





(RE-E-987) LAVORI DI ADEGUAMENTO
 FUNZIONALE DELL'ARGINATURA MAESTRA DI PO
 IN COMUNE DI BORETTO (RE) PER IL
 CONTRASTO DEI FENOMENI DI FILTRAZIONE
 (CUP: B74H17000280002 CIG: 7520378C3D)
1° LOTTO

PROGETTO ESECUTIVO

00	06/2020	Emissione per commenti	DM	NP	DC
INDICE	DATA	MODIFICHE	DISEGN.	CONTR.	APPROV.
RELAZIONI TECNICHE SPECIALISTICHE					
I PROGETTISTI: Dott. Ing. Denis Cerlini Dott. Ing. Marco Belicchi Dott. Ing. Nicola Pessarelli Dott. Ing. Michele Ferrari GEOLOGIA: Dott. Geol. Carlo Caleffi Dott. Geol. Francesco Cerutti Dott. Ing. Giulia Mainardi			HANNO COLLABORATO: Dott. Ing. Cecilia Benassi Dott. Ing. Daniele Mori ARCHEOLOGIA: Dott. Archeol. Daria Pasini ASPETTI TECNOLOGICI: Dott. Ing. Armando Vanin Dott. Ing. Lorenzo Belicchi		
			ELABORATO: BRTT 31.02		
IL RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO DI PROFESSIONISTI:    			GIUGNO 2020		

INDICE

1. PREMESSA	3
2. RELAZIONE IDROLOGICA ED IDRAULICA	4
3. RELAZIONE SULLE VERIFICHE GEOTECNICHE	5
3.1 PREMESSE	5
3.2 SCELTA DEI TRATTI OMOGENEI E RELATIVE SEZIONI DI RIFERIMENTO	5
3.3 GEOMETRIA DELLE SEZIONI	8
3.4 CONDIZIONI AL CONTORNO	11
3.5 CRITERI DI VERIFICA	11
3.6 MODELLO MATEMATICO DI FILTRAZIONE	13
3.7 VERIFICHE SVILUPPATE NELL'AMBITO DELLA PROGETTAZIONE DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA	16
3.7.1 Premessa	16
3.7.2 Valori di riferimento delle permeabilità	16
3.7.3 Simulazioni volte alla valutazione della sensibilità del modello (sezione 33)	17
3.7.4 Simulazioni stato di fatto	28
3.7.5 Simulazioni progetto	45
3.1 VERIFICHE ED APPROFONDIMENTI SVILUPPATI NELL'AMBITO DELLA PROGETTAZIONE DEFINITIVA	51
3.1.1 Premessa	51
3.1.2 Valori di riferimento delle permeabilità	51
3.1.3 Simulazioni stato di fatto	52
3.1.4 Simulazioni progetto	56
4. RELAZIONE SUGLI ASPETTI TECNOLOGICI DELLA SOLUZIONE ADOTTATA... ..	60
4.1 PREMESSA	60
4.2 INIEZIONE DI MISCELA CEMENTIZIA AD ALTA PRESSIONE - JET GROUTING	61
4.2.1 La tecnologia	61
4.2.2 Le attrezzature	62
4.2.3 La tecnica esecutiva	63
4.2.4 Verifiche e controlli	64
4.2.5 Vantaggi della tecnologia	67
4.2.6 Campo prove	70
5. RELAZIONE ARCHEOLOGICA	71

6. PIANO DI GESTIONE DELLE MATERIE	72
6.1 PREMessa.....	72
6.2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....	72
6.3 TIPOLOGIE DI MATERIALE.....	73
6.4 FABBISOGNI DI MATERIALE.....	73
6.5 MATERIALI PRODOTTI E TRATTAMENTO DEGLI STESSI	74
6.6 BILANCIO DEI MATERIALI	75
6.7 SITI DI DEPOSITO	76

ALLEGATO A: Sezioni rappresentative dei tratti omogenei

1. PREMESSA

Con Determina n. 812 del 31.08.2018, l'Agenzia Interregionale per il fiume Po ha aggiudicato definitivamente allo scrivente RTP "Majone&Partners S.r.l. (mandataria), Engeo S.r.l., Studio Majone Ingegneri Associati, Ing. Giulia Mainardi (mandanti)" l'incarico per la progettazione di fattibilità tecnica ed economica, definitiva nonché di progettazione esecutiva di un primo lotto di interventi finanziati dei *"Lavori di adeguamento funzionale dell'arginatura maestra di Po in comune di Boretto (RE) per il contrasto dei fenomeni di filtrazione"*.

Il presente documento rappresenta, nell'ambito della progettazione esecutiva prevista dall'art. 23 del D.Lgs. 50/2016, le *"Relazioni tecniche specialistiche"*, redatte ai sensi dell'art. 35 del D.P.R. 207/2010.

La progettazione esecutiva in oggetto riguarda il primo lotto funzionale di interventi, da realizzarsi nell'ambito dei finanziamenti disponibili. In particolare, rispetto agli interventi individuati nel progetto Definitivo, il primo lotto funzionale riguarda un tratto in cui la realizzazione delle opere risulta prioritaria, in virtù delle maggiori problematiche di filtrazione evidenziate anche nel corso degli ultimi eventi di piena del fiume Po, come meglio descritto nella Relazione Generale (BRTT 31.01).

2. RELAZIONE IDROLOGICA ED IDRAULICA

Nella redazione del presente progetto esecutivo sono stati utilizzati livelli idrici di riferimento ricavati dal documento *“Fiume Po da Torino al mare - Analisi del livello di sicurezza delle arginature rispetto al sormonto”* dell'Autorità di Bacino del Fiume Po (Giugno 2014).

In particolare, i tre livelli di piena utilizzati, estratti dal suddetto documento relativamente alla sponda destra del fiume Po riguardano:

- Simpo '82;
- PAI Tr 200;
- Piena 2000.

Le sezioni di riferimento per la localizzazione dei suddetti livelli di piena sono quelle del rilievo Aipo 2005, le cui tracce sono riportate anche negli elaborati del presente progetto (planimetrie e profili longitudinali)

In particolare, nel tratto di studio che comprende le sezioni AIPO S37 (Ponte di Viadana), S37bis, S37A, S37B, S37C ed S38 (appena a monte dell'argine golendale di “Violardi”) il livello più elevato dei 3 risulta essere sempre quello PAI Tr200; tale livello è stato quindi assunto come livello di riferimento per le verifiche geotecniche di cui al successivo capitolo 3.

3. RELAZIONE SULLE VERIFICHE GEOTECNICHE

3.1 Premesse

Al fine di valutare i tratti e le modalità di intervento, sono state sviluppate le opportune verifiche di carattere geotecnico su sezioni rappresentative di tratti omogenei individuati già in fase di progettazione di fattibilità tecnica ed economica.

In relazione in quanto disposto dal committente nel Disciplinare Tecnico a base del servizio di progettazione, sintetizzato nel titolo *“Lavori di adeguamento funzionale dell'arginatura maestra di Po in comune di Boretto (RE) per il **contrasto dei fenomeni di filtrazione**”*, occorre precisare che per “verifiche geotecniche” si intendono quelle di cui al Cap. 6.2.4.2 delle NTC 2018 *“Verifiche nei confronti degli stati ultimi idraulici”*.

3.2 Scelta dei tratti omogenei e relative sezioni di riferimento

Nell'ambito dello sviluppo della progettazione di fattibilità tecnica ed economica, sono stati individuati, nell'area oggetto di studio (tratto di argine destro maestro di Po compreso tra il ponte di Viadana e l'inizio del argine golenale di “*Violardi*” al confine tra il comune di Boretto e quello di Gualtieri) tratti “omogenei”, sulla base delle caratteristiche geometriche del rilevato e della presenza di elementi strutturali (nella fattispecie muri) di difesa idraulica.

Sulla base di tale preliminare classificazione sono stati individuati sei tratti omogenei di seguito illustrati:

- A. Tratto compreso tra la sezione 01 e la sezione 16 (da Ponte di Viadana a Boretto), caratterizzato da altezza del rilevato compresa tra 5.60 e 6.60 m e presenza di una bancata lato campagna;
- B. Tratto compreso tra la sezione 16 e la sezione 20 (Boretto), caratterizzato da altezza del rilevato compresa tra 4.70 e 5.60 m, presenza di muro di difesa in c.a., nessuna bancata, presenza di una rampa lato campagna di collegamento all'abitato di Boretto;
- C. Tratto compreso tra la sezione 20 e la sezione 28 (Boretto), caratterizzato da altezza del rilevato compresa tra 4.60 e 6.30 m, presenza di muro di di-

fesa in c.a., quota nettamente differente tra lato golena e lato campagna, presenza di rampe di discesa/salita dall'argine;

- D. Tratto compreso tra la sezione 28 e la sezione 41 (valle abitato di Boretto), caratterizzato da altezza del rilevato compresa tra 6.10 e 6.80 m, presenza di una bancata lato campagna e di alcune rampe di discesa/salita dall'argine;
- E. Tratto compreso tra la sezione 41 e la sezione 51 (valle Boretto-valle bretella di collegamento tra ex SS 62 e Cispadana), caratterizzato da altezza del rilevato compresa tra 7.00 e 7.40 m - a meno di un breve tratto in corrispondenza dei fontanazzi "storici" dove, presumibilmente in epoca recente, è stato ricaricato un "terrazzo" di altezza pari a circa 2 m – e dalla presenza di una bancata intermedia lato campagna. E' il tratto in cui si sono manifestati i principali fontanazzi in concomitanza con le piene storiche più rilevanti, non ultime quelle del 1994, 2000 e 2014;
- F. Tratto compreso tra la sezione 51 e la sezione 62 (valle bretella di collegamento tra ex SS 62 e Cispadana-inizio argine golendale), caratterizzato da altezza del rilevato compresa tra 6.80 e 7.30 m e dalla presenza di una bancata intermedia lato campagna.

In ciascuno di tali tratti è stata individuata, prima per via grafica (vedi allegato A) e successivamente anche per via analitica (vedi Tabella 3-1), la sezione più gravosa sulla base delle caratteristiche geometriche e dei livelli di piena di riferimento. In particolare i parametri presi a riferimento nella scelta sono stati:

- differenza di quota tra massima piena di riferimento e quota piano campagna;
- pendenza delle scarpate e numero di bancate intermedie;
- differenza di quota tra massima piena e piano golena;
- larghezza della sommità arginale.

Successivamente è stata effettuata una valutazione che tenesse conto degli aspetti di natura geologica/litostratigrafica che hanno confermato la scelta delle sezioni.

Tabella 3-1 Caratteristiche geometriche delle sezioni per l'individuazione delle più gravose per ciascun tratto omogeneo

Sezione	GEOMETRIA						LIVELLI				PRESENZA DIAFRAMMA	TRATTO OMOGENEO
	Progressiva	Parziale	Quota sommata argine (Sezione)	Quota piede argine dx (campagna)	h max argine	Quota piede argine sx (fiume)	W.L. SIMPO 82	W.L. PAI T200	W.L. PIENA 2000	Δ W.L. MAX - P.C.		
	[m]	[m]	[m s.l.m.]	[m s.l.m.]	[m]	[m s.l.m.]	[m s.l.m.]	[m s.l.m.]	[m s.l.m.]	[m]		
-	0.00	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SEZ. 00	904.84	904.84	30.82	23.05	7.77	25.53	29.33	29.65	29.20	6.60	SI	-
SEZ. 01 = INIZIO INTERV.	981.89	77.05	31.38	-	-	27.85	29.33	29.65	29.18	-	NO	A
SEZ. 02	1029.41	47.52	30.73	23.18	7.55	28.00	29.32	29.64	29.17	6.46	NO	A
SEZ. 03	1096.74	67.33	30.19	23.20	6.99	27.69	29.32	29.63	29.16	6.43	NO	A
SEZ. 04	1151.22	54.48	30.14	23.15	6.99	25.52	29.31	29.63	29.15	6.48	NO	A
SEZ. 05	1226.55	75.34	29.97	23.35	6.62	25.85	29.30	29.62	29.13	6.27	NO	A
SEZ. 06	1323.38	96.83	29.90	23.52	6.38	26.15	29.29	29.60	29.12	6.08	NO	A
SEZ. 07	1396.81	73.42	30.06	25.04	5.02	28.60	29.28	29.59	29.10	4.55	NO	A
SEZ. 08	1633.59	236.79	30.19	-	-	28.33	29.25	29.56	29.06	-	NO	A
SEZ. 09	1682.48	48.88	30.19	-	-	19.96	29.24	29.55	29.05	-	NO	A
SEZ. 10	1766.30	83.83	30.05	24.34	5.71	27.47	29.23	29.54	29.05	5.20	SI	A
SEZ. 11	1832.76	66.46	30.13	23.86	6.27	27.40	29.22	29.53	29.04	5.67	SI	A
SEZ. 12	1895.61	62.85	30.15	23.71	6.44	27.68	29.21	29.52	29.04	5.81	SI	A
SEZ. 13	1990.08	94.48	30.13	23.53	6.60	27.44	29.20	29.50	29.04	5.97	SI	A
SEZ. 14	2068.75	78.67	30.18	23.43	6.75	27.18	29.19	29.49	29.03	6.06	SI	A
SEZ. 15	2140.92	72.16	30.28	23.81	6.47	26.26	29.18	29.48	29.03	5.67	SI	A
SEZ. 16	2231.42	90.50	29.67	23.94	5.73	26.92	29.17	29.47	29.03	5.53	SI	A-B
SEZ. 17	2287.23	55.82	29.19	23.87	5.32	27.12	29.16	29.46	29.02	5.59	SI	B
SEZ. 18	2356.34	69.10	29.23	24.58	4.65	26.06	29.15	29.45	29.02	4.87	SI	B
SEZ. 19	2443.77	87.43	29.21	24.71	4.50	26.11	29.14	29.44	29.02	4.73	SI	B
SEZ. 20	2532.64	88.87	29.25	24.25	5.00	26.17	29.13	29.42	29.01	5.17	SI	B-C
SEZ. 21	2630.10	97.46	29.20	23.15	6.05	26.53	29.12	29.41	29.01	6.26	SI	C
SEZ. 22	2715.38	85.28	29.15	24.76	4.39	27.76	29.11	29.40	28.99	4.64	SI	C
SEZ. 23	2754.01	38.63	29.10	23.44	5.66	26.92	29.10	29.39	28.98	5.95	SI	C
SEZ. 24	2806.34	52.33	29.13	23.31	5.82	27.15	29.10	29.38	28.96	6.07	SI	C
SEZ. 25	2872.08	65.74	29.12	23.56	5.56	27.25	29.09	29.38	28.95	5.82	SI	C
SEZ. 27	2965.53	93.45	29.13	23.81	5.32	27.09	29.07	29.36	28.92	5.55	SI	C
SEZ. 28	3064.67	99.14	29.12	23.60	5.52	27.61	29.06	29.35	28.90	5.75	SI	C-D
SEZ. 29	3155.88	91.21	29.82	23.18	6.64	26.45	29.05	29.33	28.88	6.15	SI	D
SEZ. 30	3214.23	58.35	29.40	23.05	6.35	27.09	29.04	29.33	28.86	6.28	SI	D
SEZ. 31	3312.81	98.58	29.84	23.19	6.65	27.04	29.03	29.31	28.83	6.12	SI	D
SEZ. 32	3393.11	80.31	29.85	23.13	6.72	26.96	29.02	29.30	28.81	6.17	SI	D
SEZ. 33	3472.70	79.59	29.96	22.91	7.05	27.08	29.01	29.29	28.79	6.38	SI	D
SEZ. 34	3555.77	83.07	29.97	22.83	7.14	27.33	28.99	29.28	28.77	6.45	NO	D
SEZ. 35	3621.45	65.68	29.78	22.52	7.26	27.71	28.98	29.27	28.76	6.75	NO	D
SEZ. 36	3698.00	76.55	29.81	22.64	7.17	28.23	28.97	29.26	28.74	6.62	NO	D
SEZ. 37	3784.50	86.50	29.84	22.88	6.96	27.49	28.96	29.24	28.71	6.36	NO	D
SEZ. 38	3877.96	93.46	29.83	22.54	7.29	27.53	28.95	29.23	28.69	6.69	NO	D
SEZ. 39	3962.02	84.06	29.85	22.46	7.39	27.83	28.94	29.22	28.69	6.76	NO	D
SEZ. 40	4024.96	62.93	29.82	22.45	7.37	27.81	28.93	29.21	28.68	6.76	NO	D
SEZ. 41	4121.16	96.20	29.76	22.02	7.74	27.83	28.92	29.19	28.68	7.17	SI	D-E
SEZ. 42	4222.43	101.27	29.63	21.79	7.84	28.23	28.91	29.18	28.68	7.39	SI	E
SEZ. 43	4303.16	80.73	29.69	23.69	6.00	28.35	28.90	29.17	28.67	5.48	SI	E
SEZ. 44	4384.39	81.23	29.77	23.97	5.80	28.33	28.88	29.16	28.67	5.19	SI	E
SEZ. 45	4458.56	74.16	29.64	21.96	7.68	27.61	28.88	29.14	28.67	7.18	SI	E
SEZ. 46	4497.72	39.16	29.63	22.17	7.46	27.25	28.87	29.14	28.67	6.97	SI	E
SEZ. 47	4583.02	85.29	29.75	22.08	7.67	26.80	28.86	29.13	28.66	7.05	SI	E
SEZ. 48	4626.52	43.50	29.70	22.11	7.59	24.05	28.85	29.12	28.66	7.01	SI	E
SEZ. 49	4686.59	60.07	29.77	21.89	7.88	23.88	28.85	29.11	28.66	7.22	SI	E
SEZ. 50	4745.13	58.54	29.84	-	-	23.94	28.84	29.10	28.66	-	SI	E
SEZ. 51	4844.62	99.49	29.72	21.84	7.88	23.95	28.83	29.09	28.65	7.25	SI	E
SEZ. 52	4941.89	97.27	29.64	21.74	7.90	23.94	28.81	29.07	28.65	7.33	SI	F
SEZ. 53	5032.69	90.81	29.57	22.05	7.52	23.91	28.80	29.06	28.65	7.01	SI	F
SEZ. 54	5085.23	52.54	29.49	22.00	7.49	28.87	28.79	29.05	28.65	7.05	SI	F
SEZ. 55	5152.56	67.33	29.58	21.96	7.62	28.57	28.79	29.04	28.64	7.08	SI	F
SEZ. 56	5246.53	93.97	29.65	-	-	28.50	28.77	29.03	28.64	-	SI	F
SEZ. 57	5340.53	94.00	29.76	21.82	7.94	27.25	28.76	29.01	28.64	7.19	SI	F
SEZ. 58	5426.58	86.05	29.90	21.87	8.03	27.65	28.75	29.00	28.63	7.13	SI	F
SEZ. 59	5504.95	78.37	29.78	22.05	7.73	27.50	28.74	28.99	28.63	6.94	SI	F
SEZ. 60	5592.41	87.46	29.71	22.10	7.61	26.58	28.72	28.98	28.62	6.88	SI	F
SEZ. 61	5680.17	87.75	29.67	21.75	7.92	26.90	28.70	28.97	28.60	7.22	SI	F
SEZ. 62 = FINE INTERV.	5762.27	82.10	29.56	22.11	7.45	24.90	28.68	28.96	28.59	6.85	SI	F
SEZ. 63	5799.83	37.56	29.65	22.25	7.40	22.31	28.67	28.95	28.58	6.70	SI	-
-	7102.85	1303.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Sulla base di quanto appena descritto, per ciascun tratto omogeneo è stata individuata una sezione di riferimento per la quale sono state successivamente sviluppate le verifiche geotecniche. In particolare:

1. Tratto A: Sezione 04;
2. Tratto B: Sezione 18;
3. Tratto C: Sezione 21;
4. Tratto D: Sezione 33;
5. Tratto E: Sezione 47;
6. Tratto F: Sezione 52.

Si rimanda all'allegato A per la rappresentazione grafica delle sezioni ed ai successivi paragrafi per la descrizione delle verifiche condotte.

3.3 Geometria delle sezioni

La geometria delle sezioni oggetto di verifica è stata ricostruita seguendo, in via schematica, le sezioni di cui allegato A del presente documento.

Attraverso l'interfaccia grafica del modello è stata quindi riprodotta la geometria della sezione di riferimento e l'andamento stratigrafico dei terreni posti al di sotto del rilevato arginale.

Ai fini delle verifiche di filtrazione, la sezione è stata schematizzata in modo da ricondurla ad una situazione geometricamente semplificata, mai meno gravosa di quella reale. Le condizioni di moto sono state supposte piane ed il campo di moto è stato così delimitato:

- inferiormente, con un piano impermeabile posto alla base delle sabbie rilevate mediante le indagini in sito, e comunque con uno strato di spessore 20 metri;
- lato fiume con una sezione verticale impermeabile posta in prima istanza in golenia e poi a circa metà dell'alveo di magra del fiume Po;
- lato campagna con una sezione verticale impermeabile posta mediamente a circa 50 m dal piede del rilevato arginale.

Con riferimento all'assetto litostratigrafico della tabella sopra riportata per ogni sezione è stato quindi riprodotto il corpo arginale, lo strato di deposito lato fiume, lo strato di materiale coesivo dei terreni di fondazione e le sabbie dei terreni sottostanti. Nelle figure seguenti si riportano le geometrie delle sezioni ricostruite indicando i vari terreni con la colorazione seguente:

- verde: rilevato arginale;
- grigio-marrone: materiale coesivo dei terreni di fondazione;
- giallo: sabbie sottostanti;
- azzurro: depositi golenali.



Figura 3-1 Schematizzazione geometrica sezione 4

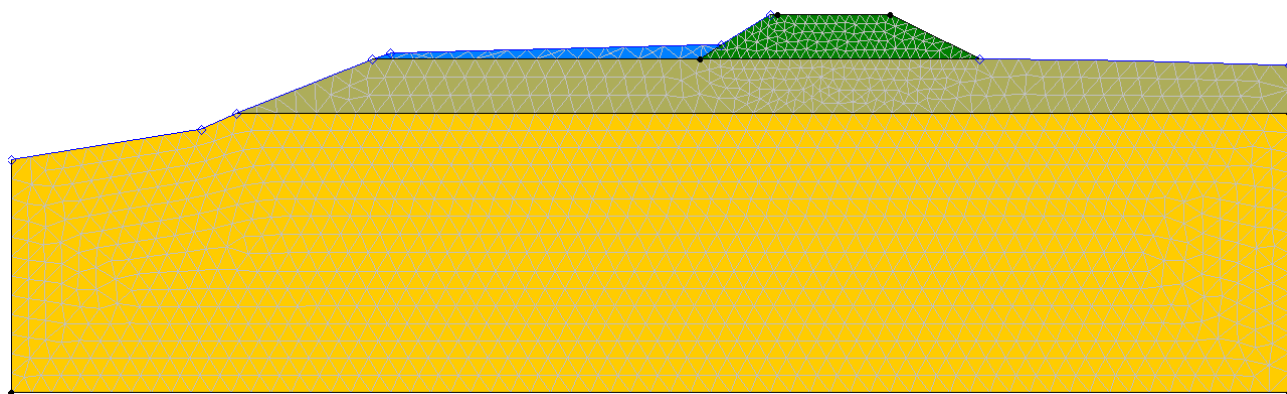


Figura 3-2 Schematizzazione geometrica sezione 18

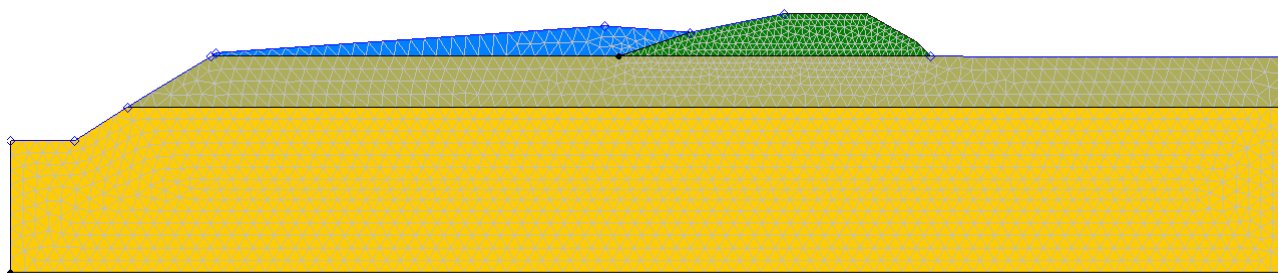


Figura 3-3 Schematizzazione geometrica sezione 21

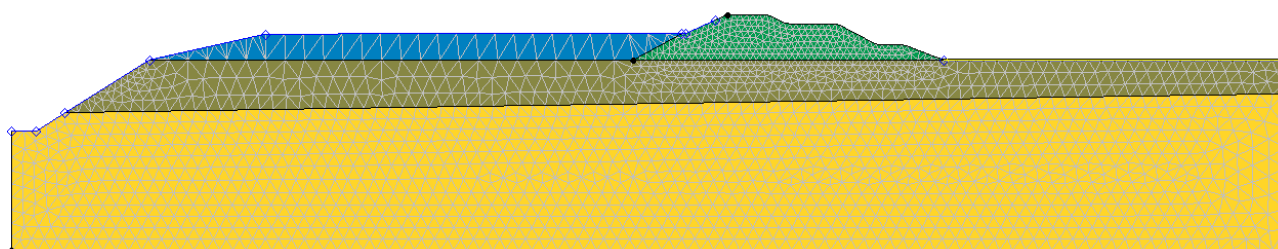


Figura 3-4 Schematizzazione geometrica sezione 33

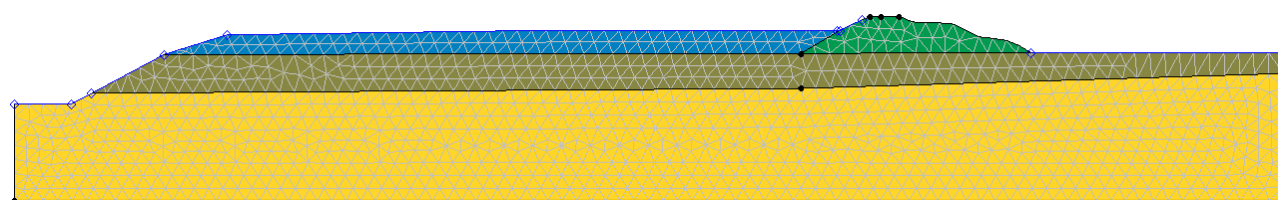


Figura 3-5 – Schematizzazione geometrica sezione 47

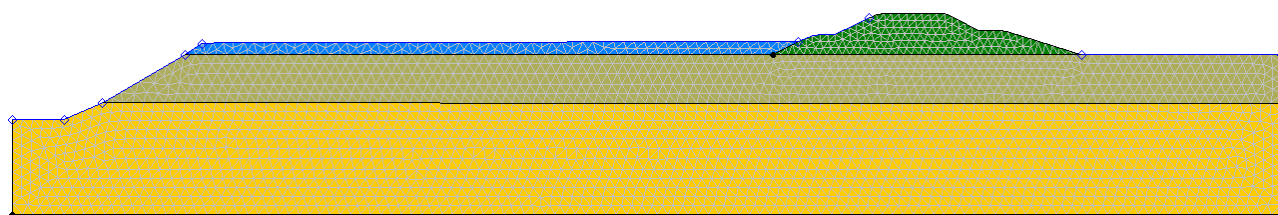


Figura 3-6 – Schematizzazione geometrica sezione 52

3.4 Condizioni al contorno

Quale condizione al contorno lato fiume viene assunto il livello di piena del Po fissato dal PAI (leggermente superiore al SIMPO nonché alla piena del 2000); tale carico idraulico viene imposto lungo tutto il contorno della sezione lato fiume fino in corrispondenza del letto di magra.

