.147	1.1
Rapido Svaso Non Drenato	1.554	1.1
Carico di manutenzione Drenato	1.116	1.1
Sisma Non Drenato	1.868	1.2

Tabella 4-5 – Tabella riepilogativa – Tratto T19 a monte della SS67





FSC

Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione



Intervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

#### 4.5 Tratto T17 a valle della SS67

Si riportano di seguito, in Figura 4-9, Figura 4-10, Figura 4-11 e Figura 4-12 le verifiche eseguite per i diversi scenari di progetto, mentre in Tabella 4-6 una tabella riepilogativa con l'indicazione dei risultati ottenuti e i coefficienti di sicurezza raggiunti.

Si evidenzia che allo stato attuale non sono presenti criticità nella stabilità del rilevato arginale.

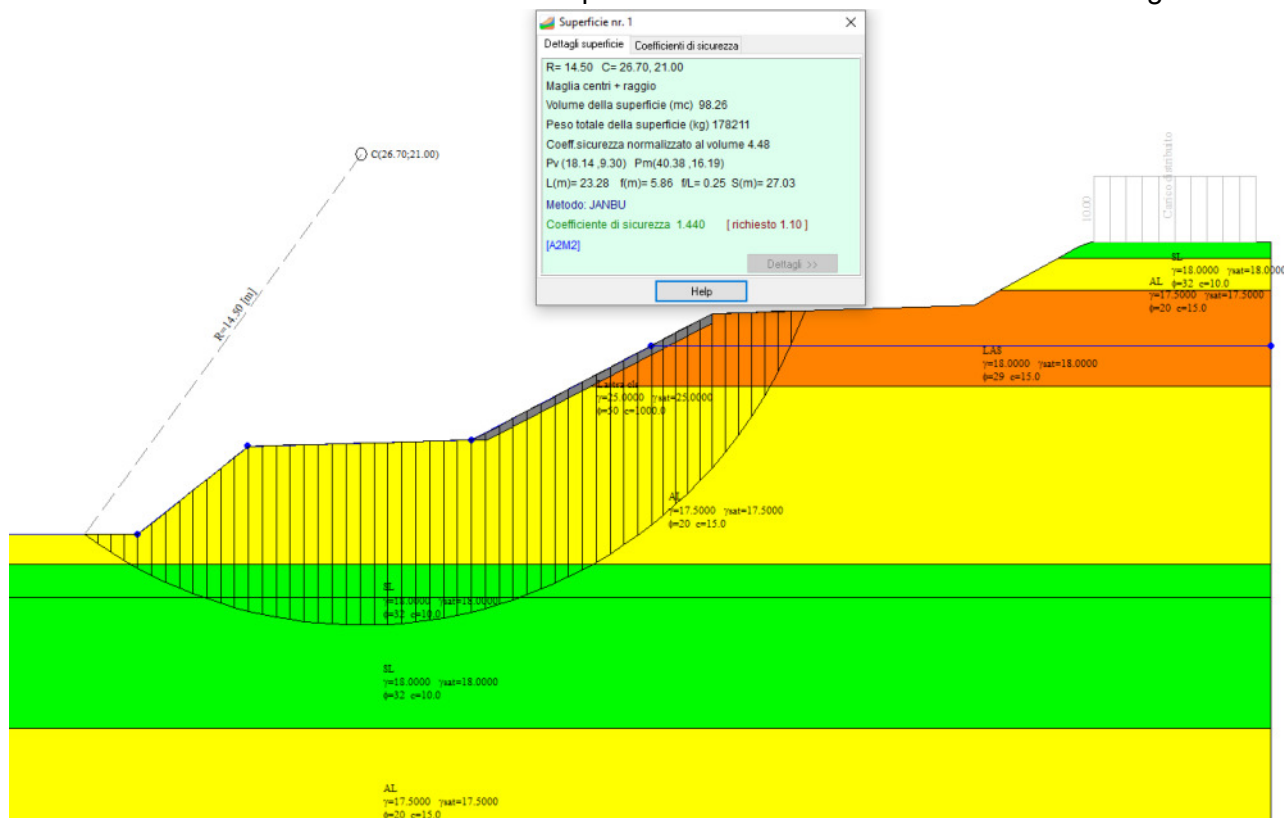


Figura 4-9 – T17 valle SS67, verifica stato attuale



# FSC

Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione



Intervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

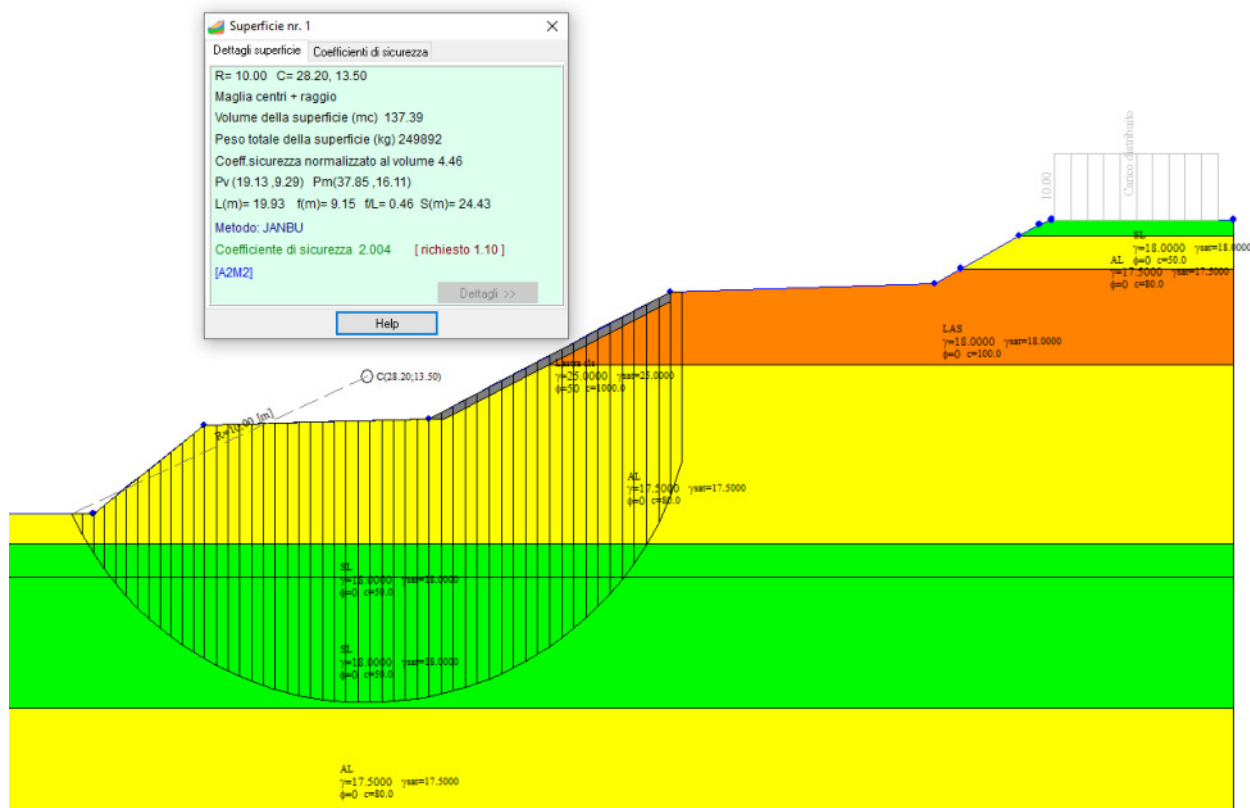


Figura 4-10 – T17 valle SS67, verifica rapido svaso

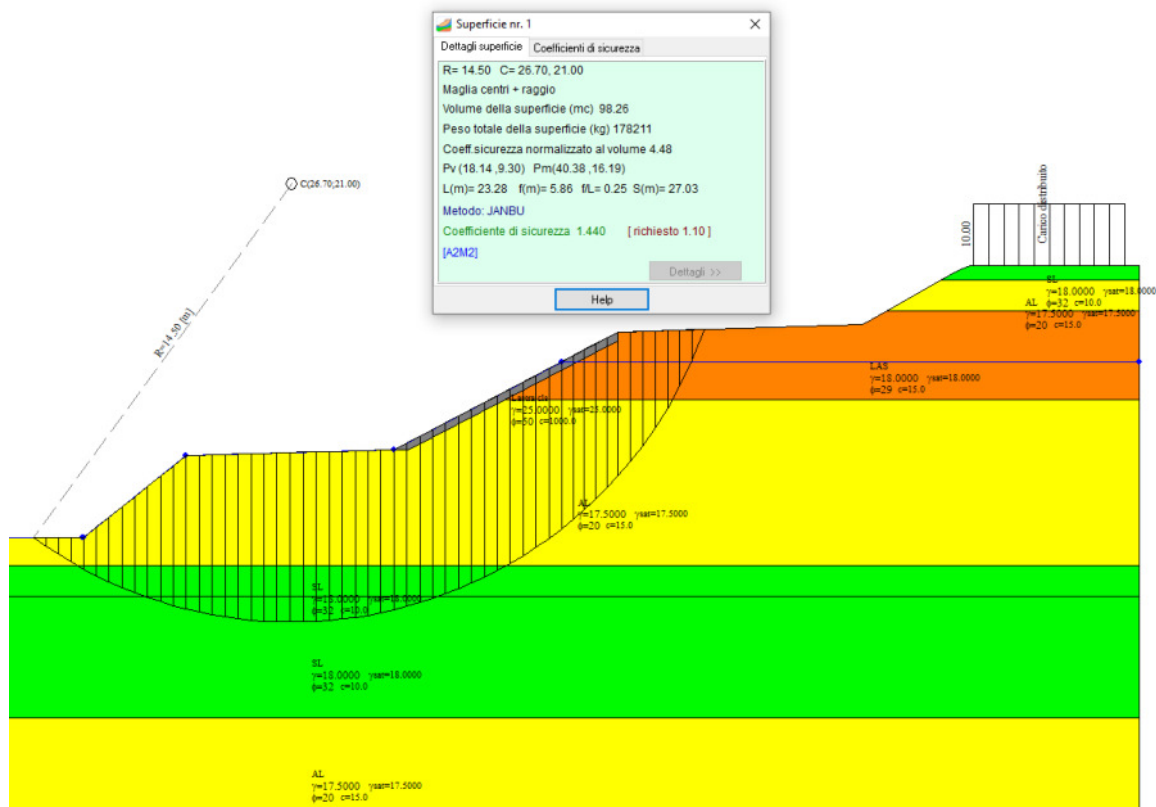
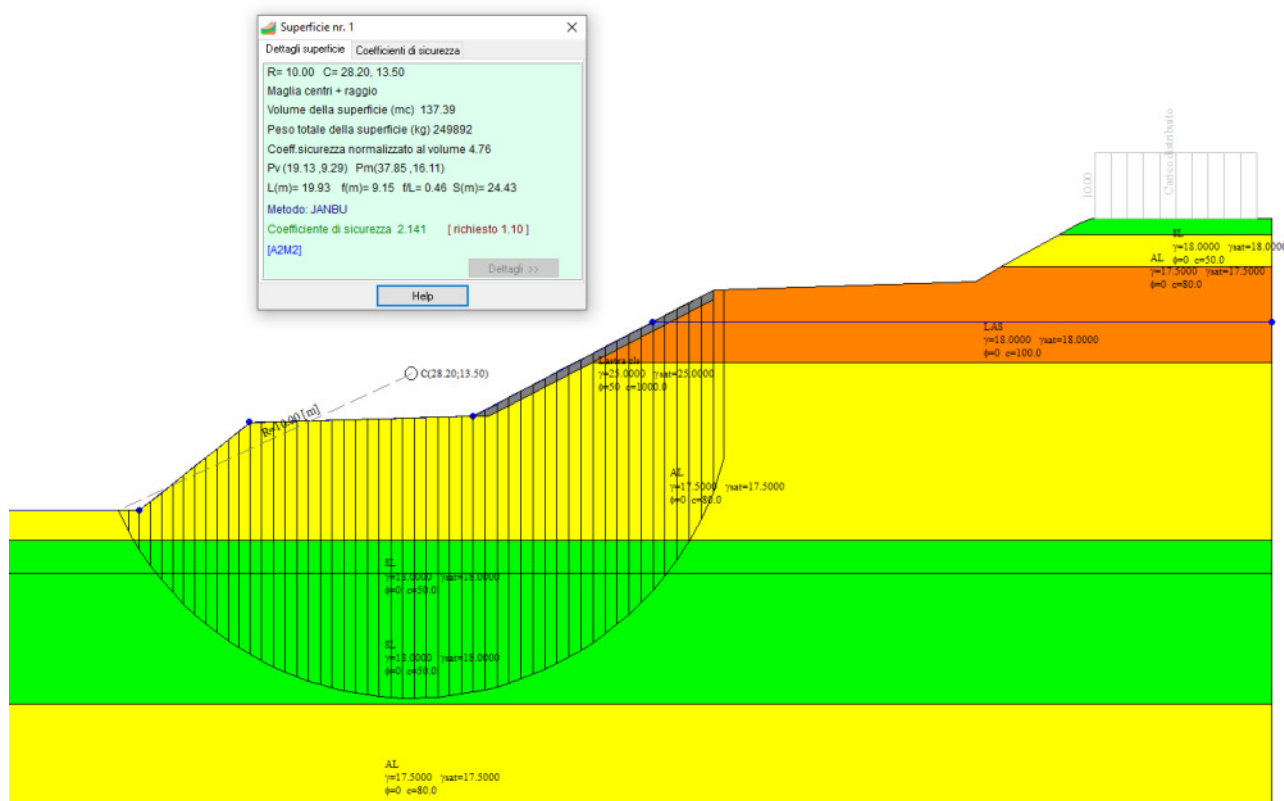


Figura 4-11 – T17 valle SS67, verifica con carico di manutenzione



*Figura 4-12 – T17 valle SS67, verifica sisma*

Scenario	Fattore Sicurezza	Fattore sicurezza da Normativa
Stato Attuale Drenato	1.440	1.1
Rapido Svaso Non Drenato	2.004	1.1
Carico di manutenzione Drenato	1.440	1.1
Sisma Non Drenato	2.141	1.2

Tabella 4-6 – Tabella riepilogativa – Tratto T17 a valle della SS67



FSC

Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione



Intervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

#### 4.6 Tratto T17 a monte della SS67

Si riportano di seguito, in Figura 4-13, Figura 4-14, Figura 4-15 e Figura 4-16 le verifiche eseguite per i diversi scenari di progetto, mentre in Tabella 4-7 una tabella riepilogativa con l'indicazione dei risultati ottenuti e i coefficienti di sicurezza raggiunti.

Si evidenzia che allo stato attuale non sono presenti criticità nella stabilità del rilevato arginale.

