

CASSA DI ESPANSIONE DEL TORRENTE BAGANZA NEI COMUNI DI FELINO, SALA BAGANZA, COLLECCHIO E PARMA (PR-E-1047)

PROGETTO ESECUTIVO

04	04/2021	Revisione per osservazioni Nota DGD n.7956 del 15-04-2021 e validazione	BERSANO	BERTERO	BERTERO
03	03/2021	Revisione per osservazioni Nota DGD n.21124 del 08-10-2020	BERSANO	BERTERO	BERTERO
02	07/2020	Revisione per osservazioni DGD e validazione	BERSANO	BERTERO	BERTERO
REV.	DATA	MODIFICHE	REDAZIONE	VERIFICA	AUTORIZZ.

ARGINATURE E SISTEMAZIONE CASSE DI ESPANSIONE RELAZIONE ARGINATURE VERIFICHE FILTRAZIONE E SIFONAMENTO

ASSOCIAZIONE TEMPORANEA DI IMPRESE

MANDATARIA:

MANDANTI:



IL R.U.P.:

 Dott. Ing. Mirella Vergnani
 (documento firmato digitalmente)

 Progettista responsabile integrazioni
 prestazioni specialistiche e Direttore Tecnico
 della mandataria.
 Hydrodata S.p.A.
 Ord. Ing. Torino N°7570L
 Dott. Ing. Roberto Bertero
 (documento firmato digitalmente)

 Progettista/Progettisti responsabili elaborato
 Hydrodata S.p.A.
 Ord. Geol. Piemonte N°247

 Dott. Geol. Marco Bersano Begey
 (documento firmato digitalmente)


CODICE ELABORATO:

B	A	G	3	0	7	A	R	G	R	E	0	1	4
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

ID (1)

CAP. (2)

TIPO (3)

DOC. (4)

PROGR. (5-6) REV. (7)

SCALA

 APRILE
 2021

INDICE

1. PREMESSA	4
2. DESCRIZIONE DELLE SEZIONI TIPO DEI RILEVATI ARGINALI.....	5
2.1 SEZIONE TIPO 1.....	6
2.2 SEZIONE TIPO 2.....	7
2.3 SEZIONE TIPO 3.....	8
2.4 SEZIONE TIPO 4.....	9
2.5 SEZIONE TIPO 5.....	10
2.6 SEZIONE TIPO 6.....	11
2.7 SEZIONE TIPO 7.....	12
2.8 SEZIONE TIPO 8.....	13
3. CODICE DI CALCOLO UTILIZZATO	15
4. IMPLEMENTAZIONE DEI MODELLI DI FLUSSO	17
5. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI	20
5.1 SEZIONE 1.....	20
5.1.1 Scenario con nucleo $K_s = 1E-8$ m/s	21
5.1.1.1 Condizione transitoria	21
5.1.1.2 Condizione stazionaria (∞)	23
5.1.2 Scenario con nucleo $K_s = 1E-6$ m/s	23
5.1.2.1 Condizione transitoria	23
5.1.2.2 Condizione stazionaria (∞)	26
5.2 SEZIONE 2.....	26
5.2.1 Scenario con nucleo $K_s = 1E-8$ m/s	27
5.2.1.1 Condizione transitoria	27
5.2.1.2 Condizione stazionaria (∞)	29
5.2.2 Scenario con nucleo $K_s = 1E-6$ m/s	30
5.2.2.1 Condizione transitoria	30
5.2.2.2 Condizione stazionaria (∞)	32
5.3 SEZIONE 3.....	32
5.3.1 Scenario con nucleo $K_s = 1E-8$ m/s	33
5.3.1.1 Condizione transitoria	33
5.3.1.2 Condizione stazionaria (∞)	35
5.3.2 Scenario con nucleo $K_s = 1E-6$ m/s	36
5.3.2.1 Condizione transitoria	36

5.3.2.2.	Condizione stazionaria (∞)	38
5.4	SEZIONE 4.....	39
5.4.1	<i>Scenario con nucleo $K_s = 1E-8$ m/s</i>	39
5.4.1.1.	Condizione transitoria	39
5.4.1.2.	Condizione stazionaria (∞)	42
5.4.2	<i>Scenario con nucleo $K_s = 1E-6$ m/s</i>	42
5.4.2.1.	Condizione transitoria	42
5.4.2.2.	Condizione stazionaria (∞)	45
5.5	SEZIONE 5.....	46
5.5.1	<i>Scenario con nucleo $K_s = 1E-8$ m/s</i>	46
5.5.1.1.	Condizione transitoria	46
5.5.1.2.	Condizione stazionaria (∞)	49
5.5.2	<i>Scenario con nucleo $K_s = 1E-6$ m/s</i>	50
5.5.2.1.	Condizione transitoria	50
5.5.2.2.	Condizione stazionaria (∞)	53
5.6	SEZIONE 6.....	53
5.6.1	<i>Scenario con nucleo $K_s = 1E-8$ m/s</i>	54
5.6.1.1.	Condizione transitoria	54
5.6.1.2.	Condizione stazionaria	56
5.6.2	<i>Scenario con nucleo $K_s = 1E-6$ m/s</i>	57
5.6.2.1.	Condizione transitoria	57
5.6.2.2.	Condizione stazionaria	60
5.7	SEZIONE 7.....	60
5.7.1	<i>Scenario con nucleo $K_s = 1E-8$ m/s</i>	61
5.7.1.1.	Condizione transitoria	61
5.7.1.2.	Condizione stazionaria	63
5.7.2	<i>Scenario con nucleo $K_s = 1E-6$ m/s</i>	64
5.7.2.1.	Condizione transitoria	64
5.7.2.2.	Condizione stazionaria	67
5.8	MANUFATTI IN C.A. ("A", "B", "C")	67
5.8.1	<i>Manufatto A</i>	68
5.8.1.1.	Condizione transitoria	68
5.8.1.2.	Condizione stazionaria	70
5.8.2	<i>Manufatto B</i>	71
5.8.2.1.	Condizione transitoria	71
5.8.2.2.	Condizione stazionaria	74
5.8.3	<i>Manufatto C</i>	75
5.8.3.1.	Condizione transitoria	75

5.8.3.2.	Condizione stazionaria	78
6.	RISULTATI DELLE VERIFICHE AL SIFONAMENTO.....	79
6.1	SINTESI VERIFICHE DEL GRADIENTE (I_c/I_E)	79
6.2	VERIFICA STATI LIMITE ULTIMI IDRAULICI	80
6.2.1	Sezioni tipo 1, 1-B	83
6.2.2	Sezione tipo 2	86
6.2.3	Sezione tipo 3	88
6.2.4	Sezione tipo 4	90
6.2.5	Sezione tipo 5	92
6.2.6	Sezione tipo 6	93
6.2.7	Sezione tipo 7	94
7.	CONCLUSIONI.....	95

1. PREMESSA

La presente relazione, nell'ambito del Progetto Esecutivo della Cassa di espansione del torrente Baganza nei comuni di Felino, Sala Baganza, Collecchio e Parma, riguarda le simulazioni numeriche finalizzate alla verifica di filtrazione entro il complesso rilevati-terreno di fondazione, e relativa verifica di sicurezza al sifonamento.

Le verifiche sono state eseguite a partire dalla costruzione di modelli bidimensionali in sezione verticale.

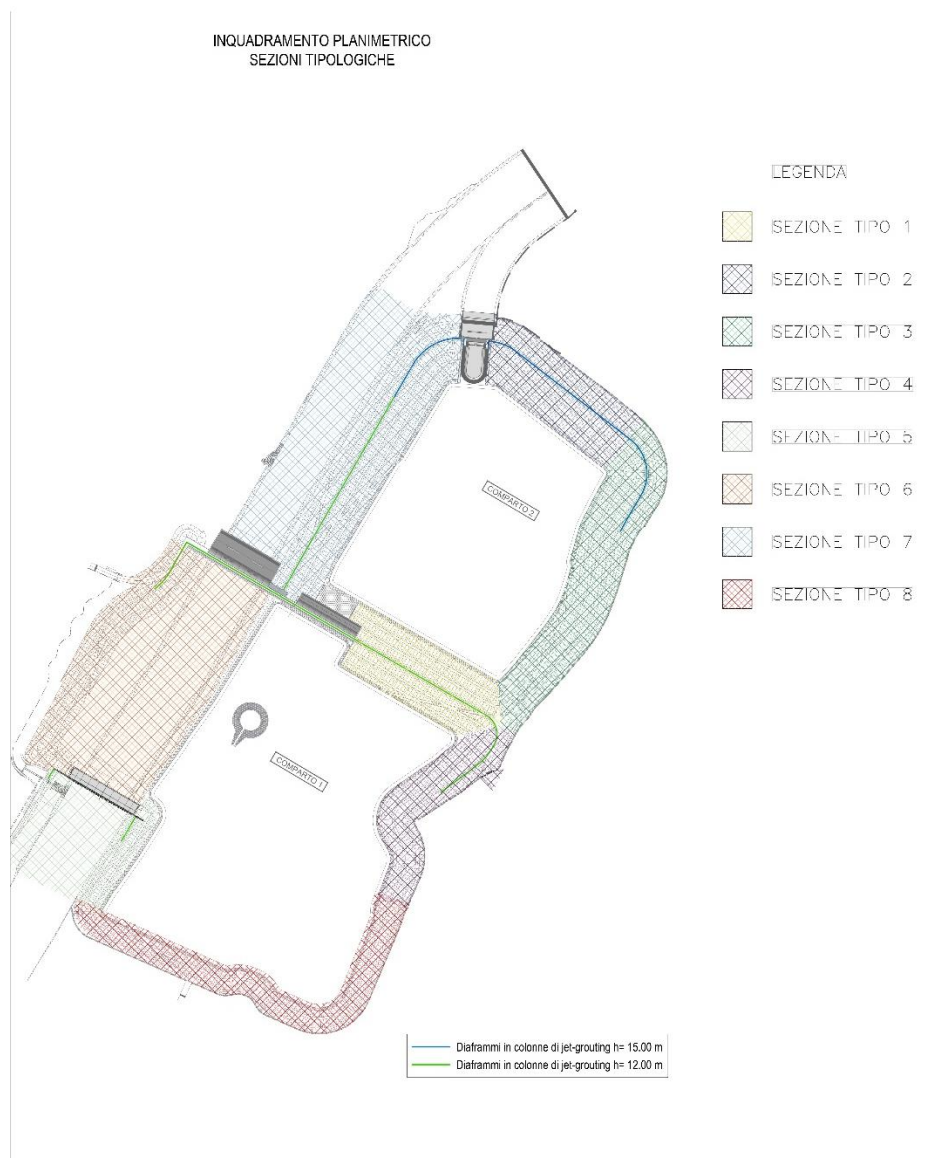
Le stesse hanno riguardato, in regime transitorio, l'idrogramma di progetto relativo all'evento di piena con $Tr = 1000$ anni, come da Relazione Idraulica.

Ulteriore simulazione è stata effettuata in regime stazionario, in riferimento ai livelli massimi interni alle vasche; tale condizione costituisce lo scenario di massima cautelatività.

In riferimento a quest'ultimo scenario, sono state eseguite le verifiche di compatibilità al sifonamento, preliminarmente attraverso metodologie semplificate, e in fase successiva con verifica agli stati ultimi idraulici in accordo con il vigente D.M. Infrastrutture 26 giugno 2014 "Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)", rif. punto E.5.1, e relativi rimandi alle NTC 08 (capitolo 6.2.3.2 "Verifiche nei confronti degli stati limite ultimi idraulici").

2. DESCRIZIONE DELLE SEZIONI TIPO DEI RILEVATI ARGINALI

La realizzazione dei rilevati arginali delle casse di espansione in progetto segue una schematizzazione che può essere ricondotta a 8 sezioni tipo, progettate in funzione dell'altezza dei rilevati e della loro posizione rispetto al piano campagna e all'alveo del torrente Baganza. L'ubicazione delle sezioni tipo è schematizzata nella seguente figura.



I terreni che costituiranno i rilevati arginali possono essere suddivisi nelle seguenti principali categorie:











- terreno per nucleo centrale, costituito da limo /argilla limosa, che dovrà raggiungere dopo costipamento una permeabilità molto bassa, caratterizzata da un coefficiente $k=10^{-7}\div10^{-8}$ m/s;
- terreno per rilevato arginale proveniente dagli scavi dell'unità geotecnica 2A, costituito ghiaia in matrice limosa che dovrà raggiungere dopo costipamento una permeabilità massima di $k\leq5\times10^{-5}$ m/s;

- terreno per rilevato arginale proveniente dagli scavi dell'unità geotecnica 2A, di tipo A1-A2 secondo la classificazione HRB-AASHTO (CNR-UNI 10006); tale terreno è caratterizzato da una permeabilità dopo costipamento di $k=10^{-3}$ m/s;

Gli ulteriori terreni che saranno utilizzati per gli strati superficiali sono i seguenti:

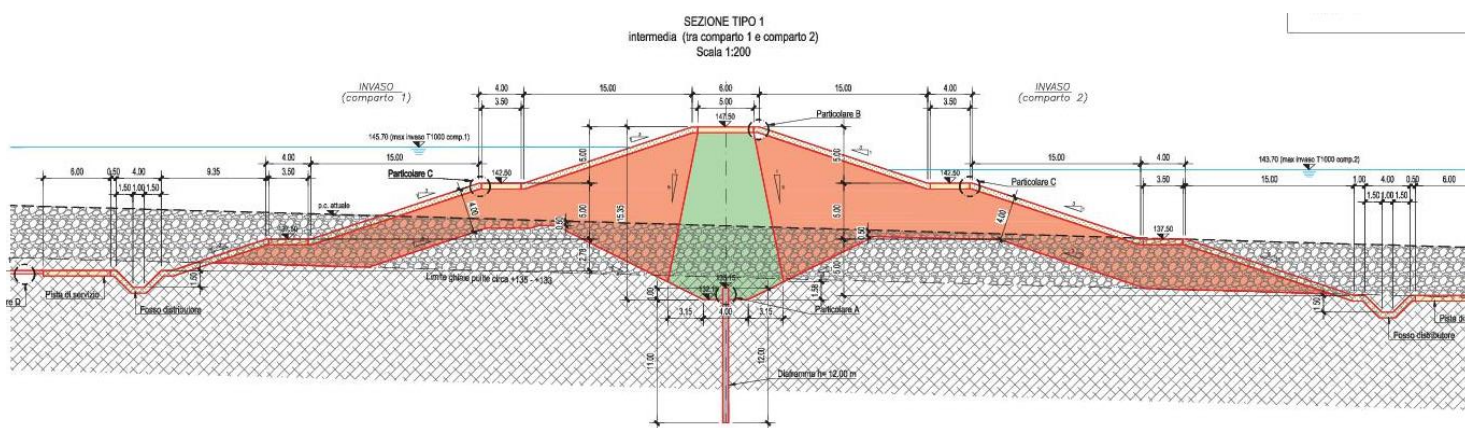
- Misto granulare stabilizzato, utilizzato per le viabilità di servizio (piste di accesso, banche, rampe di collegamento, ecc.);
- Terreno vegetale
- Scogliera in massi, per il piede del rilevato arginale in corrispondenza dell'alveo del torrente Baganza

Si riporta nella figura seguente la legenda delle sezioni tipo.

LEGENDA					
STATO DI FATTO		PROGETTO			
	Piano campagna attuale		Terreno per nucleo limo/argilla limosa permeabilità $k=10^{-7} - 10^{-8}$ m/s		Misto granulare stabilizzato per viabilità di servizio
	Strato superficiale ghiaie pulite		Terreno proveniente dagli scavi unità geotecnica 2A ghiaia in matrice limosa Permeabilità $k=5 \times 10^{-6}$ m/s		Terreno vegetale
	Terreno		Terreno proveniente dagli scavi unità geotecnica 2A terreno tipo A1-A2 Permeabilità $k=10^{-3}$ m/s		Scogliera in massi
					Rivestimento in materassi "Reno"

2.1 SEZIONE TIPO 1

La sezione tipo 1 è relativa all'argine di separazione tra l'invaso 1 e l'invaso 2, tra il manufatto B e il limite Est della cassa; il tratto realizzato con tale sezione ha uno sviluppo in asse di circa 300 m e la sua sommità è alla quota di 147.50 m.



In tale tratto l'argine presenta un nucleo centrale di altezza costante pari a 14.85 m, la cui base si colloca alla quota di 132.15 m; lo spessore del nucleo varia da 5.0 m, in sommità, a 10.3 m, poco sopra la base, con paramenti aventi pendenza 1 (H) / 5 (V). Alla base del nucleo è realizzato il diaframma in jet-grouting, di spessore pari a 60 cm, e di lunghezza di 11.0 m, al netto del tratto sommitale di 1.0 m che garantisce il collegamento tra il diaframma e il nucleo

stesso. Dalla base del nucleo, di larghezza pari a 4.0 m, si aprono le scarpate di scavo, realizzate con pendenza 2 (H) / 1 (V), fino ad una quota posta all'incirca 50 cm sotto il piano campagna.

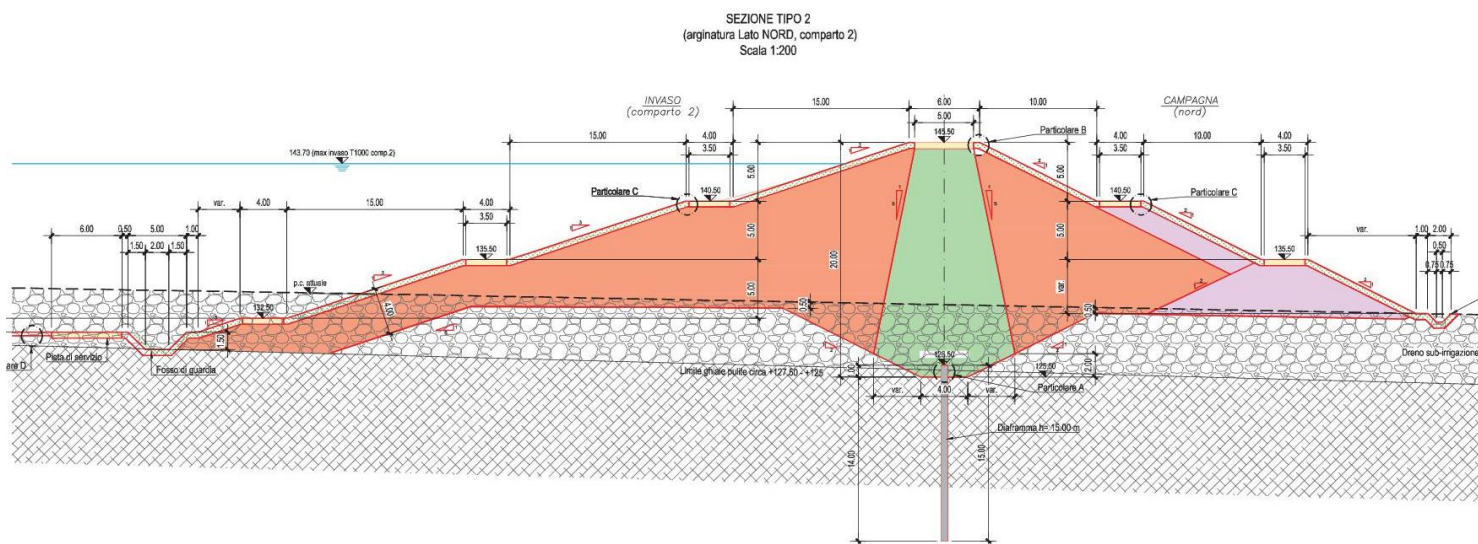
Entrambi i paramenti esterni (a monte lato invaso 1 e a valle lato invaso 2) hanno la pendenza di 3 (H) / 1 (V), con banche intermedie di larghezza pari a 4.0 m, poste a 5.0 m e a 10.0 m dalla sommità arginale. In corrispondenza dei paramenti dovrà essere garantito uno spessore del rilevato arginale, costituito da ghiaia in matrice limosa, pari a 4.0 m, fino al limite inferiore delle ghiaie pulite (posto alla quota di circa 135.0 – 133.0 m).

Completano la sezione i seguenti elementi:

- Pista sommitale di larghezza pari a 5.0 m, realizzata con misto stabilizzato per uno spessore pari a 50 cm;
- Piste di servizio poste sulle banche, di larghezza pari a 3.5 m, realizzate con misto stabilizzato per uno spessore pari a 50 cm;
- Strato superficiale di terreno vegetale, per uno spessore di circa 50 cm, il cui inerbimento sarà effettuato mediante semina a spaglio;
- Fossi al piede dei paramenti, di sezione trapezia, con base pari a 1.0 m e pendenza delle scarpate 1 (H) / 1 (V).

2.2 SEZIONE TIPO 2

La sezione tipo 2 è relativa all'argine posto sul lato Nord dell'invaso 2; il tratto realizzato con tale sezione ha uno sviluppo in asse di circa 310 m a partire dal manufatto C e la sua sommità è alla quota di 145.50 m.



In tale tratto l'argine presenta un nucleo centrale di altezza costante pari a 19.5 m, la cui base si colloca alla quota di 125.50 m; lo spessore del nucleo varia da 5.0 m, in sommità, a 11.0 m, ad una quota di 2.0 m superiore alla base, con paramenti aventi pendenza 1 (H) / 5 (V). Alla base del nucleo è realizzato il diaframma in jet-grouting, di spessore pari a 60 cm, e di lunghezza di 14.0 m, al netto del tratto sommitale di 1.0 m che garantisce il collegamento tra il diaframma e il nucleo stesso. Dalla base del nucleo, di larghezza pari a 4.0 m, si aprono le scarpate di scavo, realizzate con pendenza 2 (H) / 1 (V), fino ad una quota posta all'incirca 50 cm sotto il piano campagna.

Il paramento a monte, lato invaso 2, ha la pendenza di 3 (H) / 1 (V), con banche intermedie di larghezza pari a 4.0 m, poste a 5.0 m, a 10.0 m e a 15.0 m dalla sommità arginale. In corrispondenza dei paramenti dovrà essere garantito uno spessore del rilevato arginale, costituito da ghiaia in matrice limosa, pari a 4.0 m, fino al limite inferiore delle ghiaie pulite (posto alla quota di circa 127.5 – 125.0 m).

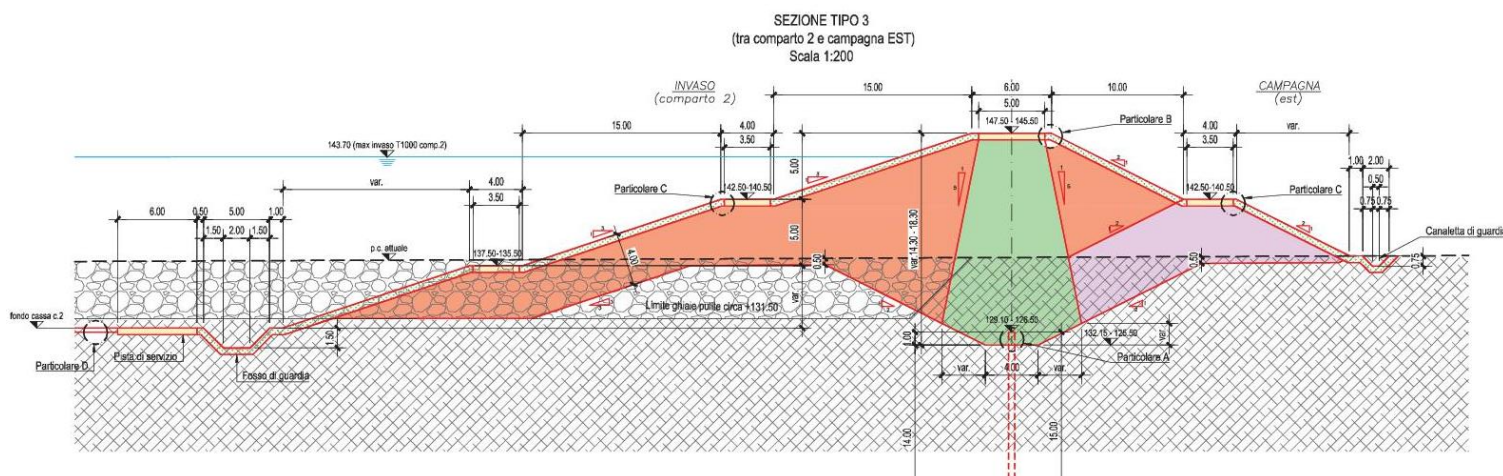
Il paramento a valle, lato piano campagna, ha la pendenza di 2 (H) / 1 (V), con banche intermedie di larghezza pari a 4.0 m, poste a 5.0 m e a 10.0 m dalla sommità arginale. Le banche saranno realizzate con materiale proveniente dagli scavi, di tipo A1-A2 secondo la classificazione HRB-AASHTO (CNR-UNI 10006), con pendenza dei paramenti 2 (H) / 1 (V); la parte di argine compresa tra le banche e il nucleo sarà realizzata con materiale proveniente dagli scavi, costituito da ghiaia in matrice limosa.

Completano la sezione i seguenti elementi:

- Pista sommitale di larghezza pari a 5.0 m, realizzata con misto stabilizzato per uno spessore pari a 50 cm;
- Piste di servizio poste sulle banche, di larghezza pari a 3.5 m, realizzate con misto stabilizzato per uno spessore pari a 50 cm;
- Strato superficiale di terreno vegetale, per uno spessore di circa 50 cm, il cui inerbimento sarà effettuato mediante semina a spaglio;
- Fosso al piede del paramento di monte, di sezione trapezia, con base pari a 1.0 m e pendenza delle scarpate 1 (H) / 1 (V);
- Canaletta di guardia al piede del paramento di valle.

2.3 SEZIONE TIPO 3

La sezione tipo 3 è relativa all'argine posto sul lato Est dell'invaso 2; il tratto realizzato con tale sezione ha uno sviluppo in asse di circa 585 m a partire dal limite della sezione tipo 2 e la sua sommità è prevalentemente alla quota di 145.50 m; solo nel tratto adiacente all'argine con sezione tipo 1, la sommità si porta alla quota di 147.50 m, mediante un raccordo di lunghezza pari a 20.0 m.



In tale tratto l'argine presenta un nucleo centrale di altezza variabile da 13.8 m a 19.5 m; tale variabilità è dovuta oltre alla variabilità della quota della sommità arginale, anche alla base del nucleo, che si colloca ad una quota variabile da 125.50 m a 129.10 m.

Il nucleo ha uno spessore minimo di 5.0 m, in sommità, e presenta paramenti aventi pendenza 1 (H) / 5 (V). Nel solo tratto adiacente alla sezione tipo 2, per una lunghezza di circa 180 m, alla base del nucleo è realizzato il diaframma in jet-grouting, di spessore pari a 60 cm, e di lunghezza di 14.0 m, al netto del tratto sommitale di 1.0 m che garantisce il collegamento tra il diaframma e il nucleo stesso. Dalla base del nucleo, di larghezza pari a 4.0 m, si aprono le scarpate di scavo, realizzate con pendenza 2 (H) / 1 (V), fino ad una quota posta all'incirca 50 cm sotto il piano campagna.

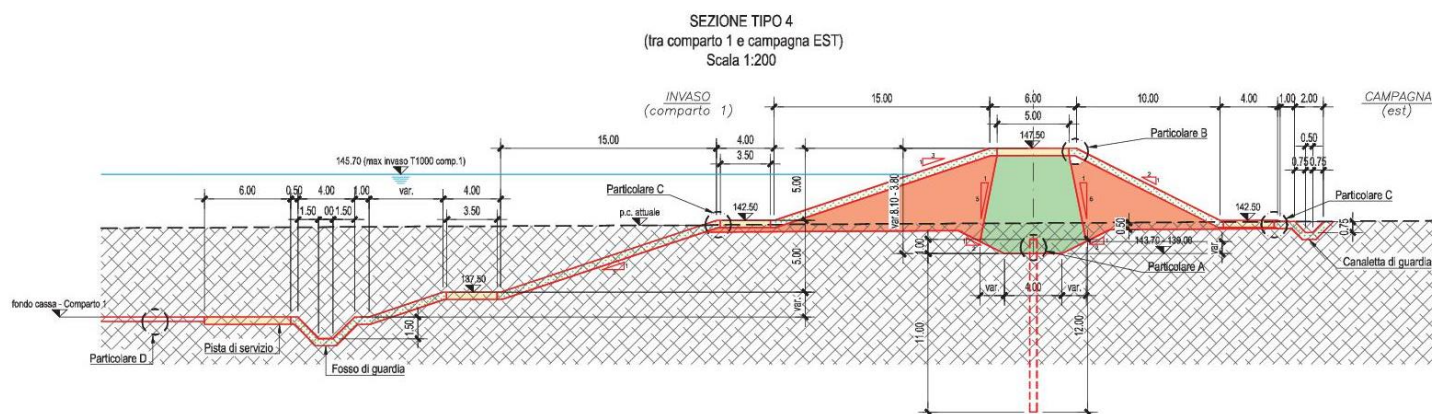
Il paramento a monte, lato invaso 2, ha la pendenza di 3 (H) / 1 (V), con banche intermedie di larghezza pari a 4.0 m, poste a 5.0 m, a 10.0 m e a 15.0 m dalla sommità arginale. In corrispondenza dei paramenti dovrà essere garantito uno spessore del rilevato arginale, costituito da ghiaia in matrice limosa, pari a 4.0 m, fino al limite inferiore delle ghiaie pulite (posto alla quota di circa 131.50 m).

Il paramento a valle, lato piano campagna, ha la pendenza di 2 (H) / 1 (V), con banche intermedie di larghezza pari a 4.0 m, poste a 5.0 m e a 10.0 m dalla sommità arginale. Le banche saranno realizzate con materiale proveniente dagli scavi, di tipo A1-A2 secondo la classificazione HRB-AASHTO (CNR-UNI 10006), con pendenza dei paramenti 2 (H) / 1 (V); la parte di argine compresa tra le banche e il nucleo sarà realizzata con materiale proveniente dagli scavi, costituito da ghiaia in matrice limosa.

Completano la sezione gli stessi elementi già descritti per la sezione tipo 2.

2.4 SEZIONE TIPO 4

La sezione tipo 4 è relativa all'argine posto sul lato Est dell'invaso 1; il tratto realizzato con tale sezione ha uno sviluppo in asse di circa 400 m a partire dal limite della sezione tipo 3 e la sua sommità è alla quota di 147.50 m.



In tale tratto l'argine presenta un nucleo centrale di altezza variabile da 3.8 m a 8.1 m; tale variabilità è dovuta alla base del nucleo, che si colloca ad una quota variabile da 143.70 m a 139.00 m.

Il nucleo ha uno spessore minimo di 5.0 m, in sommità, e presenta paramenti aventi pendenza 1 (H) / 5 (V). Nel solo tratto adiacente alla sezione tipo 3, per una lunghezza di circa 160 m, alla base del nucleo è realizzato il diaframma in jet-grouting, di spessore pari a 60 cm, e di lunghezza di 11.0 m, al netto del tratto sommitale di 1.0 m che garantisce il collegamento tra il diaframma e il nucleo stesso. Dalla base del nucleo, di larghezza pari a 4.0 m, si aprono le scarpate di scavo, realizzate con pendenza 2 (H) / 1 (V), fino ad una quota posta all'incirca 50 cm sotto il piano campagna.

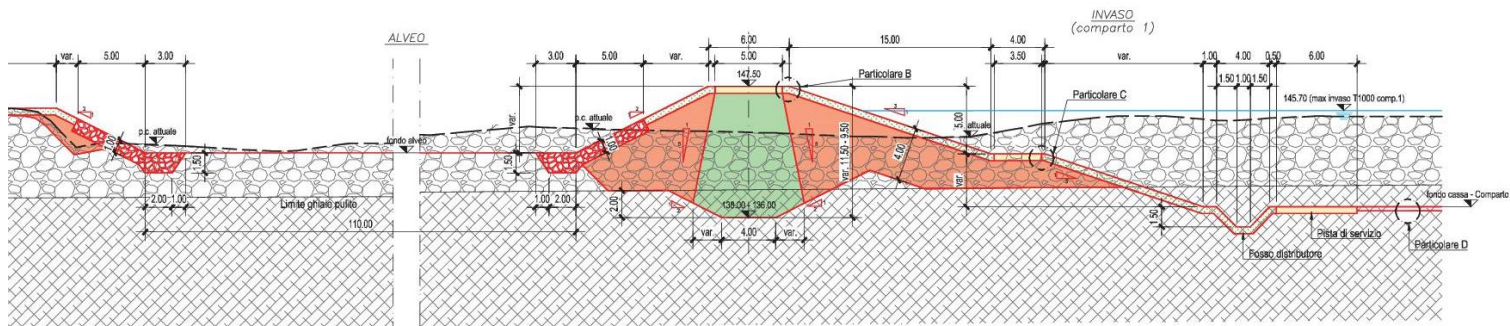
Il paramento a monte, lato invaso 1, ha la pendenza di 3 (H) / 1 (V), con banche intermedie di larghezza pari a 4.0 m, poste a 5.0 m e a 10.0 m dalla sommità arginale; il paramento a valle, lato piano campagna, ha la pendenza di 2 (H) / 1 (V), con banca intermedia di larghezza pari a 4.0 m, posta a 5.0 m dalla sommità arginale.

Il rilevato arginale esterno al nucleo sarà costituito da ghiaia in matrice limosa; completano la sezione gli stessi elementi già descritti per la sezione tipo 2.

2.5 SEZIONE TIPO 5

La sezione tipo 5 è relativa all'argine posto sul lato Ovest dell'invaso 1, a monte della briglia di monte; il tratto realizzato con tale sezione è collocato tra l'invaso 1 e l'alveo del torrente Baganza, ha uno sviluppo in asse di circa 210 m a partire dalla briglia di monte e la sua sommità è alla quota di 147.50 m.

SEZIONE TIPO 5
 (campagna OVEST - alveo - comparto)
 Scala 1:200



In tale tratto l'argine presenta un nucleo centrale di altezza variabile da 9.5 m a 11.5 m; tale variabilità è dovuta alla base del nucleo, che si colloca ad una quota variabile da 136.0 m a 138.00 m.

Il nucleo ha uno spessore minimo di 5.0 m, in sommità, e presenta paramenti aventi pendenza 1 (H) / 5 (V). Nel solo tratto adiacente alla briglia di monte, per una lunghezza di circa 50 m, alla base del nucleo è realizzato il diaframma in jet-grouting, di spessore pari a 60 cm, e di lunghezza di 11.0 m, al netto del tratto sommitale di 1.0 m che garantisce il collegamento tra il diaframma e il nucleo stesso. Dalla base del nucleo, di larghezza pari a 4.0 m, si aprono le scarpate di scavo, realizzate con pendenza 2 (H) / 1 (V), fino al limite delle ghiaie pulite.

Il paramento lato alveo ha la pendenza di 2 (H) / 1 (V); in tale tratto è prevista la riprofilatura dell'alveo, con protezione al piede costituito da scogliera in massi (vedere elaborati specifici). Il paramento lato invaso 1 ha la pendenza di 3 (H)

/ 1 (V), con banche intermedie di larghezza pari a 4.0 m, poste a 5.0 m dalla sommità arginale; con banca intermedia di larghezza pari a 4.0 m, posta a 5.0 m dalla sommità arginale.

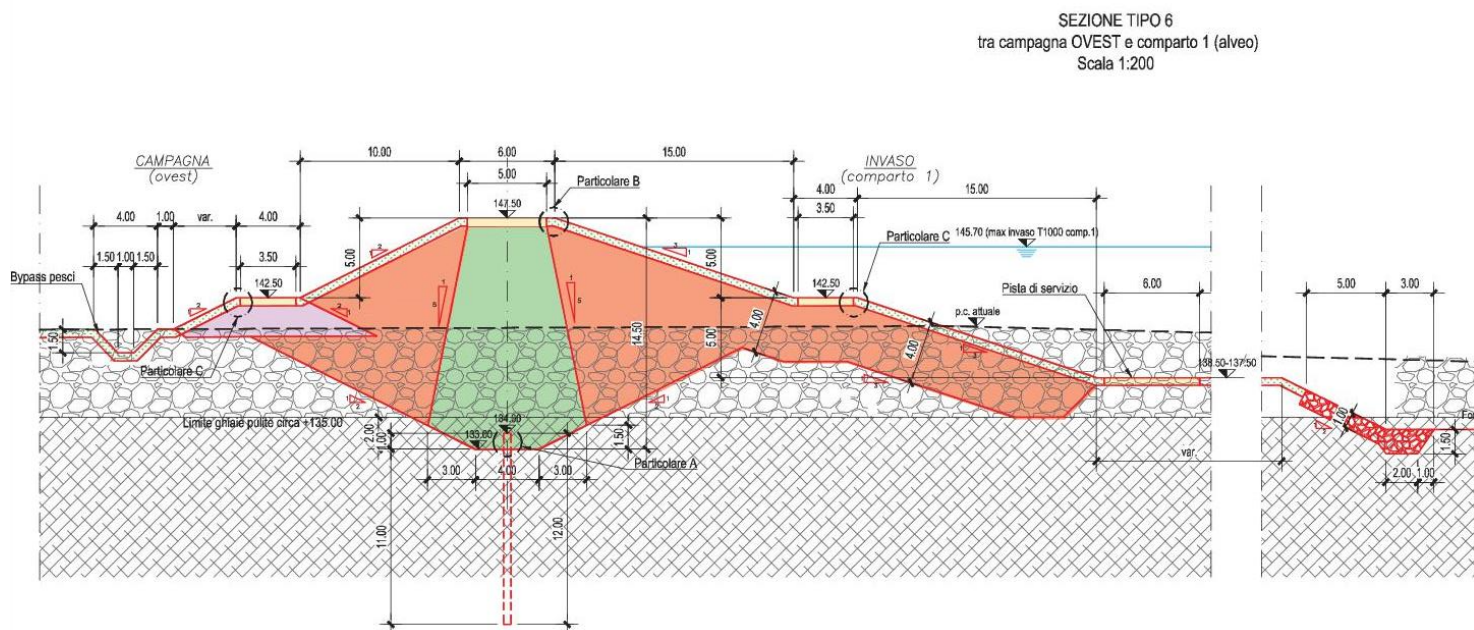
Il rilevato arginale esterno al nucleo sarà costituito da ghiaia in matrice limosa e dovrà essere garantito uno spessore del rilevato arginale pari a 4.0 m, fino al limite inferiore delle ghiaie pulite; completano la sezione gli stessi elementi già descritti per la sezione tipo 2.

L'intervento di raccordo tra i fronti di scavo del lato Sud e l'argine in spalla destra della briglia di ingresso nella cassa viene gestito prolungando il nucleo stesso, con variazione lineare della quota di approfondimento, per tutto il tratto in curva dell'argine fino ad annullarsi progressivamente in corrispondenza del tratto rettilineo del fronte di scavo. Tale aspetto viene rappresentato nei seguenti elaborati grafici:

- BAG3_07_ARG_D_SZ_01 – Comparto 1 - Sezioni trasversali - Tav.1

2.6 SEZIONE TIPO 6

La sezione tipo 6 è relativa all'argine posto sul lato Ovest dell'alveo, nel tratto posto tra la briglia di monte e il manufatto A; il tratto realizzato con tale sezione è collocato tra il piano campagna, a Ovest dell'intervento, e l'alveo del torrente Baganza, ha uno sviluppo in asse di circa 505 m e la sua sommità è alla quota di 147.50 m.

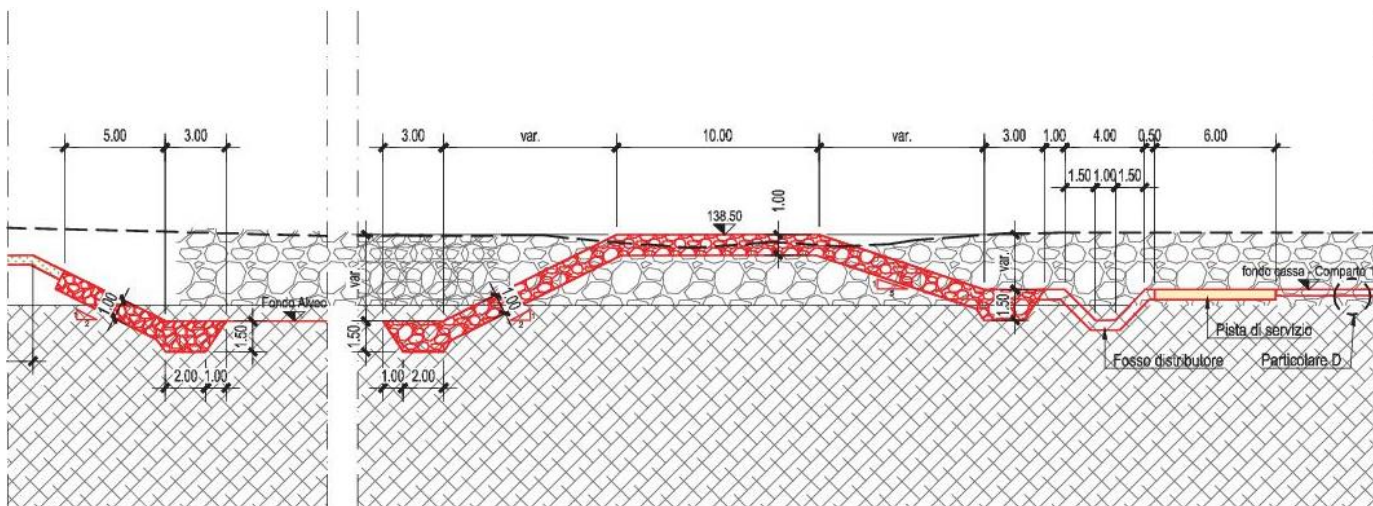


In tale tratto l'argine presenta un nucleo centrale di altezza costante pari a 14.5 m, la cui base si colloca alla quota di 133.0 m; lo spessore del nucleo varia da 5.0 m, in sommità, a 10.0 m, ad una quota di 1.5 m superiore alla base, con paramenti aventi pendenza 1 (H) / 5 (V). Alla base del nucleo, per il tratto di lunghezza pari a circa 100 m adiacente al manufatto A, è realizzato il diaframma in jet-grouting, di spessore pari a 60 cm, e di lunghezza di 11.0 m, al netto del tratto sommitale di 1.0 m che garantisce il collegamento tra il diaframma e il nucleo stesso. Dalla base del nucleo, di larghezza pari a 4.0 m, si aprono le scarpate di scavo, realizzate con pendenza 2 (H) / 1 (V), fino ad una quota posta all'incirca 50 cm sotto il piano campagna.

Il paramento lato alveo, ha la pendenza di 3 (H) / 1 (V), con banca intermedia di larghezza pari a 4.0 m, posta a 5.0 m dalla sommità arginale. In corrispondenza del paramento dovrà essere garantito uno spessore del rilevato arginale, costituito da ghiaia in matrice limosa, pari a 4.0 m, fino al limite inferiore delle ghiaie pulite (posto alla quota di circa 135.0 m). Alla base del rilevato è realizzato un esteso piano, posto alla quota variabile da 137.50 m a 138.50 m, oltre il quale è prevista la riprofilatura dell'alveo, con protezione al piede costituito da scogliera in massi.

Il paramento lato piano campagna, ha la pendenza di 2 (H) / 1 (V), con banca intermedia di larghezza pari a 4.0 m, posta a 5.0 m dalla sommità arginale. La banca sarà realizzata con materiale proveniente dagli scavi, di tipo A1-A2 secondo la classificazione HRB-AASHTO (CNR-UNI 10006), con pendenza dei paramenti 2 (H) / 1 (V); la parte di argine compresa tra la banca e il nucleo sarà realizzata con materiale proveniente dagli scavi, costituito da ghiaia in matrice limosa. Completano la sezione gli stessi elementi già descritti per la sezione tipo 2

Il tratto arginale di sfioro tra l'alveo e l'invaso 1, posto tra la briglia di monte e il manufatto A, in sponda destra del torrente Baganza, ha uno sviluppo in asse di circa 435 m e la sua sommità è alla quota costante di 138.50 m.

