



CONSORZIO di BONIFICA dell' EMILIA CENTRALE

Corso Garibaldi n. 42 42121 Reggio Emilia - www.emiliacentrale.it - direzione@emiliacentrale.it
Tel. 0522-443211 Fax. 0522-443254 C.F. 91149320359

M - PRG.
18.01

Rev. 4
del
23.02.2021

Titolo: DM n. 517 del 16 dicembre 2021 - "Investimenti in infrastrutture idriche primarie per la sicurezza dell'approvvigionamento idrico" linea d'investimento M2C4 - I4.1 del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR)"

RIFUNZIONALIZZAZIONE DELLA TRAVERSA POSTA SUL TORRENTE ENZA IN LOCALITA' CEREZZOLA

Importo: €. **12'376'800,00**

Ente Finanziatore: **MIMS**

Tipologia Progetto				Riferimento Legislativo	Comune
Fattibilità	Definitivo	Esecutivo	Contabilità		Canossa (RE) Neviano degli Arduini (PR)
	X				

ALLEGATI:

Allegato n.	Titolo:
1	RELAZIONI TECNICHE E SPECIALISTICHE
Tavola:	Oggetto:
1.4	VALUTAZIONE DEI PROCESSI RILEVANTI DI TRASPORTO SOLIDO E DI FLUSSO IDRICO SOTTERRANEO NELLE OPERE DI RIQUALIFICAZIONE DEL NODO IDRAULICO DI CEREZZOLA SUL TORRENTE ENZA
Scala:	

Il Progettista Generale:
Dott. Ing. Ada Francesconi
dfrancesconi@emiliacentrale.it

Redazione Studio Specialistico:
Dott. Ing. Stefano Orlandini
Dott. Ing. Giovanni Moretti
Collaboratori alla Progettazione:
Dott. Ing. Emanuele Baratti
Dott.sa Ing. Elena Mocchi
Dott. Ing. Stefano Corradi
Dott. Geol. Alessandro Fontanesi
Dott.sa Valentina Preti
P.I. Mauro Bigliardi

Il Responsabile del Procedimento:
Dott. Ing. Pietro Torri

ptorri@emiliacentrale.it

Area Progettazione: SLPP	Codice Progetto: 221/19/00	Codice CUP: G83D21003240006	Codice CIG:
------------------------------------	--------------------------------------	---------------------------------------	-------------

Redatto:	Verificato:	Nome File:	Note:

Data Progetto : **31/03/2022**

Data Aggiornamento:

UNI EN ISO 9001:2015

UNI EN ISO 14001:2015

UNI ISO 45001:2018





UNIMORE

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI
MODENA E REGGIO EMILIA

VALUTAZIONE DEI PROCESSI RILEVANTI DI TRASPORTO SOLIDO E DI FLUSSO IDRICO SOTTERRANEO NELLE OPERE DI RIQUALIFICAZIONE DEL NODO IDRAULICO DI CEREZZOLA SUL TORRENTE ENZA

a cura di

Stefano Orlandini e Giovanni Moretti

Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari
Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia
Via Vivarelli 10, 41125 Modena
www.idrologia.unimore.it



ORLANDINI STEFANO
25.01.2022 08:43:20 GMT+00:00

SOMMARIO

Il Consorzio di Bonifica dell'Emilia Centrale sta sviluppando un progetto di fattibilità tecnico-economica inerente alla riqualificazione del nodo idraulico di Cerezzola sul torrente Enza, al confine tra il Comune di Canossa (Reggio Emilia) e il comune di Neviano degli Arduini (Parma). Nell'ambito di questo progetto il Consorzio ha affidato all'Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia il presente studio al fine di valutare gli aspetti rilevanti delle interazioni idrauliche e idrologiche tra sistema fluviale e opere idrauliche riqualificate. Lo studio si è focalizzato su cinque aspetti: (1) valutazione delle portate al colmo con assegnato periodi di ritorno, (2) verifica della stabilità del materiale d'alveo, (3) valutazione del rilascio di sedimenti dal bacino idrografico contribuente, (4) impatto sui flussi idrici sotterranei, e (5) impatto sull'opera di captazione sotterranea esistente. Le portate al colmo con assegnato periodo di ritorno sono state valutate nell'ambito di un'analisi Monte Carlo generale della risposta idrologica e idraulica del bacino del torrente Enza chiuso a Cerezzola alla sollecitazione climatica. Le correnti idriche superficiali in corrispondenza della traversa fluviale di Cerezzola sono state descritte dal personale del Consorzio di Bonifica dell'Emilia Centrale attraverso un modello bidimensionale in moto vario basato sulle equazioni di De Saint-Venant. Sulla base di tale descrizione idraulica, sono state valutate le tensioni tangenziali al fondo al fine di verificare la stabilità del materiale d'alveo osservato nel tratto fluviale in esame. Il volume di sedimenti rilasciato dal bacino idrografico del torrente Enza in risposta a precipitazioni con assegnato periodo di ritorno è stato valutato attraverso un'analisi Monte Carlo basata sulla formula di Schoklitsch assumendo che il fattore limitante per tale rilascio sia la capacità di trasporto del sistema fluviale. I flussi idrici sotterranei nel sistema serbatoio-acquifero-traversa fluviale sono stati descritti attraverso un modello tridimensionale basato sull'equazione di Richards. Sulla base di tale descrizione, sono state valutate diverse ipotesi progettuali con specifica attenzione agli effetti prodotti sulla esistente galleria drenante di captazione delle acque per l'uso pubblico gestita da IREN. I valori delle portate al colmo con assegnato periodo di ritorno ottenuti sono in ragionevole accordo con quelli basati su analisi di frequenza tradizionali. Questo supporta l'attendibilità dell'analisi Monte Carlo nel suo complesso. Le tensioni tangenziali al fondo appaiono compatibili con la stabilità del materiale d'alveo per eventi di piena con periodo di ritorno inferiore a 20 anni, anche nella fase iniziale di riqualificazione del nodo idraulico, dove il fondo del serbatoio non presenta un corazzamento ma è reso meno pendente rispetto alle condizioni originali dalle operazioni di scavo. Il rilascio di sedimenti dal bacino idrografico contribuente durante gli eventi di piena appare gestibile attraverso ragionevoli interventi di manutenzione periodica. Analogamente, l'accumulo di sedimenti fini con conduttività idraulica non inferiore a 10^{-5} metri al secondo all'interfaccia tra il deposito alluvionale filtrante e il corpo idrico superficiale appare controllabile attraverso ragionevoli interventi di manutenzione mirati a mantenere lo spessore di tale deposito al di sotto di circa 0.60 metri. In definitiva, i risultati ottenuti non indicano gravi problemi connessi alla ipotetica realizzazione degli interventi di riqualificazione del nodo idraulico di Cerezzola sul torrente Enza a condizione che venga attuata un'adeguata manutenzione per l'asportazione del materiale ghiaioso entrante nel serbatoio durante gli eventi di piena e per il controllo dei sedimenti fini che possono depositarsi durante i periodi di riempimento del serbatoio all'interfaccia tra deposito alluvionale contenente la galleria drenante gestita da IREN e corpo idrico superficiale formato a monte della traversa fluviale.

INDICE

SOMMARIO

1. INTRODUZIONE
 - 3.1. Motivazioni dello Studio
 - 3.2. Opere Idrauliche di Riqualificazione
 - 3.3. Interazioni con il Sistema Fluviale

2. CORRENTI SUPERFICIALI
 - 2.1. Portate al Colmo con Assegnato Periodo di Ritorno
 - 2.2. Stabilità del Materiale d'Alveo
 - 2.3. Rilasci di Sedimenti dal Bacino Idrografico Contribuente

3. FLUSSI IDRICI SOTTERRANEI
 - 3.1. Modellazione Tridimensionale dei Flussi Idrici Sotterranei
 - 3.2. Impatto delle Opere di Riqualificazione
 - 3.3. Impatto della Sedimentazione Fine

4. CONCLUSIONI

CAPITOLO 1: INTRODUZIONE

1.1 Motivazioni dello Studio

Il Consorzio di Bonifica dell'Emilia Centrale sta sviluppando un progetto di fattibilità tecnico-economica inerente alla riqualificazione del nodo idraulico di Cerezzola sul torrente Enza, al confine tra il Comune di Canossa (Reggio Emilia) e il Comune di Neviano degli Arduini (Parma). Nell'ambito di questo progetto il Consorzio ha affidato all'Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia il presente studio al fine di valutare gli aspetti rilevanti delle interazioni idrauliche e idrologiche tra sistema fluviale e opere idrauliche riqualificate. Si tratta essenzialmente della riqualificazione della traversa fluviale di Cerezzola finalizzata a migliorare la regolazione dei deflussi e a consentire l'invaso di volumi idrici utili per l'uso pubblico e per l'irrigazione. L'ubicazione del torrente Enza e, in particolare, quella della traversa fluviale di Cerezzola sono riportate nella Figura 1.

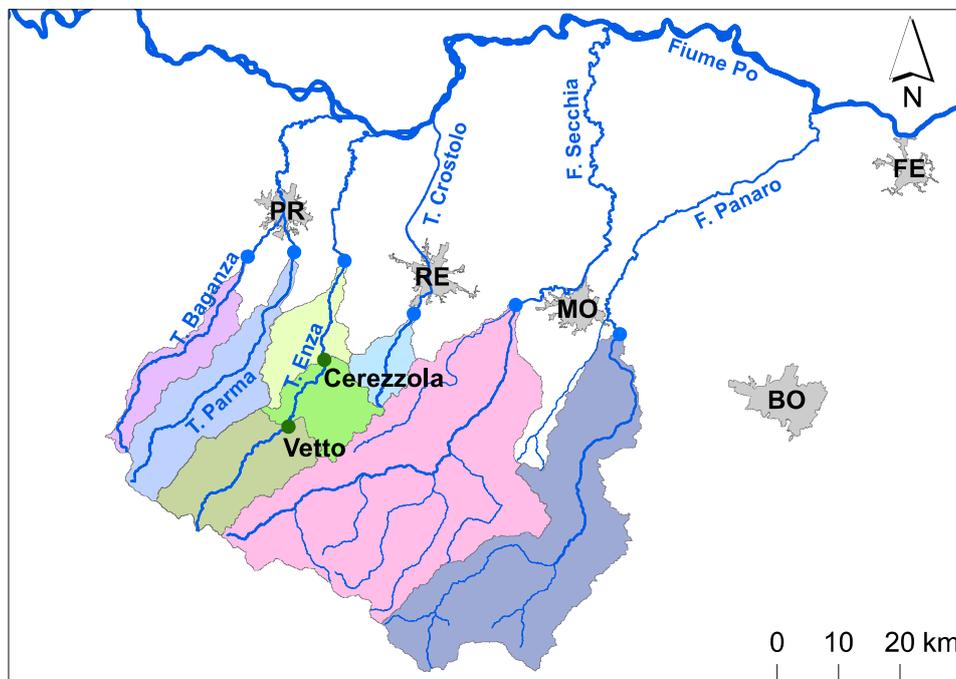


Figura 1. Ubicazione del bacino idrografico del torrente Enza nelle province di Reggio Emilia e Parma. È riportata in particolare l'ubicazione della traversa fluviale di Cerezzola.

1.2 Opere Idrauliche di Riqualificazione

La traversa fluviale di Cerezzola si trova pressoché all'apice della conoide alluvionale del torrente Enza. Essa permette la captazione tramite opere di presa superficiali di acque destinate all'uso irriguo e tramite un drenaggio subsuperficiale di acque destinate all'uso pubblico. La traversa poggia sul deposito alluvionale del torrente Enza andandone a intercettare i flussi superficiali e in parte anche quelli sotterranei con i setti di fondazione. Il progetto di riqualificazione del nodo idraulico di Cerezzola redatto dal Consorzio di Bonifica dell'Emilia Centrale prevede l'innalzamento di tutto il coronamento della traversa con opere abbattibili e lo scavo a monte della stessa del materiale d'alveo in modo tale che possa essere formato un serbatoio per la riserva idrica da utilizzare nei mesi estivi per l'uso irriguo.