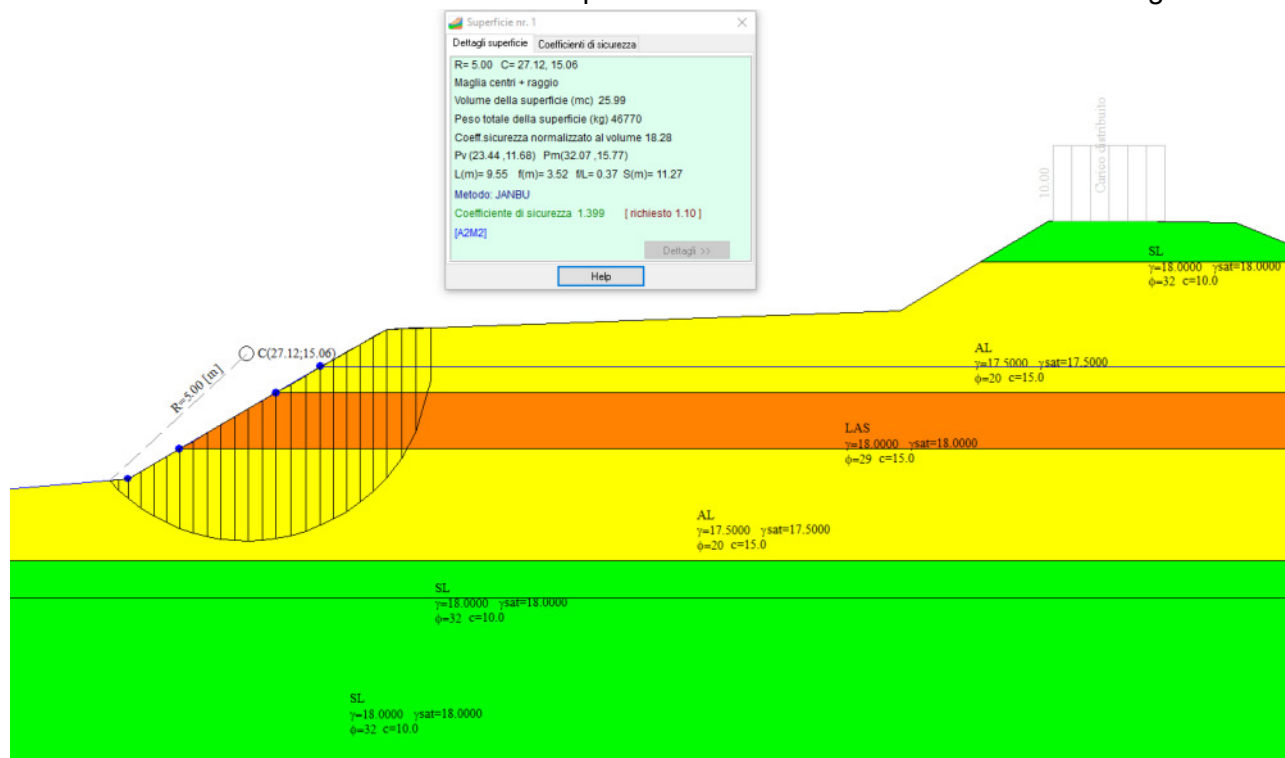


Figura 4-13 – T17 monte SS67, verifica stato attuale





# FSC

Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione



Intervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

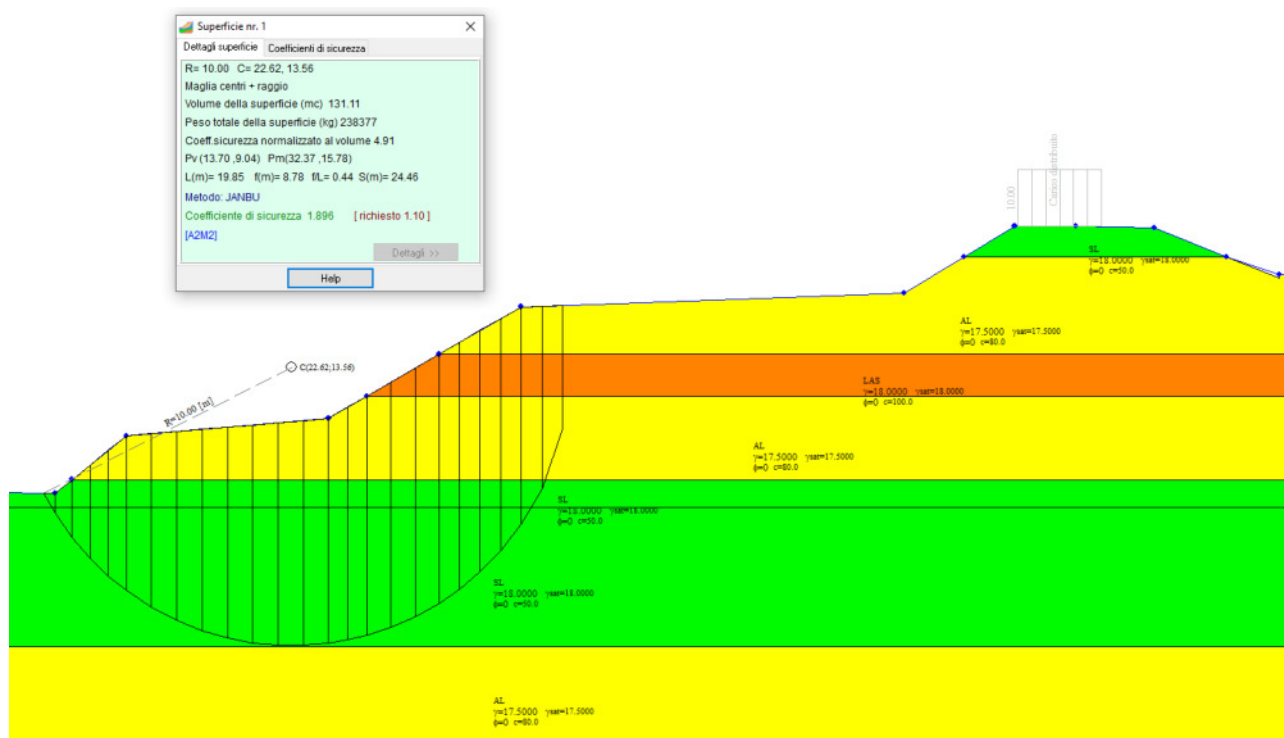


Figura 4-14 – T17 monte SS67, verifica rapido svaso

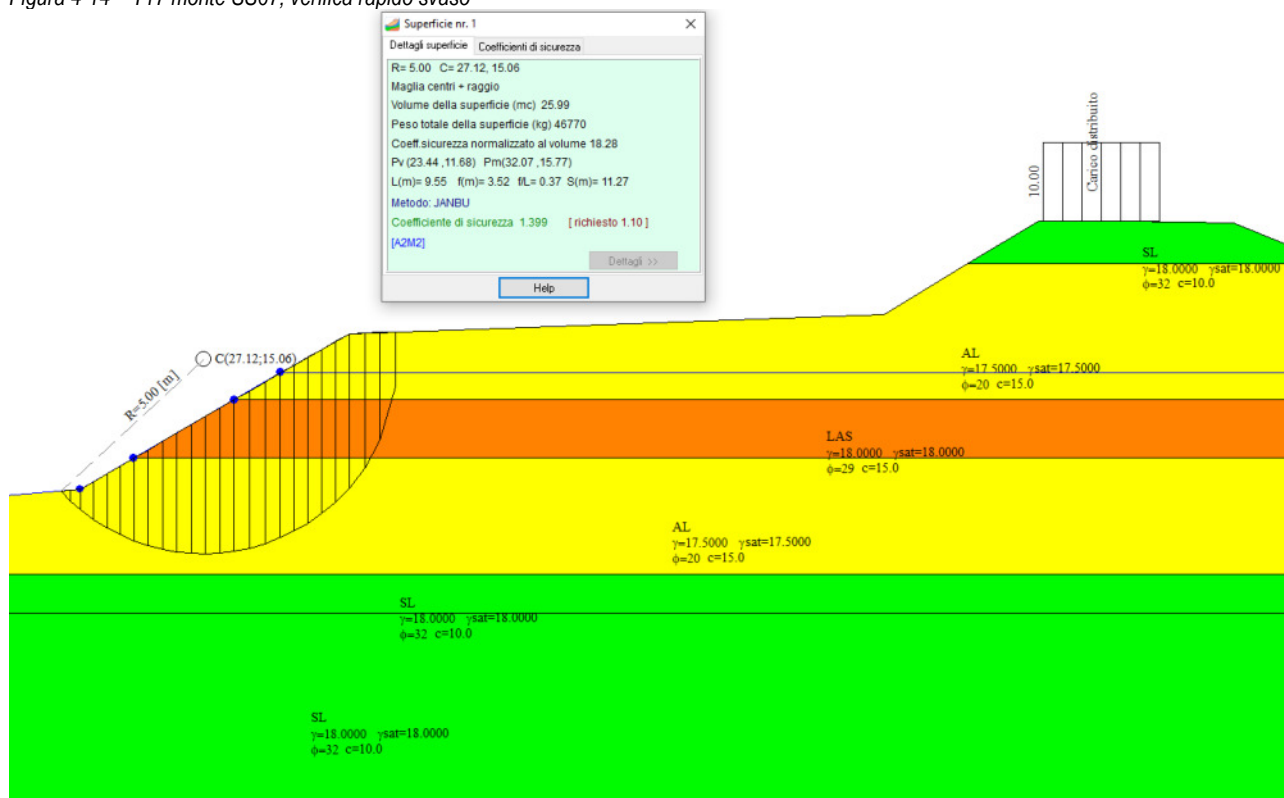


Figura 4-15 – T17 monte SS67, verifica con carico di manutenzione



# FSC

Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione



Intervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

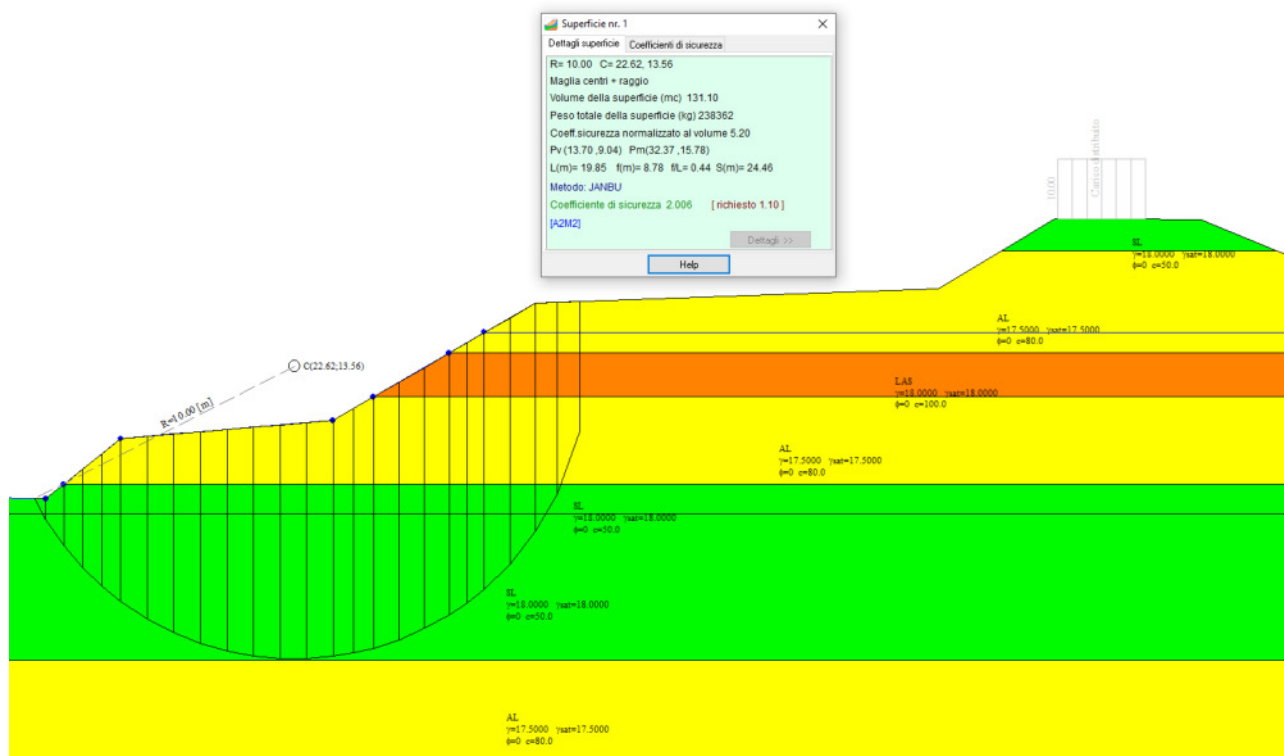


Figura 4-16 – T17 monte SS67, verifica sisma

Scenario	Fattore Sicurezza	Fattore sicurezza da Normativa
Stato Attuale Drenato	1.399	1.1
Rapido Svaso Non Drenato	1.896	1.1
Carico di manutenzione Drenato	1.399	1.1
Sisma Non Drenato	2.006	1.2

Tabella 4-7 – Tabella riepilogativa – Tratto T17 a monte della SS67



FSC

Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione



Intervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

## 4.7 Tratto T18 della SS67

Si riportano di seguito, in Figura 4-17, Figura 4-18, Figura 4-19, Figura 4-20 le verifiche eseguite per i diversi scenari di progetto, mentre in Tabella 4-8 una tabella riepilogativa con l'indicazione dei risultati ottenuti e i coefficienti di sicurezza raggiunti.

Si evidenzia che allo stato attuale non sono presenti criticità nella stabilità del rilevato arginale.