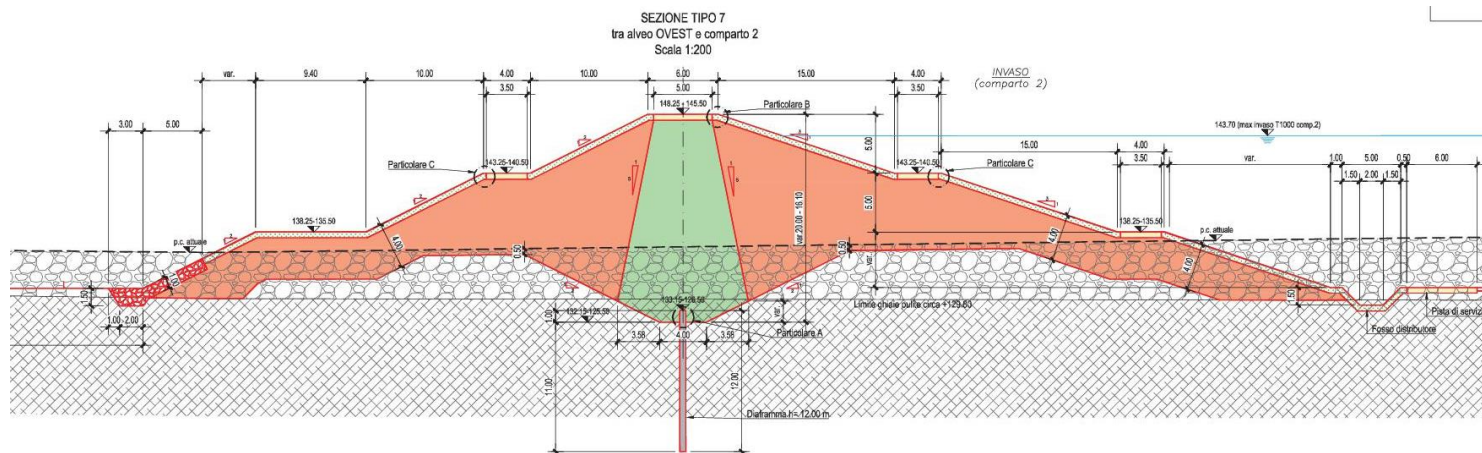


Il paramento lato alveo ha la pendenza di 2 (H) / 1 (V), mentre il paramento lato invaso 1 ha la pendenza di 3 (H) / 1 (V); l'intero argine è protetto con scogliera in massi per uno spessore minimo di 1.0 m.

2.7 SEZIONE TIPO 7

La sezione tipo 7 è relativa all'argine posto sul lato Ovest dell'invaso 2, tra l'alveo del torrente Baganza e l'invaso stesso; il tratto realizzato con tale sezione è collocato tra il manufatto A e il manufatto C, ha uno sviluppo in asse di circa 575 m e la sua sommità è prevalentemente alla quota di 145.50 m; solo nel tratto adiacente al manufatto A, la sommità si porta alla quota di 148.25 m, mediante due tratti di raccordo:

- Il primo di lunghezza pari a circa 44.5 m, per passare dalla quota di 145.50 m alla quota di 147.50 m;
- Il secondo di lunghezza pari a circa 30 m, per passare dalla quota di 147.50 m alla quota di 148.25 m.



In tale tratto l'argine presenta un nucleo centrale di altezza variabile da 16.1 m a 20.0 m; tale variabilità è dovuta oltre alla variabilità della quota della sommità arginale, anche alla base del nucleo, che si colloca ad una quota variabile da 125.50 m a 132.15 m.

Il nucleo ha uno spessore minimo di 5.0 m, in sommità, e presenta paramenti aventi pendenza 1 (H) / 5 (V). Alla base del nucleo è realizzato il diaframma in jet-grouting, di spessore pari a 60 cm, e di lunghezza pari a:

- 14.0 m, per il tratto con sviluppo in asse pari a circa 170 m, adiacente al manufatto C;
- 11.0 m per il rimanente tratto di circa 405 m, adiacente al manufatto A,

al netto del tratto sommitale di 1.0 m che garantisce il collegamento tra il diaframma e il nucleo stesso. Dalla base del nucleo, di larghezza pari a 4.0 m, si aprono le scarpate di scavo, realizzate con pendenza 2 (H) / 1 (V), fino ad una quota posta all'incirca 50 cm sotto il piano campagna.

Il paramento lato alveo, ha la pendenza di 2 (H) / 1 (V), con le seguenti banche intermedie:

- Banca di larghezza pari a 4.0 m, posta a 5.0 m dalla sommità arginale;
- Banca di larghezza pari a 9.40 m, posta a 10.0 m dalla sommità arginale.

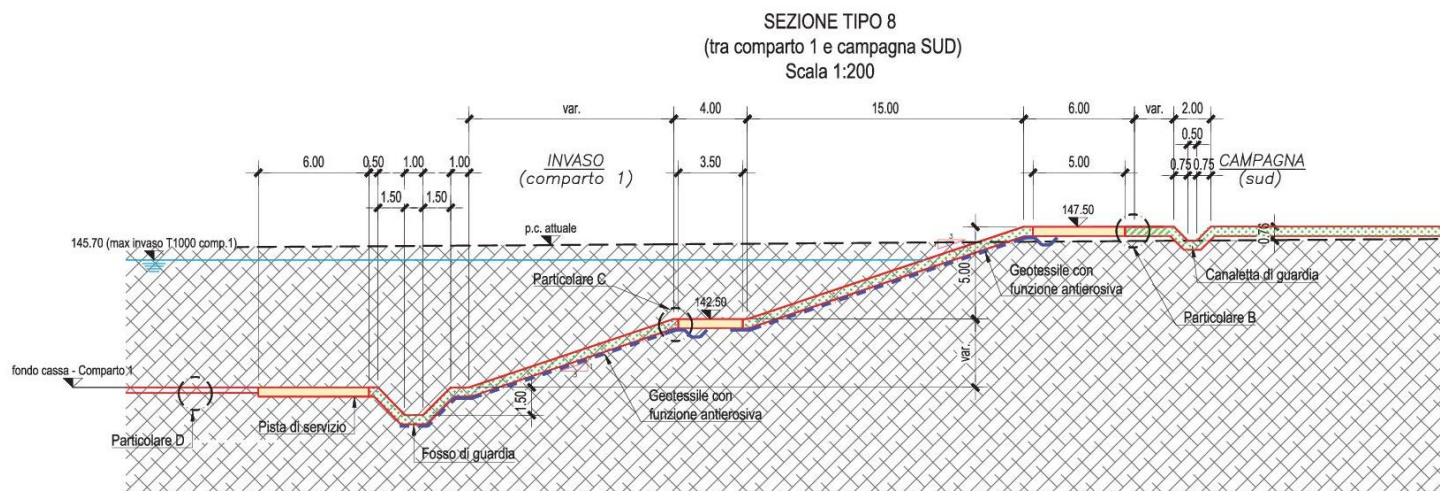
In tale tratto è prevista la riprofilatura dell'alveo, con protezione al piede costituito da scogliera in massi.

Il paramento lato invaso 2, ha la pendenza di 3 (H) / 1 (V), con banche intermedie di larghezza pari a 4.0 m, poste a 5.0 m e a 10.0 m dalla sommità arginale.

In corrispondenza dei paramenti dovrà essere garantito uno spessore del rilevato arginale, costituito da ghiaia in matrice limosa, pari a 4.0 m, fino al limite inferiore delle ghiaie pulite (posto alla quota di circa 129.80 m); completano la sezione gli stessi elementi già descritti per la sezione tipo 2.

2.8 SEZIONE TIPO 8

La sezione tipo 8 è relativa al lato Sud e parzialmente al lato Est dell'invaso 1; il tratto realizzato con tale sezione ha uno sviluppo in asse di circa 800 m a partire dal manufatto C e la sua sommità è alla quota di 147.50 m.



Tale tratto è caratterizzato da una modesta altezza dell'argine rispetto al piano campagna e da una scarpata, per raggiungere la quota di fondo dell'invaso 1, con paramento di pendenza 3 (H) / 1 (V) e con banca intermedia di larghezza pari a 4.0 m, posta a 5.0 m dalla sommità arginale.

Lungo le scarpate in scavo tra la sezione 3 e la sezione 10, al di sotto dello strato di terreno vegetale, sono posati teli di geotessile con funzione antierosiva, opportunamente ancorati in sommità e alla base; tale geotessile sarà tessuto a trama ed ordito in polipropilene stabilizzato ai raggi UV e sarà formato da bandelle sovrapposte. Il telo sarà composto da materiale resistente agli agenti chimici, imputrescibile ed atossico con buona resistenza alle alte temperature e avrà massa areica di 300 g/mq e resistenza a trazione trasversale di 60 kN/m.

3. CODICE DI CALCOLO UTILIZZATO

Le modellizzazioni si sono basate sul noto codice FEFLOW (DHI-WASY), tridimensionale con discretizzazione agli elementi finiti.

FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW system) è uno dei più sofisticati codici numerici ad oggi disponibili per la modellazione dei processi di flusso e trasporto in mezzi porosi e fratturati, in condizioni sia sature che insature. Tale ambiente di simulazione presenta funzionalità avanzate che lo collocano tra gli standard maggiormente accreditati per le simulazioni nell'ambito dell'ingegneria degli acquiferi.

Rimandando in particolare per il dettaglio alla letteratura tecnica disponibile, si riportano le seguenti caratteristiche generali del modello, nella release attuale (FEFLOW 7.2, 2019):

- discretizzazione con mesh tridimensionale agli elementi finiti, triangolari o quadrangolari;
- discretizzazione con elementi totalmente destrutturati;
- simulazione in zona satura ed in zona non satura;
- simulazione in mezzi porosi e fratturati, con possibilità di assegnazione differenziata delle 3 componenti vettoriali dell'ellissoide di conducibilità idraulica;
- simulazione di elementi discreti (pozzi, fratture, tubazioni, condotti carsici, ecc.) con approccio idraulico alla Manning-Stichler all'interno del sistema di flusso per filtrazione.
- simulazione di trasporto con fluidi di densità diverse per temperatura o concentrazione salina, flusso "density dependent";
- flusso e trasporto di fluidi a viscosità variabile;
- simulazione dei processi di trasporto degli inquinanti, con integrazione di un'estesa tipologia di reazioni chimiche e meccanismi di degradazione;
- simulazione del flusso di calore, per conduzione, convezione, trasporto; simulazione di scambiatori di calore e sonde geotermiche.

L'applicazione di FEFLOW, è adatta a simulare ogni condizione di progetto includendo il codice di calcolo moduli per l'inserimento di barriere lineari semipermeabili o impermeabili, diaframmi.

FEFLOW consente inoltre l'inserimento di "elementi discreti" all'interno del modello di flusso, condizione che consente ad esempio di simulare singole discontinuità, o tubazioni e condotte sotterranee per il trasferimento dei flussi in condizioni indipendenti dalla filtrazione nel mezzo poroso.

Utilizzando gli strumenti in ambiente Feflow, tutte le strutture in sotterraneo (diaframmi, setti impermeabili, limiti tra materiali a differenti proprietà, ecc.) sono inseribili come elementi vincolanti di costruzione della mesh di calcolo ("supermesh elements"), direttamente dai layout di progetto. Pertanto la griglia agli elementi finiti viene costruita sulla base della geometria reale degli elementi geometrici e di modello concettuale, e non sulla base di approssimazioni e schematizzazioni. Analogamente la geometria degli strati e dei livelli a differente conducibilità idraulica, dove

distinguibili, viene inserita tra gli elementi vincolanti per la costruzione della mesh consentendo la rappresentazione dell'andamento stratigrafico in assoluto aderente con il modello concettuale.

Nel caso specifico, l'approccio agli elementi finiti è d'obbligo in presenza di disomogeneità stratigrafiche e geometrie complesse, non correttamente schematizzabili sulla base di grid regolari alle differenze finite, come nel caso delle strutture in progetto e relativi terreni di fondazione.

4. IMPLEMENTAZIONE DEI MODELLI DI FLUSSO

Sono stati implementati modelli di flusso bidimensionali in sezione verticale relativi alle sezioni di progetto significative per altezza, geometria, battenti e differenziali di carico idraulico interno/esterno, e rappresentative del progetto complessivo (Figura 1).

Le simulazioni sono state eseguite in regime transitorio con risoluzione dell'equazione di Richards, per flusso saturo e non saturo.

Le simulazioni hanno riguardato il flusso interno al rilevato in riferimento alle condizioni al contorno costituite dai livelli idrometrici sui paramenti calcolate dalla modellizzazione idraulica (rif. Elaborato BAG3 02 IDR R RE 02 0 Relazione Idraulica).

Al sistema, sulla base delle caratteristiche dei materiali in sito che verranno utilizzati per la realizzazione dei rilevati (rif. Relazione Geotecnica), sono state attribuite le caratteristiche riportate in Tabella 1 – Parametri idrodinamici dei materiali del terreno di fondazione e del corpo arginale.

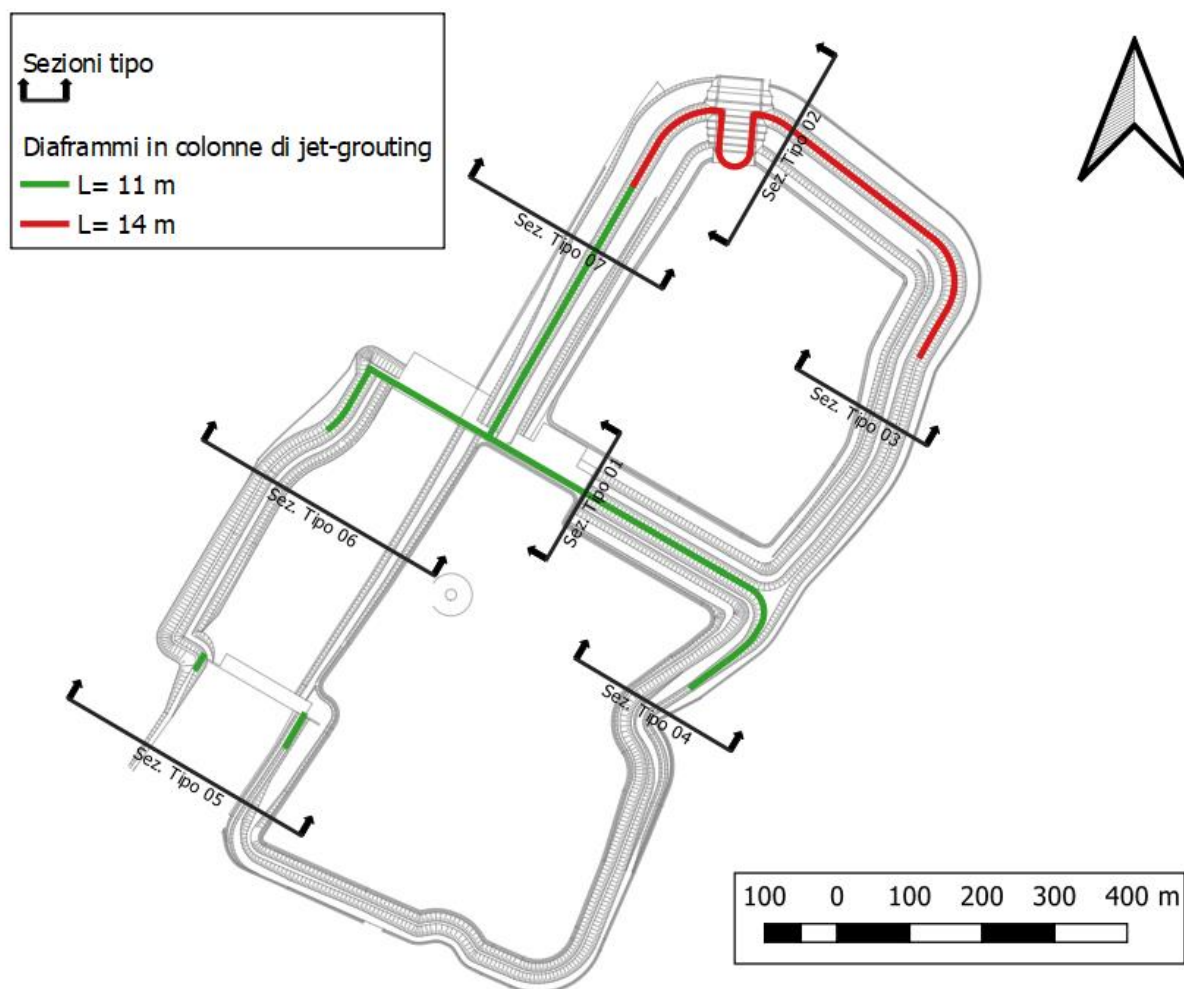


Figura 1 – Sezioni di progetto per le quali sono state effettuate le verifiche di filtrazione

	Descrizione	U.G.	Ks (m/s)
Rilevati			
Corpo arginale (nucleo)	A 2-6, A6 – A7-6		1E-8 (*)
Corpo arginale	U.G.2a		5E-5
Terreni di fondazione			
Unità di Modena	Ghiaie e Sabbie	U.G. 1	1E-3
Subsistema di Ravenna	Ghiaie e sabbie limoso argillose	U.G. 2a	5E-5
	Livelli prettamente limosi argillosi	U.G. 2b	1E-7
Diaframma di tenuta in jet grouting			1E-8

(*) range di verifica: 1E-8 ÷ 1E-6

Tabella 1 – Parametri idrodinamici dei materiali del terreno di fondazione e del corpo arginale

Le verifiche sono state condotte sulla base dei seguenti scenari:

- condizioni di moto transitorio;
- idrogrammi di progetto corrispondenti all'evento di piena $T_r = 1000$ anni (con picco di piena q. 145.7 comparto 1, 143.7 comparto 2, rif. Figura 2);
- falda lato valle assunta cautelativamente pari alla quota del p.c. ¹.

Il flusso non saturo è stato simulato utilizzando il classico modello di Van Genuchten modificato, per la definizione attraverso fitting parameters dei termini non lineari dell'equazione di Richards (curve di pressione capillare vs. saturazione e Saturazione vs. conducibilità idraulica).

Nella condizione satura, la conducibilità idraulica corrisponde al valore K_{sat} (max) indicato in tabella, e l'equazione di Richards si riduce alla classica equazione di Darcy per il flusso nel mezzo poroso.

Sul paramento esterno è stata posta la condizione al contorno di seepage face (pressione $P=0$ ai nodi di interfaccia) che simula il libero deflusso delle acque dove il livello di saturazione raggiunga il piano di campagna ovvero il paramento esterno medesimo.

¹ Per la specifica sezione 5, relativa al tratto di rilevato arginale tra alveo Comparto 1 e alveo Baganza, è stata applicata come condizione al contorno sul lato esterno vasca il contestuale idrogramma di piena $T_r 1000$, da modello idraulico (rif. successivo par. 2.5)

Le simulazioni bidimensionali in sezione verticale, in regime transitorio, hanno consentito di calcolare, per ogni time step l'andamento della superficie di saturazione interna all'argine per l'idrogramma di livello applicato.

Le verifiche nei confronti del sifonamento, a partire da ulteriore set di verifiche in regime stazionario relative ai massimi livelli di invaso nei singoli comparti, sono state innanzitutto condotte verificando che il rapporto tra il gradiente I_c , assunto pari a 1, ed il gradiente idraulico massimo in uscita le sia superiore a 2. A seguire è stata implementata verifica nei confronti degli stati limite ultimi idraulici, ai sensi il vigente D.M. Infrastrutture 26 giugno 2014 "Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)", rif. punto E.5.1., e relativi rimandi alle NTC 2008, come nel seguito specificato.

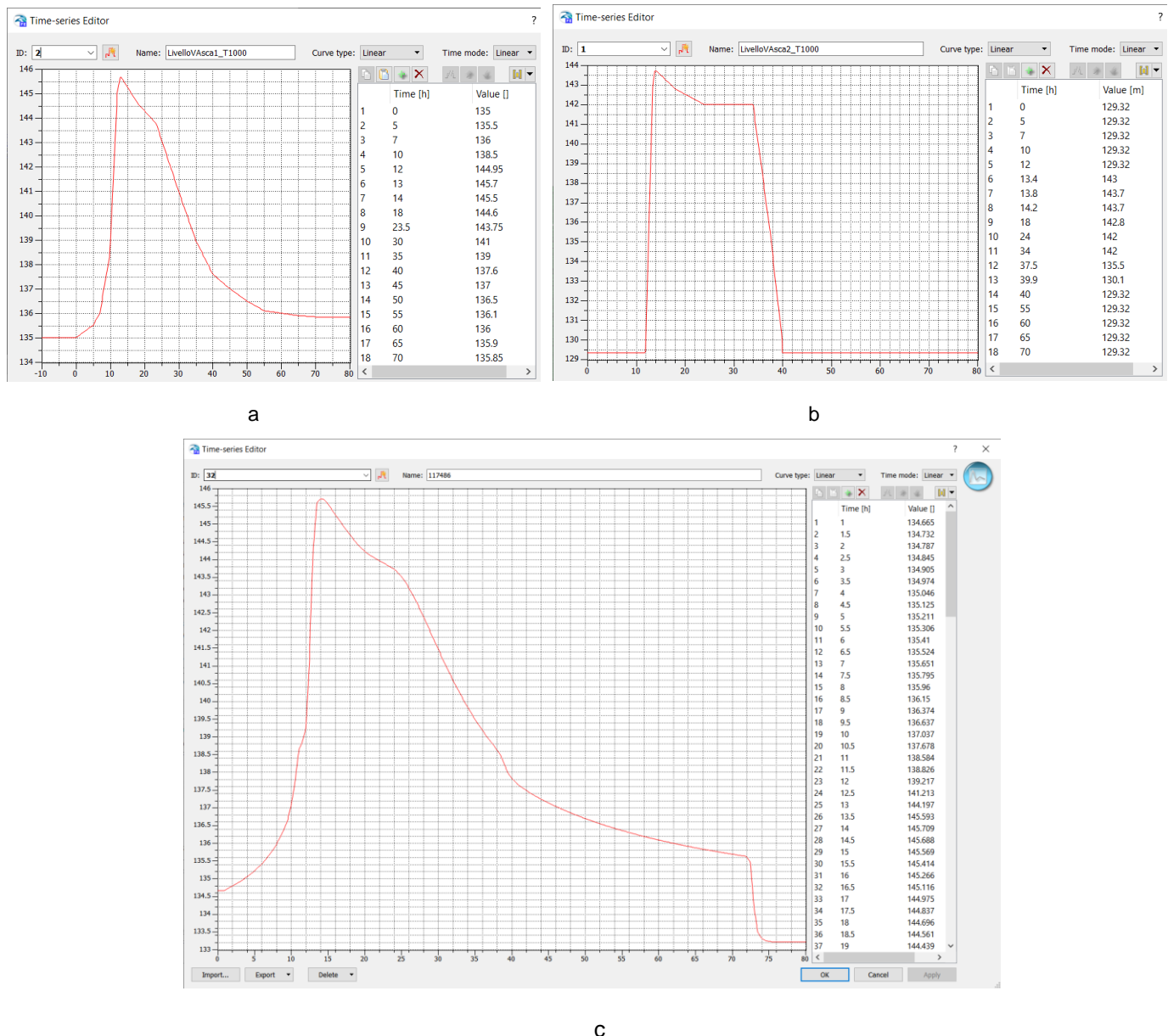


Figura 2 – Quote idrometriche di riferimento per le simulazioni in regime transitorio, da modello idraulico; comparto 1 (a), comparto 2 (b), alveo Baganza monte manufatto "A"

5. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

Nel seguito vengono riportati i risultati delle simulazioni, per ognuna delle cinque sezioni di progetto, Sez. 1, Sez. 2, Sez. 3, Sez. 6, Sez. 7 (Figura 1), per l'idrogramma di piena $Tr = 1000$ anni.

Nelle figure che seguono, sono in particolare riportate le sezioni di verifica, con rappresentazione del campo di conducibilità idraulica e della linea di saturazione per le seguenti condizioni:

- regime transitorio, rappresentazione dei tempi di calcolo $t = 14$ h (picco evento), 30 h, 50 h, 80 h
- regime stazionario (∞).

Tutte le simulazioni corrispondono alla condizione teorica maggiormente cautelativa ("condizione critica"), ovvero di massima differenza di quota idrometrica tra i paramenti arginali, come nel seguito specificato.

Per tutte le sezioni vengono eseguite due differenti set di verifiche, in riferimento a valori di conducibilità idraulica del nucleo $K = 1E-8$ m/s e $1E-6$ m/s (rif. precedente Tabella 1, "range di verifica").

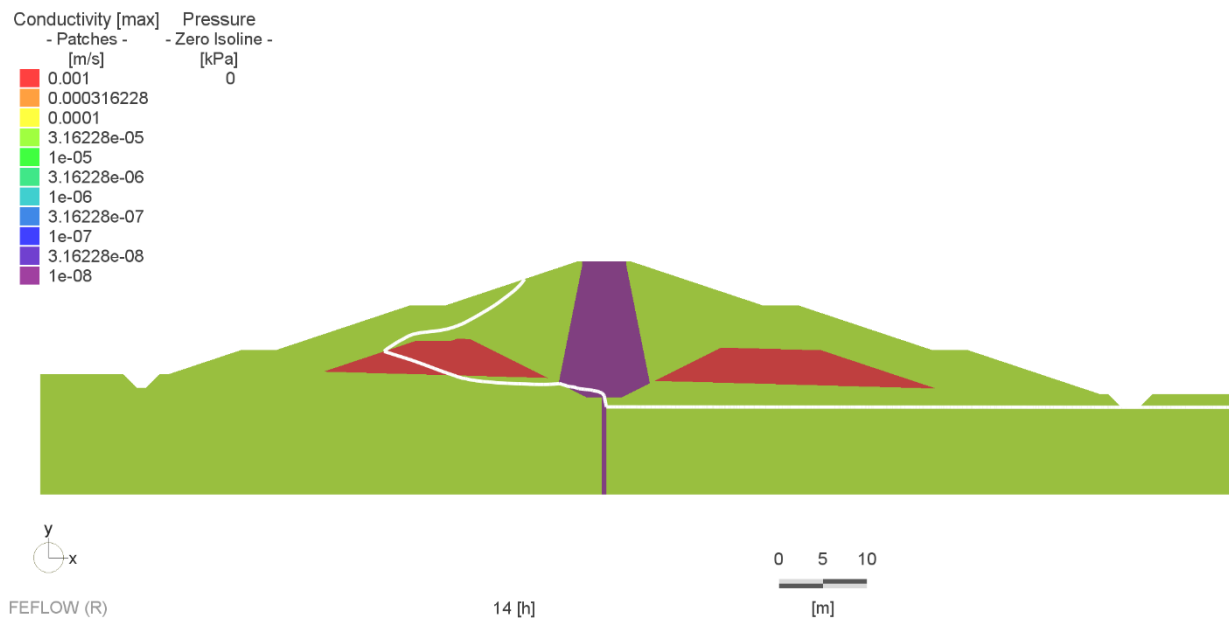
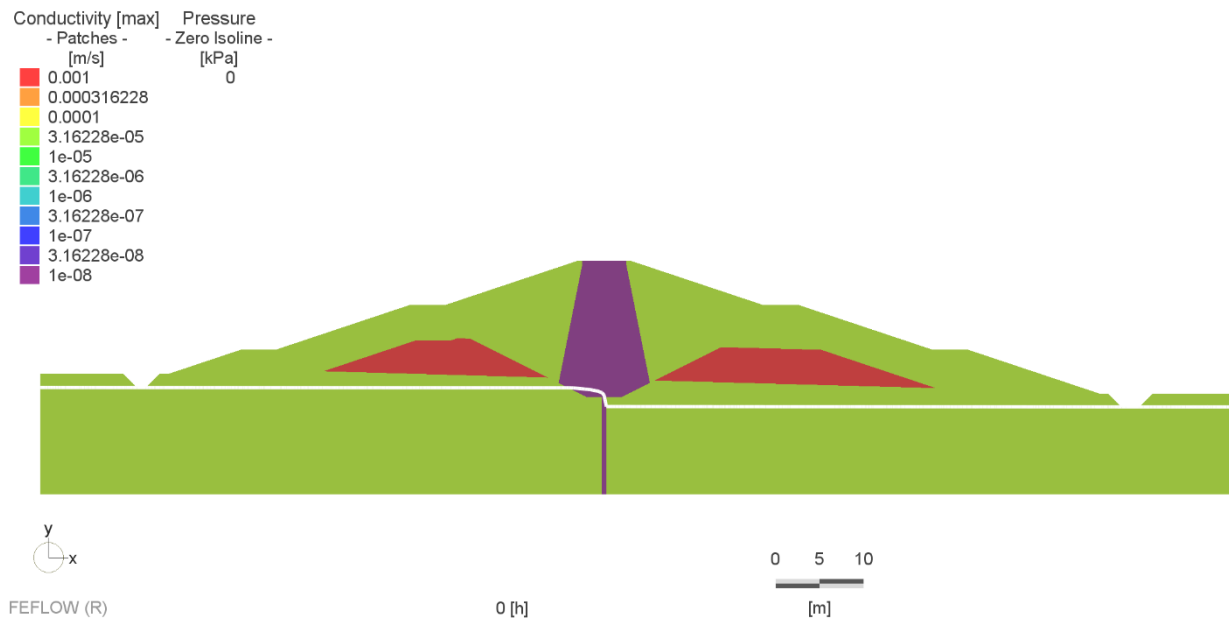
5.1 SEZIONE 1

"Condizione critica" di riferimento:

- transitorio: idrogramma $Tr1000$ anni comparto 1 (paramento in sx), seepage face (free outflow) paramento e comparto 2 (dx in figura), con quota piezometrica iniziale corrispondente alla canaletta a fondo vasca;
- stazionario: quota idrometrica massima (145.7 m s.l.m.) comparto 1, come sopra comparto 2.

5.1.1 Scenario con nucleo $K_s = 1E-8$ m/s

5.1.1.1. Condizione transitoria



Conductivity [max] Pressure
- Patches - - Zero Isoline -
[m/s] [kPa]
0
0.001
0.000316228
0.0001
3.16228e-05
1e-05
3.16228e-06
1e-06
3.16228e-07
1e-07
3.16228e-08
1e-08

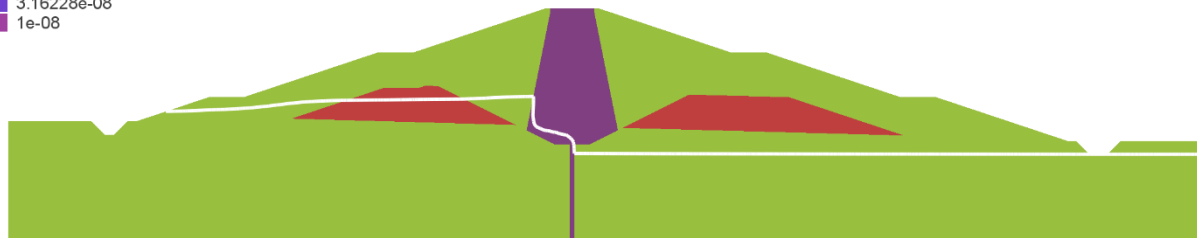


FEFLOW (R)

50 [h]

0 5 10
[m]

Conductivity [max] Pressure
- Patches - - Zero Isoline -
[m/s] [kPa]
0
0.001
0.000316228
0.0001
3.16228e-05
1e-05
3.16228e-06
1e-06
3.16228e-07
1e-07
3.16228e-08
1e-08

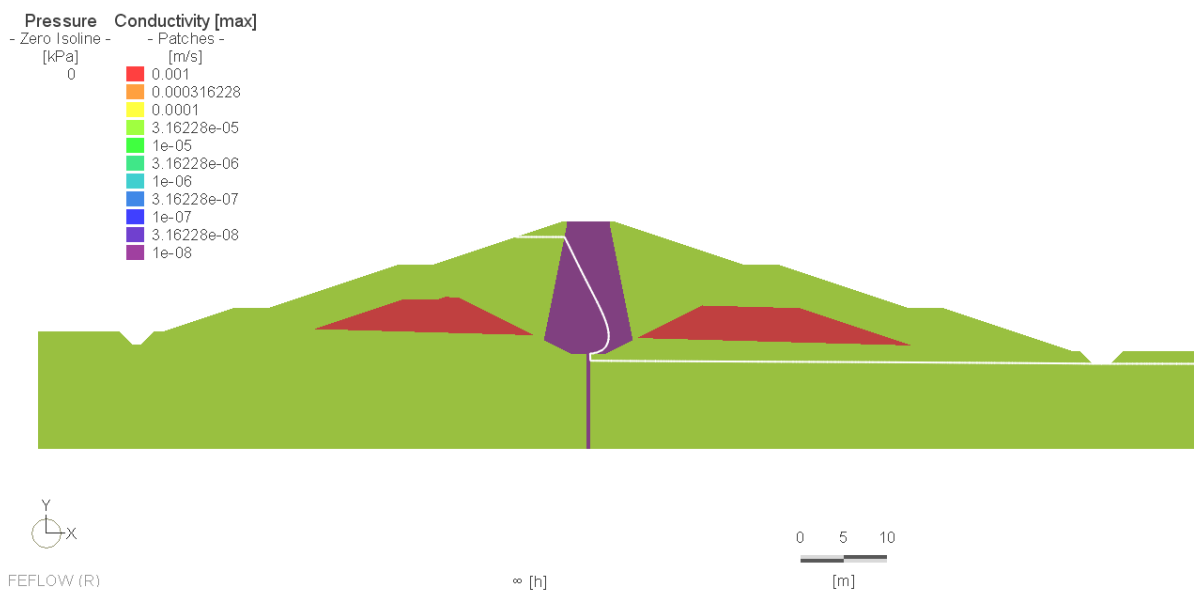


FEFLOW (R)

80 [h]

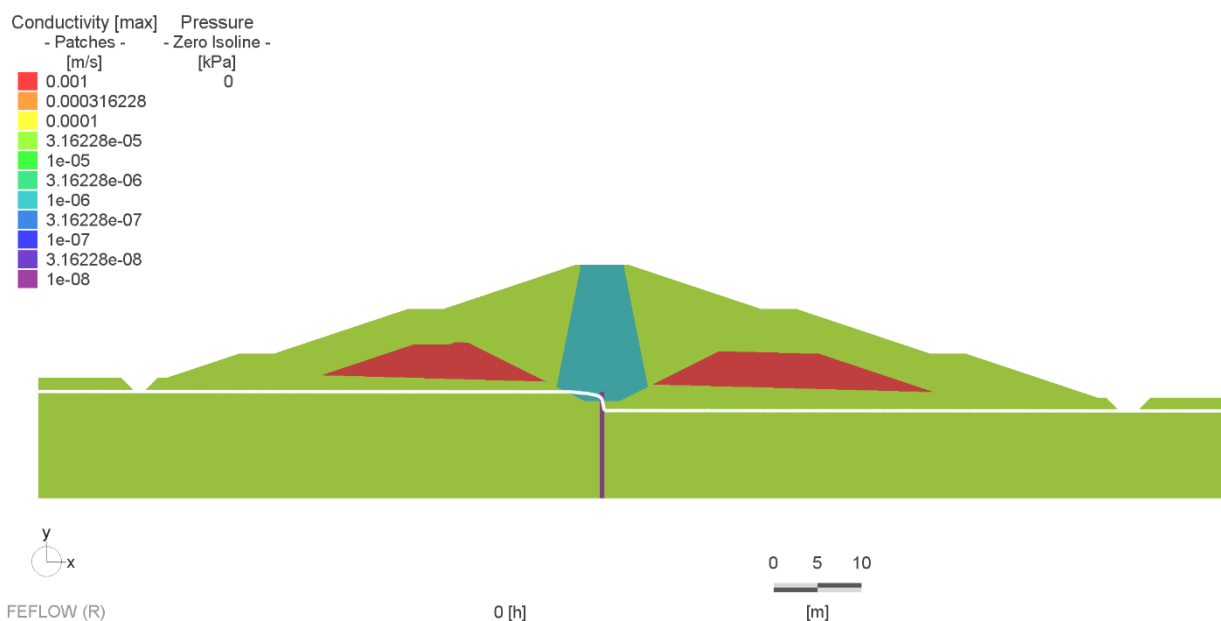
0 5 10
[m]

5.1.1.2. Condizione stazionaria (∞)



5.1.2 Scenario con nucleo Ks = 1E-6 m/s

5.1.2.1. Condizione transitoria



Conductivity [max] Pressure
- Patches - - Zero Isoline -
[m/s] [kPa]
0
0.001
0.000316228
0.0001
3.16228e-05
1e-05
3.16228e-06
1e-06
3.16228e-07
1e-07
3.16228e-08
1e-08

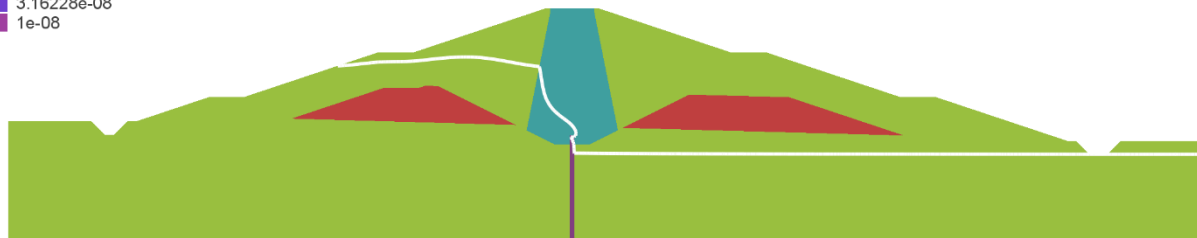


FEFLOW (R)

14 [h]

0 5 10
[m]

Conductivity [max] Pressure
- Patches - - Zero Isoline -
[m/s] [kPa]
0
0.001
0.000316228
0.0001
3.16228e-05
1e-05
3.16228e-06
1e-06
3.16228e-07
1e-07
3.16228e-08
1e-08

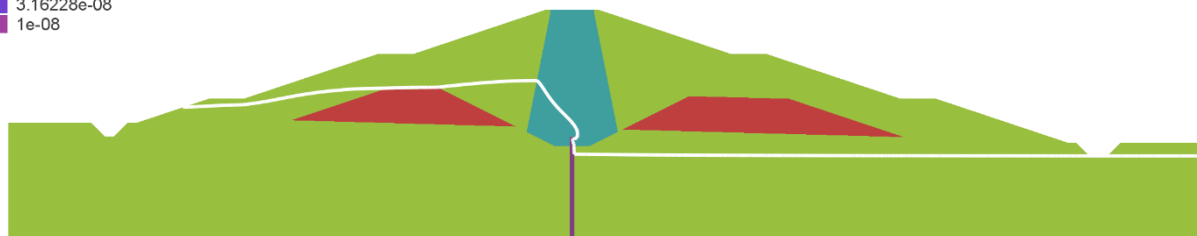


FEFLOW (R)

30 [h]

0 5 10
[m]

Conductivity [max] Pressure
- Patches - Zero Isoline -
[m/s] [kPa]
0
0.001
0.000316228
0.0001
3.16228e-05
1e-05
3.16228e-06
1e-06
3.16228e-07
1e-07
3.16228e-08
1e-08

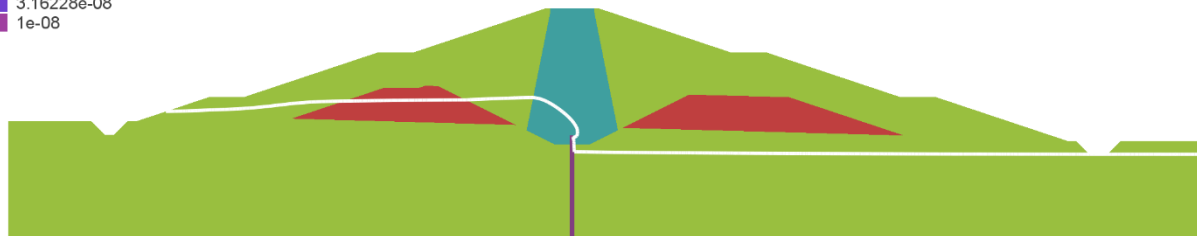


FEFLOW (R)

50 [h]

0 5 10
[m]

Conductivity [max] Pressure
- Patches - Zero Isoline -
[m/s] [kPa]
0
0.001
0.000316228
0.0001
3.16228e-05
1e-05
3.16228e-06
1e-06
3.16228e-07
1e-07
3.16228e-08
1e-08

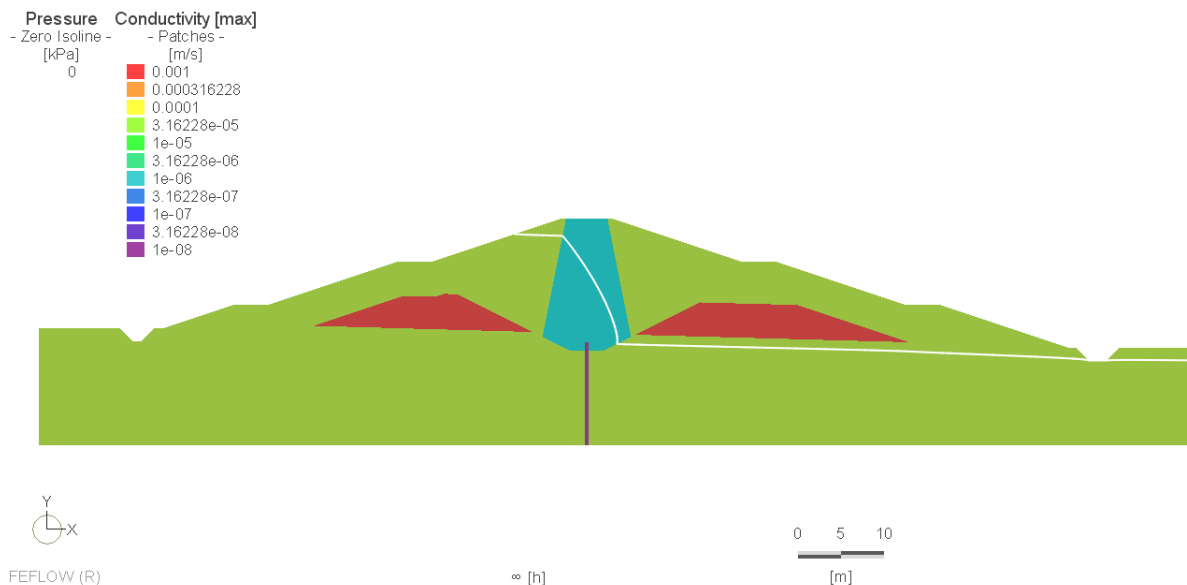


FEFLOW (R)

80 [h]

0 5 10
[m]

5.1.2.2. Condizione stazionaria (∞)



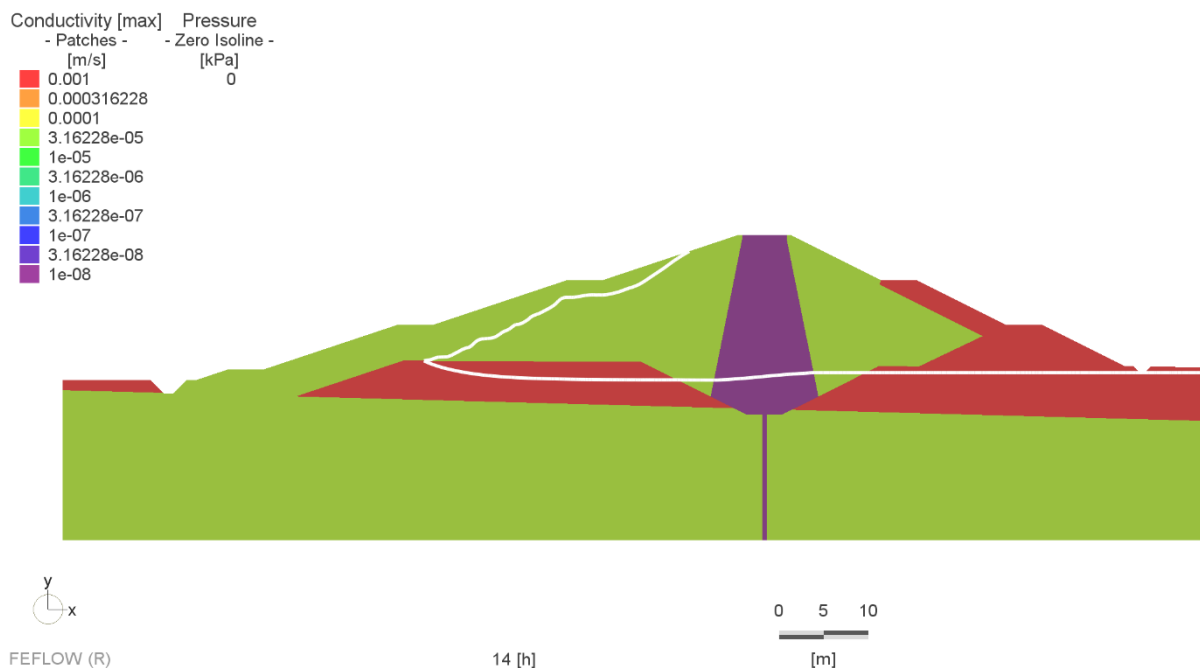
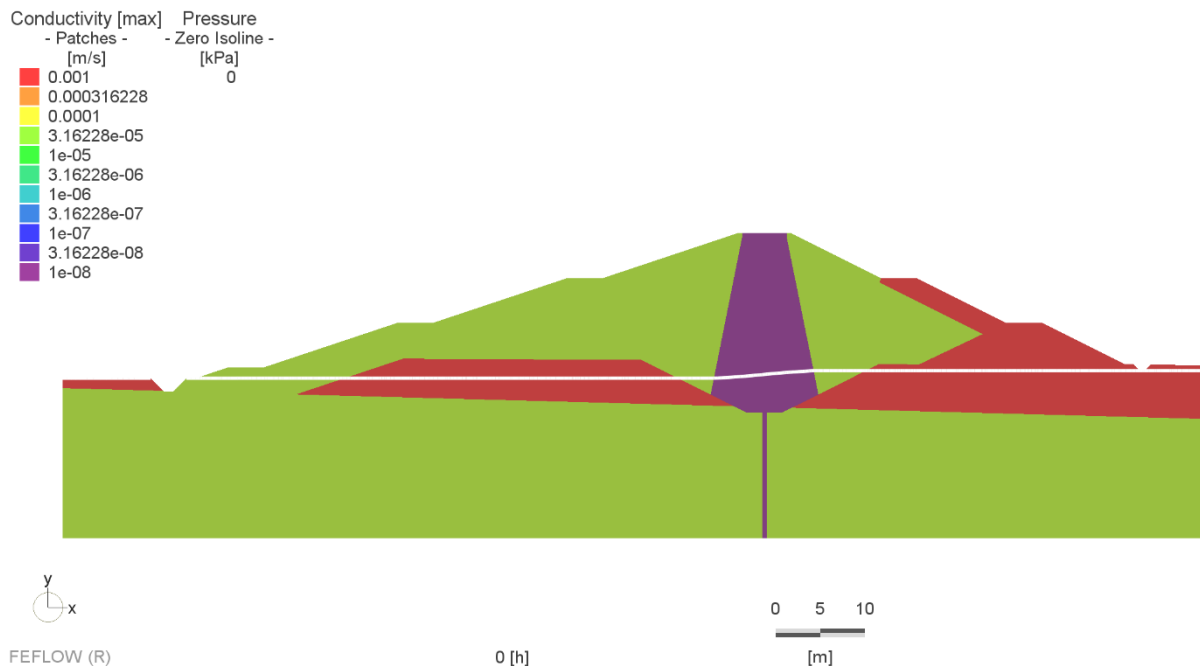
5.2 SEZIONE 2

“Condizione critica” di riferimento:

- transitorio: idrogramma Tr1000 anni comparto 2 (paramento in sx), seepage face (free outflow) paramento esterno (dx in figura), con quota piezometrica iniziale corrispondente alla canaletta a base rilevato / p.c..
- stazionario: quota idrometrica massima (143.7 m s.l.m.) comparto 2, come sopra paramento esterno.

