

AGENZIA INTERREGIONALE PER IL FIUME PO

 (RE-E-995) - LAVORI DI RIPRISTINO ARGINE GOLENALE  
 FIUME PO IN LOCALITA' GUALTIERI (RE)

CIG Z012E0D3C0 - CUP B74H20001040006


**PROGETTO**

<input type="checkbox"/>	FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA
<input checked="" type="checkbox"/>	DEFINITIVO
<input checked="" type="checkbox"/>	ESECUTIVO

TITOLO ELABORATO

**RELAZIONE IDRAULICA  
E GEOTECNICA**

N° ELABORATO

**PE.B**

SCALA

IL RESPONSABILE DEL PROGETTO

Ing. Riccardo Telò


**Studio Telo**  
**May Fly**

 Ingegneria Idraulica e Ambientale  
 Largo 24 agosto 1942, n°33/A - 43126 - Parma  
 Tel. & Fax 0521-292795  
 studiotelo@studiotelo.it www.studiotelo.it

IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

Ing. Mirella Vergnani

AGGIORNAMENTI:

REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	CONTROLL.	APPROV.
0	Luglio 2020		Ing. Quintavalla	Ing. Quintavalla	Ing. Telò

## INDICE

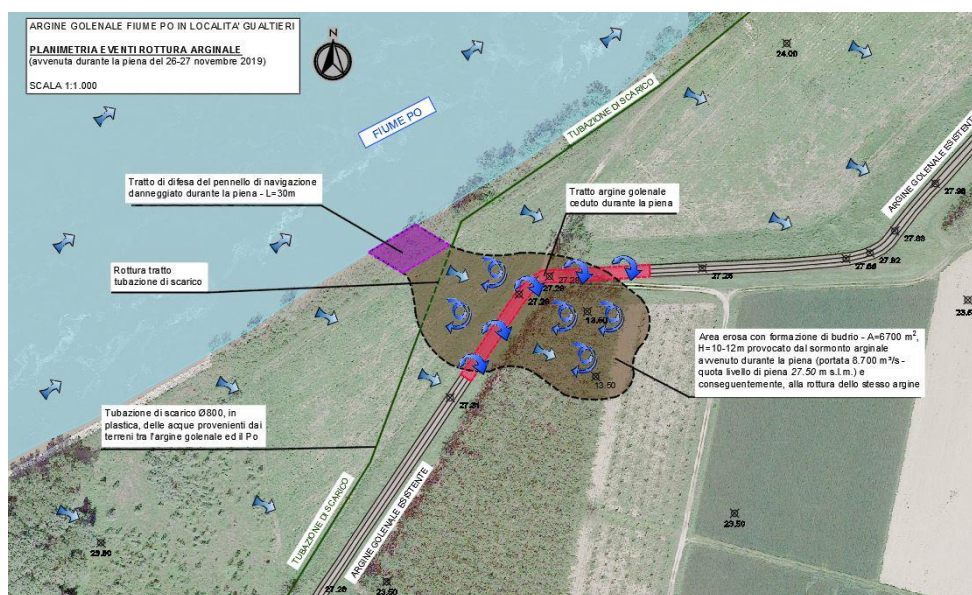
<b>1. PREMESSA.....</b>	<b>2</b>
<b>2. ARTICOLAZIONE DELLO STUDIO .....</b>	<b>3</b>
2.1. FASE 1: DEFINIZIONE DI UN QUADRO CONOSCITIVO DI RIFERIMENTO MORFOLOGICO, IDROLOGICO, IDRAULICO E GEOLOGICO .....	3
2.2. FASE 2: VERIFICA DI INFILTRAZIONE E SIFONAMENTO E DI STABILITÀ GLOBALE DEI PARAMENTI ARGINALI .....	3
<b>3. RIFERIMENTI NORMATIVI E TECNICI.....</b>	<b>4</b>
3.1. NORMATIVA NAZIONALE .....	4
3.2. NORMATIVA REGIONALE/INTERREGIONALE .....	4
<b>4. INDAGINE TOPOGRAFICA.....</b>	<b>5</b>
<b>5. DATI GEOLOGICI .....</b>	<b>6</b>
<b>6. ANALISI IDROLOGICA-IDRAULICA .....</b>	<b>9</b>
6.1. IDROGRAMMI DI PIENA E ANALISI DELL'EVENTO DEL 26-27 NOVEMBRE 2019 .....	9
<b>7. LE OPERE IN PROGETTO.....</b>	<b>12</b>
<b>8. VERIFICHE DI INFILTRAZIONE E STABILITÀ DEL RILEVATO ARGINALE.....</b>	<b>13</b>
8.1. VERIFICHE DI INFILTRAZIONE .....	14
8.1.1. Stratigrafia dei terreni e condizioni al contorno .....	15
8.1.1.1 <i>Analisi della sezione 11 nella configurazione senza banca arginale lato campagna</i> .....	16
8.1.1.2 <i>Analisi della sezione 11 nella configurazione con banca arginale lato campagna</i> .....	18
8.2. VERIFICHE DI STABILITÀ DEL RILEVATO ARGINALE.....	20
8.2.1. Verifica di stabilità nella configurazione senza banca arginale .....	24
8.2.2. Verifica di stabilità nella configurazione con banca arginale.....	24
<b>9. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE SUI RISULTATI DELLE SIMULAZIONI.....</b>	<b>26</b>

## 1. PREMESSA

La presente Relazione idraulica e geotecnica è parte integrante del Progetto esecutivo relativo all'intervento di 'Ripristino argine golendale Fiume Po in località Gualtieri (RE)', commissionato da AIPO allo Studio scrivente. Scopo della presente relazione è determinare le dinamiche di infiltrazione e di cedimento della struttura arginale e quindi se serve la necessità di proteggere il corpo del nuovo argine con diaframature in alternativa ad altre soluzioni.

Per meglio approfondire la tematica in esame, è importante ricostruire la dinamica del collasso dell'argine avvenuto durante l'evento di piena del Fiume Po del 26-27 novembre 2019. Come meglio riportato nel capitolo 6, il collasso dell'argine è avvenuto per sormonto. Le condizioni di criticità che si è innescata ha poi provocato la formazione del budrio e quindi l'innescò del processo erosivo che si è propagato verso la sponda di navigazione del Po che è poi crollata anch'essa per un fronte di circa 30m.

Attualmente (luglio 2020) sono in corso di esecuzione a cura del Consorzio golendale Malaspina (gestore dell'argine) i lavori di riempimento del budrio per il ripristino del piano campagna ante piena.



**FIGURA 1-1 DESCRIZIONE DEGLI EVENTI AVVENUTI DURANTE LA PIENA DEL 26-27 NOVEMBRE CHE HANNO DETERMINATO IL COLLASSO DI UN TRATTO DI ARGINE GOLENALE DEL F.PO IN COMUNE DI GUALTIERI (RE).**

## **2. ARTICOLAZIONE DELLO STUDIO**

---

Il progetto si è articolato nelle seguenti fasi:

### **2.1. FASE 1: DEFINIZIONE DI UN QUADRO CONOSCITIVO DI RIFERIMENTO MORFOLOGICO, IDROLOGICO, IDRAULICO E GEOLOGICO**

---

Lo scopo di questa fase è stato quello di definire una serie di parametri idraulici, morfologici e geologici al contorno necessari per l'interpretazione dei meccanismi di collasso che hanno interessato l'argine nel recente passato e per definire le migliori soluzioni progettuali per la sua sistemazione.

Dal punto di vista morfologico è stato possibile utilizzare immagini aeree ottenute grazie ad un volo eseguito con drone da parte di AIPO nel giugno 2020, un rilievo topografico dell'argine esistente prima del crollo e un rilievo della situazione attuale.

I dati geologici sono stati invece mutuati da una serie di indagini eseguite da AIPO per la caratterizzazione di un tratto di arginatura maestra del Fiume Po posta a monte rispetto alla zona oggetto di studio.

I dati idraulici relativi alla piena del 26-27 novembre 2019 in termini di idrogrammi di piena sono invece stati ricavati dalle misurazioni di AIPO in corrispondenza dell'idrometro di Boretto.

### **2.2. FASE 2: VERIFICA DI INFILTRAZIONE E SIFONAMENTO E DI STABILITÀ GLOBALE DEI PARAMENTI ARGINALI**

---

Ai fini della verifica della stabilità del rilevato arginale in progetto, anche in occasione delle sollecitazioni più critiche, è stato implementato uno studio di filtrazione mediante modellistica numerica agli elementi finiti e una conseguente verifica geotecnica che ha riguardato in particolare la stabilità dei paramenti. Tali analisi consentono di: verificare il grado di sicurezza dell'opera rispetto a potenziali fenomeni di sifonamento al piede della stessa e rispetto alla stabilità dei paramenti arginali, di definire i carichi idraulici, le velocità di flusso attraverso l'argine e l'andamento della linea di filtrazione durante la propagazione della piena di progetto.



### **3. RIFERIMENTI NORMATIVI E TECNICI**

---

Le analisi di seguito riportate sono state condotte rispettando gli indirizzi e le prescrizioni riportate nella normativa di riferimento nazionale e regionale.