1.3 Interazioni con il Sistema Fluviale

Lo studio delle interazioni idrauliche e idrologiche tra il sistema fluviale del torrente Enza e la traversa fluviale riqualificata di Cerezzola si è focalizzato su cinque punti: (1) valutazione delle portate al colmo con assegnato periodo di ritorno, (2) verifica della stabilità del materiale d'alveo, (3) valutazione del rilascio di sedimenti dal bacino idrografico contribuente, (4) impatto sui flussi idrici sotterranei, e (5) impatto sull'opera di captazione sotterranea esistente. Le portate al colmo con assegnato periodo di ritorno sono state valutate nell'ambito di un'analisi Monte Carlo generale della risposta idrologica e idraulica del bacino del torrente Enza chiuso a Cerezzola alla sollecitazione climatica. Le correnti idriche superficiali in corrispondenza della traversa fluviale di Cerezzola sono state descritte dal personale del Consorzio di Bonifica dell'Emilia Centrale attraverso un modello bidimensionale in moto vario basato sulle equazioni di De Saint-Venant e, sulla base di tale descrizione idraulica, sono state valutate le tensioni tangenziali al fondo al fine di verificare la stabilità del materiale d'alveo osservato nel tratto fluviale in esame. Il volume di sedimenti rilasciato dal bacino idrografico del torrente Enza in risposta a precipitazioni con assegnato periodo di ritorno è stato valutato attraverso un'analisi Monte Carlo basata sulla formula di Schoklitsch assumendo che il fattore limitante per tale rilascio sia la capacità di trasporto del sistema fluviale. I flussi idrici sotterranei nel sistema serbatoio-acquifero-traversa fluviale sono stati descritti attraverso un modello tridimensionale basato sull'equazione di Richards e, sulla base di tale descrizione, sono state valutate diverse ipotesi progettuali con specifica attenzione agli effetti prodotti sulla esistente galleria drenante di captazione delle acque per l'uso pubblico gestita da IREN. Le analisi condotte e i risultati ottenuti sono illustrate nei seguenti capitoli 2 e 3. Le conclusioni dello studio sono riportate nel capitolo 4.

CAPITOLO 2: CORRENTI SUPERFICIALI

2.1. Portate al Colmo con Assegnato Periodo di Ritorno

Le portate al colmo rilasciate dal bacino idrografico del torrente Enza a Cerezzola sono state valutate eseguendo un'analisi Monte Carlo. Il bacino del torrente Enza chiuso a Cerezzola ha estensione $A = 45\,7212\,000\text{ m}^2$ e lunghezza dell'asta principale $L = 44\,049\text{ m}$. Sono state considerate le curve di probabilità pluviometrica

$$i_T(d) = \text{ARF}(A, d) a_T d^{n_T-1},$$

dove i è l'intensità di precipitazione in mm h^{-1} , T è il periodo di ritorno in a , d è la durata di precipitazione in h , ARF è il fattore di riduzione all'area, a_T e n_T sono parametri. Il valore di ARF dipende dall'estensione del bacino idrografico A e dalla durata di precipitazione d secondo la relazione

$$\text{ARF}(A, d) = \max(0.25, 1 - 0.048 A^{0.36-0.01 \ln A} d^{-0.35}).$$

I valori di a_T sono pari a 34.27, 40.47, 46.55, 54.56, 60.64, 66.75, 74.85, 81.00 mm h^{-1} , per T pari a 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 e 1000 a , rispettivamente. I valori di n_T sono pari a 0.367, 0.360, 0.355, 0.350, 0.348, 0.345, 0.343 e 0.341, per T pari a 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 e 1000 a , rispettivamente. La generazione delle precipitazioni efficaci è basata sull'uso di un coefficiente di deflusso costante ϕ , variabile tra 0.60 e 0.70 nel caso in esame. La concentrazione delle precipitazioni efficaci lungo il reticolo idrografico è descritta considerando una velocità di scorrimento superficiale v costante, variabile tra 1.0 e 2.5 m s^{-1} nel caso in esame. Al fine di incorporare la variabilità delle condizioni idroclimatiche possibili e gli effetti di memoria e non linearità inerenti alla risposta idrologica del bacino idrografico, il coefficiente di deflusso ϕ e la velocità di scorrimento superficiale v sono stati generati casualmente in ciascuna simulazione Monte Carlo considerando distribuzioni di probabilità uniformi. Per ogni coppia di parametri ϕ e v generati in modo casuale, è stata identificata la portata al colmo come massima portata rilasciata al variare della durata di precipitazione. Si ottiene che

$$Q_p = \text{ARF}(A, d) \phi a_T d^{n_T-1} A \min(d/t_c, 1),$$

dove $t_c = L/v$ è il tempo di corrivazione e deve essere espresso in h . Per ogni periodo di ritorno T sono state eseguite 10 000 simulazioni Monte Carlo. I valori delle medie e delle deviazioni standard σ ottenuti sono riportati nella Tabella 1. Le medie sono indici di tendenza centrale. Le deviazioni standard σ sono indici di dispersione attorno le medie e forniscono una misura dell'incertezza della valutazione fornita dalla media. I valori delle portate al colmo, delle relative incertezze e dei relativi periodi di ritorno sono anche riportati in seguito nella Figura 2a. Il numero elevato di simulazioni Monte Carlo garantisce la stabilità dei risultati rispetto alla ripetizione delle simulazioni. Si osserva inoltre che le portate al colmo Q_p si riscalgano con il periodo di ritorno T secondo una legge logartimica come atteso dalla teoria dei valori estremi.

Tabella 1. Portate al colmo e rilasci di sedimenti per assegnati periodi di ritorno. I valori riportati sono quelli medi m ottenuti nelle simulazioni Monte Carlo mentre e le deviazioni standard σ calcolate sulle stesse simulazioni Monte Carlo

T (a)	m_{Q_p} ($m^3 s^{-1}$)	σ_{Q_p} ($m^3 s^{-1}$)	m_{SY} (m^3)	σ_{SY} (m^3)	m_{SY} (t)	σ_{SY} (t)
5	693	106	3325	668	8811	1771
10	808	123	4711	779	12484	2064
20	921	142	6207	917	16448	2431
50	1070	165	8345	1089	22113	2887
100	1183	184	10127	1226	26836	3250
200	1297	201	11924	1359	31598	3603
500	1445	227	14537	1579	38523	4183
1000	1561	245	16543	1720	43838	4558

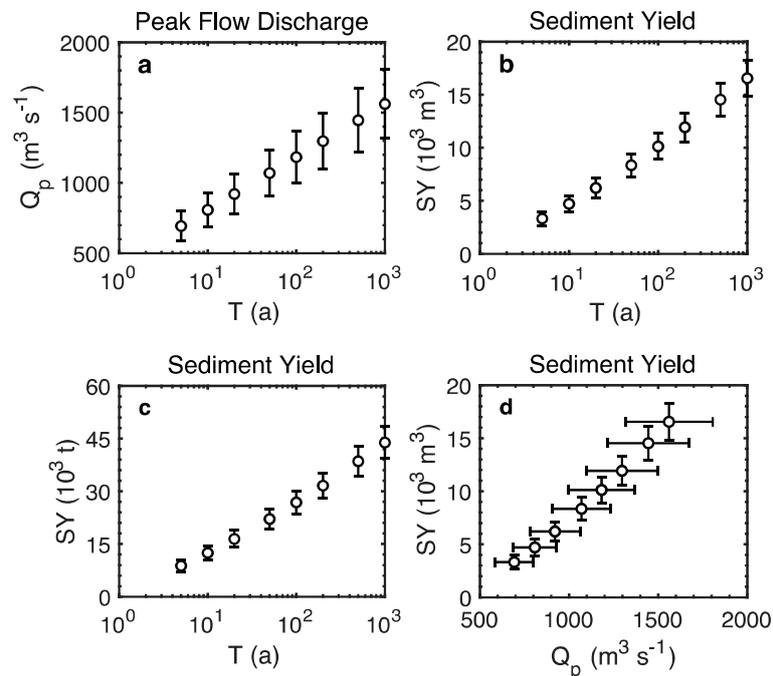


Figura 2. Ricorrenza degli eventi di piena espressa in termini di periodo di ritorno T e valori corrispondenti (a) della portata al colmo Q_p in $m^3 s^{-1}$, (b) del volume rilasciato di sedimenti SY in m^3 , (c) della massa di sedimenti SY in t. (d) Relazione tra portata al colmo Q_p e volume rilasciato di sedimenti SY in m^3 . I valori riportati crescono con i valori del periodo di ritorno T considerati, pari a 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 e 1000 a.

2.2. Stabilità del Materiale d'Alveo

La stabilità del materiale d'alveo è verificata utilizzando le descrizioni delle correnti bidimensionali che si possono manifestare in regime di piena, calcolando le tensioni tangenziali al fondo e confrontando tali tensioni con quelle critiche per la mobilità del fondo. Il dominio sul quale sono stati calcolati i valori minimo, massimo, medio e la deviazione standard della tensione tangenziale al fondo è quello riportato in Figura 3 e rappresenta la parte del serbatoio in progetto attraversata dall'alveo attivo nei periodi dell'anno in cui la parte mobile della traversa sarà abbattuta. La composizione del materiale d'alveo è stata osservata sul campo come riportato nelle Figure 4 e 5.

Le dimensioni caratteristiche d_{50} e d_{84} del materiale d'alveo sono state ottenute attraverso la procedura di conteggio dei ciottoli di Wolman (*Wolman pebble counting procedure*).



Figura 3. L'area del nuovo serbatoio che verrà attraversata dall'alveo attivo nei periodi in cui l'opera di sbarramento in progetto sarà abbattuta. Le tensioni tangenziali riportate in Tabella 3 sono calcolate all'interno del perimetro blu.



Figura 4. Rilievo e campionamento del materiale d'alveo sul torrente Enza a Cerezzola (Reggio Emilia) con specifica attenzione al materiale superficiale e all'azione di corazzamento da esso svolto.



Figura 5. Rilievo e campionamento del materiale d'alveo sul torrente Enza a Cerezzola (Reggio Emilia) con specifica attenzione al materiale subsuperficiale presente nei primi 20–30 cm del profilo verticale. Le proprietà di tale materiale d'alveo è incorporata nella formula di Andrews.

Le tensioni tangenziali critiche per la mobilità del fondo sono valutate utilizzando le equazioni di Shields, di Komar e di Andrews. Secondo l'equazione di Shilelds si ha che

$$\tau_c = \theta_c g (\rho_s - \rho) d_{84},$$

dove θ_c è un parametro che può essere assunto pari a 0.006, g è l'accelerazione di gravità assunta pari a 9.81 m s^{-2} , ρ_s è la densità del materiale di fondo assunta pari a 2650 kg m^{-3} , ρ è la densità dell'acqua assunta pari a 1000 kg m^{-3} , d_{84} è il diametro medio dei sedimenti in m che è maggiore di quello dell'84% dei sedimenti che compongono l'alveo fluviale. Si considera tale diametro per incorporare nella verifica l'effetto di corazzamento del fondo. Secondo l'equazione di Komar si ha che

$$\tau_c = \theta_c g (\rho_s - \rho) d_{50}^{0.65} d_{84}^{0.35},$$

dove θ_c è un parametro che può essere assunto pari a 0.045. Secondo l'equazione di Andrews si ha che

$$\tau_c = \theta_c g (\rho_s - \rho) d_{84},$$

dove

$$\theta_c = 0.0834 \left(d_{84} / d_{50}^{(\text{substrato})} \right)^{-0.872},$$

dove $d_{50}^{(\text{substrato})}$ è il diametro mediano del substrato. I valori di θ_c , dei diametri utili e delle tensioni critiche risultanti sono riportati nella Tabella 2. I valori critici delle tensioni tangenziali al fondo sono stati calcolati considerando un materiale d'alveo con d_{50} pari a 55 mm, d_{84} pari a 104 mm, e $d_{50}^{(\text{substrato})}$ pari a 30 mm.

Tabella 2. Tensioni tangenziali al fondo critiche per il materiale d'alveo osservato, con d_{50} superficiale pari a 55 mm, d_{84} superficiale pari a 104 mm, d_{50} del substrato pari a 30 mm.

Formulazione	θ_c (-)	d_{84} (m)	$d_{50}^{(\text{substrato})}$ (m)	τ_c (Pa)
Shields	0.060	104	Non Usato	101
Komar	0.045	104	Non Usato	76
Andrews	0.028	104	30	47

Le tensioni tangenziali τ ottenute attraverso la relazione

$$\tau = \rho g R S,$$

dove ρ è la densità dell'acqua, g è l'accelerazione di gravità, R è il raggio idraulico, S è la pendenza di attrito, sono riportate nella Tabella 3 per le diverse configurazioni geometriche già considerate nelle simulazioni idrauliche effettuate dal personale del Consorzio di Bonifica. Le simulazioni considerate per l'analisi delle tensioni tangenziali descrivono lo stato di fatto e tre stati di progetto corrispondenti al caso in cui l'alveo a monte della traversa, nella sua porzione all'interno del serbatoio, abbia la pendenza di progetto pari a 0.001, al caso in cui a causa di un parziale interrimento tale pendenza si attesti a un valore pari a 0.003 e, infine, al caso di un interrimento completo in cui la pendenza del fondo ritorni a essere quella dello stato di fatto, ovvero 0.006.