5.2.1 Scenario con nucleo $K_s = 1E-8$ m/s

5.2.1.1. Condizione transitoria



Conductivity [max] Pressure
- Patches - Zero Isoline -
[m/s] [kPa]
0

0.001
0.000316228
0.0001
3.16228e-05
1e-05
3.16228e-06
1e-06
3.16228e-07
1e-07
3.16228e-08
1e-08



FEFLOW (R)

30 [h]

0 5 10
[m]

Conductivity [max] Pressure
- Patches - Zero Isoline -
[m/s] [kPa]
0

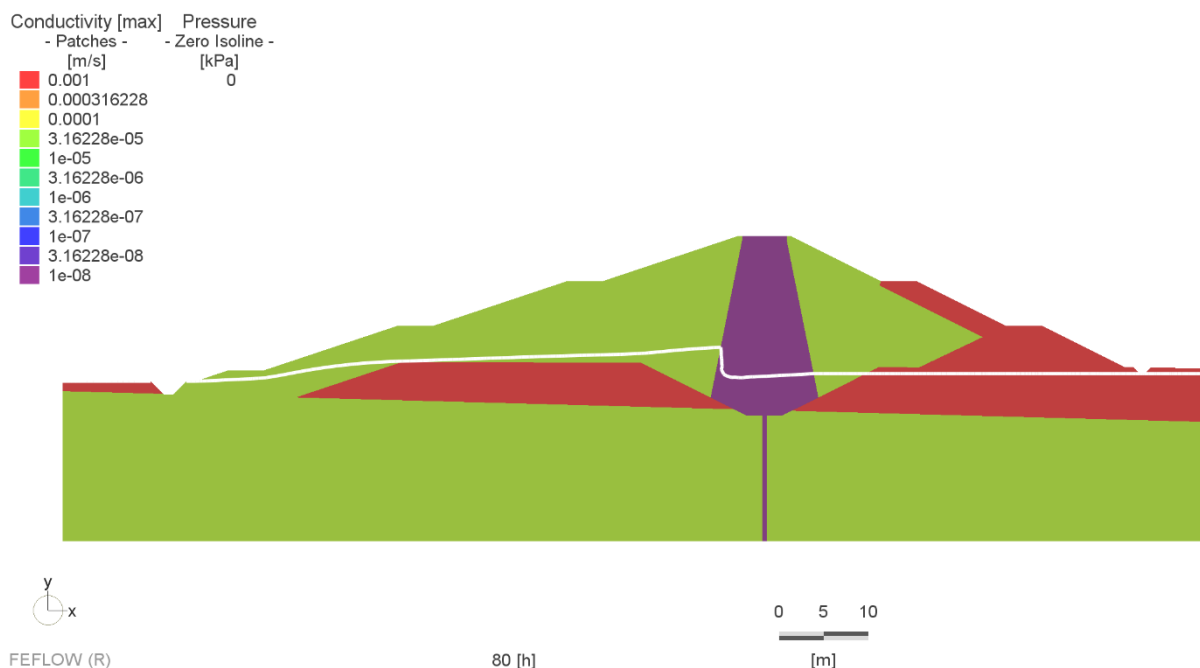
0.001
0.000316228
0.0001
3.16228e-05
1e-05
3.16228e-06
1e-06
3.16228e-07
1e-07
3.16228e-08
1e-08



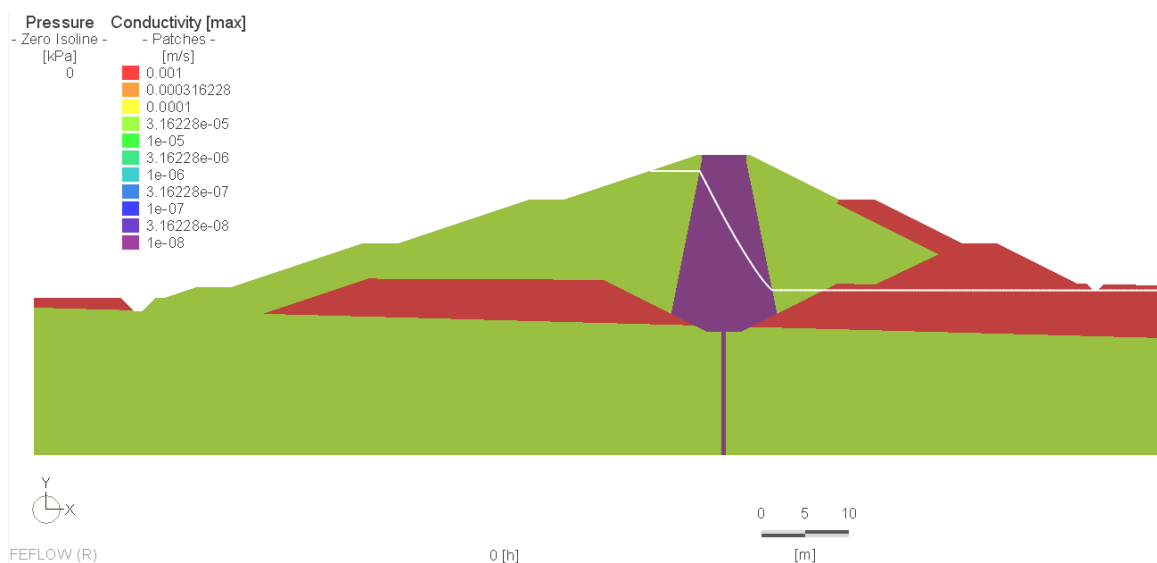
FEFLOW (R)

50 [h]

0 5 10
[m]

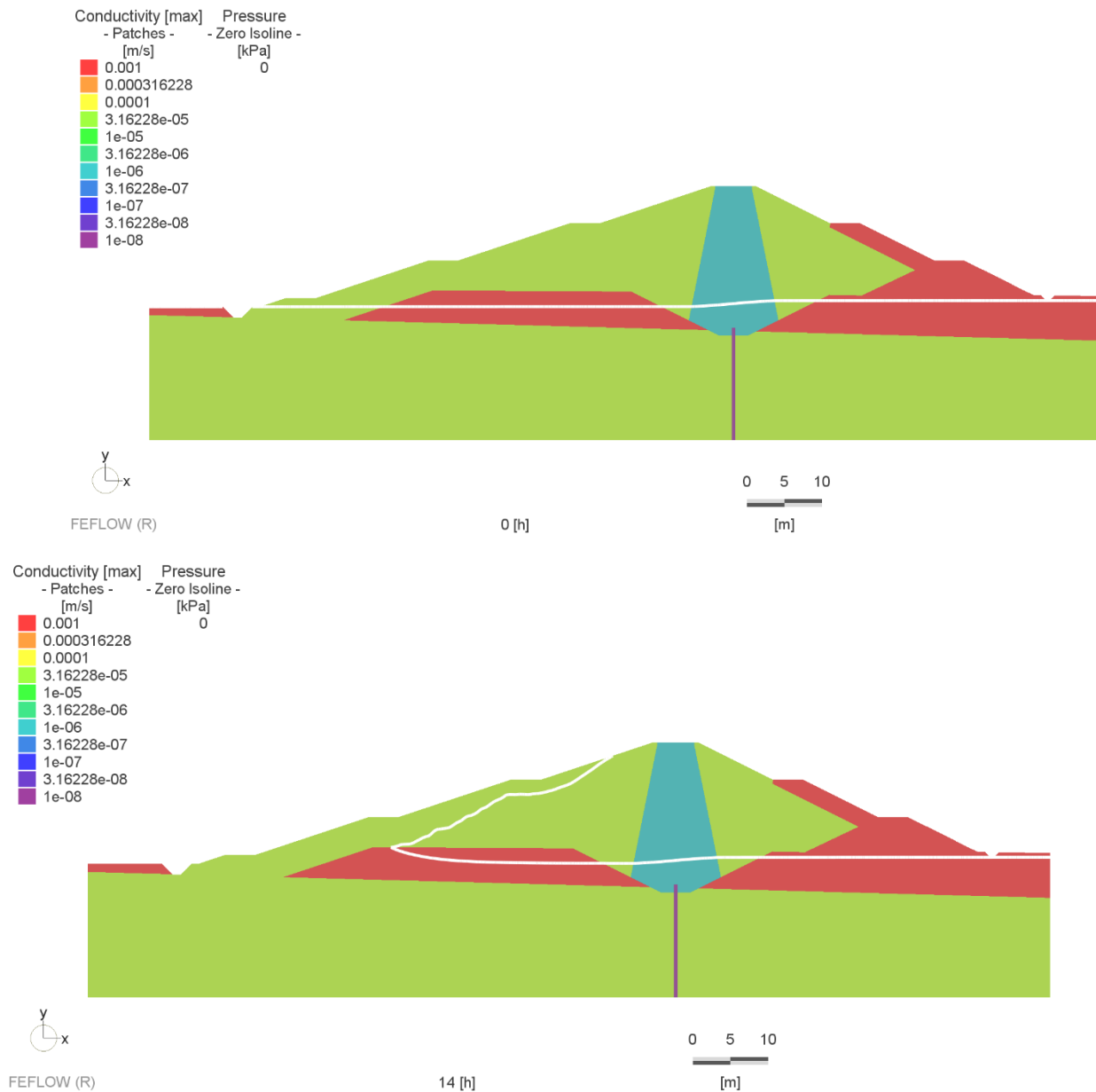


5.2.1.2. Condizione stazionaria (∞)



5.2.2 Scenario con nucleo $K_s = 1E-6$ m/s

5.2.2.1. Condizione transitoria



Conductivity [max] Pressure
- Patches - - Zero Isoline -
[m/s] [kPa]
0
0.001
0.000316228
0.0001
3.16228e-05
1e-05
3.16228e-06
1e-06
3.16228e-07
1e-07
3.16228e-08
1e-08

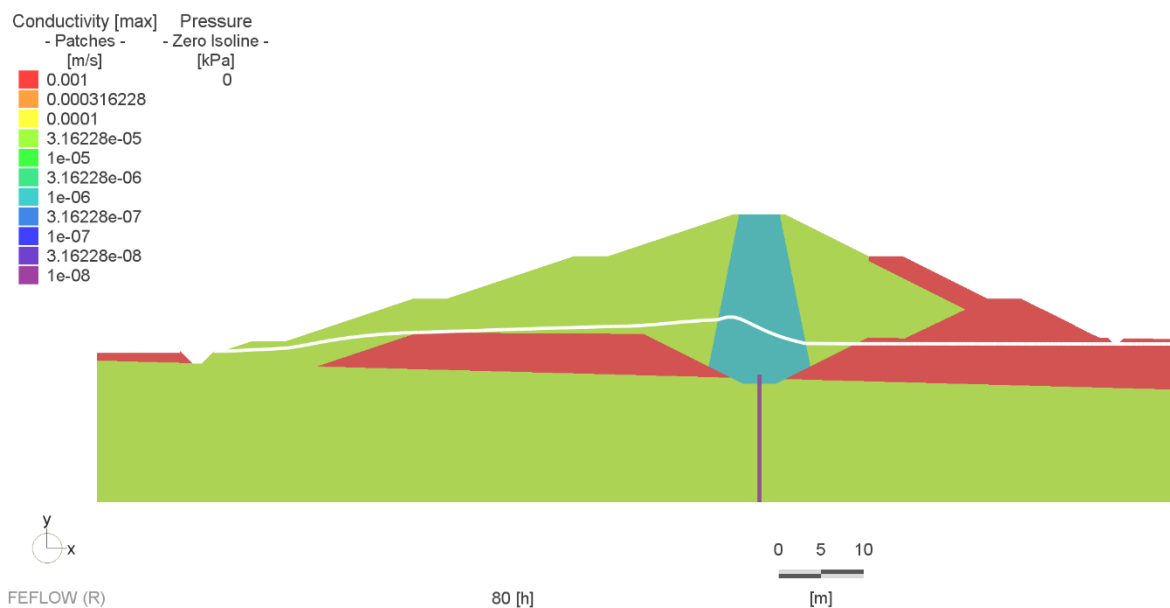


FEFLOW (R)
30 [h]

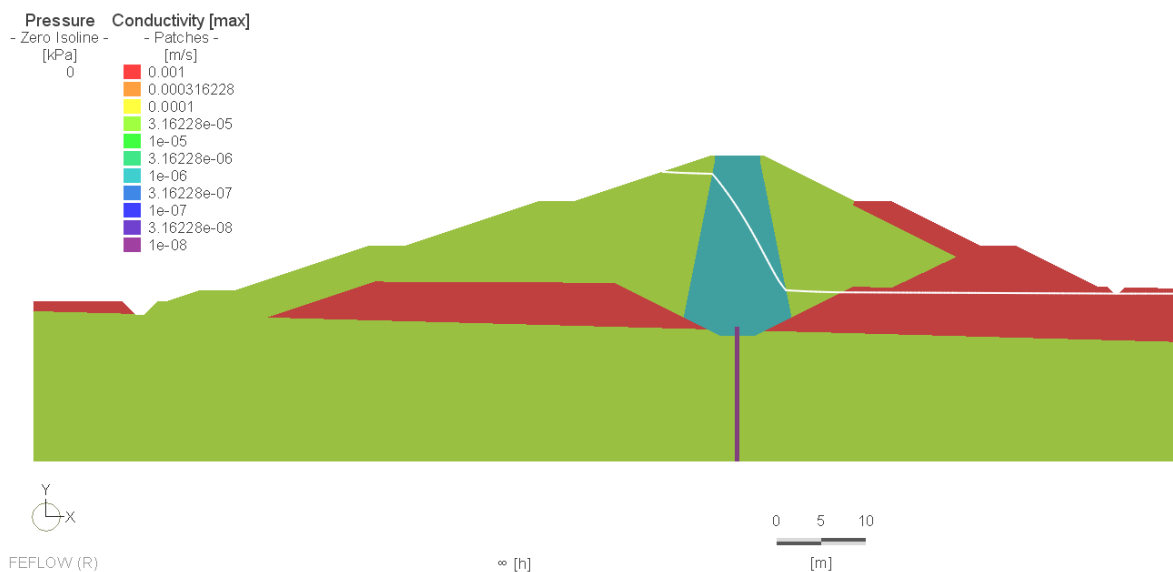
Conductivity [max] Pressure
- Patches - - Zero Isoline -
[m/s] [kPa]
0
0.001
0.000316228
0.0001
3.16228e-05
1e-05
3.16228e-06
1e-06
3.16228e-07
1e-07
3.16228e-08
1e-08



FEFLOW (R)
50 [h]



5.2.2.2. Condizione stazionaria (∞)



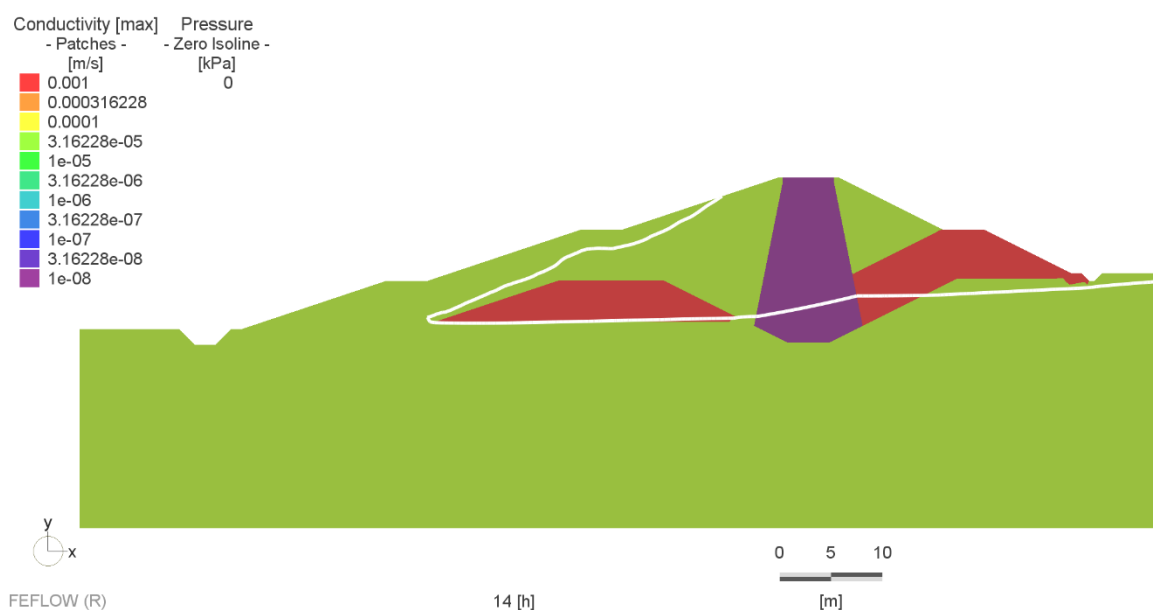
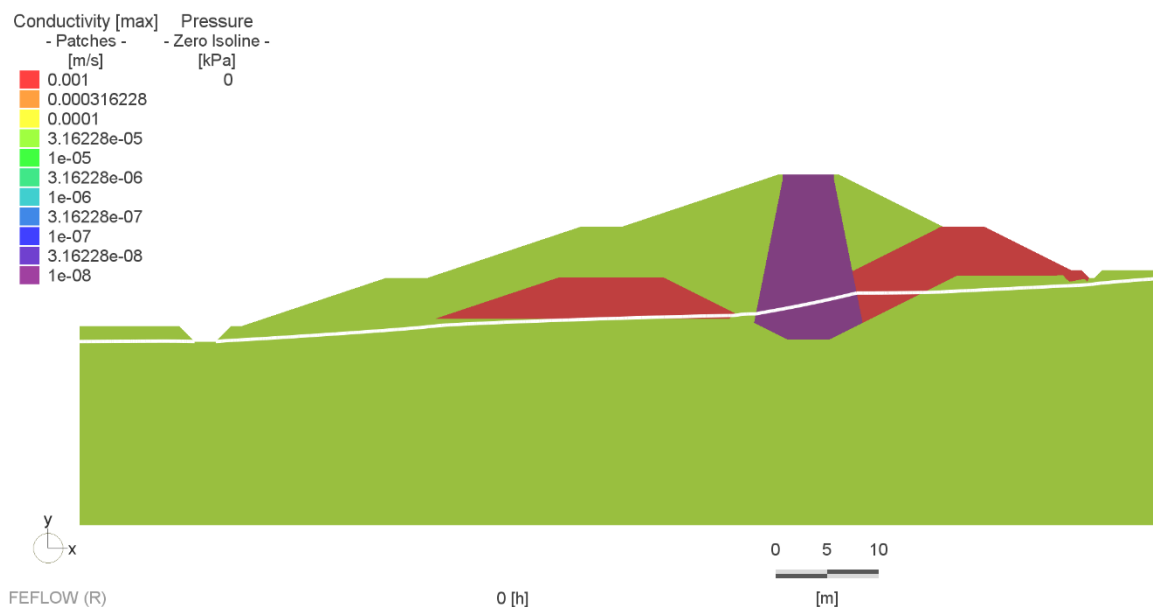
5.3 SEZIONE 3

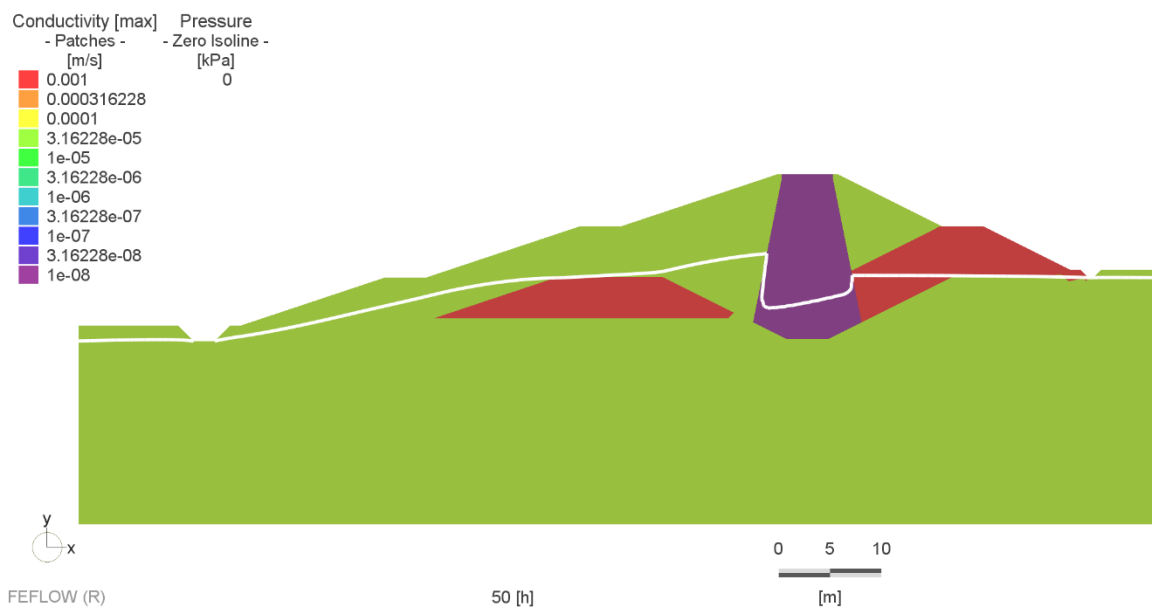
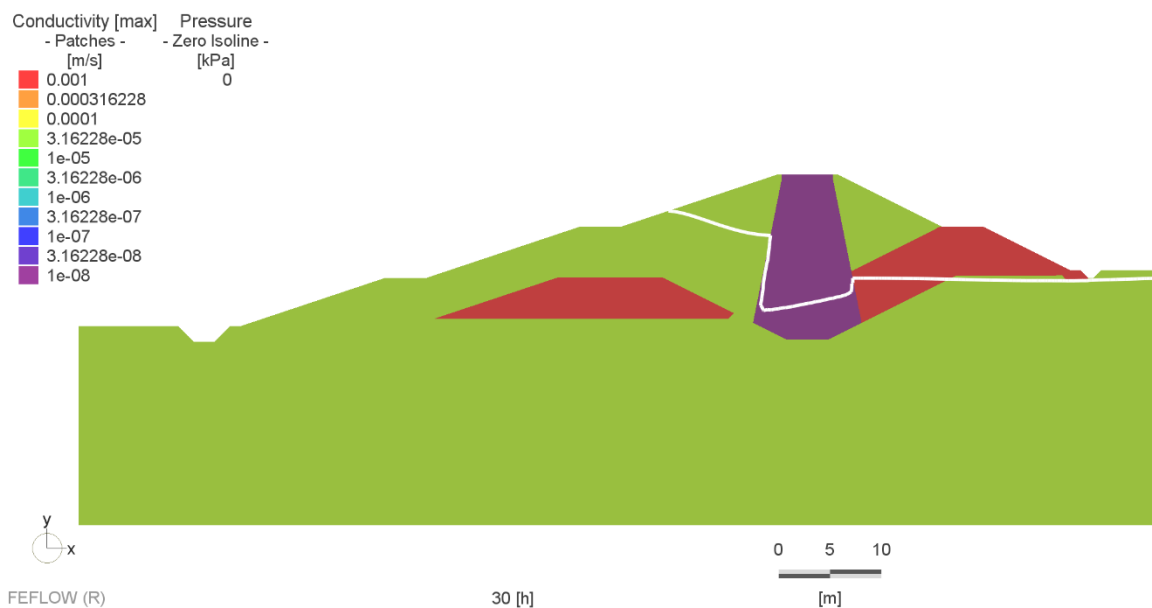
“Condizione critica” di riferimento:

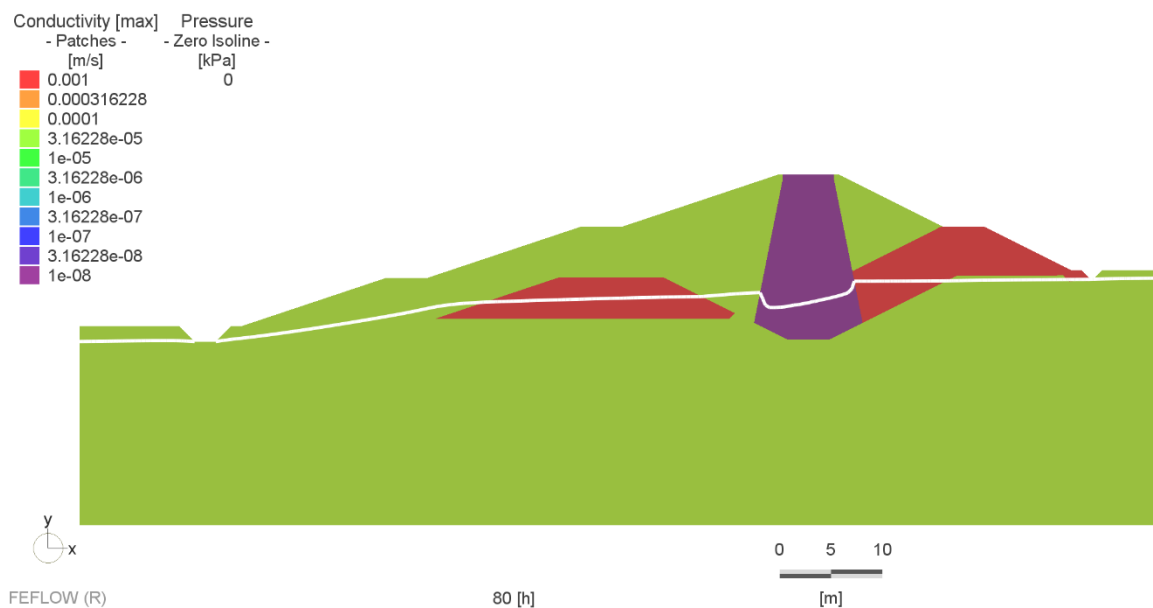
- transitorio: idrogramma Tr1000 anni comparto 2 (paramento in sx), seepage face (free outflow) paramento esterno (dx in figura), con quota piezometrica iniziale corrispondente alla canaletta a base rilevato / p.c..
- stazionario: quota idrometrica massima (143.7m s.l.m.) comparto 2, come sopra paramento esterno.

5.3.1 Scenario con nucleo $K_s = 1E-8$ m/s

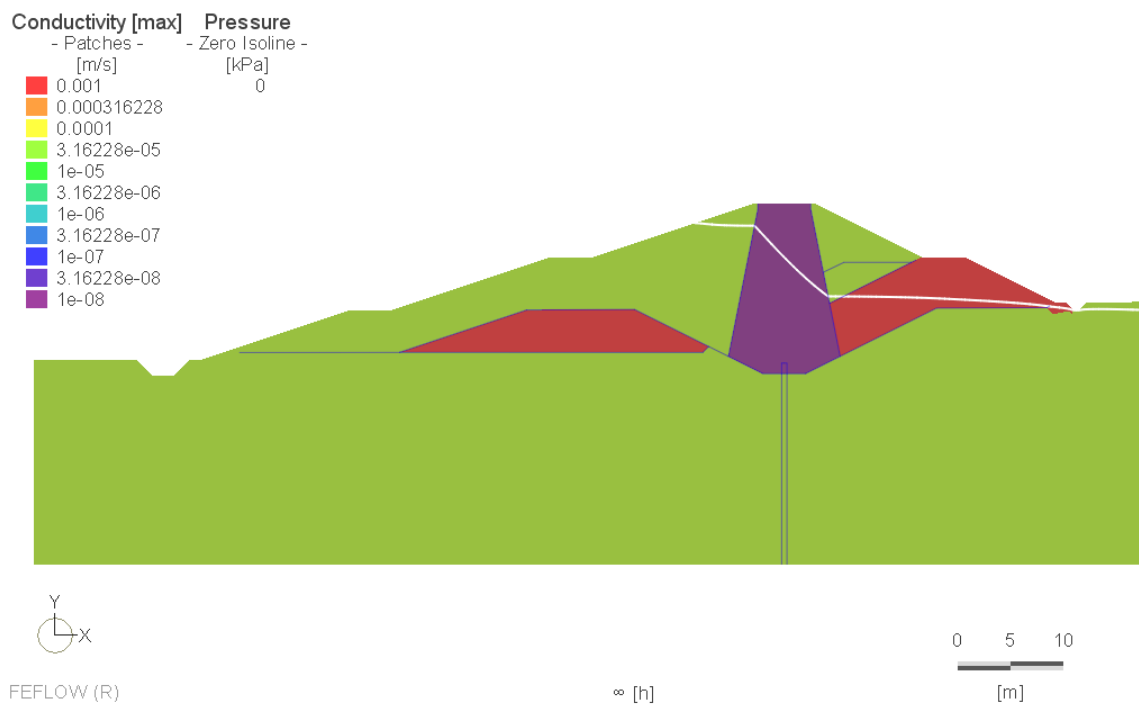
5.3.1.1. Condizione transitoria





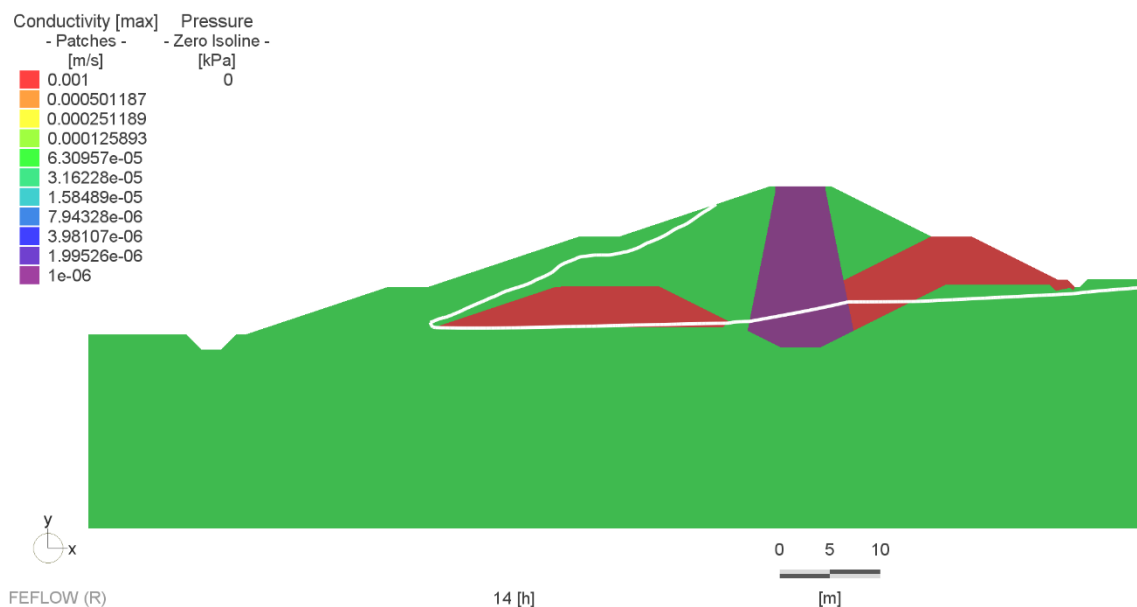
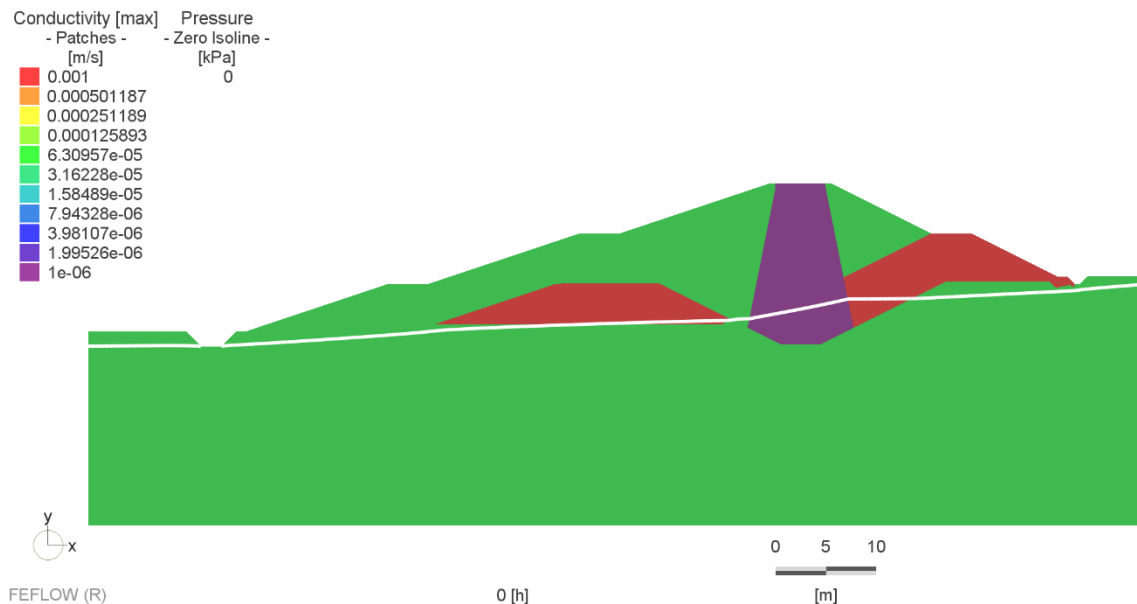


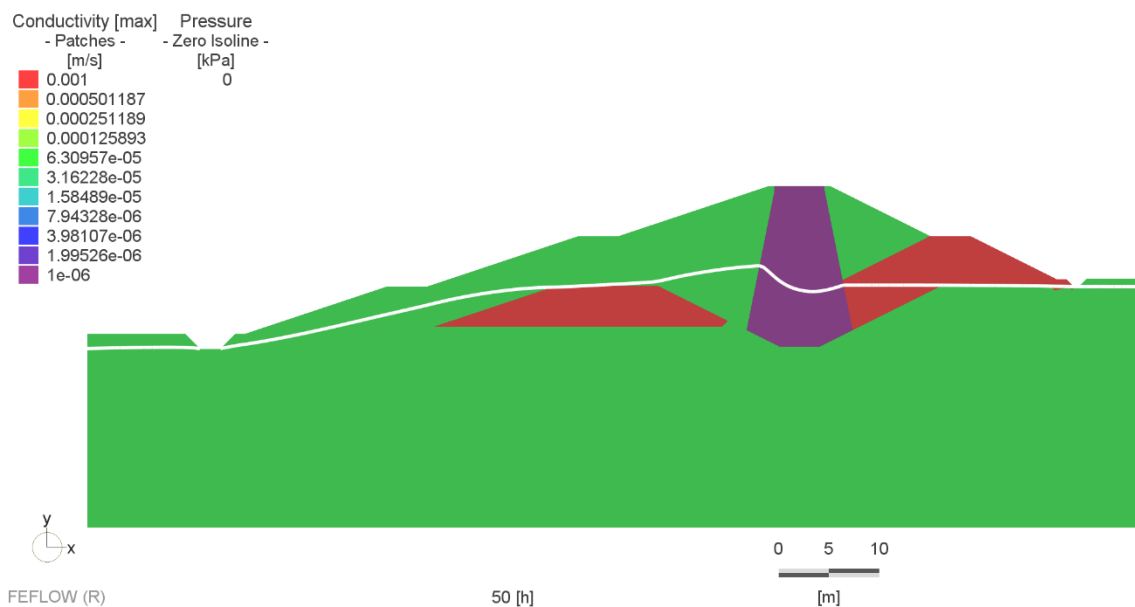
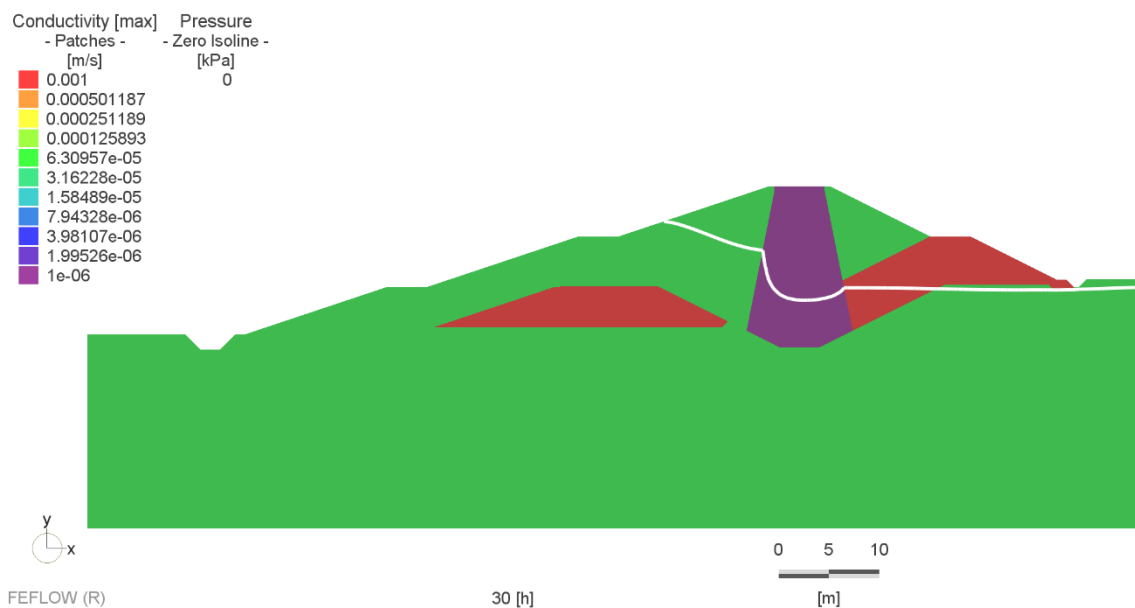
5.3.1.2. Condizione stazionaria (∞)

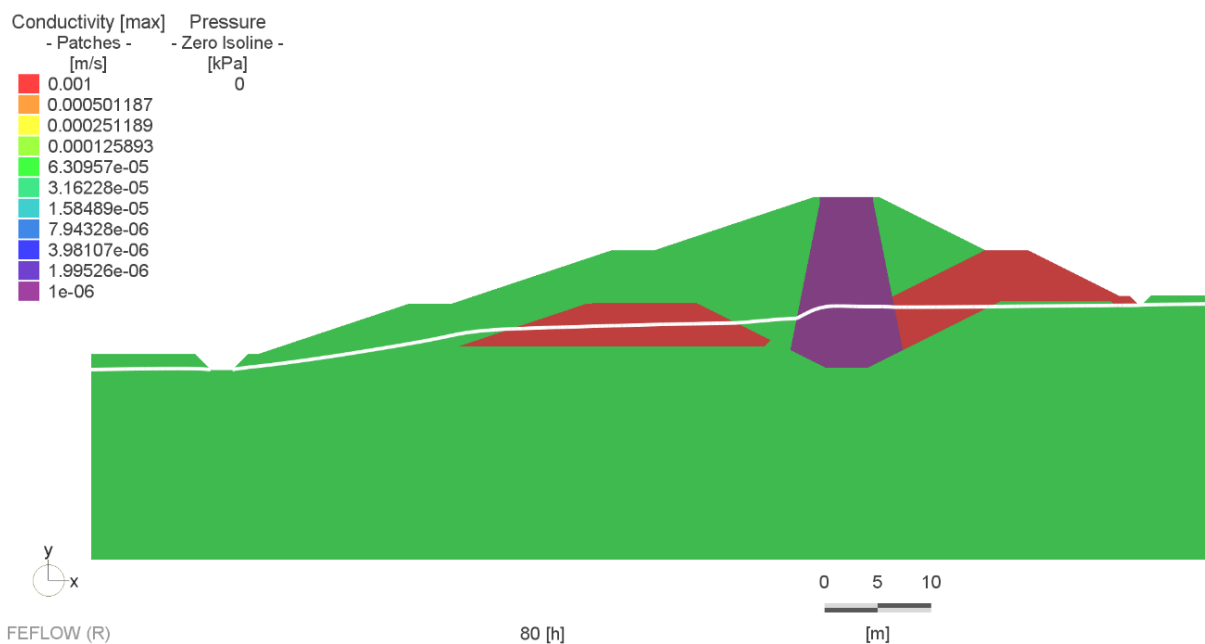


5.3.2 Scenario con nucleo $K_s = 1E-6$ m/s

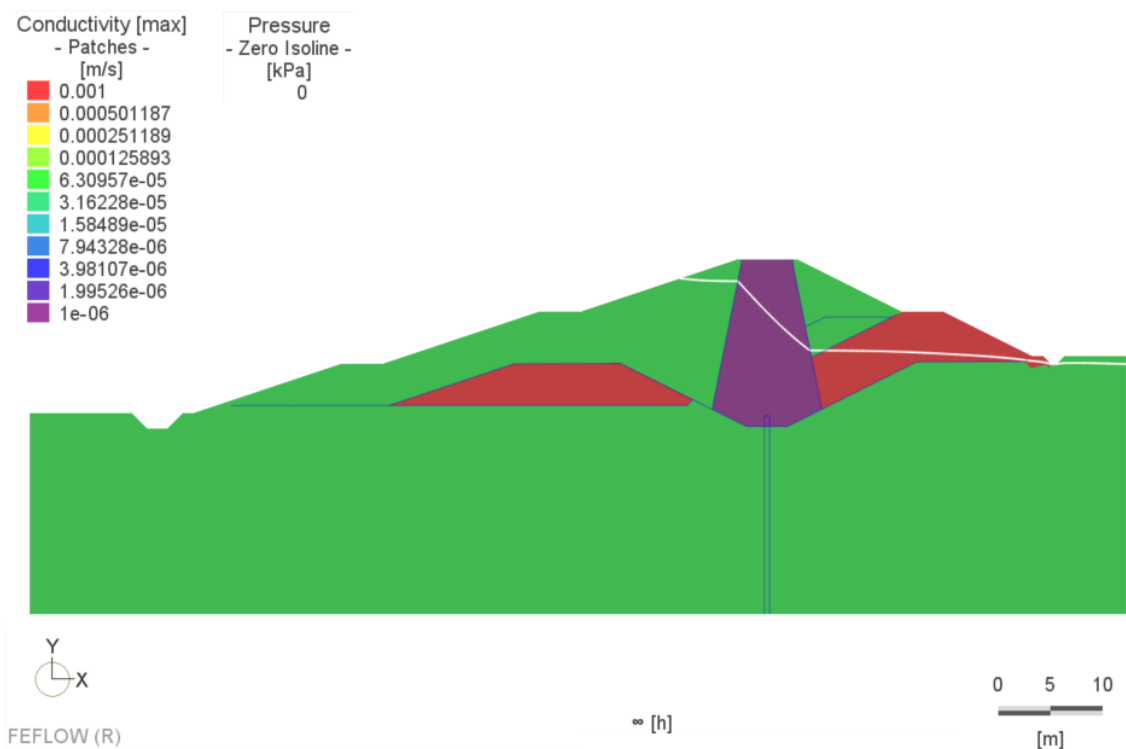
5.3.2.1. Condizione transitoria







5.3.2.2. Condizione stazionaria (∞)



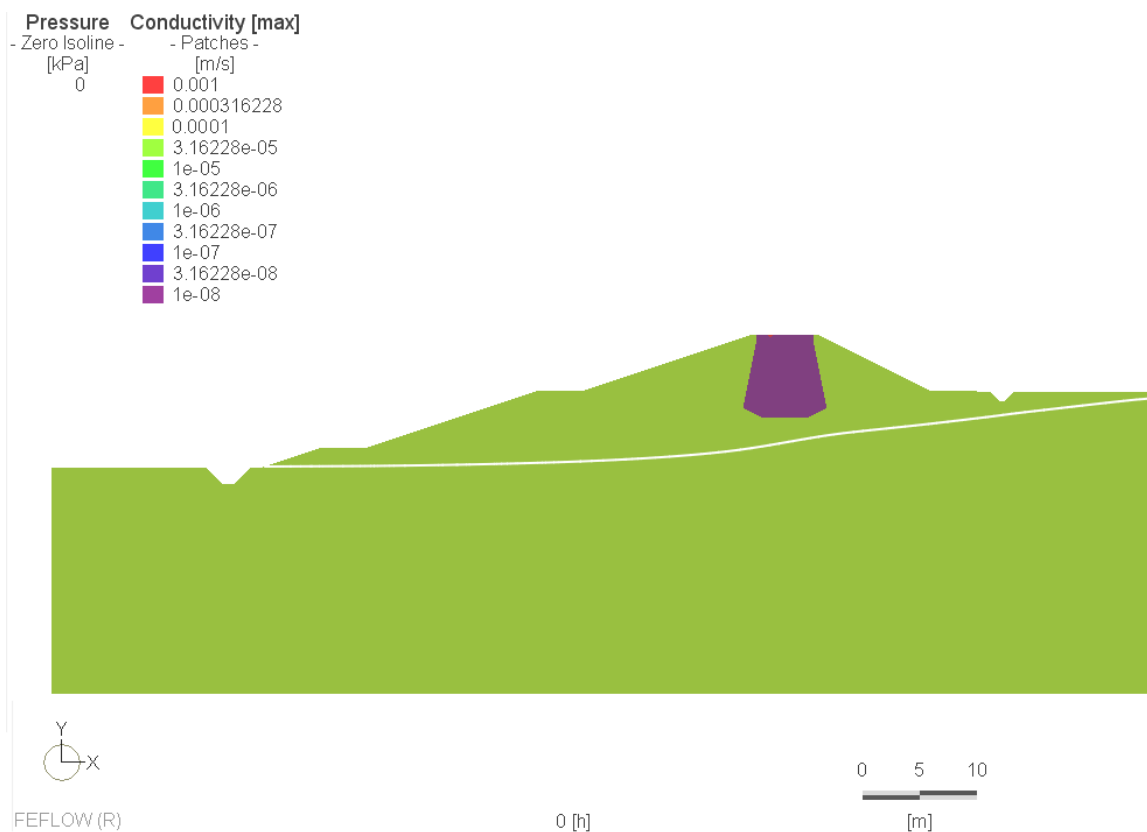
5.4 SEZIONE 4

“Condizione critica” di riferimento:

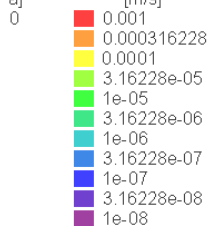
- transitorio: idrogramma Tr1000 anni comparto 1 (paramento in sx), seepage face (free outflow) paramento esterno (dx in figura), con quota piezometrica iniziale corrispondente alla canaletta a base rilevato / p.c..
- stazionario: quota idrometrica massima (145.7 m s.l.m.) comparto 1, come sopra paramento esterno.