#### **3.1. NORMATIVA NAZIONALE**

---

- 1- Testo Unico sulle Opere Pubbliche di cui al Regio Decreto 25/7/1904 n.523,
- 2- D.Lgs. 18 aprile 2016 n.50 "Attuazione delle direttive 2014/23/UE, 2014/24/UE e 2014/25/UE sull'aggiudicazione dei contratti di concessione, sugli appalti pubblici e sulle procedure d'appalto degli enti erogatori nei settori dell'acqua, dell'energia, dei trasporti e dei servizi postali, nonché per il riordino della disciplina vigente in materia di contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture",
- 3- L. 183/89 "Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo,
- 4- D.Lgs. 3 aprile 2006 n.152 "Norme in materia ambientale" e successive modifiche ed integrazioni.
- 5- DM 17 gennaio 2018 – Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC2018)

#### **3.2. NORMATIVA REGIONALE/INTERREGIONALE**

---

- 1- Norme Tecniche di Attuazione del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (NTA del PAI AdBPo),
- 2- PGRA: Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni recepito in Italia col D.lgs. 49/2010,
- 3- Piano di Gestione del distretto idrografico del Fiume Po - Strumento operativo previsto dalla Direttiva 2000/60/CE, recepita a livello nazionale dal D.lgs 152/06 e ss.mm.iii, per attuare una politica coerente e sostenibile della tutela delle acque comunitarie, attraverso un approccio integrato dei diversi aspetti gestionali ed ecologici alla scala di distretto idrografico,

## 4. INDAGINE TOPOGRAFICA

I dati morfologico-topografici utilizzati per lo studio in oggetto sono i seguenti:

- Ripresa aerea effettuata con drone nel giugno 2020 (Figura 4-1),
- Rilievo topografico delle quote di sommità dell'argine golenale (Stato ante piena del 26-27 novembre 2019) fornito da AIPO,
- Piano quotato e sezioni rilevate nel Luglio 2020 dal geom. Lauro Medici quale DL delle opere di chiusura del Budrio
- Sezioni fluviali del Fiume Po, rilevate nel 2005 da AIPO.

A)



B)



**FIGURA 4-1 A) RIPRESA DEL BUDRIO E DELLA DIFESA DEL PENNELLO DI NAVIGAZIONE EROSA DURANTE LA PIENA; B) RIPRESA DELL'ARGINE GOLENALE COLLASSATO DURANTE LA PIENA (TRATTO OVEST)**

## 5. DATI GEOLOGICI

I dati relativi alla stratigrafia del terreno di fondazione dell'argine e ai parametri geotecnici caratteristici di ogni strato sono stati desunti da una serie di indagini geognostiche eseguite da AIPO nel 2017 per la caratterizzazione dell'arginatura maestra di Po nel Comune di Boretto.

In particolare per la definizione del modello geotecnico del terreno inserito nelle simulazioni sono stati utilizzati i dati dei sondaggi stratigrafici eseguiti nella parte di argine maestro più prossima all'area oggetto di studio (sondaggi S2-S3-S4-SI3).

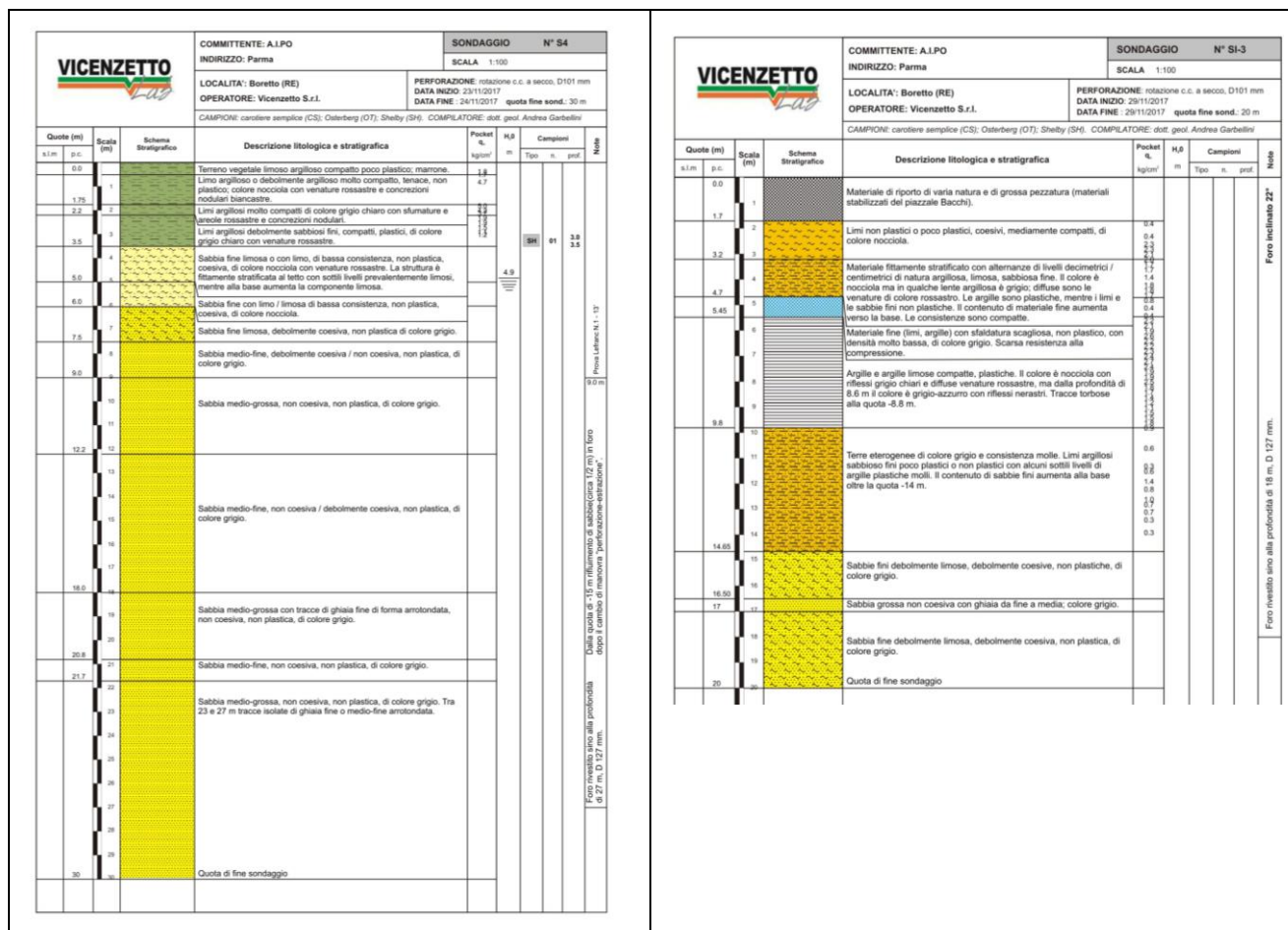
Si riportano di seguito le singole schede stratigrafiche.

VICENZETTO			COMMITTENTE: A.I.P.O. INDIRIZZO: Parma	SONDAGGIO N° S2			
			LOCALITA': Boretto (RE) OPERATORE: Vicenzetto S.r.l.	PERFORAZIONE: rotazione c.c. a secco, Ø101 mm DATA INIZIO: 27/11/2017 DATA FINE: 28/11/2017 CAMPIONI: carattere semplice (CS); Osterberg (OT); Shelby (SH); COMPILATORE: dott. geol. Andrea Garbelli			
			SCALA: 1:100	quota fine sond.: 30 m			
Quote (m) s.l.m.	Scala (m)	Schema stratigrafico	Descrizione litologica e stratigrafica	Pocket % kg/m³	H.S. m	Campioni Tipo n. prof.	Note
0.0	1		Limi argillosi compatti, plastici, di colore marrone.	1.4			
1.2	1		Limi tenaci, non plastici, molto compatti, di colore nocciola.				
2.05	1		Argille e argille limose molto compatte, non plastiche fino a -3.5 m poi plastiche, colore grigio con areole rossastre.				
5.0	4		Argille plastiche mediamente compatte / molli di colore grigio.	5.25		SH 01 3.0 SH 02 4.5	
6.1	5		Argille sabbiose molli, plastiche, di colore grigio.				
6.5	5		Sabbia fine con limo sciolto, non plastica, coesiva, di colore grigio.				
7.0	5		Argilla plastica molto di colore grigio.				
7.8	5		Sabbia medio-fine debolmente limosa, poco coesiva, non plastica, di colore grigio.				
9.45	9		Argilla plastica molle, di colore grigio.				
12.0	10		Sabbia fine limosa coesiva al tetto poi medio-fine non coesiva, non plastica a tratti debolmente limosa, colore grigio.				
13.5	15		Sabbia media, non coesiva, non plastica, di colore grigio.				
14.9	14		Sabbia fine debolmente limosa, poco coesiva, non plastica, di colore grigio.				
16.3	16		Sabbia medio-grossa, non coesiva con tracce di ghiaia fine; colore grigio.				
18.1	17		Sabbia medio-fine a tratti debolmente limosa, poco coesiva, non plastica, di colore grigio.				
20.1	20		Sabbia medio-grossa debolmente limosa con tracce di ghiaia fine e isolata ghiaia media; colore grigio.				
21.0	21		Sabbia fine debolmente limosa, poco coesiva, non plastica, di colore grigio.				
22.7	22		Sabbia medio-fine non coesiva di colore grigio.				
23.9	24		Sabbia medio-fine limosa, coesiva, con tracce di ghiaia medio-fine. Alla base aumenta la componente limosa. Colore grigio.				
25.9	26		Sabbia medio-fine, non coesiva, non plastica, con tracce di ghiaia medio-fine arrotondata. Colore grigio.				
30	30		Quota di fine sondaggio				

Foto scattata verso alla profondità di 23 m. riflettendo di sabbia (zona 1.5 m) e fori dopo il cambio di materiale di perforazione.