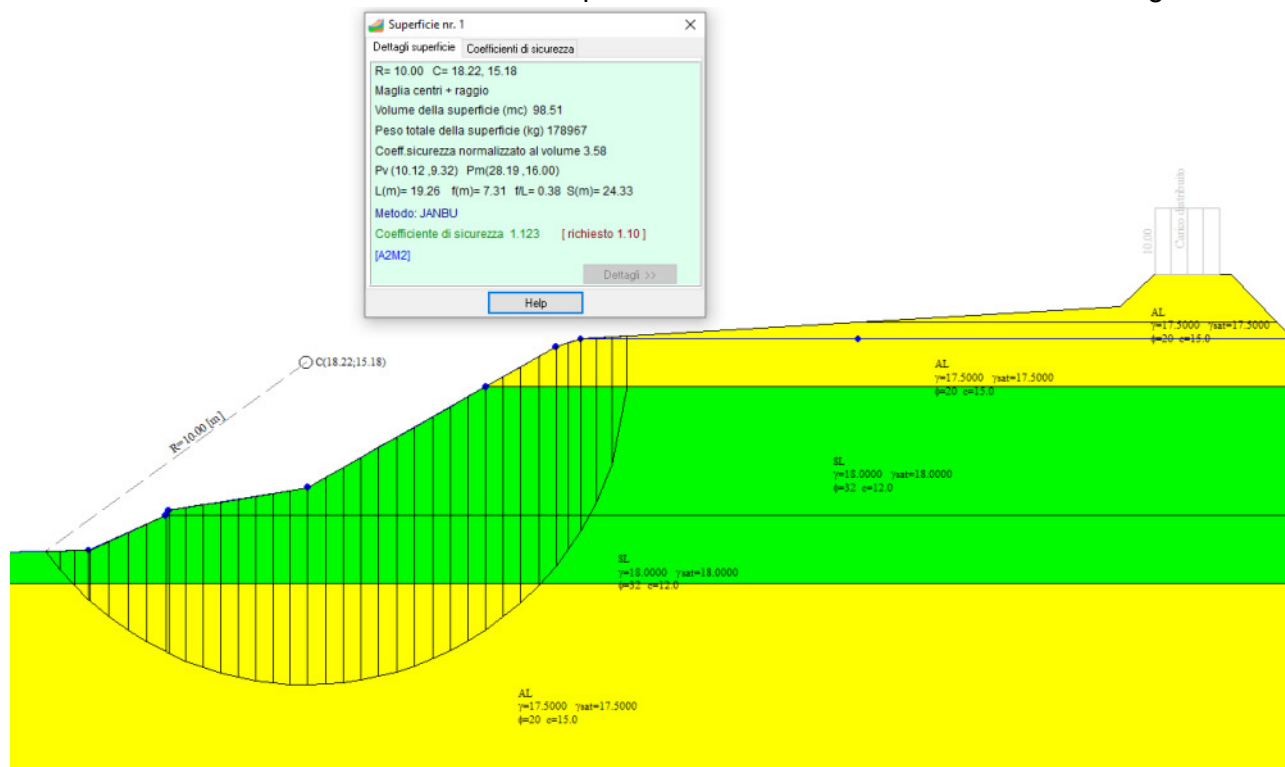


Figura 4-17 – T18, verifica stato attuale



# FSC

Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione



Intervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

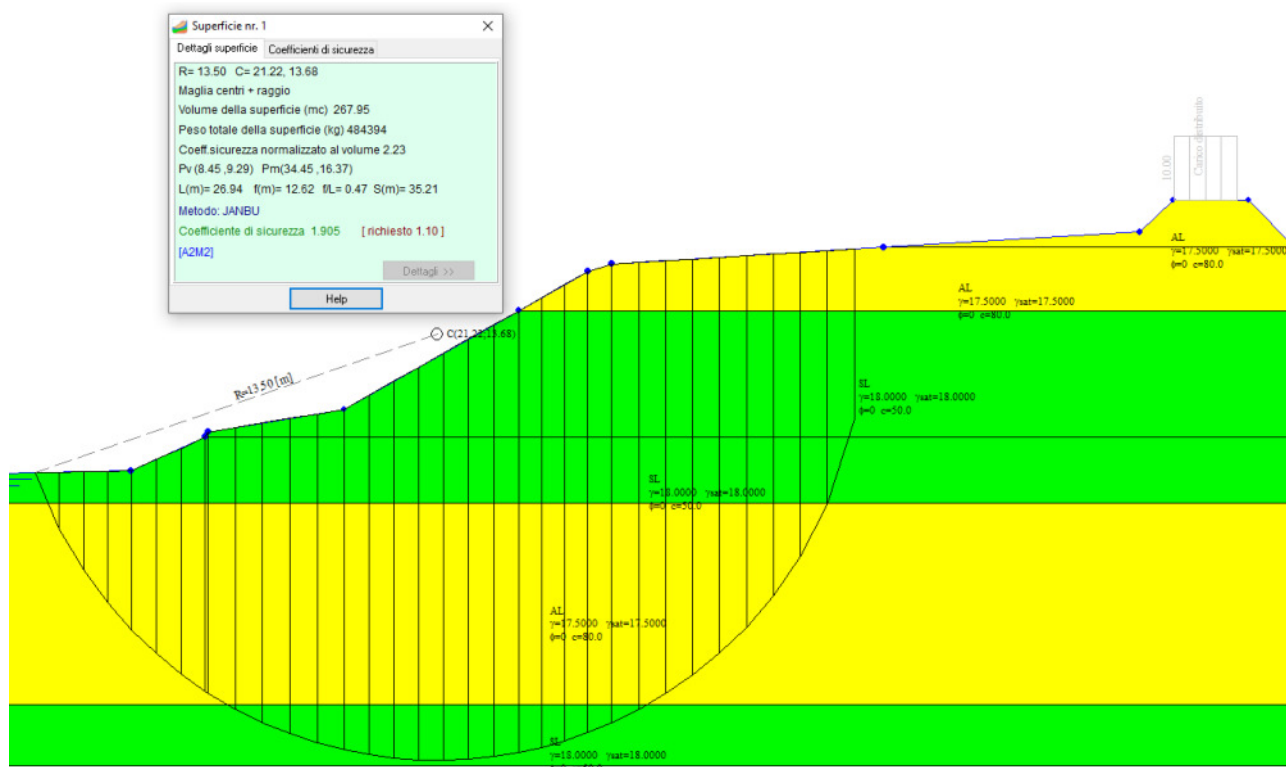


Figura 4-18 – T18, verifica rapido svasso

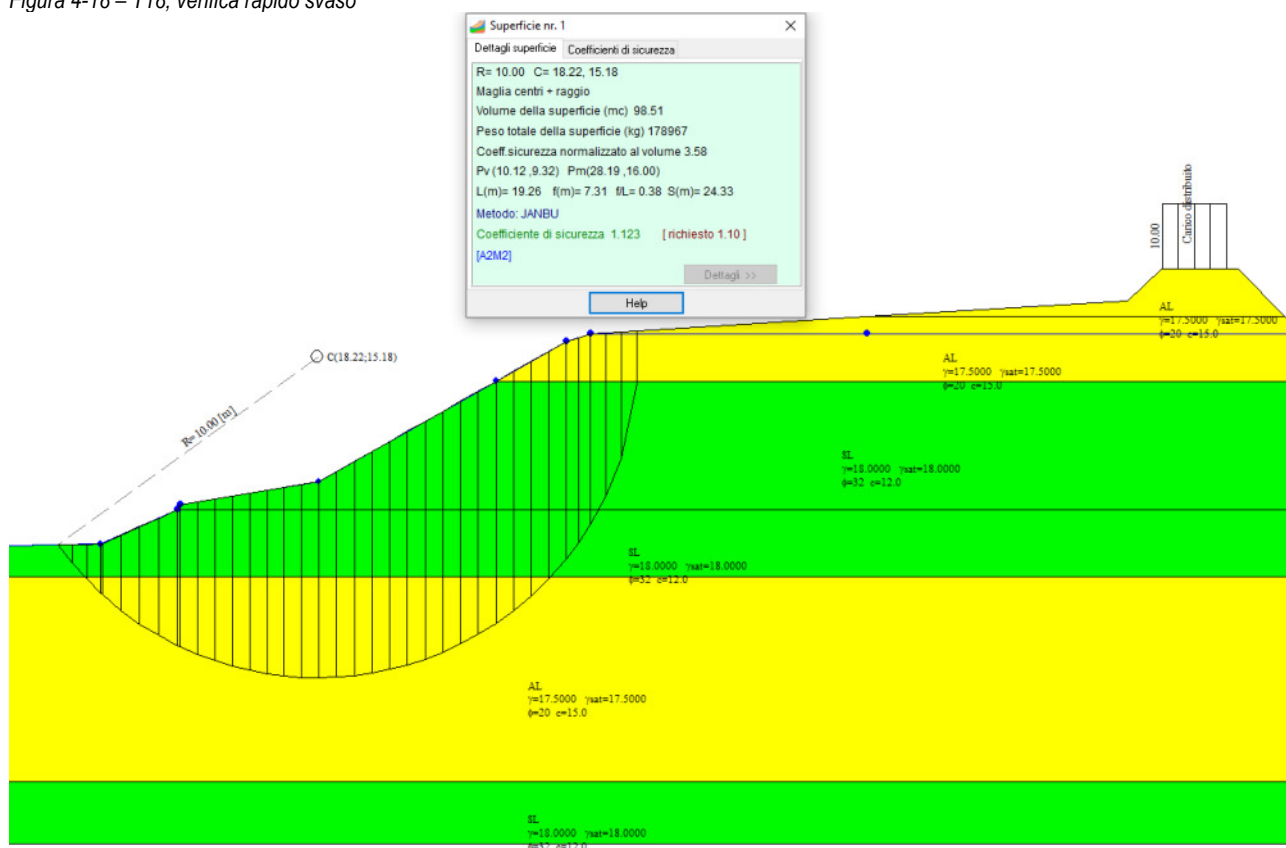


Figura 4-19 – T18, verifica con carico di manutenzione





# FSC

Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione



Intervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

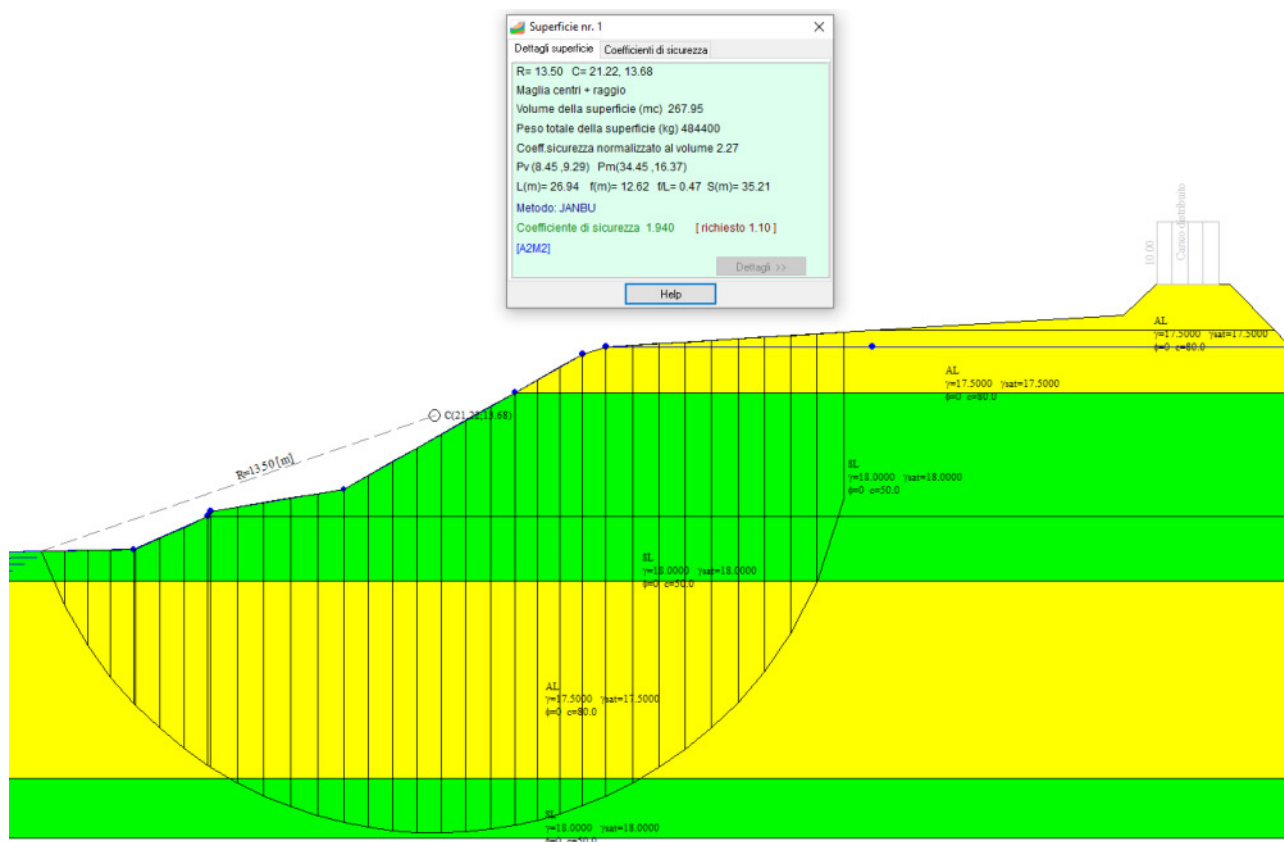


Figura 4-20 – T18, verifica sisma

Scenario	Fattore Sicurezza	Fattore sicurezza da Normativa
Stato Attuale Drenato	1.123	1.1
Rapido Svaso Non Drenato	1.905	1.1
Carico di manutenzione Drenato	1.123	1.1
Sisma Non Drenato	1.940	1.2

Tabella 4-8 – Tabella riepilogativa – Tratto T18



FSC

Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione



Intervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

#### 4.8 Tratto T16 della SS67

Si riportano di seguito, in Figura 4-21, Figura 4-22, Figura 4-23 e Figura 4-24 le verifiche eseguite per i diversi scenari di progetto, mentre in Tabella 4-9 una tabella riepilogativa con l'indicazione dei risultati ottenuti e i coefficienti di sicurezza raggiunti.

Si evidenzia che allo stato attuale non sono presenti criticità nella stabilità del rilevato arginale.