Tabella 3. Tensioni tangenziali al fondo ottenute per diverse configurazioni geometriche dell'alveo a monte della traversa in corrispondenza del transito di portate con differenti tempi di ritorno. Sono riportati i valori minimi τ_{\min} , massimi τ_{\max} , medi m_{τ} , e le deviazioni standard s_{τ} .

Stato	T (a)	τ_{\min} (Pa)	τ_{\max} (Pa)	m_{τ} (Pa)	s_{τ} (Pa)
Stato di Fatto	20	0.3	224.2	97.3	32.6
	50	1.0	253.7	112.3	37.1
	100	1.2	272.6	122.2	40.2
	200	1.3	303.8	131.4	43.4
Stato di Progetto #1 (numerazione data nel progetto) Pendenza del fondo $i_f = 0.001$	20	0.0	436.3	34.9	36.8
	50	0.0	460.8	43.0	41.9
	100	0.0	497.6	49.0	46.0
	200	0.0	538.2	54.9	50.1
Stato di Progetto #4 (numerazione data nel progetto) Interrimento parziale, $i_f = 0.003$	20	0.0	695.7	86.6	58.8
	50	0.0	709.3	99.6	64.3
	100	0.0	706.6	106.3	66.6
	200	0.0	717.1	113.8	69.6
Stato di Progetto #5 (numerazione data nel progetto) Interrimento completo, $i_f = 0.006$	20	0.0	381.2	108.3	60.4
	50	0.0	395.2	121.5	65.5
	100	0.0	405.3	131.0	69.1
	200	0.0	413.7	139.3	72.3

Come emerge dai dati riportati nella Tabella 3, le tensioni tangenziali aumentano all'aumentare del tempo di ritorno T delle correnti superficiali di piena e con la pendenza del fondo, sebbene il loro calcolo sia in realtà basato sulla pendenza di attrito S . In particolare si può notare come i valori medi delle tensioni tangenziali al fondo, assumano per lo stato di fatto valori molto simili a quelli dello stato di progetto con medesima pendenza 0.006. Confrontando i valori medi riportati nella Tabella 3 con i valori di tensione tangenziale critica riportati nella Tabella 2, è possibile ipotizzare il comportamento descritto in seguito. Le tensioni tangenziali al fondo che si sviluppano nello stato di progetto con la pendenza del fondo del serbatoio pari a 0.001 sono di valore molto simili se non inferiori a quelle critiche ottenute con la formula di Andrews per eventi di piena con periodo di ritorno T pari a 50 a. Questo indica che la sistemazione dell'alveo necessaria per la realizzazione del serbatoio è stabile in virtù della sua scarsa pendenza nonostante l'alveo possa non essere corazzato nella fase iniziale di realizzazione della riqualificazione in esame. D'altro canto, in queste condizioni si può ipotizzare che una certa frazione di materiale solido trasportato si possa sedimentare e andare ad alterare la pendenza di progetto. Per pendenze del fondo pari a 0.003 e 0.006 l'alveo risulta comunque stabile almeno per eventi con periodo di ritorno T inferiore o uguale a 20 a.

2.3. Rilasci di Sedimenti dal Bacino Idrografico Contribuente

Il rilascio di sedimenti dal bacino idrografico del torrente Enza chiuso alla sezione di Cerezzola è stato valutato assumendo che esso sia limitato dalla capacità di trasporto e non dalla disponibilità di sedimenti. Tale assunzione appare in ogni caso conservativa. Il trasporto di sedimenti al fondo è stato valutato utilizzando l'equazione di Schoklitsch, ovvero

$$q_{sb} = \frac{2.5}{\rho_s/\rho} S^{3/2} (q - q_c)$$

dove q_{sb} è la portata volumetrica di sedimenti per unità di larghezza della corrente in $m^2 s^{-1}$, ρ_s è la densità dei sedimenti ed è assunta nel presente studio pari a $2650 kg m^{-3}$, ρ è la densità dell'acqua ed è assunta nel presente studio pari a $1000 kg m^{-3}$, S è la pendenza di attrito della corrente, q è la portata volumetrica di acqua per unità di larghezza della corrente in $m^2 s^{-1}$, e q_c è la portata critica al di sotto della quale non si ha trasporto di sedimenti al fondo ed è data dalla relazione

$$q_c = 0.26 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)^{5/3} \frac{d_{40}^{3/2}}{S^{7/6}}$$

dove q_c è espressa in $m^2 s^{-1}$, d_{40} è il diametro mediano dei sedimenti in m che è maggiore di quello del 40% dei sedimenti che compongono l'alveo fluviale. La portata volumetrica di sedimenti che si muovono sul fondo e attraversano la sezione fluviale è data dalla equazione

$$Q_{sb} = q_{sb} W$$

dove Q_{sb} è la portata volumetrica di sedimenti in $m^3 s^{-1}$ e W è la larghezza della corrente in m, mentre la portata in massa di sedimenti che si muovono sul fondo e attraversano la sezione fluviale è data dalla equazione

$$G_{sb} = \rho_s Q_{sb}$$

dove G_{sb} è la portata in massa di sedimenti in $kg s^{-1}$. Il volume di sedimenti rilasciato dall'area contribuente di monte alla sezione fluviale è pari a

$$SY = \int_0^D Q_{sb} dt$$

dove SY è il volume di sedimenti rilasciato (*sediment yield*) in m^3 e D è la durata dell'evento di piena. Si noti come nel presente studio si assuma che il rilascio di sedimenti sia limitato dalla capacità di trasporto (*transport limited*) e non dalla disponibilità di sedimenti che possono essere presi dal fondo (*detachment limited*). Le stime fornite rappresentano pertanto il limite superiore dei valori di rilascio di sedimenti che ci si può attendere.

Il rilascio di sedimenti è valutato estendendo l'analisi Monte Carlo utilizzata per la valutazione della portata al colmo. Si noti che le durate critiche che massimizzano il rilascio di sedimenti sono generalmente differenti rispetto a quelle che massimizzano le portate al colmo. Oltre al coefficiente di deflusso ϕ e alla velocità di scorrimento v , si è fatto variare in modo casuale il diametro mediano dei sedimenti d_{40} che è maggiore di quello del 40% dei sedimenti che compongono l'alveo fluviale tra gli estremi 40 e 48 mm con distribuzione di probabilità uniforme. I risultati ottenuti dalle simulazione Monte Carlo di 10000 casi sono riportata a titolo di esempio nella Figura 6 per eventi di precipitazione con periodo di ritorno T pari a 200 a. Gli stessi risultati sono riportando considerando i valori medi (marker circolare) e le deviazioni standard (barre di incertezza) delle variabili di risposta nelle Figure 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 14, per eventi di precipitazione con periodo di ritorno pari a 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 e 1000 a, rispettivamente. Il volume di sedimenti rilasciato SY è riportato in funzione del periodo di ritorno T dell'evento di precipitazione nella Figura 2b in m^3 e nella Figura 2c in t. Nella Figura 2d è riportata la relazione tra portata al colmo Q_p in $m^3 s^{-1}$ e rilascio di sedimenti SY in m^3 .

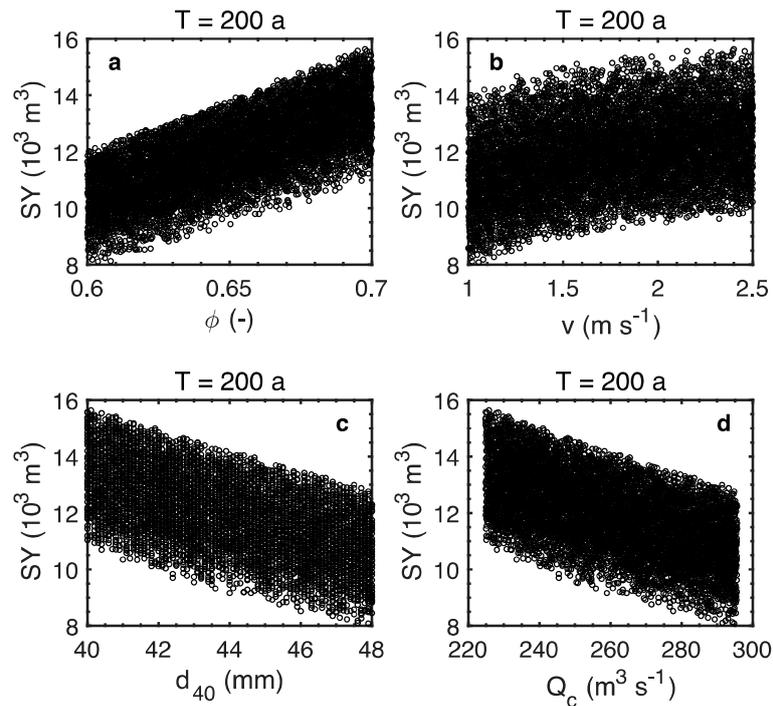


Figura 6. Analisi Monte Carlo del rilascio di sedimenti SY ottenuto al variare (a) del coefficiente di deflusso ϕ , (b) della velocità di scorrimento superficiale v e (c) del diametro medio dei sedimenti d_{40} . La relazione tra portata critica Q_c e rilascio di sedimenti SY è illustrata nella Figura 6d.

Il rilascio di sedimenti SY dal bacino idrografico contribuente risulta inferiore a 20000 m³ anche per eventi di piena con periodo di ritorno elevato. Tali rilasci appaiono pertanto gestibili attraverso interventi di manutenzione del sistema fluviale in corrispondenza della traversa di Cerezzola finalizzati alla rimozione del materiale d'alveo in eccesso rispetto a quello necessario per il mantenimento del deposito alluvionale contenente la galleria drenante di IREN.

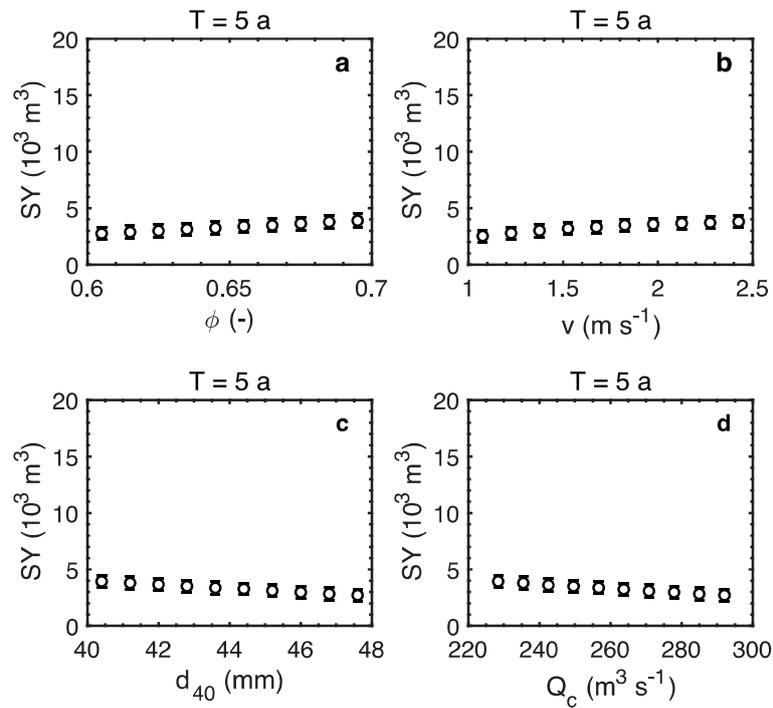


Figura 7. Volume rilasciato di sedimenti SY in relazione (a) al coefficiente di deflusso ϕ , (b) alla velocità media di scorrimento superficiale v , (c) al diametro medio dei sedimenti d_{40} , e (d) alla portata critica $Q_c = q_c W$, per eventi di precipitazione aventi periodo di ritorno T pari a 5 a.