VICENZETTO			COMMITTENTE: A.I.P.O. INDIRIZZO: Parma	SONDAGGIO N° S3			
			LOCALITA': Boretto (RE) OPERATORE: Vicenzetto S.r.l.	PERFORAZIONE: rotazione c.c. a secco, Ø101 mm DATA INIZIO: 30/10/2017 DATA FINE: 31/10/2017 CAMPIONI: carattere semplice (CS); Osterberg (OT); Shelby (SH); COMPILATORE: dott. geol. Andrea Garbelli			
			SCALA: 1:100	quota fine sond.: 30 m			
Quote (m) s.l.m.	Scala (m)	Schema stratigrafico	Descrizione litologica e stratigrafica	Pocket % kg/m³	H.S. m	Campioni Tipo n. prof.	Note
0.0	1		Limi argillosi tenaci, non plastici, molto compatti, di colore nocciola.				
3.1	3		Limi argillosi debolmente sabbiosi molto compatti, non plastici, di colore nocciola.				
4.5	4		Limi argillosi compatti, poco plastici, di colore nocciola fino -5.8 poi di colore grigio.			SH 01 4.5 SH 02 5.0	
6.15	6		Limi con argilla compatti, plastici, di colore nocciola con venature rossastre, ma alcuni livelli alla quota di -6.8 m hanno intense sfumature di colore grigio. Alla quota di -7.7/2 m è presente una lente prevalentemente limosa, mentre alla base del livello la plasticità diminuisce. La consistenza aumenta verso la base.				
6.35	6		Argille limose plastiche di colore nocciola con venature rossastre fino alla quota -9 m, poi fino alla base di colore grigio con venature di colore rossastro (accanto alla profondità di -10.5/-10.95 in cui il colore torna nocciola con concrezioni nodulari e venature rossastre). La consistenza è perlopiù mediamente compatta con valori di qu discontinui sulla verticale.				
12.4	12		Alternanze di sottili livelli di spessore centimetrico di sabbie fini con limo, limi sabbiosi coesivi poco plastici o non plastici, limi argillosi plastici. Il colore è grigio. Alla base aumenta la componente limosa sabbiosa. La consistenza è molle sino -14 m poi mediamente compatta.				
14.45	14		Sabbie fini limose o debolmente limose, coesive, non plastiche, mediamente addensate, di colore grigio.				
15.15	15		Sabbia fine debolmente limosa, debolmente coesiva, non plastica, di colore grigio.				
18.15	18		Sabbia medio - fine debolmente limosa, debolmente coesiva, non plastica, di colore grigio. A tratti sono presenti alcuni sottili livelli più coesivi con un maggiore contenuto in limo.				
25.9	26		Sabbia medio - grossa debolmente ghiaiosa fine, non coesiva, non plastica, di colore grigio.				
29.15	29		Sabbia media, non coesiva, non plastica, di colore grigio.				
30	30		Quota di fine sondaggio				

Foto scattata verso alla profondità di 27 m. D 127 mm.



Per la caratterizzazione dei terreni che costituiranno il nuovo rilevato arginale si è invece fatto riferimento a terreni di classe A4-A6 della classificazione UNI/AASHTO, aventi le caratteristiche riportate nella tabella seguente:



**PROGETTO ESECUTIVO**

Elaborato PE\_B: RELAZIONE IDRAULICA E GEOTECNICA

Classificazione generale	Terre ghiaio-sabbiose Frazione passante al setaccio 0,063 mm ≤ 35%							Terre limo-argillose Frazione passante al setaccio 0,063 mm > 35%					Torbe e terre organiche palustri
Gruppo	A1		A3	A2				A4	A5	A6	A7		A8
Sottogruppo	A1-a	A1-b		A2-4	A2-5	A2-6	A2-7				A7-5	A7-6	
Frazione passante al setaccio 2 mm 0,4 mm 0,063 mm	≤50 ≤30 ≤15	- ≤50 ≤25	- >50 ≤10	- ≤35	- ≤35	- ≤35	- ≤35	- >35	- >35	- >35	- >35	- >35	
Caratteristiche della frazione passante al setaccio 0,4 mm LL (Limite liquido) IP (Indice di plasticità)	- ≤6	- ≤6	- N.P.	≤40 ≤10	>40 ≤10	≤40 >10	>40 >10	≤40 ≤10	>40 ≤10	≤40 >10	>40 >10 IP ≤ LL-30	>40 >10 IP > LL-30	
Indice di gruppo	0		0	0				≤8	≤12	≤16	≤20		

Classificazione generale	Terre ghiaio-sabbiose Frazione passante allo staccio 0,075 UNI 2332 ≤ 35%							Terre limo-argillose Frazione passante allo staccio 0,075 UNI 2332 > 35%					Torbe e terre organiche palustri
Gruppo	A1		A3	A2				A4	A5	A6	A7		A8
Sottogruppo	A1-a	A1-b		A2-4	A2-5	A2-6	A2-7				A7-5	A7-6	
Tipi usuali dei materiali caratteristici costituenti il gruppo	Ghiaia o breccia, ghiaia o breccia sabbiosa, sabbia grossa, pomice, scorie vulcaniche, pozzolane		Sabbia fina	Ghiaia e sabbia limosa o argillosa				Limi poco compres- sibili	Limi fortemente compres- sibili	Argille poco compres- sibili	Argille forte- mente com- pressibili mediamente plastiche	Argille forte- mente com- pressibili fortemente plastiche	Torbe di recente o remota forma- zione, detriti orga- nici di origine palustre
Qualità portanti quale terreno di sottofondo in assenza di gelo	Da eccellente a buono				Da mediocre a scadente								Da scartare come sottofondo
Azione del gelo sulla qualità portante del ter- reno di sottofondo	Nessuna o lieve			Media				Molto elevata		Media	Elevata	Media	
Ritiro o rigonfiamento	Nullo			Nullo o lieve				Lieve o medio		Elevato	Elevato	Molto elevato	
Permeabilità	Elevata			Media o scarsa						Scarsa o nulla			

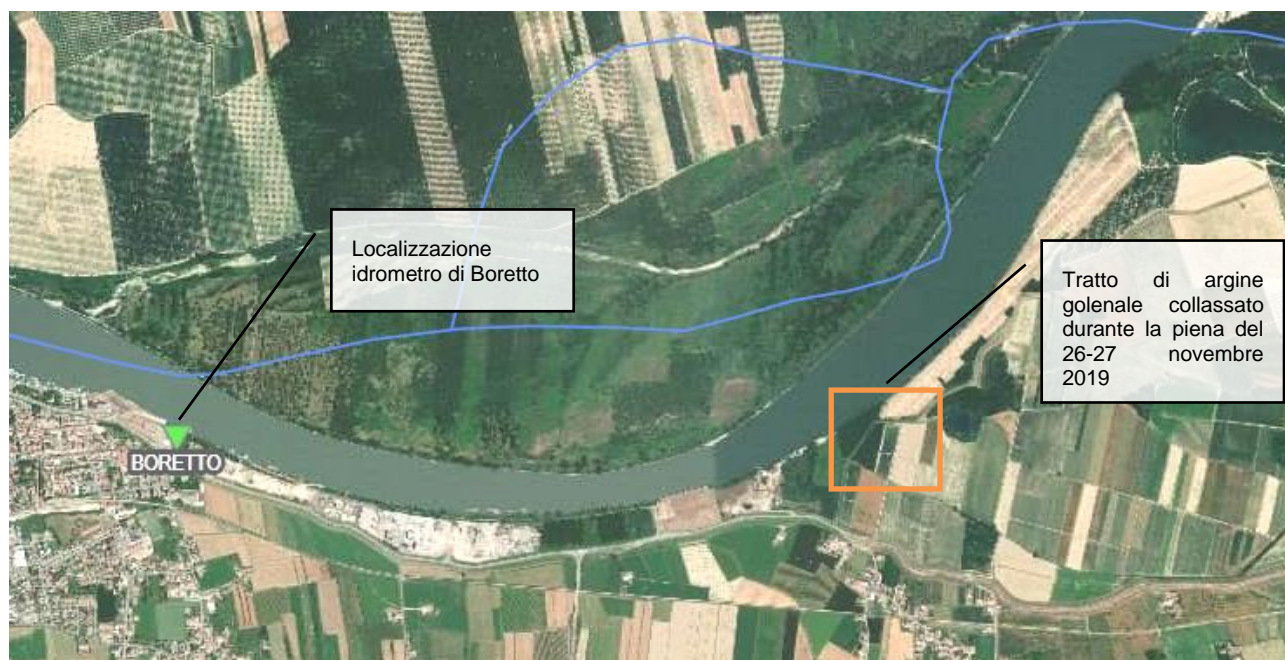
## 6. ANALISI IDROLOGICA-IDRAULICA

Per la determinazione dei parametri al contorno idrologico-idraulici necessari per l'interpretazione modellistica dei fenomeni di filtrazione attraverso l'argine e per le verifiche di stabilità dei paramenti si è fatto riferimento ai dati relativi alla piena del Fiume Po del 26-27 novembre 2019 che, come accennato in premessa, ha portato al collasso dell'argine golendale oggetto di studio.

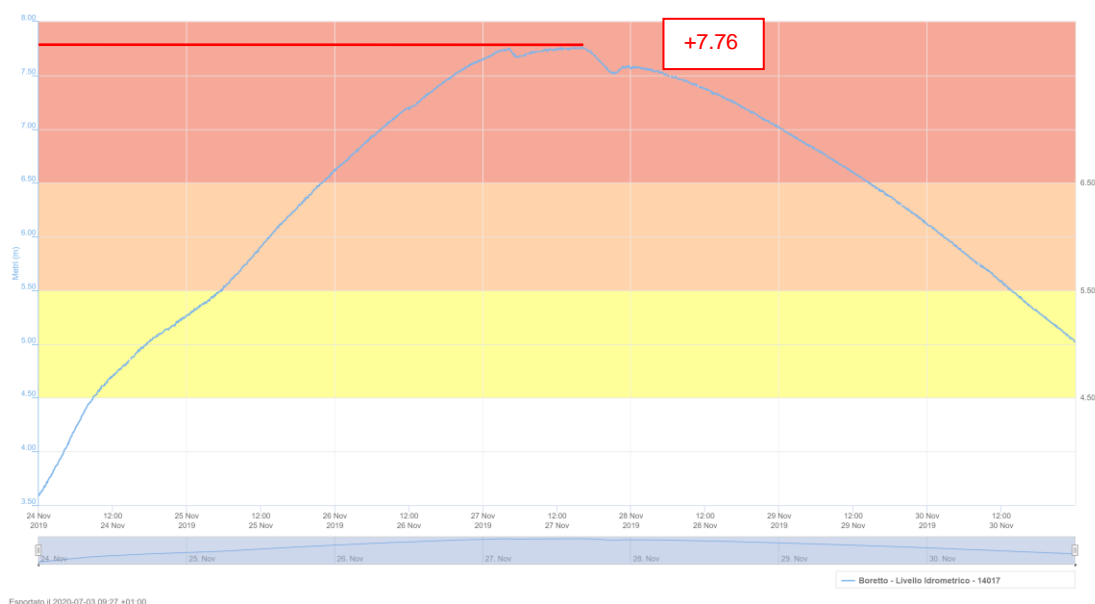
Si riportano di seguito le analisi dei dati disponibili.