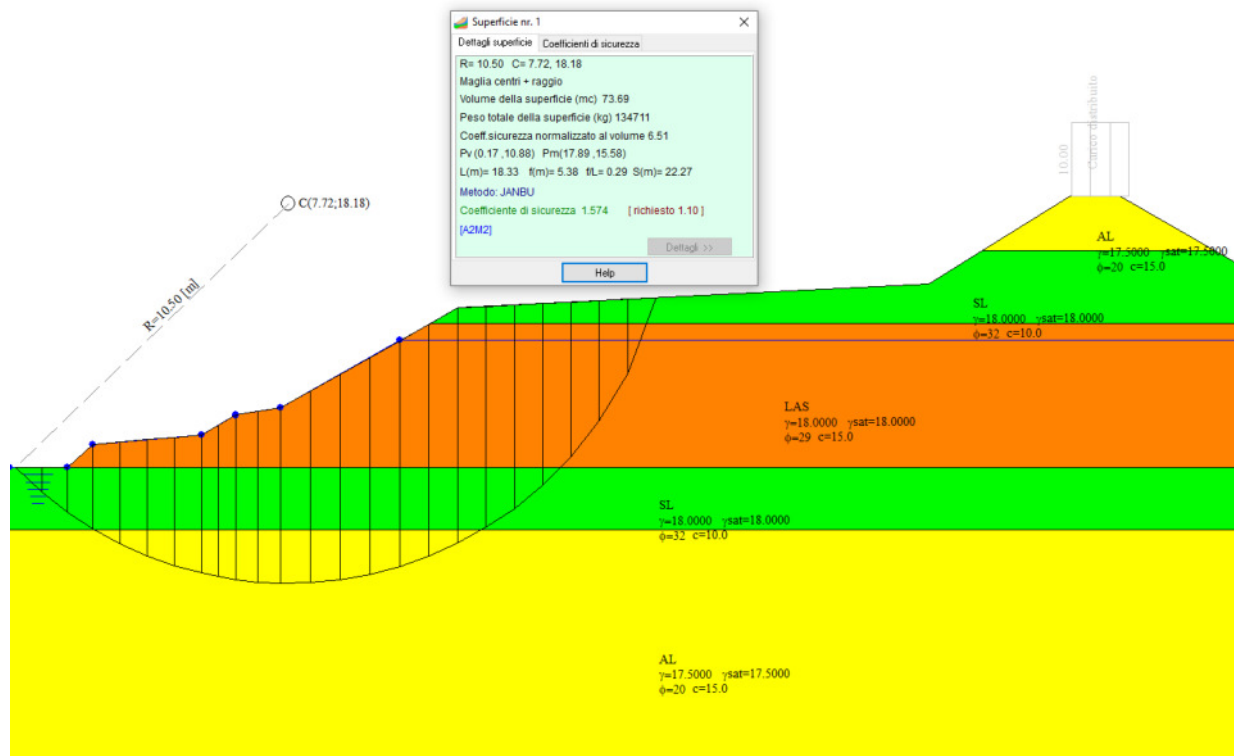


Figura 4-21 – T16, verifica stato attuale



# FSC

Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione



Intervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

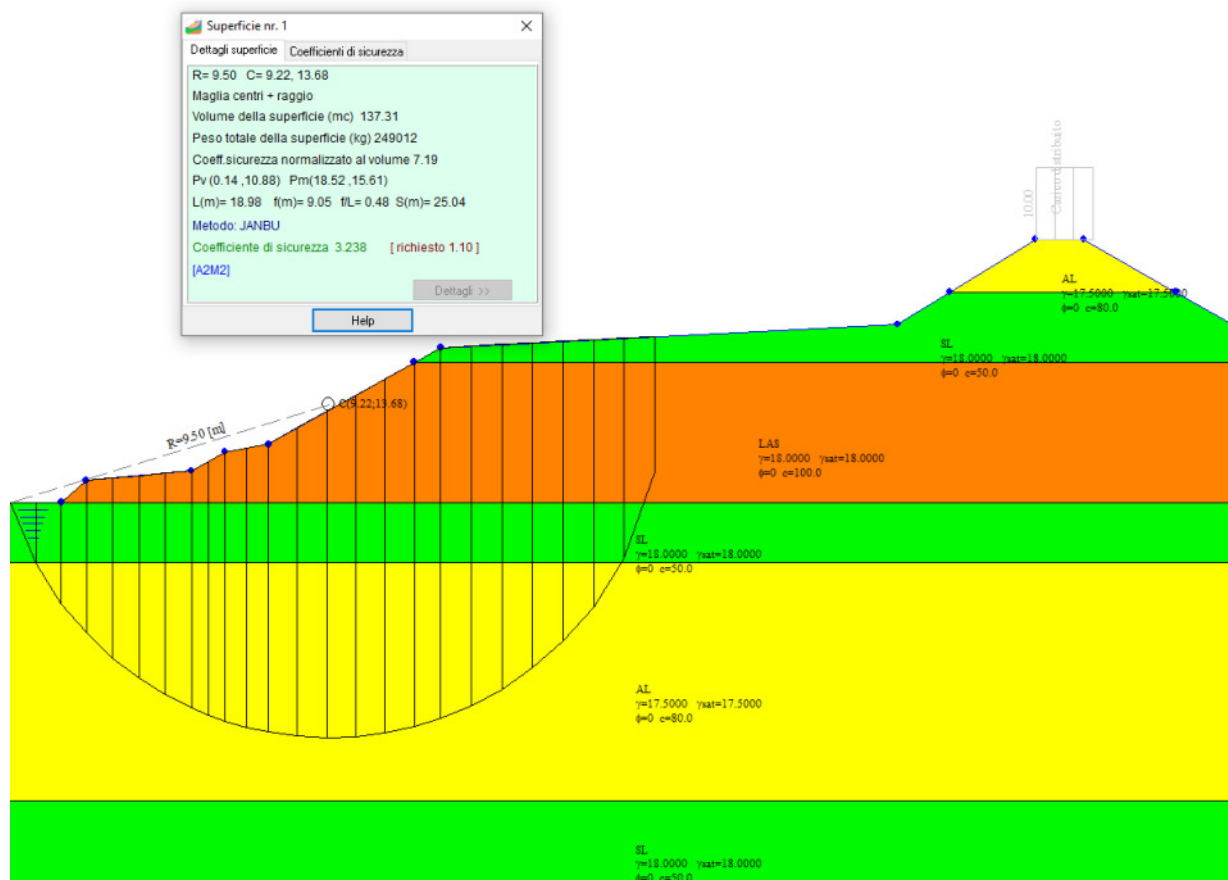


Figura 4-22 – T16, verifica rapido svasso

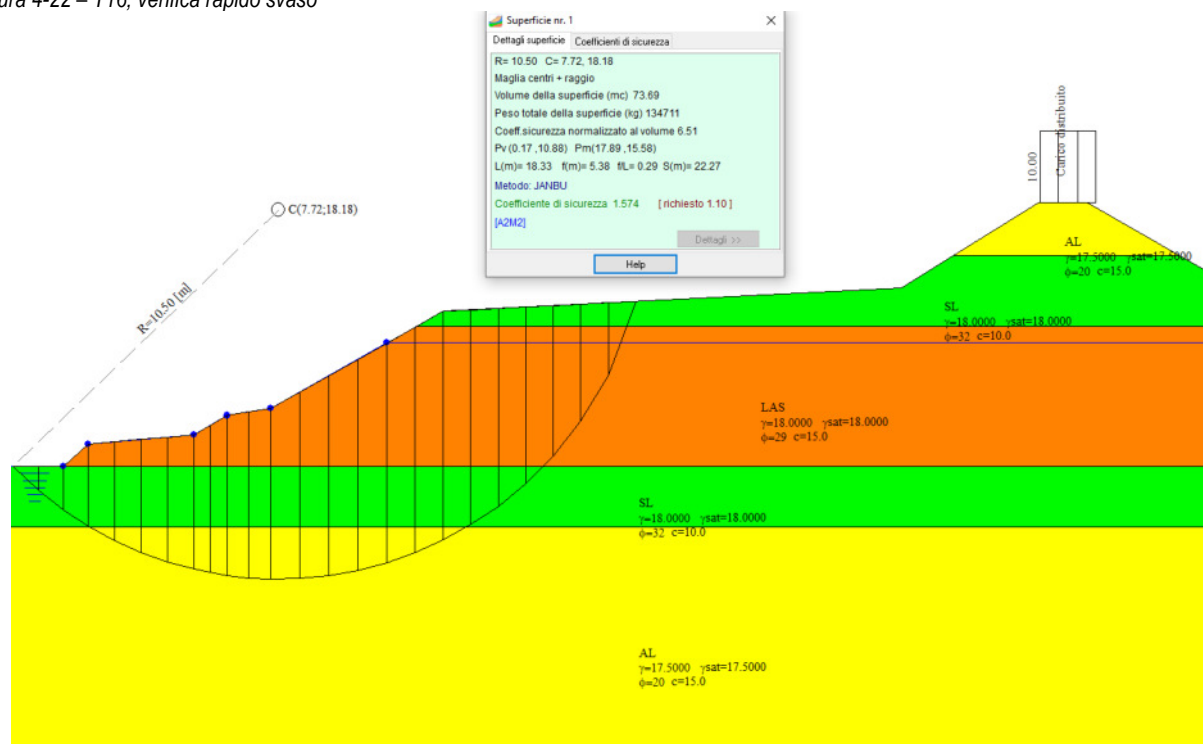


Figura 4-23 – T16, verifica con carico di manutenzione

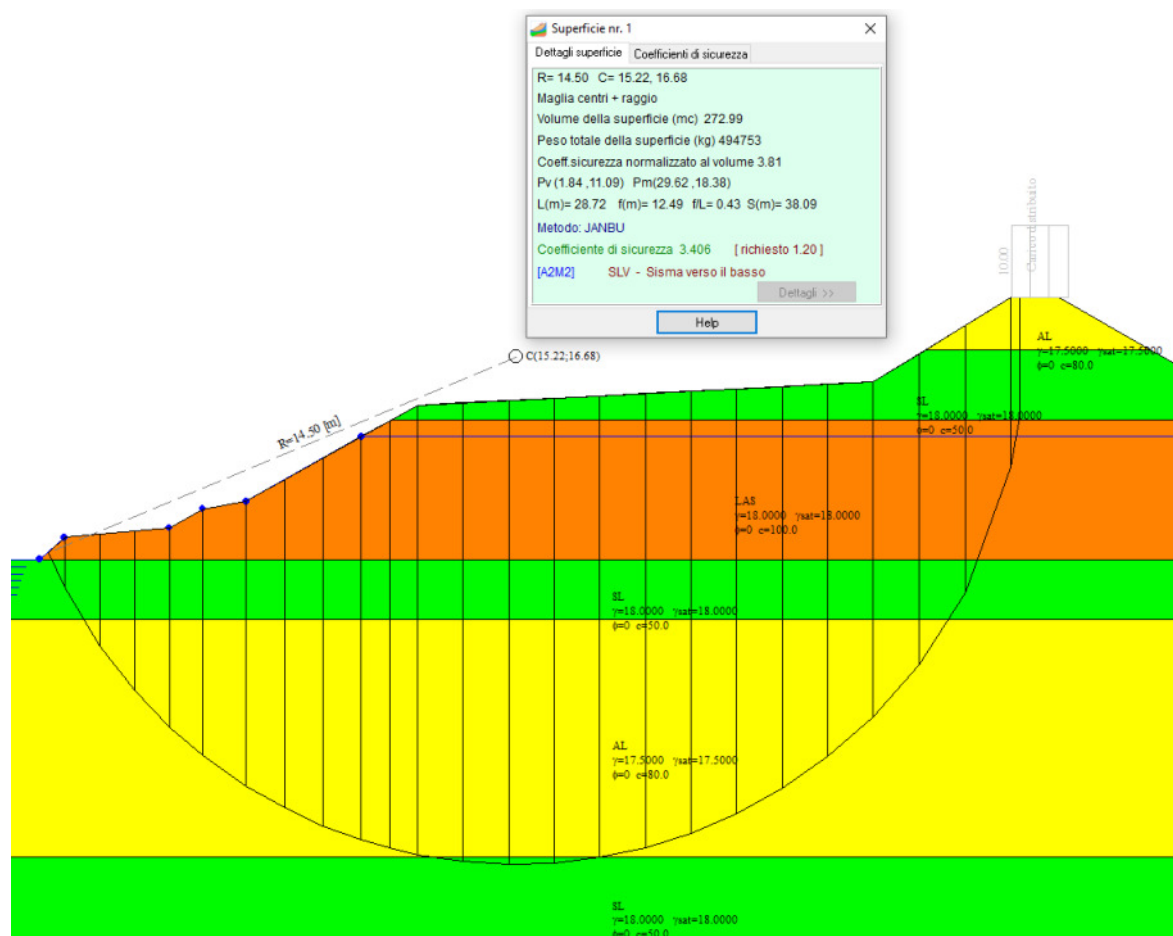


Figura 4-24 – T16, verifica sisma

Scenario	Fattore Sicurezza	Fattore sicurezza da Normativa
Stato Attuale Drenato	1.574	1.1
Rapido Svaso Non Drenato	3.238	1.1
Carico di manutenzione Drenato	1.574	1.1
Sisma Non Drenato	3.406	1.2

Tabella 4-9 – Tabella riepilogativa – Tratto T16





FSC

Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione



Intervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

## 4.9 Tratto T15 della SS67

Si riportano di seguito, in Figura 4-25, Figura 4-26, Figura 4-27 e Figura 4-28 le verifiche eseguite per i diversi scenari di progetto, mentre in Tabella 4-10 una tabella riepilogativa con l'indicazione dei risultati ottenuti e i coefficienti di sicurezza raggiunti.

Si evidenzia che allo stato attuale non sono presenti criticità nella stabilità del rilevato arginale.