A lato campagna invece è stata presa in considerazione la condizione più gravosa ovvero quella di terreno saturo imponendo una condizione di carico costante posta alla stessa quota del piano campagna.

Inferiormente, e lungo le sezioni verticali lato fiume e lato campagna è stata imposta una condizione impermeabile di non flusso.

Tutte le simulazioni sono state in condizioni di moto permanente, condizione cautelativa rispetto ad un modello di filtrazione in moto vario, ma abbastanza realistica nel caso di specie tenuto conto delle durate di diverse giornate delle piene di Po.

3.5 Criteri di verifica

Come già detto, le verifiche a sifonamento e sollevamento sono state svolte in ottemperanza alle NTC 20.02.2018.

In particolare per quanto riguarda la verifica al sifonamento si è fatto riferimento al metodo del gradiente critico. Il metodo di verifica del gradiente critico consente di mettere a confronto i massimi gradienti che si determinano nel campo di filtrazione con il cosiddetto gradiente critico ottenuto imponendo l'equilibrio tra le forze stabilizzanti (forza peso) e le forze destabilizzanti (forza di filtrazione).

Con riferimento al concetto di gradiente idraulico critico si ricorda che il movimento dell'acqua all'interno di un materiale granulare dà luogo ad un campo di pressioni neutre che possono arrivare ad annullare la pressione effettiva e di conseguenza le particelle di un terreno granulare possono essere trascinate dall'acqua in movimento. Il valore del gradiente critico, secondo fonti di letteratura, si aggira normalmente intorno all'unità (si tratta di un numero puro adimensionale), mentre i massimi valori del gradiente all'interno del campo di moto si possono calcolare dividendo il massimo valore della velocità riscontrato per il valore della permeabilità del substrato all'interno del quale avviene il moto: il grado di sicurezza al sifona-

mento è tanto più elevato quanto più il gradiente così determinato è inferiore all'unità.

Per la verifica al sifonamento si assume che il rapporto tra il gradiente critico ed il gradiente massimo si superiore ad un coefficiente di sicurezza. Nella comune letteratura tecnica tale coefficiente deve essere superiore a 2.

Dai risultati delle simulazioni risulterà che i gradienti massimi in uscita dal campo di moto si localizzano a lato campagna lungo la linea di possibile fuoriuscita della falda ed in prossimità del piede arginale. Procedendo lungo la verticale i gradienti idraulici diminuiscono per cui la verifica col metodo del gradiente critico risulta finalizzata alla verifica di un possibile trascinamento di materiale in corrispondenza del piede d'argine.

Oltre alla verifica al sifonamento, in ottemperanza alle NTC 20.02.2018. le sezioni arginali sono state verificate anche nei confronti degli stati limite ultimi di sollevamento. A tal fine, nella valutazione delle pressioni interstiziali e delle quote piezometriche caratteristiche, si devono assumere le condizioni più sfavorevoli, considerando i possibili effetti delle condizioni stratigrafiche. Le verifiche di sicurezza idraulica, che riguardano il pericolo di sollevamento degli strati impermeabili per effetto della sottopressione idraulica agente negli strati permeabili di fondazione, viene condotta con la seguente relazione:

$$G_{soll} = \frac{\sum_i H_{ti} \times \gamma_{ti}}{\gamma_w \times h_a}$$

dove H_{ti} e γ_{ti} indicano rispettivamente lo spessore e il peso di volume totale degli strati i-esimi di terreno impermeabile (γ_{ti} assunto costante e pari a 18 kN/m^3), e $\gamma_w \times h_a$ la sottopressione idraulica agente negli strati permeabili. La verifica idraulica nei confronti del pericolo a sollevamento è soddisfatta se il valore di progetto dell'azione instabilizzante V_{INST} è minore della somma delle azioni permanenti V_{STAB} e delle resistenze, ovvero:

$$V_{INST} \leq V_{STAB}$$

I coefficienti parziali per determinare i valori di progetto sono riportati nella seguente tabella 6.2.III delle NTC 18.

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

	Effetto	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	Sollevamento (UPL)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0,9
	Sfavorevole		1,1
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	γ_{G2}	0,8
	Sfavorevole		1,5
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_{Qi}	0,0
	Sfavorevole		1,5

Figura 3-7 Tabella 6.2.III delle NTC 2018

Nel presente studio si è fatto riferimento alla condizione di carichi permanenti G_1 adottando come coefficienti moltiplicativi i valori di 0,9 e 1,1 rispettivamente per le azioni stabilizzanti e instabilizzanti.

3.6 Modello matematico di filtrazione

Per le verifiche di filtrazione del rilevato arginale esistente, per ognuna delle sezioni di riferimento, è stato implementato un modello bidimensionale agli elementi finiti attraverso il codice di calcolo *SEEP2D* e l'interfaccia grafica *GMS 6.0* (**Groundwater Modelling System**).

I calcoli sono stati effettuati utilizzando un modello matematico agli elementi finiti bidimensionale sul piano verticale. L'equazione differenziale che descrive il moto vario bidimensionale nel piano verticale entro un acquifero saturo è la seguente:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

in cui:

- $h [m] = z + p/\gamma$ è il carico idraulico variabile da punto a punto in funzione del tempo ($h(x,z,t)$);
- γ è il peso specifico dell'acqua,

- $k_x, k_z [m/s]$ sono i valori dei coefficienti di permeabilità nelle due direzioni del piano verticale x-z;
- $S_S [m^{-1}]$ è il coefficiente di immagazzinamento specifico, funzione delle caratteristiche di comprimibilità dell'acqua e del mezzo poroso.

Salvo particolari applicazioni (problemi di subsidenza), considerato il valore molto piccolo di S_S si trascura interamente il termine a secondo membro dell'equazione sopra riportata. Con questa semplificazione scompare l'influenza diretta della variabile temporale e l'evoluzione temporale del carico idraulico è dovuta esclusivamente alle condizioni al contorno, anch'esse variabili nel tempo.

La soluzione, con S_S posto uguale a zero, viene individuata tramite il metodo degli elementi finiti; come è noto questo metodo prevede una suddivisione del dominio di interesse in elementi di forma regolare (mesh) entro i quali si ipotizza un certo andamento analitico (funzioni interpolari) della funzione incognita da individuare. Gli elementi sono definiti geometricamente dalle coordinate dei nodi di contorno in corrispondenza dei quali il metodo fornisce il valore dell'incognita.

Nel modello matematico adottato le funzioni interpolari sono state imposte lineari, le funzioni peso sono state poste uguali alle funzioni interpolari e di conseguenza anch'esse lineari (metodo di Galerkin).

Attraverso l'interfaccia grafica *GMS 6.0* i risultati delle simulazioni vengono rappresentati con schemi grafici di facile interpretazione nei quali si possono evidenziare le diverse componenti del campo di moto come ad esempio l'andamento dei carichi totali, delle sottopressioni, le linee di flusso, le velocità massime ecc. Nella presente nota per le simulazioni di verifica della sensibilità del modello si è deciso di rappresentare i risultati dei calcoli con l'andamento delle linee di flusso, mentre per le verifiche di stato di fatto e di progetto si è rappresentato l'andamento dei carichi e delle sottopressioni espresse in metri, in quanto utilizzate poi come criterio di verifica agli stati limite ultimi. Nelle figure seguenti si riportano alcuni esempi grafici dei risultati delle simulazioni idrauliche. Con riferimento all'andamento delle linee di flusso si evidenzia che l'andamento cromatico dal blu al rosso indica un aumento progressivo del flusso e di conseguenza delle velocità di filtrazione.

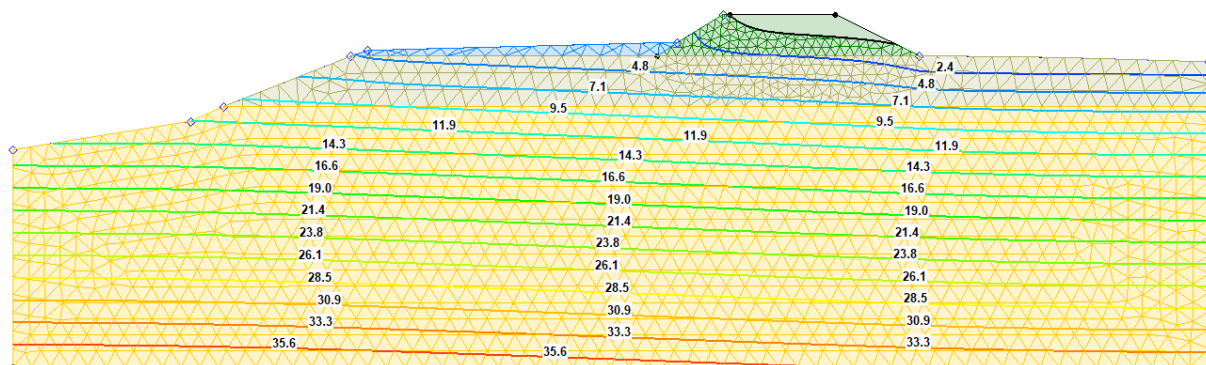


Figura 3-8 Risultati delle simulazioni in termini di sottopressioni idrauliche espresse in [m]

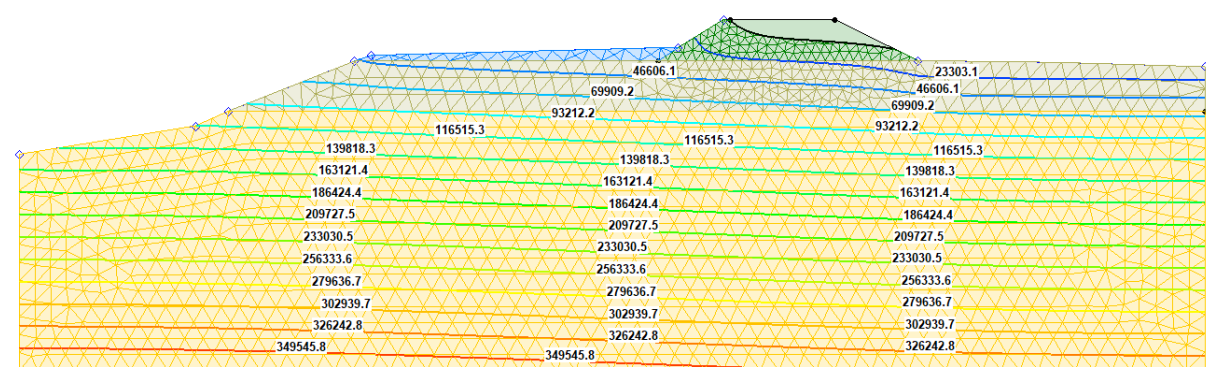


Figura 3-9 Risultati delle simulazioni in termini di sottopressioni idrauliche espresse in [N/mq]

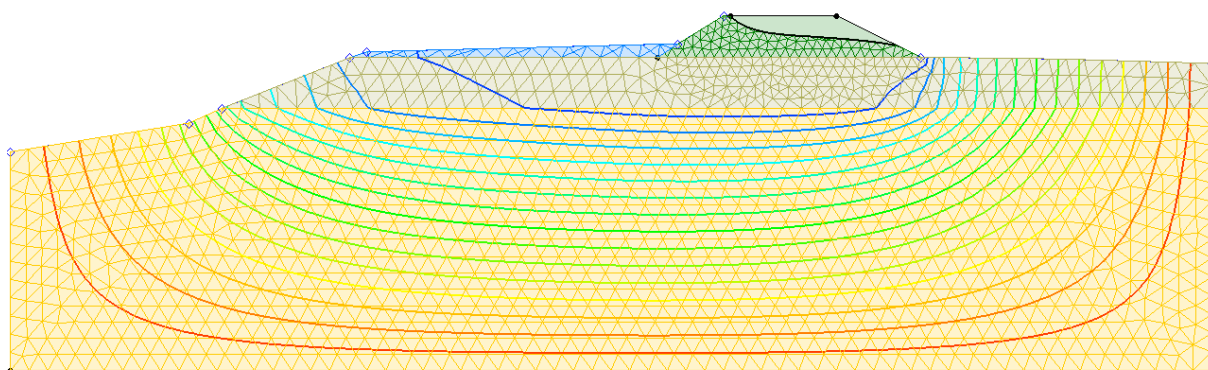


Figura 3-10 Risultati delle simulazioni espressi come andamento delle linee di flusso

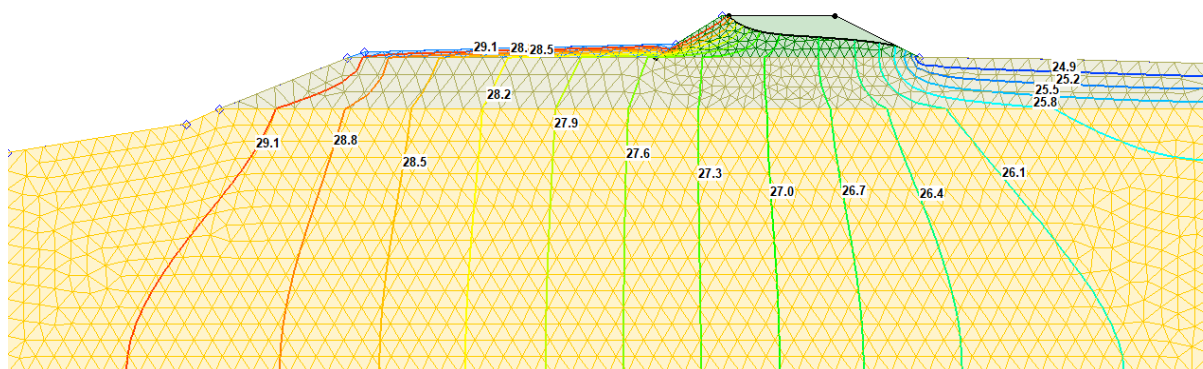


Figura 3-11 Risultati delle simulazioni espressi come andamento dei carichi idraulici [m s.l.m.]

3.7 Verifiche sviluppate nell'ambito della progettazione di fattibilità tecnica ed economica

3.7.1 Premessa

Si riportano di seguito le verifiche condotte nell'ambito della progettazione di fattibilità tecnica ed economica.

3.7.2 Valori di riferimento delle permeabilità

Per la valutazione dei valori di riferimento di permeabilità si è fatto riferimento agli elaborati geologici del progetto di fattibilità tecnica ed economica ed in particolare alla relazione geologica (Elaborato *BRTT 1.03*) nonché alle indagini condotte (Elaborato *BRTT 1.04*) dai quali sono stati evinti i seguenti valori di permeabilità di riferimento:

Litologia	<i>k</i> MAX	<i>k</i> MIN
Rilevato Arginale	1,00E-07	2,80E-11
Materiale coesivo (limi e argille dei terreni di fondazione)	6,30E-07	1,50E-10
Sabbie dei terreni sottostanti	1.15E-05	4,89E-06

Per quanto riguarda i depositi golenali, costituiti prevalentemente da materiale di cantiere (rottami, ecc.) sovrastante ad uno strato limoso più o meno potente, con-

siderato lo stato di compattazione dovuto al transito di mezzi di cantiere, è stato adottato un valore del coefficiente di permeabilità pari $1,0 \times 10^{-8}$ m/s.

3.7.3 Simulazioni volte alla valutazione della sensibilità del modello (sezione 33)

Configurazione 0: Sezione stato di fatto, senza diaframma, con valori di permeabilità massimi (sempre all'interno della finestra di valori riportata in tabella)

Vengono assunti i seguenti valori di k:

- argine: **1,00E-07**
- materiale coesivo: **6.30E-07**
- sabbie: **1,15E-05**
- depositi: **1,00E-08**

Con tali valori la simulazione presenta una **falda sospesa che attraversa il corpo arginale** come riportato nella figura seguente:

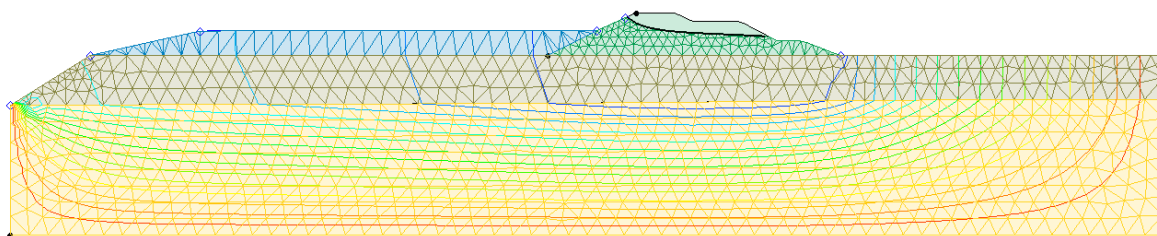


Figura 3-12 Sezione 33: andamento delle linee di flusso all'interno della sezione di calcolo

Le principali grandezze idrauliche ottenute sono di seguito riportate:

- gradiente in uscita: 0.53
- gradiente critico: 1
- F (coefficiente di sicurezza): $1/0.53 = 1.88 < 2$
- velocità filtrazione lato campagna: **2.80 E-07 m/s**
- sottopressione lato campagna al di sotto materiale coesivo: **10 m**

Configurazione 1: coefficienti di permeabilità medi/minimi in modo da eliminare falda sospesa sul corpo arginale

La sezione è sempre nella configurazione attuale, senza diaframma, e vengono assunti i seguenti valori di k:

- argine: **1,00E-09**
- materiale coesivo: **6.30E-07**
- sabbie: **4.8E-06**
- depositi: **1,00E-08**

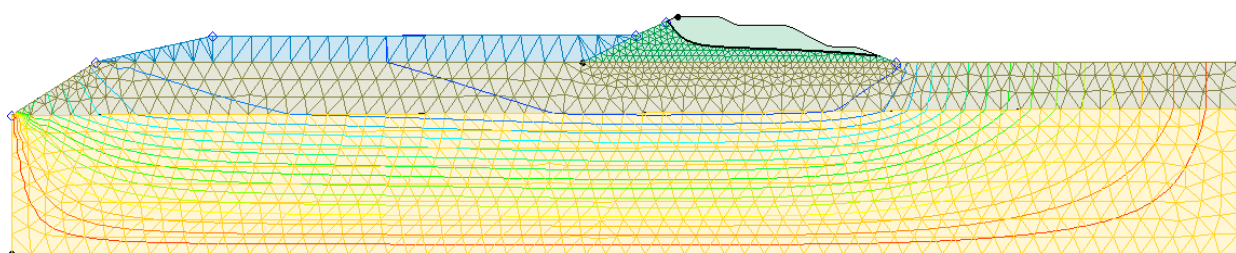


Figura 3-13 Sezione 33: andamento delle linee di flusso all'interno della sezione di calcolo

Le principali grandezze idrauliche ottenute sono di seguito riportate:

- gradiente in uscita: 0.32
- gradiente critico: 1
- F (coefficiente di sicurezza): $1/0.32 = 3.1 > 2$
- velocità filtrazione lato campagna: **1.60 E-07 m/s**
- sottopressione lato campagna al di sotto materiale coesivo: **8.3 m**

Con questa nuova configurazione **si elimina quasi completamente la falda sospesa dal corpo arginale**, come sembrerebbe essere nella realtà dei fatti sulla base delle informazioni raccolte, migliorano significativamente le verifiche a filtrazione mentre per quanto riguarda le sottopressioni la situazione migliora di poco.

Configurazione 2: come configurazione 1 ma con riduzione dello spessore delle sabbie di 10 metri

La sezione è sempre nella configurazione attuale, senza diaframma, e vengono assunti i seguenti valori di k:

- argine: **1,00E-09**
- materiale coesivo: **6.30E-07**
- sabbie: **4.8E-06**
- depositi: **1,00E-08**

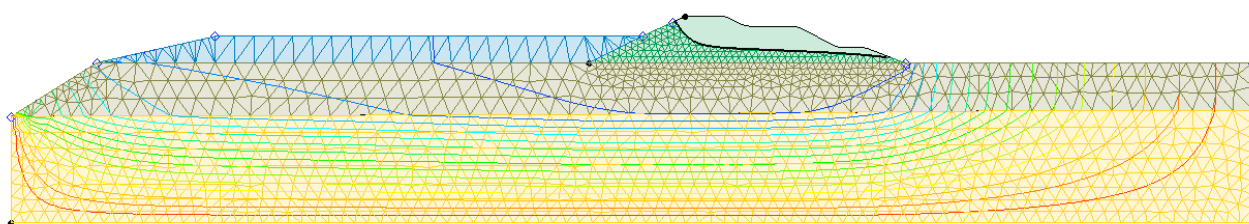


Figura 3-14 Sezione 33: andamento delle linee di flusso all'interno della sezione di calcolo

Le principali grandezze idrauliche ottenute sono di seguito riportate:

- gradiente in uscita: 0.31
- gradiente critico: 1
- F (coefficiente di sicurezza): $1/0.31 = 3.2 > 2$
- velocità filtrazione lato campagna: **1.5 E-07 m/s**
- sottopressione lato campagna al di sotto materiale coesivo: **8.3 m**

Con questa configurazione la situazione rimane pressoché invariata rispetto alla situazione precedente: **l'eventuale errore nella definizione della profondità della base delle sabbie non inficia significativamente la verifica.**

Configurazione 3: come configurazione 1 + diaframma esistente

La sezione è sempre nella configurazione attuale, con diaframma, e vengono assunti i seguenti valori di k:

- argine: **1,00E-09**
- materiale coesivo: **6.30E-07**
- sabbie: **4.8E-06**
- depositi: **1,00E-08**
- diaframma: **1,00E-10**

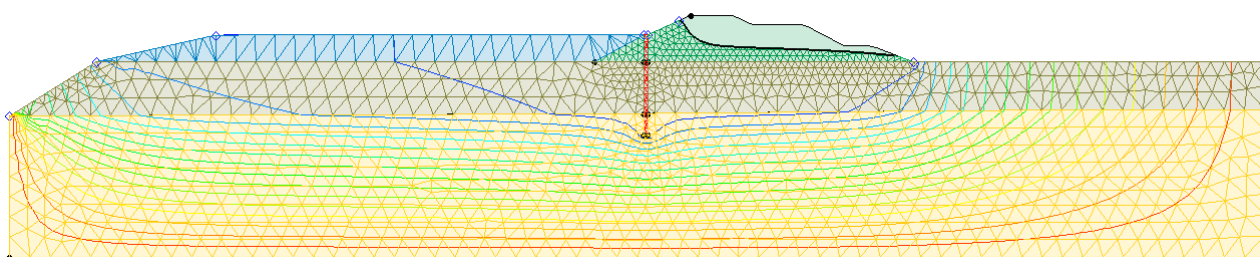


Figura 3-15 Sezione 33: andamento delle linee di flusso all'interno della sezione di calcolo

Le principali grandezze idrauliche ottenute sono di seguito riportate:

- gradiente in uscita: 0.32
- gradiente critico: 1
- F (coefficiente di sicurezza): $1/0.32 = 3.1 > 2$
- velocità filtrazione lato campagna: **1.6 E-07 m/s**
- sottopressione lato campagna al di sotto materiale coesivo: **8.3 m**

Con questa configurazione la situazione rimane pressoché invariata rispetto alla situazione precedente: **la presenza del diaframma non inficia la verifica.**

Configurazione 4: come configurazione 3 con diaframma approfondito per circa metà strato delle sabbie

La sezione può ritenersi una prima ipotesi di progetto, con diaframma prolungato, e vengono assunti i seguenti valori di k:

- argine: **1,00E-09**
- materiale coesivo: **6.30E-07**
- sabbie: **4.8E-06**
- depositi: **1,00E-08**
- diaframma: **1,00E-10**

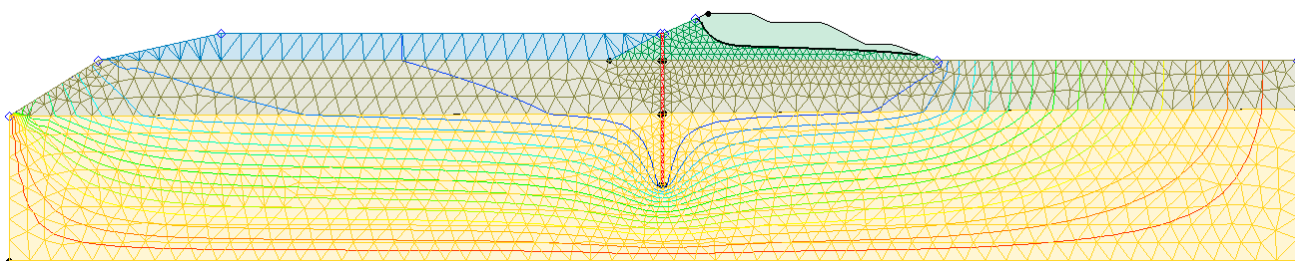


Figura 3-16 – Sezione 33: andamento delle linee di flusso all'interno della sezione di calcolo

Le principali grandezze idrauliche ottenute sono di seguito riportate:

- gradiente in uscita: 0.20
- gradiente critico: 1
- F (coefficiente di sicurezza): $1/0.20 = 5 > 2$
- velocità filtrazione lato campagna: **1.2 E-07 m/s**
- sottopressione lato campagna al di sotto materiale coesivo: **8.0 m**

Con questa configurazione **migliora decisamente il risultato della verifica a si-fonamento** mentre per quanto riguarda il valore delle sottopressioni non si hanno modifiche significative.