### 6.1. IDROGRAMMI DI PIENA E ANALISI DELL'EVENTO DEL 26-27 NOVEMBRE 2019

La definizione dei livelli idrometrici e della durata della piena del 26-27 novembre 2019 è stata possibile grazie ai dati rilevati durante l'evento dall'idrometro di Boretto, situato ca. 2.7 km a monte rispetto all'argine oggetto di collasso.



**FIGURA 6-1 LOCALIZZAZIONE DELL'IDROMETRO DI BORETTO LUNGO IL FIUME PO RISPETTO ALL'ARGINE GOLENALE OGGETTO DI STUDIO.**



**FIGURA 6-2 IDROGRAMMA DELLA PIENA F.PO DEL 26-27 NOVEMBRE 2019 RILEVATO ALL'IDROMETRO DI BORETTO**

Come si può notare dalla Figura 6-2 all'idrometro di Boretto il colmo della piena ha fatto registrare un livello pari a +7.76 m rispetto allo zero idrometrico (posto a quota 19.95 m slm).

È stata quindi definita una quota assoluta della piena al colmo pari a 27.71 m slm all'idrometro di Boretto.

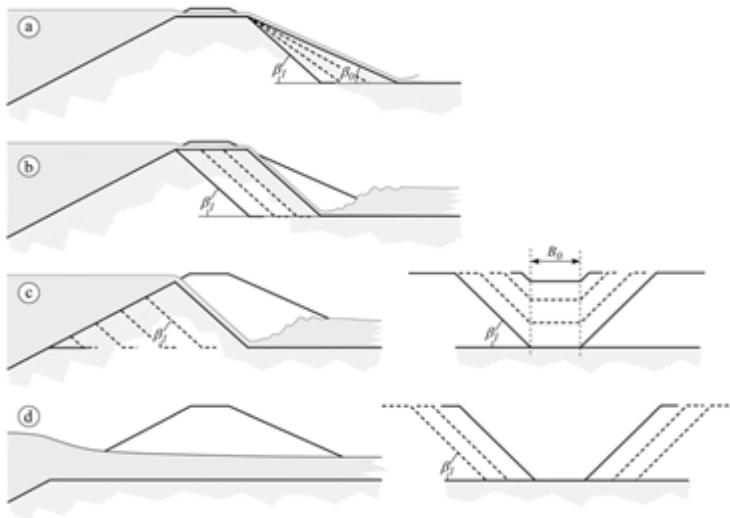
Facendo una stima sulle pendenze medie mantenute dai profili di piena del F.Po nel tratto a valle dell'idrometro di Boretto, sono stati quindi determinati i valori idrometrici raggiunti dalla piena del 26-27 novembre 2019 in corrispondenza dell'argine golenale di Gualtieri. In particolare si è stimato che la quota raggiunta dalla piena nel tratto collassato sia stata di 27.50 m slm.

È stato così possibile verificare come presumibilmente il tratto di argine oggetto di studio (avente una quota in sommità ante piena variabile tra 27.26 e 27.30 m slm) sia stato sormontato dal colmo della piena e proprio questa circostanza abbia portato all'innescarsi di un meccanismo di erosione retrogressiva che ha portato alla rimozione di materiale dal paramento lato campagna con conseguente aumento di pendenza fino alla condizione critica.

L'evoluzione tipica di questo meccanismo di rottura arginale porta in successione ad un processo erosivo al piede esterno dell'argine. Si forma quindi una condizione di criticità (stramazzo con risalto idraulico) che provoca la formazione di una voragine al piede esterno dell'argine che viene chiamato nel gergo padano BUDRIO. Il processo di Dam Break dell'argine è quindi quasi immediato e la rotta prosegue in senso longitudinale fino alla riduzione della differenza di quota idrometrica tra monte e valle.

Il meccanismo di erosione viene descritto dalle immagini seguenti e che rappresentano la classifica formazione del Budrio . In questo caso la profondità è di c.a. 10-12 m su di un'area di 6.700 m<sup>2</sup> .

Una volta che l'argine si è collassato il processo erosivo è regredito verso monte fino ad interessare la difesa sponale o pennello di navigazione che a sua volta è stato asportato dalla corrente del fiume per uno sviluppo di circa 30m. Nella figura seguente si riporta una schematizzazione tipologica di rottura arginale dovuta a sormonto.



**FIGURA 6-3** LE DIVERSE FASI DI EVOLUZIONE DELLA BRECCIA PER SORMONTO ARGINALE: A) PRIMA FASE, CONSISTENTE NELL'EROSIONE DEL PARAMENTO DI VALLE CHE PRODUCE UN IRRIPIDIMENTO DELLO STESSO; B) SECONDA FASE, DURANTE LA QUALE IL PARAMENTO DI VALLE VIENE EROSO MANTENENDOSI PARALLELO A SE STESSO; C) TERZA FASE, CARATTERIZZATA DALL'EROSIONE DEL PARAMENTO DI VALLE (A SINISTRA) CHE AL CONTEMPO DETERMINA UN PROGRESSIVO ALLARGAMENTO MEDIO DELLA BRECCIA (A DESTRA); D) RIMOSSO IL CORPO ARGINALE AL DI SOPRA DEL PIANO CAMPAGNA, IL PROCESSO EROSIVO PROSEGUE CON UN GRADUALE ALLARGAMENTO DELLA BRECCIA. (DA 'UN MODELLO IDRODINAMICO ACCOPPIATO PER LA SIMULAZIONE DI ROTTE ARGINALI IN CONTESTI FLUVIALI' DI VIERO, D'ALPAOS, CARNIELLO, DEFINA)

In realtà e nel secolo scorso lo stesso argine è stato soggetto ad almeno 15 rotture arginali con formazione di altrettanti Budri, alcuni dei quali ancor oggi esistenti altri sono stati tombati.





## **7. LE OPERE IN PROGETTO**

---

Le opere in progetto riguardano il ripristino di un tratto di argine golenale del F.Po in Comune di Gualtieri (RE), collassato durante la piena del 26-27 novembre 2019.

Come descritto nei precedenti paragrafi il sormonto della piena dell'argine in oggetto ha portato al collasso di un tratto di ca. 120 m di argine golenale con la successiva formazione di 'budrio'.

I lavori di riempimento del budrio e della corona arginale provvisoria sono attualmente in corso di esecuzione da parte del Consorzio golenale Malaspina.

Gli interventi oggetto del presente studio riguardano invece:

- 1) La ricostruzione del tratto di argine collassato,
- 2) Il ringrosso del tratto di argine golenale compreso tra l'argine maestro del F.Po e il tratto di argine collassato.

Il nuovo argine verrà realizzato con un tracciato diverso rispetto a quello crollato e avrà una lunghezza pari a 340 m. La sommità sarà posta ad una quota pari a 28.00 m slm e avrà una larghezza di 3.50 m.

I paramenti arginali avranno una pendenza pari a 2/3 sia lato fiume che lato campagna.

L'argine sarà dotato di banca lato campagna e di pista ciclabile in sommità.

I tratti di argine esistente ante piena e non completamente crollati verranno riutilizzati per la creazione di due rampe di accesso all'argine.

Il tratto di argine esistente compreso tra l'argine maestro del Fiume Po e l'argine in progetto sarà ringrossato lato campagna in modo da portare la quota sommitale a 28 m slm.

Questo ringrosso verrà effettuato in modo da non avere un tratto intercluso di argine golenale a quote inferiori a quello in progetto e scongiurare così l'ipotesi che lo stesso venga sormontato durante una piena simile a quella del novembre 2019, con il pericolo di crollo ed erosione generalizzata in una zona troppo prossima all'argine maestro.

## **8. VERIFICHE DI INFILTRAZIONE E STABILITÀ DEL RILEVATO ARGINALE**

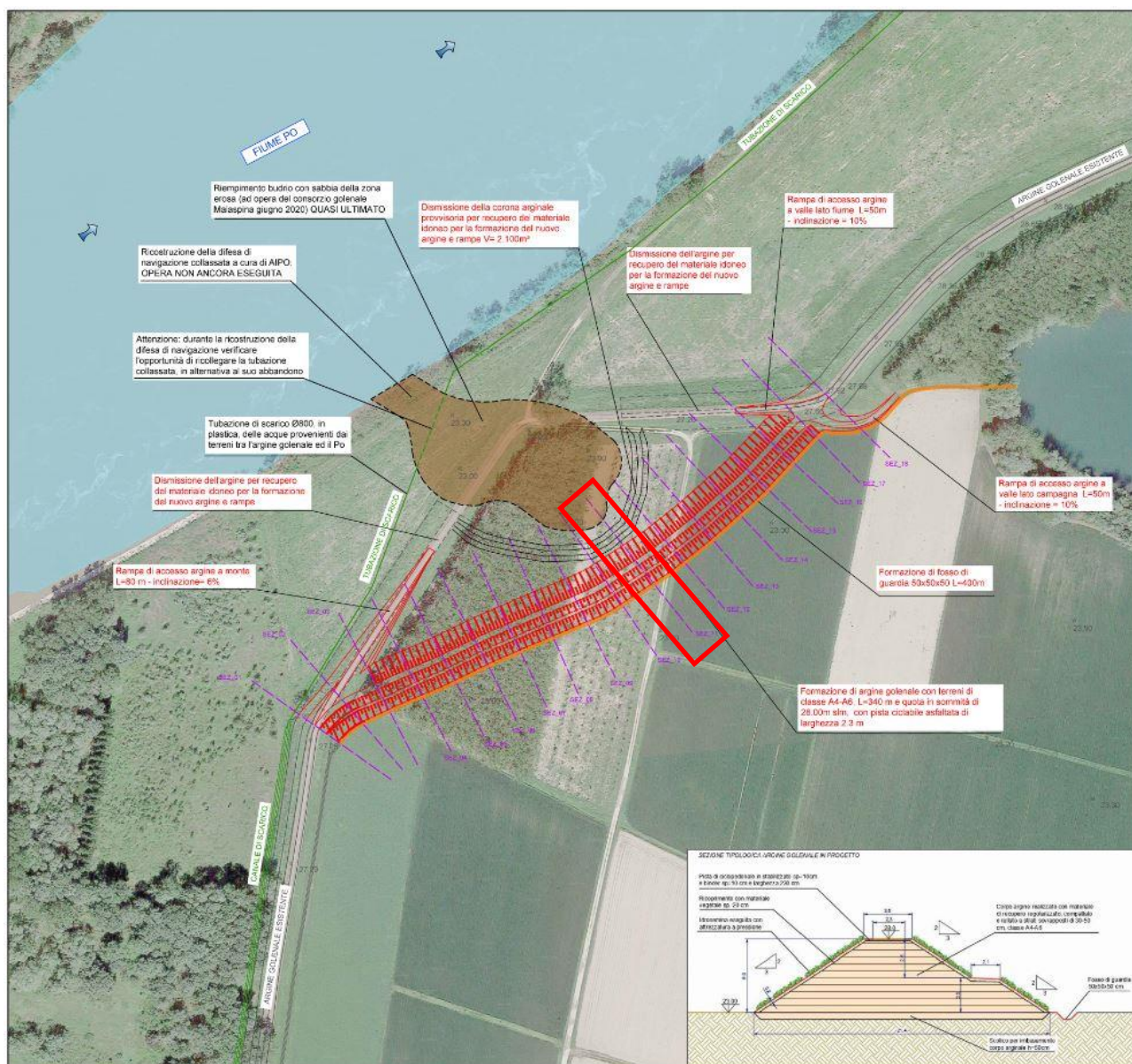
Ai fini della verifica della stabilità del tratto di rilevato arginale in progetto anche in occasione delle sollecitazioni più critiche, è stato implementato, nell'ambito del presente progetto, uno studio di filtrazione mediante modellistica numerica agli elementi finiti. Tale analisi consente, da un lato, di verificare il grado di sicurezza dell'opera rispetto a potenziali fenomeni di sifonamento al piede della stessa, e dall'altro di definire i carichi idraulici, le velocità di flusso attraverso l'argine e l'andamento della linea di filtrazione durante l'entrata in funzione delle casse.