5.4.1 Scenario con nucleo $K_s = 1E-8$ m/s

5.4.1.1. Condizione transitoria

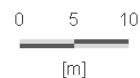


Pressure **Conductivity [max]**
- Zero Isoline - **- Patches -**
[kPa] [m/s]

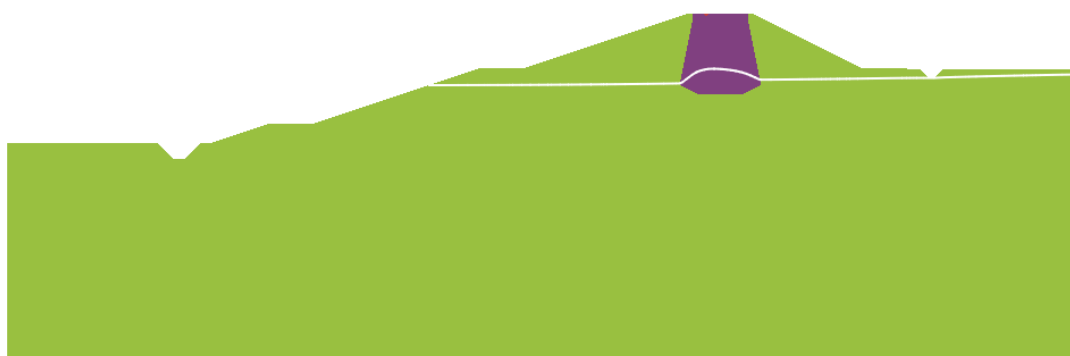
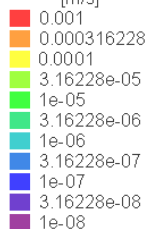


FEFLOW (R)

14 [h]

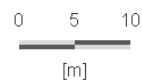


Pressure **Conductivity [max]**
- Zero Isoline - **- Patches -**
[kPa] [m/s]



FEFLOW (R)

30 [h]



Pressure - Zero Isoline - [kPa]
0

Conductivity [max] - Patches - [m/s]
0.001
0.000316228
0.0001
3.16228e-05
1e-05
3.16228e-06
1e-06
3.16228e-07
1e-07
3.16228e-08
1e-08



FEFLOW (R)

50 [h]

0 5 10
[m]

Pressure - Zero Isoline - [kPa]
0

Conductivity [max] - Patches - [m/s]
0.001
0.000316228
0.0001
3.16228e-05
1e-05
3.16228e-06
1e-06
3.16228e-07
1e-07
3.16228e-08
1e-08

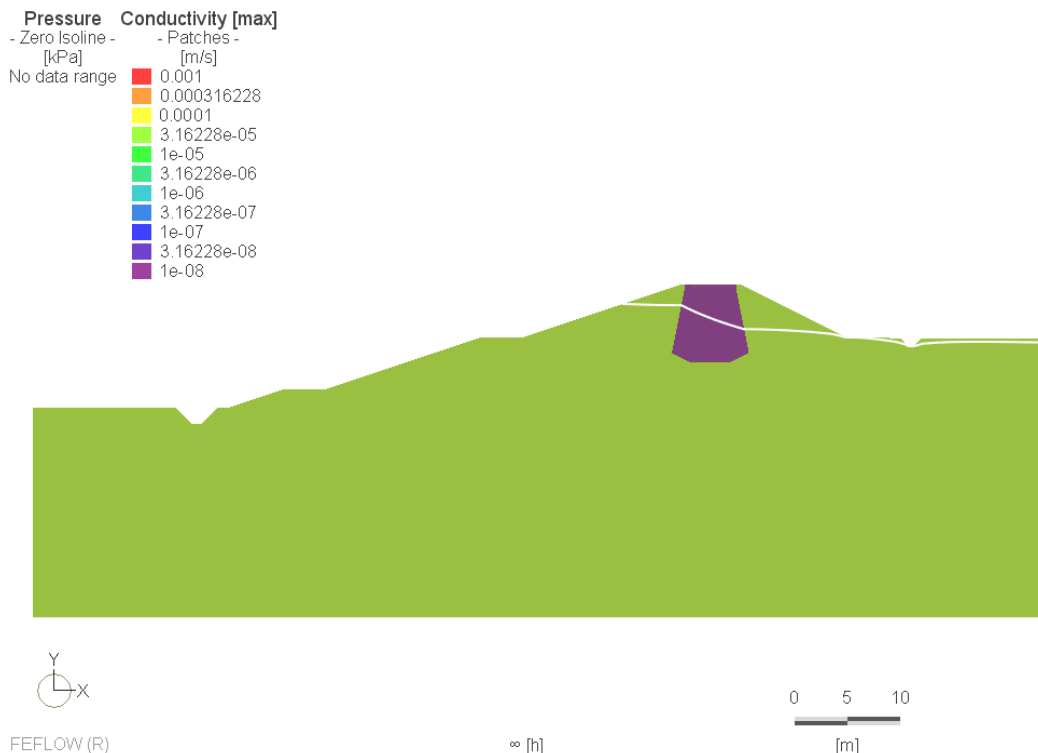


FEFLOW (R)

80 [h]

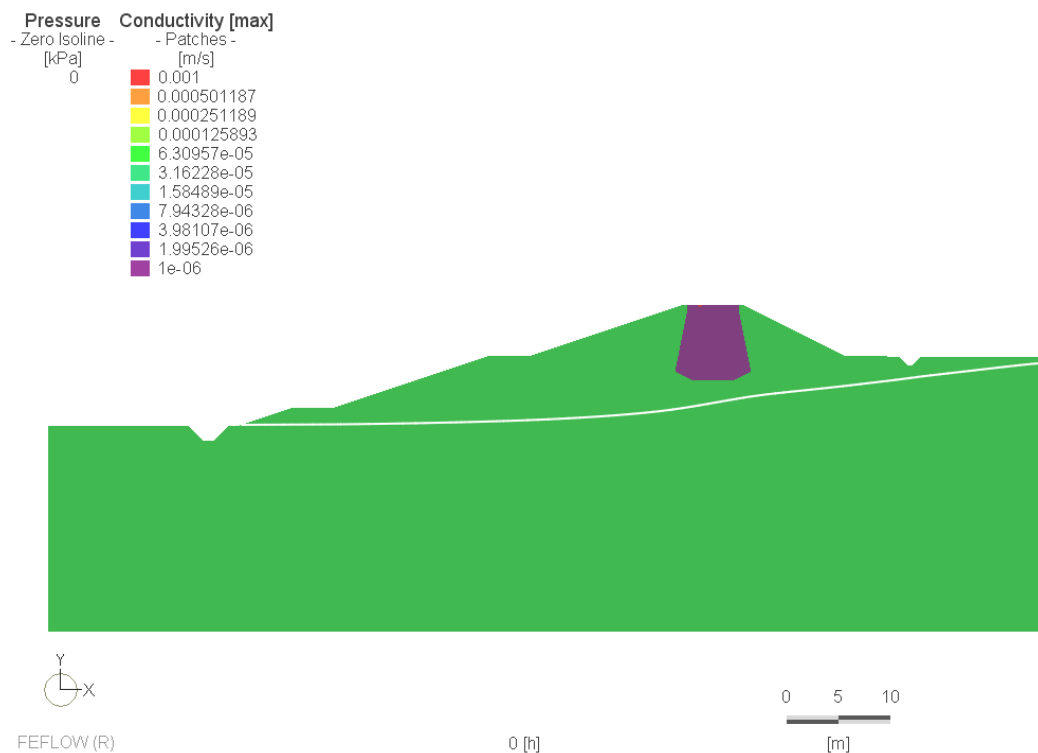
0 5 10
[m]

5.4.1.2. Condizione stazionaria (∞)



5.4.2 **Scenario con nucleo Ks = 1E-6 m/s**

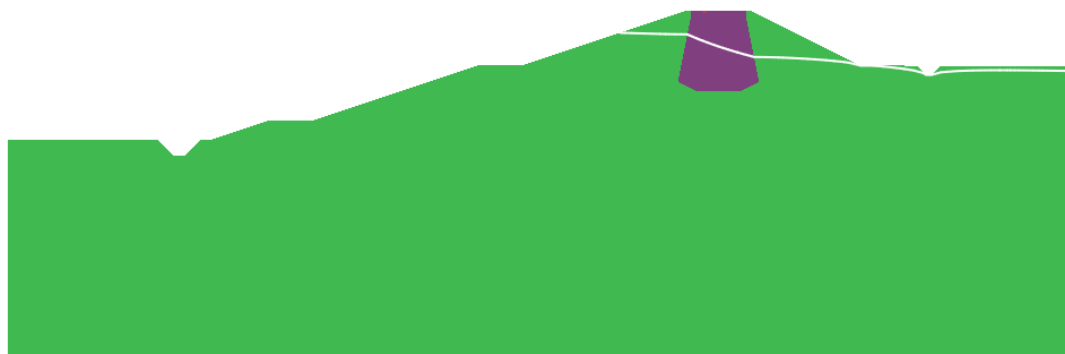
5.4.2.1. Condizione transitoria



Pressure - Zero Isolines - [kPa]
0

Conductivity [max] - Patches - [m/s]

- 0.001
- 0.000501187
- 0.000251189
- 0.000125893
- 6.30957e-05
- 3.16228e-05
- 1.58489e-05
- 7.94328e-06
- 3.98107e-06
- 1.99526e-06
- 1e-06



Y
X
FEFLOW (R)

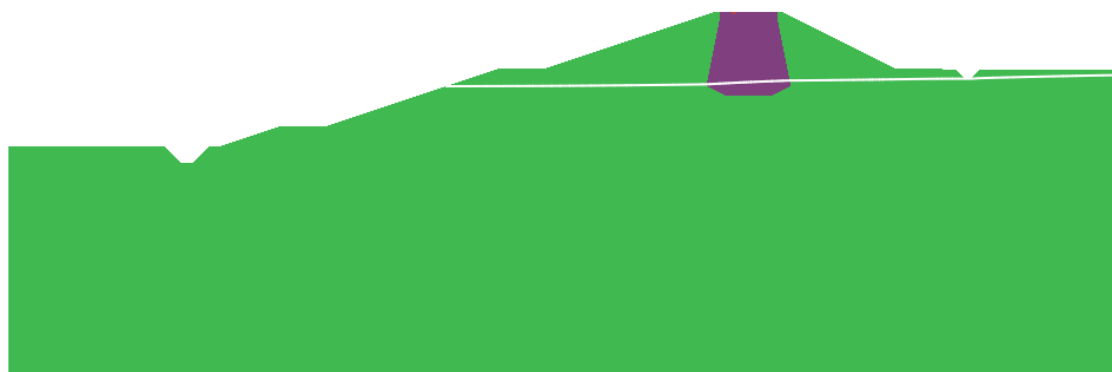
14 [h]

0 5 10
[m]

Pressure - Zero Isolines - [kPa]
0

Conductivity [max] - Patches - [m/s]

- 0.001
- 0.000501187
- 0.000251189
- 0.000125893
- 6.30957e-05
- 3.16228e-05
- 1.58489e-05
- 7.94328e-06
- 3.98107e-06
- 1.99526e-06
- 1e-06



Y
X
FEFLOW (R)

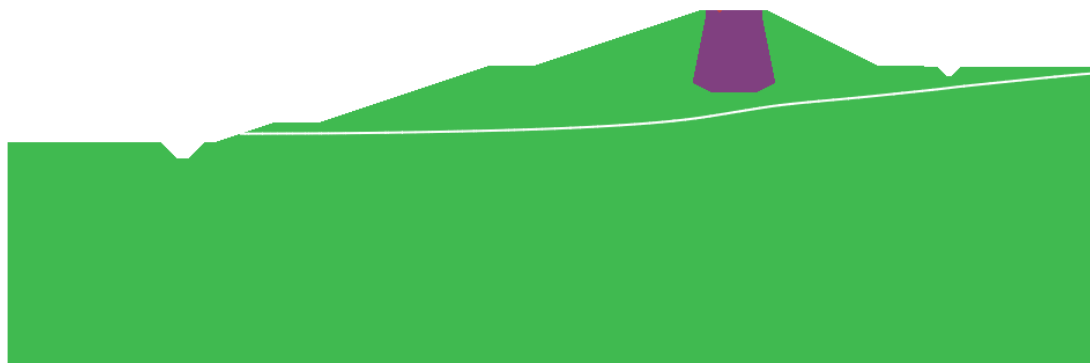
30 [h]

0 5 10
[m]

Pressure - Zero Isoline - [kPa]
0

Conductivity [max] - Patches - [m/s]

- 0.001
- 0.000501187
- 0.000251189
- 0.000125893
- 6.30957e-05
- 3.16228e-05
- 1.58489e-05
- 7.94328e-06
- 3.98107e-06
- 1.99526e-06
- 1e-06



FEFLOW (R)

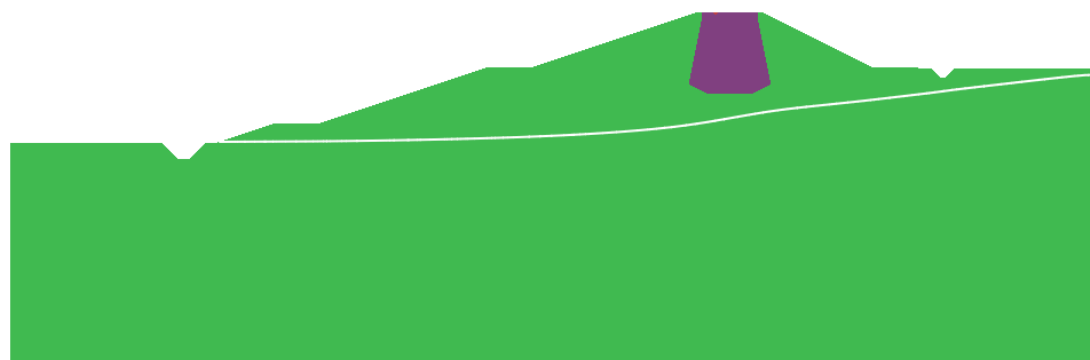
50 [h]

0 5 10
[m]

Pressure - Zero Isoline - [kPa]
0

Conductivity [max] - Patches - [m/s]

- 0.001
- 0.000501187
- 0.000251189
- 0.000125893
- 6.30957e-05
- 3.16228e-05
- 1.58489e-05
- 7.94328e-06
- 3.98107e-06
- 1.99526e-06
- 1e-06

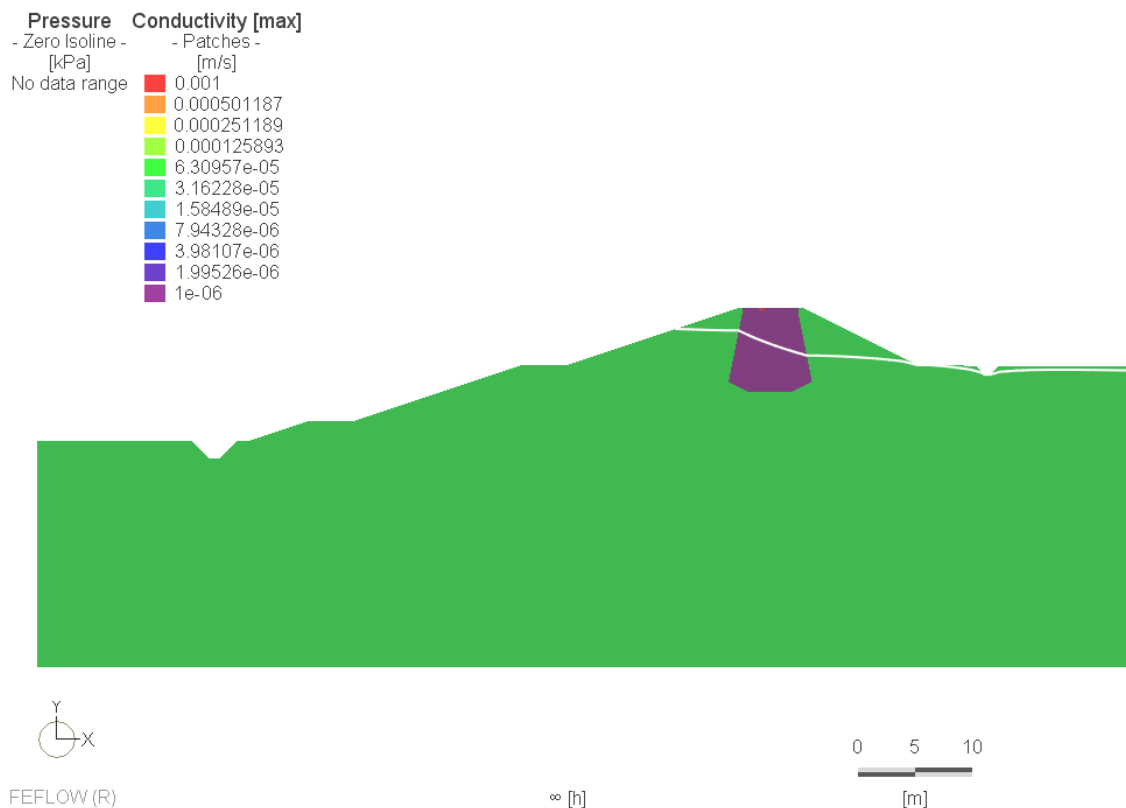


FEFLOW (R)

80 [h]

0 5 10
[m]

5.4.2.2. Condizione stazionaria (∞)



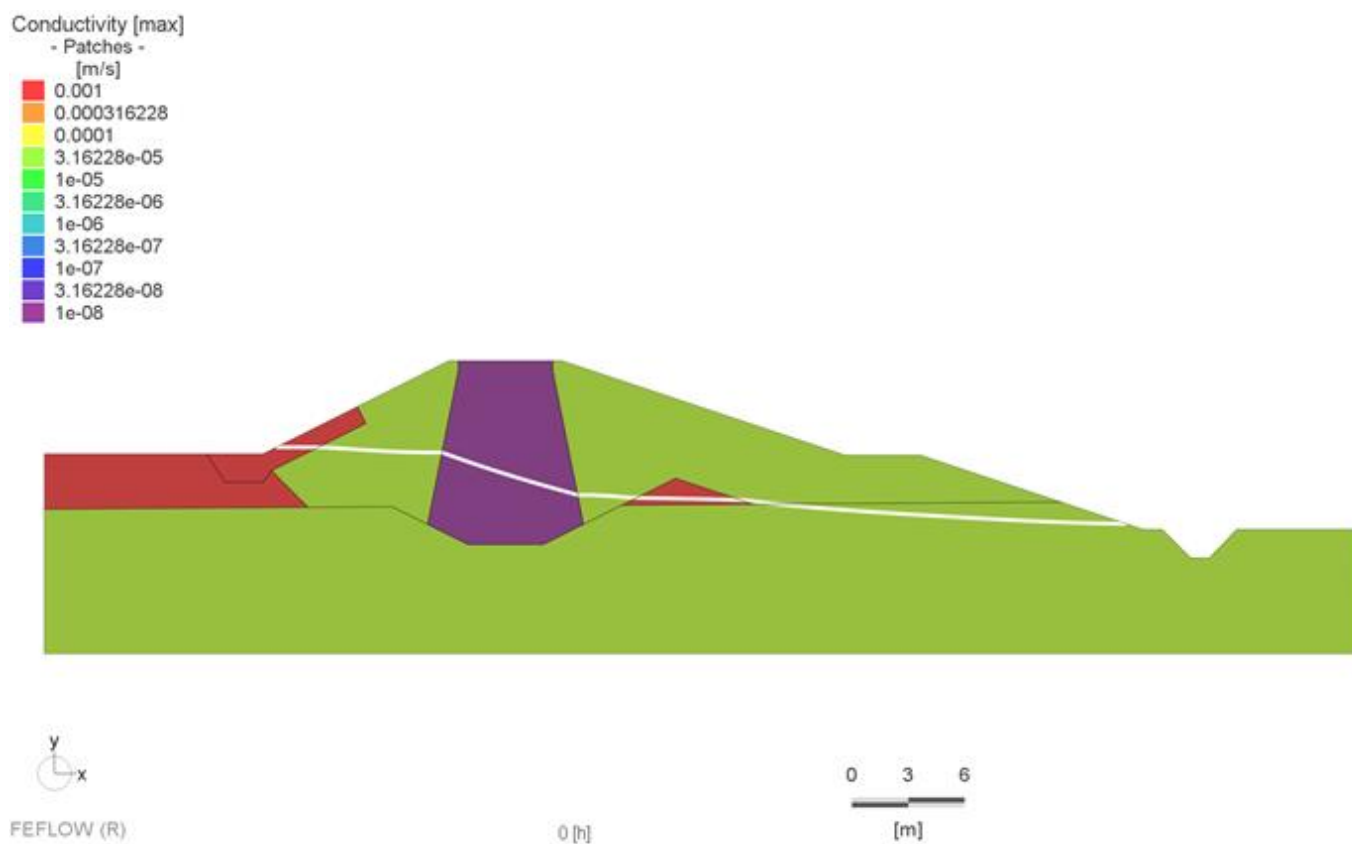
5.5 SEZIONE 5

“Condizione critica” di riferimento:

- transitorio: idrogramma Tr1000 anni comparto 1 (paramento in dx), contestuale idrogramma di progetto Tr1000 Baganza paramento esterno (sx in figura);
- stazionario: quota piezometrica a fondo vasca / canaletta interna comparto 1, quota idrometrica di riferimento in alveo Baganza corrispondente al tempo t_0 dell'evento di piena, da modello idraulico.

5.5.1 Scenario con nucleo $K_s = 1E-8$ m/s

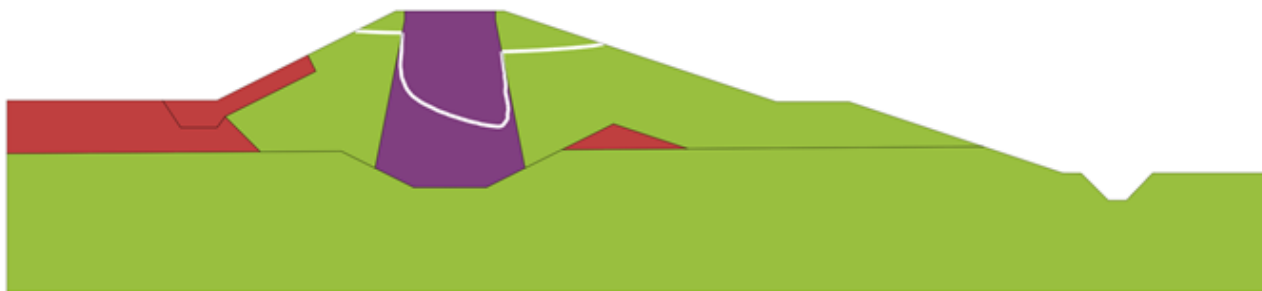
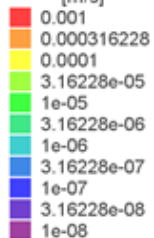
5.5.1.1. Condizione transitoria



Conductivity [max]

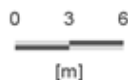
- Patches -

[m/s]



FEFLOW (R)

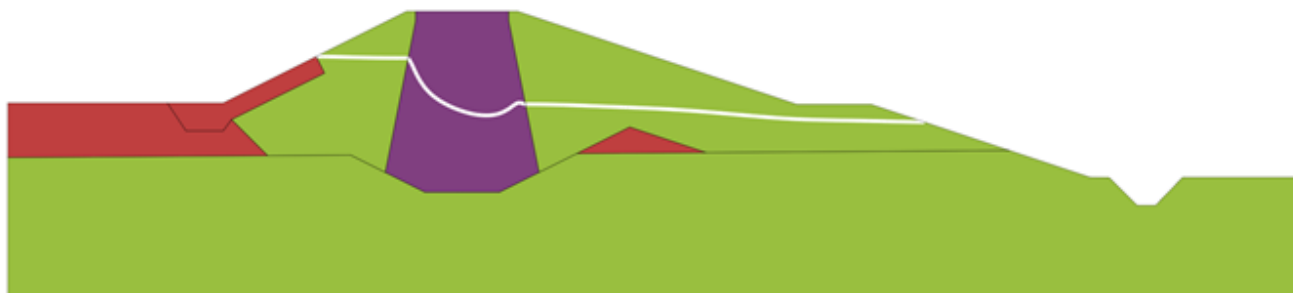
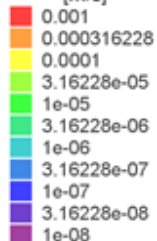
14 [h]



Conductivity [max]

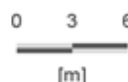
- Patches -

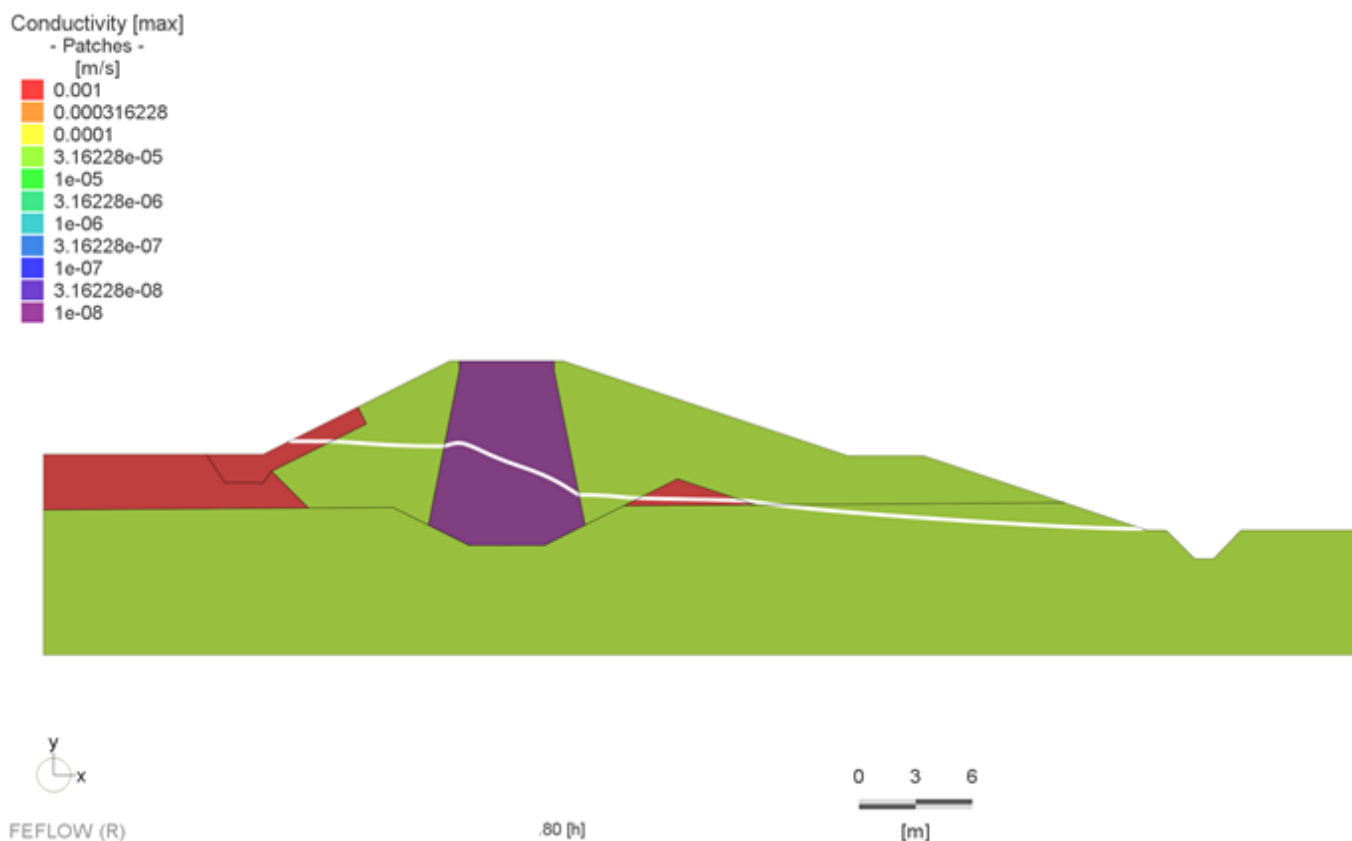
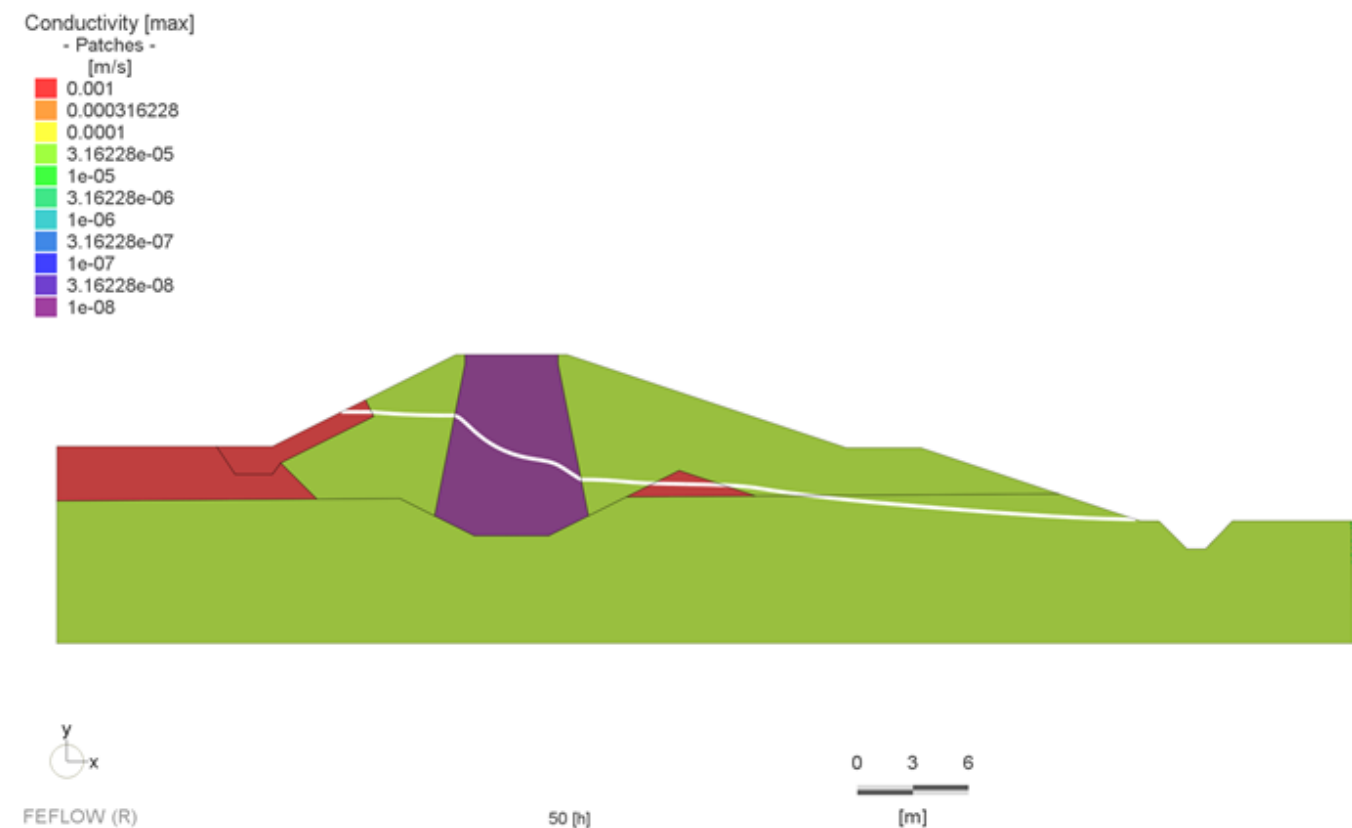
[m/s]



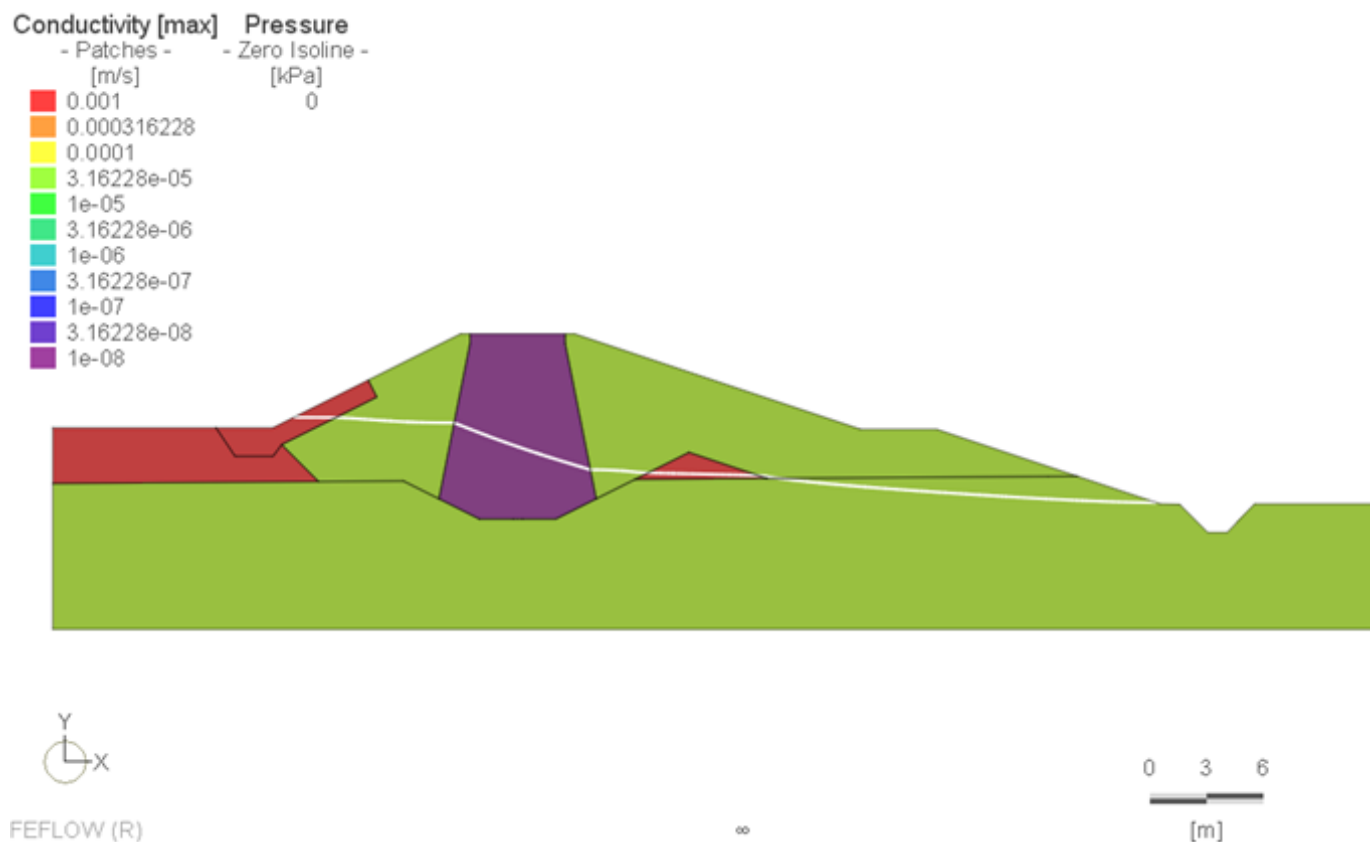
FEFLOW (R)

30 [h]





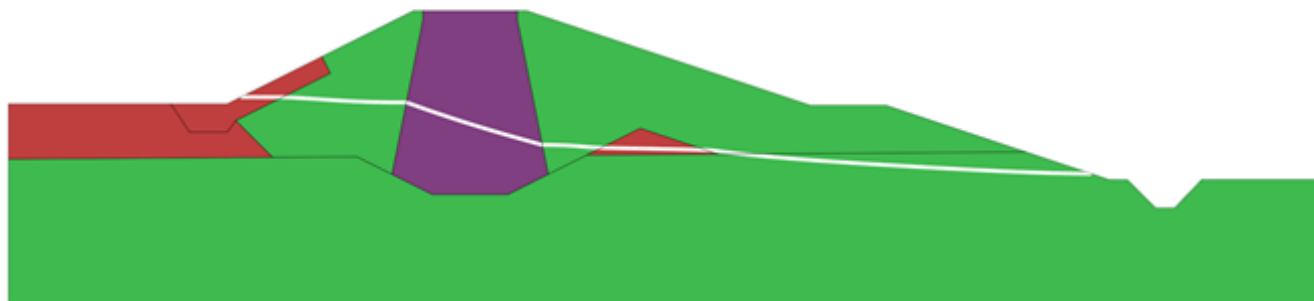
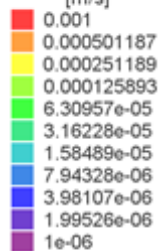
5.5.1.2. Condizione stazionaria (∞)



5.5.2 Scenario con nucleo $K_s = 1E-6$ m/s

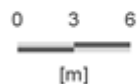
5.5.2.1. Condizione transitoria

Conductivity [max]
- Patches -
[m/s]

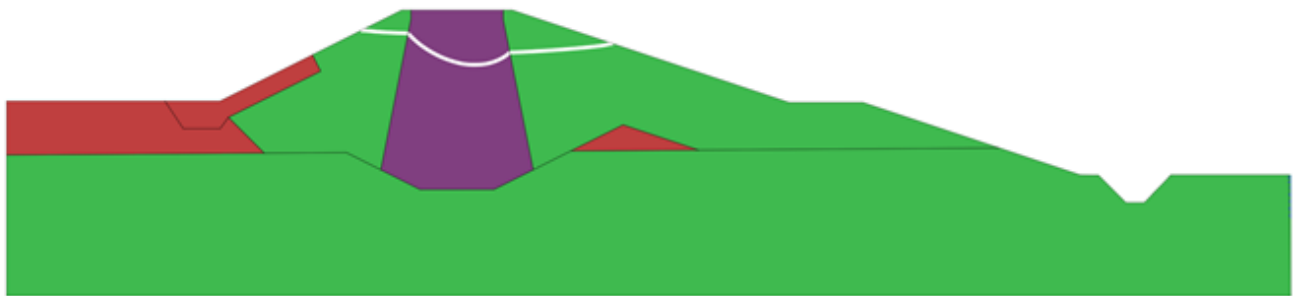
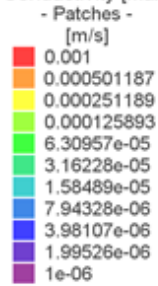


FEFLOW (R)

0 [h]

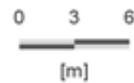


Conductivity [max]

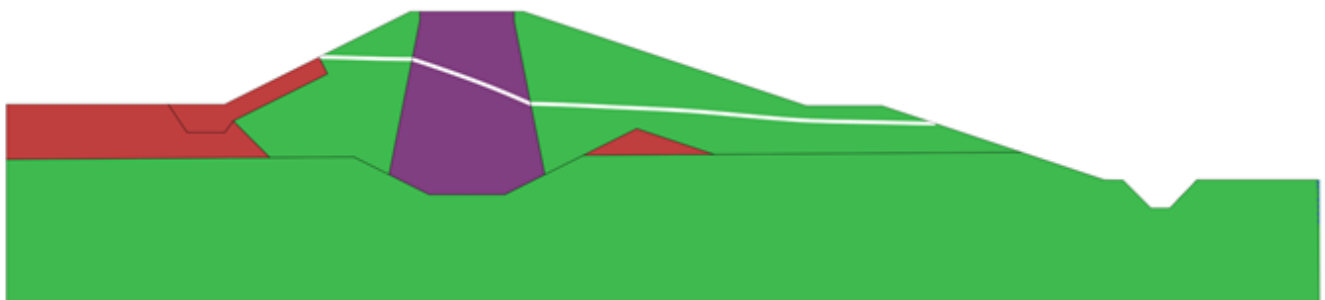
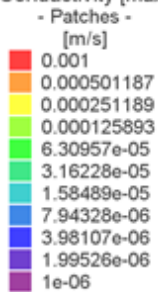


FEFLOW (R)

14 [h]

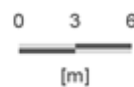


Conductivity [max]



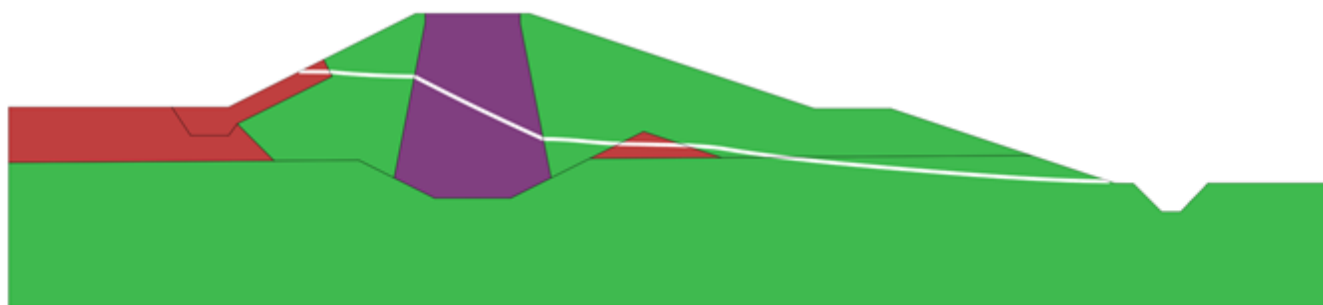
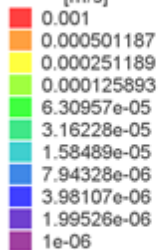
FEFLOW (R)