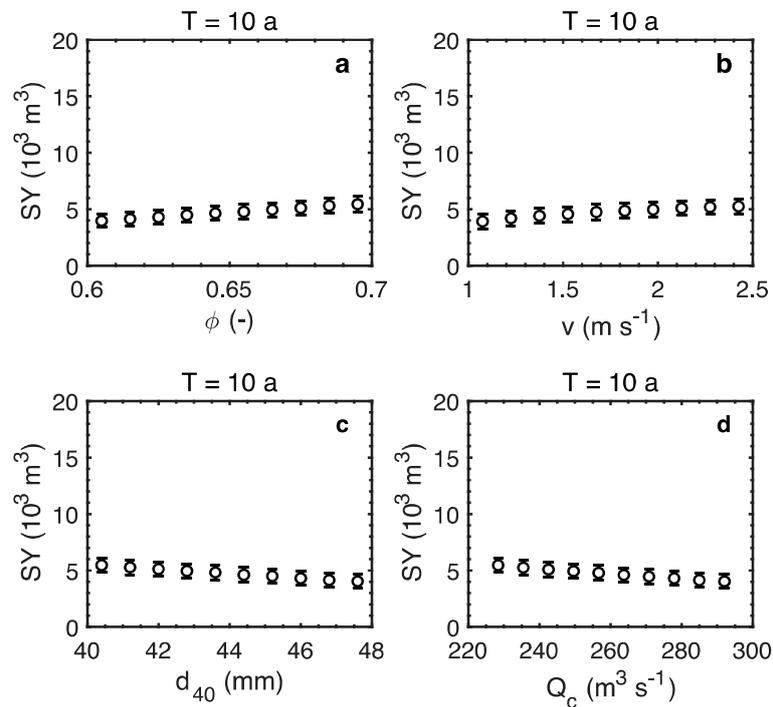


Figura 8. Volume rilasciato di sedimenti SY in relazione (a) al coefficiente di deflusso ϕ , (b) alla velocità media di scorrimento superficiale v , (c) al diametro medio dei sedimenti d_{40} , e (d) alla portata critica $Q_c = q_c W$, per eventi di precipitazione aventi periodo di ritorno T pari a 10 a.

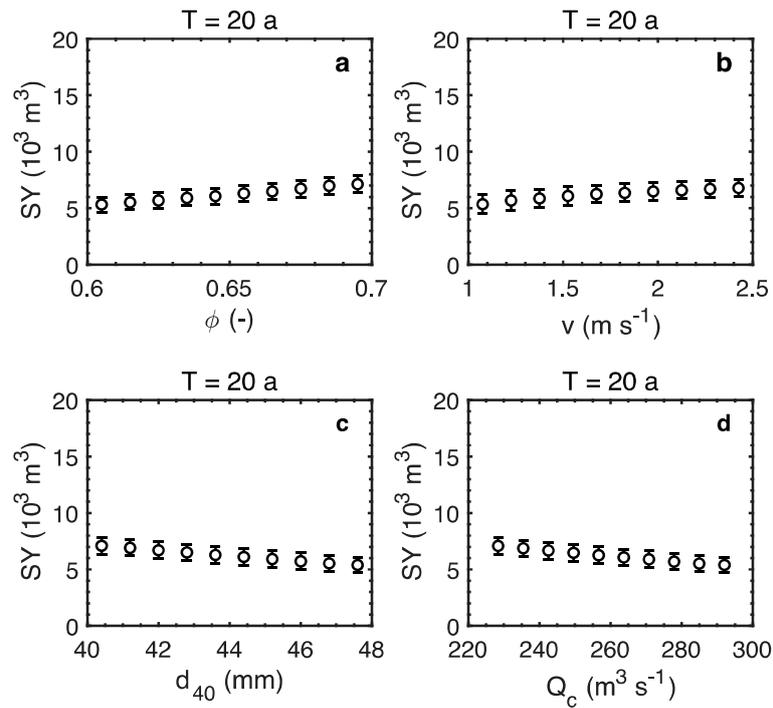


Figura 9. Volume rilasciato di sedimenti SY in relazione (a) al coefficiente di deflusso ϕ , (b) alla velocità media di scorrimento superficiale v , (c) al diametro medio dei sedimenti d_{40} , e (d) alla portata critica $Q_c = q_c W$, per eventi di precipitazione aventi periodo di ritorno T pari a 20 a.

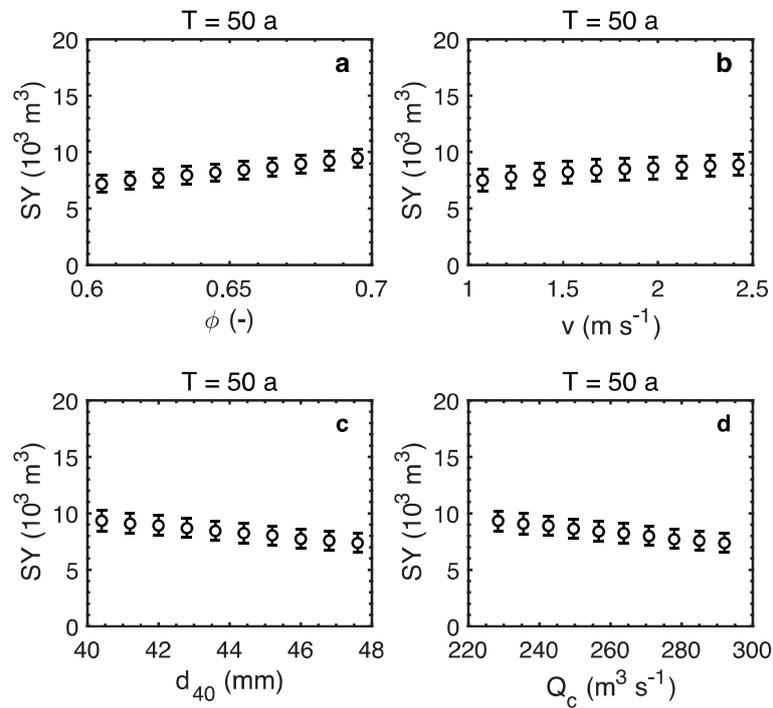


Figura 10. Volume rilasciato di sedimenti SY in relazione (a) al coefficiente di deflusso ϕ , (b) alla velocità media di scorrimento superficiale v , (c) al diametro medio dei sedimenti d_{40} , e (d) alla portata critica $Q_c = q_c W$, per eventi di precipitazione aventi periodo di ritorno T pari a 50 a.

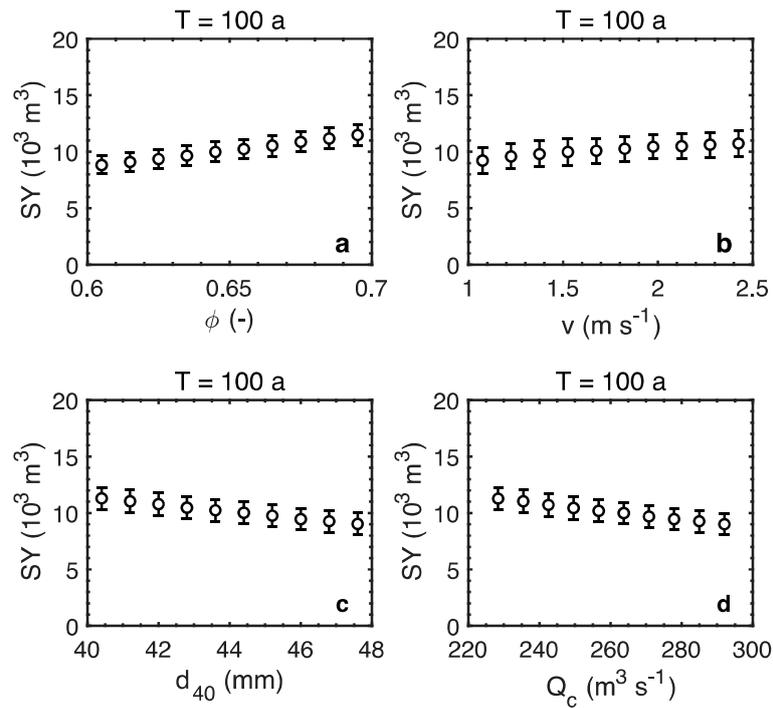


Figura 11. Volume rilasciato di sedimenti SY in relazione (a) al coefficiente di deflusso ϕ , (b) alla velocità media di scorrimento superficiale v , (c) al diametro medio dei sedimenti d_{40} , e (d) alla portata critica $Q_c = q_c W$, per eventi di precipitazione aventi periodo di ritorno T pari a 100 a.

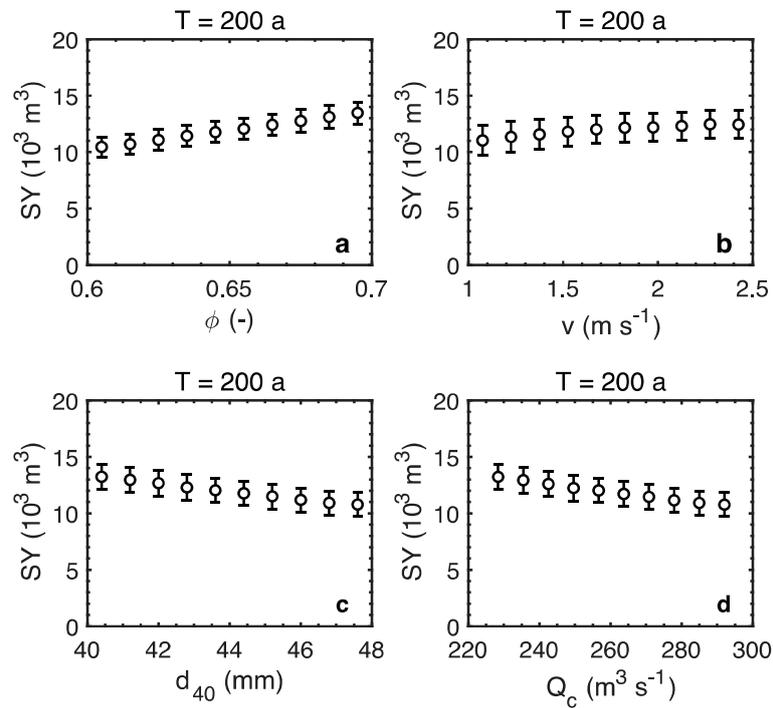


Figura 12. Volume rilasciato di sedimenti SY in relazione (a) al coefficiente di deflusso ϕ , (b) alla velocità media di scorrimento superficiale v , (c) al diametro medio dei sedimenti d_{40} , e (d) alla portata critica $Q_c = q_c W$, per eventi di precipitazione aventi periodo di ritorno T pari a 200 a.

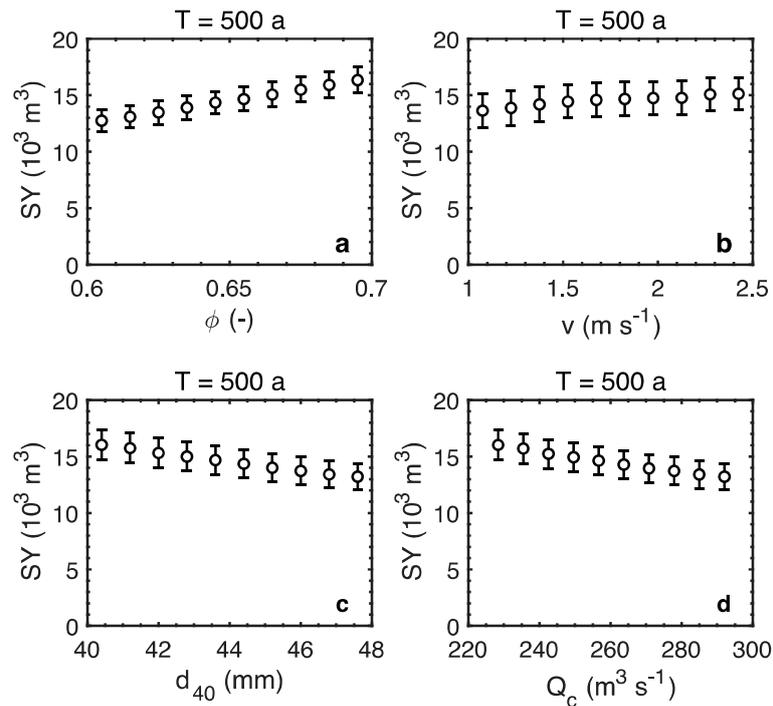


Figura 13. Volume rilasciato di sedimenti SY in relazione (a) al coefficiente di deflusso ϕ , (b) alla velocità media di scorrimento superficiale v , (c) al diametro medio dei sedimenti d_{40} , e (d) alla portata critica $Q_c = q_c W$, per eventi di precipitazione aventi periodo di ritorno T pari a 500 a.