Contestualmente sono state effettuate verifiche geotecniche di stabilità dei paramenti arginali. Le verifiche di stabilità dei paramenti sono state eseguite in considerazione degli stati limite ultimi, dimostrando il rispetto dei requisiti di sicurezza imposti dalle normative vigenti. Le condizioni di esercizio esaminate sono le seguenti:

- a) a fine costruzione,
- b) al colmo dell'onda di piena,
- c) in fase di recessione dell'onda di piena.

Le verifiche geotecniche sono state effettuate in relazione alla tipologia di opera da eseguire (argini in materiale sciolto) ricostruendo un modello geotecnico del terreno estrapolato dalle indagini eseguite da AIPO e descritte al Par.5.

La sezione arginale 'critica' verificata (sez. 11) è quella progettualmente più prossima all'area erosa (budrio) durante la piena del Novembre 2019.



**FIGURA 8-1 – RAPPRESENTAZIONE DEL TRATTO ARGINALE IN PROGETTO E DELLA SEZIONE ARGINALE 'CRITICA' (CON BANCA).**

## 8.1. VERIFICHE DI INFILTRAZIONE

Per effettuare le simulazioni dei processi di infiltrazione è stato impiegato il modello SEEP/W della Geo-Slope, un software agli elementi finiti per l'analisi della filtrazione e delle spinte dovute alle pressioni nei mezzi porosi, sia in condizioni sature che insature, in modalità permanente o, come nel presente caso, variabili nel tempo: in aggiunta alle tradizionali analisi in moto uniforme in campo saturo le formule che SEEP/W utilizza rendono possibile analizzare la filtrazione come funzione del tempo e studiare problemi

come quello dell'infiltrazione delle precipitazioni e della risposta idrologica dell'argine al mutamento dei livelli idrici durante la propagazione delle piene.

L'analisi è stata effettuata in regime transitorio, in modo da poter osservare gli incrementi nel tempo delle diverse grandezze caratteristiche del moto di filtrazione e di poter definire il flusso sotterraneo durante le varie fasi dell'onda di piena.

### **8.1.1. Stratigrafia dei terreni e condizioni al contorno**

Ai fini della presente analisi, la schematizzazione del problema geotecnico è stata effettuata con la seguente modalità:

- il corpo arginale viene definito geometricamente secondo lo schema di Figura 8-2, avente sommità arginale a quota 28 m slm e pendenza dei paramenti pari a 2/3 sia lato fiume che lato campagna.

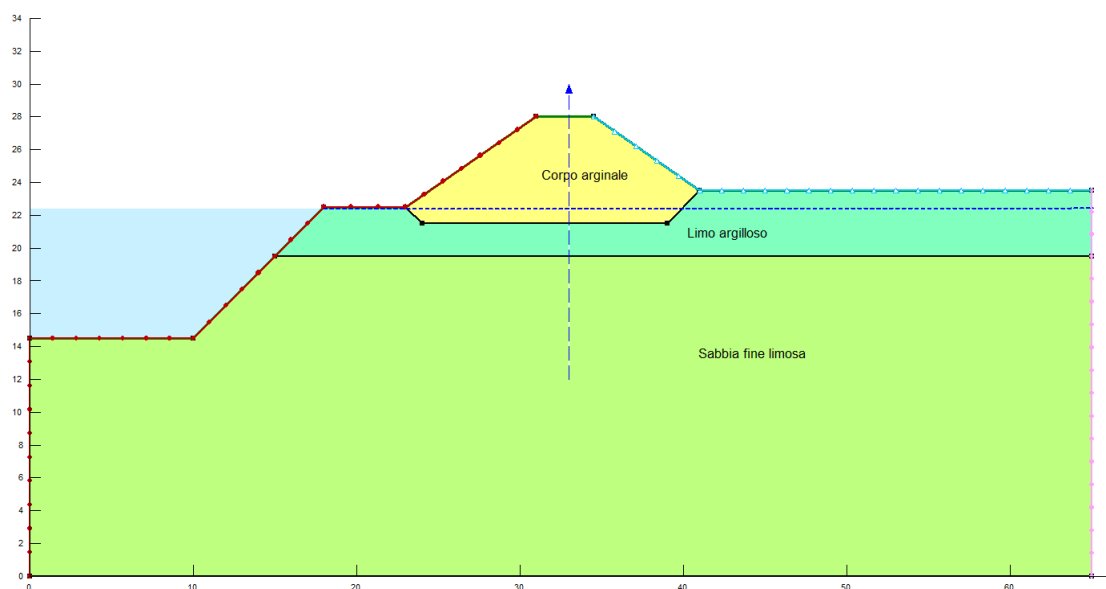
Le simulazioni hanno previsto di effettuare l'analisi in 2 diverse configurazioni:

1. Argine dotato di banca lato campagna,
2. Argine non dotato di banca lato campagna.

Dal punto di vista geolitologico si considera di realizzare l'argine con materiale A4-A6 della classificazione UNI/AASHTO (limi e argille) e con i procedimenti esecutivi previsti da Capitolato AIPO.

- il sedime del corpo arginale viene invece analizzato secondo la seguente schematizzazione: si considera che l'argine poggi su uno strato di ca. 3.5 m di limi argillosi (riscontrato in tutti i sondaggi analizzati) mentre al di sotto vi sia uno strato profondo di sabbie fini limose.





**FIGURA 8-2 SCHEMATIZZAZIONE GEOMETRICA E LITOLOGICA DELLA SEZIONE ARGINALE ANALIZZATA (CONFIGURAZIONE SENZA BANCA LATO CAMPAGNA)**

Per quanto riguarda la permeabilità dei terreni interessati dall'analisi, sono stati utilizzati i valori contenuti nella tabella seguente, considerati come valori cautelativi rispetto alle risultanze delle prove di permeabilità contenute nelle indagini fornite da AIPO e rispetto ai valori tipici di letteratura.

	<b>Materiali</b>	<b><math>K_H</math> [m/sec]</b>
CORPO ARGINALE	LIMO E ARGILLA	$10^{-6}$
SUBSTRATO	LIMO ARGILLOSO	$10^{-6}$
	SABBIA FINE LIMOSA	$10^{-4} - 10^{-5}$

Come condizione al contorno idraulica lato fiume è stata imposta la propagazione dell'idrogramma di piena occorso durante l'evento del Novembre 2019 ricostruendo l'andamento temporale della quota idrica in corrispondenza della sezione analizzata.

La condizione al contorno sulla frontiera del dominio a lato campagna è stata mantenuta, a favore di sicurezza, costante nel tempo con carico assegnato pari a 22.50 m s.l.m..

#### 8.1.1.1 Analisi della sezione 11 nella configurazione senza banca arginale lato campagna

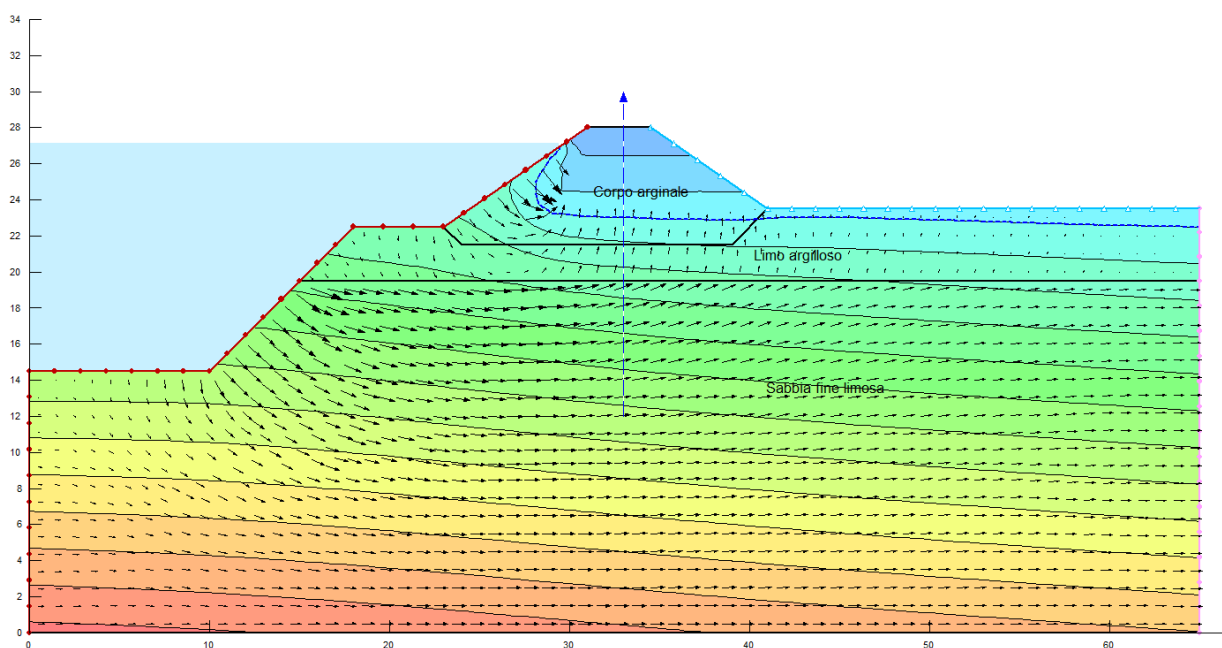
La sezione 11 è rappresentativa del tratto di rilevato arginale in progetto più prossima al budrio creatosi durante la piena del novembre 2019.