Configurazione 5: come configurazione 4 con diaframma approfondito fino a 5 m dal piano delle sabbie

La sezione può ritenersi una ipotesi di progetto, con diaframma, e vengono assunti i seguenti valori di k:

- argine: **1,00E-09**
- materiale coesivo: **6.30E-07**
- sabbie: **4.8E-06**
- depositi: **1,00E-08**
- diaframma: **1,00E-10**

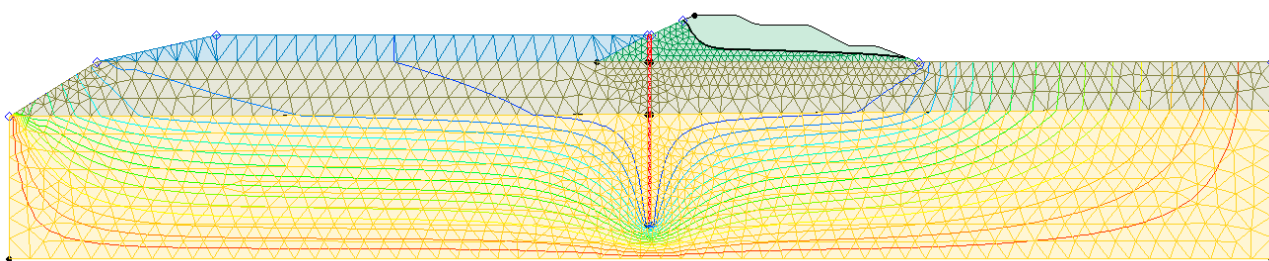


Figura 3-17 – Sezione 33: andamento delle linee di flusso all'interno della sezione di calcolo

Le principali grandezze idrauliche ottenute sono di seguito riportate:

- gradiente in uscita: 0.13
- gradiente critico: 1
- F (coefficiente di sicurezza): $1/0.13 = 7.6 \gg 2$
- velocità filtrazione lato campagna: **5.0 E-08 m/s**
- sottopressione lato campagna al di sotto materiale coesivo: **7.8 m**

Con questa configurazione migliora ulteriormente il risultato della verifica a sifonamento mentre **per quanto riguarda il valore delle sottopressioni non si hanno modifiche significative.**

Configurazione 6: come configurazione 3 con aggiunta di diaframma sul lato campagna di 10 m

La sezione può ritenersi una ipotesi di progetto, con diaframma, e vengono assunti i seguenti valori di k:

- argine: **1,00E-09**
- materiale coesivo: **6.30E-07**
- sabbie: **4.8E-06**
- depositi: **1,00E-08**
- diaframma: **1,00E-10**

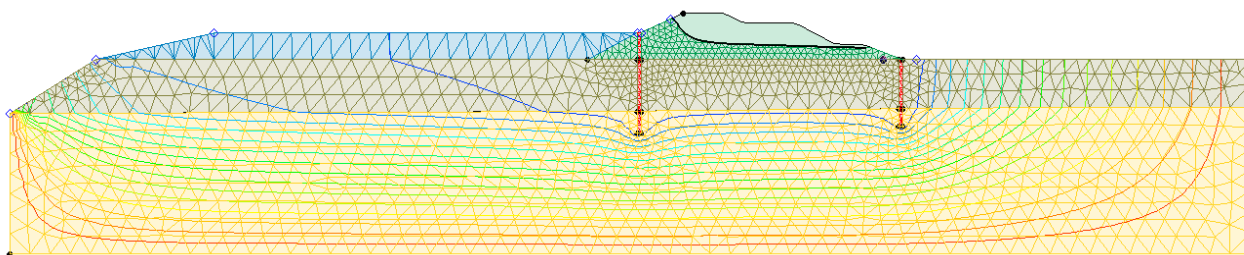


Figura 3-18 – Sezione 33: andamento delle linee di flusso all'interno della sezione di calcolo

Le principali grandezze idrauliche ottenute sono di seguito riportate:

- gradiente in uscita: 0.30
- gradiente critico: 1
- F (coefficiente di sicurezza): $1/0.30 = 3.3 \gg 2$
- velocità filtrazione lato campagna: **1.14 E-07 m/s**
- sottopressione lato campagna al di sotto materiale coesivo: **8.5 m**

Con questa configurazione **non migliora nessuna delle due verifiche**; anzi si genera una falda sospesa lungo praticamente tutto il paramento arginale a campagna.

Configurazione 7: come configurazione 3 ma con griglia di calcolo estesa lato Po fino a metà alveo magra

La sezione è sempre nella configurazione attuale, con diaframma, e vengono assunti i seguenti valori di k:

- argine: **1,00E-09**
- materiale coesivo: **6.30E-07**
- sabbie: **4.8E-06**
- depositi: **1,00E-08**
- diaframma: **1,00E-10**

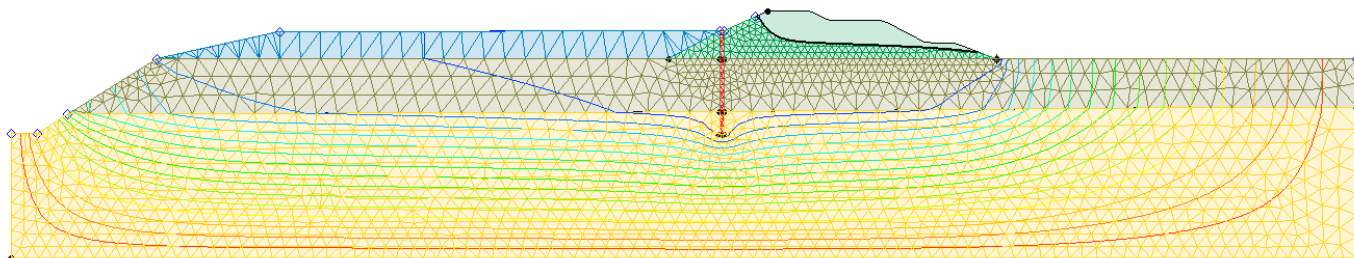


Figura 3-19 – Sezione 33: andamento delle linee di flusso all'interno della sezione di calcolo

Le principali grandezze idrauliche ottenute sono di seguito riportate:

- gradiente in uscita: 0.33
- gradiente critico: 1
- F (coefficiente di sicurezza): $1/0.33 = 3.0 > 2$
- velocità filtrazione lato campagna: **1.6 E-07 m/s**
- sottopressione lato campagna al di sotto materiale coesivo: **8.4 m**

Con questa configurazione i risultati sono molto simili a quelli della configurazione 3 anche **se la possibilità di infiltrazione direttamente nello strato sabbioso attraverso l'alveo di magra peggiora leggermente i risultati.**

Configurazione 7a: come configurazione 7 ma con sabbie più permeabili e materiale coesivo più impermeabile

La sezione è sempre nella configurazione attuale, con diaframma, e vengono assunti i seguenti valori di k che esaltano le differenze di permeabilità fra gli strati permeabili e non della fondazione:

- argine: **1,00E-09**
- materiale coesivo: **6.30E-08**
- sabbie: **1.15E-05**
- depositi: **1,00E-08**
- diaframma: **1,00E-10**

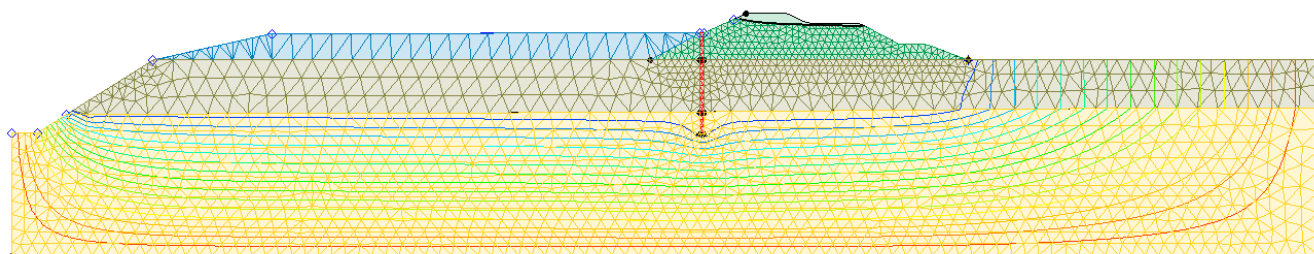


Figura 3-20 – Sezione 33: andamento delle linee di flusso all'interno della sezione di calcolo

Le principali grandezze idrauliche ottenute sono di seguito riportate:

- gradiente in uscita: 1.15
- gradiente critico: 1
- F (coefficiente di sicurezza): $1/0.33 = 0.87 < 2$
- velocità filtrazione lato campagna: **5.7 E-08 m/s**
- pressione lato campagna al di sotto materiale coesivo: **11.5 m**

Con questa configurazione che esalta le differenze di permeabilità fra i due strati di fondazione **si ha un deciso peggioramento delle condizioni di sifonamento ed anche delle sottopressioni**. Si tratta di una configurazione probabilmente non verosimile in relazione al fatto che mostra la falda sospesa lungo tutto il paramento arginale lato campagna, cosa che non è stata mai segnalata da nessun osser-

vatore, ma che però evidenzia ancora una volta l'importante ruolo svolta dal valore della permeabilità in verifiche di questo tipo.

Considerazioni conclusive

Sulla base delle suddette modellazioni si possono riassumere i seguenti elementi salienti:

- **il valore della permeabilità K assunta nei calcoli assume un ruolo fondamentale per i risultati e per l'andamento della linea piezometrica all'interno del rilevato arginale;**
- **l'estensione lato fiume del modello risulta importante al fine di cogliere tutte le sfumature del fenomeno di filtrazione;**
- **in base ai valori di permeabilità adottati esiste più di una configurazione che dà luogo a verifiche al sifonamento e al sollevamento non soddisfacenti (configurazioni 0 e 7a);**
- **l'ipotesi di realizzare diaframmi lato campagna non sembra essere efficace in quanto si ha un innalzamento della superficie piezometrica all'interno del corpo arginale.**

Alla luce delle suddette considerazioni per il proseguo delle verifiche di filtrazione si è ritenuto opportuno considerare la geometria della sezione estesa lato fiume fino a metà dell'alveo di magra. Inoltre, sulla base dei risultati sopra riportati si è deciso di verificare in condizioni di stato di fatto le configurazioni ritenute più efficaci a rappresentare la situazione in essere, ovvero le configurazioni **0, 1 e 7a**.

Come già detto in precedenza i risultati delle simulazioni vengono riportati in forma grafica in termini di andamento delle sottopressioni idrauliche espresse in metri e dei carichi totali in m s.l.m.

Sezione - Tratto - Lunghezza	aspetti geometrici e idraulici					Configurazione			Coefficienti di permeabilità					Risultati del modello			Verifiche			
	quota piano campagna	spessore minimo limi e argille a campagna	W.L.	Falda	carico sul pc.	codice	descrizione	L diaframma	depositi golenali	corpo arginale	Limi e argille terreni fondazione	Sabbie terreni profondi	Diaframma	Gradiente in uscita	Velocità filtrazione campagna	Sottopressio ne campagna sotto materiale coesivo (h _a)	Coefficiente di sicurezza al sifonamento (F>2?)	Forza stabilizzante (g _T H _T)	Forza instabilizzant e (g _w h _a)	Verifica sollevamento 0.9 (g _T H _T) / 1.1 (g _w h _a) > 1?
[m]	[m s.l.m.]	[m]	[m s.l.m.]	[m s.l.m.]	[m]	[]		[m]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[]	[m/s]	[m]	[]	[kPa]	[kPa]	[-]
33	22.87	5.20	29.29	22.87	6.42	SDF - 0	molto permeabile	-	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁷	6.30*10 ⁻⁷	1.15*10 ⁻⁵	-	0.53	2.80*10 ⁻⁷	10.00	1.89	93.60	100	0.77
tratto D						SDF - 1	mediamente/minimamente permeabile	-	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	6.30*10 ⁻⁷	4.80*10 ⁻⁶	-	0.32	1.60*10 ⁻⁷	8.30	3.13	93.60	83	0.92
1050						SDF - 2	come 1 con riduzione spessore sabbie	-	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	6.30*10 ⁻⁷	4.80*10 ⁻⁶	-	0.31	1.50*10 ⁻⁷	8.30	3.23	93.60	83	0.92
						SDF - 3	come 1 con diaframma esistente	15	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	6.30*10 ⁻⁷	4.80*10 ⁻⁶	1*10 ⁻¹⁰	0.32	1.60*10 ⁻⁷	8.30	3.13	93.60	83	0.92
						PR - 4	come 3 con diaframma approfondito	20	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	6.30*10 ⁻⁷	4.80*10 ⁻⁶	1*10 ⁻¹⁰	0.20	1.20*10 ⁻⁷	8.00	5.00	93.60	80	0.96
						PR - 5	come 4 con diaframma approfondito fino a 5 m da piano sabbie	30	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	6.30*10 ⁻⁷	4.80*10 ⁻⁶	1*10 ⁻¹⁰	0.13	5.00*10 ⁻⁸	7.80	7.69	93.60	78	0.98
						PR - 6	come 3 con diaframma anche lato campagna	15	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	6.30*10 ⁻⁷	4.80*10 ⁻⁶	1*10 ⁻¹⁰	0.30	1.14*10 ⁻⁷	8.50	3.33	93.60	85	0.90
						SDF - 7	come 3 con griglia di calcolo estesa lato Po	15	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	6.30*10 ⁻⁷	4.80*10 ⁻⁶	1*10 ⁻¹⁰	0.33	1.60*10 ⁻⁷	8.40	3.03	93.60	84	0.91
						SDF - 7a	con diaframma	15	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	6.30*10 ⁻⁸	1.15*10 ⁻⁵	1*10 ⁻¹⁰	1.15	5.70*10 ⁻⁸	11.50	0.87	93.60	115	0.67

3.7.4 Simulazioni stato di fatto

Nel proseguo verranno sviluppate delle 6 sezioni di riferimento scelte, ciascuna rappresentativa di un tratto omogeneo arginale, nelle configurazioni **0**, **1** e **7a** precedentemente descritte.

Configurazione 0: Sezione stato di fatto, senza diaframma, con valori di permeabilità massimi (sempre all'interno della finestra riportata in tabella)

Vengono assunti i seguenti valori di k:

- argine: **1,00E-07**
- materiale coesivo: **6.30E-07**
- sabbie: **1,15E-05**
- depositi: **1,00E-08**

sezione 4

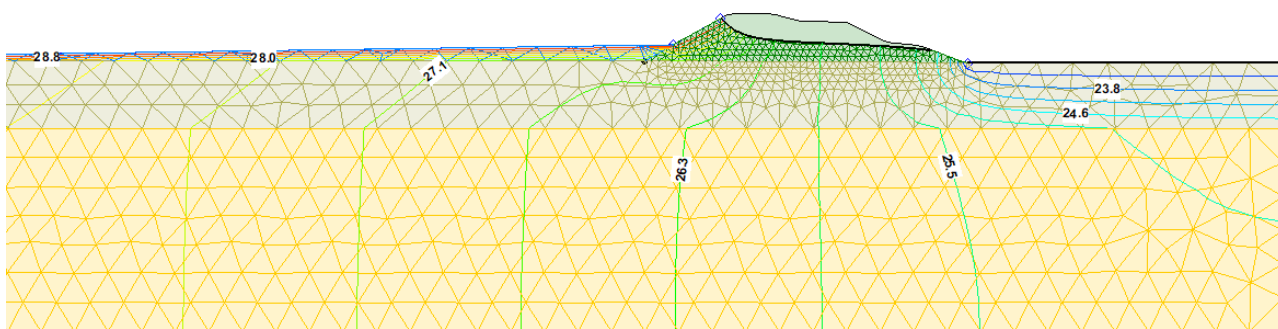


Figura 3-21 Sezione 4: andamento dei carichi totali [m s.l.m.] all'interno del campo di moto (sezione non rappresentata interamente a lato Po per maggiore chiarezza)

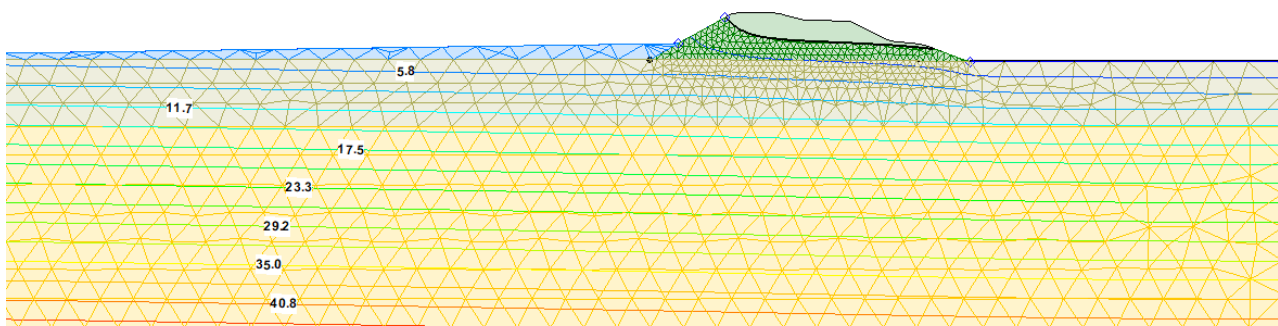


Figura 3-22 – Sezione 4: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto (sezione non rappresentata interamente a lato Po per maggiore chiarezza)

sezione 18

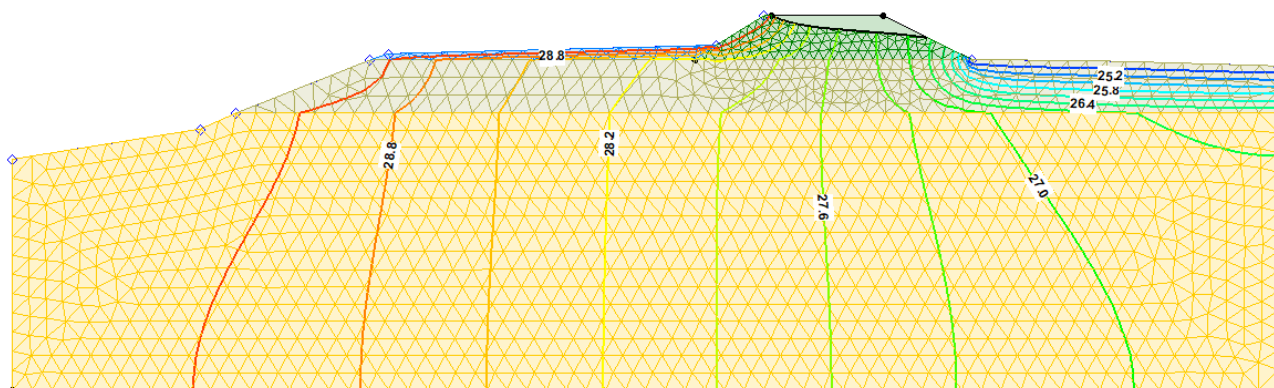


Figura 3-23 Sezione 18: andamento dei carichi totali [m s.l.m.] all'interno del campo di moto

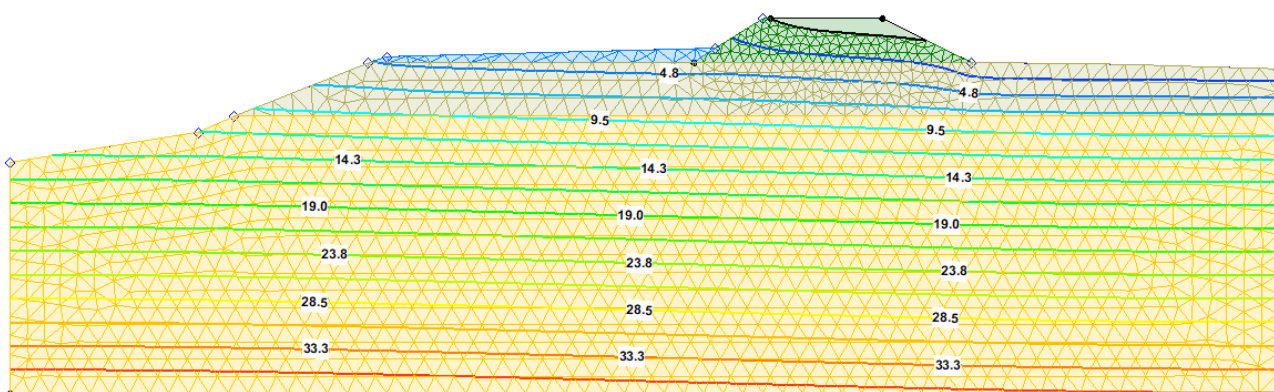


Figura 3-24 – Sezione 18: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto

sezione 21

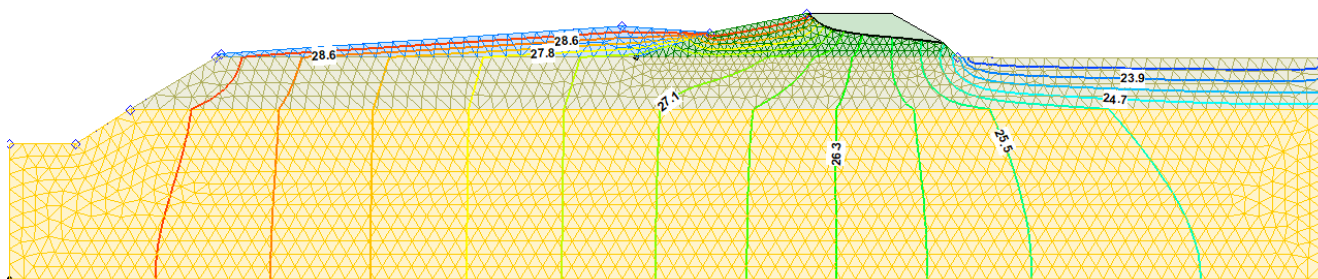


Figura 3-25 – Sezione 21: andamento dei carichi totali [m s.l.m.] all'interno del campo di moto

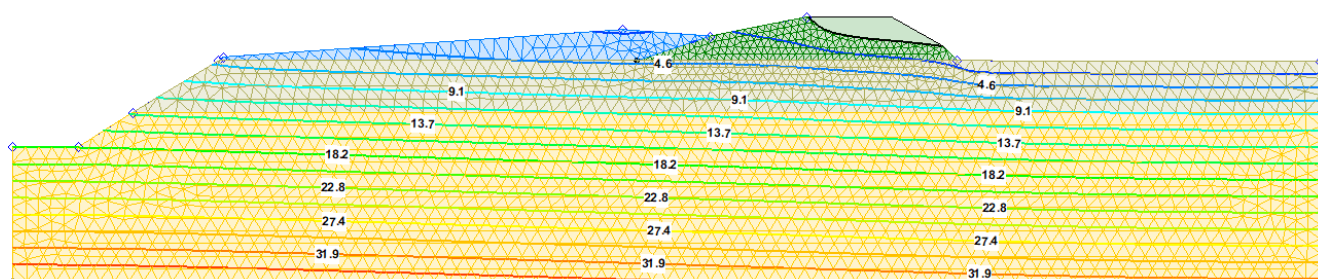


Figura 3-26 – Sezione 21: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto

sezione 33

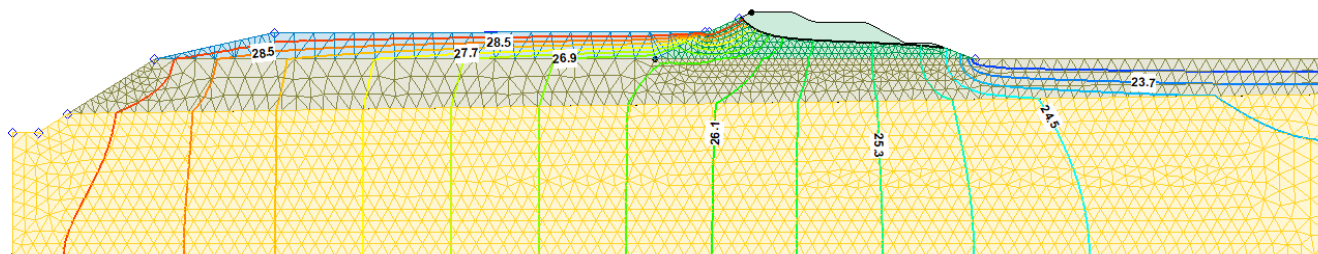


Figura 3-27 – Sezione 33: andamento dei carichi totali [m s.l.m.] all'interno del campo di moto

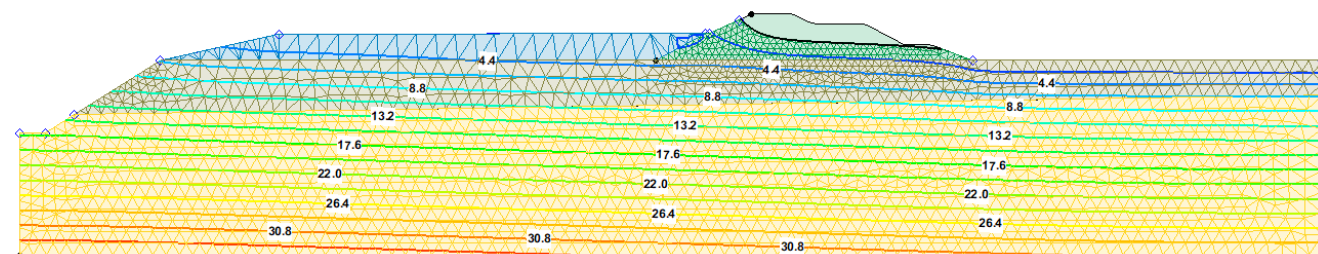


Figura 3-28 – Sezione 33: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto

sezione 47

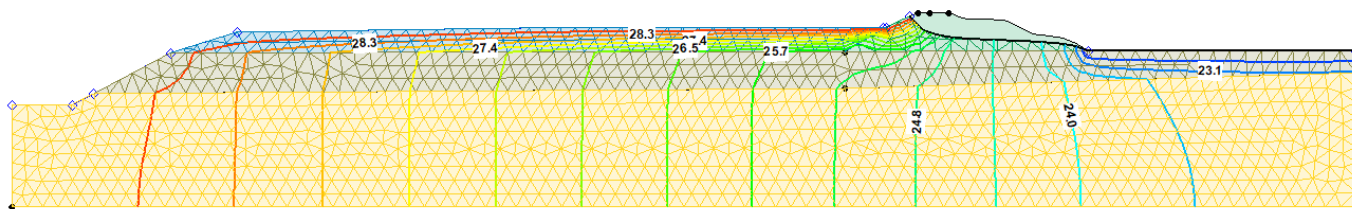


Figura 3-29 – Sezione 47: andamento dei carichi totali [m s.l.m.] all'interno del campo di moto

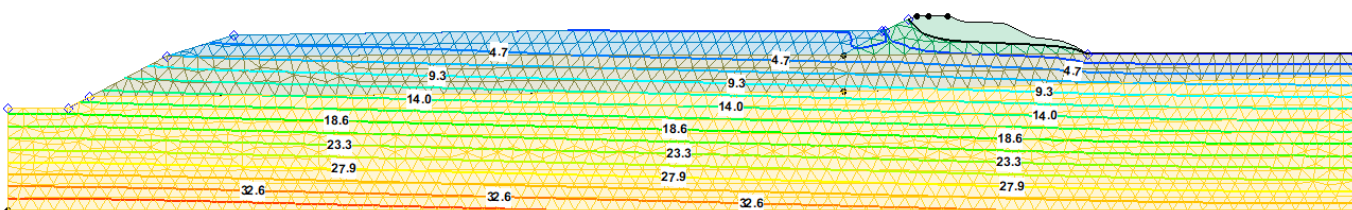


Figura 3-30 – Sezione 47: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto

sezione 52

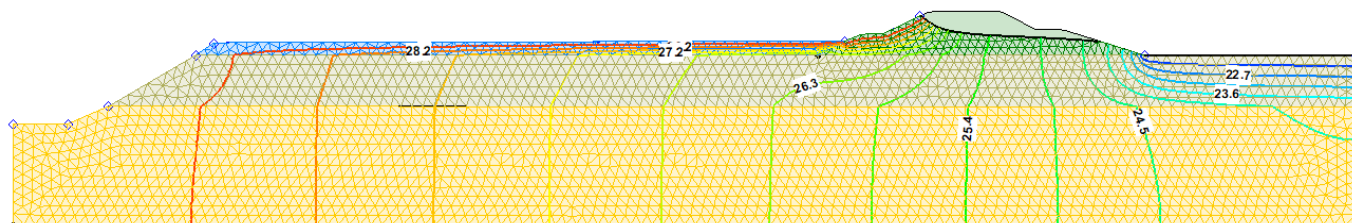


Figura 3-31 – Sezione 52: andamento dei carichi totali [m s.l.m.] all'interno del campo di moto