30 [h]



Conductivity [max]

- Patches -
[m/s]



FEFLOW (R)

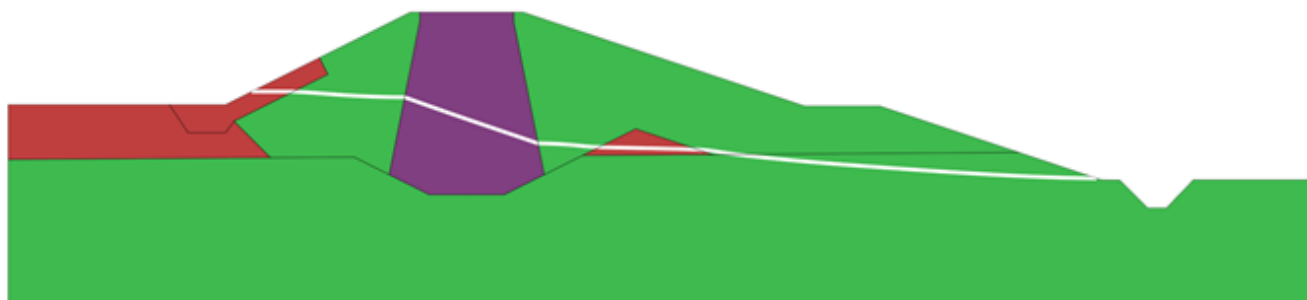
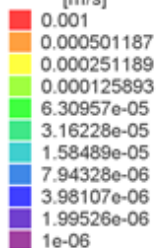
50 [h]

0 3 6

[m]

Conductivity [max]

- Patches -
[m/s]



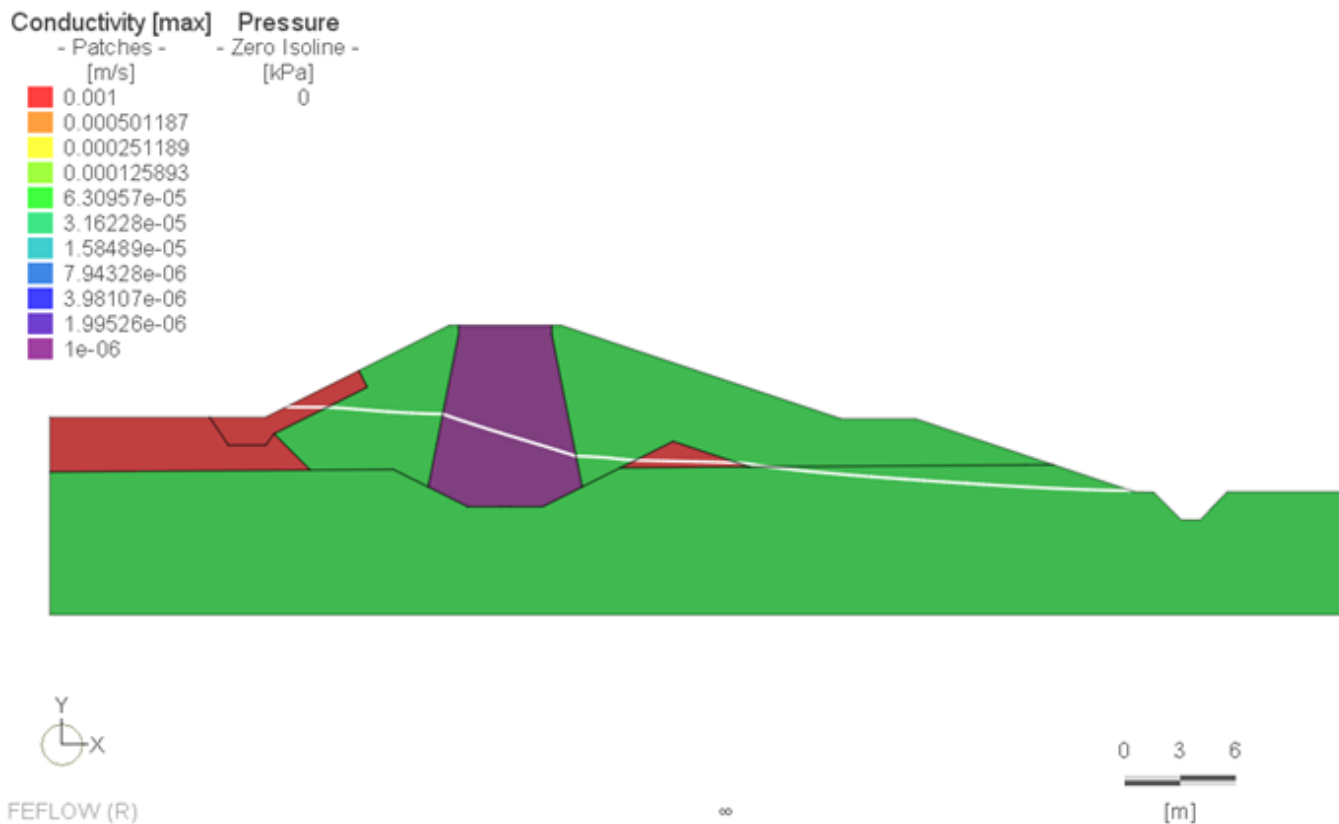
FEFLOW (R)

80 [h]

0 3 6

[m]

5.5.2.2. Condizione stazionaria (∞)



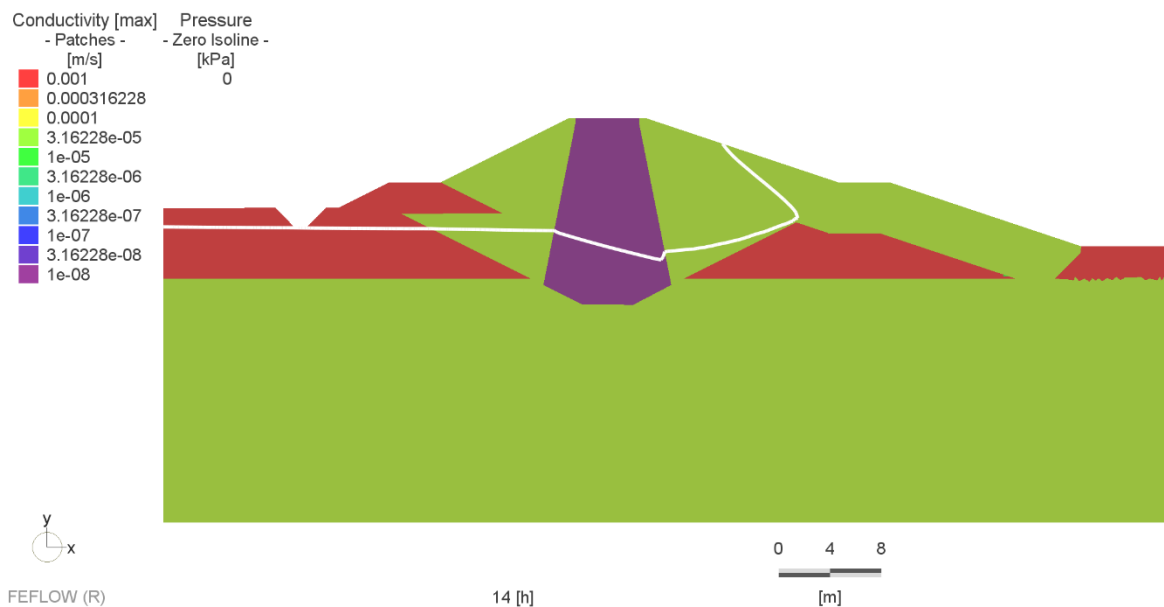
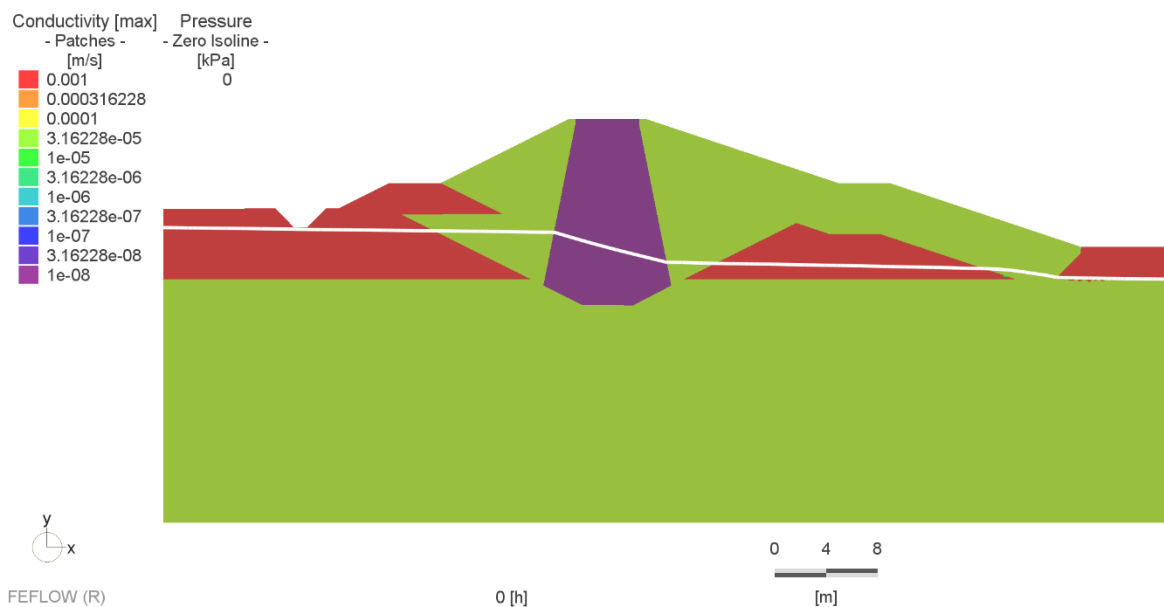
5.6 SEZIONE 6

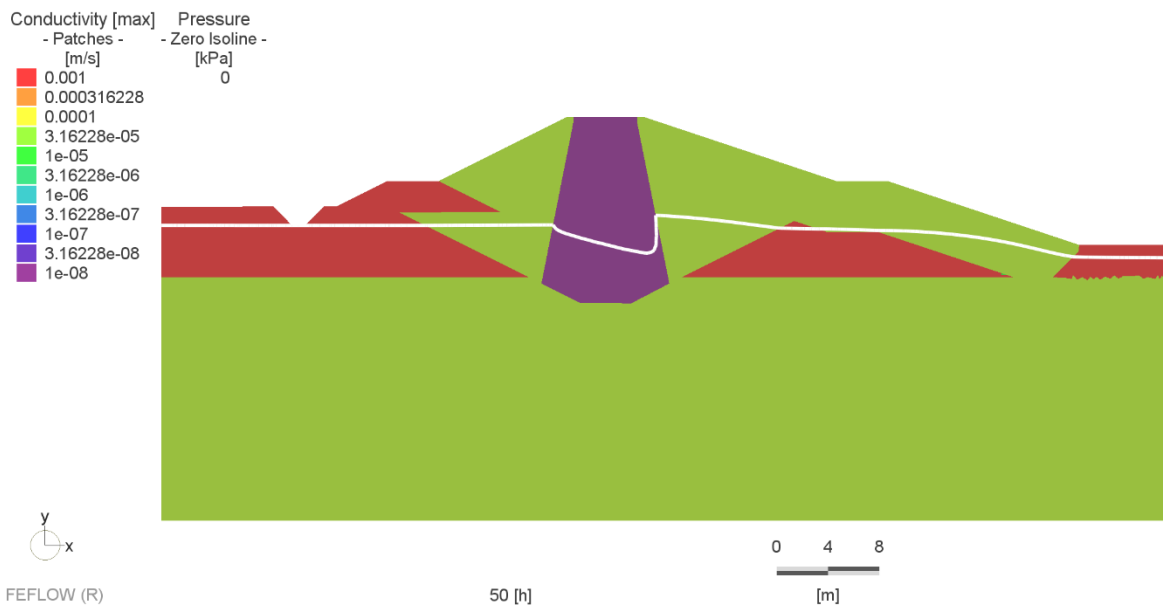
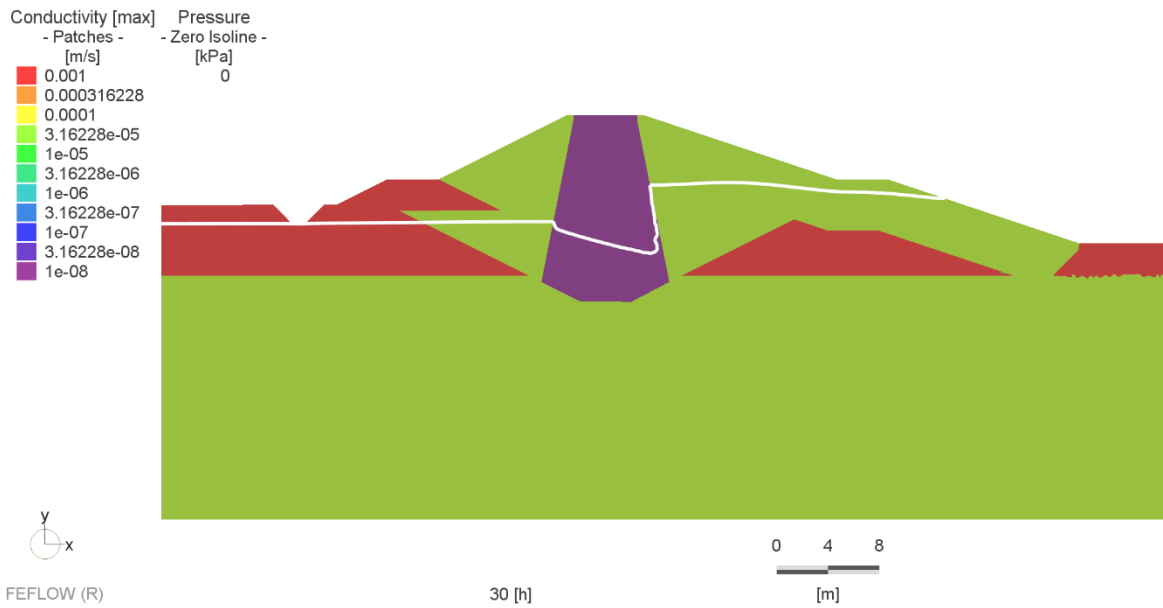
“Condizione critica” di riferimento:

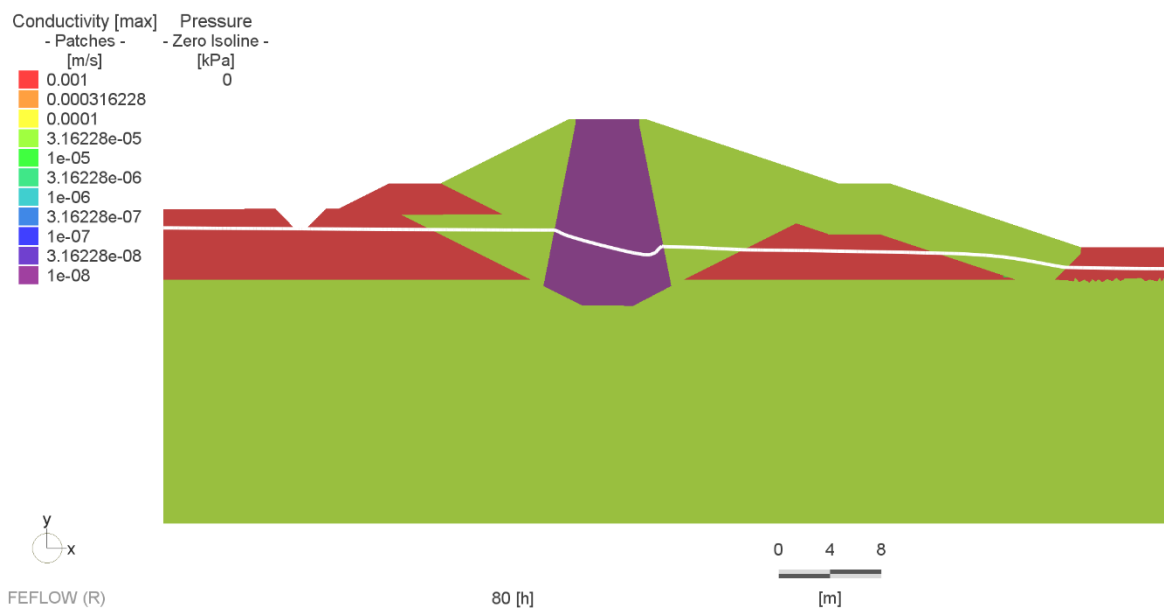
- transitorio: idrogramma Tr1000 anni comparto 1 (paramento in dx), contestuale idrogramma di progetto Tr1000 Baganza paramento esterno (sx in figura);
- stazionario: quota piezometrica a fondo vasca / canaletta interna comparto 1, quota idrometrica di riferimento in alveo Baganza corrispondente al tempo t_0 dell'evento di piena, da modello idraulico.

5.6.1 Scenario con nucleo $K_s = 1E-8$ m/s

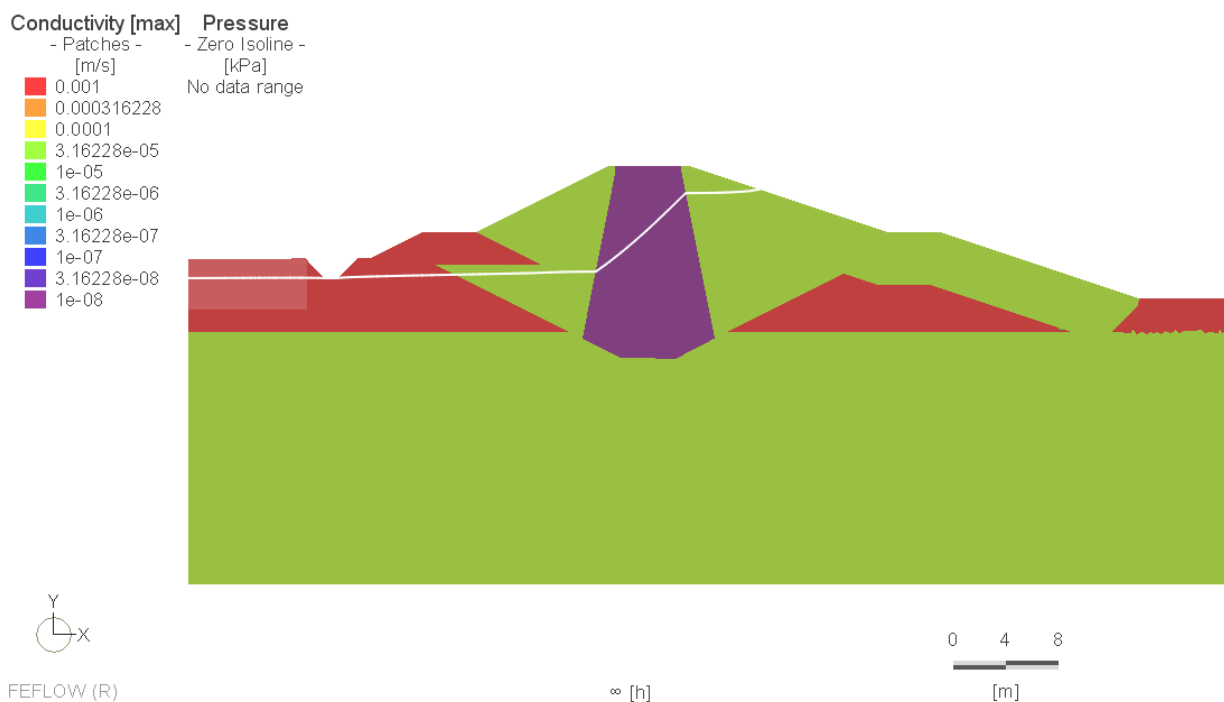
5.6.1.1. Condizione transitoria





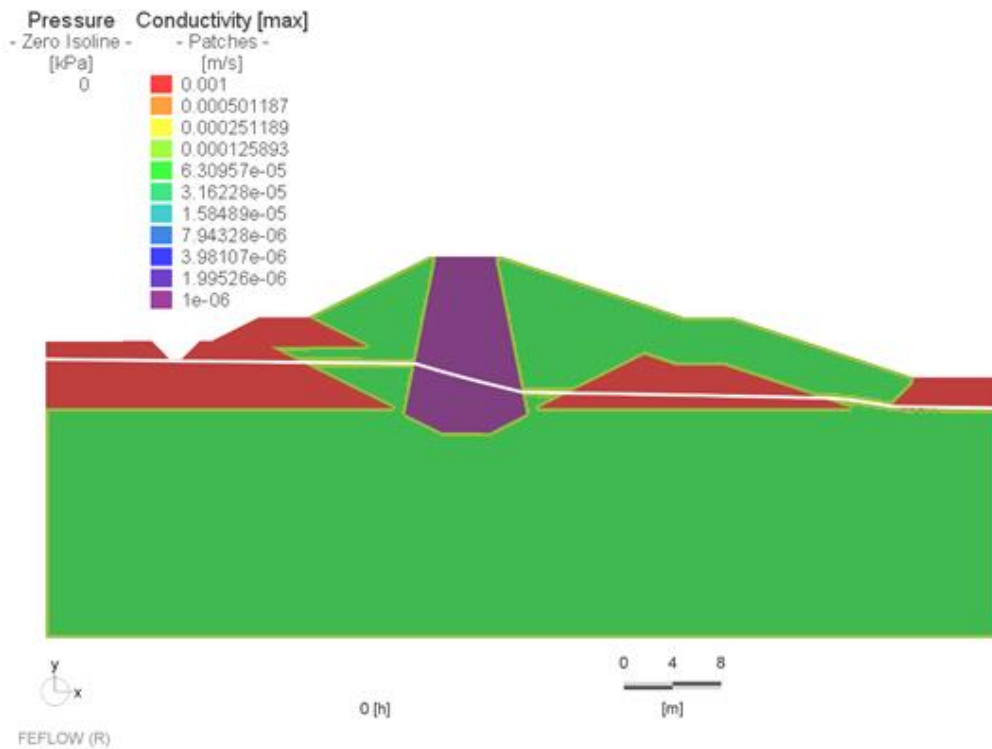


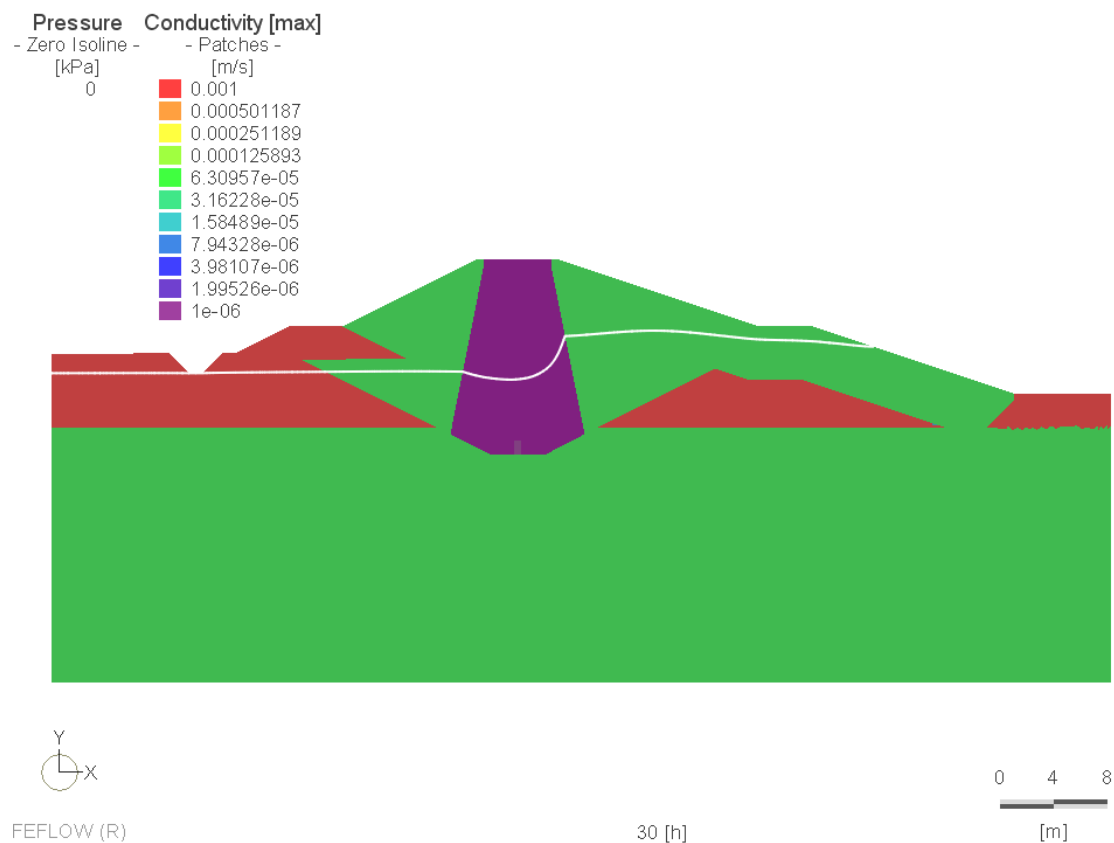
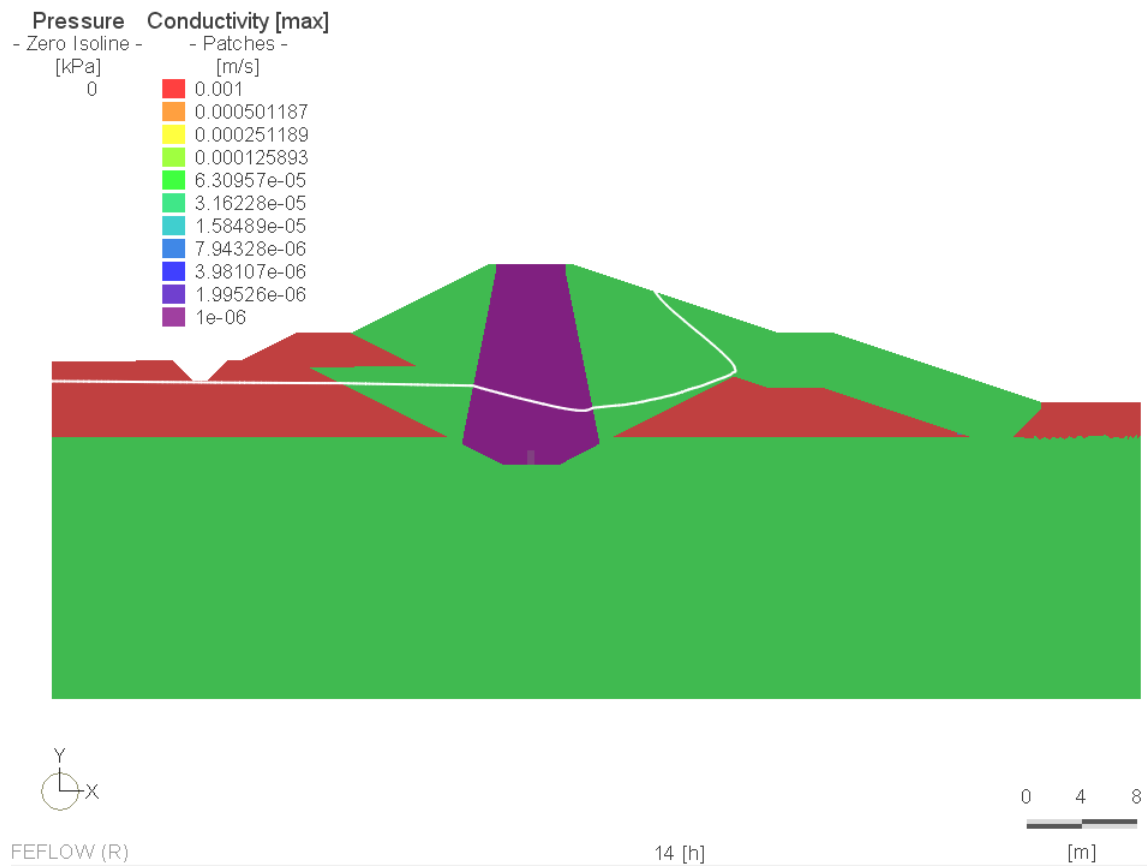
5.6.1.2. Condizione stazionaria

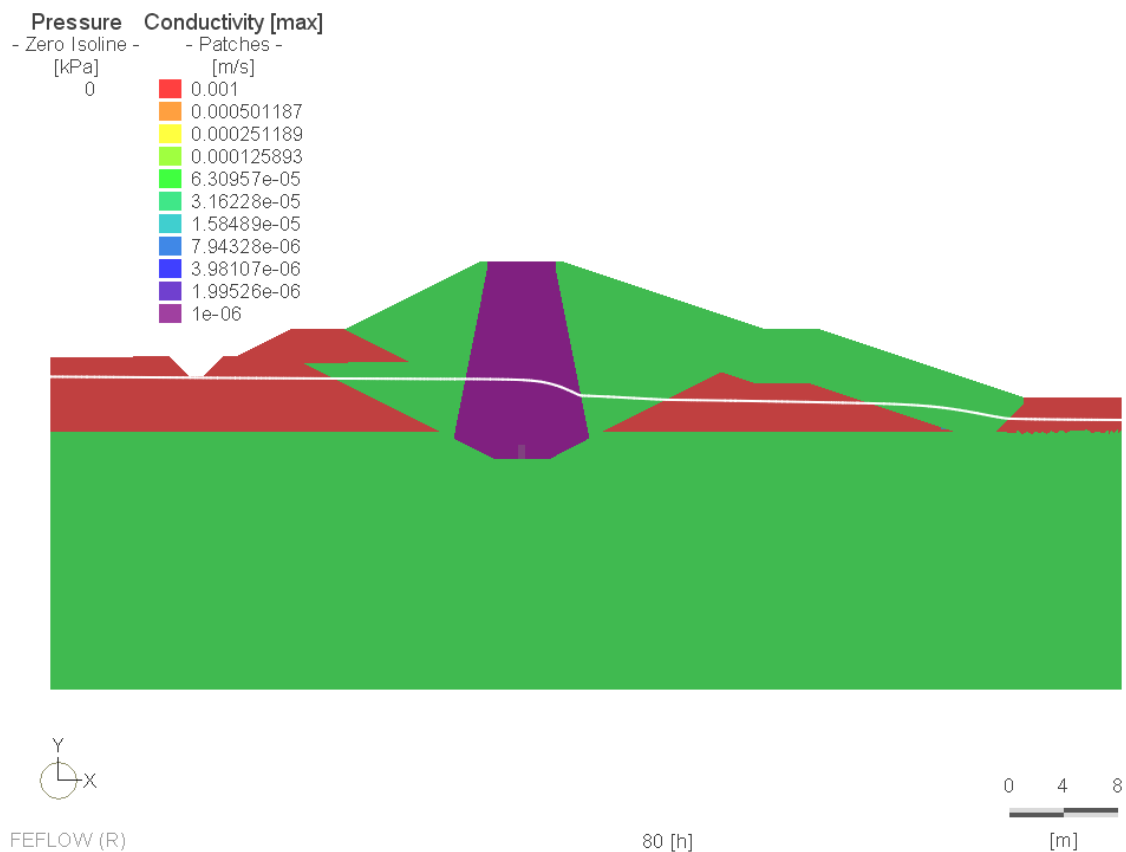
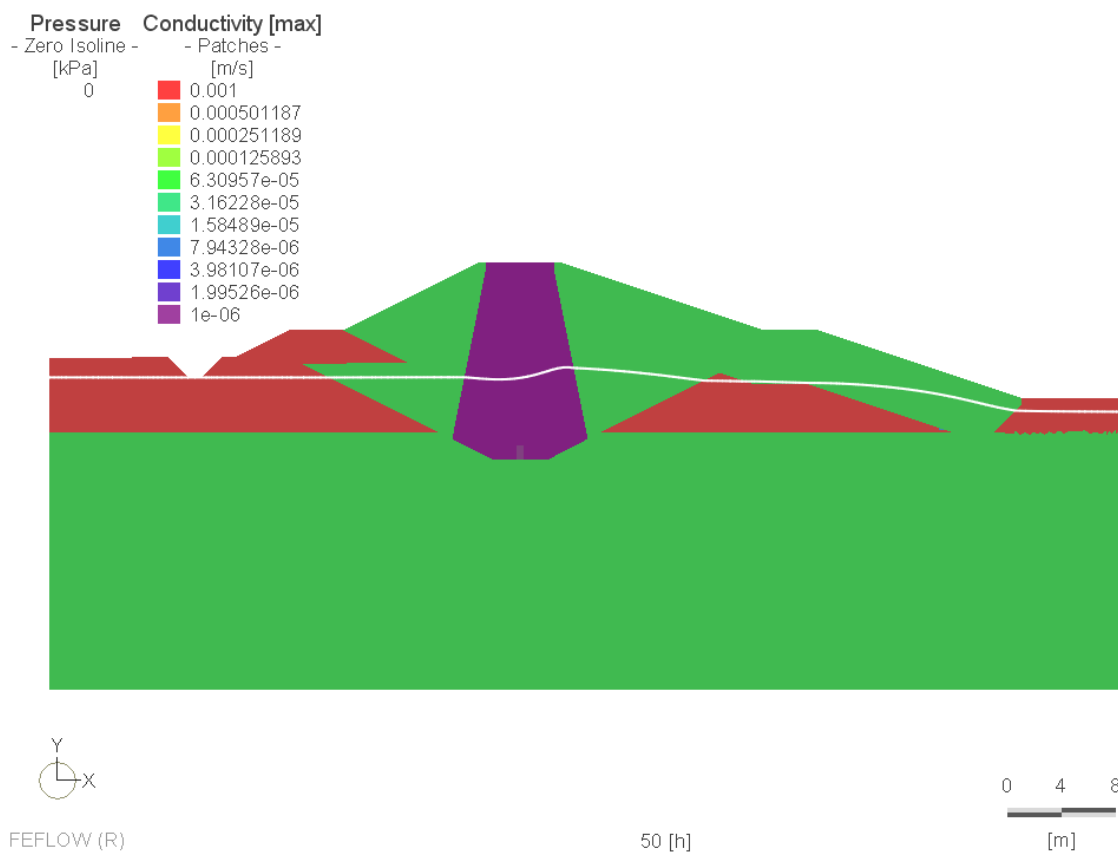


5.6.2 Scenario con nucleo $K_s = 1E-6$ m/s

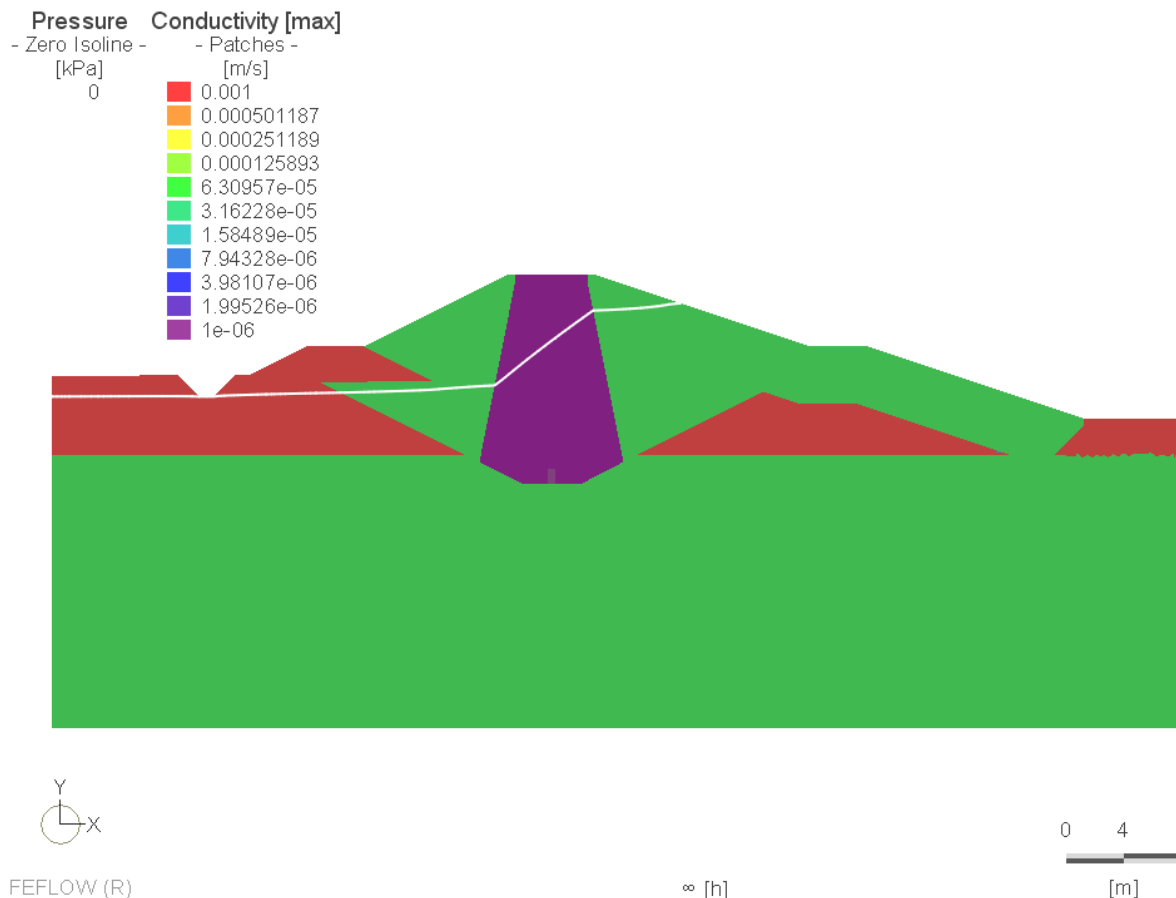
5.6.2.1. Condizione transitoria







5.6.2.2. Condizione stazionaria



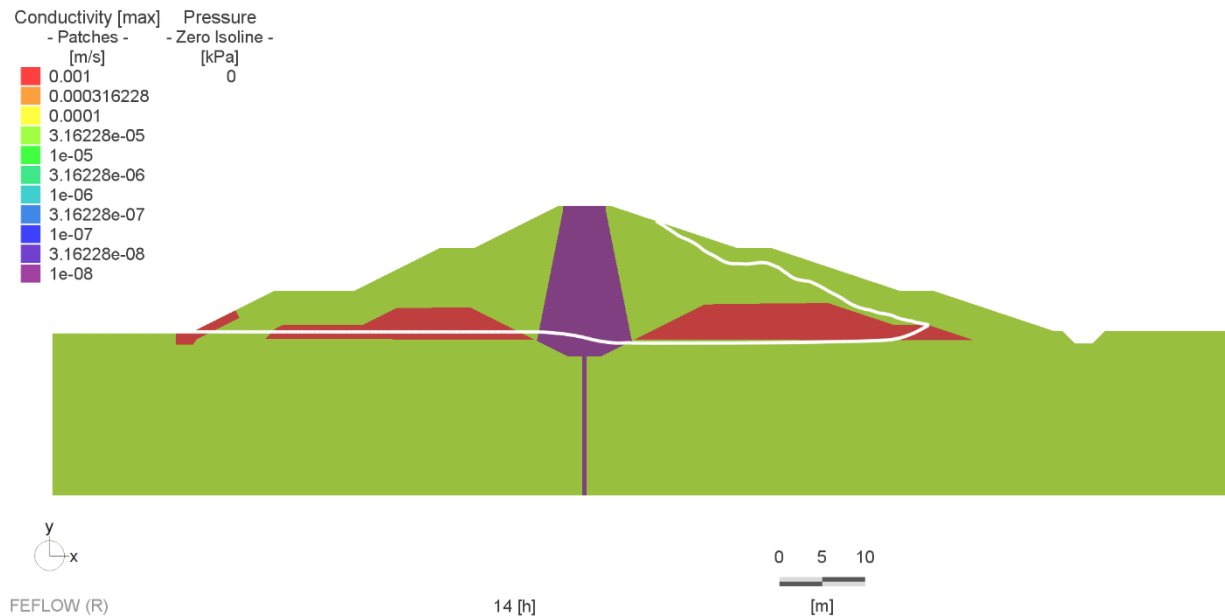
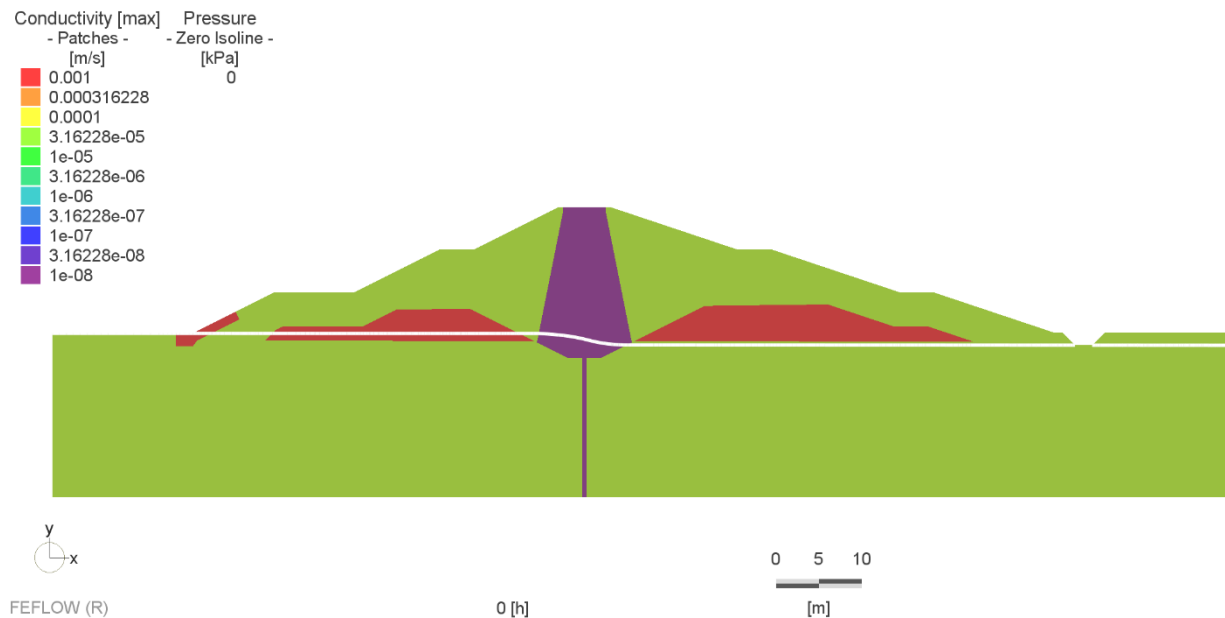
5.7 SEZIONE 7

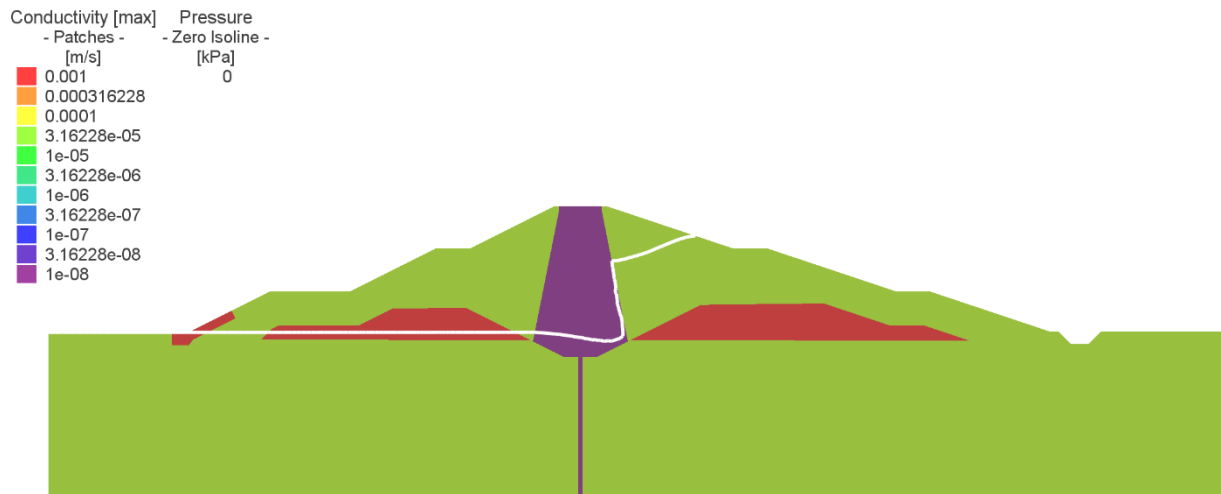
“Condizione critica” di riferimento:

- transitorio: idrogramma Tr1000 anni comparto 2 (paramento in dx), seepage face (free outflow) paramento esterno (sx in figura), con quota piezometrica iniziale corrispondente al fondo alveo.
- stazionario: quota idrometrica massima (143.7 m s.l.m.) comparto 2, come sopra paramento esterno.