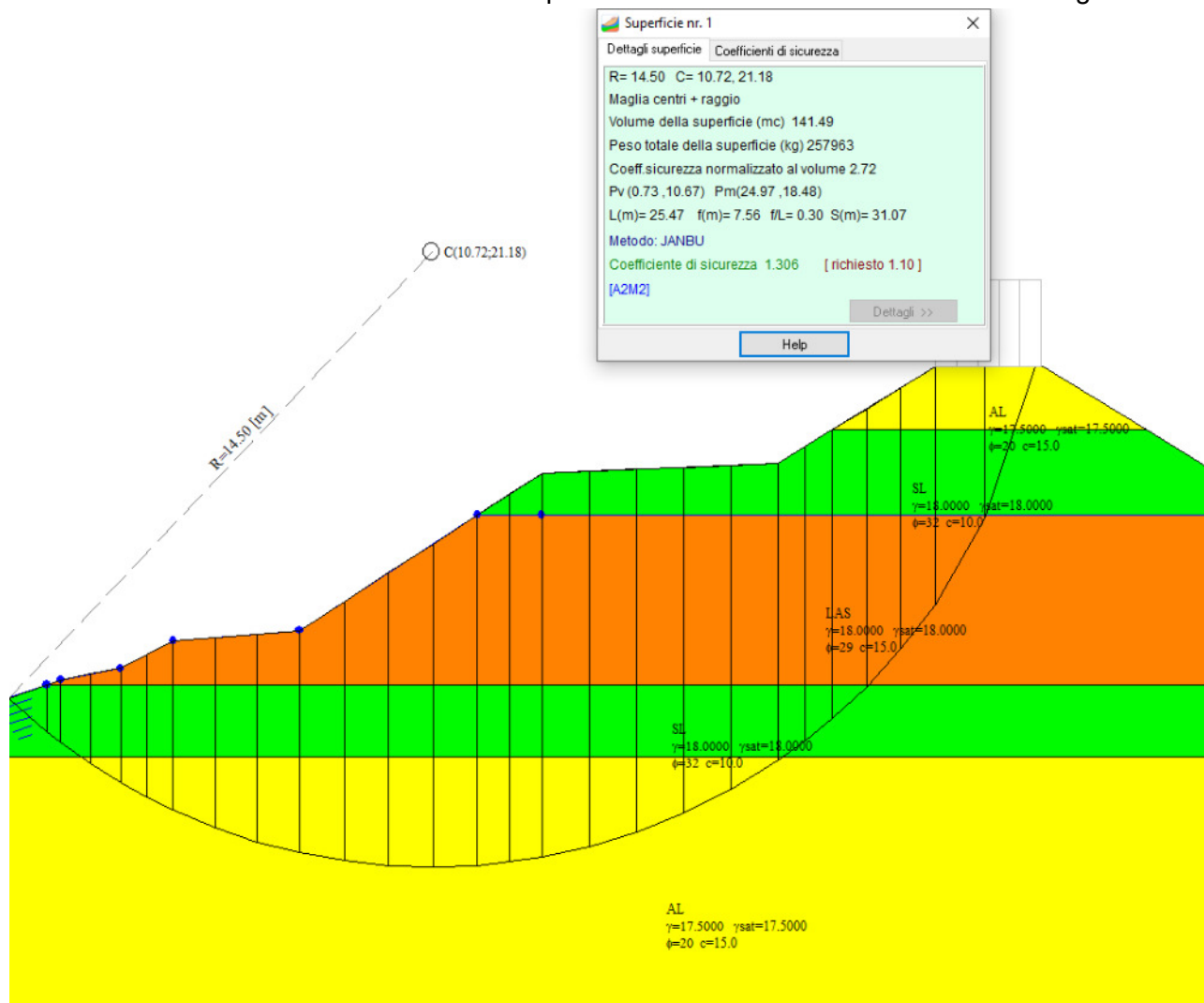


Figura 4-25 – T15, verifica stato attuale



# FSC

Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione



Intervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

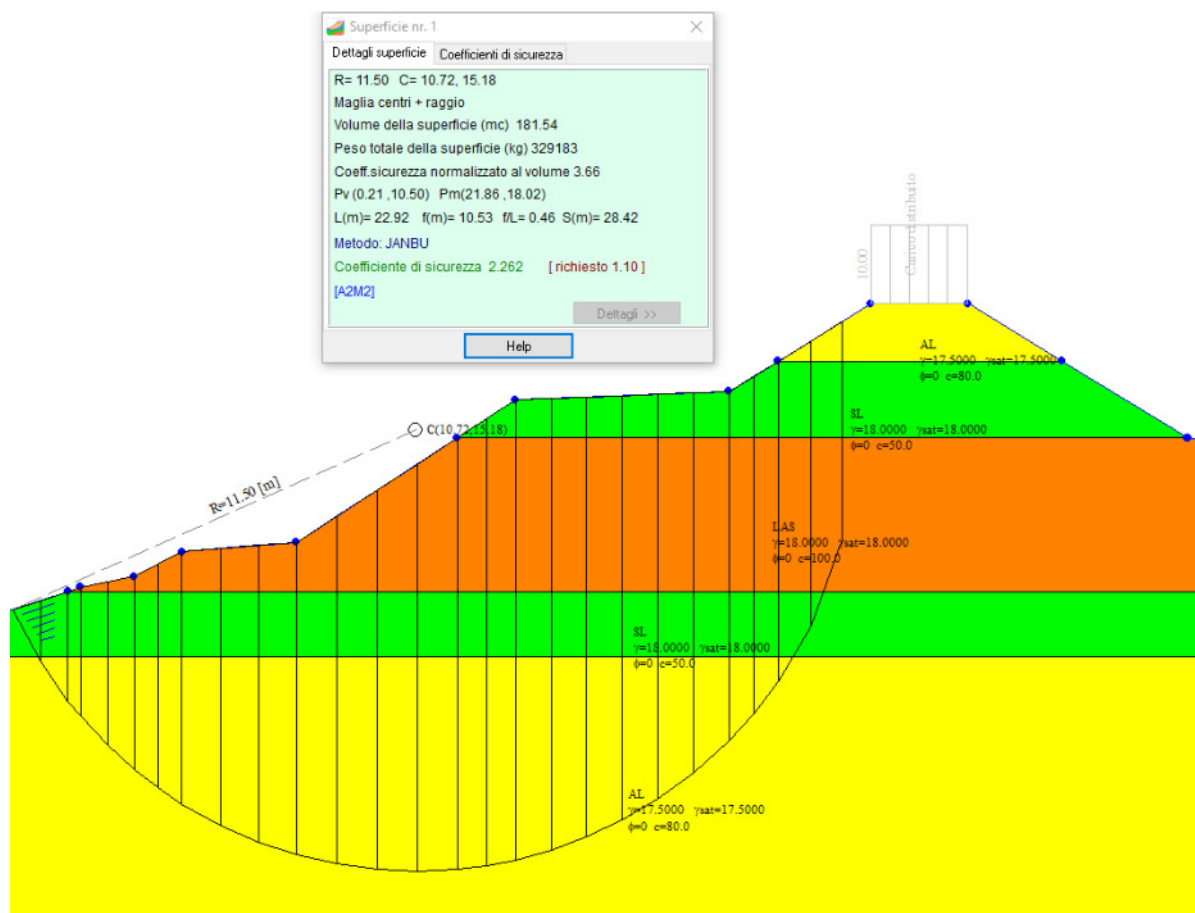


Figura 4-26 – T15, verifica rapido svasso

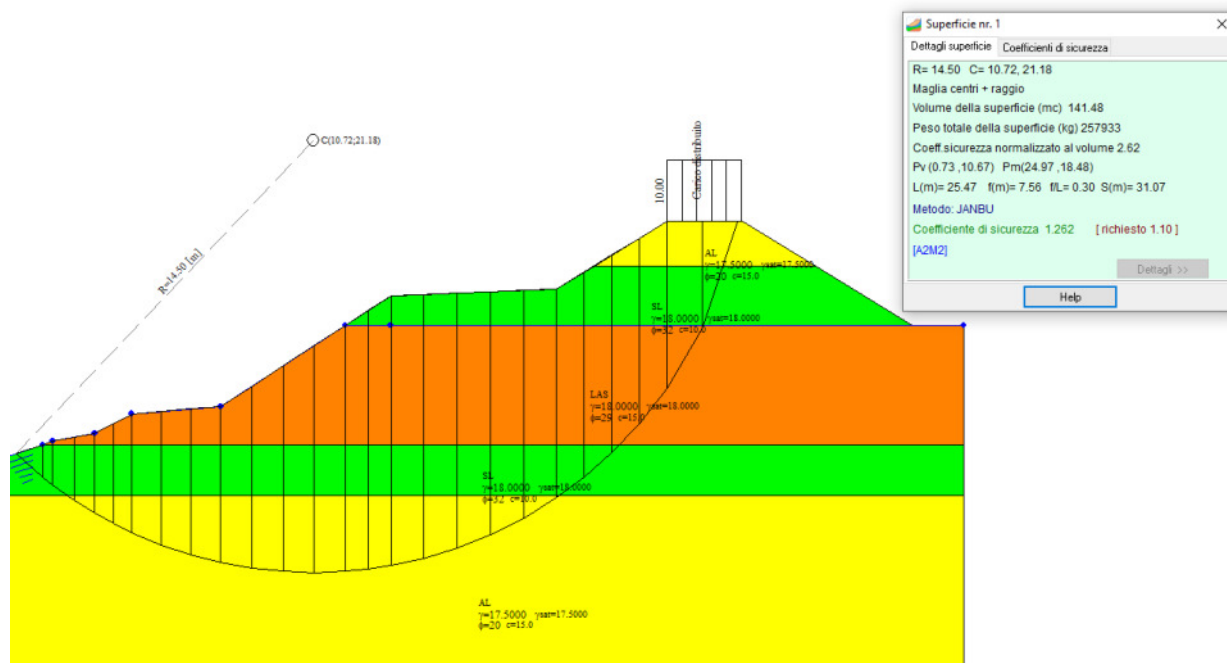


Figura 4-27 – T15, verifica con carico di manutenzione



FSC

Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione



Intervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

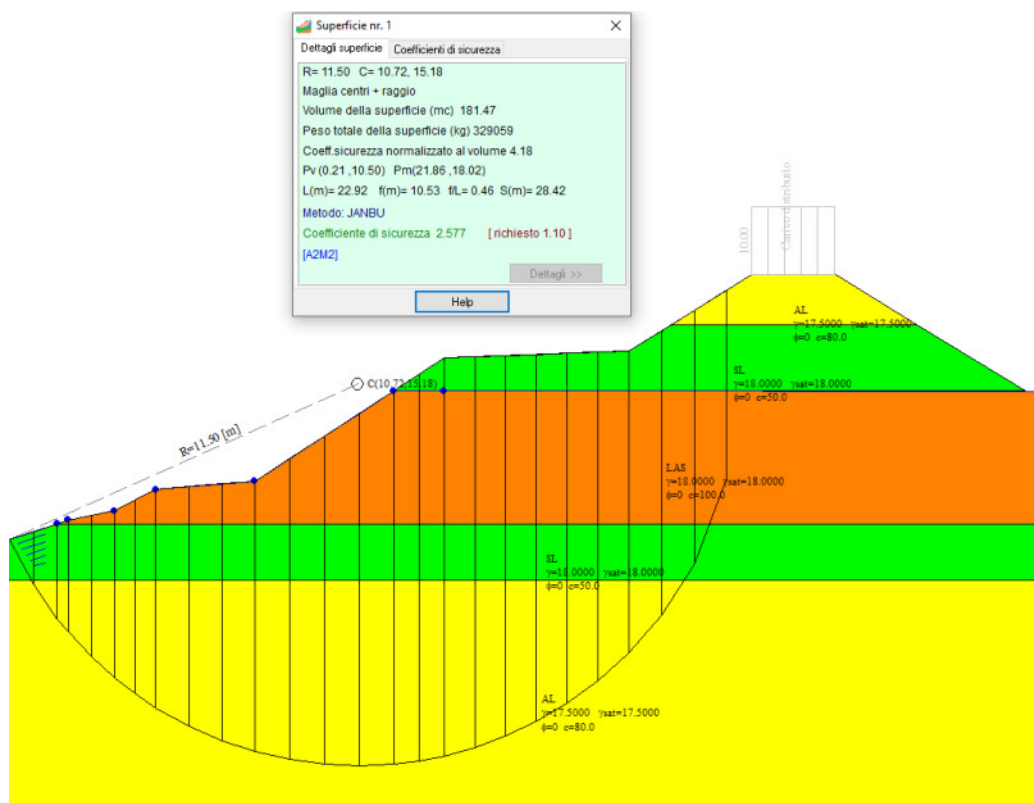


Figura 4-28 – T15, verifica sisma

Scenario	Fattore Sicurezza	Fattore sicurezza da Normativa
Stato Attuale Drenato	1.306	1.1
Rapido Svaso Non Drenato	2.262	1.1
Carico di manutenzione Drenato	1.262	1.1
Sisma Non Drenato	2.577	1.2

Tabella 4-10 – Tabella riepilogativa – Tratto T16



#### 4.10 Riepilogo risultati sulla stabilità dei versanti

Si riporta in Tabella 4-11 il riepilogo dei fattori di sicurezza ottenuti per ogni scenario di verifica in ciascun tratto allo stato attuale. Si nota come allo stato attuale le caratteristiche geologico-geotecniche e la morfologia delle sezioni garantisce il rispetto dei fattori di sicurezza indicati nelle NTC 2018 e relativa circolare.

Scenario	Tratto T19 valle SS	Tratto T19 monte SS	Tratto T17 valle SS	Tratto T17 monte SS	Tratto T18	Tratto T16	Tratto T15	Fattore sicurezza da Normativa
Stato Attuale Drenato	1.289	1.147	1.44	1.399	1.123	1.574	1.306	1.1
Rapido Svaso Non Drenato	2.064	1.554	2.004	1.896	1.905	3.238	2.262	1.1
Carico di manutenzione Drenato	1.289	1.116	1.44	1.399	1.123	1.574	1.262	1.1
Sisma Non Drenato	2.268	1.868	2.141	2.006	1.94	3.406	2.577	1.2

Tabella 4-11 – Tabella riepilogativa delle verifiche di stabilità



**FSC**Fondo per lo Sviluppo  
e la CoesioneIntervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

## 5 Infissione delle palancole

Le verifiche per la determinazione della profondità di infissione delle palancole sono state eseguite su una sezione tipo per tratto, in modo che, a seguito di asportazione di parte del rilevato arginale causata da evento di piena particolarmente grave, esse siano in grado di sostenere la parte rimanente, vale a dire circa metà della sezione arginale intatta.

Per garantire un maggiore margine di sicurezza la parte considerata asportata è quella che risulta in maggiore altezza di ritenuta della palanca, indipendentemente dal fatto che sia lato fiume o lato campagna.

Gli scenari di verifica adottati per ogni sezione tipo considerano le condizioni sismiche e la presenza del carico di manutenzione di 10 KN/m, ad esclusione del tratto T17 a monte della SS67 nel quale, visti i risultati in termini di spostamento alla testa della palanca e degli spazi a disposizione, si prescrive la distanza da esso di almeno 4 m in seguito al manifestarsi della condizione alla base della verifica. Per la limitazione degli spostamenti in testa si è considerato, nei limiti del possibile, di aumentare la profondità di infissione o la rigidità e grandezza del profilo, non sono stati presi in considerazione eventuali sistemi di ancoraggio in quanto l'installazione di tiranti richiede spazi che non sono sufficienti, con rischio inoltre di interferire con le infrastrutture limitrofe o comunque con inclinazione degli stessi tale da compromettere o limitare fortemente la loro funzionalità.

In tutte le verifiche è stata considerata la posizione della falda al livello del piano campagna quindi lato monte al pari della quota di testa della palanca mentre lato valle alla quota dello scavo considerato. Anche nel caso in cui lo scavo sia riferito alla porzione di argine lato fiume si è considerata la quota liquida alla base dello scavo perché altrimenti avrebbe azione stabilizzante.

Di seguito verranno quindi riportate le verifiche per ogni sezione tipo.

Le caratteristiche geotecniche adottate nelle verifiche sono riportate nel paragrafo 3 e le medesime utilizzate per la verifica a stabilità.

Le verifiche dell'infissione delle palancole sono state effettuate utilizzando *PAC 16 prodotto da Aztec Informatica s.r.l., Casoli del Manco (CS)*.

### 5.1 Aspetti teorici

#### 5.1.1 Calcolo della profondità di infissione

Nel caso generale l'equilibrio della paratia è assicurato dal bilanciamento fra la spinta attiva agente da monte sulla parte fuori terra, la resistenza passiva che si sviluppa da valle verso monte nella zona interrata e la contropinta che agisce da monte verso valle nella zona interrata al di sotto del centro di rotazione.

Pertanto, il primo passo da compiere nella progettazione è il calcolo della profondità di infissione necessaria ad assicurare l'equilibrio fra i carichi agenti (spinta attiva, resistenza passiva, contropinta, tiro dei tiranti ed eventuali carichi esterni).

Nel calcolo classico delle paratie si suppone che essa sia infinitamente rigida e che possa subire una rotazione intorno ad un punto (*Centro di rotazione*) posto al di sotto della linea di fondo scavo.

**FSC**Fondo per lo Sviluppo  
e la CoesioneIntervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

Occorre pertanto costruire i diagrammi di spinta attiva e di spinta (resistenza) passiva agenti sulla paratia. A partire da questi si costruiscono i diagrammi risultanti.

Nella costruzione dei diagrammi risultanti si adotterà la seguente notazione:

$K_{am}$  diagramma della spinta attiva agente da monte

$K_{av}$  diagramma della spinta attiva agente da valle sulla parte interrata

$K_{pm}$  diagramma della spinta passiva agente da monte

$K_{pv}$  diagramma della spinta passiva agente da valle sulla parte interrata.

Calcolati i diagrammi suddetti si costruiscono i diagrammi risultanti

$$D_m = K_{pm} - K_{av} \quad \text{e} \quad D_v = K_{pv} - K_{am}$$

Questi diagrammi rappresentano i valori limiti delle pressioni agenti sulla paratia. La soluzione è ricercata per tentativi facendo variare la profondità di infissione e la posizione del centro di rotazione fino a quando non si raggiunge l'equilibrio sia alla traslazione che alla rotazione.

Per mettere in conto un fattore di sicurezza nel calcolo delle profondità di infissione si può agire con tre modalità:

1. applicazione di un coefficiente moltiplicativo alla profondità di infissione strettamente necessaria per l'equilibrio;
2. riduzione della spinta passiva tramite un coefficiente di sicurezza;
3. riduzione delle caratteristiche del terreno tramite coefficienti di sicurezza su  $\tan(\varphi)$  e sulla coesione.

### 5.1.2 Calcolo delle spinte

#### Metodo di Culmann (metodo del cuneo di tentativo)

Il metodo di Culmann adotta le stesse ipotesi di base del metodo di Coulomb: cuneo di spinta a monte della parete che si muove rigidamente lungo una superficie di rottura rettilinea o spezzata (nel caso di terreno stratificato).

La differenza sostanziale è che mentre Coulomb considera un terrapieno con superficie a pendenza costante e carico uniformemente distribuito (il che permette di ottenere una espressione in forma chiusa per il valore della spinta) il metodo di Culmann consente di analizzare situazioni con profilo di forma generica e carichi sia concentrati che distribuiti comunque disposti. Inoltre, rispetto al metodo di Coulomb, risulta più immediato e lineare tener conto della coesione del masso spingente. Il metodo di Culmann, nato come metodo essenzialmente grafico, si è evoluto per essere trattato mediante analisi numerica (noto in questa forma come metodo del cuneo di tentativo).

I passi del procedimento risolutivo sono i seguenti:

- si impone una superficie di rottura (angolo di inclinazione  $r$  rispetto all'orizzontale) e si considera il cuneo di spinta delimitato dalla superficie di rottura stessa, dalla parete su cui si calcola la spinta e dal profilo del terreno;

**FSC**Fondo per lo Sviluppo  
e la CoesioneIntervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

- si valutano tutte le forze agenti sul cuneo di spinta e cioè peso proprio ( $W$ ), carichi sul terrapieno, resistenza per attrito e per coesione lungo la superficie di rottura ( $R$  e  $C$ ) e resistenza per coesione lungo la parete ( $A$ );
- dalle equazioni di equilibrio si ricava il valore della spinta  $S$  sulla parete.

Questo processo viene iterato fino a trovare l'angolo di rottura per cui la spinta risulta massima nel caso di spinta attiva e minima nel caso di spinta passiva.

Le pressioni sulla parete di spinta si ricavano derivando l'espressione della spinta  $S$  rispetto all'ordinata  $z$ . Noto il diagramma delle pressioni si ricava il punto di applicazione della spinta.

### 5.1.3 Spinta in presenza di falda

Nel caso in cui a monte della parete sia presente la falda il diagramma delle pressioni risulta modificato a causa della sottospinta che l'acqua esercita sul terreno. Il peso di volume del terreno al di sopra della linea di falda non subisce variazioni. Viceversa, al di sotto del livello di falda va considerato il peso di volume efficace

$$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w$$

dove  $\gamma_{\text{sat}}$  è il peso di volume saturo del terreno (dipendente dall'indice dei pori) e  $\gamma_w$  è il peso specifico dell'acqua. Quindi il diagramma delle pressioni al di sotto della linea di falda ha una pendenza minore. Al diagramma così ottenuto va sommato il diagramma triangolare legato alla pressione esercitata dall'acqua.

Il regime di filtrazione della falda è stato considerato idrodinamico.

Quindi, in questo caso sia la falda di monte che di valle viene considerata statica, la pressione in un punto a quota  $h$  al di sotto della linea freatica sarà dunque pari a:

$$\gamma_w h$$

Nell'ipotesi di regime idrodinamico la falda viene considerata idrodinamica, la pressione in un punto a profondità  $h_m$  dalla linea freatica se calcolata da monte risulterà pari a:

$$\gamma_w h_m (1-i)$$

oppure, se calcolata da valle, la pressione in un punto a profondità  $h_v$  dalla linea freatica da valle risulterà pari a:

$$\gamma_w h_v (1+i).$$

Il valore della pressione al piede della paratia in regime idrodinamico coincide sia se calcolata da monte che da valle.

$i$  rappresenta il gradiente idraulico nell'ipotesi di filtrazione monodimensionale.



#### 5.1.4 Spinta in presenza di sisma

Per tenere conto dell'incremento di spinta dovuta al sisma si fa riferimento al metodo di Mononobe-Okabe (cui fa riferimento la Normativa Italiana).