Le condizioni al contorno all'inizio della simulazione in regime non-stazionario coincidono con la linea piezometrica corrispondente al livello di falda. Successivamente è stato imposto l'aumento dei livelli idrici lato fiume, in accordo con l'andamento dell'idrogramma di piena occorso durante l'evento del Novembre 2019, fino al livello massimo raggiunto dalla piena in corrispondenza della zona oggetto di studio.

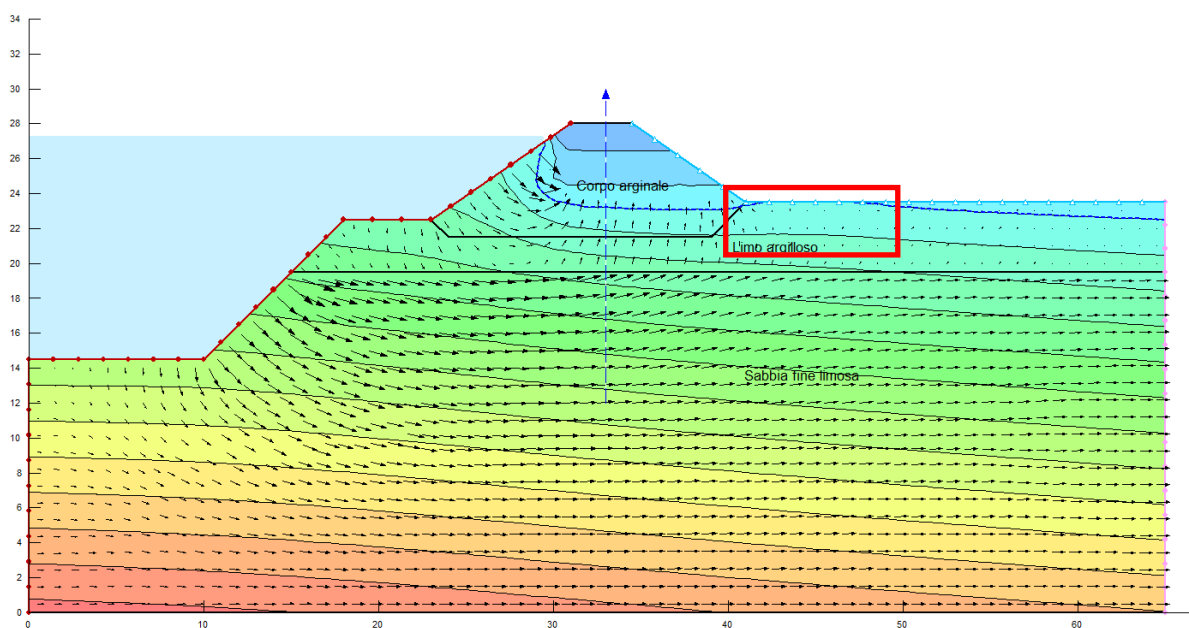
Si è considerato di mantenere la quota di massima piena per un lasso temporale pari a 200.000 sec a favore di sicurezza.

Nelle figure seguenti sono riportate le pressioni neutre e la linea di filtrazione valutate in corrispondenza di:

- Istante in cui la piena raggiunge il livello massimo,
- A seguito del mantenimento del massimo livello di piena per 200.000 sec.



**FIGURA 8-3 ANDAMENTO DELLA LINEA DI FILTRAZIONE (IN BLU) E DELLE PRESSIONI INTERSTIZIALI IN CORRISPONDENZA DELL'ISTANTE IN CUI LA PIENA RAGGIUNGE IL MAX LIVELLO IDRICO (CONFIGURAZIONE SENZA BANCA).**



**FIGURA 8-4 ANDAMENTO DELLA LINEA DI FILTRAZIONE (IN BLU) E DELLE PRESSIONI INTERSTIZIALI A SEGUITO DEL MANTENIMENTO DEL MAX LIVELLO IDRICO DI PIENA PER 200.000 SEC (CONFIGURAZIONE SENZA BANCA).**

Come si può notare dalle immagini riportate la linea di filtrazione nelle simulazioni, con il perdurare nel tempo del massimo livello di piena, si avvicina al piano campagna, con conseguente fuoriuscita di acqua che interessa i primi 6-7 m dal piede dell'argine.

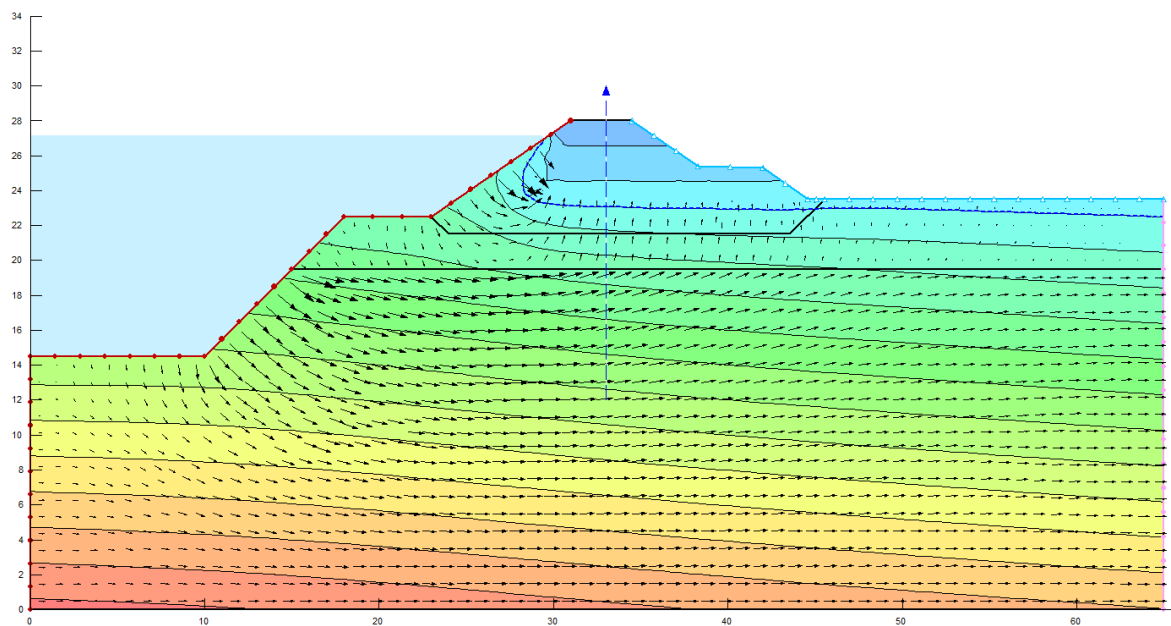
Questa situazione è molto rischiosa per l'insorgere di indesiderati processi di sifonamento dell'argine.

#### 8.1.1.2 Analisi della sezione 11 nella configurazione con banca arginale lato campagna

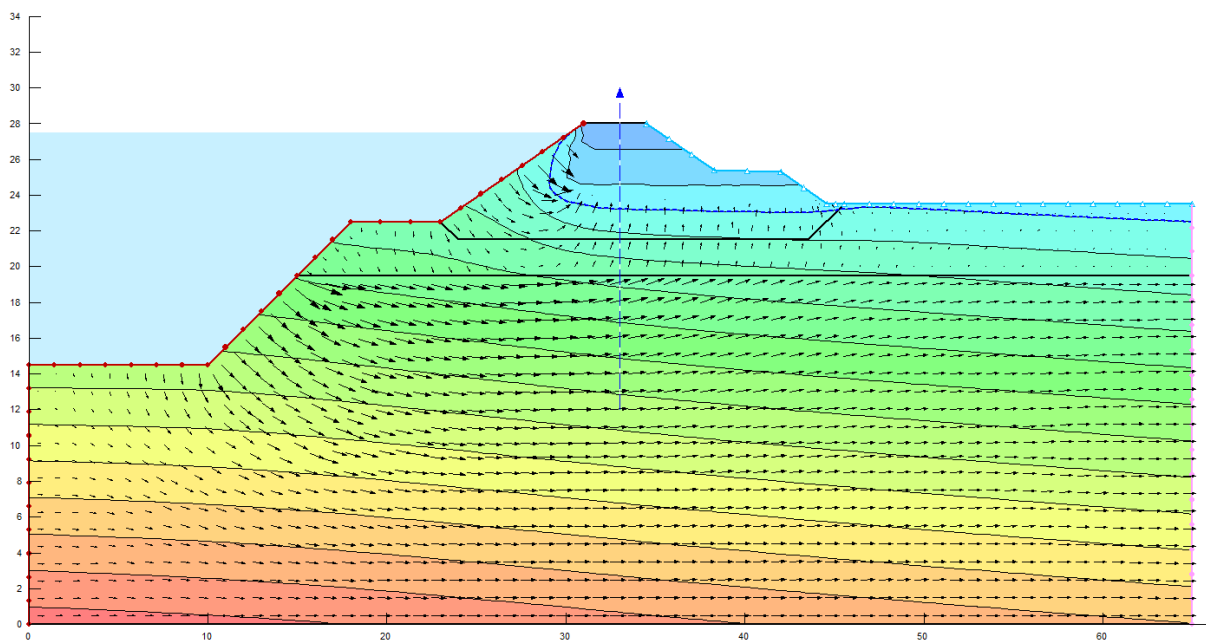
Le condizioni al contorno analizzate nella simulazione sono le medesime riportate per la configurazione senza banca.