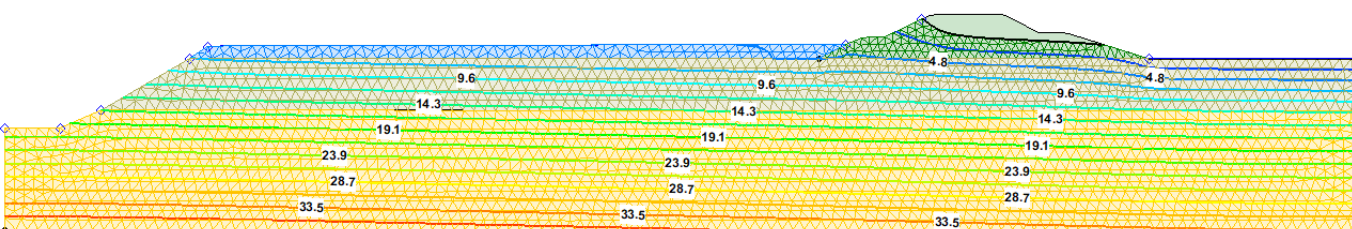


Figura 3-32 – Sezione 52: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto

Dall'analisi dei risultati emerge che **nella configurazione 0** i valori della permeabilità danno luogo ad una falda sospesa che attraversa il corpo arginale. Come verrà mostrato successivamente nella tabella riassuntiva delle simulazioni di stato di fatto;

- **nelle sezioni 18 e 47 la verifica al sifonamento non risulta soddisfatta;**
- **nella sezione 47 le verifica al sollevamento non risultano soddisfatte.**

Configurazione 1: coefficienti di permeabilità medi/minimi in modo da eliminare falda sospesa sul corpo arginale

La sezione è sempre nella configurazione attuale, senza diaframma, e vengono assunti i seguenti valori di k:

- argine: **1,00E-09**
- materiale coesivo: **6,30E-07**
- sabbie: **4,80E-06**
- depositi: **1,00E-08**

sezione 4

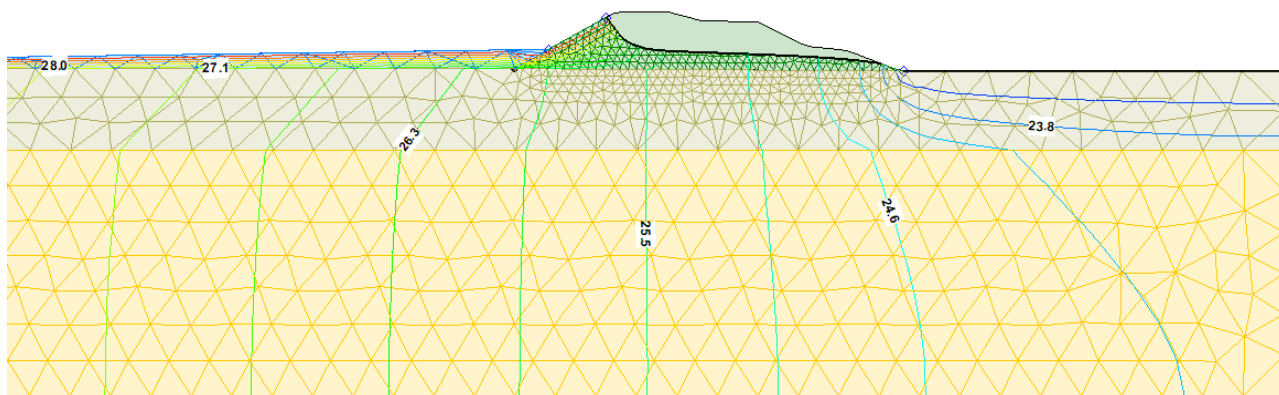


Figura 3-33 – Sezione 4: andamento dei carichi totali [m s.l.m.] all'interno del campo di moto (sezione non rappresentata interamente a lato Po per maggiore chiarezza)

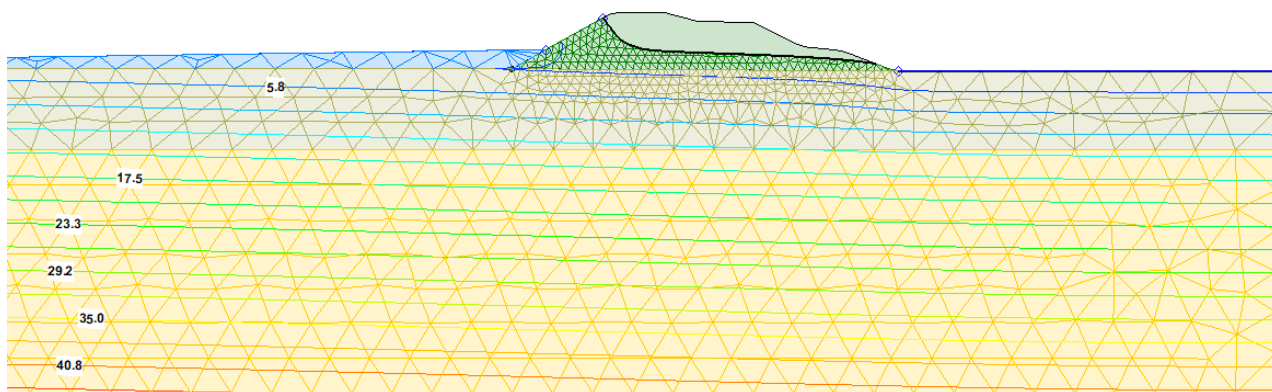


Figura 3-34 – Sezione 4: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto (sezione non rappresentata interamente a lato Po per maggiore chiarezza)

sezione 18

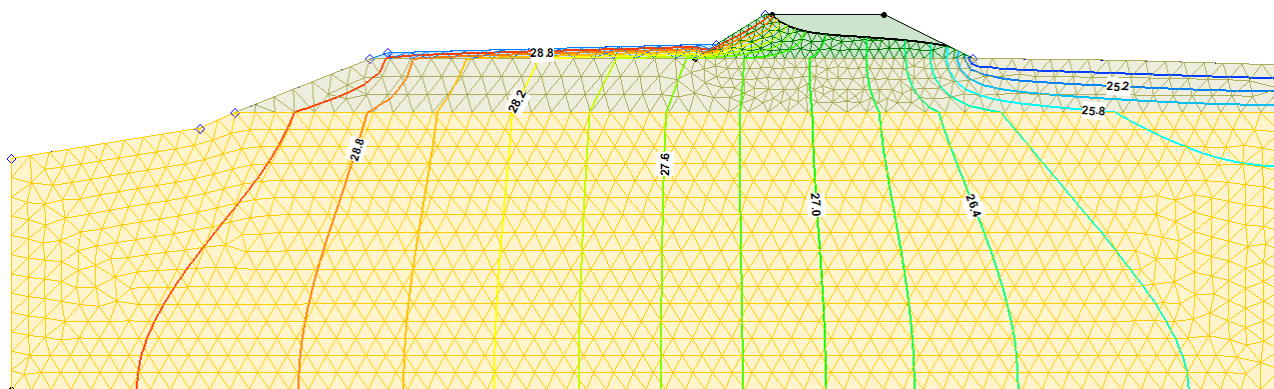


Figura 3-35 – Sezione 18: andamento dei carichi totali [m s.l.m.] all'interno del campo di moto

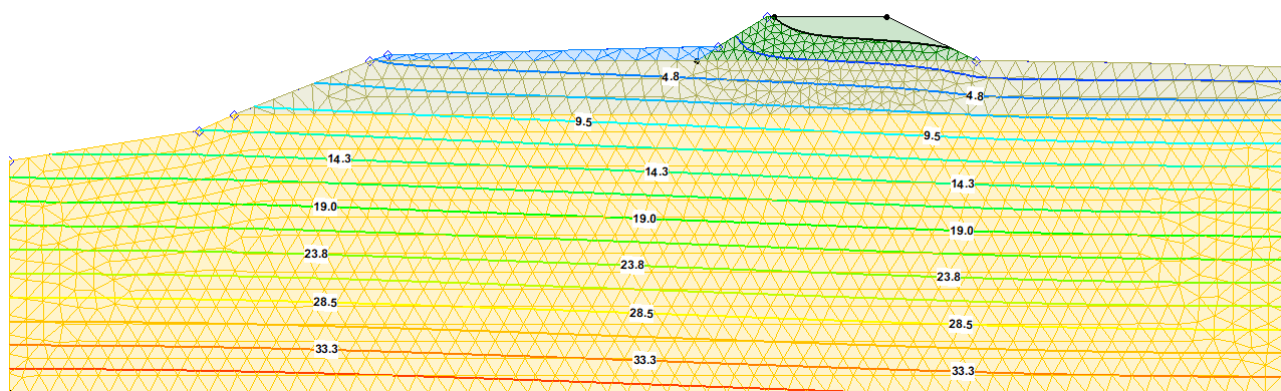


Figura 3-36 – Sezione 18: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto

sezione 21

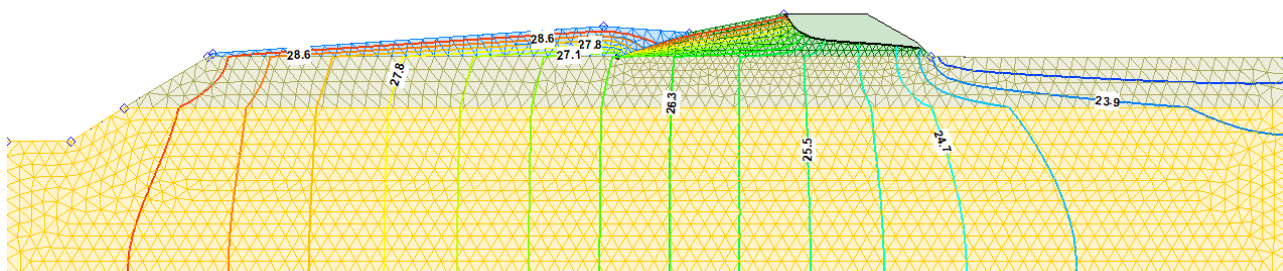


Figura 3-37 – Sezione 21: andamento dei carichi totali [m s.l.m.] all'interno del campo di moto

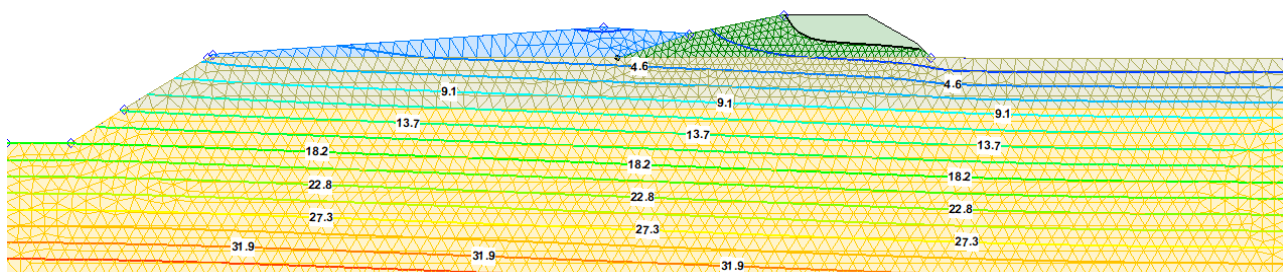


Figura 3-38 – Sezione 21: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto

sezione 33

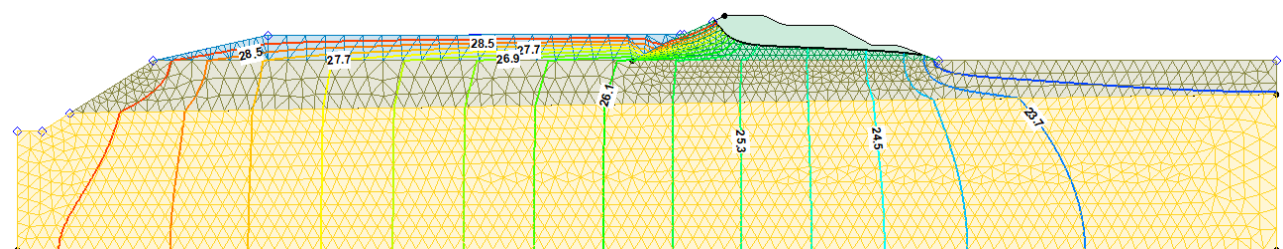


Figura 3-39 – Sezione 33: andamento dei carichi totali [m s.l.m.] all'interno del campo di moto

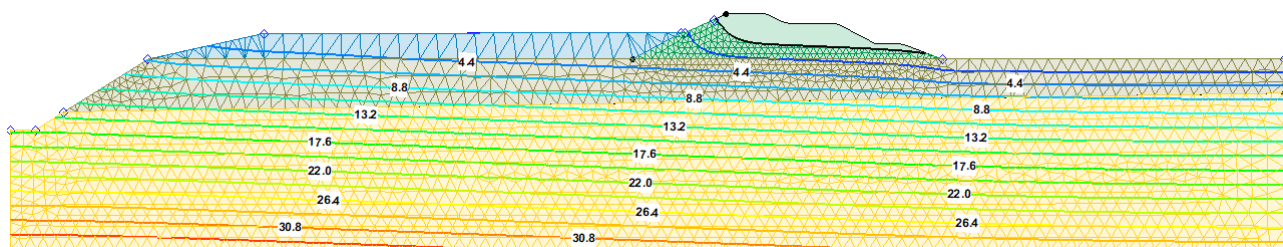


Figura 3-40 – Sezione 33: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto

sezione 47

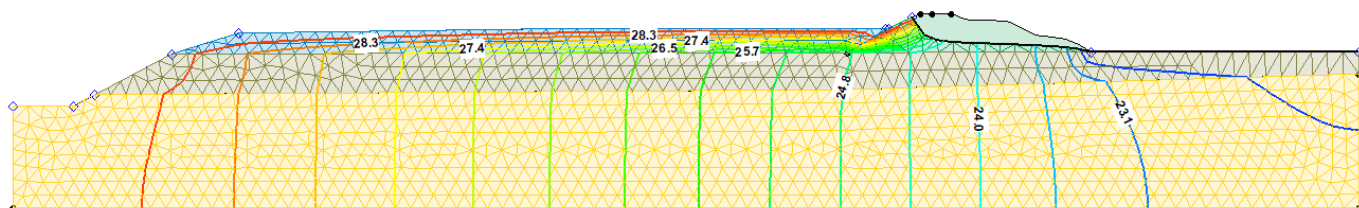


Figura 3-41 – Sezione 47: andamento dei carichi totali [m s.l.m.] all'interno del campo di moto

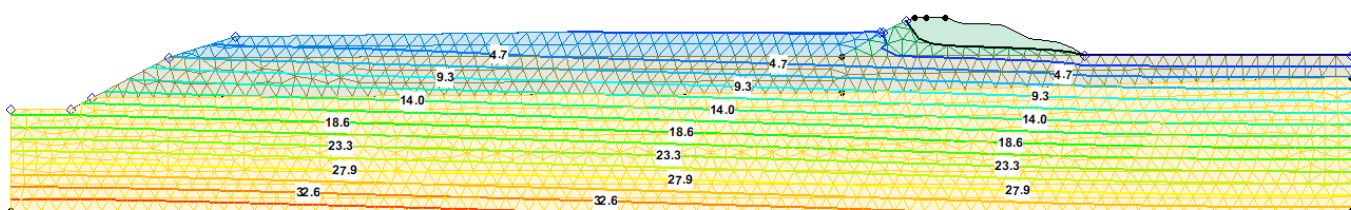


Figura 3-42 – Sezione 47: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto

sezione 52

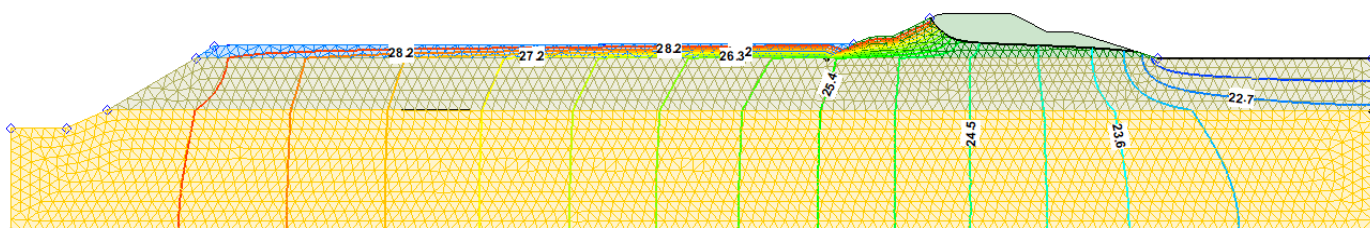


Figura 3-43 – Sezione 52: andamento dei carichi totali [m s.l.m.] all'interno del campo di moto

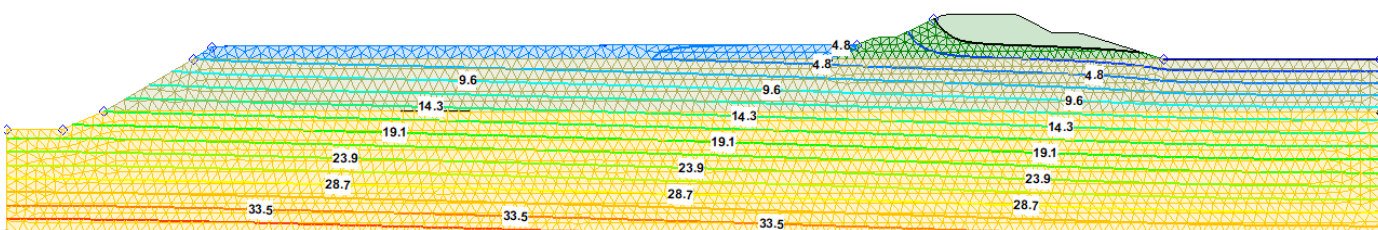


Figura 3-44 – Sezione 52: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto

Dall'analisi dei risultati emerge che l'ipotesi di utilizzare valori medi delle permeabilità consentono di ridurre/eliminare la falda sospesa all'interno del corpo arginale. Dall'analisi delle grandezze idrauliche ottenute dalle simulazioni (riportate nel dettaglio nella tabella riassuntiva dei risultati dello stato di fatto) si evince **che per la configurazione 1 tutte le sezioni risultano verificate sia al sifonamento che al sollevamento.**

Configurazione 7a: sezione con diaframma attuale, con sabbie più permeabili e materiale coesivo più impermeabile

La sezione è sempre nella configurazione attuale, con diaframma, e vengono assunti i seguenti valori di k:

- argine: **1,00E-09**
- materiale coesivo: **6.30E-08**
- sabbie: **1.15E-05**
- depositi: **1,00E-08**
- diaframma: **1,00E-10**

sezione 4

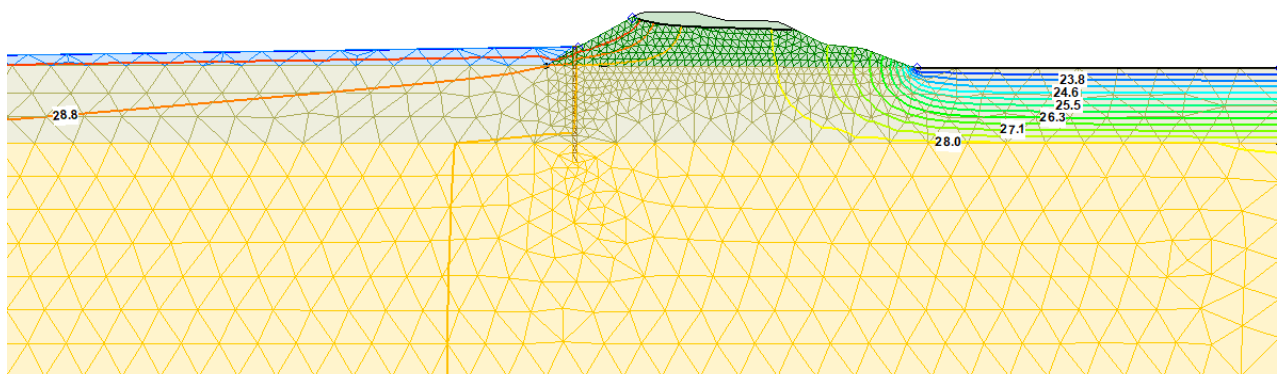


Figura 3-45 – Sezione 4: andamento dei carichi totali [m s.l.m.] all'interno del campo di moto (sezione non rappresentata interamente a lato Po per maggiore chiarezza)

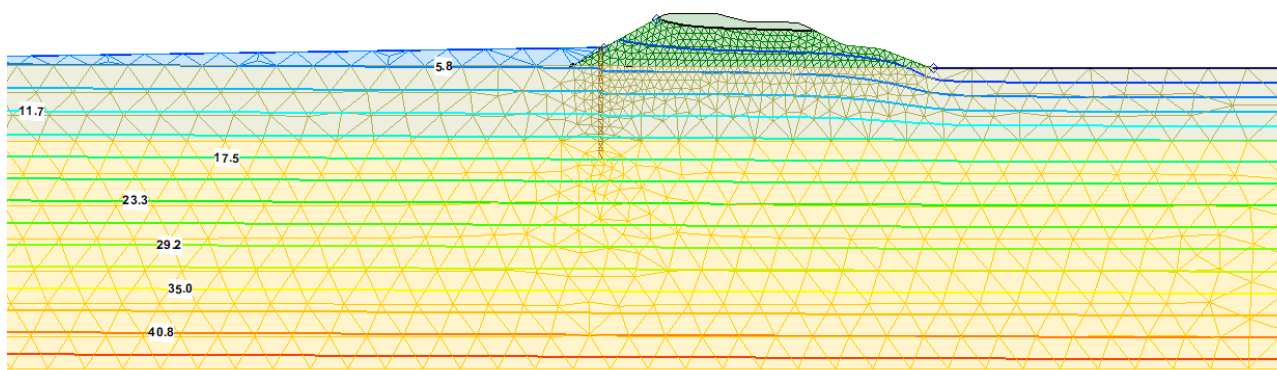


Figura 3-46 – Sezione 4: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto (sezione non rappresentata interamente a lato Po per maggiore chiarezza)

sezione 18

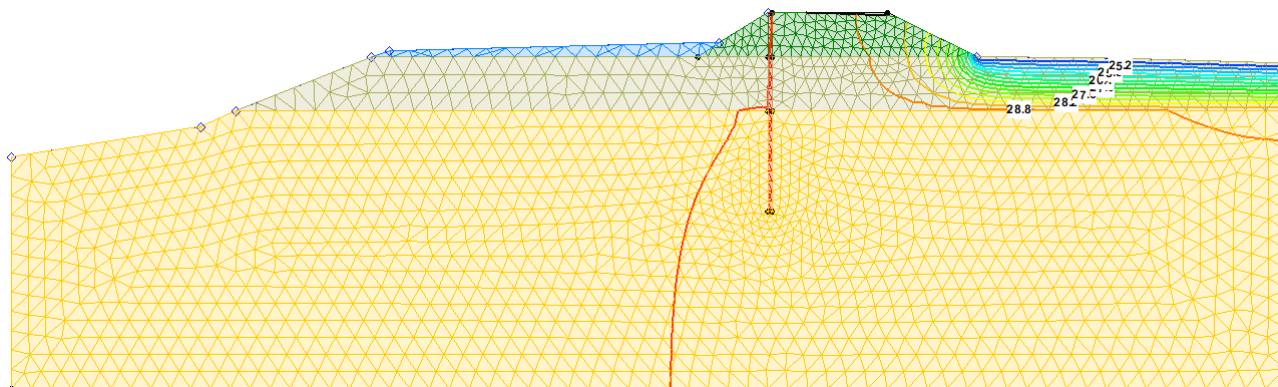


Figura 3-47 – Sezione 18: andamento dei carichi totali [m s.l.m.] all'interno del campo di moto

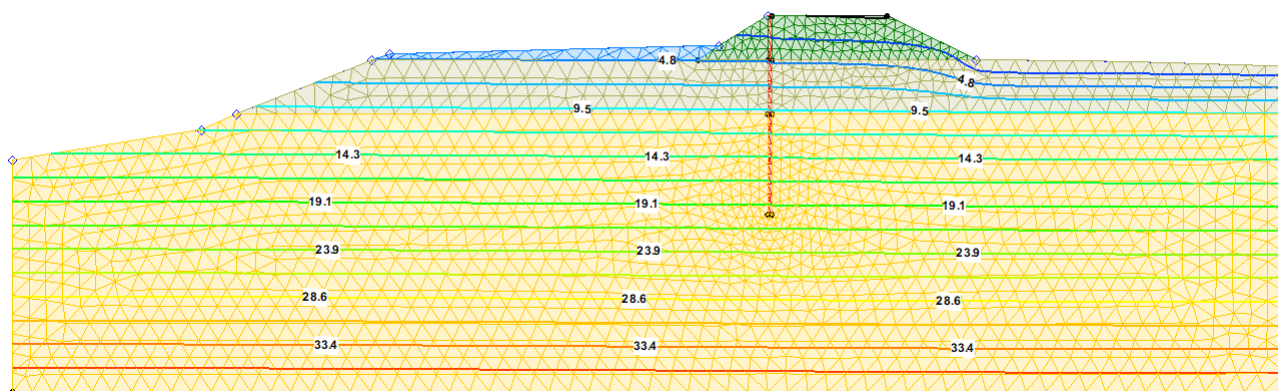


Figura 3-48 – Sezione 18: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto

sezione 21

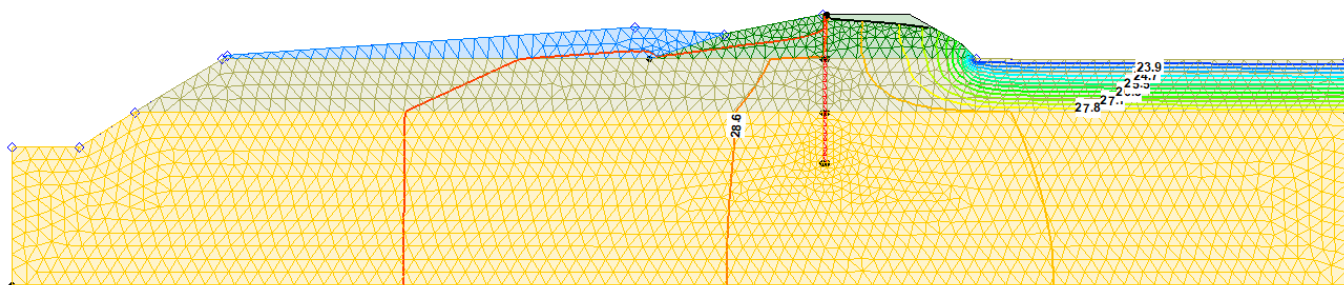


Figura 3-49 – Sezione 21: andamento dei carichi totali [m s.l.m.] all'interno del campo di moto