Il metodo di Mononobe-Okabe considera nell'equilibrio del cuneo spingente la forza di inerzia dovuta al sisma. Indicando con  $W$  il peso del cuneo e con  $C$  il coefficiente di intensità sismica la forza di inerzia valutata come

$$F_i = W \cdot C$$

Indicando con  $S$  la spinta calcolata in condizioni statiche e con  $S_s$  la spinta totale in condizioni sismiche l'incremento di spinta è ottenuto come

$$DS = S - S_s$$

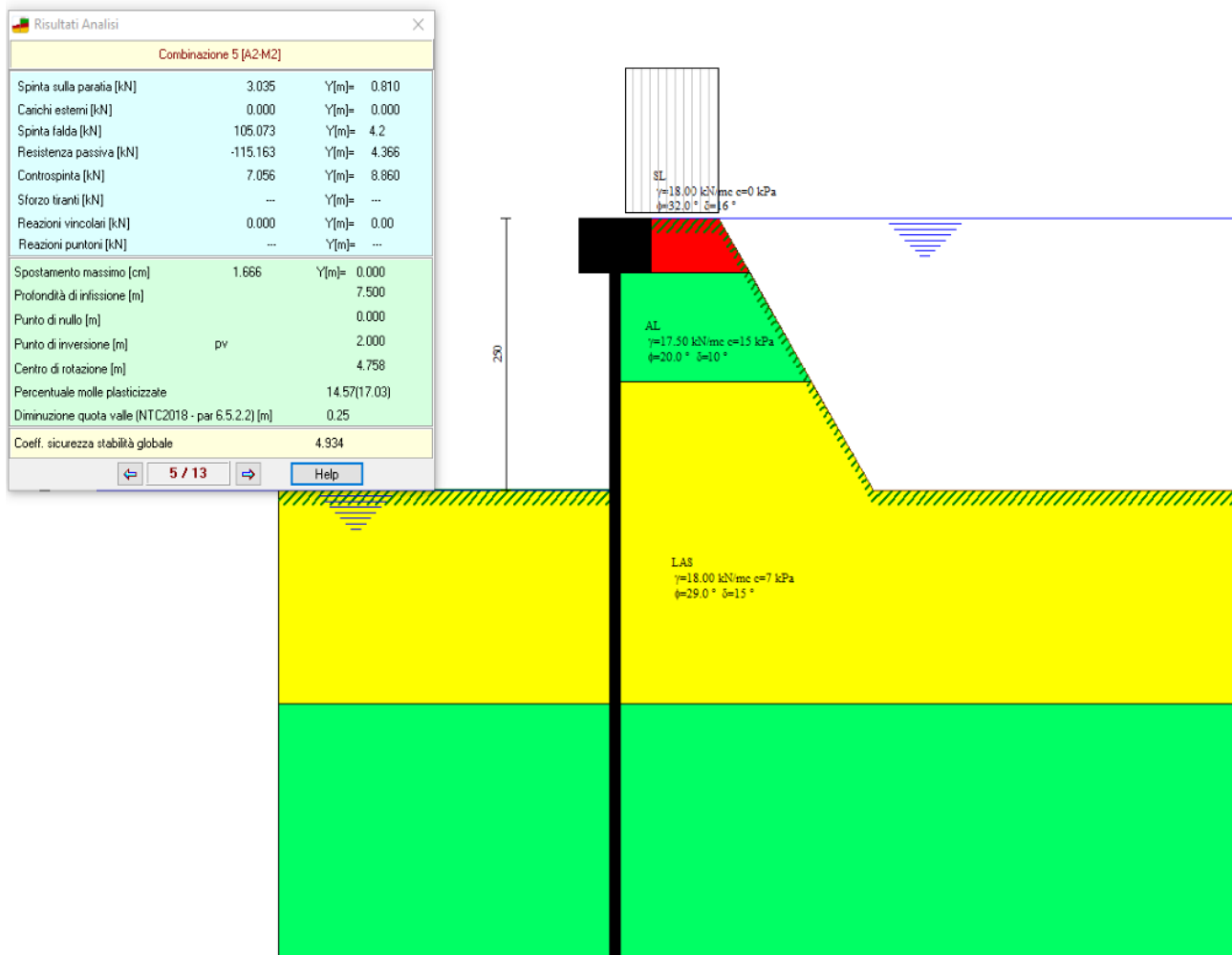
L'incremento di spinta viene applicato a 1/3 dell'altezza della parete stessa (diagramma triangolare con vertice in alto).

#### 5.1.5 Verifica alla stabilità globale

Per la verifica alla stabilità globale si fa riferimento a quanto espresso al paragrafo 4.1.

### 5.2 Risultati delle verifiche

Si riportano in Figura 5-1, Figura 5-2, Figura 5-3, Figura 5-4, Figura 5-5 e Figura 5-6 i risultati delle verifiche rispettivamente per la sezione del Tratto T19 a valle della SS67, T19 a monte della SS67, T17 a monte della SS67, T16 e T15, mentre in Tabella 5-1 una tabella riepilogativa del profilo scelto e delle profondità di infissione, con i relativi spostamenti in testa. È stata omessa la verifica del tratto T17 a valle della SS67, in quanto in quel tratto la funzione delle palancole è legata alla verifica a filtrazione.



*Figura 5-1 – T19 a valle della SS67, verifica Palancola*





# FSC

Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione



Intervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

Risultati Analisi		
Combinazione 4 [A2-M2]		
Spinta sulla paratia [kN]	8.025	Y[m]= 1.254
Carichi esterni [kN]	0.000	Y[m]= 0.000
Spinta falda [kN]	121.143	Y[m]= 4.3
Resistenza passiva [kN]	-157.791	Y[m]= 5.039
Controspinta [kN]	28.625	Y[m]= 9.087
Sforzo tiranti [kN]	---	Y[m]= ---
Reazioni vincolari [kN]	0.000	Y[m]= 0.00
Reazioni puntoni [kN]	---	Y[m]= ---
Spostamento massimo [cm]	2.861	Y[m]= 0.000
Profondità di infissione [m]		7.000
Punto di nullo [m]		0.000
Punto di inversione [m]	pv	2.550
Centro di rotazione [m]		4.527
Percentuale molle plasticizzate		32.62(20.51)
Diminuzione quota valle (NTC2018 - par 6.5.2.2) [m]		0.30
Coef. sicurezza stabilità globale		2.540

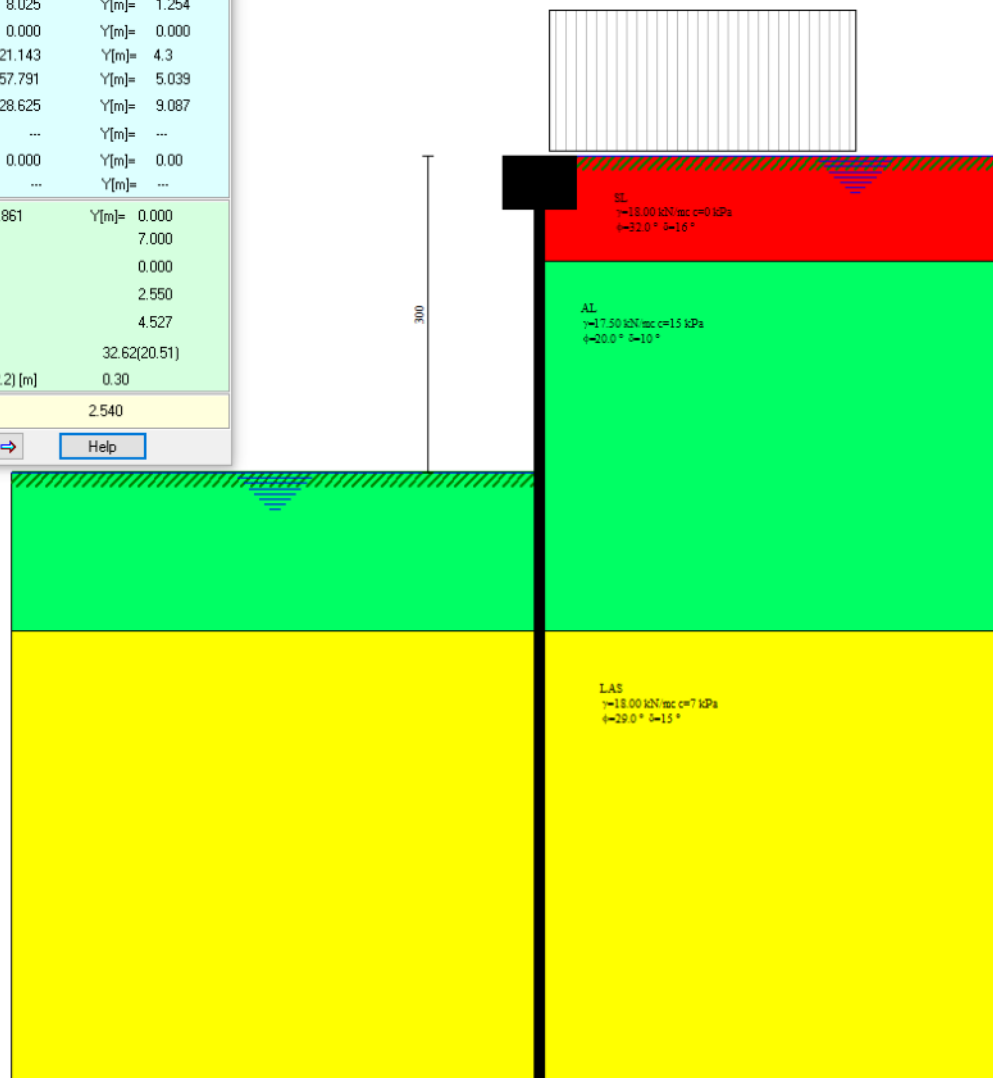


Figura 5-2 – T19 a monte della SS67, verifica Palancola



# FSC

Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione



Intervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

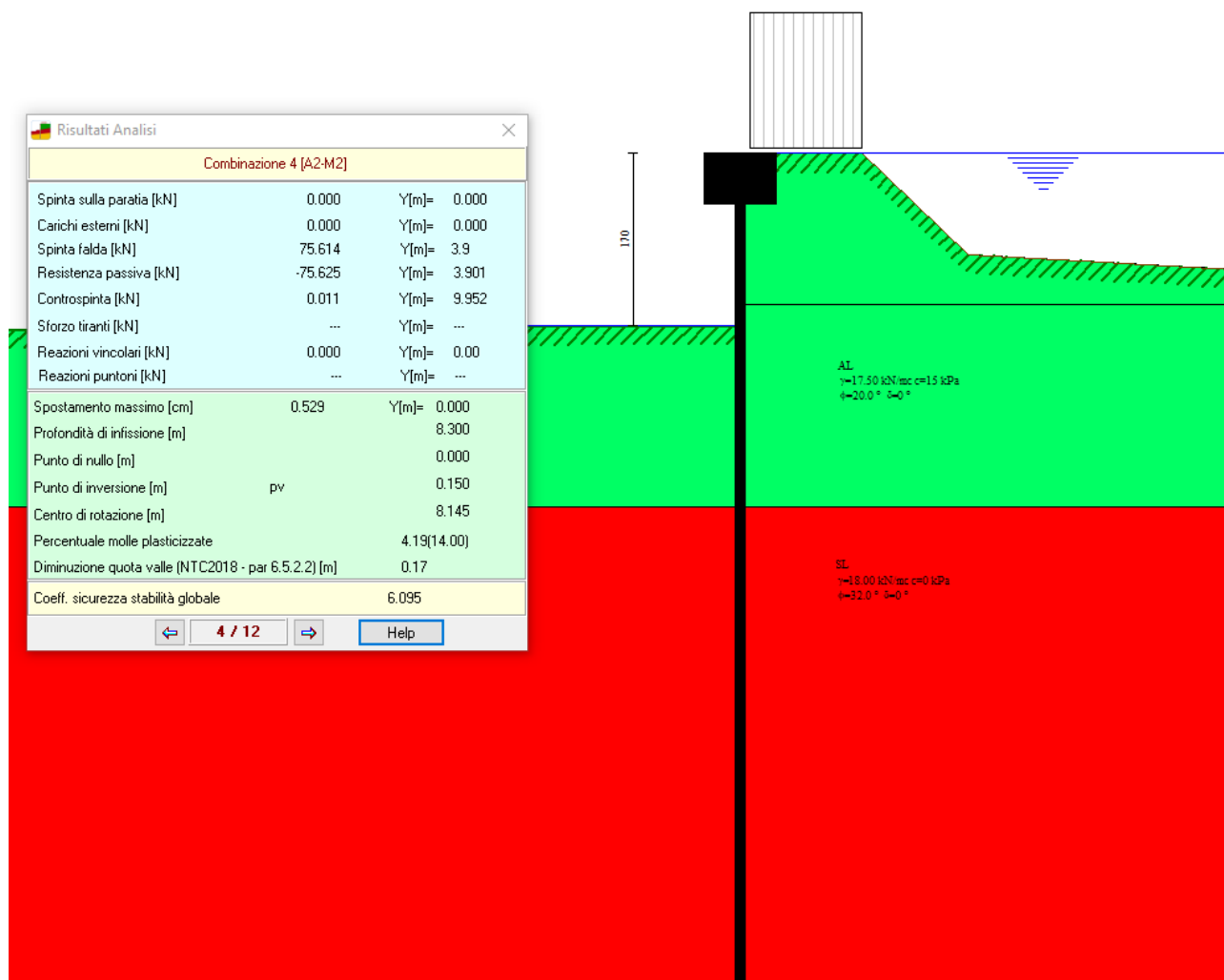


Figura 5-3 – T18, verifica Palancola



# FSC

Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione



Intervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

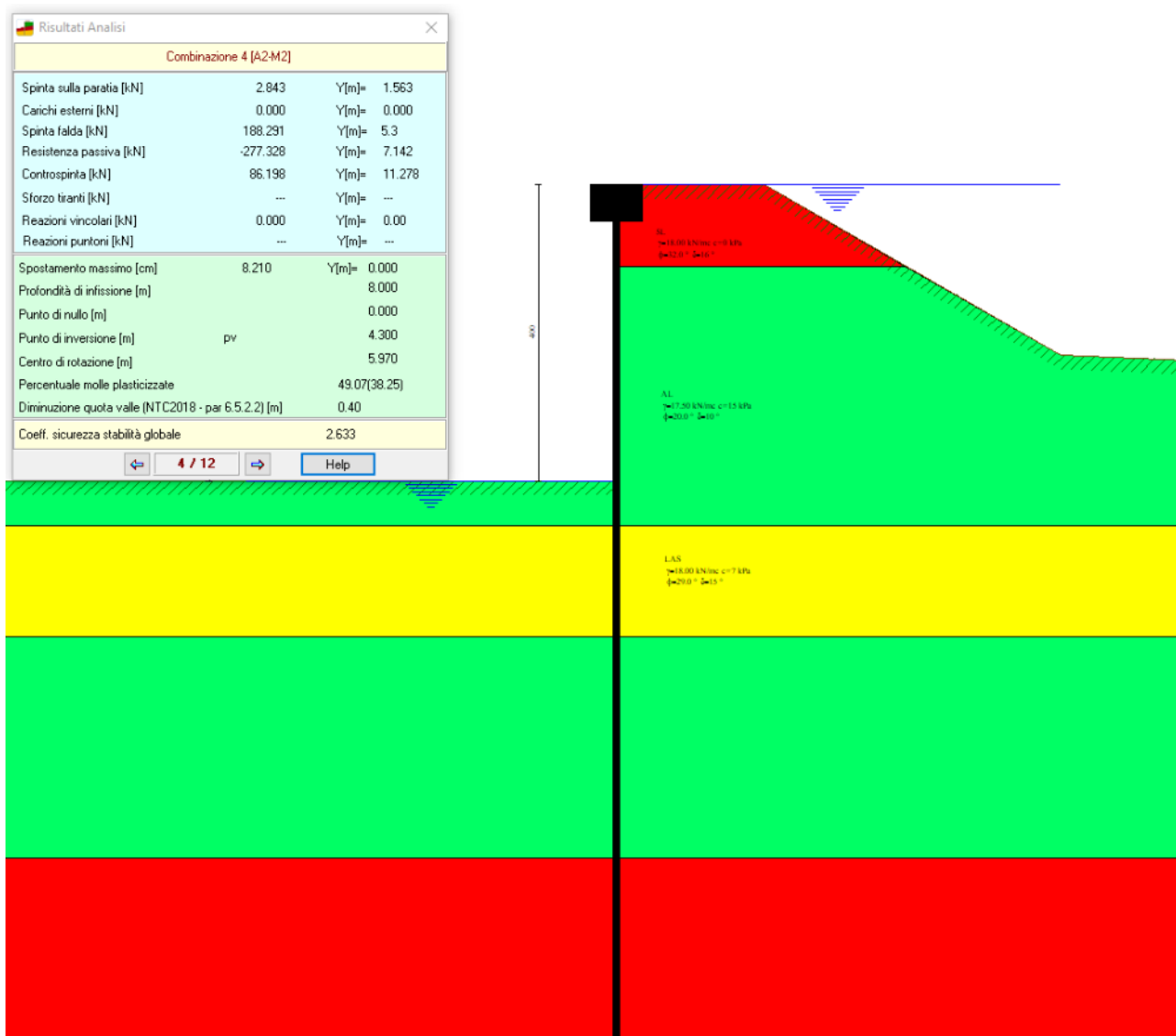


Figura 5-4 – T17 a monte della SS67, verifica Palancola



# FSC

Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione



Intervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

Risultati Analisi		
Combinazione 3 [A2-M2]		
Spinta sulla paratia [kN]	13.282	Y[m]= 2.189
Carichi esterni [kN]	0.000	Y[m]= 0.000
Spinta falda [kN]	105.073	Y[m]= 4.2
Resistenza passiva [kN]	-145.393	Y[m]= 4.856
Controspinta [kN]	27.040	Y[m]= 8.846
Sforzo tiranti [kN]	---	Y[m]= ---
Reazioni vincolari [kN]	0.000	Y[m]= 0.00
Reazioni puntoni [kN]	---	Y[m]= ---
Spostamento massimo [cm]	3.124	Y[m]= 0.000
Profondità di infissione [m]		7.500
Punto di nullo [m]		0.551
Punto di inversione [m]	pv	2.550
Centro di rotazione [m]		4.735
Percentuale molle plasticizzate		31.13(20.87)
Diminuzione quota valle (NTC2018 - par 6.5.2.2) [m]		0.25
Coef. sicurezza stabilità globale		4.134
3 / 12 Help		