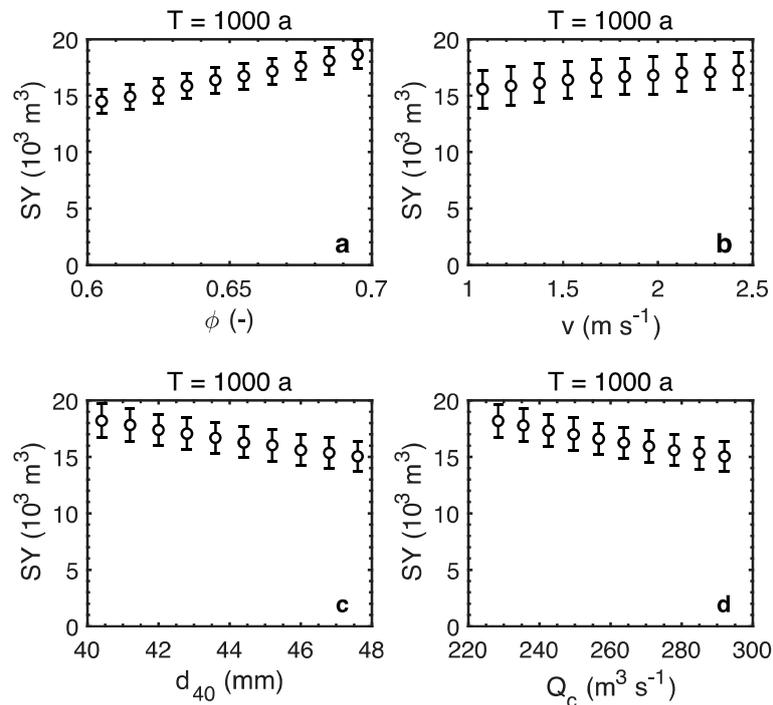


Figura 14. Volume rilasciato di sedimenti SY in relazione (a) al coefficiente di deflusso ϕ , (b) alla velocità media di scorrimento superficiale v , (c) al diametro medio dei sedimenti d_{40} , e (d) alla portata critica $Q_c = q_c W$, per eventi di precipitazione aventi periodo di ritorno T pari a 1000 a.

CAPITOLO 3: FLUSSI IDRICI SOTTERRANEI

3.1. Modellazione Tridimensionale dei Flussi Idrici Sotterranei

Per l'analisi dell'influenza delle strutture in progetto sulle strutture esistenti, in particolare sull'opera di presa subalvea in gestione a IREN che alimenta la rete di distribuzione acquedottistica, si è proceduto con la definizione di un modello tridimensionale per la ricostruzione dei flussi idrici sotterranei. Con tale modello sono state effettuate cinque differenti simulazioni che descrivono altrettanti scenari che verranno elencati nel dettaglio in seguito. Il modello, come riportato in Figura 15, si sviluppa prendendo come riferimento la traversa di Cerezzola per circa 1 km verso monte e per 2.5 km verso valle. La larghezza del modello è definita dall'alveo attivo e dai terrazzi alluvionali stabili prospicienti lo stesso. Il modello si sviluppa poi nella direzione verticale fino a incontrare lo strato impermeabile. Lo spessore dello strato permeabile è stato dedotto dalle stratigrafie riportate nella relazione dell'indagine geognostica e sismica effettuata da Geolog nei mesi di ottobre e novembre 2019. L'andamento delle superficie superiore del modello è stata definita utilizzando il modello digitale del terreno con risoluzione $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ della Regione Emilia Romagna che si estende lungo tutta l'asta del Torrente Enza dalla confluenza con il Fiume Po fino alla traversa di Cerezzola. Per la parte di modello che invece si sviluppa a monte, sono stati utilizzati punti quotati definiti attraverso un rilievo topografico eseguito nei mesi di ottobre e novembre 2019 e fornito dal Consorzio di Bonifica dell'Emilia Centrale. Il dominio nel suo sviluppo orizzontale è stato corredato dagli elementi principali, quali andamento in pianta dei manufatti esistenti, dei setti esistenti e dei setti in progetto e della galleria drenante esistente. In tal modo la maglia di calcolo triangolare si adagia in modo corretto su tali elementi e si raffittisce automaticamente in prossimità degli stessi. Nonostante il materiale di subalveo costituente il dominio, in base alle indagini geologiche, possa essere considerato omogeneo e isotropo, il dominio è stato suddiviso verticalmente in 5 strati in modo da avere una migliore descrizione dei fenomeni di saturazione del dominio stesso lungo la verticale ed eventualmente ove necessario, inserire valori di conduttività idraulica differenti (Figura 16).

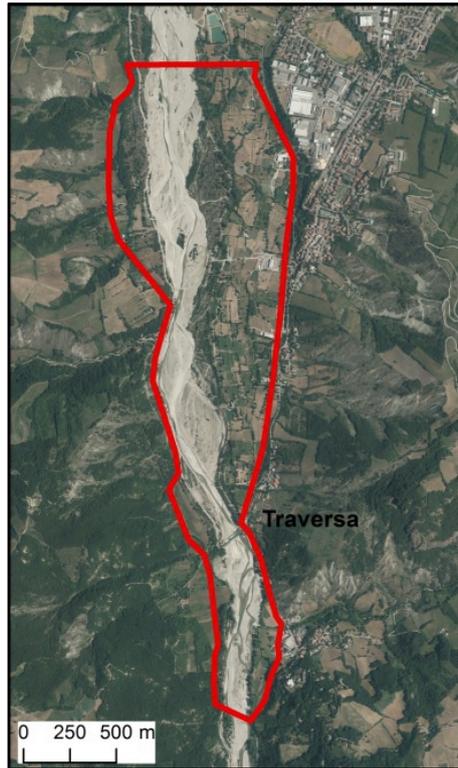


Figura 15. Il dominio considerato lungo l'asta del Torrente Enza in prossimità della traversa di Cerezzola.

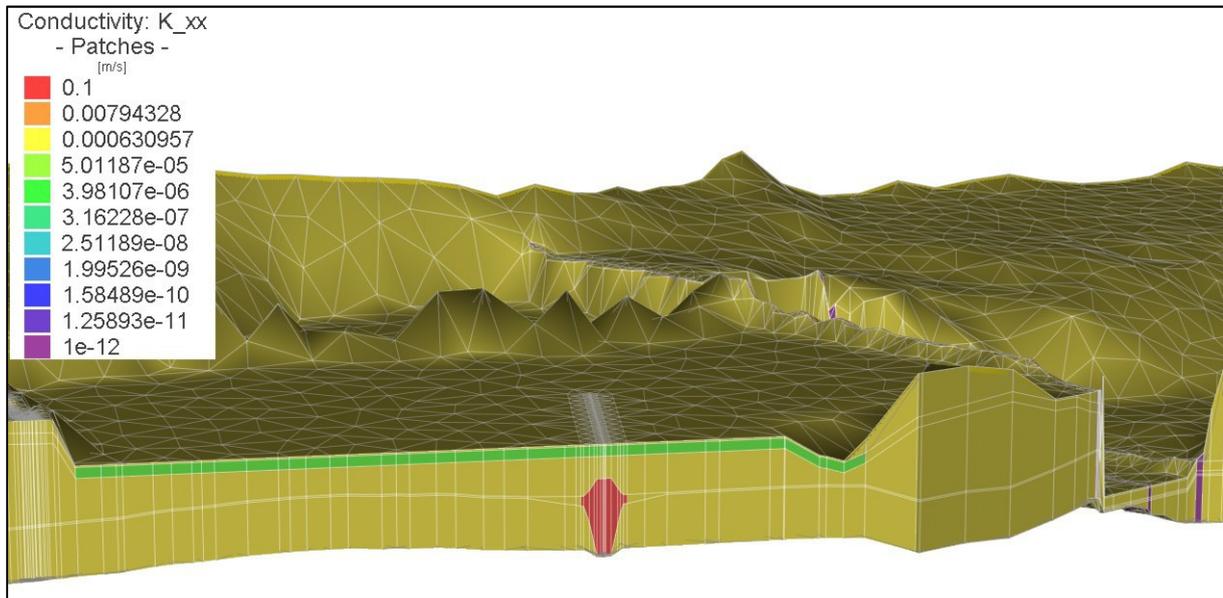


Figura 16. Sezione longitudinale del dominio tra la soglia di monte in progetto e la traversa. La superficie superiore del dominio è alla quota del fondo dell'invaso in progetto. Le diverse colorazioni mettono in evidenza le differenti conduttività idrauliche considerate nel quinto caso descritto in seguito.

Per definire le caratteristiche idrauliche del dominio si sono analizzati e correlati gli andamenti del livello idrico osservato nel fiume in corrispondenza della traversa, il livello osservato nel pozzetto di recapito della galleria drenate in cui sono posizionate le pompe che alimentano la condotta acquedottistica adduttrice e la portata emunta dalle pompe stesse. In particolare, dai dati a

disposizione relativi agli anni 2018 e 2019, si evince che mediamente il livello nel pozzetto non è molto dissimile da quello osservato in prossimità della traversa: sebbene generalmente minore di quello massimo osservato sulla traversa, è a esso congruente. Come riportato in Figura 17 la differenza si attesta tra un minimo di 20 cm e un massimo di 70 cm. In corrispondenza invece di variazioni di livello idrico sulla traversa, si può notare una risposta conseguente del livello idrico nel pozzetto. Si nota inoltre che l'accensione delle pompe porta a una repentina decrescita di qualche decina di centimetri del livello. Allo spegnimento delle stesse si riscontra invece una crescita più lenta con un asintoto orizzontale al valore stazionario. Tutti i comportamenti appena elencati portano a dedurre che il sistema in studio sia caratterizzato da elevate permeabilità del materiale di subalveo. Tutte queste considerazioni hanno condotto alla scelta di un valore di conduttività idraulica (K di Darcy) abbastanza elevato pari a 10^{-3} m s^{-1} , consistente con il materiale d'alveo osservato. La galleria drenante gestita da IREN e internamente costituita da ghiaia avente conduttività idraulica pari a 0.1 m s^{-1} . Tali scelte hanno trovato poi riscontro sia nelle simulazioni dello stato di fatto come sarà illustrato in seguito. Per tutte le simulazioni effettuate è stata scelta come condizione iniziale di carico totale il valore della quota della superficie libera della corrente nell'alveo di magra, ipotizzando quindi che nell'alveo vi sia una portata minima che alimenta la falda e che il livello di tale falda sia appunto paragonabile al livello del fiume in ciascuna sezione.

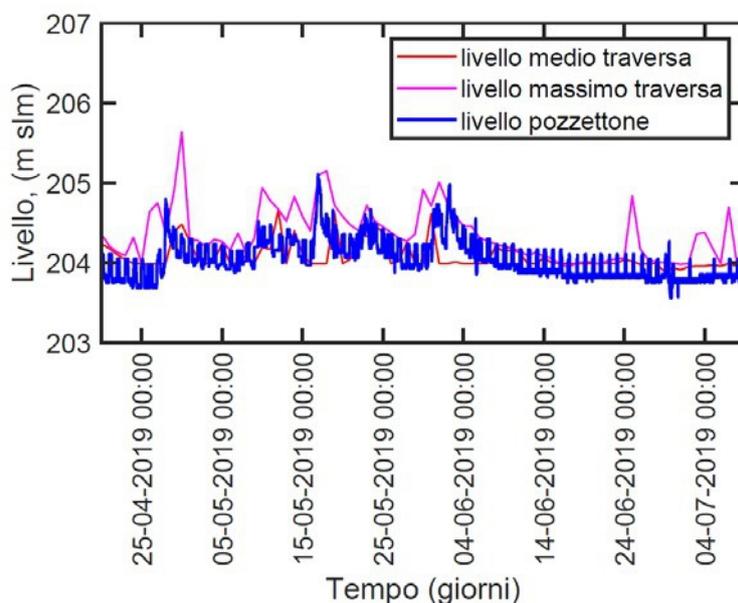


Figura 17. L'andamento dei livelli osservati in corrispondenza della traversa di Cerezzola e all'interno del pozzetto IREN.