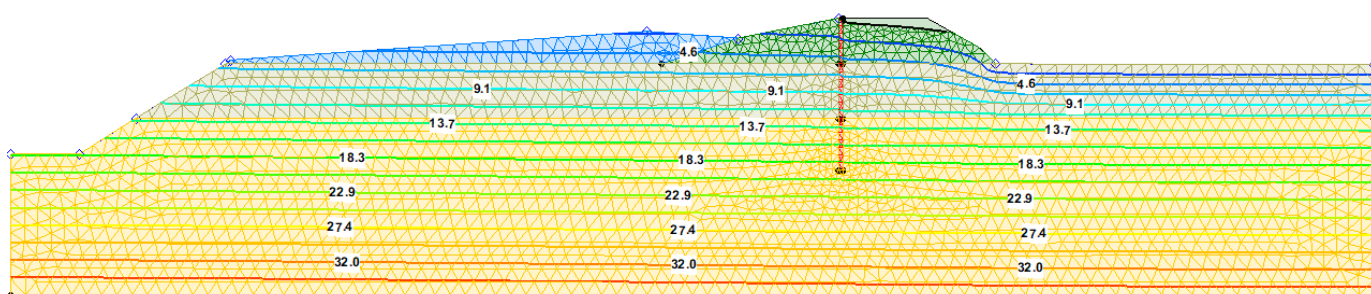


Figura 3-50 – Sezione 21: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto

sezione 33

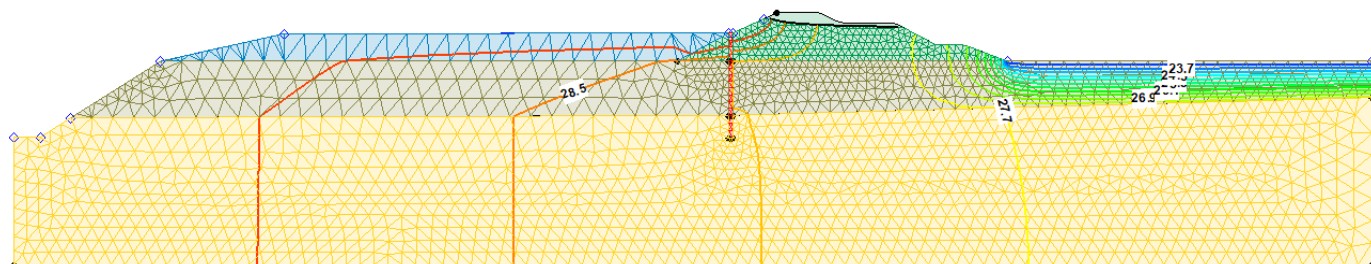


Figura 3-51 – Sezione 33: andamento dei carichi totali [m s.l.m.] all'interno del campo di moto

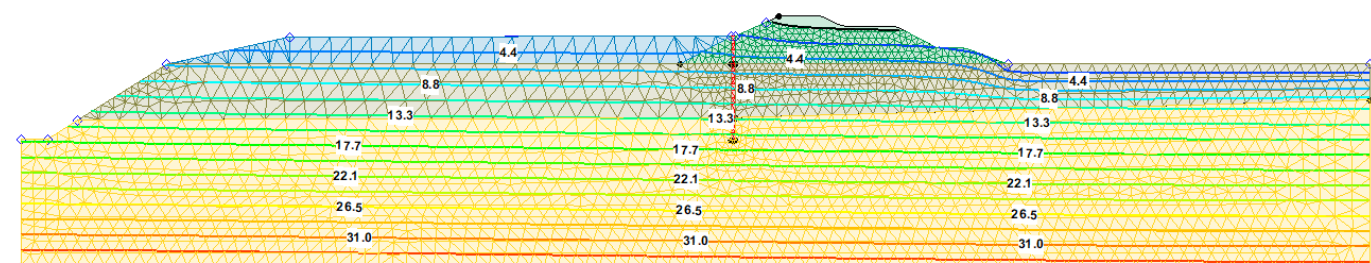


Figura 3-52 – Sezione 33: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto

sezione 47

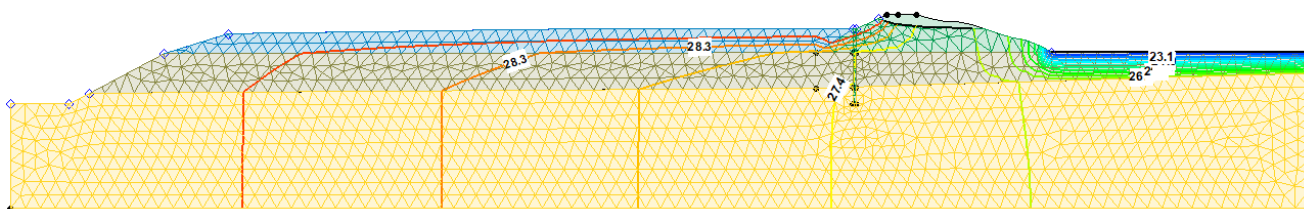


Figura 3-53 – Sezione47: andamento dei carichi totali [m s.l.m.] all'interno del campo di moto

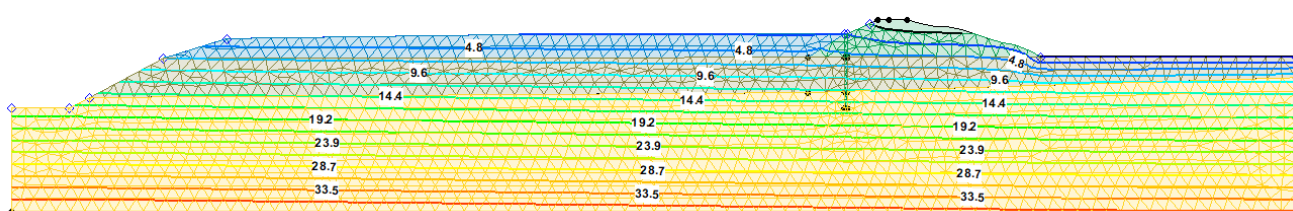


Figura 3-54 – Sezione 33: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto

sezione 52

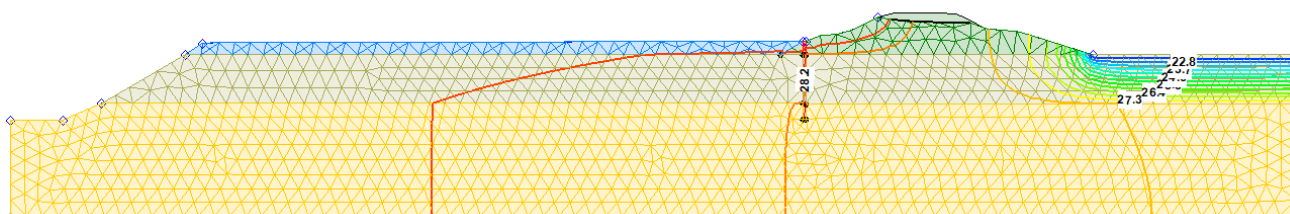


Figura 3-55 – Sezione52: andamento dei carichi totali [m s.l.m.] all'interno del campo di moto

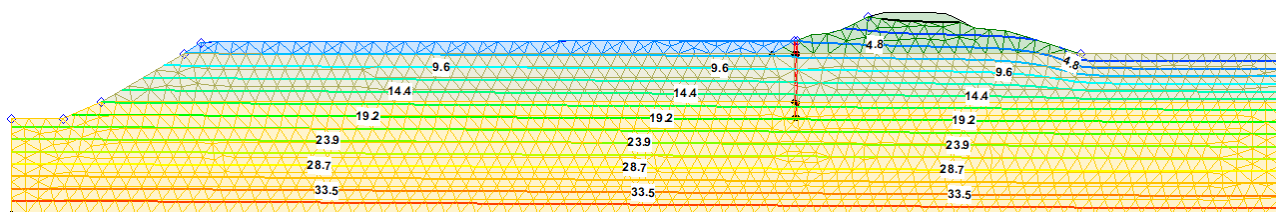


Figura 3-56 Sezione52: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto

Con questa configurazione che esalta le differenze di permeabilità fra i due strati si ha un deciso peggioramento delle condizioni di sifonamento ed anche delle sottopressioni. Si tratta di una configurazione probabilmente non verosimile in relazione al fatto che mostra la falda sospesa lungo tutto il paramento arginale lato campagna, cosa che non è stata mai segnalata da nessun osservatore, ma che però evidenzia ancora una volta l'importante ruolo svolta dal valore della permeabilità in verifiche di questo tipo.

Dall'analisi dei risultati riportati nella tabella seguente emerge che tutte le sezioni non risultano verificate né al sifonamento né al sollevamento.

Considerazioni conclusive

Dai risultati delle modellazioni di stato di fatto emergono le seguenti considerazioni:

- **nella configurazione 0 (permeabilità elevata) la sezione più gravosa nei confronti della verifica al sifonamento risulta essere la 18, per la quale si ha un valore del coefficiente di sicurezza pari a $1,45 < 2$; nei riguardi della verifica al sollevamento invece la sezione più gravosa risulta essere la 47 dove il ridotto spessore del terreno di fondazione (circa 4.30 metri) fa sì che il coefficiente di sicurezza sia inferiore a 1;**
- **nella configurazione di 1 (permeabilità media) l'abbassamento della piezometrica all'interno del corpo arginale consente di ottenere valori dei gradienti e delle sottopressioni tali da rendere verificati, con entrambi i criteri, tutte le sezioni analizzate;**
- **nella configurazione 7a la differenza di permeabilità tra le sabbie e il terreno di fondazione rende, per tutte le sezioni di riferimento, le verifiche idrauliche non soddisfatte sia nei confronti del sifonamento che del sollevamento;**
- **Il tratto che risulta comunque più lontano dalle condizioni di verifica richieste è il tratto E nel quale la sezione 47 non risulta verificata né a sifonamento né a sollevamento sia nella configurazione 0 che in quella 7a.**

Sarà questo il tratto su cui concentrare prioritariamente gli interventi del primo lotto funzionale finanziato.

Sezione - Tratto - Lunghezza	aspetti geometrici e idraulici					Configurazione			Coefficienti di permeabilità					Risultati del modello			Verifiche			
	quota piano campagna	spessore minimo limi e argille a campagna	W.L.	Falda	carico sul pc.	codice	descrizione	L diaframma	depositi golenali	corpo arginale	Limi e argille terreni fondazione	Sabbie terreni profondi	Diaframma	Gradiente in uscita	Velocità filtrazione campagna	Sottopressio ne campagna sotto materiale coesivo (h _a)	Coefficiente di sicurezza al sifonamento (F>2?)	Forza stabilizzante (g _T H _T)	Forza instabilizzant e (g _w h _a)	Verifica sollevamento 0.9 (g _T H _T) / 1.1 (g _w h _a) > 1?
[m]	[m s.l.m.]	[m]	[m s.l.m.]	[m s.l.m.]	[m]	[]		[m]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[]	[m/s]	[m]	[]	[kPa]	[kPa]	[-]
4	22.96	9.90	29.63	22.96	6.67	SDF - 0	molto permeabile	-	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁷	6.30*10 ⁻⁷	1.15*10 ⁻⁵	-	0.43	1.70*10 ⁻⁷	12.10	2.33	178.20	121	1.20
tratto A						SDF - 1	mediamente permeabile	-	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	6.30*10 ⁻⁷	4.80*10 ⁻⁶	-	0.33	1.05*10 ⁻⁷	11.00	3.03	178.20	110	1.33
1240						SDF - 7a	con diaframma	15	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	6.30*10 ⁻⁸	1.15*10 ⁻⁵	1*10 ⁻¹⁰	0.90	3.68*10 ⁻⁸	15.00	1.11	178.20	150	0.97
18	24.58	5.40	29.45	24.42	4.87	SDF - 0	molto permeabile	-	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁷	6.30*10 ⁻⁷	1.15*10 ⁻⁵	-	0.69	3.68*10 ⁻⁷	7.90	1.45	97.20	79	1.01
tratto B						SDF - 1	mediamente permeabile	-	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	6.30*10 ⁻⁷	4.80*10 ⁻⁶	-	0.47	2.13*10 ⁻⁷	7.00	2.13	97.20	70	1.14
310						SDF - 7a	con diaframma	20	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	6.30*10 ⁻⁸	1.15*10 ⁻⁵	1*10 ⁻¹⁰	1.18	4.64*10 ⁻⁸	9.70	0.85	97.20	97	0.82
21	23.03	7.10	29.41	23.15	6.38	SDF - 0	molto permeabile	-	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁷	6.30*10 ⁻⁷	1.15*10 ⁻⁵	-	0.41	1.45*10 ⁻⁷	9.60	2.44	127.80	96	1.09
tratto C						SDF - 1	mediamente permeabile	-	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	6.30*10 ⁻⁷	4.80*10 ⁻⁶	-	0.28	1.03*10 ⁻⁷	8.60	3.57	127.80	86	1.22
540						SDF - 7a	con diaframma	20	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	6.30*10 ⁻⁸	1.15*10 ⁻⁵	1*10 ⁻¹⁰	0.84	4.69*10 ⁻⁸	12.20	1.19	127.80	122	0.86
33	22.87	5.20	29.29	22.87	6.42	SDF - 0	molto permeabile	-	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁷	6.30*10 ⁻⁷	1.15*10 ⁻⁵	-	0.50	1.83*10 ⁻⁷	7.50	2.00	93.60	75	1.02
tratto D						SDF - 1	mediamente permeabile	-	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	6.30*10 ⁻⁷	4.80*10 ⁻⁶	-	0.32	1.47*10 ⁻⁷	7.00	3.13	93.60	70	1.09
1050						SDF - 7a	con diaframma	15	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	6.30*10 ⁻⁸	1.15*10 ⁻⁵	1*10 ⁻¹⁰	1.15	5.70*10 ⁻⁸	11.50	0.87	93.60	115	0.67
47	22.24	4.30	29.13	22.24	6.89	SDF - 0	molto permeabile	-	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁷	6.30*10 ⁻⁷	1.15*10 ⁻⁵	-	0.51	2.55*10 ⁻⁷	6.80	1.96	77.40	68	0.93
tratto E						SDF - 1	mediamente permeabile	-	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	6.30*10 ⁻⁷	4.80*10 ⁻⁶	-	0.34	1.56*10 ⁻⁷	6.00	2.94	77.40	60	1.06
780						SDF - 7a	con diaframma	15	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	6.30*10 ⁻⁸	1.15*10 ⁻⁵	1*10 ⁻¹⁰	1.20	5.87*10 ⁻⁸	11.40	0.83	77.40	114	0.56
52	21.86	9.40	29.07	21.86	7.21	SDF - 0	molto permeabile	-	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁷	6.30*10 ⁻⁷	1.15*10 ⁻⁵	-	0.49	1.65*10 ⁻⁷	12.00	2.04	169.20	120	1.15
tratto F						SDF - 1	mediamente permeabile	-	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	6.30*10 ⁻⁷	4.80*10 ⁻⁶	-	0.30	1.00*10 ⁻⁷	10.00	3.33	169.20	100	1.38
870						SDF - 7a	con diaframma	15	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	6.30*10 ⁻⁸	1.15*10 ⁻⁵	1*10 ⁻¹⁰	1.04	4.50*10 ⁻⁸	15.00	0.96	169.20	150	0.92

3.7.5 Simulazioni progetto

Sulla base di quanto emerso nelle verifiche di stato di fatto di cui al precedente paragrafo, l'attenzione è stata posta al tratto E, risultato essere il più vulnerabile, ed a parte del tratto D. I restanti tratti analizzati A, C, F, ed in particolare il tratto B, non sono perfettamente verificati in tutte configurazioni analizzate ma, in relazione al mandato ricevuto dallo scrivente nel documento preliminare alla progettazione redatto dall'Amministrazione Appaltante, l'attenzione è stata posta ai tratti più gravosi e nei quali si è avuto segnale tangibile delle problematiche illustrate anche in occasione di recenti eventi di piena. Le verifiche di progetto, fin dalla fase di progettazione di fattibilità tecnica ed economica, sono state quindi sviluppate per le relative sezioni di riferimento: la sezione 47 per il tratto E e la 33 per il tratto D.

Vengono di seguito riportare le simulazioni di progetto avendo scelto, dopo diverse simulazioni di prova, di realizzare un diaframma di lunghezza pari a 30 m (lunghezza doppia rispetto al diaframma esistente). Le configurazioni di riferimento per le simulazioni di progetto sono la configurazione 0 e la configurazione 7a per le quali le verifiche non risultano soddisfatte (o lo sono al limite). Come già detto, le simulazioni di progetto sono state condotte relativamente alle sezioni 47 e 33 risultate più gravose dal punto di vista idraulico. Relativamente alla sezione 33 la soluzione progettuale è stata simulata solamente per la configurazione 7a in quanto per la configurazione 0 le verifiche risultano soddisfatte e con l'intervento di progetto non possono che migliorare.

Per maggiore chiarezza gli schemi grafici dei risultati sotto riportati vengono rappresentati nell'intorno del diaframma di progetto.

Configurazione 0: Sezione progetto con valori di permeabilità massimi (sempre all'interno della finestra prima definita)

La sezione nella configurazione di progetto viene sviluppata con diaframma $L=30m$ e vengono assunti i seguenti valori di k :

- argine: **$1,00E-07$**
- materiale coesivo: **$6.30E-07$**

- sabbie: **1.15E-05**
- depositi: **1,00E-08**
- diaframma: **1,00E-10**

sezione 47

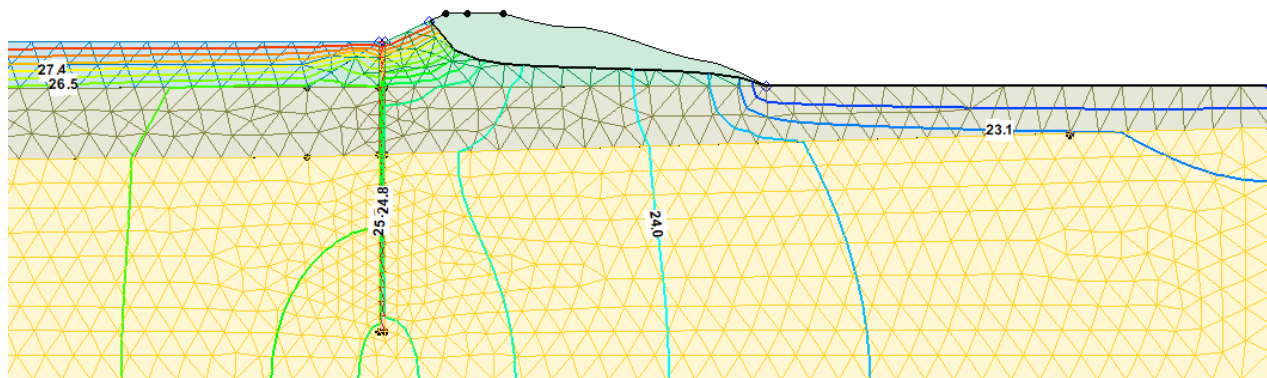


Figura 3-57 Sezione 47: andamento dei carichi totali [m s.l.m.] all'interno del campo di moto

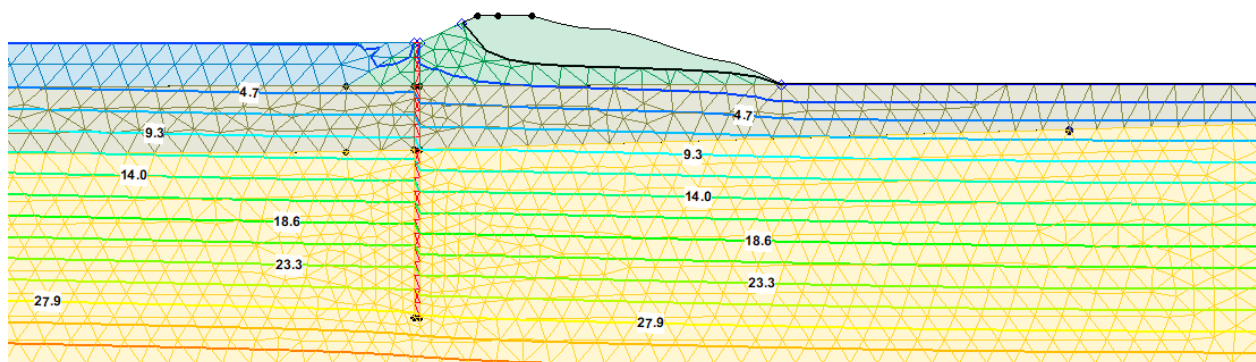


Figura 3-58 Sezione 47: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto

Configurazione 7a: configurazione di progetto con sabbie molto permeabili e materiale coesivo più impermeabile

La sezione è nella configurazione di progetto, con diaframma $L=30\text{m}$, e vengono assunti i seguenti valori di k :

- argine: **$1,00E-09$**
- materiale coesivo: **$6.30E-08$**
- sabbie: **$1.15E-05$**
- depositi: **$1,00E-08$**
- diaframma: **$1,00E-10$**

sezione 33

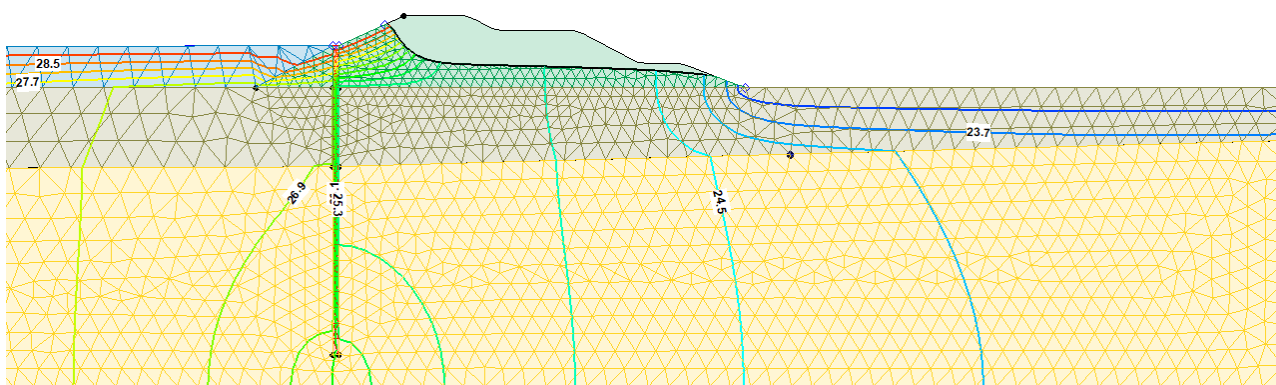


Figura 3-59 – Sezione 33: andamento dei carichi totali [m s.l.m.] all'interno del campo di moto

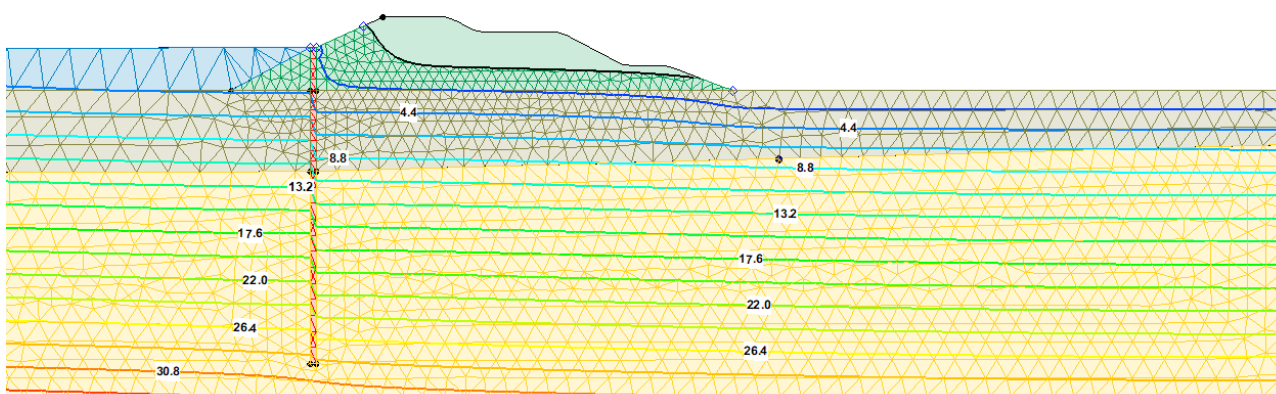


Figura 3-60 – Sezione 33: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto

sezione 47

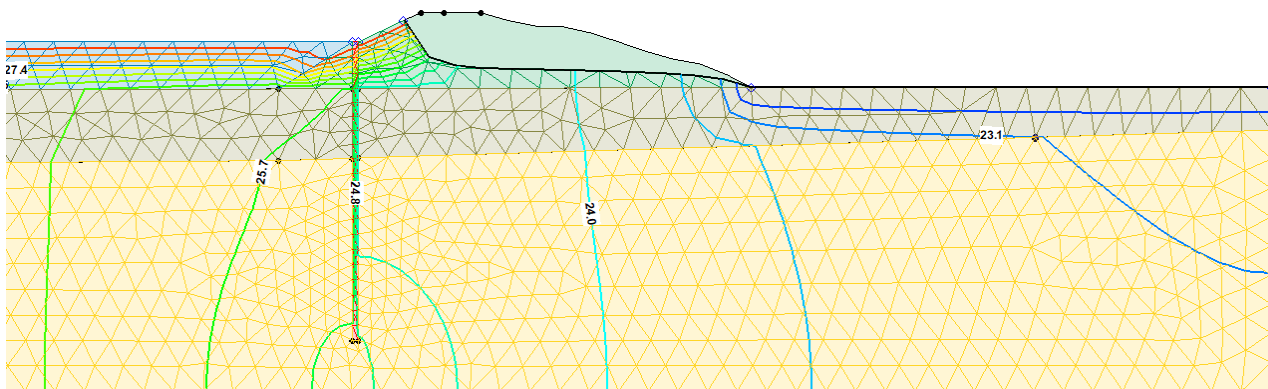


Figura 3-61 – Sezione 47: andamento dei carichi totali [m s.l.m.] all'interno del campo di moto

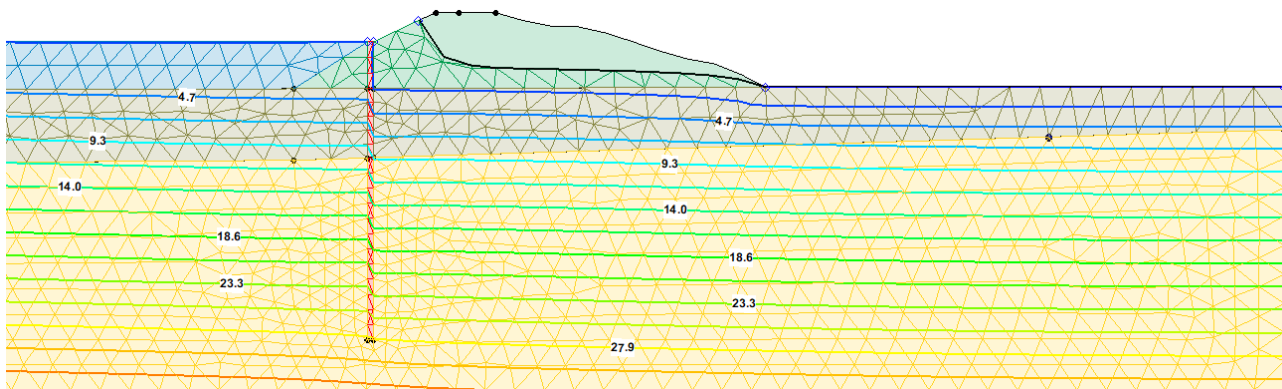


Figura 3-62 – Sezione 47: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto

Nella tabella seguente vengono riportati i risultati delle verifiche idrauliche condotte per la configurazione di progetto.