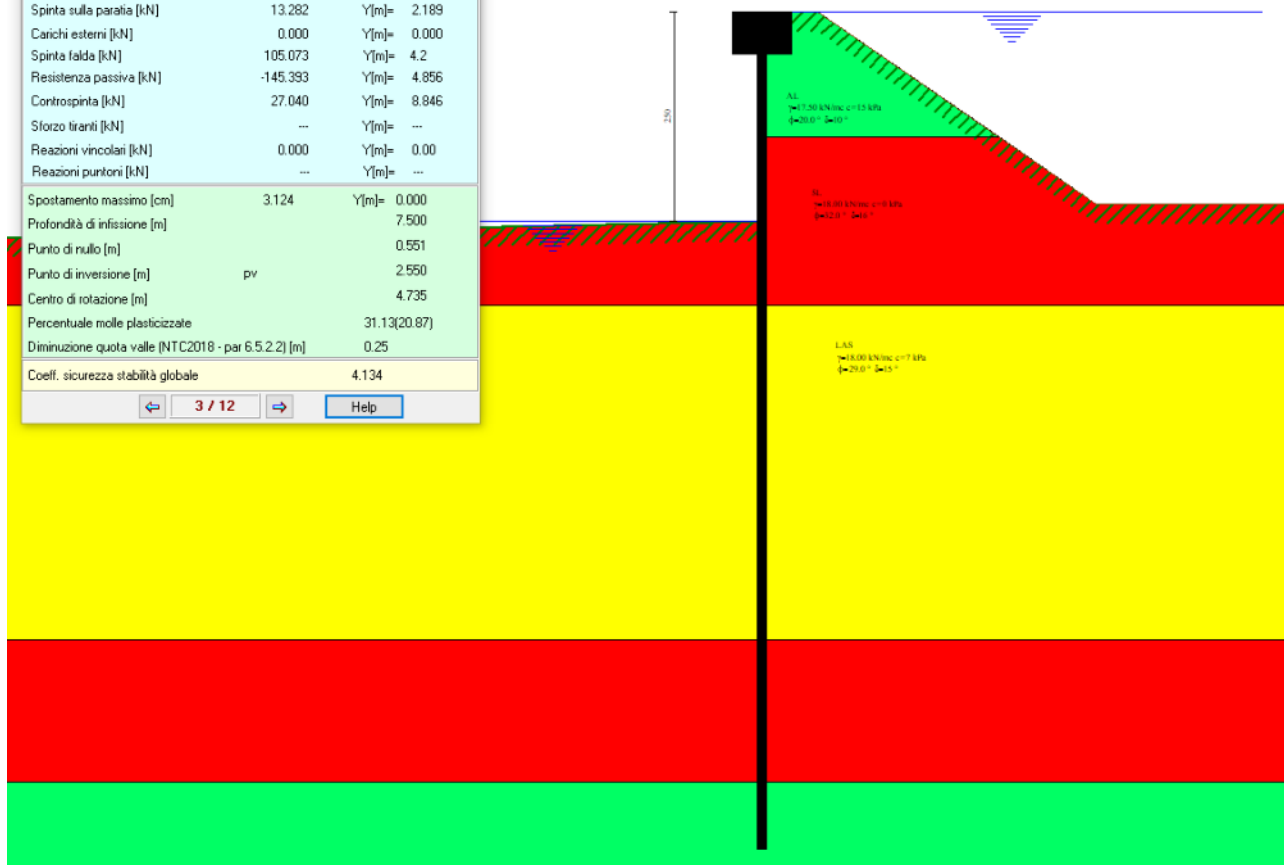


Figura 5-5 – T16, verifica Palancola



# FSC

Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione



Intervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

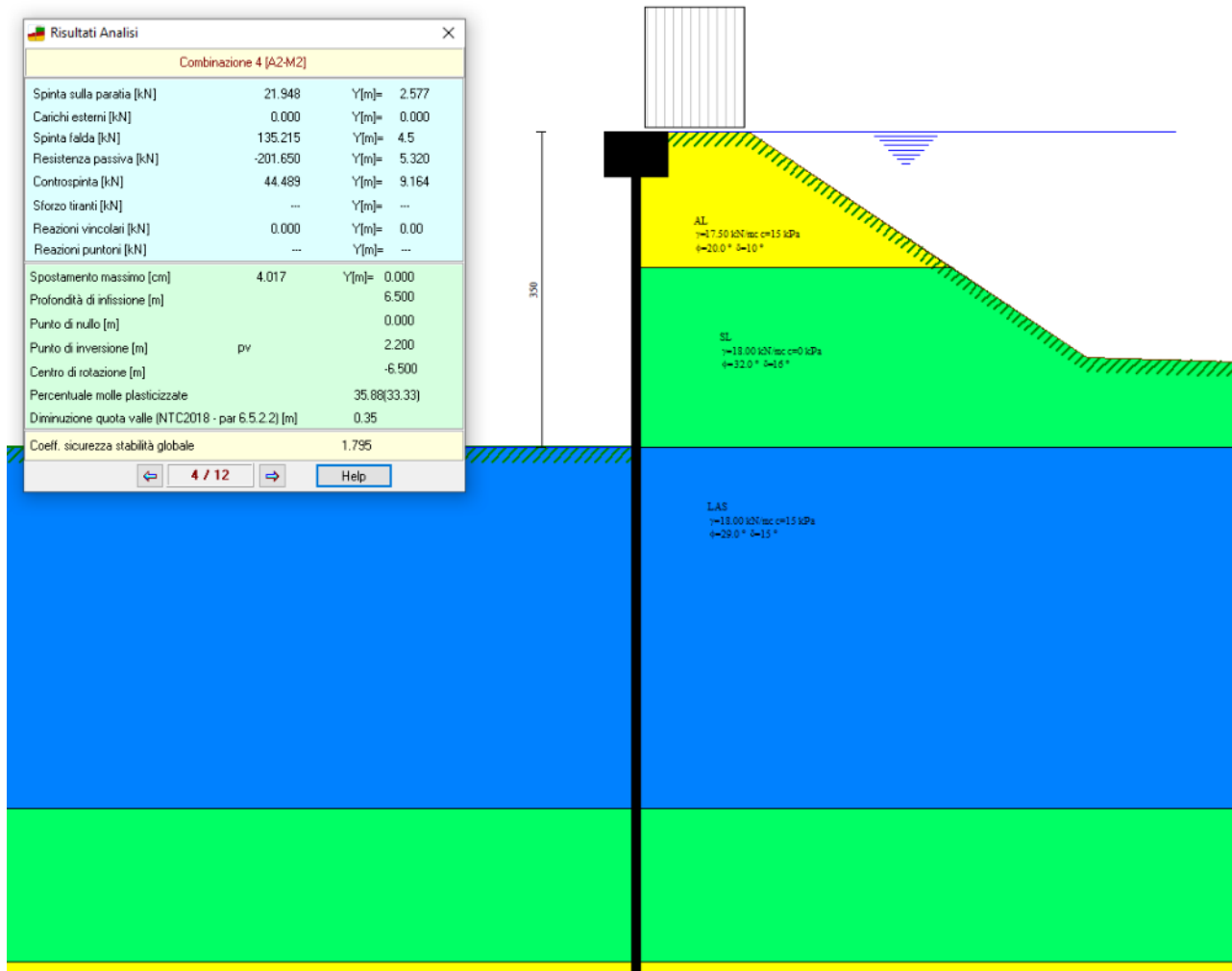


Figura 5-6 – T15, verifica Palancola

	Tratto T19	Tratto T19	Tratto T18	Tratto T17	Tratto T16	Tratto T15
	Valle SS	Monte SS		Monte SS		
Profilo Palancola	PU-18*	PU-22*	PU-18*	PU-28*	PU-18*	PU-22*
Altezza totale palancola [m]	10	10	10	12	10	10
Altezza scavo [m]	2.5	3	1.7	4	2.5	3.5
Infissione [m]	7.5	7	8.3	8	7.5	6.5
Spostamento [cm]	1.66	2.86	0.53	8.21	3.12	4.02
* o di equivalenti caratteristiche tecniche						

Tabella 5-1 – Tabella riepilogativa – Verifica Palancola





Dalla tabella riepilogativa si deduce che in tutti i tratti analizzati l'altezza di 10 m è sufficiente a contenere gli spostamenti entro valori accettabili, ad eccezione del Tratto 17 a monte della SS in cui per ridurre gli spostamenti e garantire la stabilità dell'opera è necessario arrivare a 12 m di altezza totale di palancola. Tuttavia, visti gli spostamenti che si verificano si prescrive di evitare di transitare ad una distanza minore di 4 m dalla palancola e di utilizzare l'ampio spazio golenale per le operazioni di manutenzione straordinaria e ordinaria.



## 6 Verifiche al sifonamento

Caratteristica fondamentale degli argini è quello di garantire lo sbarramento del corso d'acqua ed impedire quindi la filtrazione attraverso il corpo stesso e verso l'area abitata lato campagna.

In particolare, un fenomeno da considerare è il sifonamento dell'argine.

Le verifiche per scongiurare potenziali fenomeni di sifonamento sono state condotte con il criterio di Bligh-Lane.

Il criterio si basa sull'assunzione che la velocità dell'acqua nel mezzo poroso debba essere, in ogni punto, tale da non rimuovere la fase più fine del materiale che costituisce il mezzo stesso.

Esso si fonda sul fatto che la resistenza al moto è molto minore lungo il contatto tra la base (orizzontale o quasi) del manufatto e il terreno che lungo gli altri contatti tra le strutture (ad esempio verticali) di tenuta (diaframmi, palancole, taglioni, ecc.) e il terreno.

Si può così individuare, tra i vari percorsi dell'acqua, quello critico, prudenzialmente rappresentato dal contorno dell'opera inserita nel mezzo poroso, il cui sviluppo, adeguatamente pesato nei suoi tratti (1/3 se il contatto è orizzontale, 1 se è verticale) deve essere un multiplo del dislivello H tra monte e valle ed il cui valore deve essere non inferiore a quello definito dalla natura dei terreni interessati.

$$C = \frac{L_v + \frac{L_o}{3}}{\Delta h} > C^*$$

dove:

$L_v$  = lunghezza dei percorsi verticali in aderenza alla struttura;

$L_o$  = lunghezza dei percorsi orizzontali in aderenza alla struttura;

$\Delta h$  = differenza di carico tra monte e valle;

C = coefficiente dipendente dal tipo di materiale.

Terreno	C*
Sabbia molto fine o limo	8,5
Sabbia fine	7,0
Sabbia media	6,0
Sabbia grossa	5,0
Ghiaia fine	4,0
Ghiaia media	3,5
Ghiaia grossa con ciottoli	3,0
Massi con ciottoli e ghiaia	2,5
Argilla molle	3,0
Argilla media	2,0
Argilla compatta	1,8
Argilla molto compatta	1,6

Si osserva che il metodo di Bligh-Lane si riferisce a un moto stazionario e, pertanto, la sua applicazione fornisce risultati cautelativi.

**FSC**Fondo per lo Sviluppo  
e la CoesioneIntervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

Considerando la natura del terreno nel caso in esame si può assumere  $C^*=3$ . Infatti, vista l'alternanza di strati di argille mediamente addensate e di sabbie mediamente addensate è stato scelto un valore pari alla media di quello assunto da queste due tipologie di terreno.

Si riporta in Tabella 6-1 la verifica dello stato attuale mentre in Tabella 6-2 la verifica per lo stato di progetto.

Da esse si nota come, mentre nello stato attuale si riscontra pericolo di sifonamento, nello stato di progetto questa evenienza viene scongiurata grazie all'infissione delle palancole e quindi all'allungamento del percorso di filtrazione.

Stato Attuale	Bligh-Lane						
	T19 valle SS	T17 valle SS	T19 monte SS	T17 monte SS	T18	T16	T15
Lo [m]	5.68	22.211	5.16	14.51	4.03	5.6	8.27
Lv [m]	2.2	3.889	2.5	4	1.7	2.41	3.51
H [m]	2.2	3.889	2.5	4	1.7	2.41	3.51
C	1.861	2.904	1.688	2.209	1.790	1.775	1.785
$C^*$	3	3	3	3	3	3	3

Tabella 6-1 – Risultati Bligh-Lane stato attuale

Stato Progetto	Bligh-Lane						
	T19 valle SS	T17 valle SS	T19 monte SS	T17 monte SS	T18	T16	T15
Lo [m]	5.68	22.211	5.16	14.51	4.03	5.6	8.27
Lv [m]	17.8	17.711	17.5	22	18.3	17.59	17.49
H [m]	2.2	3.889	2.5	4	1.7	2.41	3.51
C	8.952	6.458	7.688	6.709	11.555	8.073	5.768
$C^*$	3	3	3	3	3	3	3

Tabella 6-2 – Risultati Bligh-Lane stato di progetto

**FSC**Fondo per lo Sviluppo  
e la CoesioneIntervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

## 7 Verifiche di filtrazione

Sono state eseguite infine verifiche di filtrazione, sia allo stato attuale che allo stato di progetto al fine di impedire, per eventi di durata particolarmente sostenuta, la filtrazione fino al lato campagna, compromettendo così la stabilità dell'argine.

In particolare, il fenomeno da scongiurare è quello per cui la saturazione del mezzo poroso, vale a dire il terreno, incrementi fino ad interessare il paramento lato campagna.

Per saturazione si intende il rapporto tra il volume di acqua nei pori del terreno e il volume dei vuoti stesso, più di preciso:

$$S_e = \frac{V_w}{V_v}$$

Dove:

- $S_e$  è la saturazione, variabile da 0 (assenza di acqua nei vuoti) a 1 (vuoti completamente saturi di acqua) [-];
- $V_w$  volume di acqua nei vuoti [l];
- $V_v$  volume dei vuoti [l].

Al momento attuale sono state eseguite le verifiche per il Tratto T19 a valle della SS67.

La verifica alla filtrazione è stata effettuata con l'ausilio del software VS2DHI (versione 1.2) sviluppato dall'U.S. Geological Survey, che simula numericamente la filtrazione bidimensionale in un mezzo poroso in condizioni di moto vario (condizioni non stazionarie). Il modello risolve alle differenze finite le equazioni di Richard in un dominio definito dall'utente con assegnate condizioni al contorno. Per la definizione della funzione caratteristica (che lega carico piezometrico, coefficiente di conducibilità e contenuto d'acqua) dei terreni è stata utilizzata la formula di Van Genuchten.

I parametri utilizzati per la caratterizzazione dei terreni costituenti l'argine sono stati ricavati sulla base delle indagini di CPTU effettuate in sede di progetto e dei valori di letteratura.

La verifica alla filtrazione è stata condotta assumendo i seguenti parametri dei terreni costituenti il rilevato e i terreni di fondazione:

$K_z/K_h$  = rapporto tra conducibilità verticale e orizzontale;

$K_h$  = conducibilità idraulica orizzontale [m/s]

Porosità = porosità efficace

RMC, alpha e beta = parametri della formula di Van Genuchten

La formula di Van Genuchten fornisce i valori dei gradi di saturazione e dalla conducibilità idraulica nella parte di mezzo poroso insatura secondo le seguenti espressioni:

**FSC**Fondo per lo Sviluppo  
e la CoesioneIntervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

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

$$Kr = (1 - C \cdot D^{(-gamma)})^2 / D^{(gamma/2)}$$

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

$$D = 1 + |\alpha \cdot h|^{beta}$$

dove

se = saturazione effettiva (VMC-RMC)/(Porosità – RMC)

VMC = grado di umidità nel suolo

RMC = grado di umidità residuo

Kr = conducibilità idraulica relativa

h = tensione capillare

Alpha e Beta = parametri empirici

Gamma = 1- 1/Beta

Si osservi che per il materiale costituente l'argine esistente e di progetto sono stati adottati dei valori cautelativi di conducibilità idraulica.