Nelle figure seguenti sono riportate le pressioni neutre e la linea di filtrazione valutate in corrispondenza di:

- c) Istante in cui la piena raggiunge il livello massimo,
- d) A seguito del mantenimento del massimo livello di piena per 200.000 sec.



**FIGURA 8-5 ANDAMENTO DELLA LINEA DI FILTRAZIONE (IN BLU) E DELLE PRESSIONI INTERSTIZIALI IN CORRISPONDENZA DELL'ISTANTE IN CUI LA PIENA RAGGIUNGE IL MAX LIVELLO IDRICO (CONFIGURAZIONE CON BANCA).**



**FIGURA 8-6 ANDAMENTO DELLA LINEA DI FILTRAZIONE (IN BLU) E DELLE PRESSIONI INTERSTIZIALI A SEGUITO DEL MANTENIMENTO DEL MAX LIVELLO IDRICO DI PIENA PER 200.000 SEC (CONFIGURAZIONE CON BANCA).**



Dalle immagini riportate si desume come, nella configurazione dell'argine con banca, la linea di filtrazione lato campagna si mantenga sempre al di sotto della superficie libera di efflusso e quindi non si abbiano fenomeni di fuoriuscita di acqua anche a seguito del mantenimento del massimo livello idrico di piena per un periodo di 200.000 sec.

## **8.2. VERIFICHE DI STABILITÀ DEL RILEVATO ARGINALE**

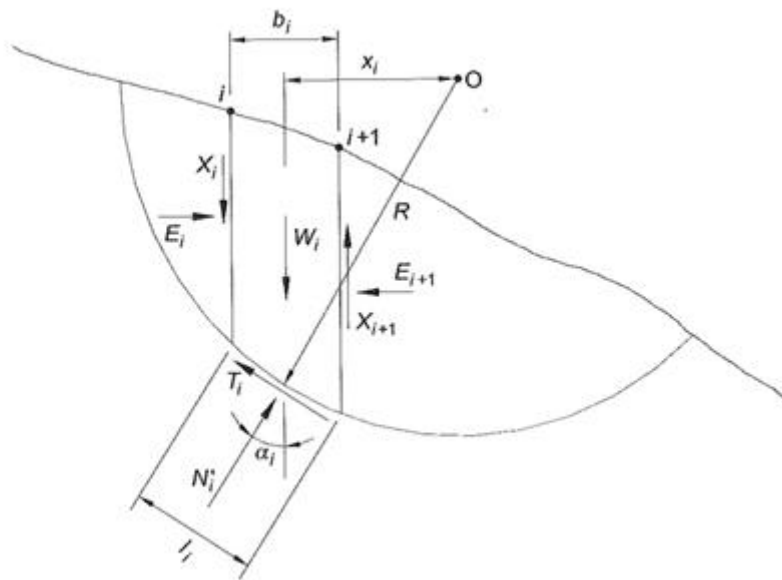
---

Di seguito vengono riportate le risultanze delle verifiche di stabilità della sezione arginale 11 nelle due configurazioni con e senza banca arginale, già analizzate alla filtrazione e quindi già definite sia dal punto di vista geometrico che sotto l'aspetto del modello geotecnico del corpo arginale e del sottostante substrato di fondazione.

Le analisi di stabilità sono state eseguite per il paramento lato fiume della struttura arginale data la criticità dovuta alla presenza del budrio creatosi durante la piena del novembre 2019. Questa zona di erosione profonda è in corso di riempimento ma nelle simulazioni, a favore di sicurezza, si considera ancora presente. L'analisi è stata eseguita con il metodo di Bishop attraverso l'utilizzo del modulo SLOPE/W del software agli elementi finiti GeoStudio per l'analisi di stabilità di pendii, fronti di scavo e paramenti dei rilevati attraverso il metodo dell'equilibrio limite globale.

Tramite questo approccio il comportamento del terreno è assimilato a quello di un mezzo rigido-plastico e, pertanto, l'analisi considera solo le condizioni presenti all'istante di rottura. Ipotizzando che lo scivolamento avvenga lungo una superficie di geometria nota in condizioni di deformazione piana, la resistenza al taglio lungo la superficie di scivolamento è confrontata con il valore necessario a garantire l'equilibrio e questo rapporto è assunto come misura della sicurezza.

Nel metodo di Bishop, si assume che la superficie di scivolamento sia una superficie cilindrica a direttrice circolare.


**FIGURA 8-7 METODO SEMPLIFICATO DI BISHOP (1955)**

Considerando la condizione di equilibrio alla rotazione intorno al centro di istantanea rotazione O (v. Figura 8-7) il momento della forza peso del terreno interno alla superficie di scivolamento dev'essere uguale al momento delle azioni agenti sulla superficie stessa, per cui il coefficiente di sicurezza risulta dato da:

$$F = \frac{R * \sum [c' I_i + (N_i - U_i) \tan \varphi']}{\sum W_i x_i}$$

tenendo conto che la resistenza al taglio è espressa da

$$T_i = \frac{c' I_i + (N_i - U_i) \tan \varphi'}{F}$$

Dopo aver ricavato  $N_i$  dall'equilibrio alla traslazione verticale del singolo concio, esso può essere sostituito nell'espressione del coefficiente di sicurezza:

$$F = \frac{\sum [(c' b_i + W_i (1 - r_u) \tan \varphi' + (X_i - X_{i+1}) \tan \varphi') \frac{1}{M_\alpha}]}{\sum W_i \sin \alpha_i}$$

nella quale si è posto

$$M_{\alpha} = \cos \alpha_i \left( 1 + \frac{\tan \phi' \tan \alpha_i}{F} \right)$$

e si è indicato con  $r_u$  il rapporto tra la risultante della pressione interstiziale agente alla base del concio e il peso della colonna di terreno, ossia

$$r_u = \frac{u_i b_i}{W_i}$$

Assumendo  $X_i - X_{i-1} = 0$ , il coefficiente di sicurezza può essere valutato con l'espressione approssimata

$$F = \frac{\sum [(c' b_i + W_i (1 - r_u) \tan \phi') \frac{1}{M_{\alpha}}]}{\sum W_i \sin \alpha_i}$$

Si noti che, poiché il coefficiente di sicurezza compare sia al primo che al secondo membro (per la presenza di  $M_{\alpha}$ ), è necessaria una procedura iterativa: si introduce un valore di tentativo di F nell'equazione di  $M_{\alpha}$

e se ne calcola un nuovo valore con l'equazione relativa al coefficiente di sicurezza, continuando fino alla convergenza desiderata.

Il modello utilizzato ricerca le superfici di scivolamento aventi centro e curvatura differenti, fino a trovare quella caratterizzata dal minore coefficiente di sicurezza.

Le verifiche di stabilità sono state eseguite assumendo per il rilevato arginale e per il terreno in sito i seguenti parametri geomeccanici di riferimento:

	Angolo di attrito $\phi'$ [°]	Peso specifico terreno $\gamma$ [kN/m³]	Coesione efficace $c'$ [kPa]	Coesione non drenata $c_u$ [kPa]
Rilevato arginale	-	-	-	50
Limo argilloso	26	18	0	-
Sabbia fine limosa	30	19	0	-

La scelta dei suddetti parametri è stata effettuata, per il rilevato arginale, considerando l'utilizzo di terreni coesivi limosi-argillosi (classe A4-A6) mentre per il substrato di fondazione, valutando i risultati delle indagini eseguite da AIPO e richiamate al Par. 5.

Le verifiche di stabilità sono state condotte agli Stati limite ultimi utilizzando l'Approccio 1 – Combinazione 2 (A2+M2+R2), in accordo con il par. 6.8.2 delle NTC18.

Nelle tabelle seguenti sono riportati i valori dei vari coefficienti utilizzati nella verifica:

Coefficienti parziali per le azioni – Stabilità dei paramenti			
CARICHI	EFFETTO	Coeff. parziale	A2 - GEO

Permanenti	Favorevole	$\gamma_{G1}$	1,0
	Sfavorevole		1,0
Variabili	Favorevole	$\gamma_{Qi}$	0,0
	Sfavorevole		1,3

<i>Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno – Stabilità dei paramenti</i>			
PARAMETRO	GRANDEZZA ALLA QUALE APPLICARE IL COEFFICIENTE	Coeff. parziale	M2
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,25
Peso dell'unità di volume	$\gamma$	$\gamma_{\gamma}$	1,00
Coesione efficace	$c'_k$	$\gamma_{c'}$	1,25
Resistenza non drenata	$c_{uk}$	$\gamma_{cu}$	1,4

<i>Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza di opere in materiali sciolti – Stabilità dei paramenti</i>		
Fase	Coeff. parziale	R2 - GEO
Colmo dell'onda di piena	$\gamma_R$	1,2
Recessione dell'onda di piena	$\gamma_R$	1,1

Per tenere conto delle variazioni di pressione interstiziale e di carico idraulico nelle varie configurazioni analizzate si è fatto riferimento ai risultati dell'analisi del moto di filtrazione implementata con il medesimo software utilizzato per la verifica di stabilità dei paramenti, ma attraverso il modulo dedicato SEEP/W.

Il criterio di rottura utilizzato è quello di Mohr-Coulomb.