Questa scelta è supportata dall'analisi comparata dei livelli osservati in prossimità della traversa e quelli osservati nel pozzetto riportati in Figura 3 e dai livelli di falda osservati durante le prove geognostiche. Le condizioni al contorno invece sono variabili in funzione dei differenti casi considerati ma comunque sono basate sui seguenti criteri: nella sezione di monte e in quella di valle del dominio è imposto un carico totale su tutta la sezione pari al valore della quota della superficie libera della corrente nell'alveo di magra. In corrispondenza del pozzetto di IREN è imposto un prelievo pari a 100 L s^{-1} . Nella zona retrostante la traversa a seconda dei casi, è imposto sulla superficie un carico pari alla quota della superficie libera della corrente nell'alveo di magra, in modo da schematizzare la presenza della linea di falda alimentata dalla corrente di magra oppure la quota di massimo invaso di progetto. Tutte queste condizioni al contorno che descrivono situazioni molto simili al deflusso di magra nell'alveo fluviale sono state considerate costanti nel tempo e sono state effettuate simulazioni della durata di 365 giorni per valutare i loro effetti su lunghi periodi. In particolare le simulazioni effettuate sono riportate di seguito.

Caso 1: Stato attuale con assenza di setti nella traversa esistente

Il dominio è stato considerato omogeneo e isotropo con valori di conduttività idraulica pari a 10^{-3} m s^{-1} , e corredato da condizioni iniziali e al contorno come descritto in precedenza. Analizzando i risultati si può notare che il dominio contenete la galleria drenante gestita da IREN è sempre saturo durante tutti i 365 giorni della simulazione (Figure 18 e 19). Poiché il risultato è congruente con i dati osservati, le ipotesi per la caratterizzazione del dominio e del materiale con cui è stata effettuata la simulazione possono ritenersi realistiche.



Figura 18. Porzione dello strato contenente il galleria drenante gestita da IREN, al centro dell'immagine, al tempo di simulazione $t = 365$ giorni. In alto le tracce delle fondazioni del manufatto, in basso quelle della soglia di monte. Tutto l'ammasso permeabile costituente il dominio, galleria drenante compresa, è generalmente saturo.

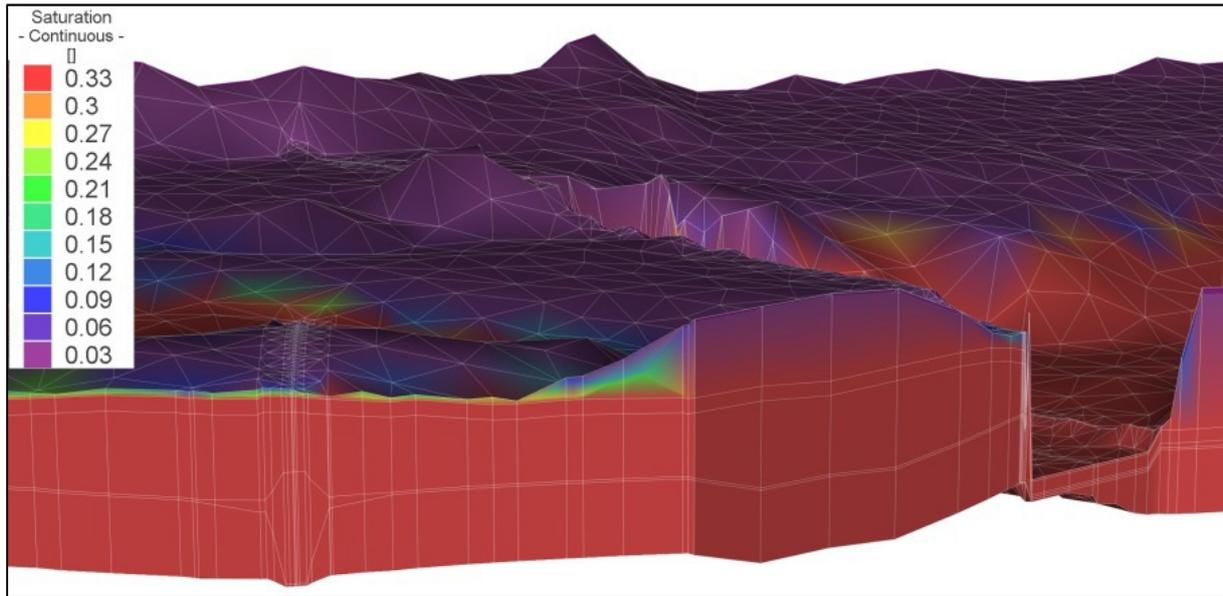


Figura 19. Sezione longitudinale del dominio in prossimità del pozzetto IREN al tempo di simulazione $t = 365$ giorni. Tutto l'ammasso permeabile costituente il dominio, galleria drenante di forma esagonale compresa, è saturo.

Caso 2: Stato attuale con presenza di setti nella traversa esistente

Analogamente al caso precedente il dominio è stato considerato omogeneo e isotropo con valori di conduttività idraulica pari a 10^{-3} m s^{-1} eccetto che per la galleria drenante d e corredato da condizioni iniziali e al contorno come descritto in precedenza. I setti esistenti sotto alla traversa sono stati introdotti assegnando loro una conduttività idraulica relativamente bassa e pari a $10^{-12} \text{ m s}^{-1}$. A monte della traversa è stata considerata la superficie del terreno e la presenza della falda come nei casi precedenti. Analizzando i risultati si può notare che il dominio contenente la galleria drenante gestita da IREN è sempre saturo durante tutti i 365 giorni della simulazione (Figure 20 e 21). Poiché il risultato è congruente con i dati osservati, le ipotesi per la caratterizzazione del dominio e del materiale con cui è stata effettuata la simulazione possono ritenersi realistiche. Il confronto di questo caso con il precedente fanno supporre che la presenza dei setti sotto la traversa esistente o la loro parziale assenza non influenzi considerevolmente il comportamento e le funzionalità della galleria drenante posto a monte della stessa.



Figura 20. Porzione dello strato contenente il galleria drenante gestita da IREN, al centro dell'immagine, al tempo di simulazione $t = 365$ giorni. In alto le tracce delle fondazioni del manufatto, in basso quelle della soglia di monte. Tutto l'ammasso permeabile costituente il dominio, galleria drenante compresa, è generalmente saturo.

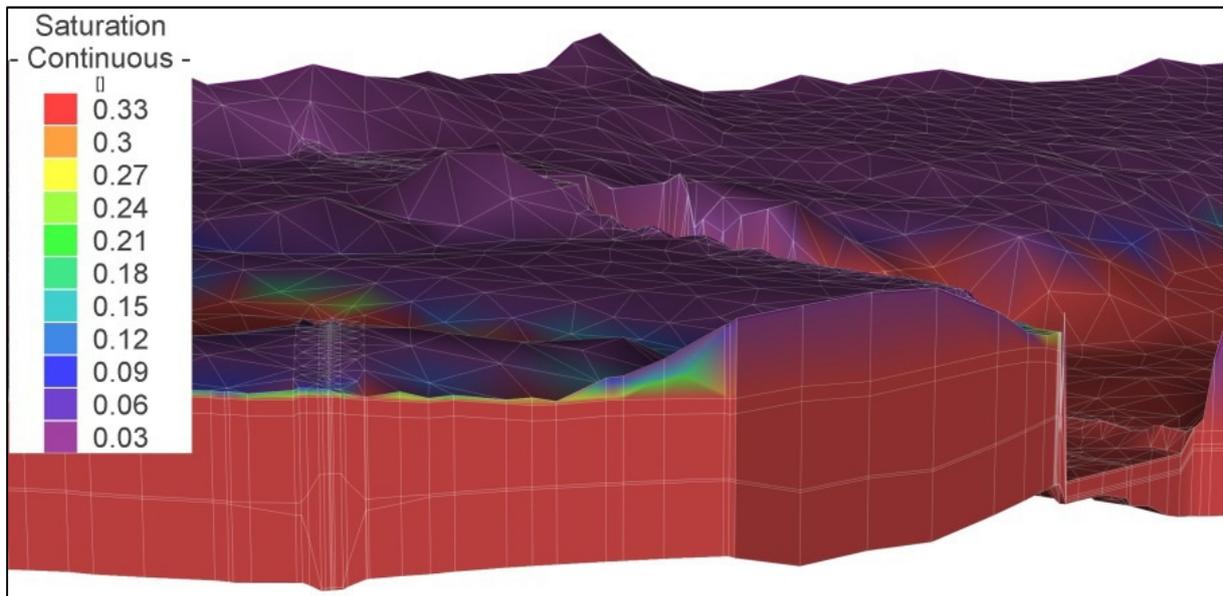


Figura 21. Sezione longitudinale del dominio in prossimità del pozzetto gestito da IREN al tempo di simulazione $t = 365$ giorni. Tutto l'ammasso permeabile costituente il dominio, galleria drenante di forma esagonale compresa, è saturo.

3.2. Impatto delle Opere di Riqualificazione

Caso 3: Stato di progetto con nuovi setti a monte e valle della traversa esistente

Analogamente ai casi precedenti il dominio è stato considerato omogeneo e isotropo con valori di conduttività idraulica pari a 10^{-3} m s^{-1} , e corredato da condizioni iniziali e al contorno come descritto in precedenza. In aggiunta ai setti esistenti sotto alla traversa già introdotti nel caso precedente, sono stati introdotti anche i setti in calcestruzzo previsti al di sotto delle nuove opere a monte e a valle della attuale traversa, assegnando loro una conduttività idraulica relativamente bassa e pari a $10^{-12} \text{ m s}^{-1}$. Analizzando i risultati si può notare che il dominio contenente la galleria drenate gestita da IREN è sempre saturo durante tutti i 365 giorni della simulazione (Figure 22 e 23).



Figura 22. Porzione dello strato contenente la galleria drenante gestita da IREN, al centro dell'immagine, al tempo di simulazione $t = 365$ giorni. In alto le tracce delle fondazioni del manufatto, in basso quelle della soglia di monte. Tutto l'ammasso permeabile costituente il dominio, galleria drenante compresa, è generalmente saturo.

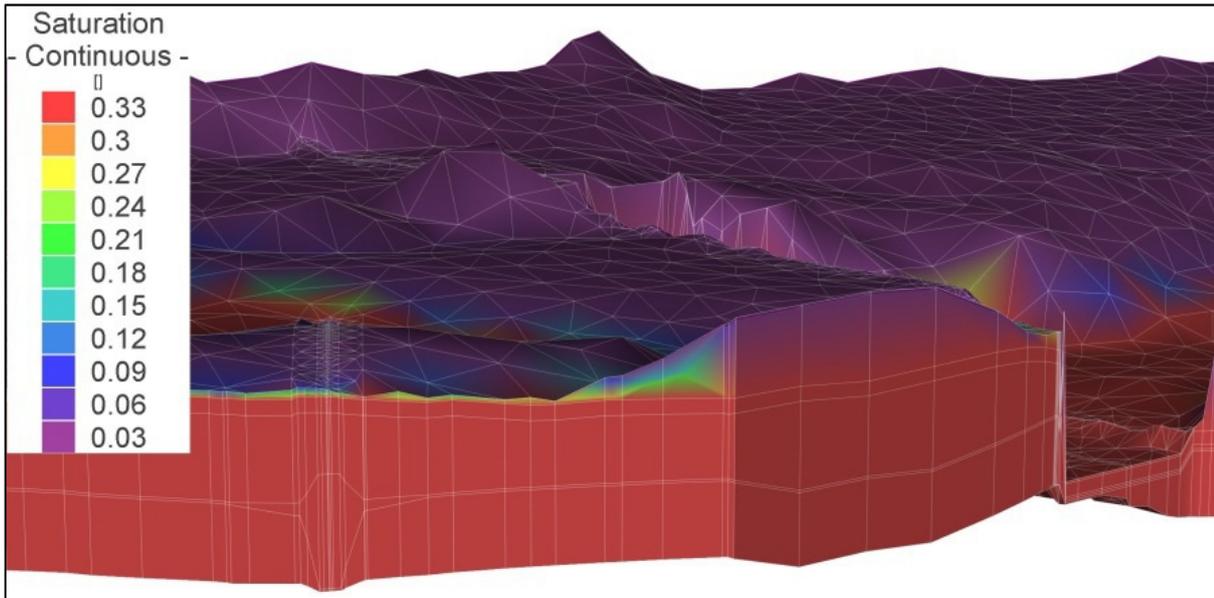


Figura 23. Sezione longitudinale del dominio in prossimità del pozzetto IREN al tempo di simulazione $t = 365$ giorni. Tutto l'ammasso permeabile costituente il dominio, galleria drenante di forma esagonale compresa, è saturo.