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

Le condizioni al contorno sono state inserite con il seguente criterio (Figura 7-1):

- al paramento di monte a contatto con l'acqua e al bordo di monte del dominio è stato assegnato un carico totale variabile nel tempo (Linea blu) fino a raggiungere il livello massimo per una durata complessiva 48 ore ;
- al paramento di valle è stata assegnata una condizione di superficie libera (Linea arancione);
- al bordo di valle del dominio è stata assegna una condizione di carico totale fissa pari ai livelli di falda (Linea blu);
- alla base del dominio e alla sommità dell'argine è stata assegnata la condizione di flusso nullo.





FSC

Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione



Intervento di consolidamento delle arginature  
esistenti nel tratto terminale del Fiume Era in  
corrispondenza del centro abitato di Pontedera  
Progetto Definitivo  
Settembre 2023

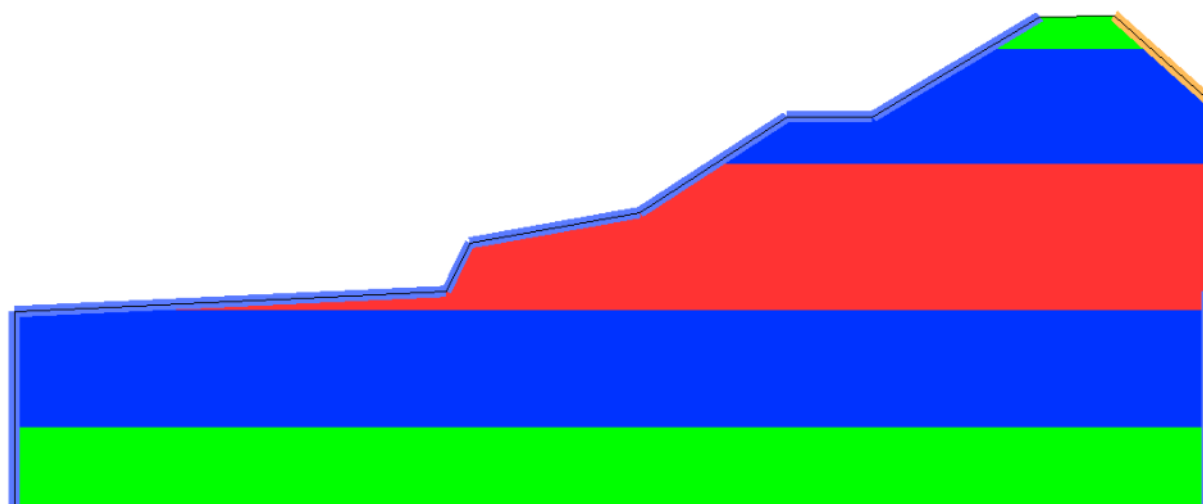


Figura 7-1 – Dominio e condizioni al contorno

Il terreno è stato schematizzato, sulla base delle caratteristiche di permeabilità e similmente a quanto stabilito per gli altri tipi di analisi, in 3 tipi:

- Sabbia e sabbie limose (SL);
- Argilla e argilla limosa (AL);
- Alternanze decimetriche di argille limose e sabbia limose (LAS)

Sono stati quindi definiti 3 strati con le caratteristiche idrogeologiche riportate in Figura 7-2.

Textural Class									
Flow (van Genuchten function)									
Color	Name	Kzz/Khh	Sat Khh	Ss	Porosity	RMC	alpha	beta	
	inactive	1	0	0	0	0	0	0	0
	Sabbie_lim...	0.5	2.5E-5	0	0.4	0.2	1	5	
	Alternanze	0.5	4E-6	0	0.35	0.15	1	5	
	Argille_Lim...	0.5	7E-7	0	0.3	0.1	1	5	

Figura 7-2 – Caratteristiche idrogeologiche dei terreni considerati

Si riporta infine in Tabella 7-1 un confronto tra i diversi scenari di verifica, allo stato attuale e di progetto, per ogni sezione. In Figura 7-3 , invece, si riporta la legenda.

Si nota come la presenza della palancola evita in tutti gli scenari di verifica la filtrazione nel mezzo poroso fino ad interessare il paramento arginale lato campagna. Nei Tratti T18 e T16, nei quali già allo stato attuale non si verifica intersezione tra la linea di saturazione e paramento lato campagna, si evidenzia come, in seguito all'infiissione delle palancole si riduce la parte del rilevato lato Fiume a saturazione massima con conseguenti benefici alla stabilità dell'argine.

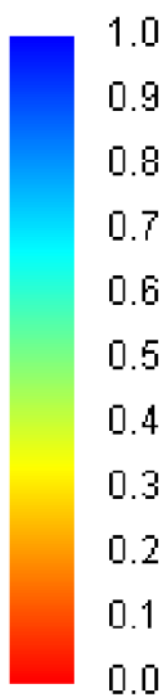
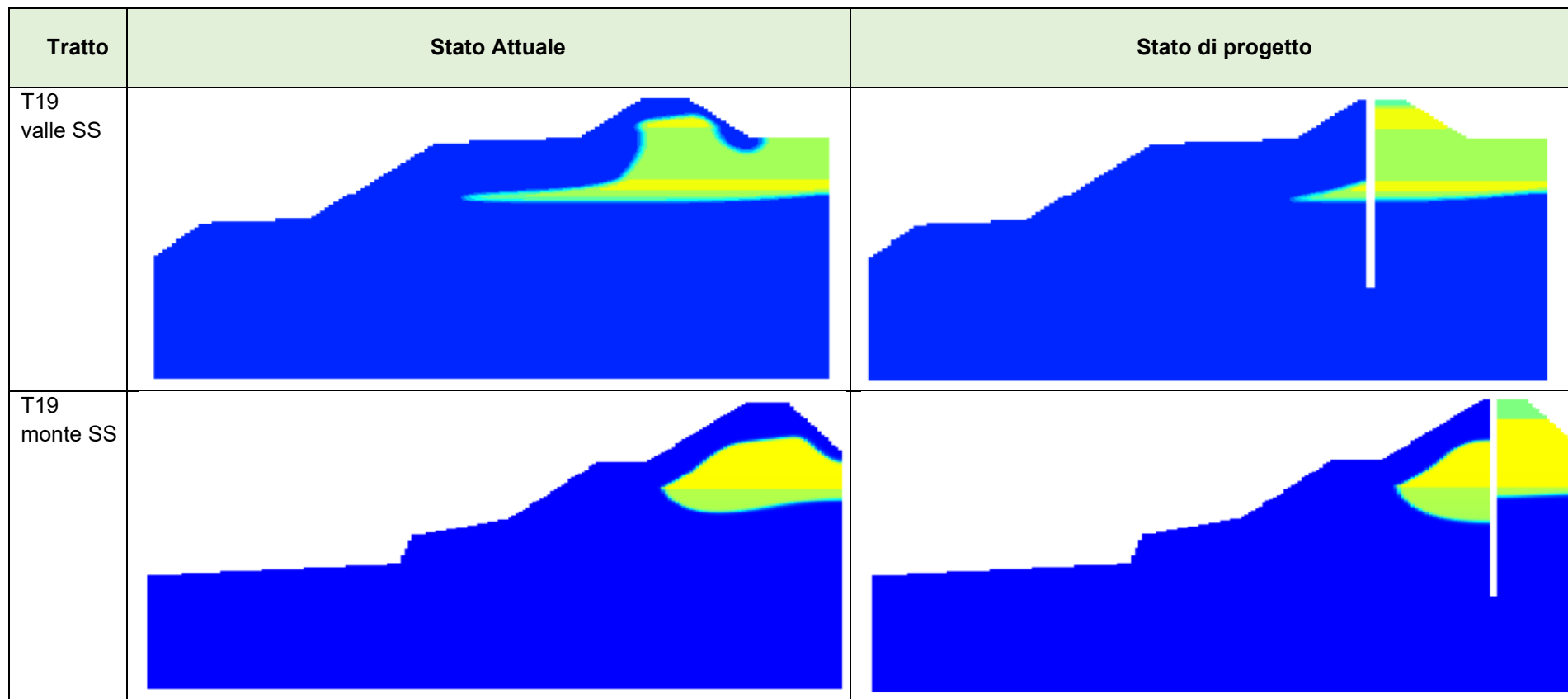
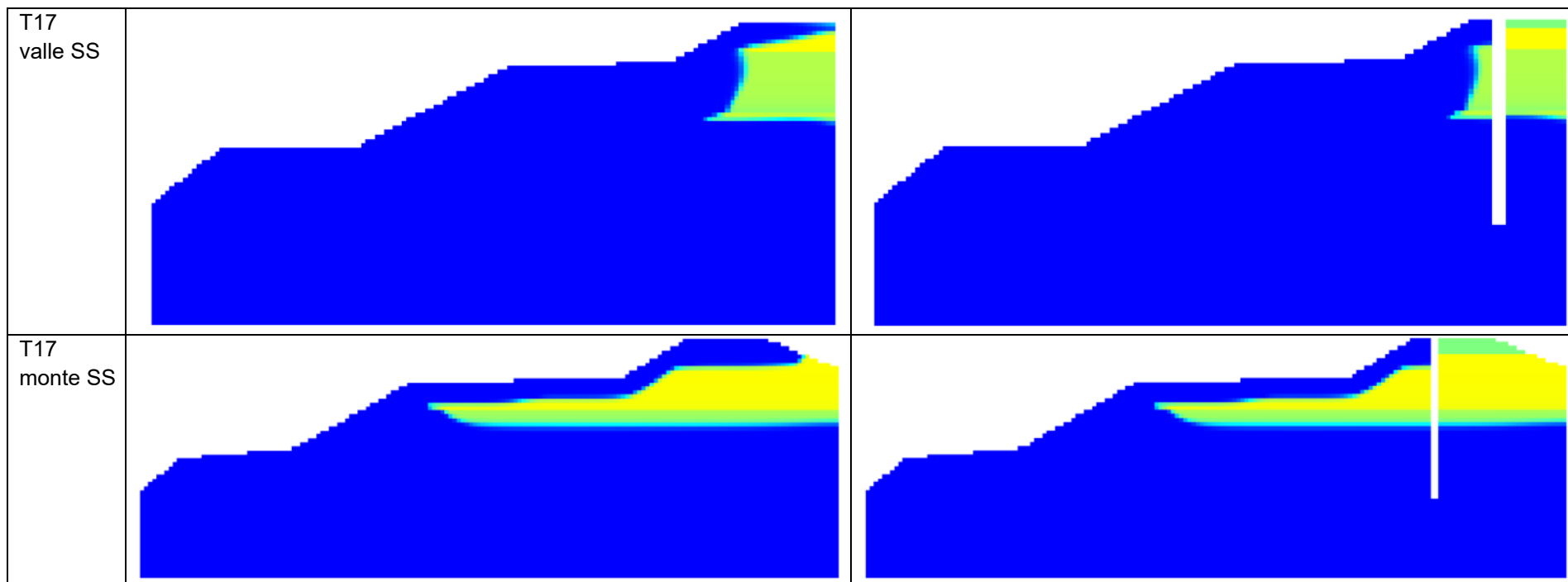
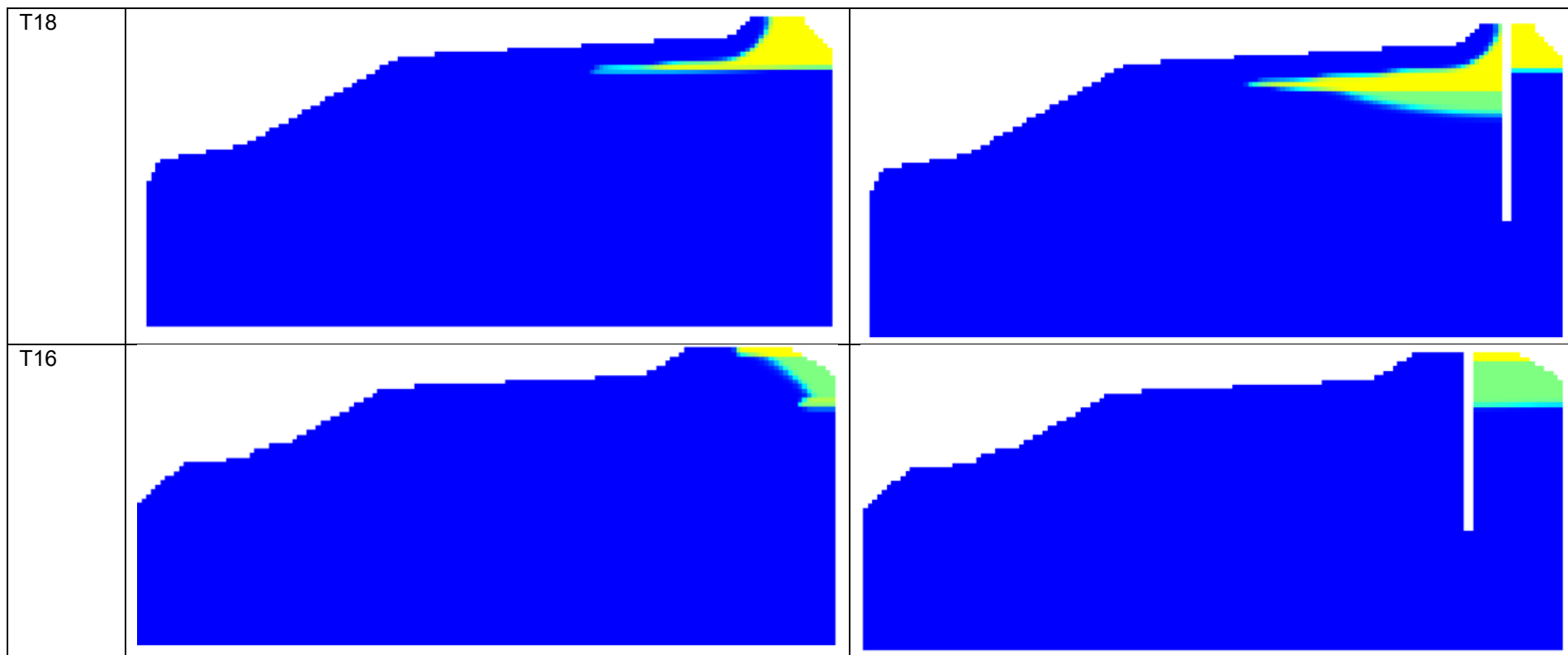


Figura 7-3 – Legenda delle mappe della filtrazione









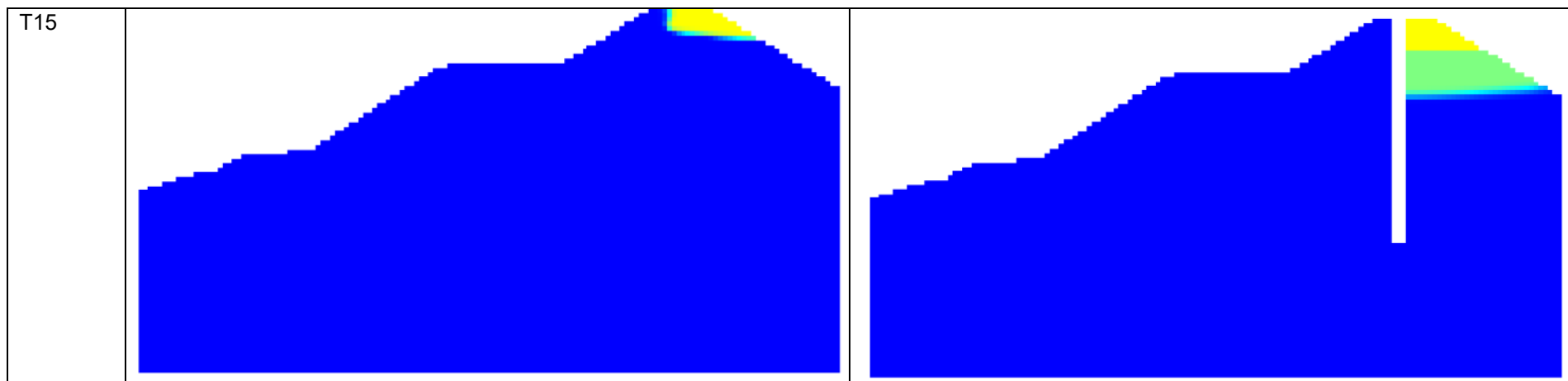


Tabella 7-1 – Tabella riepilogativa dei risultati di filtrazione