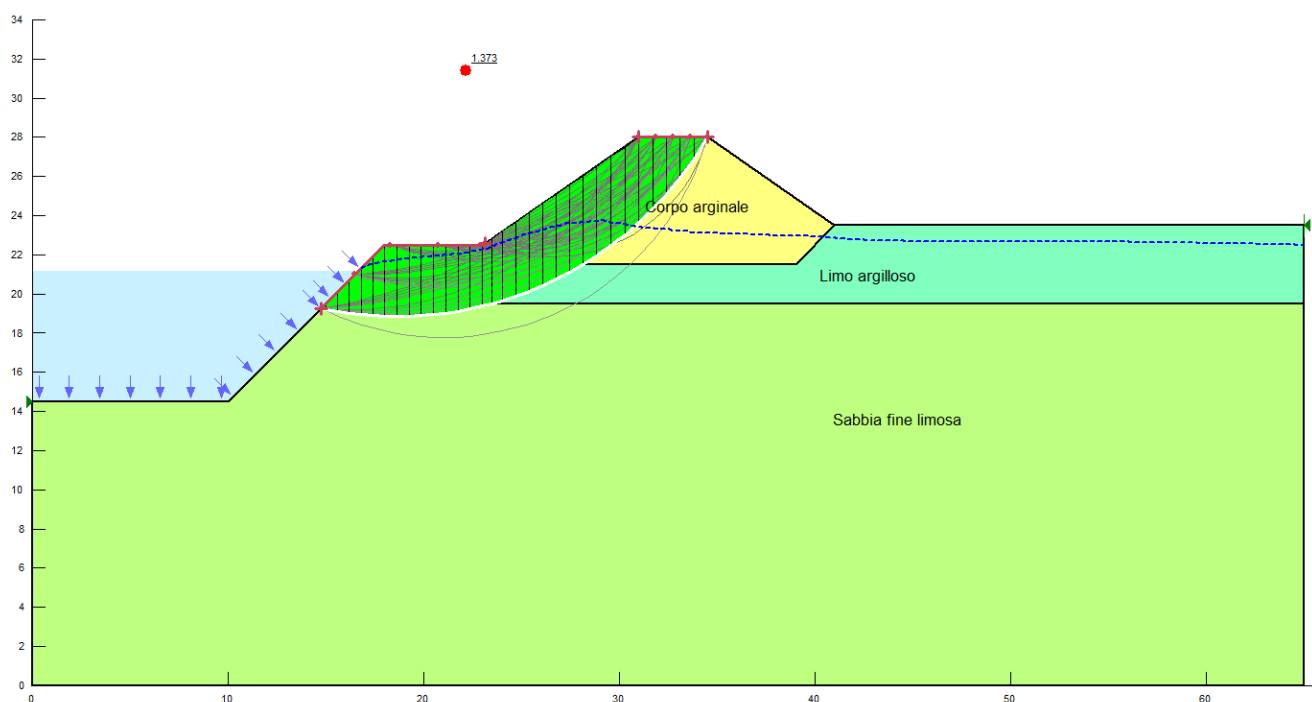
Di seguito vengono esposti i risultati delle verifiche di stabilità dei paramenti arginali per ciascuna delle sezioni esaminate nelle diverse configurazioni.



### 8.2.1. Verifica di stabilità nella configurazione senza banca arginale

Dal punto di vista modellistico, l'analisi del problema di stabilità dei paramenti lato fiume è avvenuta impostando, per la ricerca della superficie critica di scivolamento circolare (arco di circonferenza), una zona di innesco dello scivolamento (testa argine) e una zona di termine dello scivolamento (piede argine).

Nell'immagine seguente sono illustrati i risultati delle elaborazioni effettuate.



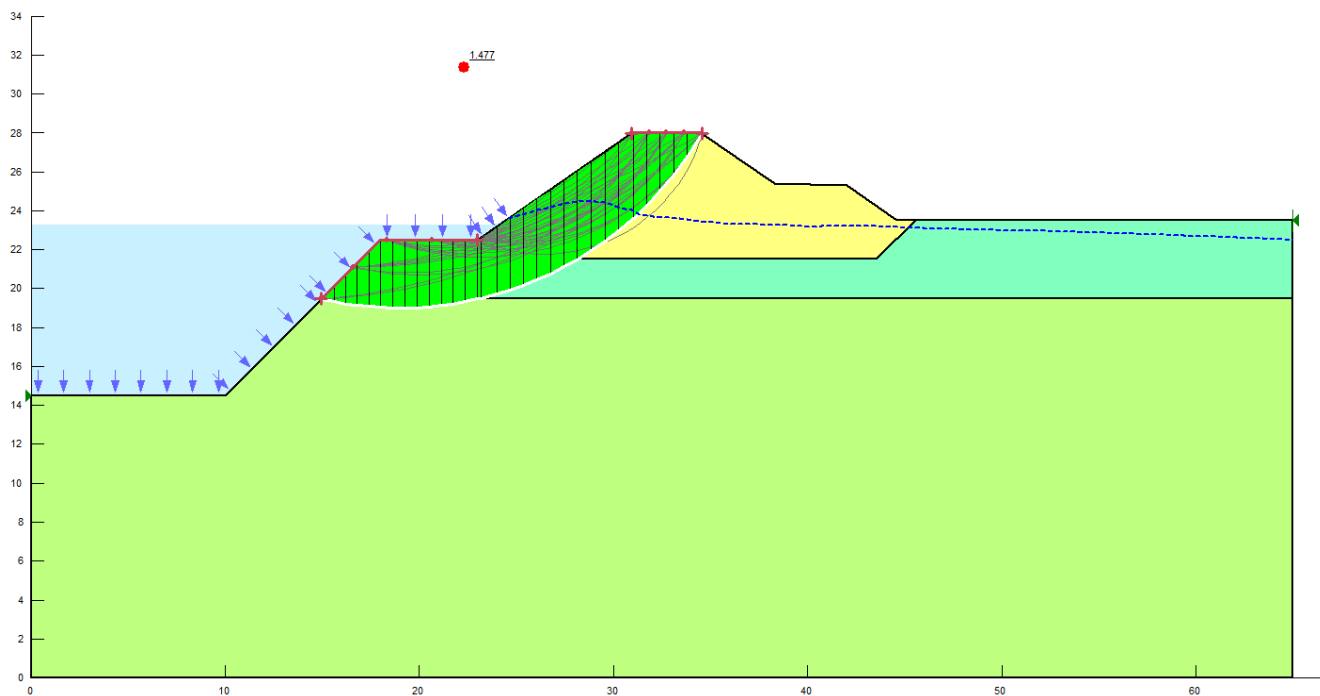
**FIGURA 8-8 VERIFICA DI STABILITÀ DEL PARAMENTO LATO FIUME IN FASE DI RECESSIONE DELL'ONDA DI PIENA – CONFIGURAZIONE SENZA BANCA ARGINALE**

Il coefficiente di sicurezza minimo, associato alla superficie di scivolamento critica, che delimita la porzione verde dell'argine nella figura precedenti, risulta pari a 1.373 in fase di recessione dell'onda. La superficie critica di scivolamento ricade all'interno di un range di superfici di scivolamento (in grigio), corrispondenti a coefficienti di sicurezza maggiori.

Il fattore di sicurezza si mantiene quindi superiore al minimo valore previsto da normativa anche nella condizione più critica.

### 8.2.2. Verifica di stabilità nella configurazione con banca arginale

Nell'immagine seguente sono illustrati i risultati più significativi delle elaborazioni effettuate.



**FIGURA 8-9 VERIFICA DI STABILITÀ DEL PARAMENTO LATO FIUME IN FASE DI RECESSIONE DELL'ONDA DI PIENA – CONFIGURAZIONE CON BANCA ARGINALE**

Il coefficiente di sicurezza minimo, associato alla superficie di scivolamento critica, che delimita la porzione verde dell'argine nella figura precedenti, risulta pari a 1.477 in fase di recessione dell'onda. La superficie critica di scivolamento ricade all'interno di un range di superfici di scivolamento (in grigio), corrispondenti a coefficienti di sicurezza maggiori.

Il fattore di sicurezza si mantiene quindi superiore al minimo valore previsto da normativa anche nella condizione più critica.

## **9. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE SUI RISULTATI DELLE SIMULAZIONI**

Le verifiche di filtrazione e stabilità globale condotte per due diverse configurazioni del rilevato arginale in progetto in sponda destra del Fiume Po in Comune di Gualtieri (RE), al fine di ripristinare il tratto di argine golendale collassato durante la piena del novembre 2019, sono state articolate nelle seguenti fasi:

- 1) Definizione di un modello geotecnico del terreno, a partire dalle risultanze di indagini geotecniche di campo, integrate dalla geometria degli argini e dalle condizioni idrauliche al contorno;
- 2) Esecuzione delle analisi numeriche di infiltrazione nei rilevati arginali;
- 3) Esecuzione delle analisi numeriche di stabilità dei paramenti.

I risultati delle analisi di filtrazione, condotte per la sezione dell'argine più prossima al budrio creatosi durante la piena del novembre 2019 e attualmente in corso di ripascimento, hanno messo in luce una criticità associata al fenomeno di filtrazione attraverso il corpo e il substrato arginale, che si instaura in occasione della propagazione della piena di riferimento per il F.Po, nella configurazione dell'argine golendale senza banca.

Il perdurare del colmo della piena (nella simulazione per una durata cautelativa di 200.000 sec) porta infatti ad un incremento della saturazione degli strati più superficiali del terreno e del corpo arginale che, accoppiati alla presenza di una falda posta a poche decine di centimetri dal piano campagna, può favorire la fuoriuscita di acqua al piede dell'argine.

Queste condizioni di filtrazione sono rischiose per il rilevato arginale per il possibile innesco di fenomeni di sifonamento al piede, che determina la progressiva rimozione della frazione fine del materiale lungo vie preferenziali.

Effettuando le medesime analisi, ma nella configurazione dell'argine con banca, si nota come l'allungamento del percorso di filtrazione renda l'argine maggiormente protetto rispetto a possibili fenomeni di sifonamento al piede.

Le analisi di stabilità dei paramenti arginali lato fiume, implementate a partire dai risultati delle analisi di filtrazione, hanno evidenziato come la situazione più critica sia dovuta al calo di resistenza al taglio associato all'aumento delle velocità di filtrazione nella fase di recessione dell'onda di piena.

In tutti i casi i valori del coefficiente di sicurezza, considerando l'argine eseguito con materiali di classe A4-A6 posto in opera secondo le prescrizioni di progetto, si mantengono sempre superiori ai minimi imposti da normativa anche nelle condizioni più critiche.