Caso 4: Stato di progetto con nuovi setti a monte e valle della traversa esistente e nuovo invaso a monte

Analogamente ai casi precedenti il dominio è stato considerato omogeneo ed isotropo con valori di conduttività idraulica pari a 10^{-3} m s^{-1} , e corredato da condizioni iniziali e al contorno come già descritto. In aggiunta ai setti esistenti sotto alla traversa, già introdotti nel caso precedente, sono stati aggiunti anche i setti in calcestruzzo previsti al di sotto delle nuove opere a monte e a valle della attuale traversa, assegnando loro una conduttività idraulica relativamente bassa e pari a $10^{-12} \text{ m s}^{-1}$. In aggiunta rispetto al caso precedente è stata modificata la superficie superiore del dominio a monte della traversa secondo lo scavo previsto in progetto e in tale zona è stato imposto un carico costante per tutta la simulazione pari alla quota di massimo invaso di 205 m slm. Analizzando i risultati si può notare che anche in questo caso il dominio contenente la galleria drenante gestita da IREN è sempre saturo durante tutti i 365 giorni della simulazione (Figure 24 e 25). La presenza dei nuovi setti in progetto e lo scavo dell'invaso non influenzano il comportamento e le funzionalità della galleria drenate posta a monte della traversa nel caso in cui non vi sia una modifica delle proprietà del materiale di fondo del nuovo invaso.



Figura 24. Porzione dello strato contenente la galleria drenate gestita da IREN, al centro dell'immagine, al tempo di simulazione $t = 365$ giorni. In alto le tracce delle fondazioni del manufatto, in basso quelle della soglia di monte. Tutto l'ammasso permeabile costituente il dominio, galleria drenante compresa, è generalmente saturo.

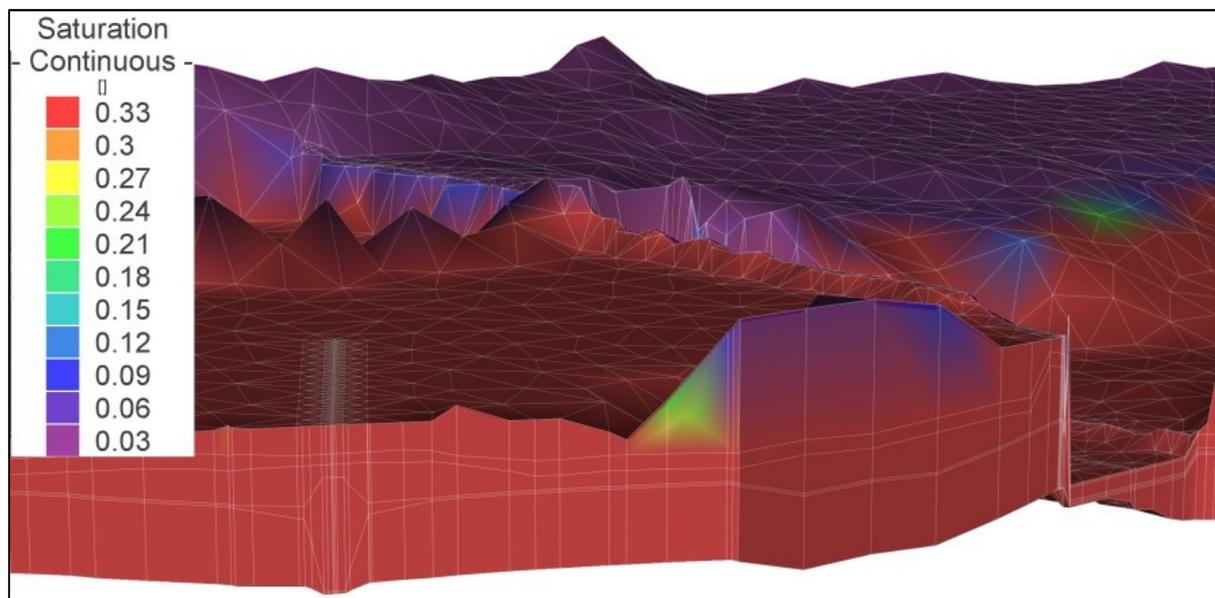


Figura 25. Sezione longitudinale del dominio in prossimità del pozzetto gestito da IREN al tempo di simulazione $t = 365$ giorni. Tutto l'ammasso permeabile costituente il dominio, galleria drenate di forma esagonale compresa, è saturo. In questo caso la superficie superiore del dominio in corrispondenza dell'invaso è modificata come da progetto.

3.3. Impatto della Sedimentazione Fine

Caso 5: Stato di progetto con nuovi setti a monte e a valle della traversa esistente, nuovo invaso a monte, e strato di materiale fine con spessore pari a 0.15 m e conduttività idraulica pari a 10^{-4} m s⁻¹

Analogamente al caso precedente il dominio è stato considerato omogeneo e isotropo con valori di conduttività idraulica pari a 10^{-3} m s⁻¹, e corredato da condizioni iniziali e al contorno come già descritto. In aggiunta ai setti esistenti sotto alla traversa, già introdotti nel caso precedente, sono stati aggiunti anche i setti in calcestruzzo previsti al di sotto delle nuove opere a monte e a valle della attuale traversa, assegnando loro una conduttività idraulica relativamente bassa e pari a 10^{-12} m s⁻¹. Come nel caso precedente è stata modificata la superficie superiore del dominio a monte della traversa secondo lo scavo previsto in progetto e in tale zona è stato imposto un carico costante per tutta la simulazione pari alla quota di massimo invaso di 205 m slm. In questo caso è stato però introdotto, come riportato in Figura 15, uno strato con minore conduttività idraulica e spessore variabile all'interfaccia tra deposito alluvionale e corpo idrico superficiale. Tale strato è stato introdotto per simulare un eventuale intasamento dello strato superficiale da parte di depositi fini che si possano sedimentare nel nuovo invaso a causa delle modeste velocità della corrente nel serbatoio. Tale fenomeno può in linea di principio limitare l'alimentazione dello strato subalveo da parte delle correnti superficiali. Sono stati quindi eseguiti differenti esperimenti con valori di conduttività idraulica K variabile da 10^{-4} a 10^{-6} m s⁻¹ e spessori h variabili da 0.15 a 0.60 m. I risultati sono riassunti nelle Figure 26 e 27. In particolare emerge come per valori di conduttività idraulica K maggiori o uguali a 10^{-5} al variare dello spessore dello strato superiore intasato di materiale fine, fino ad un valore di 0.6 m, non si presentino anomalie di comportamento della galleria drenante che invece sono evidenti nel caso in cui la conduttività idraulica K sia pari a 10^{-6} . In questo caso sono impediti i flussi verticali che dall'alveo vanno ad alimentare la galleria e si sviluppano zone insature sia in corrispondenza della galleria drenante che nello strato superiore.

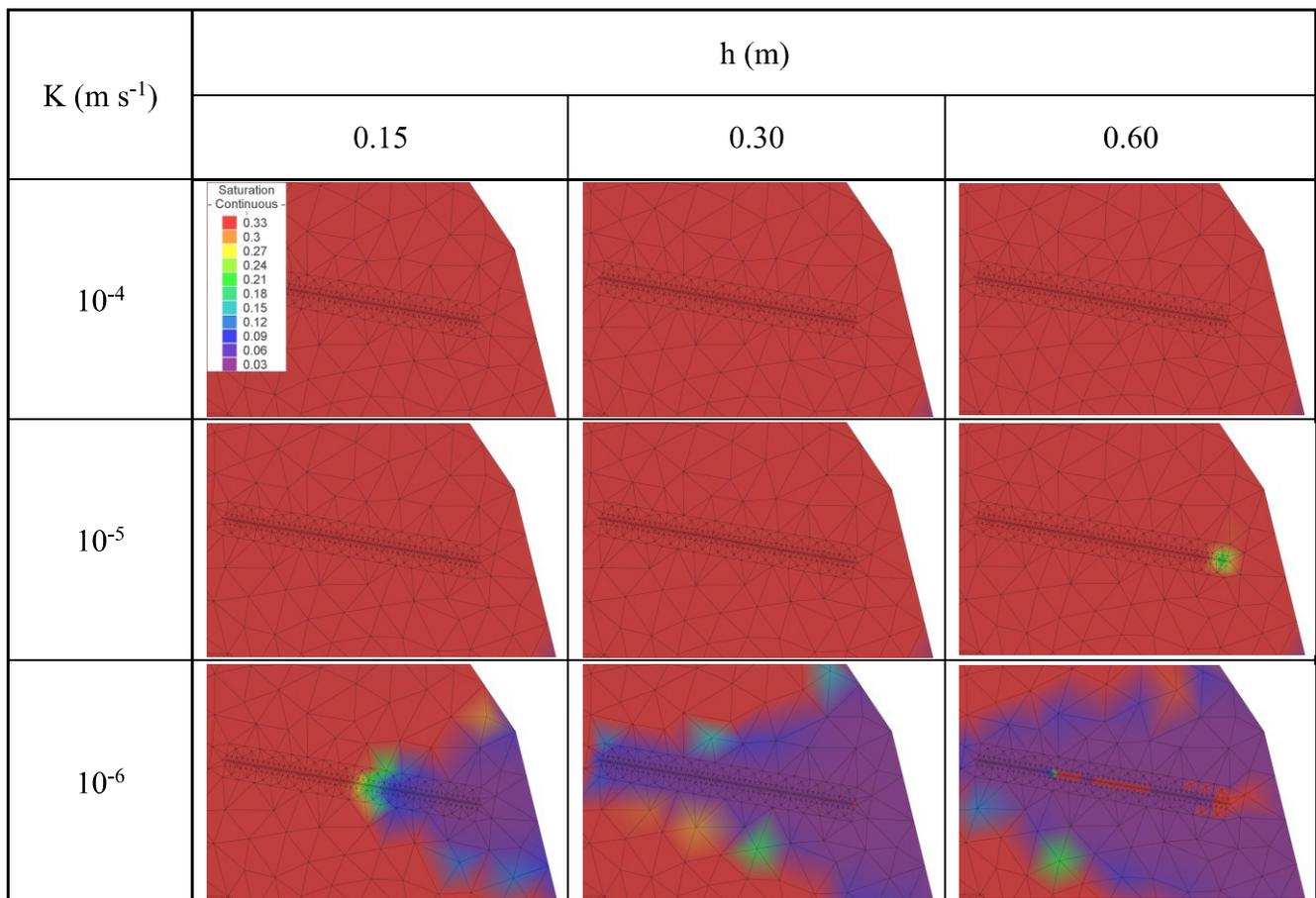


Figura 26. Porzione dello strato immediatamente superiore allo strato contenente la galleria drenante gestita da IREN in corrispondenza della stessa, al tempo di simulazione $t = 365$ giorni. È evidente in prossimità della parte superiore della galleria drenante una zona insatura, con estensione crescente in funzione dello spessore dello strato di materiale fine, quando la conduttività idraulica di tale materiale è pari a 10^{-6} .