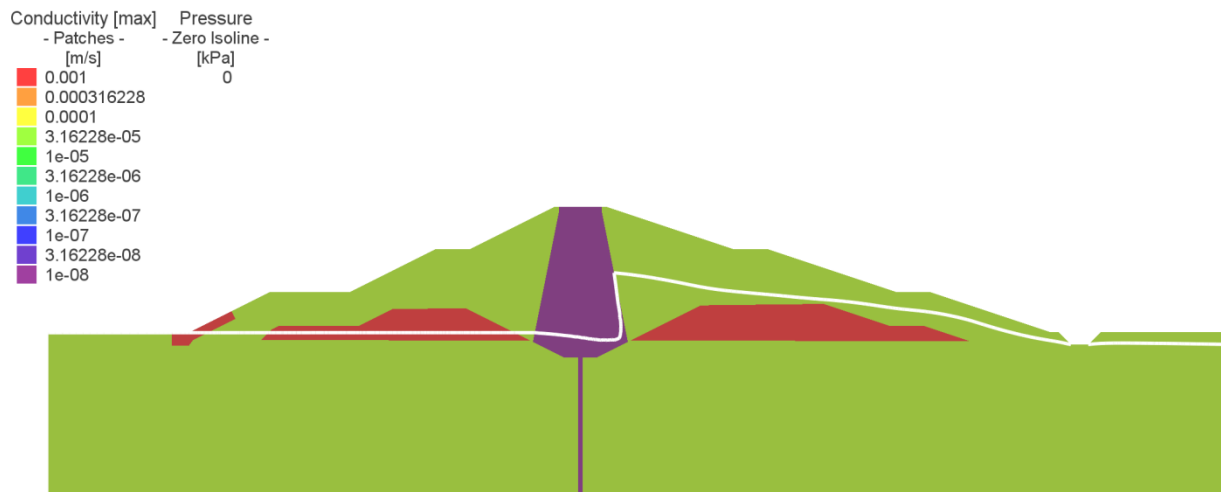
5.7.1 Scenario con nucleo $K_s = 1E-8$ m/s

5.7.1.1. Condizione transitoria

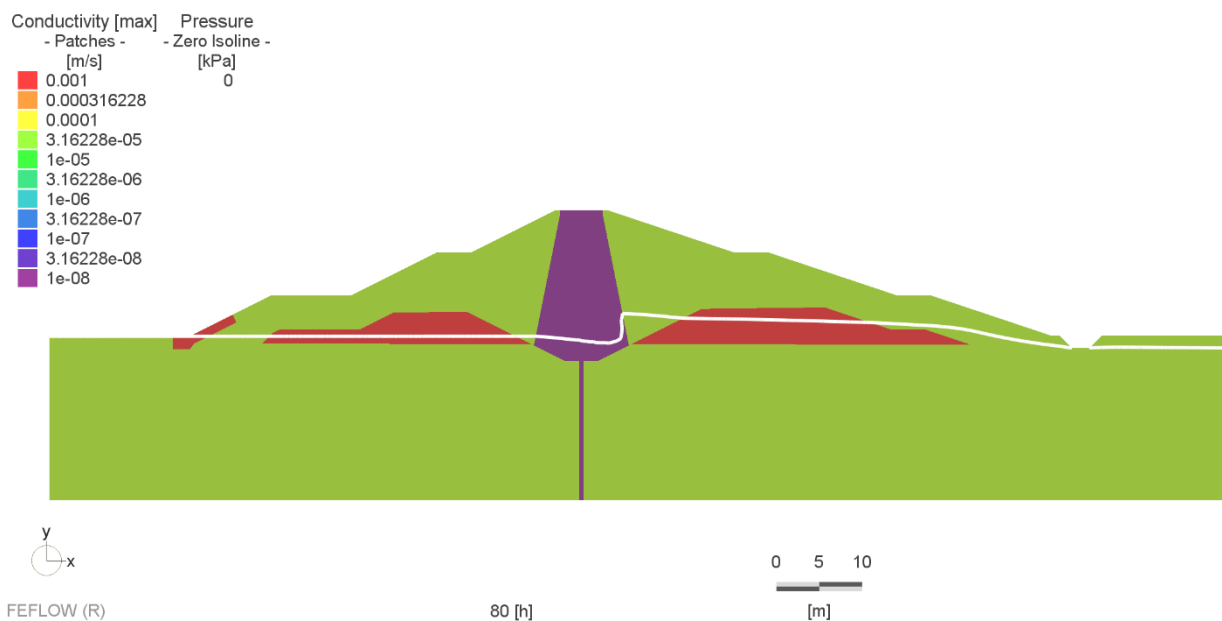




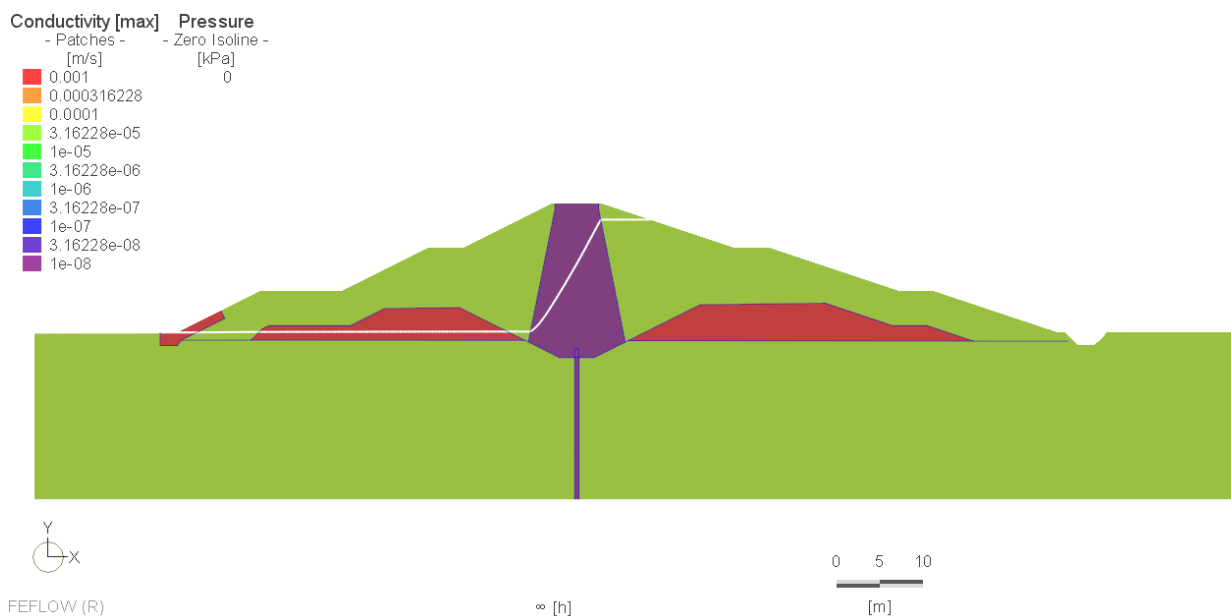
FEFLOW (R) 30 [h] 0 5 10 [m]



FEFLOW (R) 50 [h] 0 5 10 [m]

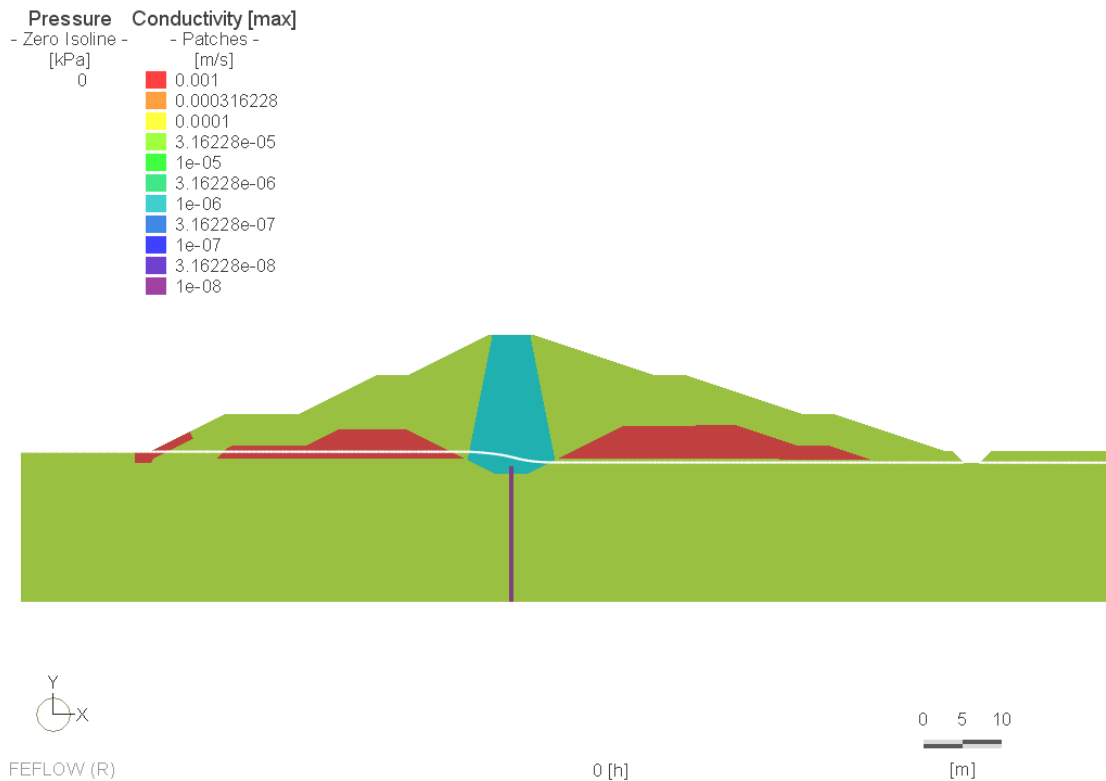


5.7.1.2. Condizione stazionaria



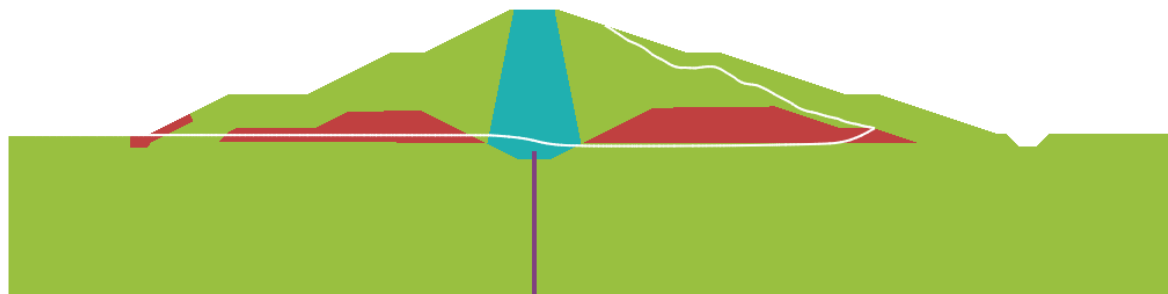
5.7.2 Scenario con nucleo $K_s = 1E-6$ m/s

5.7.2.1. Condizione transitoria



Pressure **Conductivity [max]**
- Zero Isoline - **- Patches -**
[kPa] [m/s]
0

0.001
0.000316228
0.0001
3.16228e-05
1e-05
3.16228e-06
1e-06
3.16228e-07
1e-07
3.16228e-08
1e-08



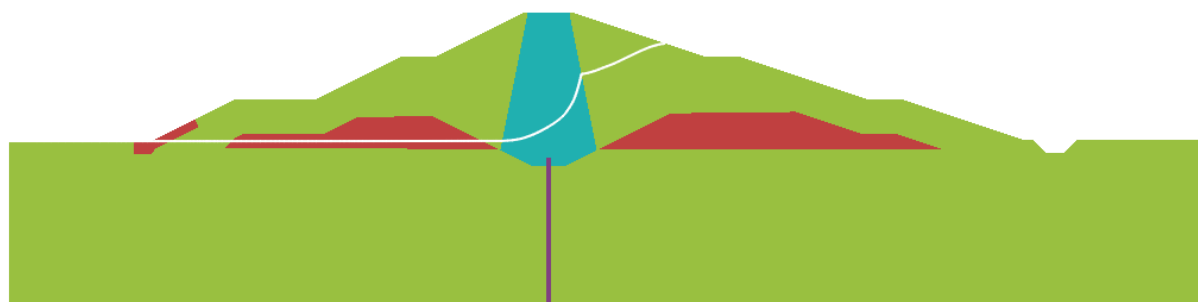
FEFLOW (R)

14 [h]

0 5 10
[m]

Pressure **Conductivity [max]**
- Zero Isoline - **- Patches -**
[kPa] [m/s]
0

0.001
0.000316228
0.0001
3.16228e-05
1e-05
3.16228e-06
1e-06
3.16228e-07
1e-07
3.16228e-08
1e-08



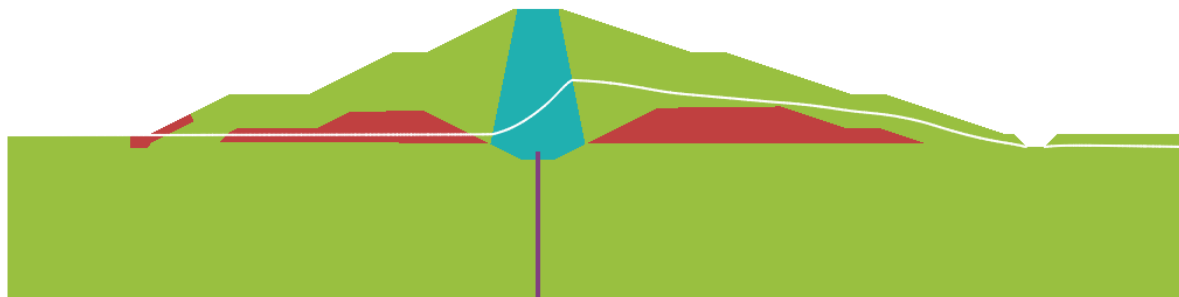
FEFLOW (R)

30 [h]

0 5 10
[m]

Pressure - Zero Isoline - [kPa]
0

Conductivity [max] - Patches - [m/s]
0.001
0.000316228
0.0001
3.16228e-05
1e-05
3.16228e-06
1e-06
3.16228e-07
1e-07
3.16228e-08
1e-08



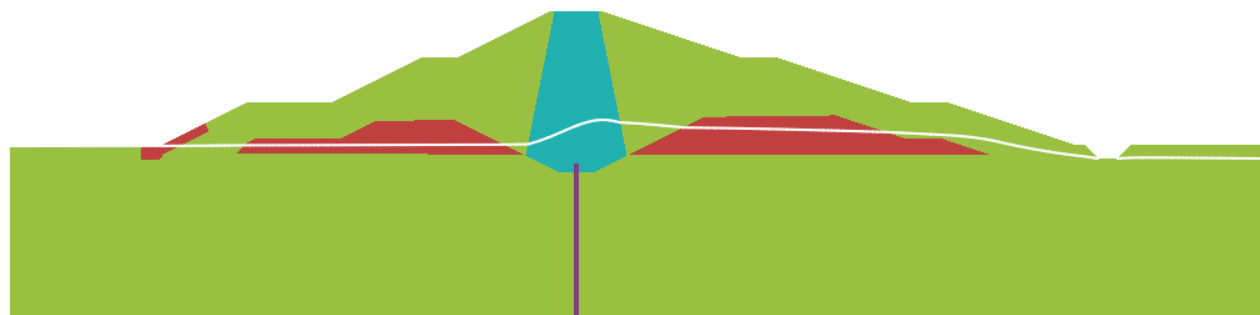
FEFLOW (R)

50 [h]

0 5 10
[m]

Pressure - Zero Isoline - [kPa]
0

Conductivity [max] - Patches - [m/s]
0.001
0.000316228
0.0001
3.16228e-05
1e-05
3.16228e-06
1e-06
3.16228e-07
1e-07
3.16228e-08
1e-08

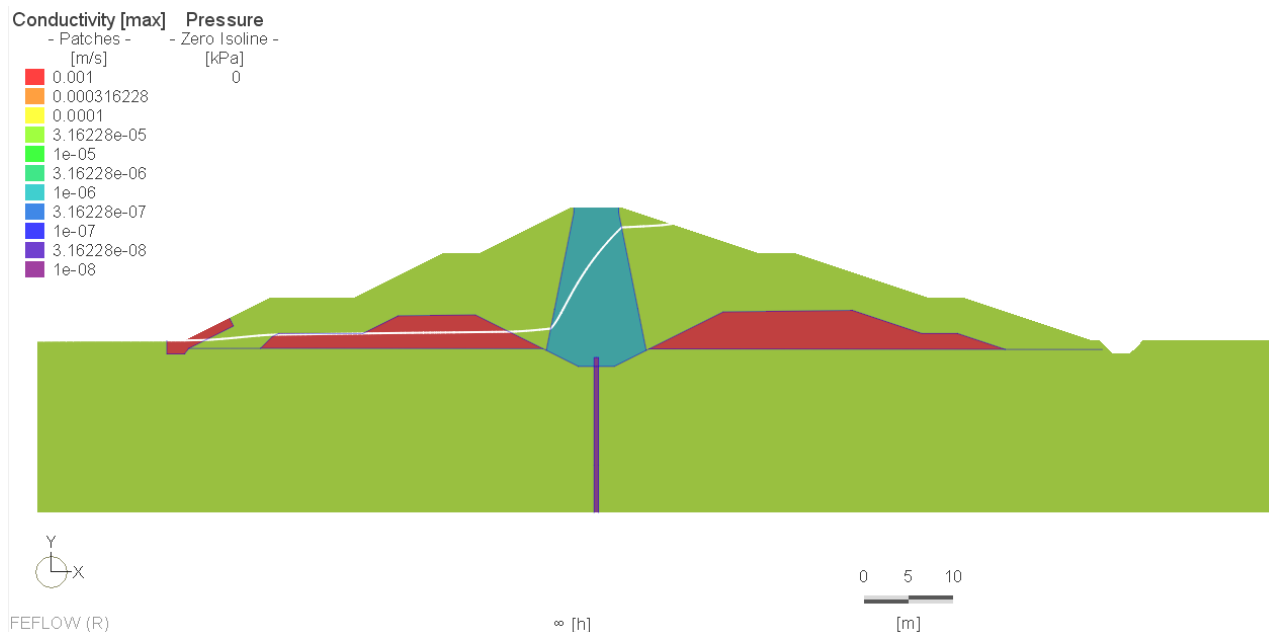


FEFLOW (R)

80 [h]

0 5 10
[m]

5.7.2.2. Condizione stazionaria



5.8 MANUFATTI IN C.A. (“A”, “B”, “C”)

Le verifiche di filtrazione, in regime transitorio, hanno riguardato i terreni di fondazione dei manufatti A, B e C, con la finalità di determinare l'andamento delle pressioni neutre nelle condizioni di massima cautelatività, corrispondente ai seguenti scenari critici:

- Opera “A”: Idrogramma piena in alveo Tr1000 anni monte opera (Figura 2-c), falda a fondo alveo a valle opera;
- Opera “B”: Idrogramma vasca comparto 1, Tr1000 anni monte opera (Figura 2-a), falda a fondo comparto 2 (vasca vuota) a valle opera;
- Opera “C”: Idrogramma vasca comparto 2, Tr1000 anni monte opera (Figura 2-b), falda a fondo canale di scarico (canale vuoto) a valle opera.

Le medesime simulazioni sono state effettuate in regime stazionario nella condizione di picco idrometrico.

Nei successivi paragrafi sono riportati i risultati delle simulazioni in termini di isolinee di pressione.

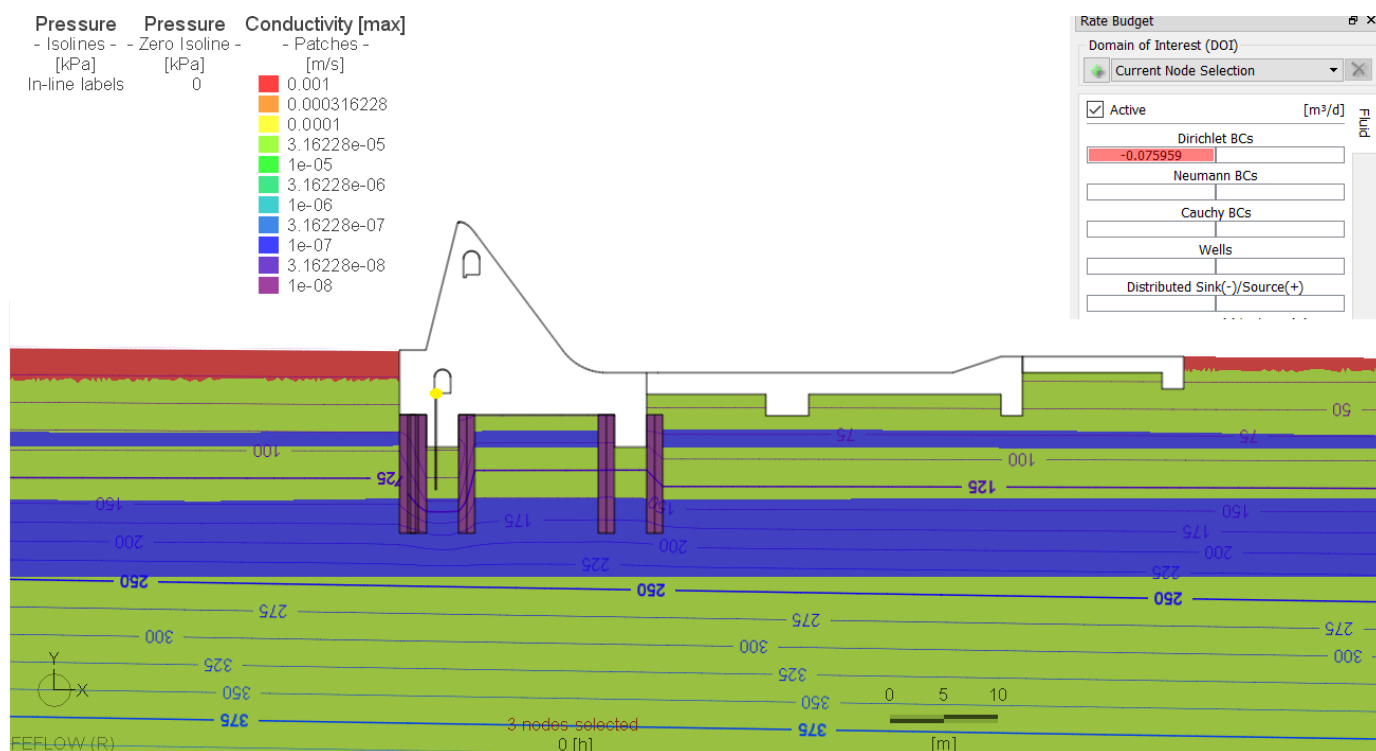
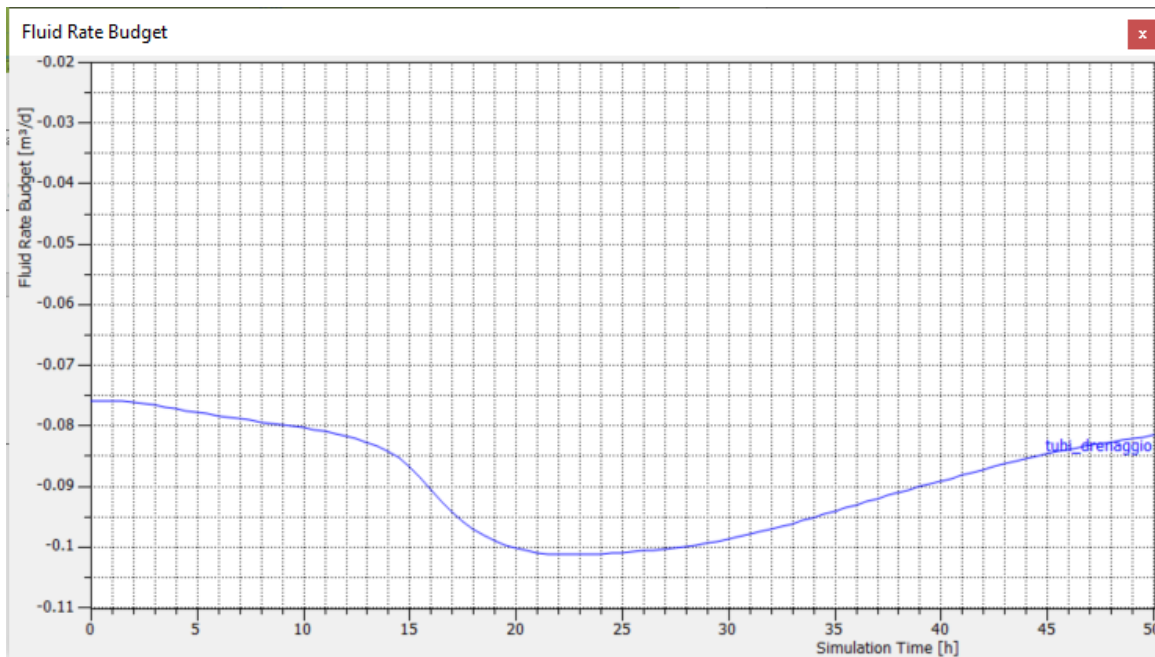
Dai risultati delle simulazioni si evidenzia, a fronte dell'incremento delle pressioni a monte conseguente all'evento idrometrico di riferimento, il mantenimento di un campo di pressioni pressochè costante a valle dei diaframmi in jet-grouting, immorsati nei livelli limoso-argillosi a bassa conducibilità idraulica ($K=10^{-7}$ m/s).

Si osserva a riguardo che non riscontrando in alcuna fase sovrappressioni a valle dei diaframmi in jet-grouting, le verifiche al sifonamento sono da considerarsi intrinsecamente soddisfatte.

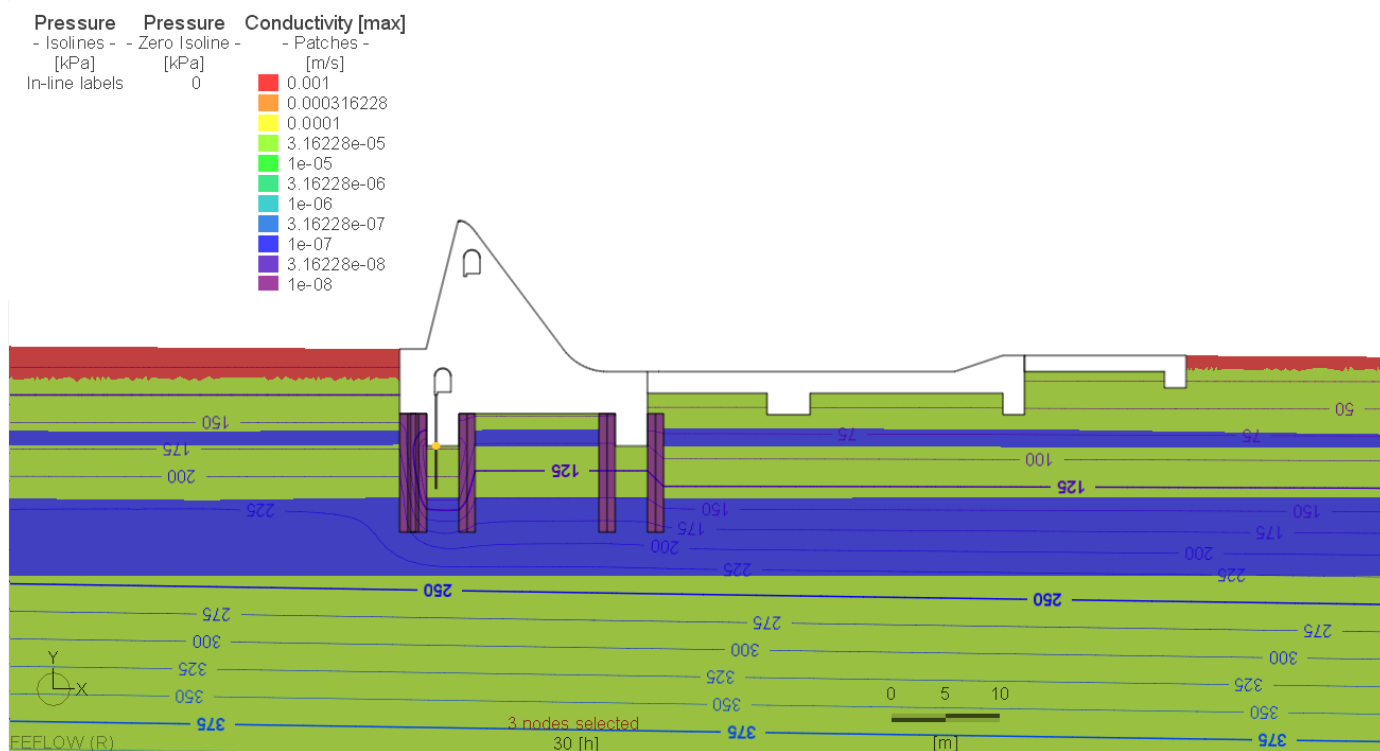
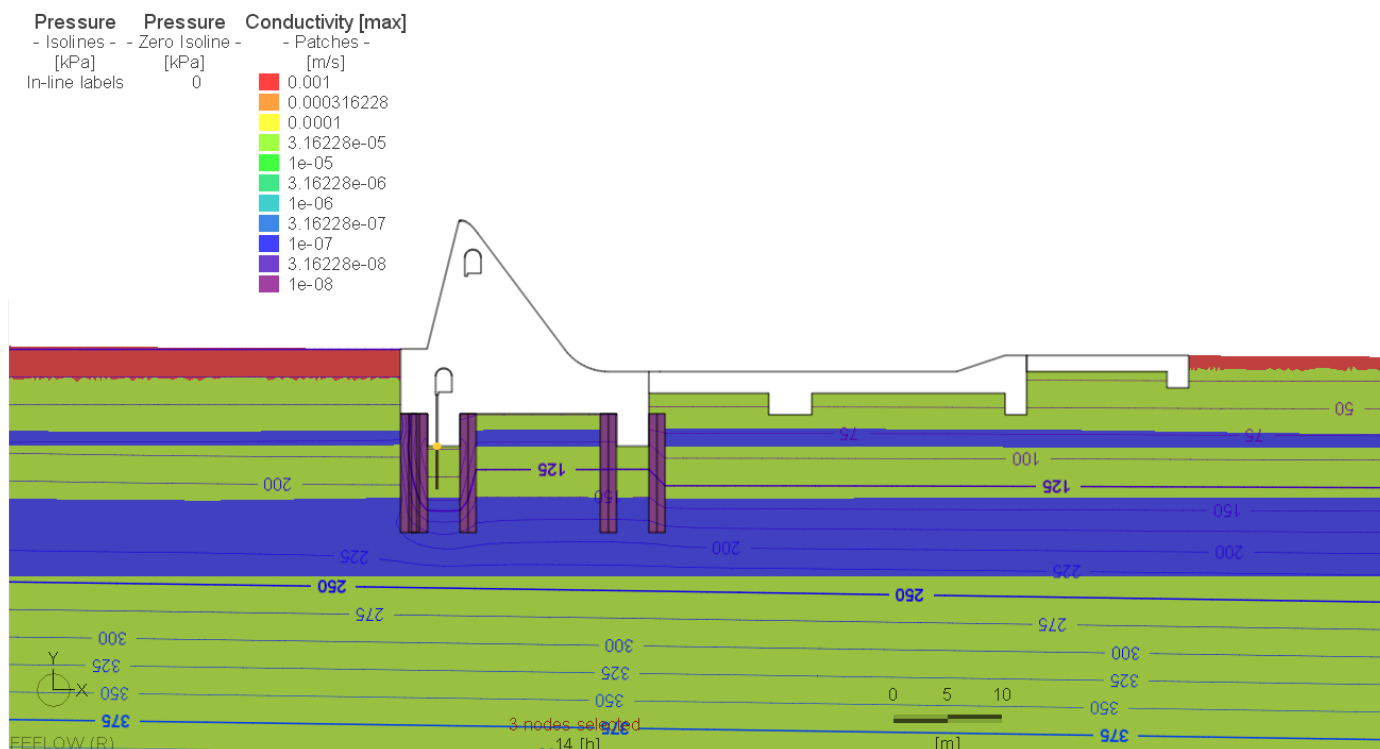
5.8.1 Manufatto A

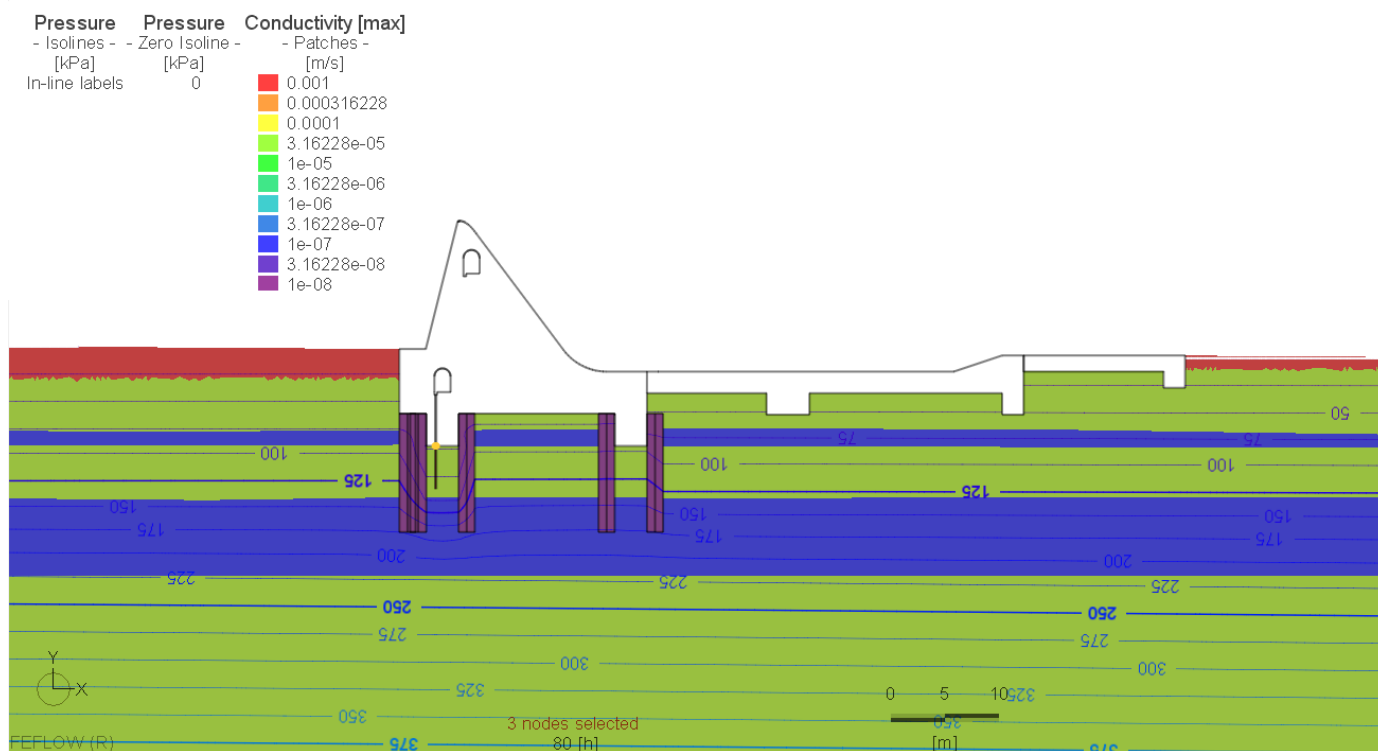
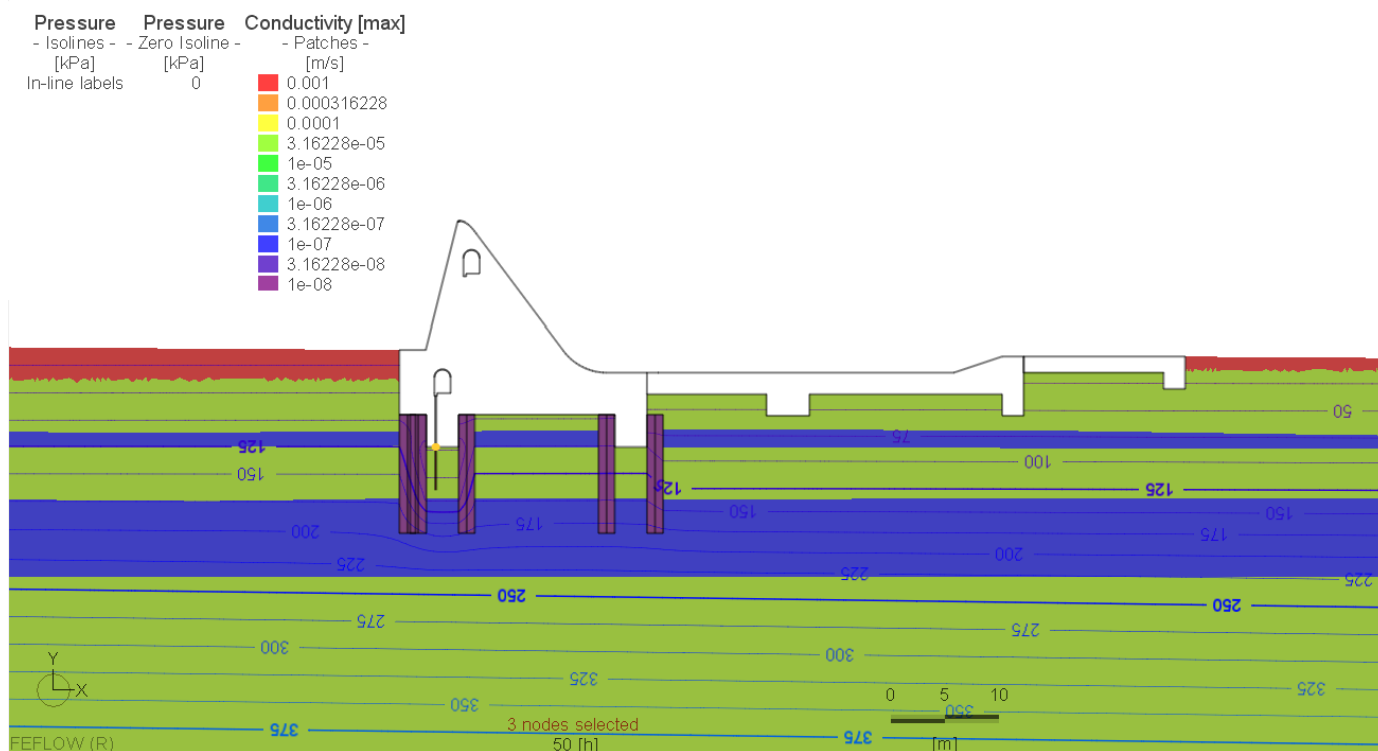
5.8.1.1. Condizione transitoria

Si riporta il grafico di portata unitaria dai tubi drenanti al cunicolo di ispezione ($m^3/d30$ per metro lineare della canaletta di fondo), e a seguire le condizioni relative al tempo $t = 14\text{ h}$, 30 h , 50 h , 80 h .