Dall'analisi dei risultati si evince che **la realizzazione di un diaframma che interessa “abbondantemente” il substrato sabbioso consente di diminuire sensibilmente i valori del gradiente e delle sottopressioni tali da rendere soddisfatte le verifiche idrauliche al sifonamento e al sollevamento.**

Sezione - Tratto - Lunghezza	aspetti geometrici e idraulici					Configurazione			Coefficienti di permeabilità					Risultati del modello			Verifiche			
	quota piano campagna	spessore minimo limi e argille a campagna	W.L.	Falda	carico sul pc.	codice	descrizione	L diaframma	depositi golenali	corpo arginale	Limi e argille terreni fondazione	Sabbie terreni profondi	Diaframma	Gradiente in uscita	Velocità filtrazione campagna	Sottopressio ne campagna sotto materiale coesivo (h _a)	Coefficiente di sicurezza al sifonamento (F>2?)	Forza stabilizzante (g _{Ti} H _{Ti})	Forza instabilizzant e (g _w h _a)	Verifica sollevamento 0.9 (g _{Ti} H _{Ti}) / 1.1 (g _w h _a) > 1?
[m]	[m s.l.m.]	[m]	[m s.l.m.]	[m s.l.m.]	[m]	[]		[m]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[]	[m/s]	[m]	[]	[kPa]	[kPa]	[-]
33	22.87	5.20	29.29	22.87	6.42	SDF - 7a	con diaframma	15	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	6.30*10 ⁻⁸	1.15*10 ⁻⁵	1*10 ⁻¹⁰	1.15	5.70*10 ⁻⁸	11.50	0.87	93.60	115	0.67
tratto D 1050						PR - 7a	progetto come 7a	33	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	6.30*10 ⁻⁸	1.15*10 ⁻⁵	1*10 ⁻¹⁰	0.30	1.14*10 ⁻⁷	7.70	3.33	93.60	77	0.99
47	22.24	4.30	29.13	22.24	6.89	SDF - 0	molto permeabile	-	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁷	6.30*10 ⁻⁷	1.15*10 ⁻⁵	-	0.51	2.55*10 ⁻⁷	6.80	1.96	77.40	68	0.93
tratto E						SDF - 7a	con diaframma	15	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	6.30*10 ⁻⁸	1.15*10 ⁻⁵	1*10 ⁻¹⁰	1.20	5.87*10 ⁻⁸	11.40	0.83	77.40	114	0.56
780						PR - 0	progetto come 0	25	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁷	6.30*10 ⁻⁷	1.15*10 ⁻⁵	1*10 ⁻¹⁰	0.24		5.80	4.17	77.40	58	1.09
						PR - 7a	progetto come 7a	35	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	6.30*10 ⁻⁸	1.15*10 ⁻⁵	1*10 ⁻¹⁰	0.18	1.12*10 ⁻⁷	6.00	5.56	77.40	60	1.06

3.1 Verifiche ed approfondimenti sviluppati nell'ambito della progettazione definitiva

3.1.1 Premessa

Nel corso del 2019, allo scopo di approfondire l'assetto litostratigrafico del tratto di argine individuato per la realizzazione degli interventi in progetto, sono state effettuate ulteriori indagini geognostiche.

In particolare, tali indagini - per maggiori approfondimenti si rimanda alla *Relazione Geologica (BRTT 31.03)* ed al relativo allegato *Campagna Geognostica 2019 (BRTT 31.04)* – vengono di seguito sintetizzate:

- N°9 prove penetrometriche con prova di dissipazione;
- N°1 pozzo e N°2 piezometri;
- N°1 prova di pompaggio in sito.

Le risultanze delle indagini hanno comportato lievi modifiche sia alla geometria dei substrati che ai parametri di permeabilità da attribuire agli stessi.

Si è reso quindi necessario un aggiornamento delle verifiche, con riferimento solo a quelle sviluppate nei due tratti già preliminarmente individuati come più gravosi (tratto D e tratto E). In particolare alla luce delle nuove indagini si sono riverificate le sezioni 33 e 47, nonché ulteriori due sezioni: la 40bis (tratto D) e la 51 (tratto E), in considerazione del fatto che sono ubicate esattamente in corrispondenza delle indagini svolte nella campagna 2019.

Si riportano quindi di seguito i nuovi valori di riferimento delle permeabilità e le simulazioni sviluppate.

3.1.2 Valori di riferimento delle permeabilità

Nella tabella seguente si riportano i valori dei coefficienti di permeabilità assunti per le verifiche integrative resesi necessarie a seguito della nuova campagna di indagini geognostiche eseguite nel 2019.

Litologia	k 2019 (m/s)
Rilevato Arginale	1,00E-09
Materiale coesivo (limi e argille dei terreni di fondazione)	9.09E-09
Sabbie dei terreni sottostanti	8.84E-04

Per quanto riguarda i depositi golenali è stato mantenuto lo stesso valore di permeabilità assunto nelle verifiche precedenti pari a $1,0 \times 10^{-8}$ m/s.

3.1.3 Simulazioni stato di fatto

Vengono di seguito riportate le nuove simulazioni di stato di fatto eseguite a seguito degli approfondimenti litostratigrafici. In continuità con le verifiche precedenti si è deciso di nominare le nuove verifiche di stato di fatto come configurazione 7b i cui valori di k assunti sono di seguito riportati:

- argine: **1,00E-09**
- materiale coesivo: **9.09E-09**
- sabbie: **8.84E-04**
- depositi: **1,00E-08**
- diaframma: **1,00E-10**

Per maggiore chiarezza gli schemi grafici dei risultati sotto riportati vengono rappresentati nell'intorno del rilevato arginale.

sezione 33

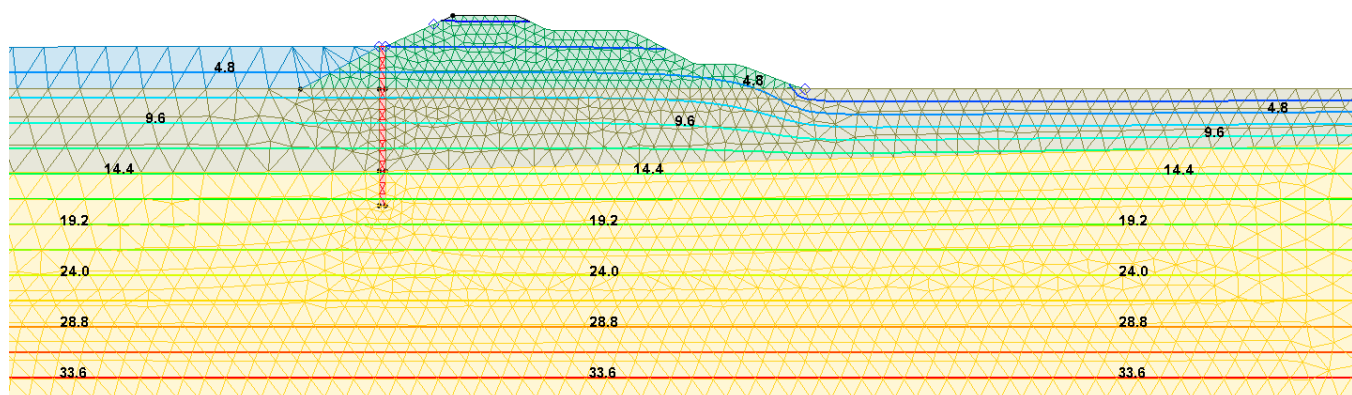


Figura 3-63 – Sezione 33: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto

sezione 47

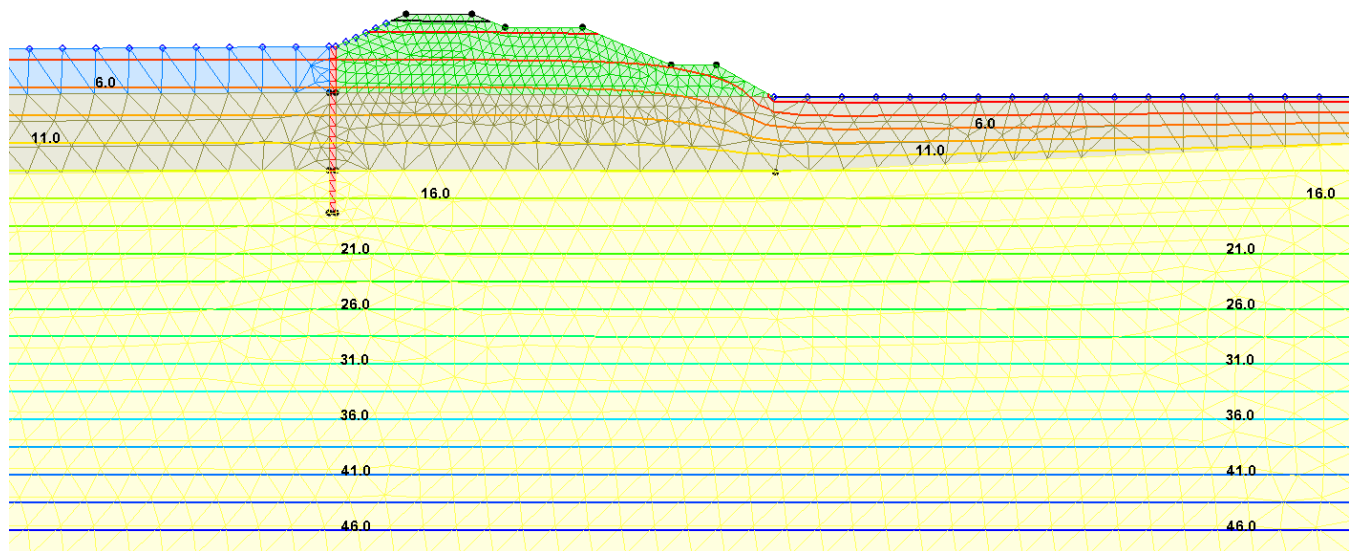


Figura 3-64 – Sezione 47: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto

sezione 40bis

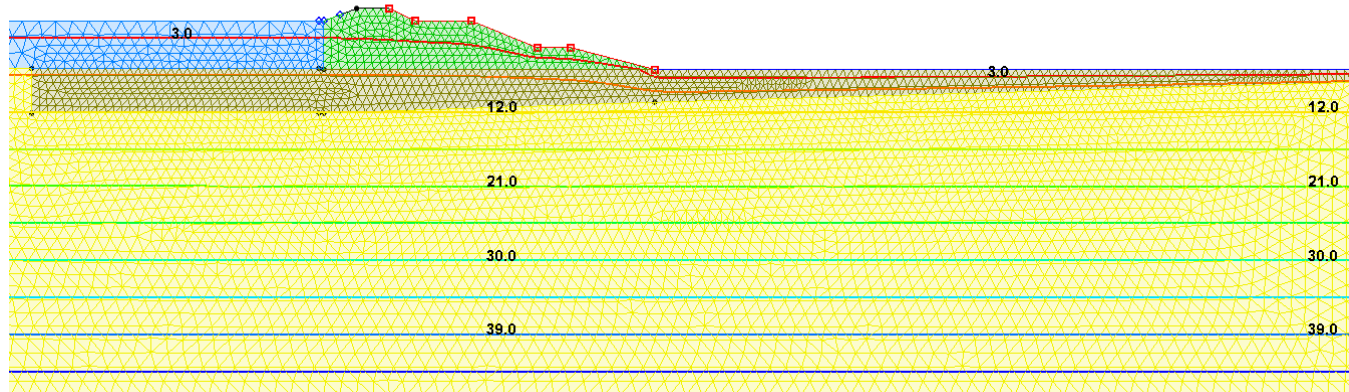


Figura 3-65 – Sezione 40bis: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto

sezione 51

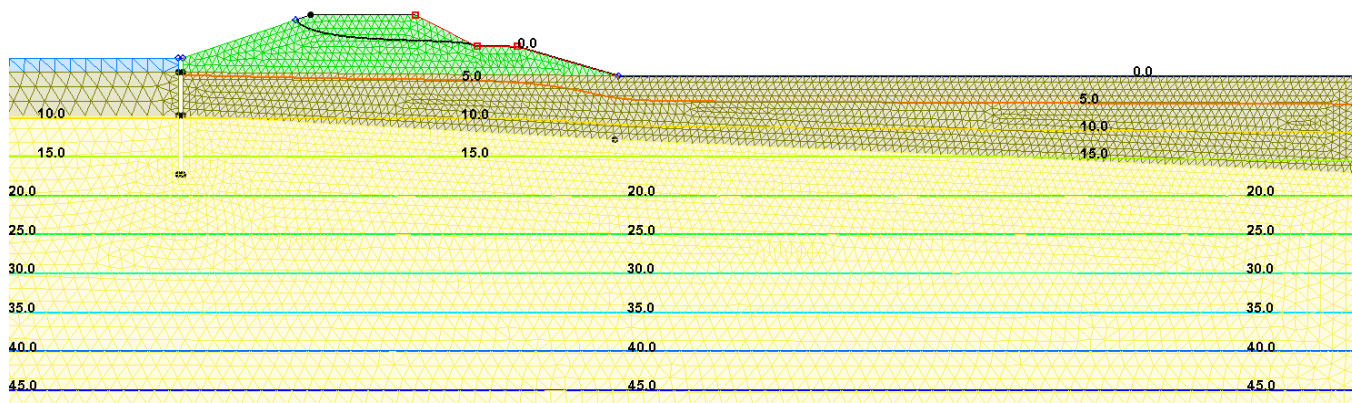


Figura 3-66 – Sezione 51: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto

Nella tabella seguente si riportano le principali grandezze idrauliche dedotte dalle simulazioni di stato di fatto e i risultati delle verifiche di filtrazione al sifonamento e al sollevamento secondo i criteri delle NTC2018.

Le verifiche di approfondimento svolte nel progetto Definitivo hanno di fatto confermato le criticità già evidenziate nelle sezioni 33 e 47, criticità ancor più evidenti nella sezione aggiuntiva 40bis, mentre nell'altra sezione aggiuntiva 51 le verifiche risultano, seppur di poco, soddisfatte.

Ciò ha consentito di definire l'opportunità di iniziare gli interventi finanziati del presente progetto esecutivo di 1° lotto, a partire da valle del tratto individuato nel progetto Definitivo, non più alla sezione 51/52, come nel progetto di fattibilità tecnica ed economica, ma alla sezione 48bis (tra la 48 e la 49), dove le condizioni idrauliche cominciano a difettare.

Sezione - Tratto - Lunghezza	aspetti geometrici e idraulici					Configurazione				Coefficienti di permeabilità					Risultati del modello			Verifiche			
	quota piano campagna	spessore minimo limi e argille a campagna	W.L.	Falda	carico sul pc.	codice	descrizione	L diaframma	quota diaframma	depositi golenali	corpo arginale	Limi e argille terreni fondazione	Sabbie terreni profondi	Diaframma	Gradiente in uscita	Velocità filtrazione campagna	Sottopressio ne campagna sotto materiale coesivo (h _a)	Coefficiente di sicurezza al sifonamento (F>2?)	Forza stabilizzante (g _{TI} H _{TI})	Forza instabilizzant e (g _w h _a)	Verifica sollevamento 0.9 (g _{TI} H _{TI}) / 1.1 (g _w h _a) > 1?
[m]	[m s.l.m.]	[m]	[m s.l.m.]	[m s.l.m.]	[m]	[]		[m]	[m s.l.m.]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[]	[m/s]	[m]	[]	[kPa]	[kPa]	[-]
33	22.87	5.20	29.29	22.87	6.42	SDF - 7b	con diaframma	15	11.87	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	9.09*10 ⁻⁹	8.84*10 ⁻⁴	1*10 ⁻¹⁰	1.54	1.14*10 ⁻⁸	12.06	0.65	93.60	120.6	0.64
TRATTO D																					
47	22.24	4.30	29.13	22.24	6.89	SDF - 7b	con diaframma	15	11.80	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	9.09*10 ⁻⁹	8.84*10 ⁻⁴	1*10 ⁻¹⁰	1.55	1.12*10 ⁻⁸	11.89	0.65	77.40	118.9	0.53
TRATTO E																					
40bis	22.36	2.00	29.20	22.36	6.84	SDF - 7b	con diaframma	-	-	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	9.09*10 ⁻⁹	8.84*10 ⁻⁴	-	1.84	1.80*10 ⁻⁸	8.40	0.54	36.00	84	0.35
51	21.76	8.30	29.09	22.24	7.33	SDF - 7b	con diaframma	15	9.05	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	9.09*10 ⁻⁹	8.84*10 ⁻⁴	1*10 ⁻¹⁰	0.45	5.3*10 ⁻⁹	11.55	2.22	149.40	115.5	1.06

3.1.4 Simulazioni progetto

Vengono di seguito riportati le simulazioni di progetto condotte sulle sezioni ¹. In particolare la soluzione del progetto Definitivo prevede un approfondimento del diaframma esistente (ove presente), mentre per la sezione 40bis la realizzazione ex-novo di un diaframma che interessa lo strato sabbioso e si attesta alla base dello strato costituito dal materiale coesivo, quest'ultimo tratto non oggetto della presente progettazione esecutiva a causa della limitatezza del finanziamento disponibile.

sezione 33

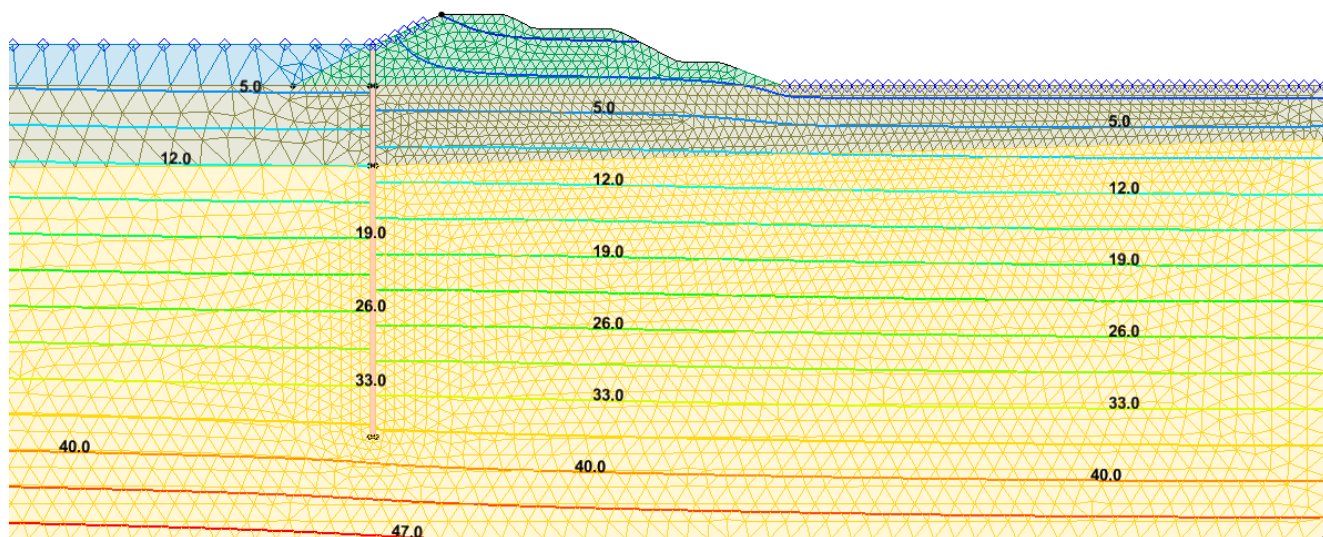


Figura 3-67 – Sezione 33: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto

¹ la sezione 51 è stata sviluppata anche per le simulazioni di progetto nonostante già nello stato di fatto fosse verificata

sezione 47

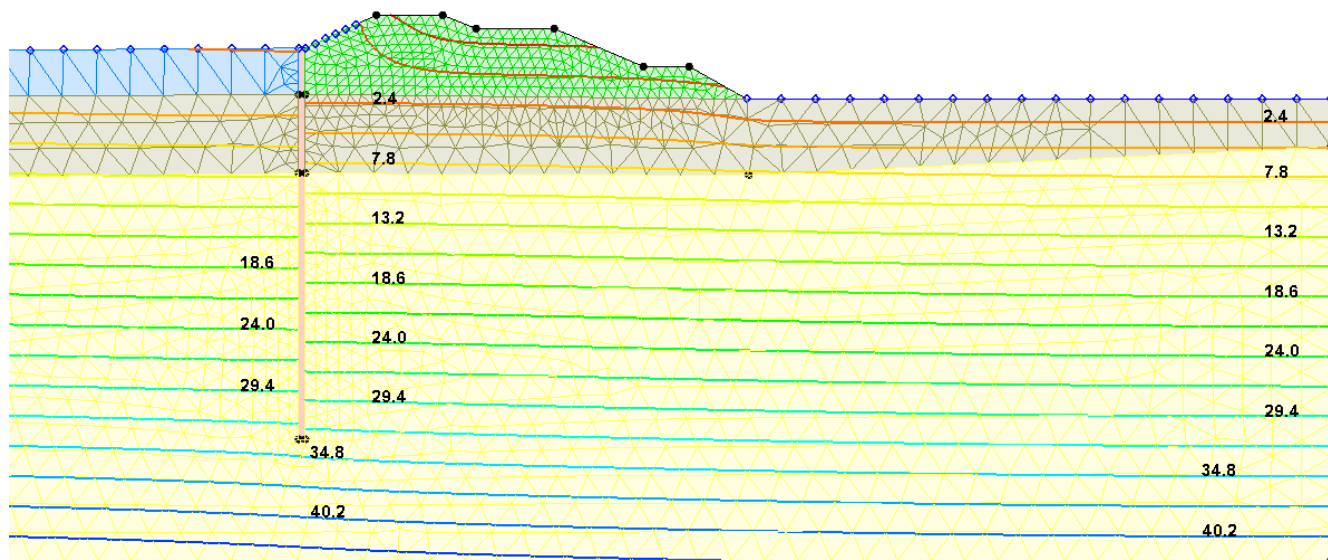


Figura 3-68 – Sezione 47: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto

sezione 40bis

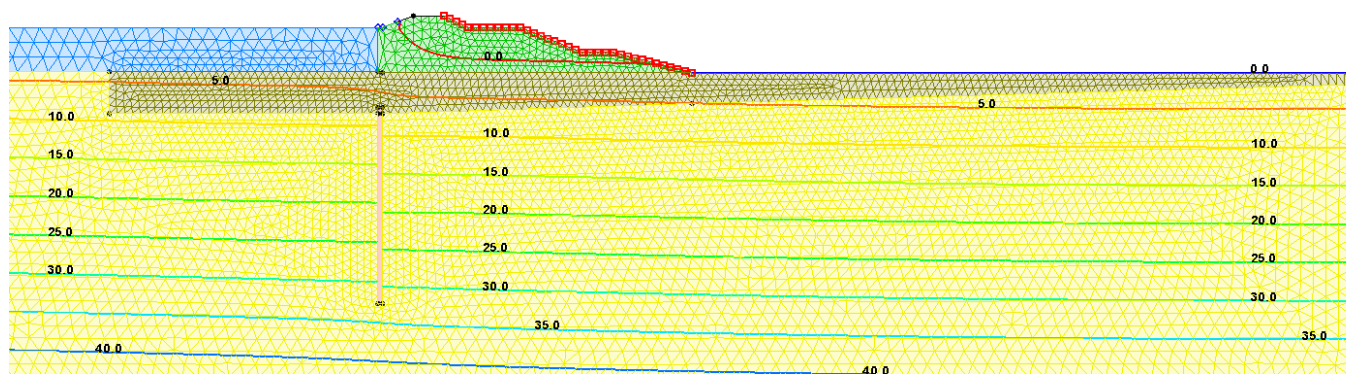


Figura 3-69 – Sezione 40bis: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto

sezione 51

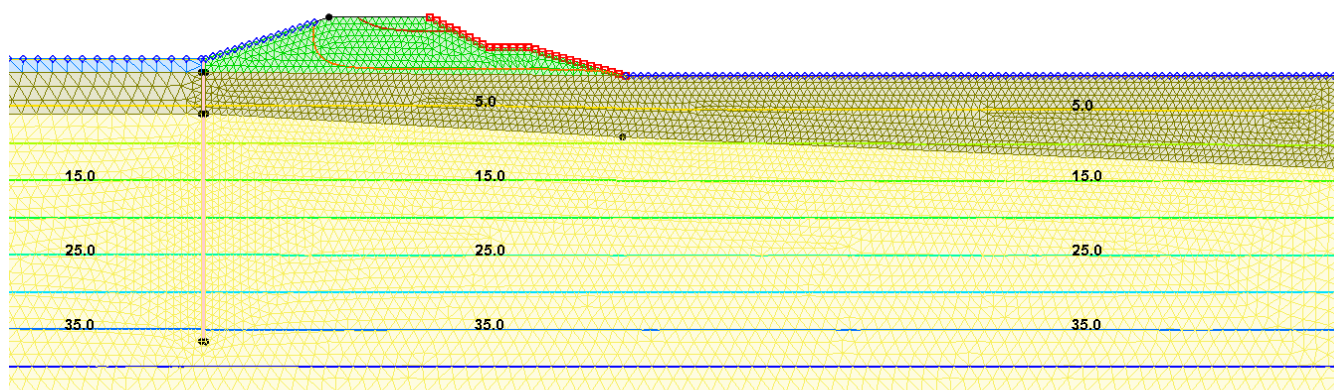


Figura 3-70 – Sezione 51: andamento delle sottopressioni idrauliche [m] all'interno del campo di moto

Nella tabella seguente si riportano le principali grandezze idrauliche dedotte dalle simulazioni di progetto e i risultati delle verifiche di filtrazione al sifonamento e al sollevamento secondo i criteri delle NTC2018.

L'intervento proposto nel progetto definitivo consente di riportare nei termini di legge i coefficienti di sicurezza sia al sifonamento che al sollevamento dei tratti D ed E come sopra definiti ed illustrati; l'intervento di cui al presente progetto finanziato costituisce un primo tassello in tale direzione.