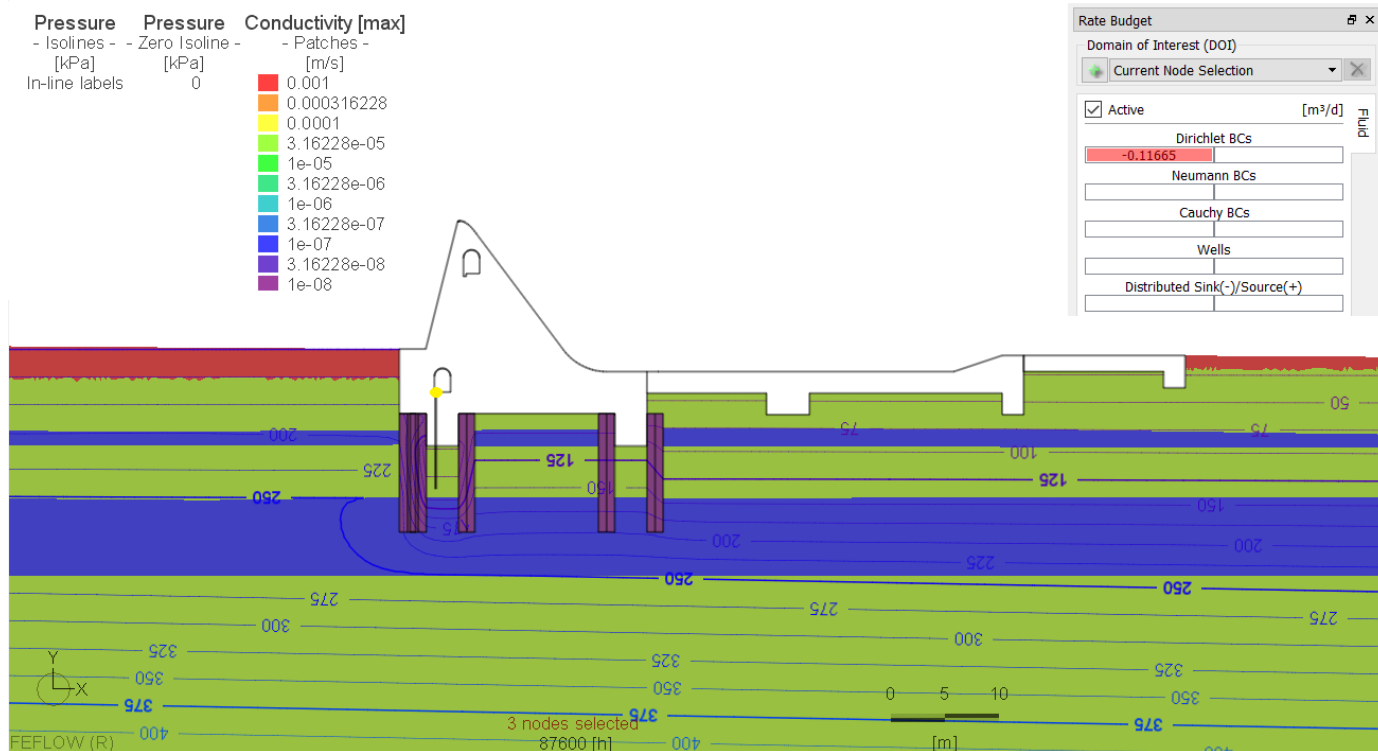


Nota: l'istogramma "Rate Budget" rappresenta la portata unitaria (m^3/d per m di sviluppo longitudinale del cunicolo di ispezione)





5.8.1.2. Condizione stazionaria

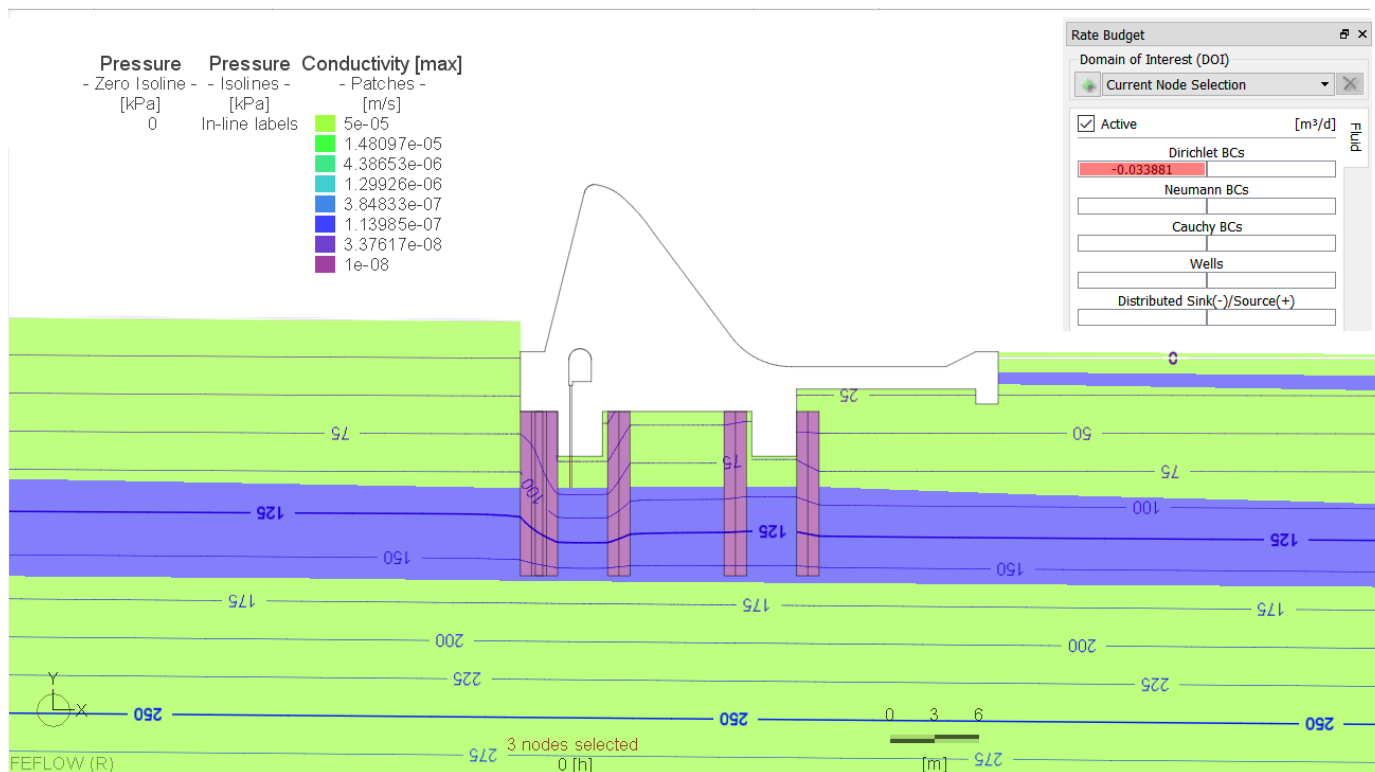
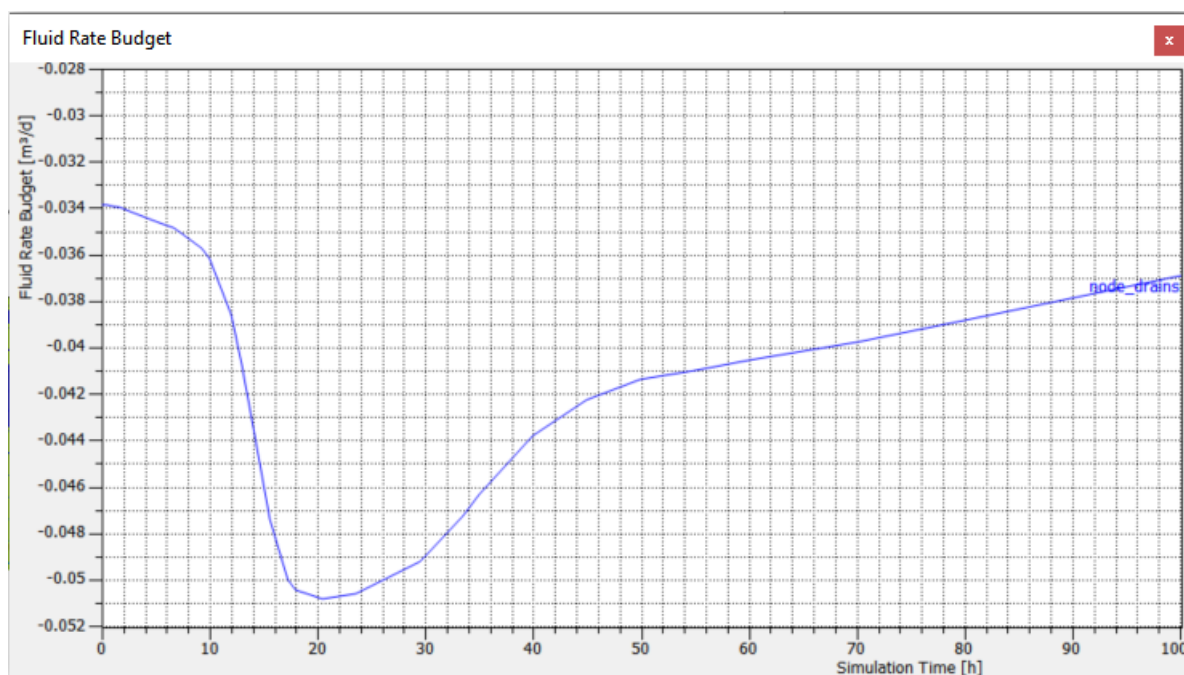


Nota: l'istogramma "Rate Budget" rappresenta la portata unitaria (m³/d per m di sviluppo longitudinale del cunicolo di ispezione)

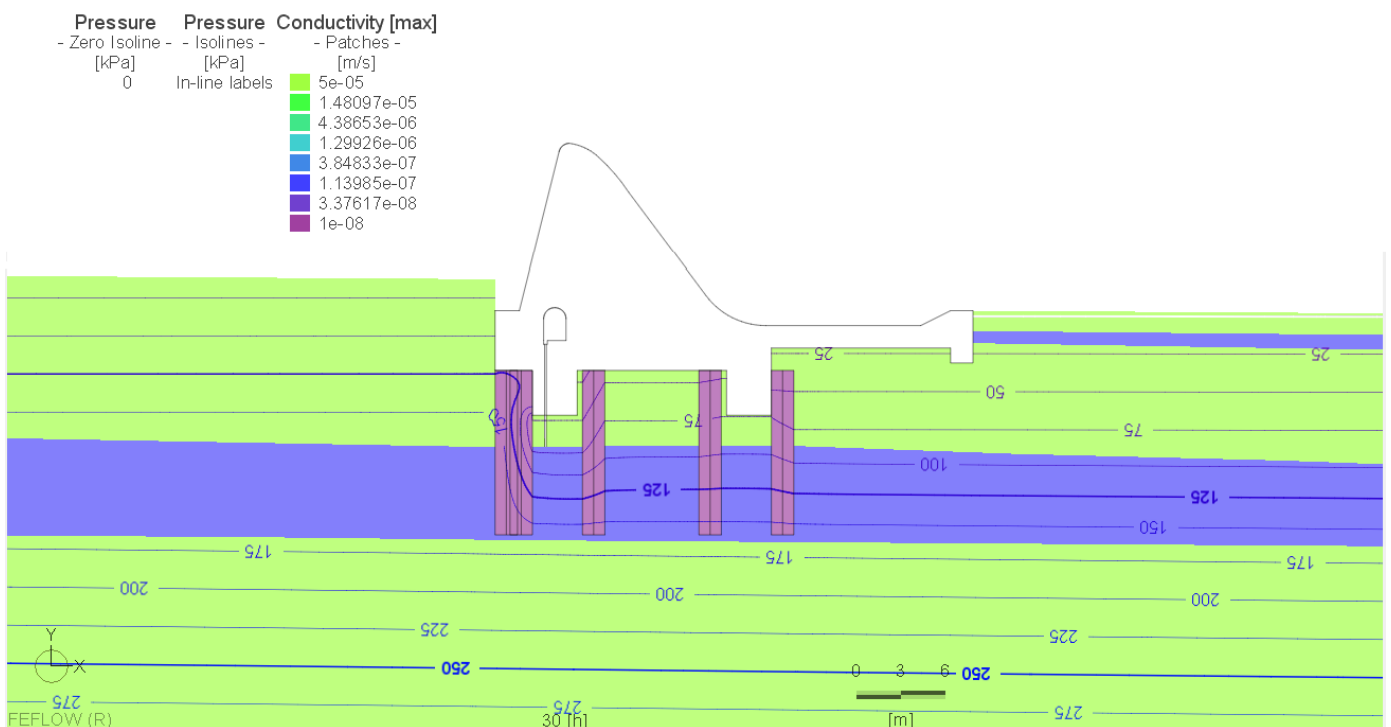
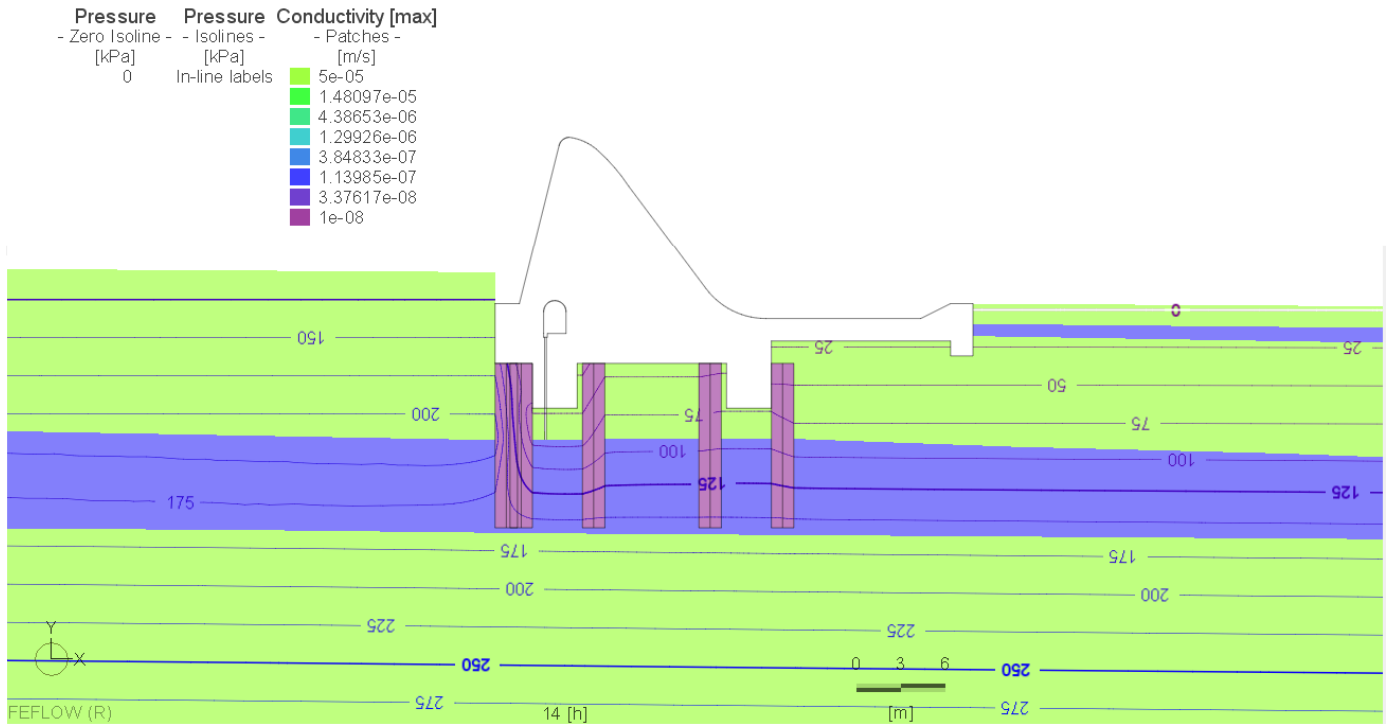
5.8.2 Manufatto B

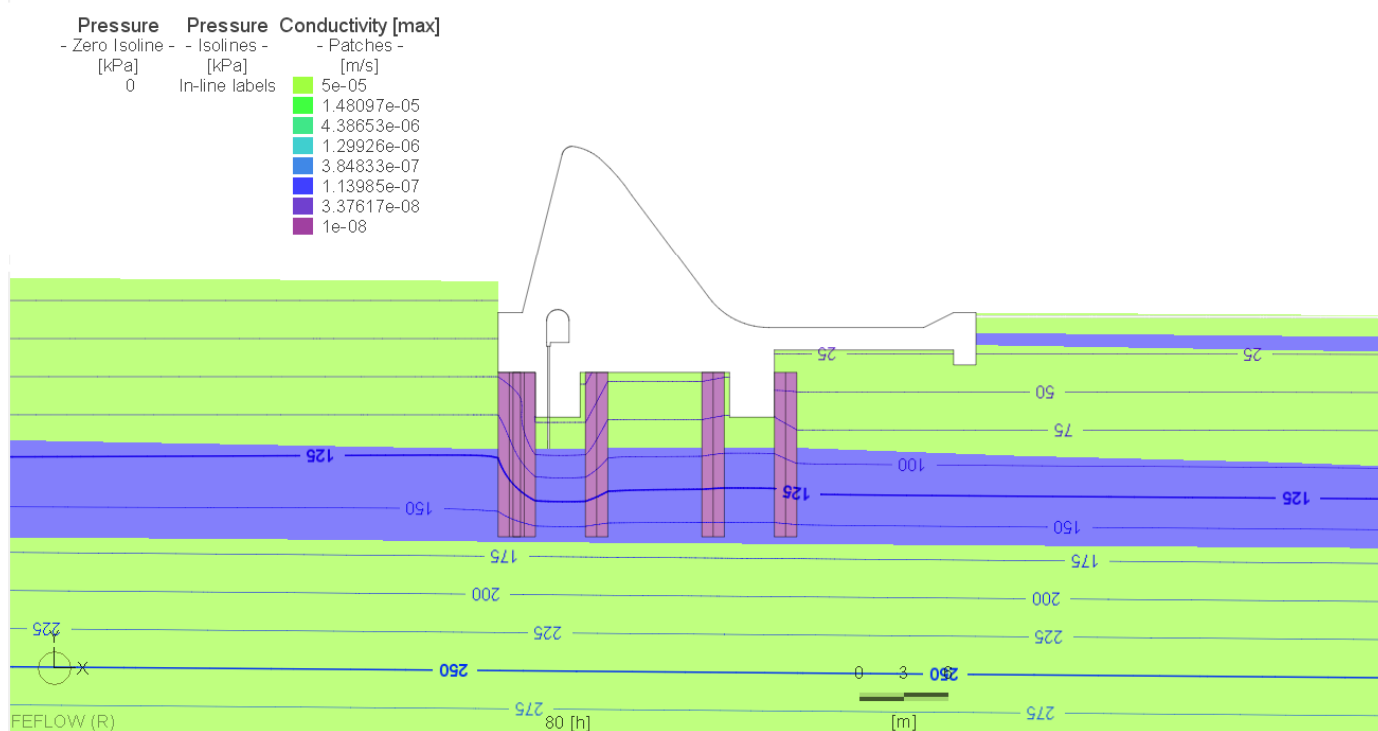
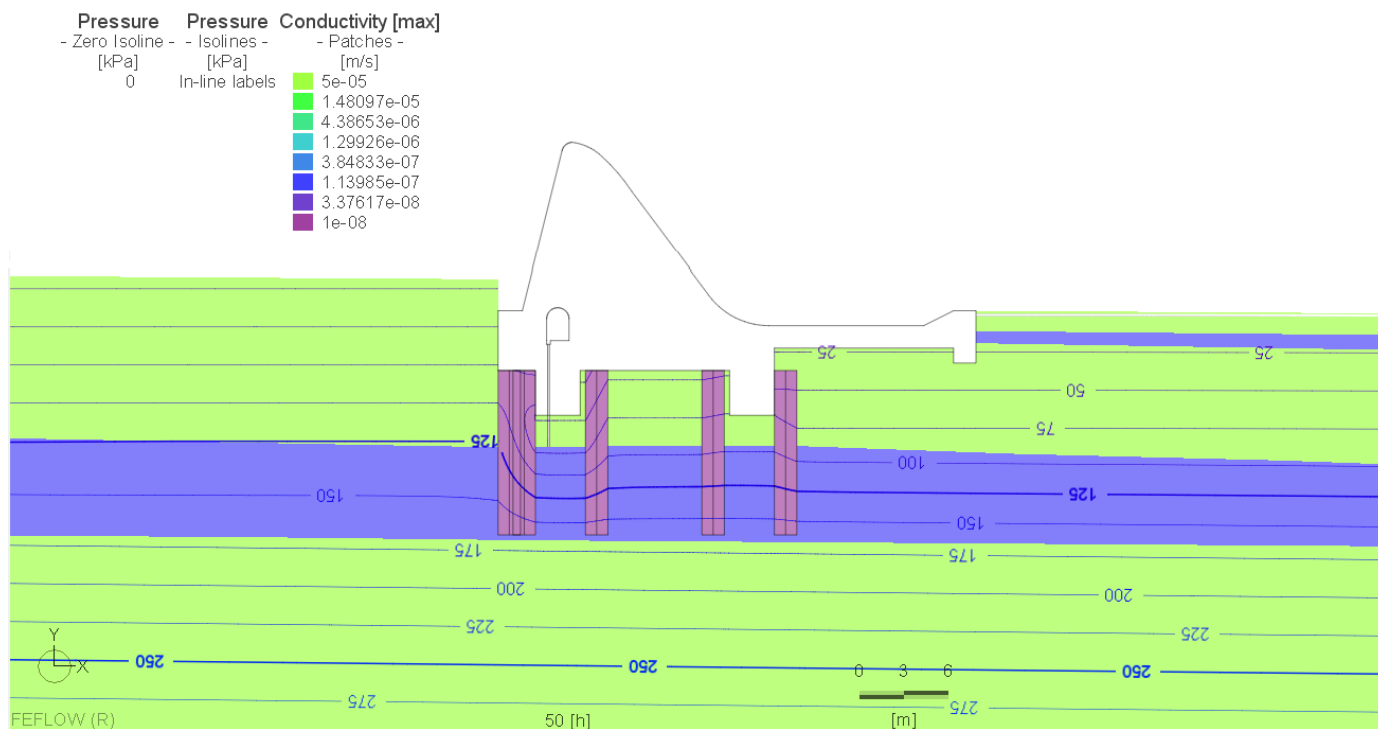
5.8.2.1. Condizione transitoria

Si riporta il grafico di portata unitaria dai tubi drenanti al cunicolo di ispezione (m³/d30 per metro lineare della canaletta di fondo), e a seguire le condizioni relative al tempo $t = 14 \text{ h}$, 30 h , 50 h , 80 h .

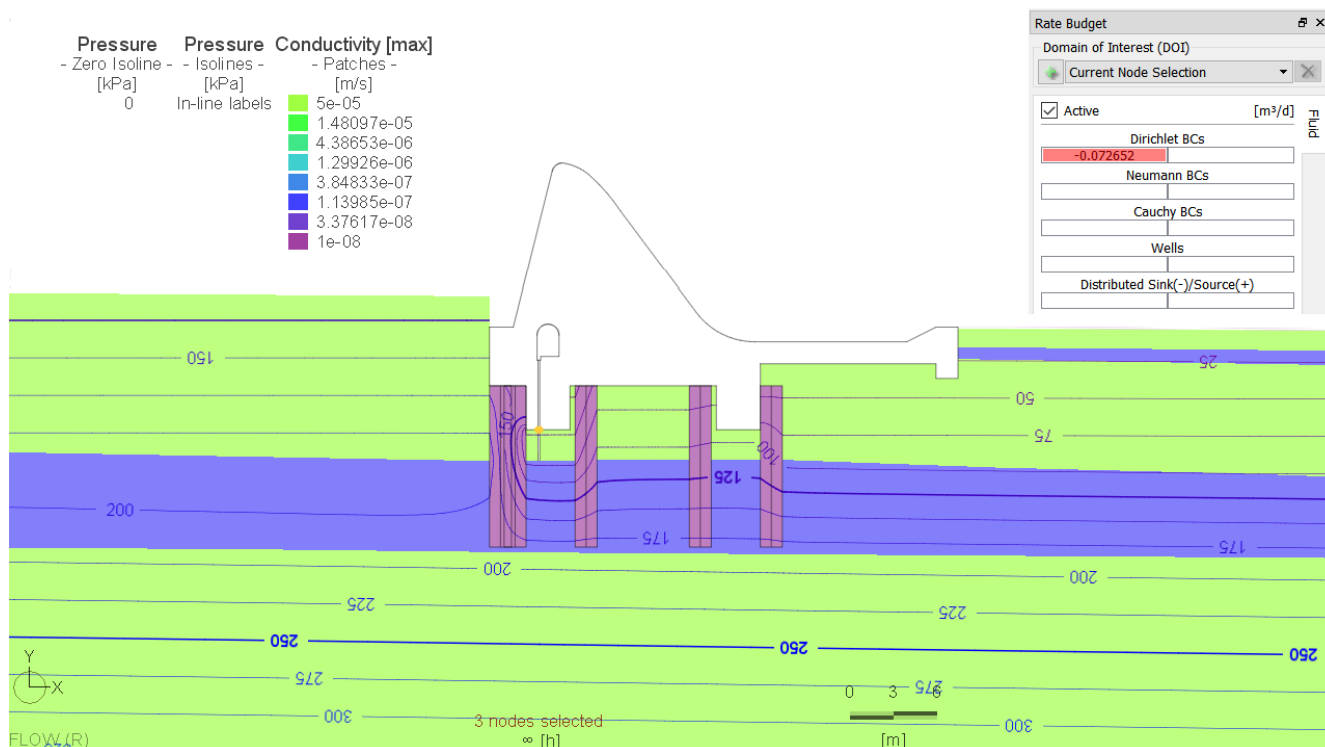


Nota: l'istogramma "Rate Budget" rappresenta la portata unitaria (m3/d per m di sviluppo longitudinale del cunicolo di ispezione)





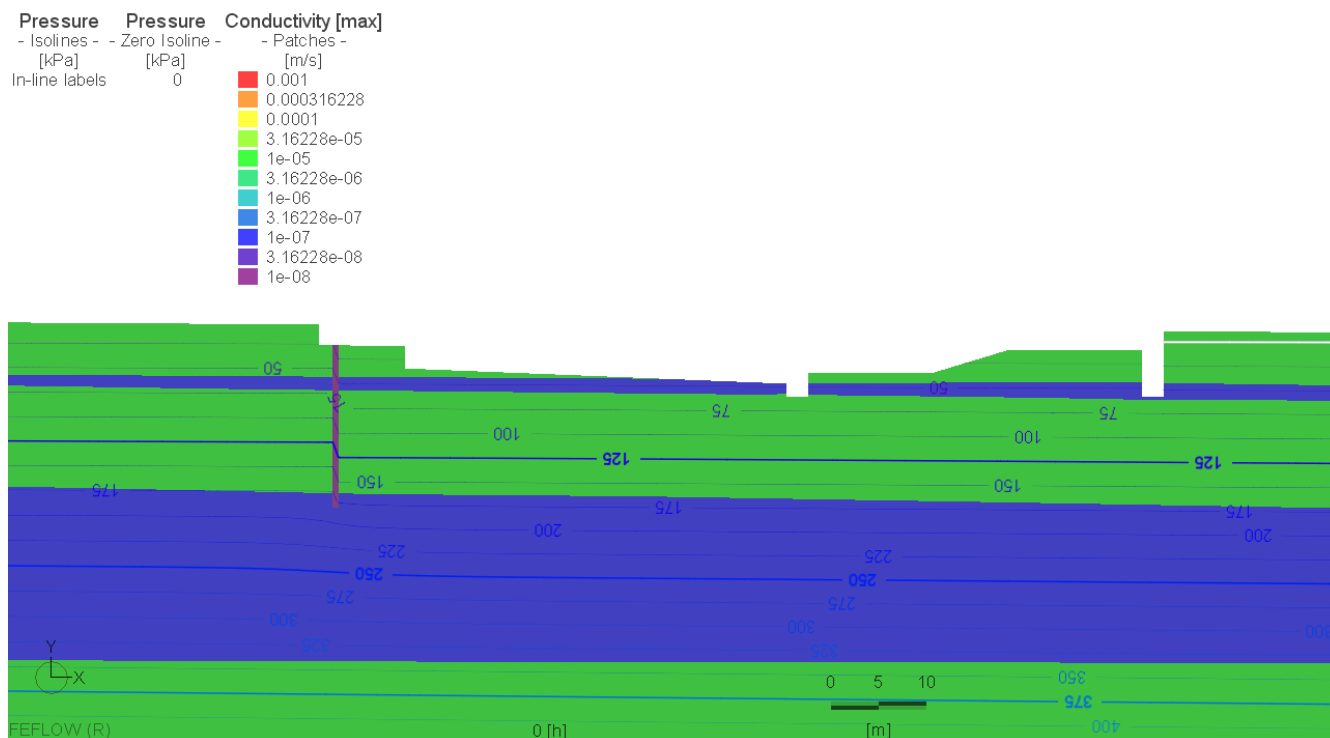
5.8.2.2. Condizione stazionaria



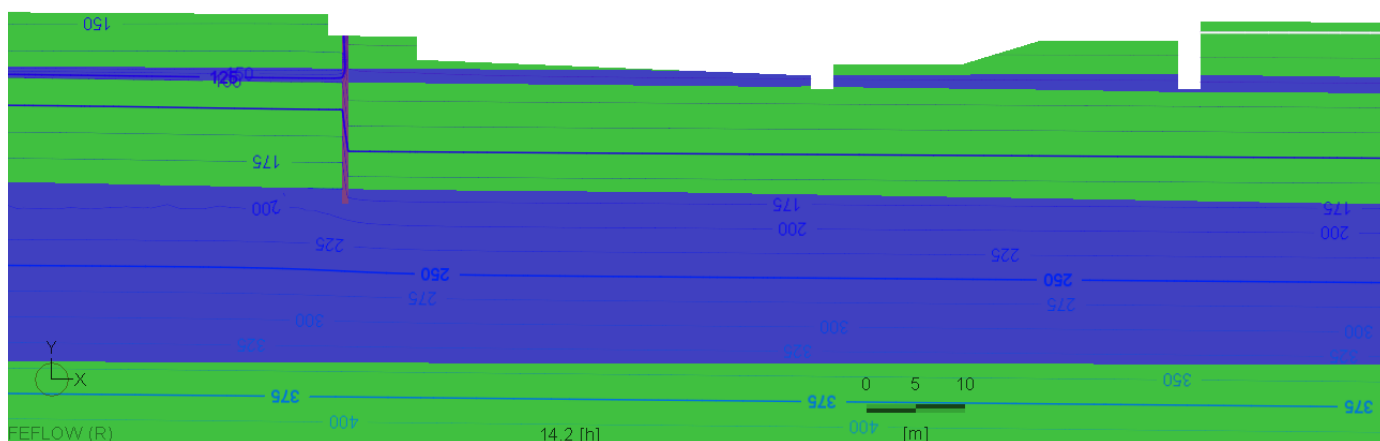
Nota: l'istogramma "Rate Budget" rappresenta la portata unitaria (m³/d per m di sviluppo longitudinale del cunicolo di ispezione)

5.8.3 Manufatto C

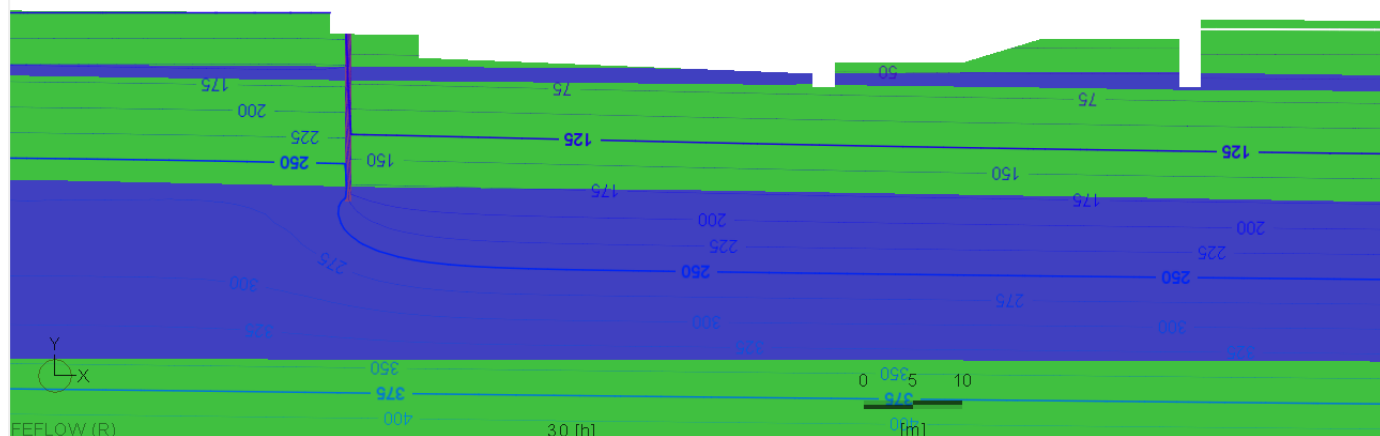
5.8.3.1. Condizione transitoria



Pressure - Isolines - [kPa] In-line labels
Pressure - Zero Isoline - [kPa] 0
Conductivity [max] - Patches - [m/s]
0.001
0.000316228
0.0001
3.16228e-05
1e-05
3.16228e-06
1e-06
3.16228e-07
1e-07
3.16228e-08
1e-08

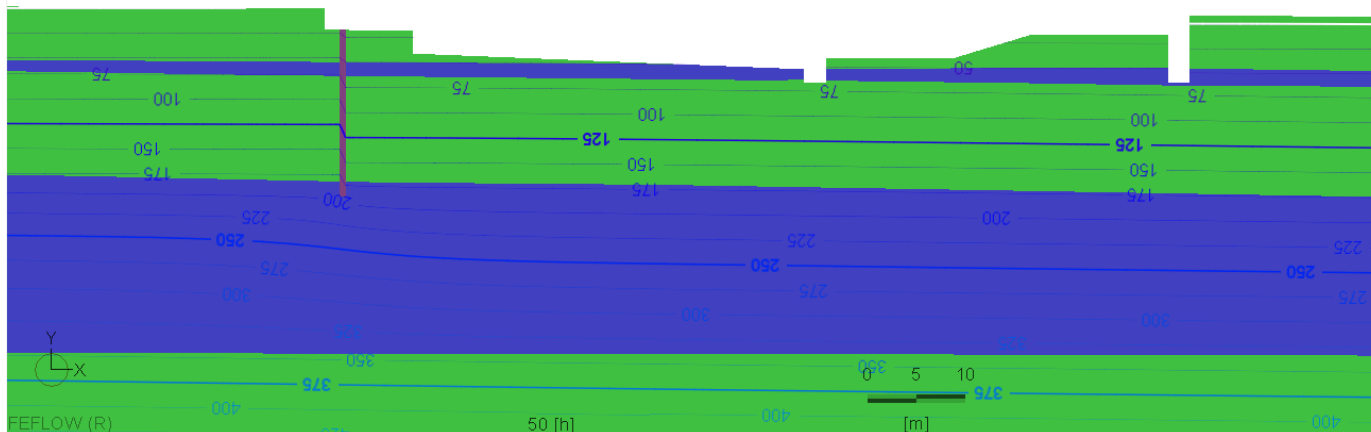


Pressure - Isolines - [kPa] In-line labels
Pressure - Zero Isoline - [kPa] 0
Conductivity [max] - Patches - [m/s]
0.001
0.000316228
0.0001
3.16228e-05
1e-05
3.16228e-06
1e-06
3.16228e-07
1e-07
3.16228e-08
1e-08



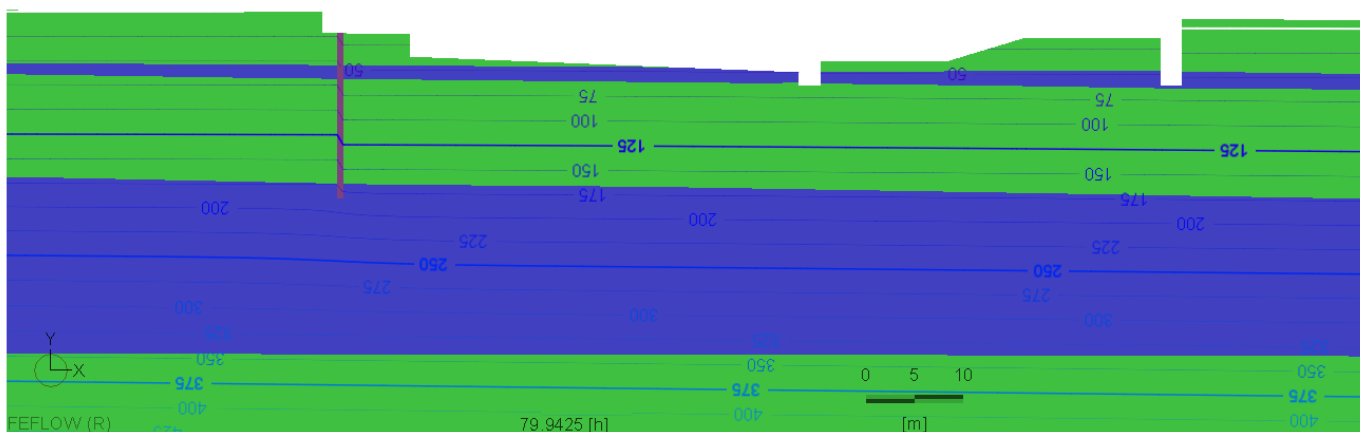
Pressure - Isolines - [kPa] In-line labels
Pressure - Zero Isoline - [kPa] 0
Conductivity [max] - Patches - [m/s]

0.001
0.000316228
0.0001
3.16228e-05
1e-05
3.16228e-06
1e-06
3.16228e-07
1e-07
3.16228e-08
1e-08



Pressure - Isolines - [kPa] In-line labels
Pressure - Zero Isoline - [kPa] 0
Conductivity [max] - Patches - [m/s]

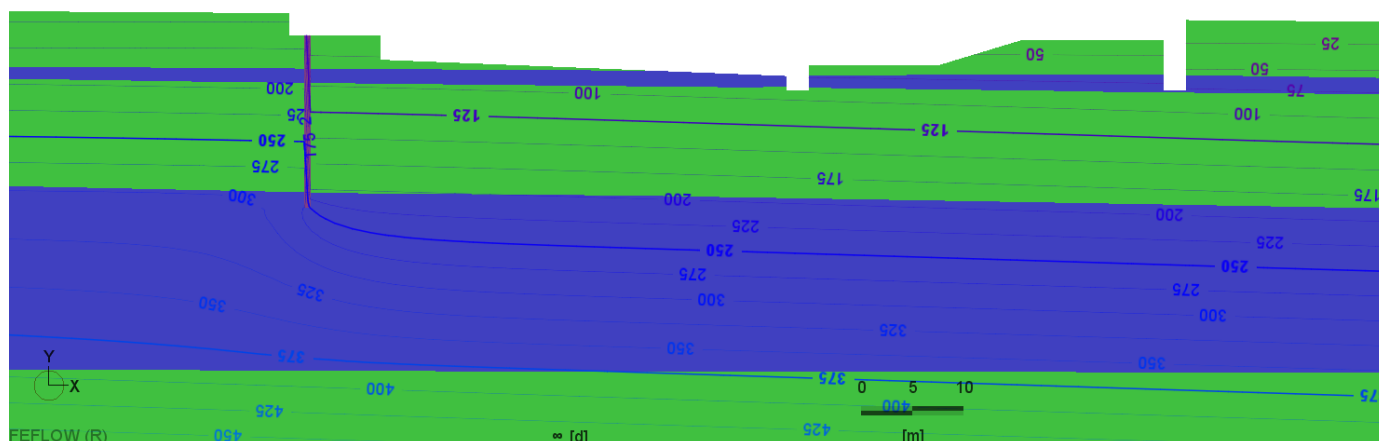
0.001
0.000316228
0.0001
3.16228e-05
1e-05
3.16228e-06
1e-06
3.16228e-07
1e-07
3.16228e-08
1e-08



5.8.3.2. Condizione stazionaria

Conductivity [max]
- Patches -
[m/s]

- 0.001
- 0.000316228
- 0.0001
- 3.16228e-05
- 1e-05
- 3.16228e-06
- 1e-06
- 3.16228e-07
- 1e-07
- 3.16228e-08
- 1e-08



6. RISULTATI DELLE VERIFICHE AL SIFONAMENTO

Le verifiche al sifonamento sono state eseguite a partire dal campo piezometrico interno al rilevato, dai modelli bidimensionali in sezione verticale di cui ai punti precedenti.

Gli scenari di verifica sono relativi alle specifiche simulazioni effettuate in regime stazionario, in riferimento ai livelli massimi interni alle vasche (rif. par 5.1÷7.1.2 e 5.1÷7.2.2), come specificato ai punti precedenti per ognuna delle sezioni di modello (rif. dettaglio della “condizione critica di riferimento”).

Le verifiche di compatibilità al sifonamento, sono state preliminarmente eseguite attraverso metodologie semplificate, e in fase successiva con verifica agli stati ultimi idraulici in accordo con il vigente D.M. Infrastrutture 26 giugno 2014 “Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)”, rif. punto E.5.1, e relativi rimandi alle NTC 08 (capitolo 6.2.3.2 “Verifiche nei confronti degli stati limite ultimi idraulici”).

6.1 SINTESI VERIFICHE DEL GRADIENTE (I_c/I_E)

Come è noto per aversi sifonamento occorre che il gradiente idraulico i sia superiore al gradiente idraulico critico i_c dove:

$$I_c = \gamma' / \gamma_w$$

In cui

γ' = peso di volume sommerso del terreno;

γ_w = peso di volume dell'acqua.

Nel caso in oggetto il peso di volume sommerso γ' (pari alla differenza tra peso di volume saturo e peso specifico dell'acqua), sulla base della densità $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ valutata dallo studio geotecnico, può essere considerato cautelativamente pari a $\gamma' = 9 \text{ kN/m}^3$.

Il gradiente i è calcolato dal modello di filtrazione, considerando il valore massimo i_{max} :

$$i_{max} = DH / L$$

Le verifiche nei confronti del pericolo di sifonamento sono state dunque innanzitutto condotte verificando che il rapporto tra il gradiente idraulico critico I_c , assunto pari a 0,9 circa, ed il gradiente idraulico massimo sia superiore a 2

Nella seguente tabella vengono riportati in sintesi i risultati delle verifiche condotte:

Sezione di progetto	Gradiente idraulico
Sezione 1	
<i>nucleo 1E-8 m/s</i>	0,034
<i>nucleo 1e-6 m/s</i>	0,225

Sezione 2	
<i>nucleo 1E-8 m/s</i>	0,002
<i>nucleo 1e-6 m/s</i>	0,016
Sezione 3	
<i>nucleo 1E-8 m/s</i>	0,265
<i>nucleo 1e-6 m/s</i>	0,277
Sezione 4	
<i>nucleo 1E-8 m/s</i>	0,257
<i>nucleo 1e-6 m/s</i>	0,278
Sezione 5	
<i>nucleo 1E-8 m/s</i>	0.042
<i>nucleo 1e-6 m/s</i>	0.043
Sezione 6	
<i>nucleo 1E-8 m/s</i>	0.029
<i>nucleo 1e-6 m/s</i>	0.041
Sezione 7 (*)	
<i>nucleo 1e-6 m/s</i>	0,002

(*) gradiente ≈ 0 per entrambe le condizioni di riferimento nucleo 1e-6, 1e-8 m/s; risultato del modello non differenziabile

Tabella 2 – Valori del gradiente idraulico nella zona di deflusso (paramento esterno)

Per tutti i casi simulati il gradiente massimo in uscita risulta pari a 0,28, per cui viene sempre garantito un coefficiente di sicurezza maggiore di 3.

6.2 VERIFICA STATI LIMITE ULTIMI IDRAULICI

Il controllo della stabilità al sifonamento è previsto dalle NTC 08 - capitolo 6.2.3.2 “Verifiche nei confronti degli stati limite ultimi idraulici”; nelle suddette Norme Tecniche viene indicato che il valore di progetto della pressione interstiziale instabilizzante ($u_{inst,d}$) deve risultare non superiore al valore di progetto della tensione totale stabilizzante ($\sigma_{stb,d}$) tenendo conto dei coefficienti parziali definiti nella seguente Tabella 3 (Tab. 6.2.IV delle NTC08):

Tabella 6.2.IV – Coefficienti parziali sulle azioni per le verifiche nei confronti di stati limite di sifonamento.

CARICHI	EFFETTO	COEFFICIENTE PARZIALE γ_F (o γ_E)	SIFONAMENTO (HYD)
Permanenti	Favorevole	γ_{G1}	0,9
	Sfavorevole		1,3
Permanenti non strutturali ⁽¹⁾	Favorevole	γ_{G2}	0,0
	Sfavorevole		1,5
Variabili	Favorevole	γ_{Qi}	0,0
	Sfavorevole		1,5

(1) Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. i carichi permanenti portati) siano compiutamente definiti, si potranno adottare gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

Tabella 3 - Coefficienti parziali sulle azioni per le verifiche nei confronti di stati limite di sifonamento, previsti dalle NTC08 (Tab. 6.2.IV delle NTC08)

Con riferimento al vigente D.M. Infrastrutture 26 giugno 2014 “*Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)*”, per gli sbarramenti in materiali sciolti è previsto il riferimento al punto E.5.1.

E. DIGHE DI MATERIALI SCIOLTI

...

E.5 - Verifiche di sicurezza

....

E.5.1. - Verifiche nei confronti degli stati limite ultimi (SLU)

....

Le verifiche nei confronti del sifonamento si eseguono conformemente a quanto previsto al § 6.2.3.2 delle NTC, utilizzando i coefficienti parziali sulle azioni, γ_F , riportati nella tabella 6.2.IV delle NTC.

Pertanto, per la specifica applicazione si conferma il riferimento ai valori dei coefficienti di Tabella 3 (tabella 6.2.IV delle NTC). Cautelativamente, in considerazione della tipologia e funzionalità dell'invaso, sono stati eseguiti due scenari di verifica A-B applicando i seguenti coefficienti parziali (Tabella 4÷Tabella 14):

- A – scenario di riferimento “normativo”, con coefficienti parziali pari a 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,3 (sfavorevoli, carichi permanenti);
- B – scenario di verifica in cui, a partire dalla medesima condizione di riduzione delle azioni favorevoli, è cautelativamente considerato il coefficiente moltiplicativo 1,5 per le pressioni interstiziali (sfavorevoli, carichi variabili).

A partire dalle verifiche di filtrazione dei rilevati arginali, presentate nel precedente paragrafo, si sono ricavati i valori della pressione interstiziale e confrontate con le pressioni totali, calcolate cautelativamente considerando un peso di volume del terreno pari 19 kN/m^3 .

Le verifiche, considerando la presenza dei diaframmi, risultano sempre soddisfatte.

A partire dalle verifiche di filtrazione dei rilevati arginali, presentate nel precedente paragrafo, si sono ricavati i valori della pressione interstiziale e confrontate con le pressioni totali, calcolate cautelativamente considerando un peso di volume del terreno pari 19 kN/m^3 .

Profondità	u_k	$u_{inst,d}$	σ_k	σ_k/u_k	$\sigma_{stb,d}$	$\sigma_{stb,d}/u_{inst,d}$
[m]	[kPa]	[kPa]	[kPa]		[kPa]	
1	10	12,9	19	1,91	17,1	1,32
2	19,8	25,8	38	1,92	34,2	1,33
3	29,7	38,6	57	1,92	51,3	1,33
4	39,5	51,4	76	1,92	68,4	1,33

Le verifiche (rif. successive

Scenario di verifica A: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,3 (sfavorevoli, carichi permanenti)

Profondità	u_k	$u_{inst,d}$	σ_k	σ_k/u_k	$\sigma_{stb,d}$	$\sigma_{stb,d}/u_{inst,d}$
[m]	[kPa]	[kPa]	[kPa]		[kPa]	
1	10,0	15,0	19	1,90	17,1	1,14
2	19,8	29,7	38	1,92	34,2	1,15
3	29,7	44,6	57	1,92	51,3	1,15
4	39,5	59,3	76	1,92	68,4	1,15

Scenario di verifica B: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,5 (sfavorevoli, carichi variabili)

Profondità	u_k	$u_{inst,d}$	σ_k	σ_k/u_k	$\sigma_{stb,d}$	$\sigma_{stb,d}/u_{inst,d}$
[m]	[kPa]	[kPa]	[kPa]		[kPa]	
1	9,8	12,7	19	1,94	17,1	1,34
2	19,6	25,5	38	1,93	34,2	1,34
3	29,5	38,3	57	1,93	51,3	1,34
4	39,3	51,1	76	1,93	68,4	1,34

Tabella 4÷

Scenario di verifica A: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,3 (sfavorevoli, carichi permanenti)

Profondità	u_k	$u_{inst,d}$	σ_k	σ_k/u_k	$\sigma_{stb,d}$	$\sigma_{stb,d}/u_{inst,d}$
[m]	[kPa]	[kPa]	[kPa]		[kPa]	
1	9,8	14,7	19	1,94	17,1	1,16
2	19,6	29,4	38	1,94	34,2	1,16
3	29,5	44,3	57	1,93	51,3	1,16
4	39,3	59,0	76	1,93	68,4	1,16

Scenario di verifica B: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,5 (sfavorevoli, carichi variabili)

Tabella 14) risultano sempre soddisfatte ($\sigma_{stb,d}/u_{inst,d} > 1$).

6.2.1 Sezioni tipo 1, 1-B

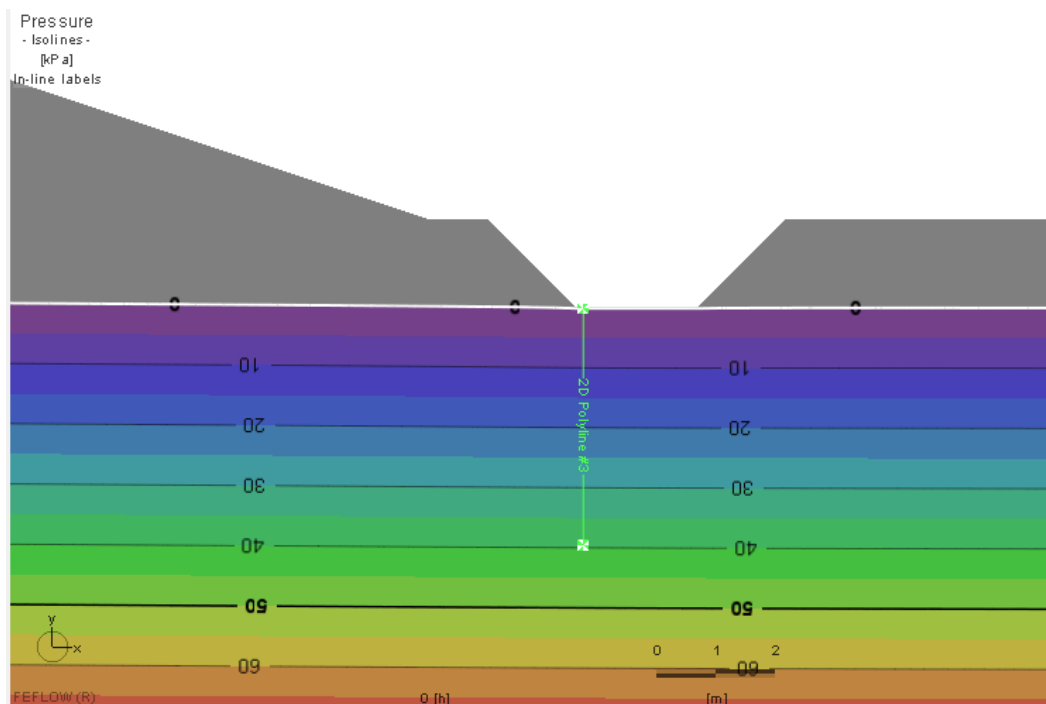


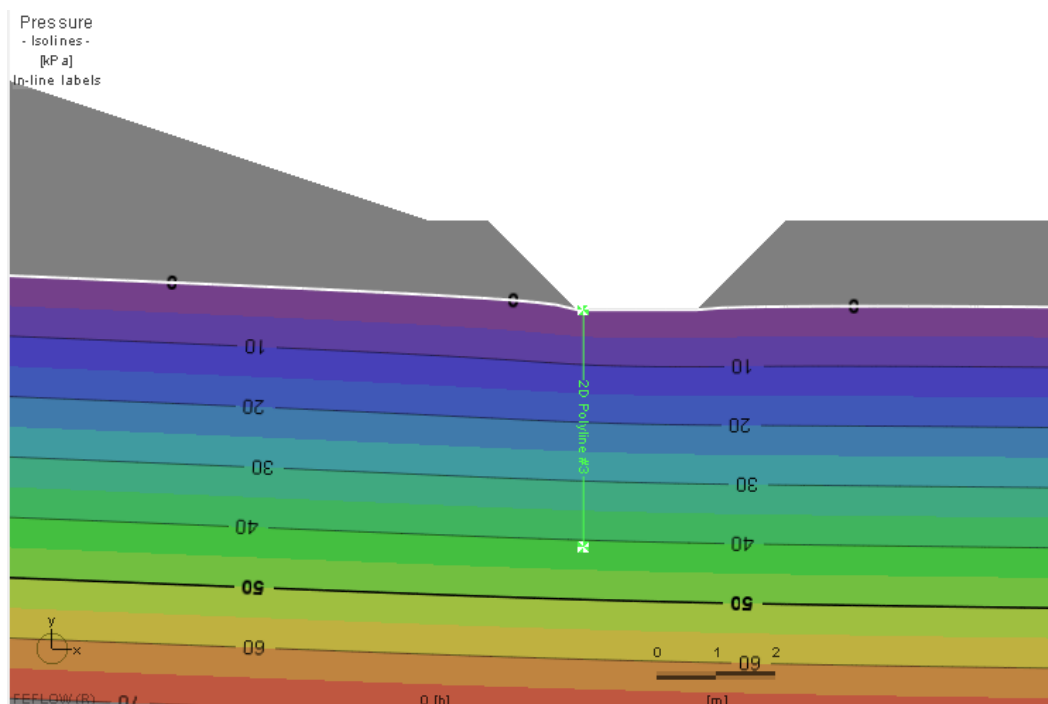
Figura 3 - Andamento delle pressioni interstiziali (kPa) per sezione tipo 1 (K nucleo 1E-8 m/s)

Profondità [m]	u_k [kPa]	$u_{inst,d}$ [kPa]	σ_k [kPa]	σ_k/u_k	$\sigma_{stb,d}$ [kPa]	$\sigma_{stb,d}/u_{inst,d}$
1	10	12,9	19	1,91	17,1	1,32
2	19,8	25,8	38	1,92	34,2	1,33
3	29,7	38,6	57	1,92	51,3	1,33
4	39,5	51,4	76	1,92	68,4	1,33

Scenario di verifica A: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,3 (sfavorevoli, carichi permanenti)

Profondità [m]	u_k [kPa]	$u_{inst,d}$ [kPa]	σ_k [kPa]	σ_k/u_k	$\sigma_{stb,d}$ [kPa]	$\sigma_{stb,d}/u_{inst,d}$
1	10,0	15,0	19	1,90	17,1	1,14
2	19,8	29,7	38	1,92	34,2	1,15
3	29,7	44,6	57	1,92	51,3	1,15
4	39,5	59,3	76	1,92	68,4	1,15

Scenario di verifica B: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,5 (sfavorevoli, carichi variabili)

Tabella 4 - Verifica al sifonamento sezione tipo 1 (K nucleo 1E-8 m/s)

Figura 4 - Andamento delle pressioni interstiziali (kPa) per sezione tipo 1 (K nucleo 1E-6 m/s)

Profondità [m]	u_k [kPa]	$u_{inst,d}$ [kPa]	σ_k [kPa]	σ_k/u_k	$\sigma_{stb,d}$ [kPa]	$\sigma_{stb,d}/u_{inst,d}$
1	10,8	14	19	1,76	17,1	1,22
2	21	27,3	38	1,81	34,2	1,25
3	31,1	40,4	57	1,83	51,3	1,27
4	41,1	53,4	76	1,85	68,4	1,28

Scenario di verifica A: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,3 (sfavorevoli, carichi permanenti)

Profondità [m]	u_k [kPa]	$u_{inst,d}$ [kPa]	σ_k [kPa]	σ_k/u_k	$\sigma_{stb,d}$ [kPa]	$\sigma_{stb,d}/u_{inst,d}$
1	10,8	16,2	19	1,76	17,1	1,06
2	21	31,5	38	1,81	34,2	1,09
3	31,1	46,7	57	1,83	51,3	1,10
4	41,1	61,7	76	1,85	68,4	1,11

Scenario di verifica B: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,5 (sfavorevoli, carichi variabili)

Tabella 5 - Verifica al sifonamento sezione tipo 1 (K nucleo 1E-6 m/s)

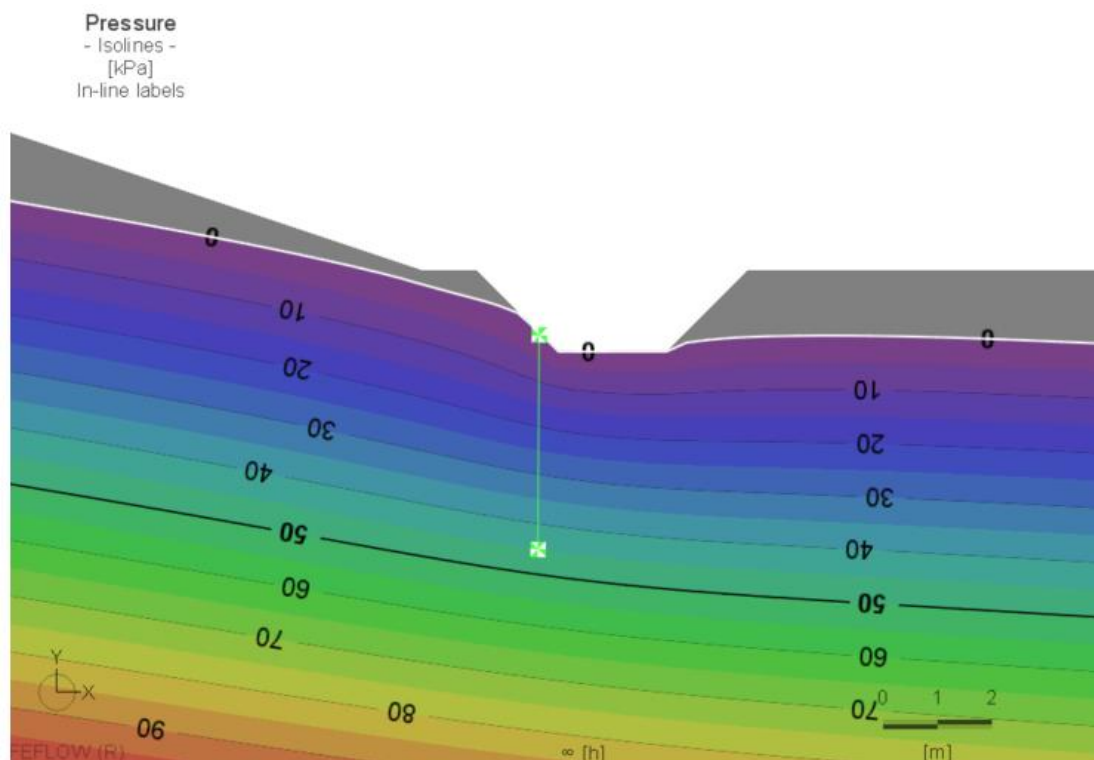


Figura 5 - Andamento delle pressioni interstiziali (kPa) per sezione tipo 1-B (K nucleo 1E-8 m/s)

Profondità [m]	u_k [kPa]	$u_{inst,d}$ [kPa]	σ_k [kPa]	σ_k/u_k	$\sigma_{stb,d}$ [kPa]	$\sigma_{stb,d}/u_{inst,d}$
1	12,3	15,99	19,00	1,54	17,10	1,07
2	23,0	29,90	38,00	1,65	34,20	1,14
3	33,9	44,07	57,00	1,68	51,30	1,16
4	45,0	58,50	76,00	1,69	68,40	1,17

Scenario di verifica A: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,3 (sfavorevoli, carichi permanenti)

Tabella 4b - Verifica al sifonamento sezione tipo 1-B (K nucleo 1E-8 m/s)

6.2.2 Sezione tipo 2

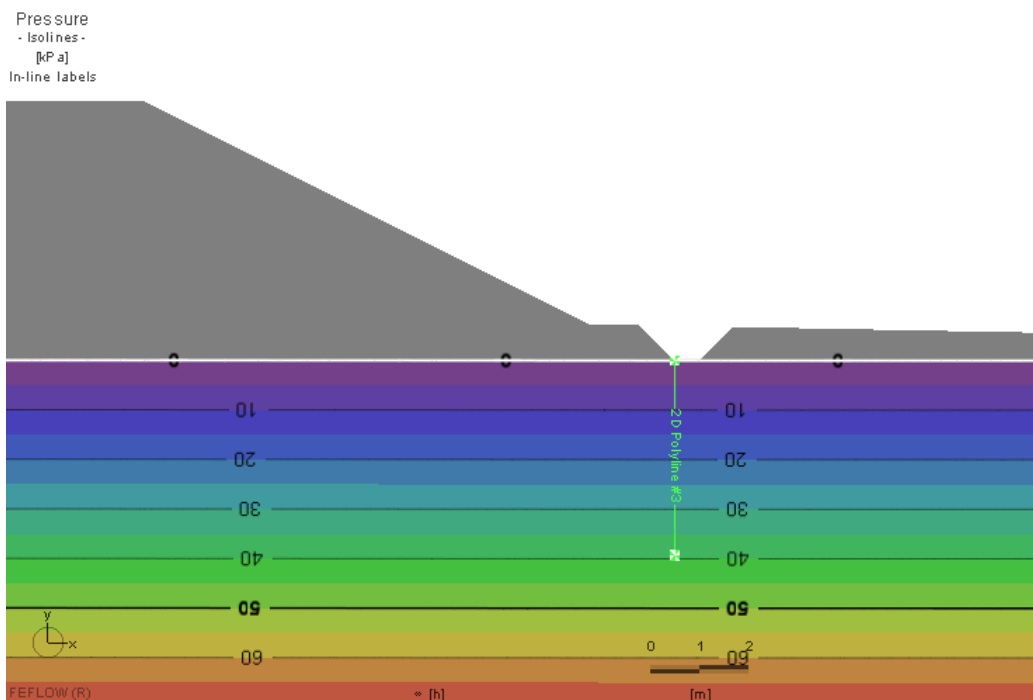


Figura 6 - Andamento delle pressioni interstiziali (kPa) per sezione tipo 2 (K nucleo 1E-8 m/s)

Profondità [m]	u_k [kPa]	$u_{inst,d}$ [kPa]	σ_k [kPa]	σ_k/u_k	$\sigma_{stb,d}$ [kPa]	$\sigma_{stb,d}/u_{inst,d}$
1	9,8	12,8	19	1,94	17,1	1,34
2	19,6	25,5	38	1,94	34,2	1,34
3	29,4	38,3	57	1,94	51,3	1,34
4	39,2	51	76	1,94	68,4	1,34

Scenario di verifica A: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,3 (sfavorevoli, carichi permanenti)

Profondità [m]	u_k [kPa]	$u_{inst,d}$ [kPa]	σ_k [kPa]	σ_k/u_k	$\sigma_{stb,d}$ [kPa]	$\sigma_{stb,d}/u_{inst,d}$
1	9,8	14,7	19	1,94	17,1	1,16
2	19,6	29,4	38	1,92	34,2	1,16
3	29,4	44,1	57	1,92	51,3	1,16
4	39,2	58,8	76	1,92	68,4	1,16

Scenario di verifica B: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,5 (sfavorevoli, carichi variabili)

Tabella 6 - Verifica al sifonamento sezione tipo 2 (K nucleo 1E-8 m/s)

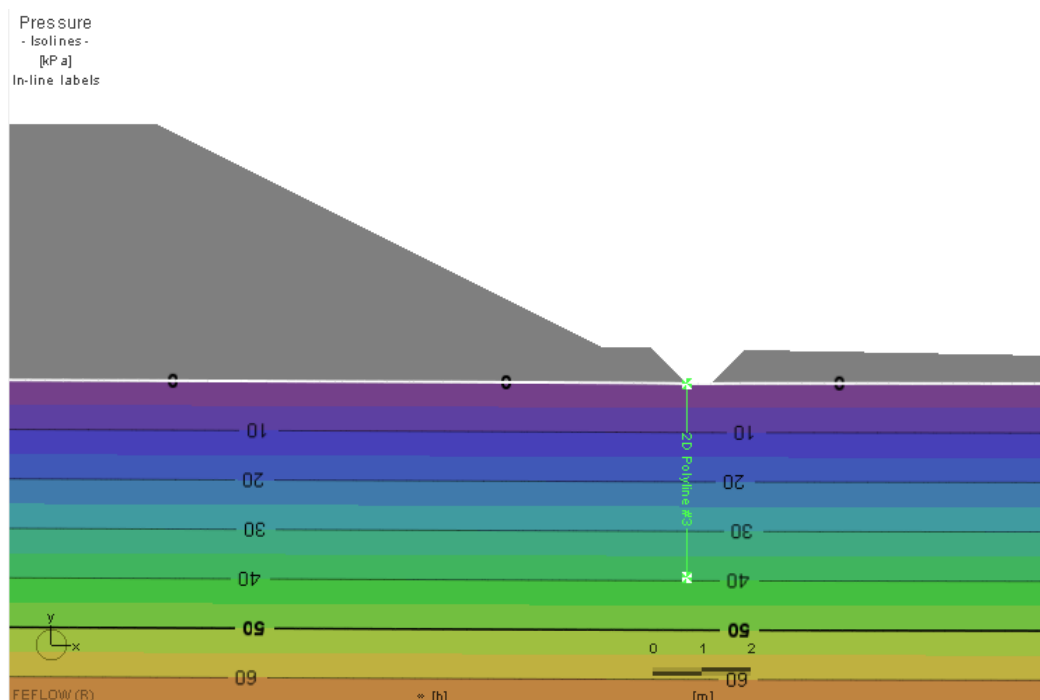


Figura 7 - Andamento delle pressioni interstiziali (kPa) per sezione tipo 2 (K nucleo 1E-6 m/s)

Profondità	uk	u _{inst,d}	σ _k	σ _k /uk	σ _{stb,d}	σ _{stb,d} /u _{inst,d}
[m]	[kPa]	[kPa]	[kPa]		[kPa]	
1	9,9	12,9	19	1,92	17,1	1,33
2	19,7	25,7	38	1,92	34,2	1,33
3	29,6	38,4	57	1,93	51,3	1,33
4	39,4	51,2	76	1,93	68,4	1,34

Scenario di verifica A: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,3 (sfavorevoli, carichi permanenti)

Profondità	uk	u _{inst,d}	σ _k	σ _k /uk	σ _{stb,d}	σ _{stb,d} /u _{inst,d}
[m]	[kPa]	[kPa]	[kPa]		[kPa]	
1	9,9	14,9	19	1,92	17,1	1,15
2	19,7	29,6	38	1,93	34,2	1,16
3	29,6	44,4	57	1,93	51,3	1,16
4	39,4	59,1	76	1,93	68,4	1,16

Scenario di verifica B: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,5 (sfavorevoli, carichi variabili)

Tabella 7 - Verifica al sifonamento sezione tipo 2 (K nucleo 1E-6 m/s)

6.2.3 Sezione tipo 3

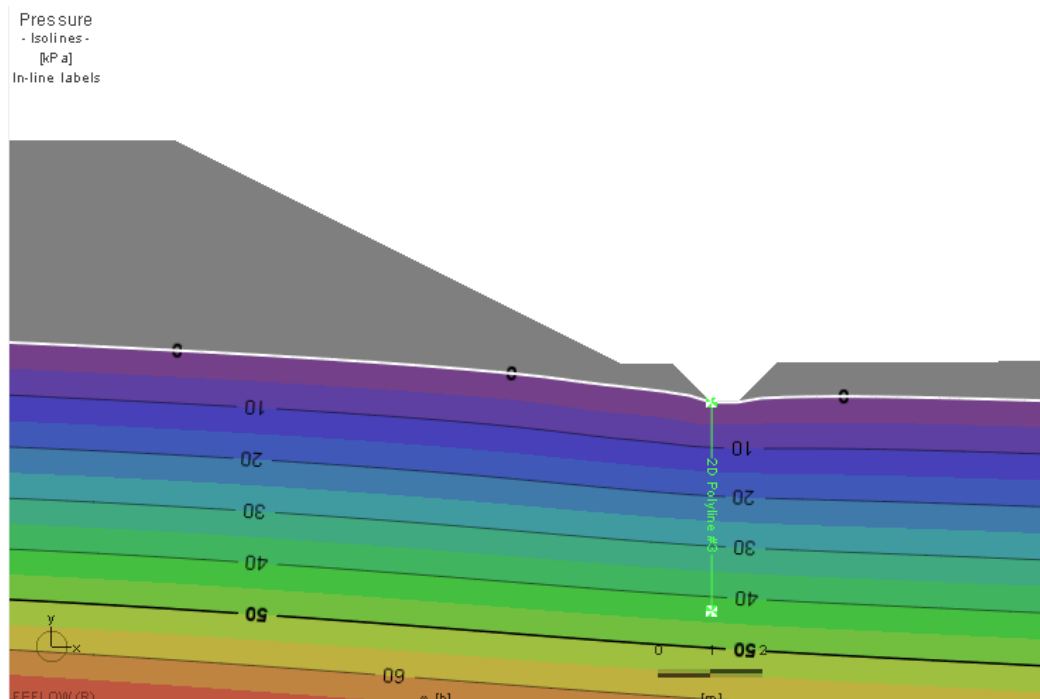


Figura 8 - Andamento delle pressioni interstiziali (kPa) per sezione tipo 3 (K nucleo 1E-8 m/s)

Profondità [m]	u_k [kPa]	$u_{inst,d}$ [kPa]	σ_k [kPa]	σ_k/u_k	$\sigma_{stb,d}$ [kPa]	$\sigma_{stb,d}/u_{inst,d}$
1	11,5	14,9	19	1,66	17,1	1,15
2	22,1	28,8	38	1,72	34,2	1,19
3	32,5	42,3	57	1,75	51,3	1,21
4	42,8	55,6	76	1,78	68,4	1,23

Scenario di verifica A: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,3 (sfavorevoli, carichi permanenti)

Profondità [m]	u_k [kPa]	$u_{inst,d}$ [kPa]	σ_k [kPa]	σ_k/u_k	$\sigma_{stb,d}$ [kPa]	$\sigma_{stb,d}/u_{inst,d}$
1	11,5	17,2	19	1,66	17,1	1,00
2	22,1	33,2	38	1,92	34,2	1,03
3	32,5	48,8	57	1,92	51,3	1,05
4	42,8	64,2	76	1,92	68,4	1,07

Scenario di verifica B: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,5 (sfavorevoli, carichi variabili)

Tabella 8 - Verifica al sifonamento sezione tipo 3

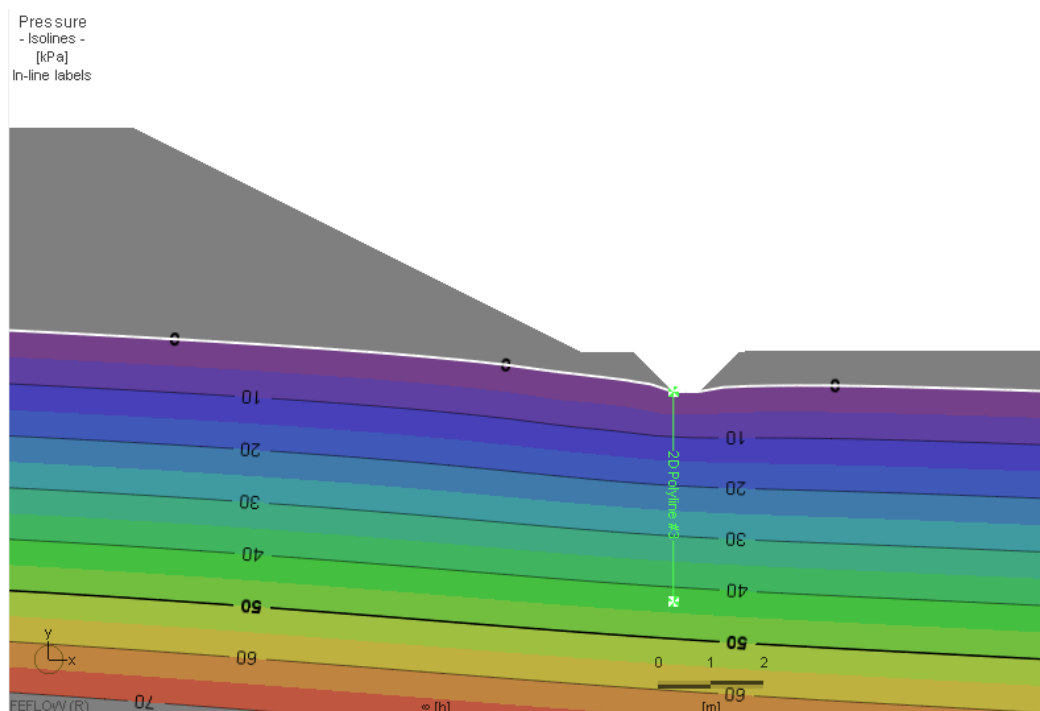


Figura 9 - Andamento delle pressioni interstiziali (kPa) per sezione tipo 3 (K nucleo 1E-6 m/s)

Profondità [m]	u_k [kPa]	$u_{inst,d}$ [kPa]	σ_k [kPa]	σ_k/u_k	$\sigma_{stb,d}$ [kPa]	$\sigma_{stb,d}/u_{inst,d}$
1	11,5	15	19	1,65	17,1	1,14
2	22,2	28,9	38	1,71	34,2	1,18
3	32,6	42,4	57	1,75	51,3	1,21
4	42,9	55,8	76	1,77	68,4	1,23

Scenario di verifica A: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,3 (sfavorevoli, carichi permanenti)

Profondità [m]	u_k [kPa]	$u_{inst,d}$ [kPa]	σ_k [kPa]	σ_k/u_k	$\sigma_{stb,d}$ [kPa]	$\sigma_{stb,d}/u_{inst,d}$
1	11,5	17,2	19	1,66	17,1	1,00
2	22,2	33,3	38	1,71	34,2	1,03
3	32,6	48,9	57	1,75	51,3	1,05
4	42,9	64,4	76	1,77	68,4	1,06

Scenario di verifica B: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,5 (sfavorevoli, carichi variabili)

Tabella 9 - Verifica al sifonamento sezione tipo 3 (K nucleo 1E-6 m/s)

6.2.4 Sezione tipo 4

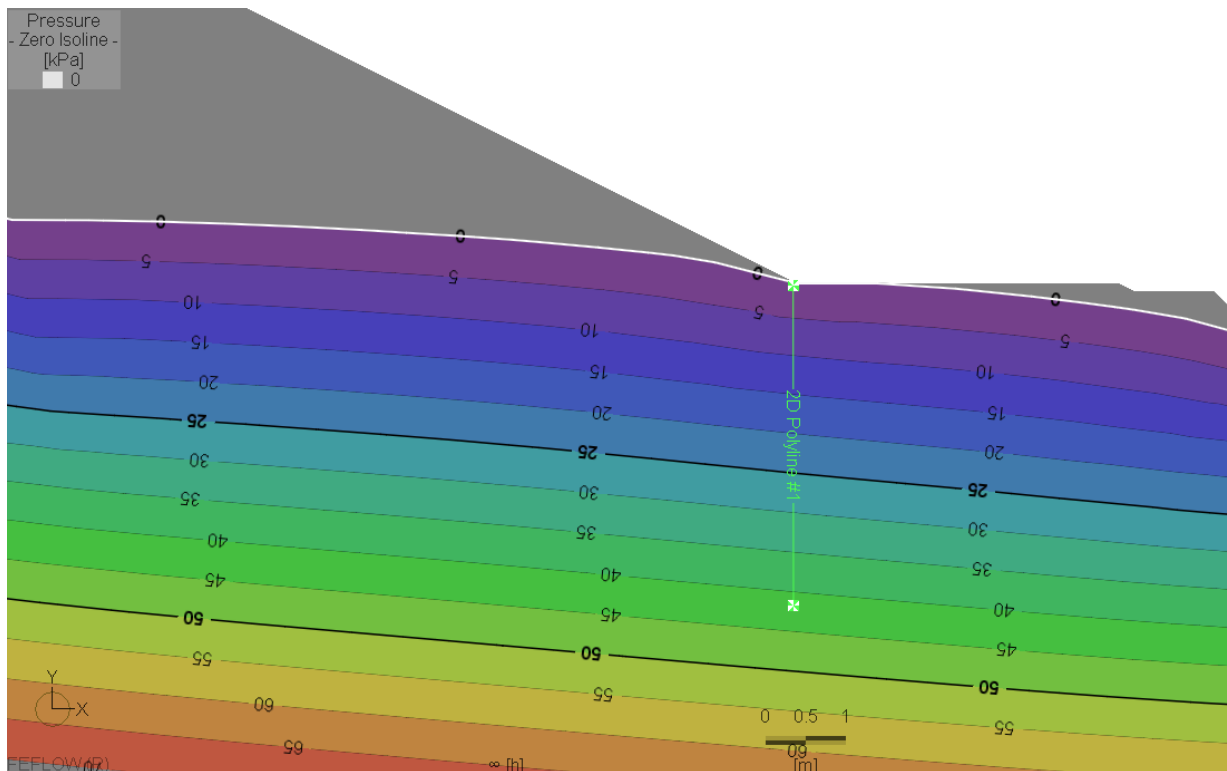


Figura 10 - Andamento delle pressioni interstiziali (kPa) per sezione tipo 4 (K nucleo 1E-8 m/s)

Profondità [m]	u_k [kPa]	$u_{inst,d}$ [kPa]	σ_k [kPa]	σ_k/u_k	$\sigma_{stb,d}$ [kPa]	$\sigma_{stb,d}/u_{inst,d}$
1	11,19	14,5	19	1,7	17,1	1,18
2	21,57	28	38	1,76	34,2	1,22
3	32,15	41,8	57	1,77	51,3	1,23
4	42,3	55	76	1,8	68,4	1,24

Scenario di verifica A: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,3 (sfavorevoli, carichi permanenti)

Profondità [m]	u_k [kPa]	$u_{inst,d}$ [kPa]	σ_k [kPa]	σ_k/u_k	$\sigma_{stb,d}$ [kPa]	$\sigma_{stb,d}/u_{inst,d}$
1	11,19	16,8	19	1,70	17,1	1,02
2	21,57	32,4	38	1,92	34,2	1,06
3	32,15	48,2	57	1,92	51,3	1,06
4	42,3	63,5	76	1,92	68,4	1,08

Scenario di verifica B: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,5 (sfavorevoli, carichi variabili)

Tabella 10 - Verifica al sifonamento sezione tipo 4 (K nucleo 1E-8 m/s)

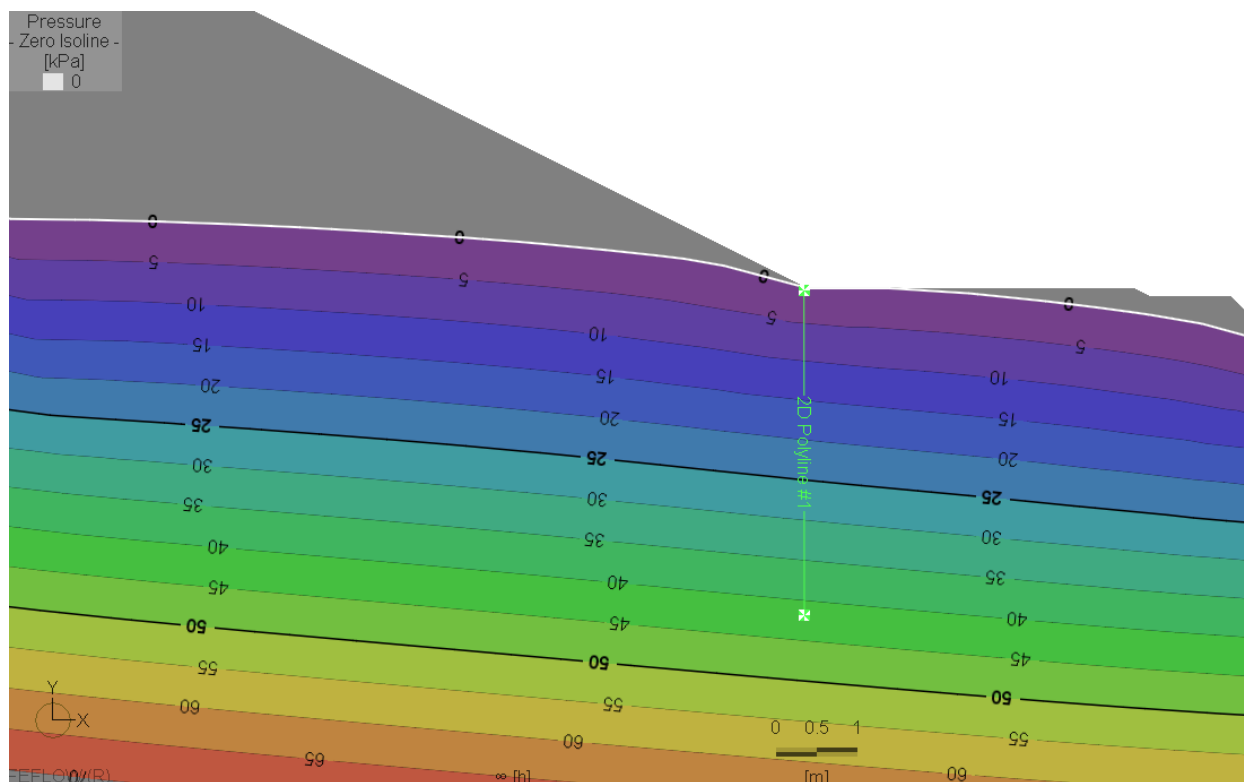


Figura 11 - Andamento delle pressioni interstiziali (kPa) per sezione tipo 4 (K nucleo 1E-6 m/s)

Profondità [m]	u_k [kPa]	$u_{inst,d}$ [kPa]	σ_k [kPa]	σ_k/u_k	$\sigma_{stb,d}$ [kPa]	$\sigma_{stb,d}/u_{inst,d}$
1	10,3	13,4	19	1,85	17,1	1,28
2	20,3	26,3	38	1,87	34,2	1,3
3	30,2	39,2	57	1,89	51,3	1,31
4	40	52	76	1,9	68,4	1,31

Scenario di verifica A: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,3 (sfavorevoli, carichi permanenti)

Profondità [m]	u_k [kPa]	$u_{inst,d}$ [kPa]	σ_k [kPa]	σ_k/u_k	$\sigma_{stb,d}$ [kPa]	$\sigma_{stb,d}/u_{inst,d}$
1	11,26	16,9	19	1,69	17,1	1,01
2	22,48	33,7	38	1,69	34,2	1,01
3	32,24	48,4	57	1,77	51,3	1,06
4	42,7	64,1	76	1,78	68,4	1,07

Scenario di verifica B: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,5 (sfavorevoli, carichi variabili)

Tabella 11 - Verifica al sifonamento sezione tipo 4 (K nucleo 1E-6 m/s)

6.2.5 Sezione tipo 5

Pressure
 - Isolines -
 [kPa]
 In-line labels

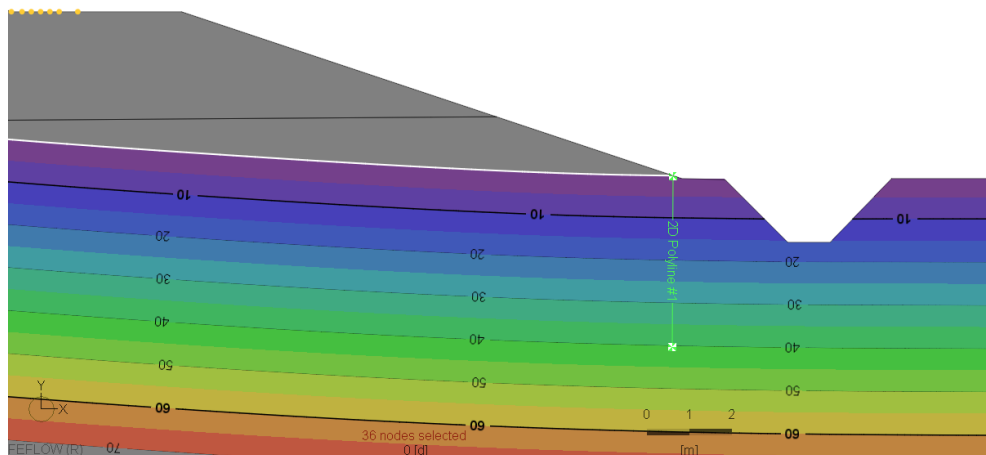


Figura 12 - Andamento delle pressioni interstiziali (kPa) per sezione tipo 5 (K nucleo 1E- m/s)

Profondità	uk	u _{inst,d}	σ _k	σ _k /uk	σ _{stb,d}	σ _{stb,d} /u _{inst,d}
[m]	[kPa]	[kPa]	[kPa]		[kPa]	
1	10,5	13,7	19	1,81	17,1	1,25
2	20,7	26,9	38	1,84	34,2	1,27
3	30,8	40	57	1,85	51,3	1,28
4	40,9	53,2	76	1,86	68,4	1,29

Scenario di verifica A: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,3 (sfavorevoli, carichi permanenti)

Profondità	uk	u _{inst,d}	σ _k	σ _k /uk	σ _{stb,d}	σ _{stb,d} /u _{inst,d}
[m]	[kPa]	[kPa]	[kPa]		[kPa]	
1	10,5	15,8	19	1,81	17,1	1,09
2	20,7	31,1	38	1,84	34,2	1,10
3	30,8	46,2	57	1,85	51,3	1,11
4	40,9	61,4	76	1,86	68,4	1,11

Scenario di verifica B: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,5 (sfavorevoli, carichi variabili)

Tabella 12 - Verifica al sifonamento sezione tipo 5 (K nucleo 1E-6 m/s)

6.2.6 Sezione tipo 6

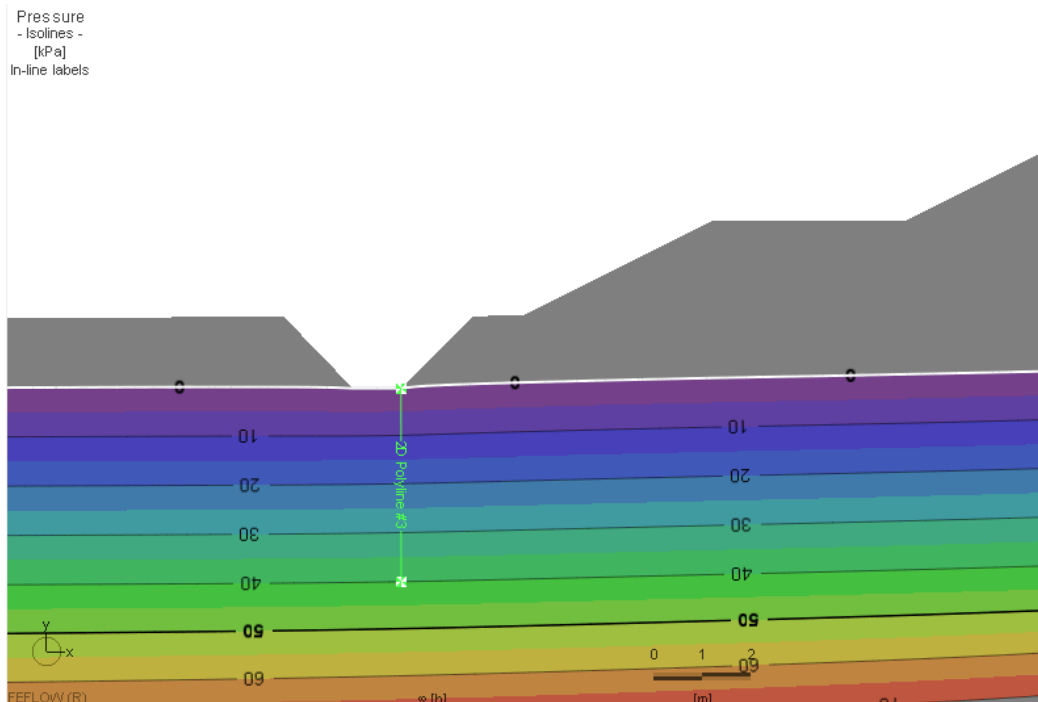


Figura 13 - Figura 14 - Andamento delle pressioni interstiziali (kPa) per sezione tipo 6 (K nucleo 1E-6 m/s)

Profondità [m]	u_k [kPa]	$u_{inst,d}$ [kPa]	σ_k [kPa]	σ_k/u_k	$\sigma_{stb,d}$ [kPa]	$\sigma_{stb,d}/u_{inst,d}$
1	10,3	13,4	19	1,85	17,1	1,28
2	20,3	26,3	38	1,87	34,2	1,3
3	30,2	39,2	57	1,89	51,3	1,31
4	40	52	76	1,9	68,4	1,31

Scenario di verifica A: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,3 (sfavorevoli, carichi permanenti)

Profondità [m]	u_k [kPa]	$u_{inst,d}$ [kPa]	σ_k [kPa]	σ_k/u_k	$\sigma_{stb,d}$ [kPa]	$\sigma_{stb,d}/u_{inst,d}$
1	10,3	15,5	19	1,84	17,1	1,11
2	20,3	30,5	38	1,87	34,2	1,12
3	30,2	45,3	57	1,89	51,3	1,13
4	40	60,0	76	1,90	68,4	1,14

Scenario di verifica B: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,5 (sfavorevoli, carichi variabili)

Tabella 13 - Verifica al sifonamento sezione tipo 6 (K nucleo 1E-6 m/s)

6.2.7 Sezione tipo 7

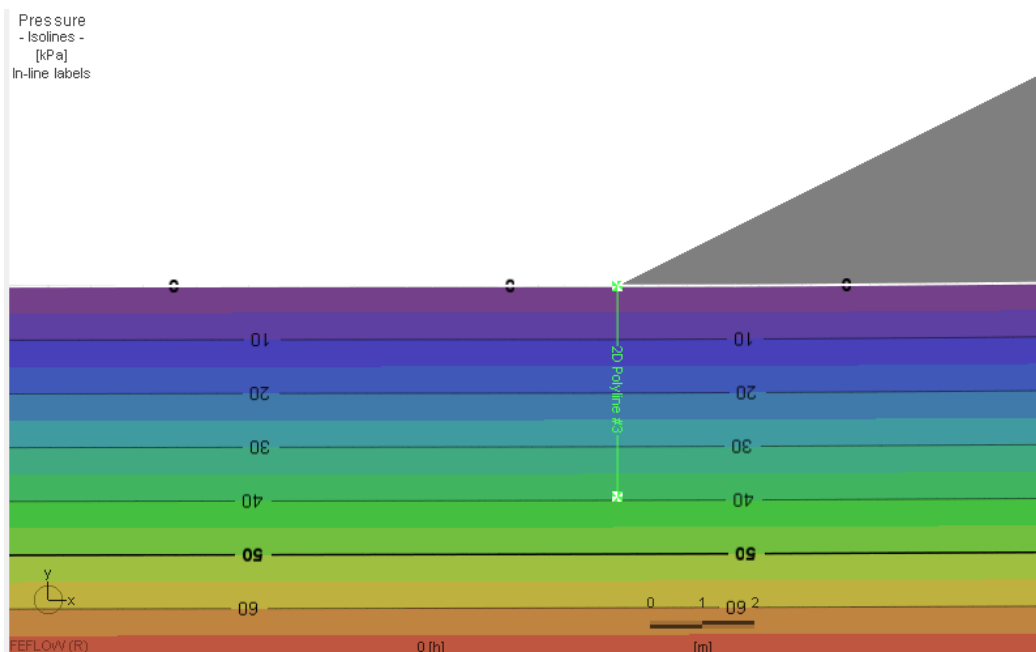


Figura 15 - Andamento delle pressioni interstiziali con terreno multistrato per sezione tipo 7 (K nucleo 1E-6 m/s)

Profondità [m]	u_k [kPa]	$u_{inst,d}$ [kPa]	σ_k [kPa]	σ_k/u_k	$\sigma_{stb,d}$ [kPa]	$\sigma_{stb,d}/u_{inst,d}$
1	9,8	12,7	19	1,94	17,1	1,34
2	19,6	25,5	38	1,93	34,2	1,34
3	29,5	38,3	57	1,93	51,3	1,34
4	39,3	51,1	76	1,93	68,4	1,34

Scenario di verifica A: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,3 (sfavorevoli, carichi permanenti)

Profondità [m]	u_k [kPa]	$u_{inst,d}$ [kPa]	σ_k [kPa]	σ_k/u_k	$\sigma_{stb,d}$ [kPa]	$\sigma_{stb,d}/u_{inst,d}$
1	9,8	14,7	19	1,94	17,1	1,16
2	19,6	29,4	38	1,94	34,2	1,16
3	29,5	44,3	57	1,93	51,3	1,16
4	39,3	59,0	76	1,93	68,4	1,16

Scenario di verifica B: coefficiente di combinazione 0,9 (azioni favorevoli, carichi permanenti), 1,5 (sfavorevoli, carichi variabili)

Tabella 14 - Verifica al sifonamento sezione tipo 7 (K nucleo 1E-6 m/s)

7. CONCLUSIONI

Le verifiche di filtrazione entro il complesso rilevati-terreno di fondazione, e relativa verifica di sicurezza al sifonamento, sono state eseguite a partire dalla costruzione di modelli bidimensionali in sezione verticale, con discretizzazione agli elementi finiti.

Le verifiche stesse hanno riguardato:

- in regime transitorio, le condizioni al contorno riferite agli idrogrammi di progetto per l'evento di piena con $Tr = 1000$ anni;
- in regime stazionario, con riferimento alle massime quote idrometriche per l'evento $Tr = 1000$ anni, la condizione teorica maggiormente cautelativa ("condizione critica"), ovvero di massima differenza di quota idrometrica tra i paramenti arginali, come specificato per i singoli scenari.

Sulla base degli scenari simulati con i modelli di flusso, le verifiche di compatibilità al sifonamento, sono state eseguite preliminarmente attraverso metodologie semplificate, e in fase successiva con verifica agli stati ultimi idraulici in accordo con il vigente D.M. Infrastrutture 26 giugno 2014 "Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)", rif. punto E.5.1, e relativi rimandi alle NTC 08 (capitolo 6.2.3.2 "*Verifiche nei confronti degli stati limite ultimi idraulici*").

Le verifiche risultano sempre soddisfatte, ovvero non si riscontrano condizioni determinanti il sifonamento, né in relazione ad andamenti transitori del campo delle pressioni nel rilevato nel corso dell'evento di piena ($Tr=1000$ anni), né in stazionario, con riferimento, per il medesimo evento, a scenari di verifica ampiamente cautelativi.