Sezione - Tratto - Lunghezza	aspetti geometrici e idraulici					Configurazione				Coefficienti di permeabilità					Risultati del modello			Verifiche			
	quota piano campagna	spessore minimo limi e argille a campagna	W.L.	Falda	carico sul pc.	codice	descrizione	L diaframma	quota diaframma	depositi golenali	corpo arginale	Limi e argille terreni fondazione	Sabbie terreni profondi	Diaframma	Gradiente in uscita	Velocità filtrazione campagna	Sottopressio ne campagna sotto materiale coesivo (h _a)	Coefficiente di sicurezza al sifonamento (F>2?)	Forza stabilizzante (g _{T1} H _{T1})	Forza instabilizzant e (g _w h _a)	Verifica sollevamento 0.9 (g _{T1} H _{T1}) / 1.1 (g _w h _a) > 1?
[m]	[m s.l.m.]	[m]	[m s.l.m.]	[m s.l.m.]	[m]	[]		[m]	[m s.l.m.]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[]	[m/s]	[m]	[]	[kPa]	[kPa]	[-]
33	22.87	5.20	29.29	22.87	6.42	SDF - 7b	con diaframma	15	11.87	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	9.09*10 ⁻⁹	8.84*10 ⁻⁴	1*10 ⁻¹⁰	1.54	1.14*10 ⁻⁸	12.06	0.65	93.60	120.6	0.64
tratto D						PR - 7b	progetto come 7b	36	-9.13	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	9.09*10 ⁻⁹	8.84*10 ⁻⁴	1*10 ⁻¹⁰	0.49	9.82*10 ⁻⁸	6.77	2.04	93.60	67.7	1.13
47	22.24	4.30	29.13	22.24	6.89	SDF - 7b	con diaframma	15	11.8	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	9.09*10 ⁻⁹	8.84*10 ⁻⁴	1*10 ⁻¹⁰	1.55	1.12*10 ⁻⁸	11.89	0.65	77.40	118.9	0.53
tratto E						PR - 7b	progetto come 7b	38	-11.2	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	9.09*10 ⁻⁹	8.84*10 ⁻⁴	1*10 ⁻¹⁰	0.49	5.87*10 ⁻⁸	6.80	2.04	93.60	68	1.13
40bis	22.36	2.00	29.20	22.36	6.84	SDF - 7b	con diaframma	-	-	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	9.09*10 ⁻⁹	8.84*10 ⁻⁴	-	1.84	1.80*10 ⁻⁸	8.40	0.54	36.00	84	0.35
						PR-7b	progetto come 7b	26.5	-8.63	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	9.09*10 ⁻⁹	8.84*10 ⁻⁴	1*10 ⁻¹⁰	0.49	8.22*10 ⁻⁸	1.88	2.04	36.00	18.8	1.57
51	21.76	8.30	29.09	22.24	7.33	SDF - 7b	con diaframma	15	9.05	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	9.09*10 ⁻⁹	8.84*10 ⁻⁴	1*10 ⁻¹⁰	0.45	5.3*10 ⁻⁹	11.55	2.22	149.40	115.5	1.06
						PR - 7b	progetto come 7b	38	-13.95	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹	9.09*10 ⁻⁹	8.84*10 ⁻⁴	1*10 ⁻¹⁰	0.23	1.24*10 ⁻⁹	9.23	4.35	149.40	92.3	1.32

4. RELAZIONE SUGLI ASPETTI TECNOLOGICI DELLA SOLUZIONE ADOTTATA

4.1 Premessa

Tra gli abitati di Guastalla e Luzzara le diaframature già eseguite per proteggere l'argine maestro dai fenomeni di filtrazione hanno consentito di tenere sotto controllo le piene importanti del grande fiume fra cui quella del 2000 ed anche le successive. In alcuni tratti, situati nel territorio del Comune di Boretto, si sono invece evidenziati ancora alcuni fontanazzi, anche in prossimità di aree dove erano stati realizzate in precedenza le opere di diaframmatura, non ultimi quelli attivati in occasione della piena nel novembre 2019.

Tra il 2017 ed il 2019 sono state condotte specifiche indagini geognostiche, al fine di avere un migliore quadro conoscitivo dell'area, per poter valutare gli interventi integrativi necessari al fine del miglioramento del livello di sicurezza dell'argine maestro, in riferimento ai fenomeni di filtrazione sotterranea ed alla conseguente formazione di "fontanazzi".

Sulla base delle risultanze delle indagini geologiche effettuate e della conseguente parametrizzazione geotecnica è stato ricostruito un profilo stratigrafico tra le progressive indagate.

Ai capitoli precedenti sono state illustrate le modalità con cui sono stati individuati tratti omogenei del rilevato arginale e per ciascun tratto una sezione di riferimento. Le sezioni così individuate sono poi state oggetto di verifica ai moti di filtrazione sotterranei, che si possono innescare dall'innalzamento del livello del fiume Po in corrispondenza di eventi di piena, individuando in tal modo le criticità legate a situazioni stratigrafiche caratterizzate da potenziali alte permeabilità di flusso idraulico.

Infatti alte permeabilità di flusso idraulico corrispondono ad alte velocità di moti di filtrazione e conseguente rischio di sifonamento dell'opera idraulica sovrastante di contenimento, con grave pregiudizio per l'opera in corrispondenza di eventi di piena con permanenza di picco che si possono mantenere per molte ore.

Sempre attraverso le modellazioni di cui sopra sono state quindi definite le profondità ed i tratti delle opere di “*cut-off*” idraulico (diaframmi) idonee a formare una barriera sotterranea al fine di prolungare il percorso di filtrazione e quindi impedire l’instaurarsi di fenomeni di “sifonamento” dell’argine.

Nel presente Capitolo, dopo l’attenta valutazione delle tecnologie oggi disponibili, per la realizzazione di un diaframma con finalità di barriera al fenomeno di migrazione idraulica sotterranea sviluppata in fase di progettazione di fattibilità tecnica ed economica, viene descritta la tecnologia scelta per l’intervento, in fase di progettazione definitiva, evidenziandone le peculiarità applicative.

Per la descrizione di dettaglio delle opere previste in progetto si rimanda alla Relazione Generale (elaborato BRTT31.01).

4.2 Iniezione di miscela cementizia ad alta pressione - Jet grouting

4.2.1 La tecnologia

Il Jet grouting è una tecnologia esecutiva che prevede l’iniezione nel terreno di una miscela cementizia ad alta pressione (500 ÷ 600 bar), al fine di consolidare i terreni di fondazione o per la formazione di diaframmi verticali continui, che possono essere armati all’occorrenza.

La tecnica consiste nel disgregare il terreno miscelandolo nel contempo con una sospensione cementizia, oppure nella rimozione della parte più fine mediante l’uso di aria o acqua, per ampliare la diffusione del trattamento con un effetto di parziale sostituzione del terreno.

Le fasi esecutive, per la realizzazione di un diaframma, possono essere sommarie così descritte:

1. perforazione del terreno sino alla quota desiderata, la perforazione avviene con circolazione di acqua oppure, qualora sia necessario sostenere le pareti del foro, di fango bentonitico o prodotto stabilizzante analogo;
2. partendo dal basso verso l’alto estrazione delle aste di perforazione con rotazione e contemporanea iniezione a pressione di una miscela cementizia; in det-

to modo il terreno si frantuma e si mescola con il prodotto iniettato e si procede in tal modo risalendo sino al raggiungimento della quota desiderata;

3. completata la fase d'iniezione, si ripetono le operazioni per le colonne attigue di jet grouting, secondo la sequenza definita nel rispetto delle prescrizioni del Capitolato Speciale d'Appalto, avendo cura di eseguire delle sovrapposizioni e compenetrazioni tra le colonne, così da ottenere un unico corpo finale continuo e compatto.

Si possono quindi eseguire con questa tecnica esecutiva colonne di diametro variabile, quindi diaframmi di diverso spessore, in funzione del tipo di terreno e degli obiettivi da raggiungere.

Nel caso in esame si è previsto uno spessore utile del diaframma di 660 mm, quindi realizzando colonne del diametro di 1000 mm, con un passo di 750 mm, per una corretta compenetrazione, realizzando il diaframma continuo rappresentato schematicamente nella seguente **Figura 4-1** Schema di diaframma continuo con colonne jet grouting secanti.

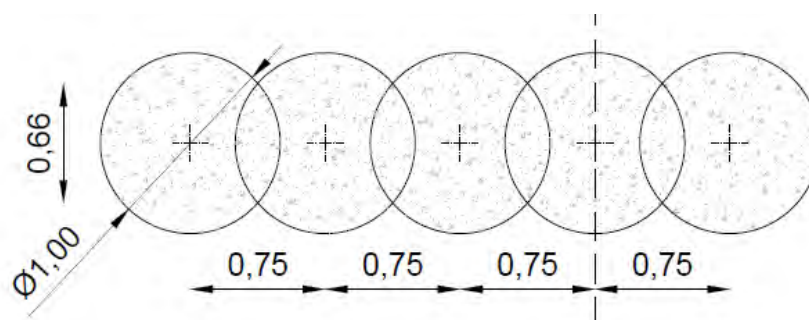


Figura 4-1 Schema di diaframma continuo con colonne jet grouting secanti

4.2.2 Le attrezzature

Le attrezzature necessarie per l'esecuzione della tecnologia jet grouting possono essere sinteticamente elencate:

- perforatrice semovente, di norma cingolata, munita di aste di perforazione idonee, monitor e ugelli;

- impianto di miscelazione per il confezionamento di una miscela cementizia, dotato di sistemi di pesatura ponderale;
- pompa ad Alta Pressione (400 ÷ 600 bar).

La perforatrice avrà un'antenna con corsa tale da realizzare il trattamento colonna-re senza necessità di interruzione dell'iniezione per operazioni di giunzione aste.

4.2.3 La tecnica esecutiva

La tecnica esecutiva applicata alla realizzazione di un diaframma verticale è ben rappresentata dalla seguente **Figura 4-2**, che sintetizza le fasi esecutive, precisamente:

- Fase 1:** Perforazione con aste di perforazione dotate di "monitor" provvisto di ugelli, fino alla profondità di progetto del diaframma;
- Fase 2 e 3:** Iniezione ad alta pressione in risalita di miscela cementizia e contestuale rotazione delle aste di perforazione, per la realizzazione di un elemento colonnare verticale di terreno consolidato;
- Fase 4:** Realizzazione di colonne consolidate adiacenti/secanti, secondo la sequenza operativa definita dall'Impresa, nel rispetto delle prescrizioni del Capitolato Speciale d'Appalto

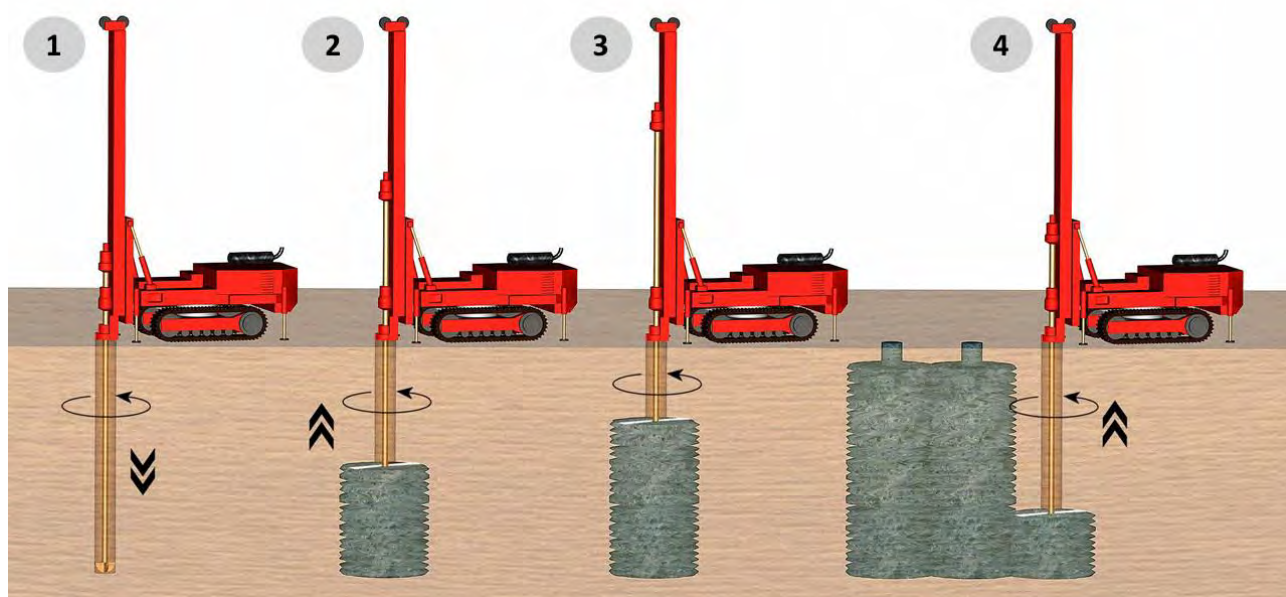


Figura 4-2 - Fasi esecutive del Jet grouting

4.2.4 Verifiche e controlli

Si distinguono di norma i controlli in fase esecutiva dai controlli di verifica del trattamento colonnare realizzato (diametri, continuità, etc.).

Controlli in fase esecutiva

Durante l'esecuzione delle colonne di prova saranno effettuati diversi controlli allo scopo di garantire la qualità del prodotto finale.

Si utilizzerà una miscela cementizia che avrà indicativamente un rapporto ponderale A/C = 1 e quindi con le seguenti quantità per ogni metro cubo di miscela:

Acqua	Kg/mc	756,00
Cemento	Kg/mc	756,00
Miscela	Kg/mc	1.512,00

Durante i lavori sulla miscela cementizia verrà verificata periodicamente :

- Viscosità Marsh
- Densità

Registrazione parametri di trattamento

La perforatrice sarà equipaggiata con strumentazione elettronica per il controllo e la registrazione in continuo dei parametri della lavorazione sia in fase di perforazione, sia in fase di iniezione, in particolare verranno registrati tutti i seguenti parametri:

1. profondità del foro (*"jet depth"*);
2. forza di spinta dell'asta (*"jet force"*);
3. velocità di traslazione dell'asta (*"jet depth"*);
4. coppia di rotazione dell'asta (*"jet TORQ"*);
5. velocità di rotazione dell'asta (*"jet ROT"*);
6. inclinazione del mast, assi X e Y (*"jet inclXY"*);
7. pressione, portata e volume della miscela cementizia;

8. pressione dell'aria (nel caso di sistema bifluido);
 9. pressione e portata dell'acqua (nel caso di sistema trifluido);
 10. velocità di risalita;
 11. tempo o step di risalita delle aste;
 12. lunghezza della colonna iniettata;
 13. data e ora di inizio e fine della singola colonna e durata esecuzione colonna;
- Questi parametri vengono registrati in continuo, ovvero su ogni colonna jet grouting eseguita e i dati riversati su un dispositivo rimovibile e portati su PC, per una successiva stampa che certificherà la lavorazione eseguita.

Controlli di verifica

Per la verifica del diametro reso delle colonne, del grado di compenetrazione e l'uniformità del trattamento colonnare, ad avvenuta maturazione della miscela cementizia iniettata, si possono eseguire due tipologie di controlli: controlli distruttivi e controlli non distruttivi.

I controlli distruttivi consistono nella esecuzione di carotaggi meccanici, con carotiere doppio munito di corona al diamante, ad una distanza predeterminata dall'asse di una o più colonne, per verificare il raggiungimento dei diametri nominali di progetto. I carotaggi sono inseriti all'interno delle attività di verifica e controllo dei parametri della lavorazione, sia durante l'esecuzione di un campo prove da eseguirsi preliminarmente all'inizio delle attività di progetto, che in corso d'opera vero e proprio.

Le carote di terreno trattato vengono disposte in apposite cassette catalogatrici, fotografate e verrà immediatamente calcolato il coefficiente R.Q.D. o grado di recupero per la determinazione del grado di compattezza ed omogeneità del trattamento jet grouting.

Per ogni carotaggio, si procede alla scelta di un certo numero di campioni da prelevare in apposite fustelle e da trasportare presso un laboratorio geotecnico specializzato per i seguenti test:

- analisi granulometriche;

- prova di permeabilità;
- analisi microsismiche;
- determinazione del contenuto d'acqua;
- misura del peso di volume;
- prove di compressione ad espansione laterale libera per la resistenza a rottura.

I fori di carotaggio eseguiti vengono impiegati per le prove di permeabilità in situ di tipo Lefranc. Le prove di permeabilità in situ servono alla individuazione del coefficiente di permeabilità dell'ammasso consolidato, coefficiente k in m al secondo.

I controlli non distruttivi consistono nella esecuzione delle seguenti tipologie di prove:

- prove geofisiche;
- controlli termometrici;
- indagini geoelettriche.

Per quanto riguarda le prove geofisiche, la metodologia utilizzata è quella della tomografia sismica che consente, attraverso l'acquisizione e l'elaborazione di un considerevole numero di dati, la costruzione di immagini bidimensionali o tridimensionali del terreno consolidato (**Figura 4-3**).

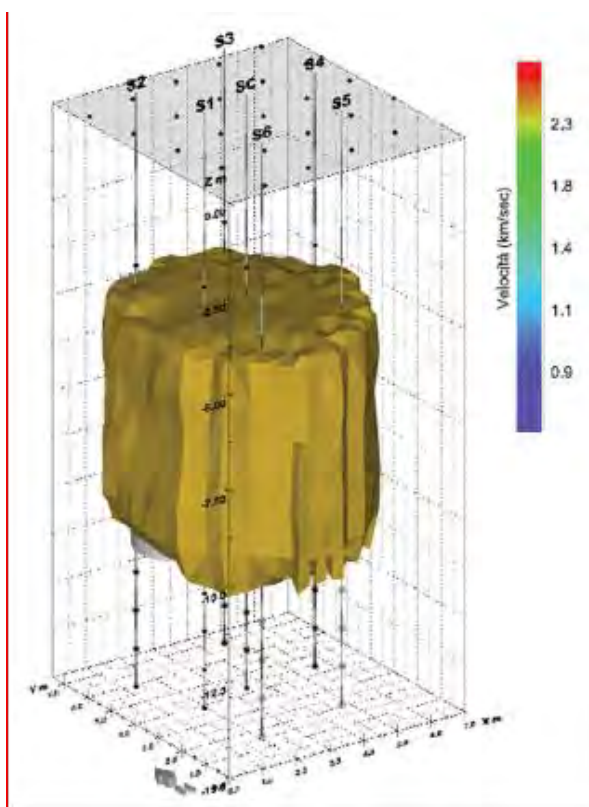


Figura 4-3 - Sismica tomografica 3D

4.2.5 Vantaggi della tecnologia

L'utilizzo del jet grouting per finalità idrauliche è una forma estensiva dell'utilizzo di una tecnologia nata abbastanza recentemente nell'ambito delle attività utilizzate per il miglioramento delle caratteristiche geotecniche dei terreni (consolidamenti). Si tratta di una tecnica realizzativa molto flessibile che può essere utilizzata nelle seguenti varianti esecutive più importanti:

- Jet grouting colonnare (la modalità applicata nell'intervento in esame);
- Jet grouting lamellare.

La peculiarità della tecnologia, nella realizzazione di un diaframma continuo verticale, a differenza di ogni altra tecnica esecutiva, risiede nella possibilità di realizzare uno schermo idraulico, o parte di esso, a profondità predeterminate, senza la necessità di estendere lo schermo fino in superficie.

Infatti la fase di perforazione può raggiungere la profondità di progetto, ma la fase di iniezione ad alta pressione, che realizza l'elemento colonnare o lamellare, può

essere parzializzata alle quote d'interesse indicate dalle verifiche idrauliche, quindi separando in modo netto la fase di perforazione con quella del trattamento.

Ma la progettazione di uno schermo idraulico, proporzionalmente all'importanza dell'opera, non può prescindere da altri importanti considerazioni legati alla fase realizzativa, soprattutto nel caso di barriere idrauliche profonde, come nel progetto in esame.

Certezza delle geometrie esecutive e continuità del diaframma

Considerata la profondità della barriera idraulica in progetto e considerato il grado di incertezza delle geometrie esecutive insita nelle modalità esecutive non è stata utilizzata come ipotesi realizzativa il jet grouting lamellare, ma bensì il jet grouting colonnare che rappresenta senza dubbio una soluzione più sicura.

Si pensi infatti che la sola, ma inevitabile e difficilmente controllabile deformazione elastica delle aste di perforazione, può indurre in significativi errori di posizionamento planimetrico del monitor d'iniezione, con la conseguente realizzazione dei "tegoli" non posizionati nello stesso piano di giacitura verticale e quindi della mancanza della necessaria sovrapposizione di tegoli adiacenti.

Diversamente la realizzazione di un diaframma di colonne consolidate con tecnica jet grouting può essere utilizzato per gli obiettivi da raggiungere, ma successivamente ad una riflessione che il progettista deve fare in relazione ai seguenti elementi derivanti dalla determinazione dei seguenti parametri fondamentali: geologia e profondità.

Tali elementi di progetto, a loro volta, influenzano in modo sensibile i parametri esecutivi che si dovranno assumere per l'efficacia del diaframma e precisamente: scelta del "diametro nominale" reso ed interasse tra le colonne consolidate.

Infatti, il jet grouting non prevede la determinatezza delle geometrie realizzative, ma il riferimento alla scelta dei parametri citati è lasciata alle numerose esperienze ormai presenti in letteratura e quindi a correlazioni parametriche tra tali parametri, alla sensibilità ed al grado di prudenza del progettista e soprattutto alla esecuzione di un campo prove preliminare e propedeutico all'inizio delle attività di diaframma-

tura, per individuare i parametri ottimali al raggiungimento dei diametri di progetto e precisamente:

- Pressione d'iniezione;
- Portata d'iniezione;
- Velocità di risalita del monitor;

È principalmente per queste ragioni che nel presente progetto è stata scelta questa tecnologia per la realizzazione delle barriere in profondità nello strato sabbioso.

Di seguito si riepilogano i principali vantaggi della tecnologia adottata nel presente progetto esecutivo (**Jet Grouting colonnare**):

- possibilità di realizzare uno schermo idraulico, o parte di esso, a profondità predeterminate, senza la necessità di estendere lo schermo fino in superficie;
- certezza delle geometrie esecutive e continuità del diaframma rispetto alle altre metodologie, compresi il jet lamellare;
- minore volume del rifiuto o comunque del materiale di scavo da gestire, trasportare ed allocare;
- condizioni geologiche omogenee ed ottimali per il terreno oggetto di trattamento;
- minore impatto in superficie, con particolare riferimento alle zone pavimentate o comunque antropizzate;
- minori dimensioni della cantieristica e delle forniture da/verso il cantiere;
- costi non superiori ad altre tecniche, se valutate tenendo conto della possibilità di realizzazione "chirurgica" dell'intervento;
- possibilità di controllare e registrare in corso di realizzazione tutti i parametri di iniezione e quindi avere un quadro completo e preciso dell'eseguito colonna per colonna.

4.2.6 Campo prove

Come già accennato in precedenza, prima dell'inizio dei lavori, sarà realizzato un campo prove per la determinazione dei parametri ottimali della lavorazione da utilizzare per consentire il raggiungimento dei diametri nominali di progetto.

Si procederà ad eseguire alcune colonne di prova fuori opera, in una zona in cui le caratteristiche del terreno siano il più possibile rappresentative del terreno da consolidare/impermeabilizzare in fase esecutiva.

L'Appaltatore proporrà il programma di campo prove per approvazione alla Direzione dei Lavori, in conformità alle prescrizioni del Capitolato Speciale d'Appalto (BRTT 31.14), a cui si rimanda per approfondimenti.

5. RELAZIONE ARCHEOLOGICA

Per quanto riguarda l'archeologia si rimanda alla *Verifica preventiva dell'interesse archeologico* allegata al progetto di Fattibilità tecnica ed economica (elaborato *BRTT 1.05*).

Si sottolinea che tale documento è stato sottoposto a parere del Ministero per i beni e le attività culturali – Soprintendenza archeologia belle arti e paesaggio per la Città Metropolitana di Bologna e le Province di Modena, Reggio Emilia e Ferrara che si è espresso positivamente.

Per maggiori dettagli si rimanda alla Relazione generale (*BRTT 31.01*) del presente progetto Esecutivo.

6. PIANO DI GESTIONE DELLE MATERIE

6.1 Premessa

Le opere previste nel presente progetto consistono in elementi di “cut-off” idraulico (diaframmi) idonei a formare una barriera sotterranea al fine di prolungare il percorso di filtrazione e quindi impedire l'instaurarsi di fenomeni di “sifonamento” dell'argine. Si prevede in particolare di realizzare colonne di terreno consolidato con metodo “jetting”, del diametro di 1000 mm, per complessivi 6'343 m circa.

Ai fini della gestione delle materie, il volume di materiale escavato deriva dalla formazione dei pozzetti esplorativi per la localizzazione dei diaframmi esistenti e per l'eventuale scavo parziale dell'argine esistente per formare il piano di lavoro delle macchine per la perforazione ed iniezione. In tutti i casi, la totalità del materiale scavato verrà reimpiegato per il rinterro dei pozzetti e la formazione dell'argine..

Dal jet-grouting, pur nell'indeterminatezza della stima che potrà essere raffinata soltanto a seguito del campo prove previsto prima dell'esecuzione delle opere, si può ipotizzare, in base a casi analoghi per dimensioni e litologia, un'incidenza del “refluo” della miscela di iniezione (*Spoil*) dell'ordine del 30% del volume complessivo iniettato (pari al volume delle colonne consolidate). Si può pertanto ipotizzare un volume complessivo di miscela residuale pari a circa 1'500 mc.

6.2 Normativa di riferimento

In sintesi, la normative applicabile per gli interventi in oggetto è la seguente:

- Decreto del Presidente della Repubblica del 13 giugno 2017, n.120 “*Regolamento recante la disciplina semplificata della gestione delle terre e rocce da scavo, ai sensi dell'articolo 8 del decreto-legge 12 settembre 2014, n. 133, convertito, con modificazioni, dalla legge 11 novembre 2014, n. 164*”.
- D.Lgs. 3 aprile 2006 n. 152 e ss.mm.ii. “*Norme in materia ambientale*”.

- D.Lgs. 16 gennaio 2006 n. 4 *“Ulteriori disposizioni correttive ed integrative del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152, recante norme in materia ambientale”*.
- D.M. 5 febbraio 1998 *“Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli articoli 31 e 33 del Decreto Legislativo 5.2.97 n. 22”*.
- Delibera SNPA n. 54/2019 - *“Linee guida sull'applicazione della disciplina per l'utilizzo delle terre e rocce da scavo”*

6.3 Tipologie di materiale

Si prevede di rimuovere, scavare o demolire e movimentare le seguenti tipologie di materiale:

- Terre e rocce da scavo;
- Conglomerati cementizi;
- Esubero della miscela di iniezione.

Nell'ambito del presente lotto non si prevede la demolizione di pavimentazioni stradali, invece prevista nel lotto successivo, non oggetto del presente appalto.

Si prevede di approvvigionare le seguenti tipologie di materiale:

- Miscele cementizie di iniezione;;
- Conglomerati cementizi;

Nell'ambito del presente lotto non si prevede l'approvvigionamento di conglomerati bituminosi, invece previsto nel lotto successivo, non oggetto del presente appalto.

6.4 Fabbisogni di materiale

Nel presente paragrafo si riportano le quantità relative ai fabbisogni dei materiali necessari per la realizzazione delle opere in progetto.

I suddetti materiali sono suddivisi nelle seguenti categorie principali dei quali si riportano le quantità di progetto:

- Terre e rocce da scavo.....**1.060 mc**

- Miscele cementizie di iniezione.....**4.980 mc**
- Conglomerati cementizi**50 mc**

Si prevede che le terre saranno tutti provenienti dal riutilizzo del materiale di scavo precedentemente accantonato in cantiere.

I conglomerati cementizi saranno reperiti presso gli impianti presenti nel territorio.

6.5 *Materiali prodotti e trattamento degli stessi*

Di seguito si riportano i quantitativi di materiali prodotti durante le operazioni di scavo e demolizione previste. I volumi sono stati suddivisi per tipologia di materiale:

- Terre e rocce da scavo.....**1.060 mc**
- Miscela cementizia di iniezione (*Spoil*).....**1.500 mc**
- Conglomerati cementizi**55 mc**

Si prevede che le terre e le rocce provenienti dagli scavi vengano totalmente riutilizzate (rinterri e rifacimenti argine).

Per quanto riguarda il volume del fango pesante che fuoriesce dal punto d'iniezione (*Spoil*), costituito da una porzione di terreno asportato durante la lavorazione, in sospensione con la miscela cementizia iniettata, esso dovrà essere conferito a discarica autorizzata, previa decantazione e solidificazione in vasche di stoccaggio opportunamente realizzate in adiacenza al cantiere. Il fango, composto principalmente da un alto contenuto ponderale di cemento ed una porzione di terreno proporzionale al grado di finezza dello stesso, è soggetto ad una fase di presa estremamente rapida, assumendo la consistenza di materiale lapideo dopo poche ore. E' quindi è da considerarsi in tutto e per tutto un rifiuto da poter essere conferito a discarica per inerti.

Il materiale proveniente dalle demolizioni di piccole strutture in cls/c.a. dovrà essere conferito anch'esso a discarica autorizzata.

6.6 Bilancio dei materiali

Nella seguenti tabelle riepilogative si riportano i bilanci di volume dei materiali in gioco:

MATERIALE	PRODOTTO [mc]	FABBISOGNO [mc]	ESUBERO [mc]
Terre e rocce da scavo	1.060	1.060	-

MATERIALE	ESUBERO [mc]	FABBISOGNO (DA IMPIANTO) [mc]
Miscele cementizie di iniezione	1.500	4.980
Conglomerati cementizi	55	50

Gli articoli 20 e 21 del DPR del 13 giugno 2017, n. 120, prevedono l'utilizzo di terre e rocce come sottoprodotti, provenienti da cantieri di piccole dimensioni, vale a dire cantieri in cui sono prodotte terre e rocce da scavo in quantità non superiori a 6'000 metri cubi, come nel caso in questione.

Si ricorda che il DPR 120/2017 prevede che il produttore delle terre e rocce da scavo invii all'ARPA ed al Comune competenti per territorio una dichiarazione relativa alle caratteristiche dei materiali da scavare secondo le modalità definite all'art. 21.

Le attività di scavo potranno avere inizio solo ed esclusivamente una volta trascorsi almeno 15 giorni dalla trasmissione della dichiarazione. La modulistica va trasmessa anche nel caso di riutilizzo in sito del materiale scavato.

Al termine del riutilizzo la ditta dovrà trasmettere agli stessi Enti la "dichiarazione di avvenuto utilizzo".

La modulistica relativa alle terre e rocce da scavo può essere scaricata dal sito ARPAE (https://www.arpae.it/dettaglio_generale.asp?id=3185&idlivello=1770)

6.7 Siti di deposito

Sono stati preliminarmente individuati, nel raggio di 10-15 Km dalle aree di intervento, alcuni siti disponibili, anche in termini quantitativi, per il conferimento del materiale di cui al precedente paragrafo.

Si riporta nella seguente Figura 6-1 la localizzazione di tali siti e, di seguito, distanze e riferimenti.



Figura 6-1 Localizzazione possibili siti di conferimento materiale in esubero

1) Rosa Inerti

Via Gerbolina, 21

46019 Viadana (MN)

Distanza dal cantiere: 10.1 Km

2) Bottesini Renato

Via Sant'Antonio, 53

46019 Banzuolo - Viadana (MN)

Distanza dal cantiere: 11.1 Km

3) Romitti S.r.l.

Via Carboni, 107

42045 Luzzara (RE)

Distanza dal cantiere: 14.3 Km

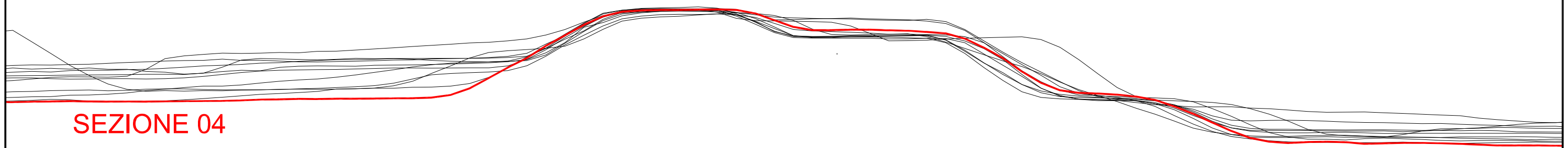
Sarà in ogni caso onere dell'Appaltatore, come anche stabilito nel Capitolato Speciale d'Appalto, individuare gli effettivi impianti di recupero o smaltimento autorizzati cui conferire i materiali prodotti, sulla base di quelli disponibili alla data effettiva dell'appalto.

ALLEGATO A: Sezioni rappresentative dei tratti omogenei

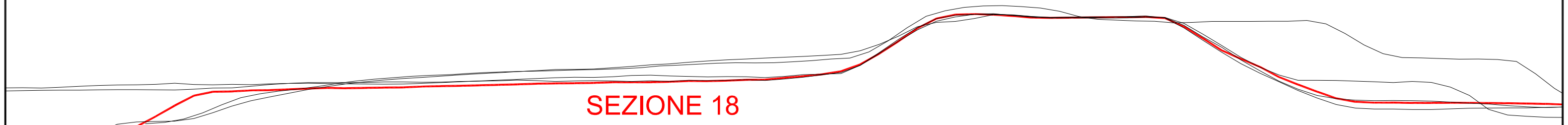
SOVRAPPOSIZIONE SEZIONI

Scala 1:200

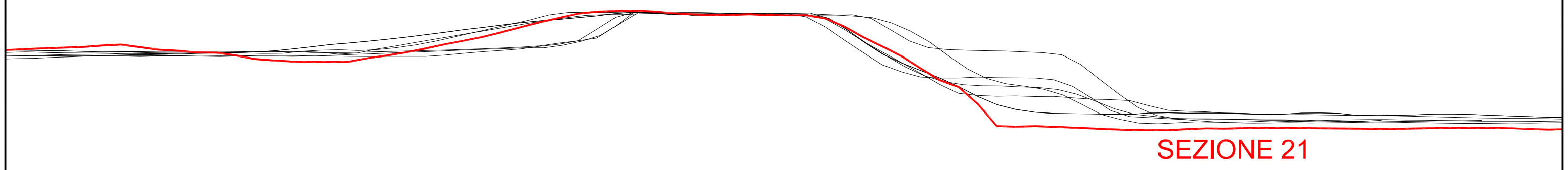
TRATTO OMOGENEO A



TRATTO OMOGENEO B



TRATTO OMOGENEO C



SOVRAPPOSIZIONE SEZIONI

Scala 1:200

TRATTO OMOGENEO D

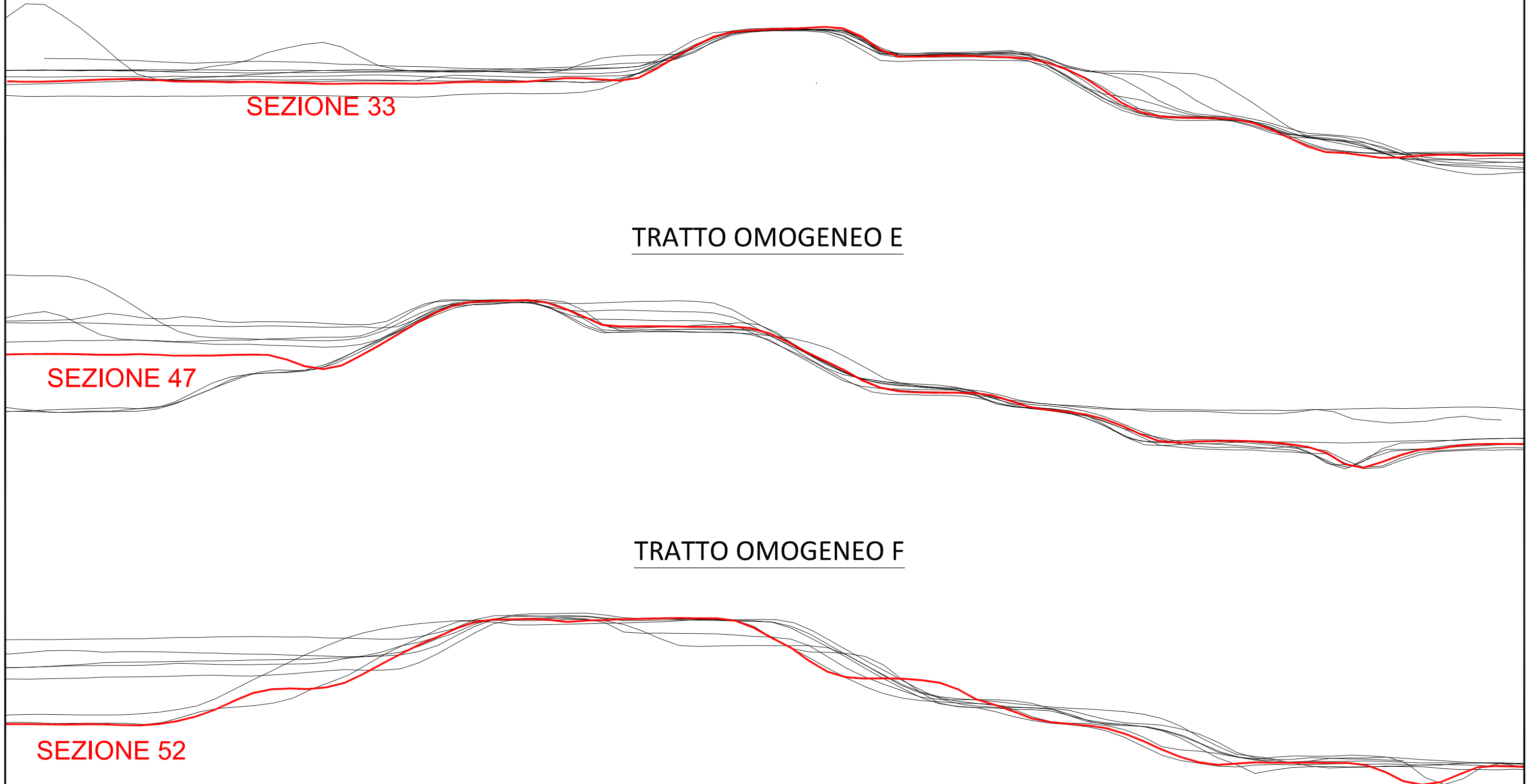
SEZIONE 33

TRATTO OMOGENEO E

SEZIONE 47

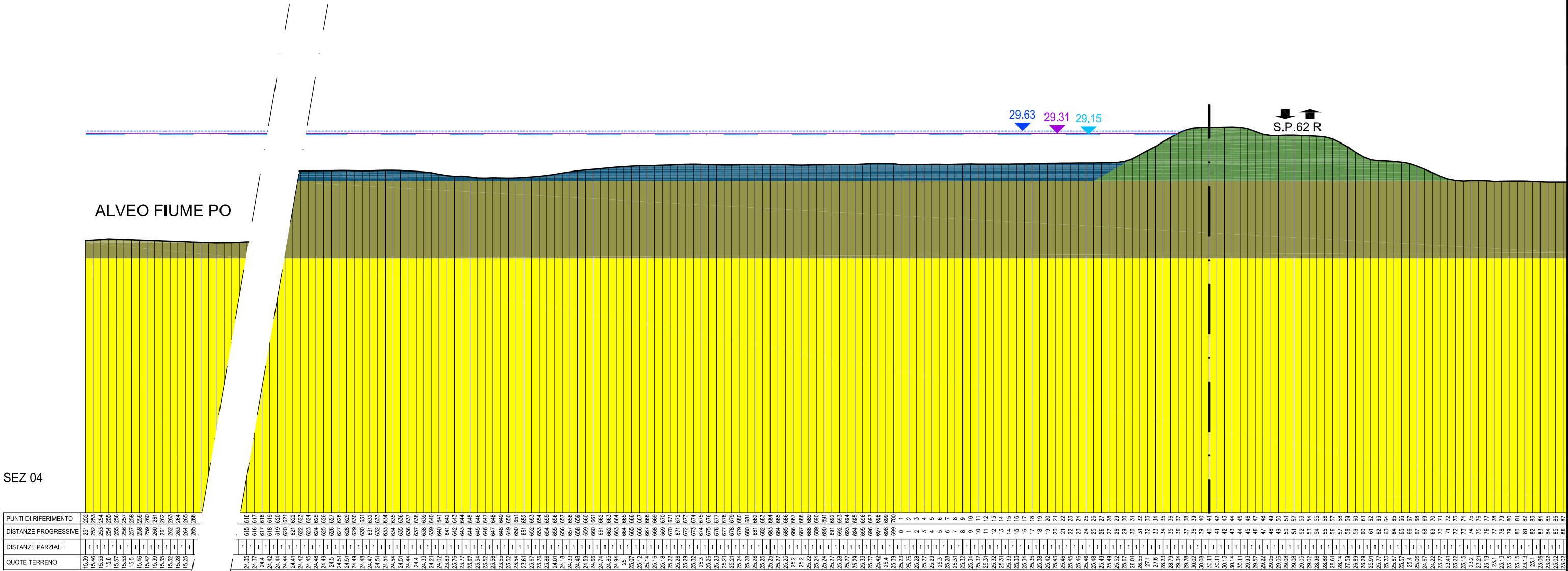
TRATTO OMOGENEO F

SEZIONE 52



SEZIONI RAPPRESENTATIVE DEI TRATTI OMOGENEI

TRATTO OMOGENEO A - SEZIONE 04



LEGENDA

Profilo terreno

Stato di fatto:

Diaframmi esistenti

Stratigrafia:

Corpo arginale

Materiale coesivo

Sabbia

Depositi golenali

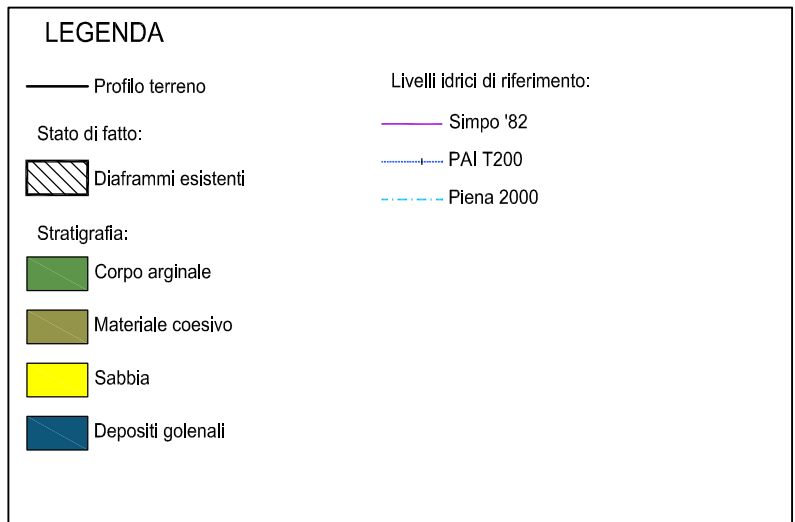
Livelli idrici di riferimento:

Simpo '82

PAI T200

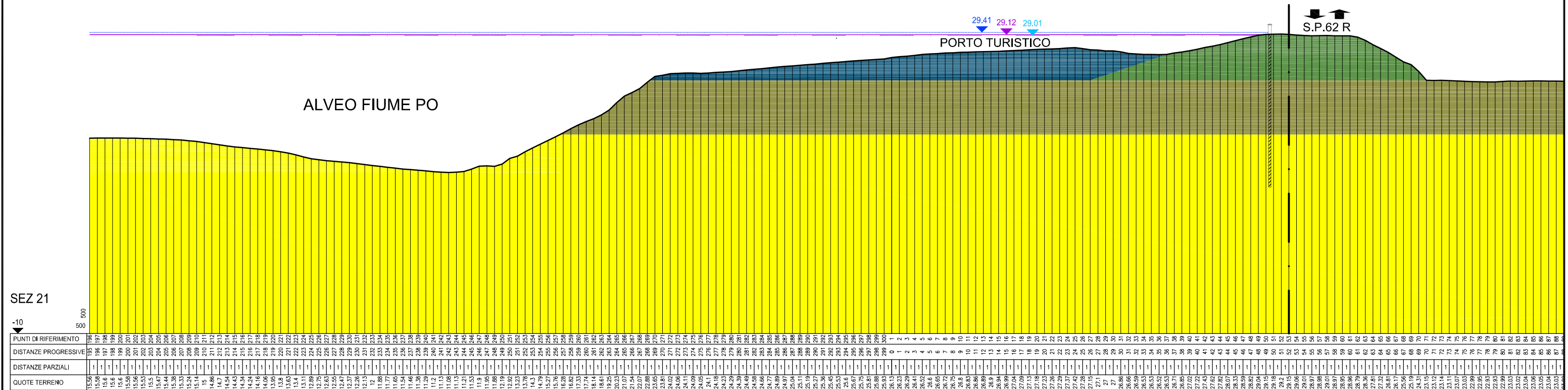
Piena 2000

TRATTO OMOGENEO B - SEZIONE 18



SEZIONI RAPPRESENTATIVE DEI TRATTI OMOGENEI

TRATTO OMOGENEO C - SEZIONE 21



LEGENDA

—— Profilo terreno

Stato di fatto:

 Diaframmi esistenti

Stratigrafia:

Livelli idrici di riferimento:

— Simpo '82

PAI T200

Piena 2000

 Corpo arginale

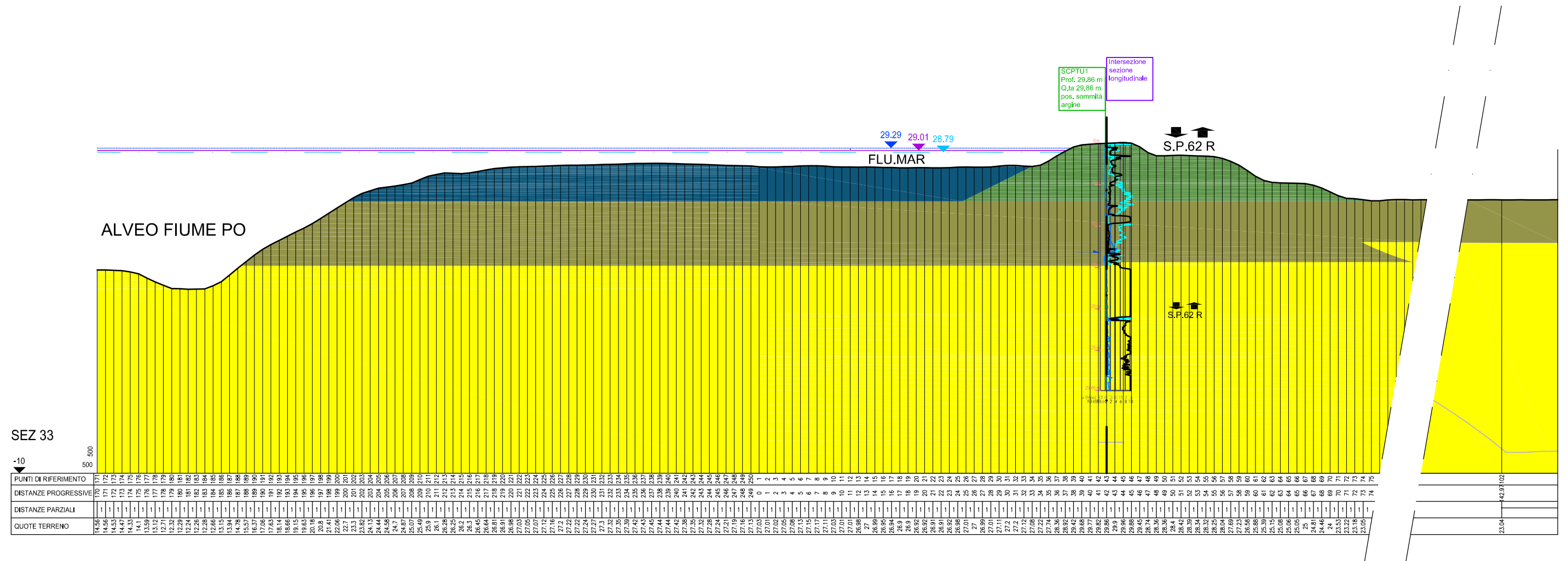
 Materiale coesivo

 Sabbia

	Depositi golenali
---	-------------------

SEZIONI RAPPRESENTATIVE DEI TRATTI OMOGENEI

TRATTO OMOGENEO D - SEZIONE 33



LEGENDA

—— Profilo terreno

Stato di fatto:

 Diaframmi esistenti

Stratigrafia:

 Corpo arginale

 Materiale coesivo

 Sabbia

 Depositi golenali

Livelli idrici di riferimento:

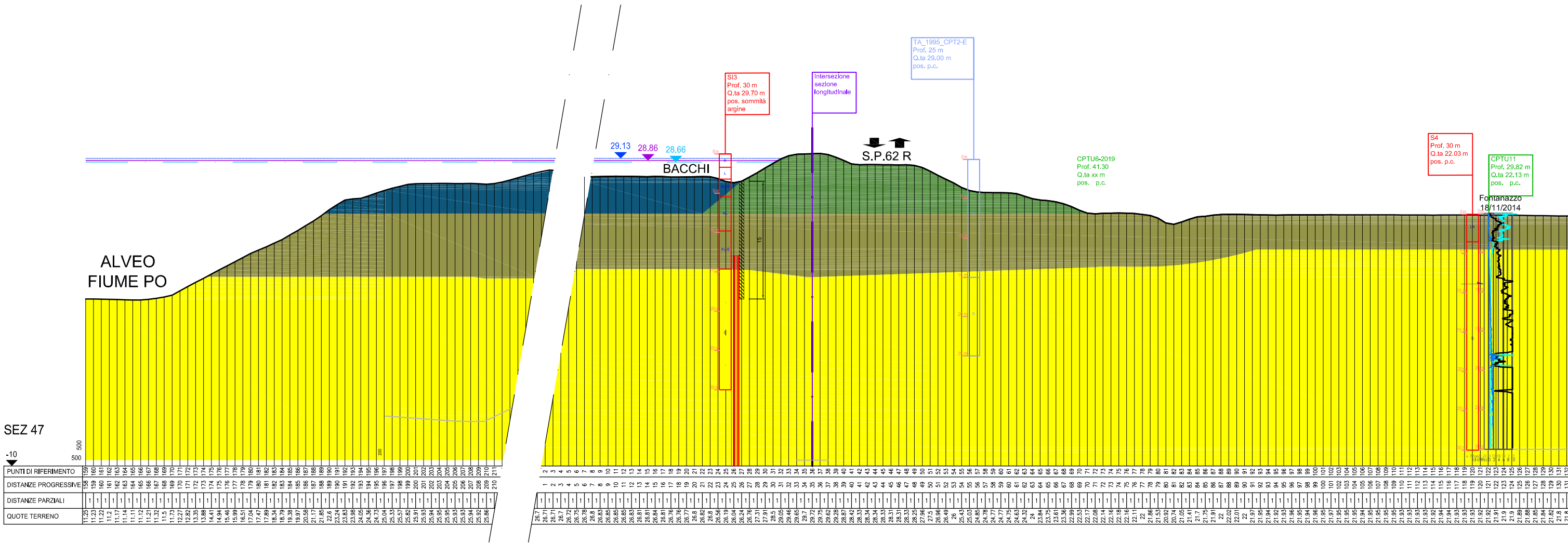
_____ Simpo '82

PAI T200

Piena 2000

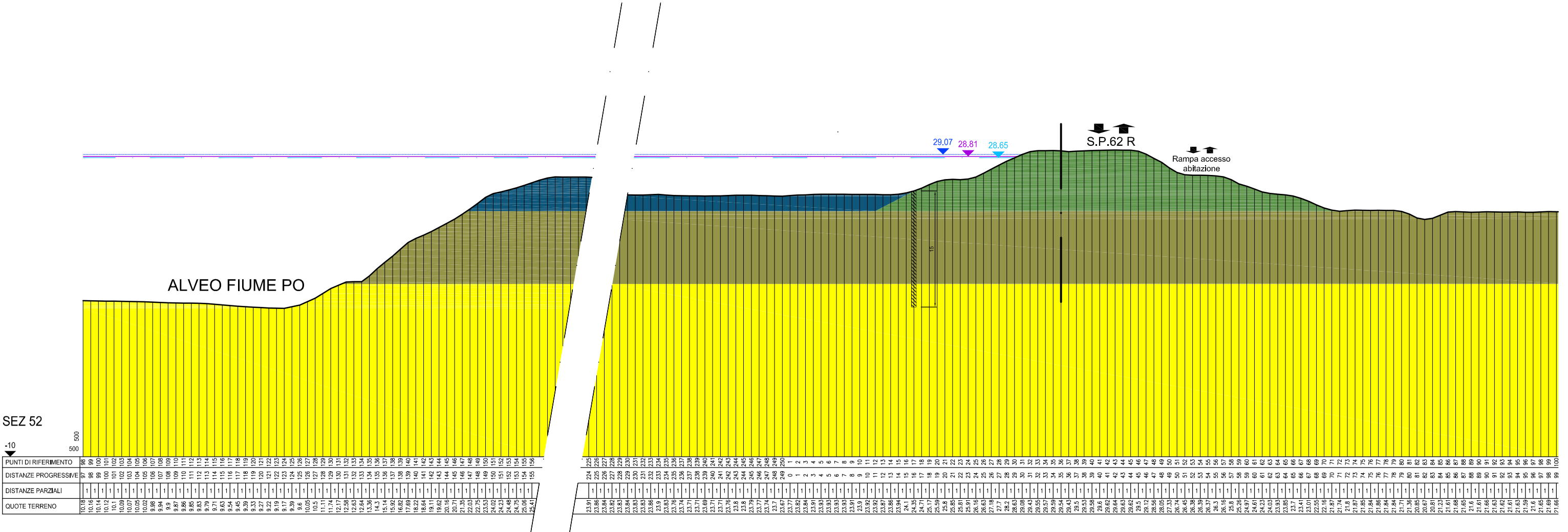
SEZIONI RAPPRESENTATIVE DEI TRATTI OMOGENEI

TRATTO OMOGENEO E - SEZIONE 47



SEZIONI RAPPRESENTATIVE DEI TRATTI OMOGENEI

TRATTO OMOGENEO F - SEZIONE 52



LEGENDA

— Profilo terreno

Stato di fatto:

Diaprammi esistenti

Stratigrafia:

Corpo arginale

Materiale coesivo

Sabbia

Depositi golenali

Livelli idrici di riferimento:

Simpo '82

PAI T200

Piena 2000