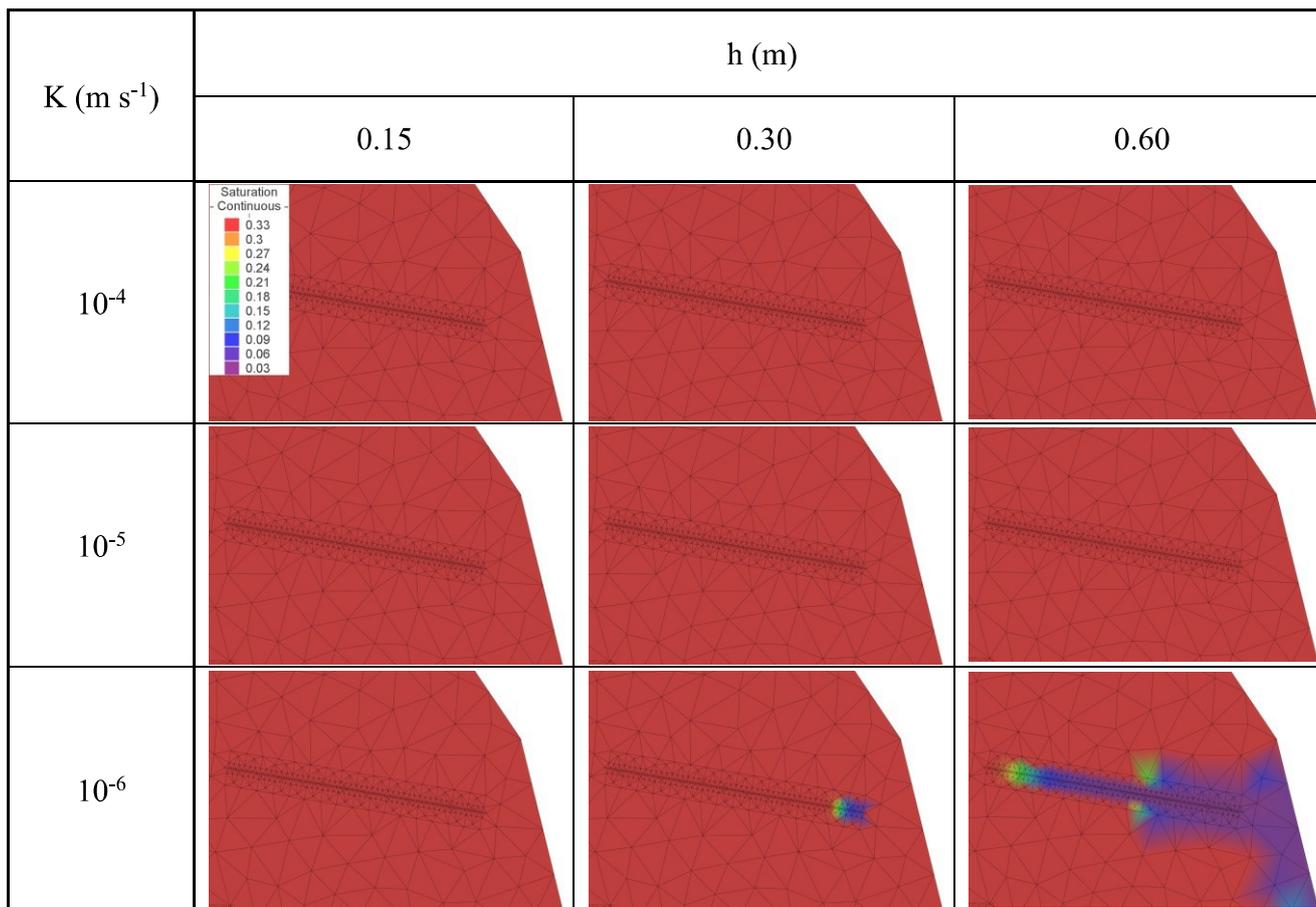


Figura 27. Porzione dello strato contenente la galleria drenante gestita da IREN che è posta al centro dell'immagine, al tempo di simulazione $t = 365$ giorni. È evidente attorno al punto di emungimento una zona insatura che interessa la galleria drenante gestita da IREN, con estensione crescente in funzione dello spessore del materiale fine, quando la conduttività idraulica di tale materiale è pari a 10^{-6} .

Per comprendere il funzionamento della galleria drenante in condizioni anomale, sono stati considerati altri casi descritti brevemente in seguito. In particolare si è considerato un valore di conduttività idraulica per la galleria drenante minore di quello usato nei casi precedenti e pari a 10^{-2} m s⁻¹. I risultati ottenuti in questo caso sono riportati nelle Figure 28 e 29. Si è considerato poi il caso più gravoso con conduttività dello strato superficiale intasato di materiale fine pari a 10^{-8} m s⁻¹ e spessore del materiale fine pari a 0.60 m. Tale caso è illustrato a titolo di esempio nelle Figure 30 e 31.

Come si può notare nelle Figure 28 e 29, nel caso in cui vi sia una diminuzione della conduttività idraulica della galleria drenante lo spessore e la conduttività idraulica dello strato superficiale intasato influiscono maggiormente sulla capacità di emungimento della galleria stessa poiché si manifestano zone insature sia lungo la galleria, sia nello strato immediatamente superiore non solo per valori di conduttività idraulica del materiale fine inferiori a 10^{-5} .

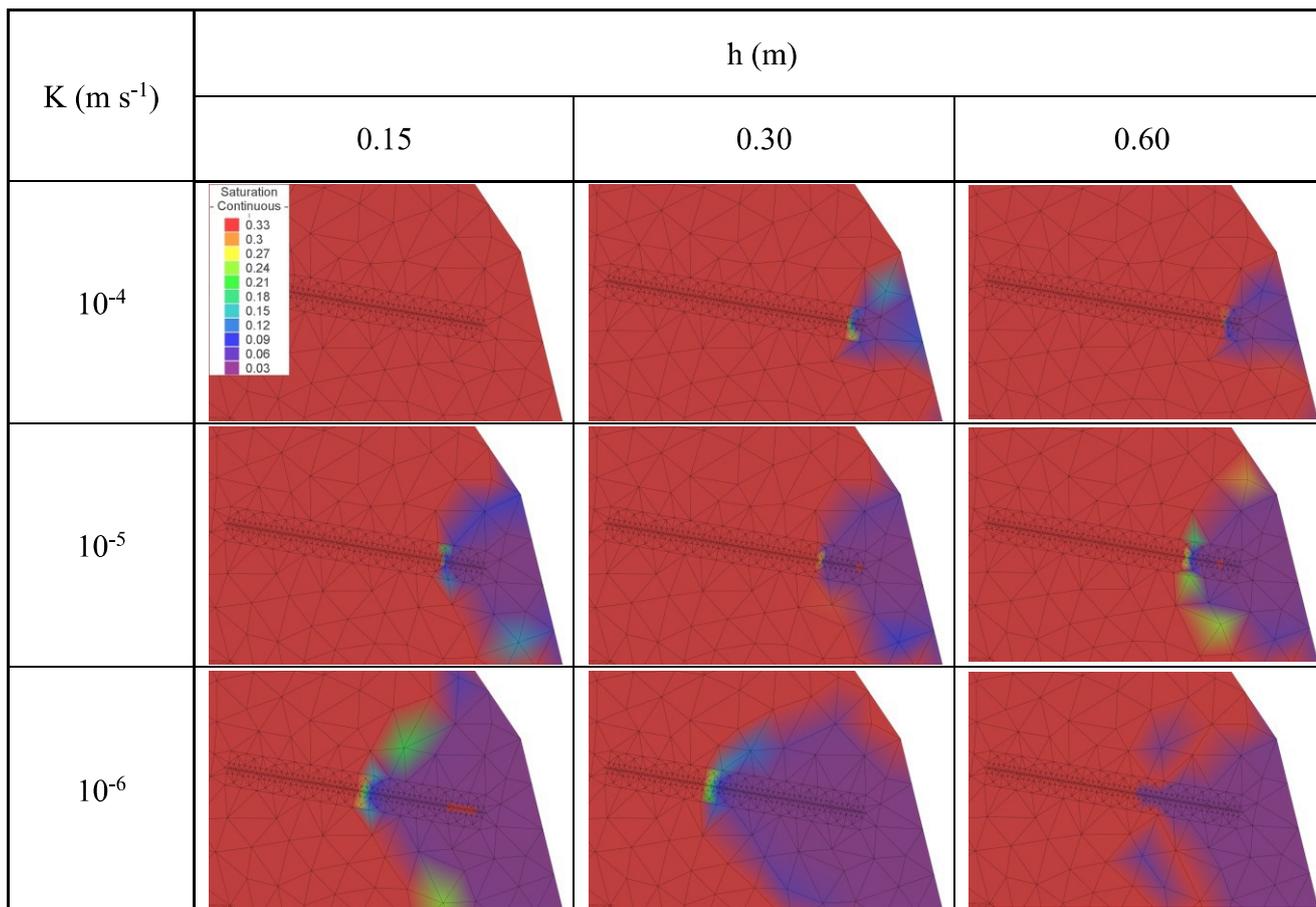


Figura 28. Porzione dello strato immediatamente superiore allo strato contenente la galleria drenante gestita da IREN in corrispondenza della stessa, al tempo di simulazione $t = 365$ giorni. È evidente in corrispondenza del punto di emungimento una zona insatura che interessa anche la galleria drenante gestita da IREN, con estensione crescente in funzione dello spessore del materiale fine.

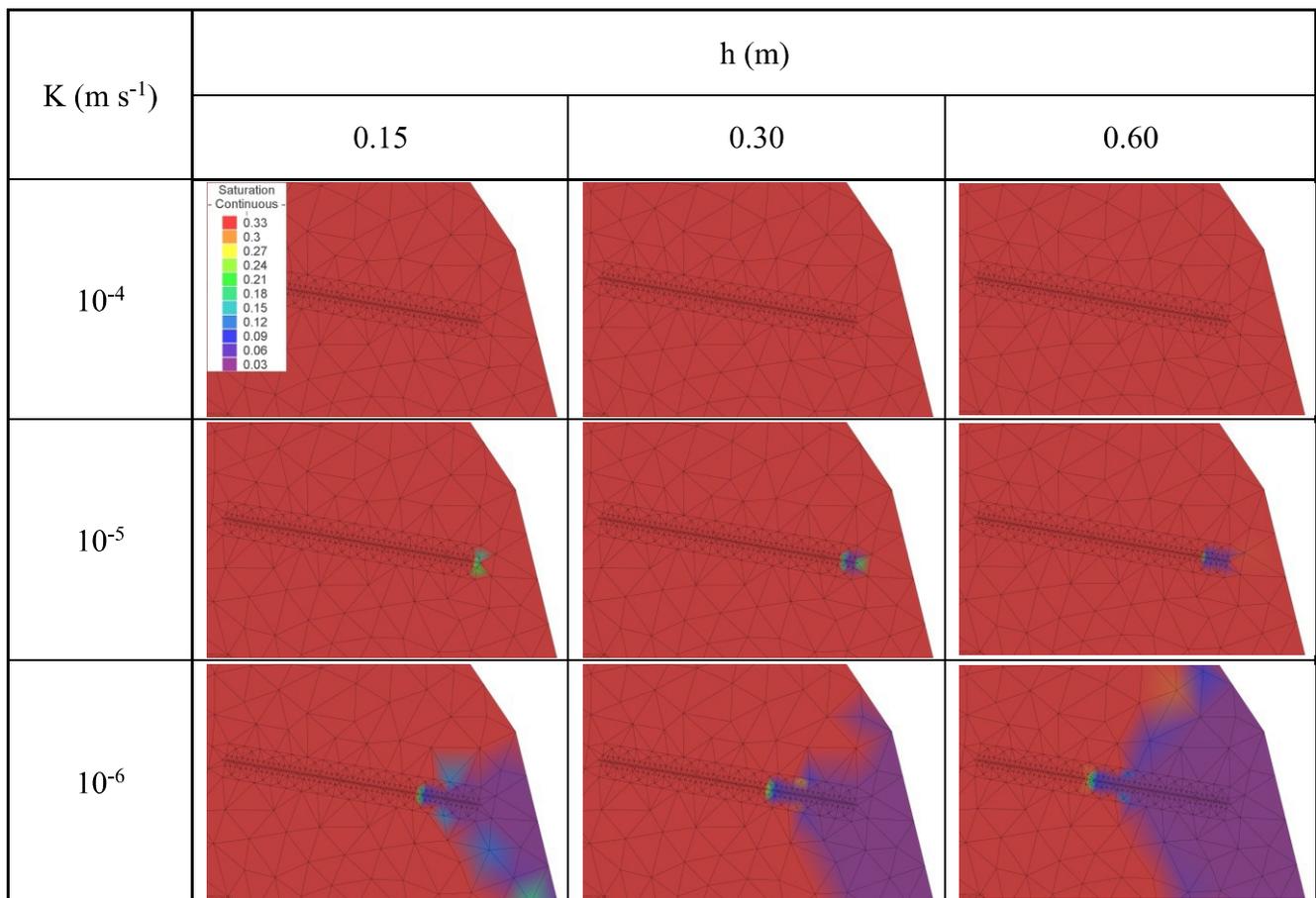


Figura 29. Porzione dello strato contenente la galleria drenante gestita da IREN che è posta al centro dell'immagine, al tempo di simulazione $t = 365$ giorni. È evidente attorno al punto di emungimento una zona insatura che interessa anche la galleria drenante gestita da IREN, con estensione crescente in funzione dello spessore del materiale fine.

Infine, sebbene il caso più gravoso con conduttività dello strato di materiale fine pari a 10^{-8} m s⁻¹ e spessore pari a 0.60 m possa essere ritenuto improbabile, è di sicuro interesse per evidenziare il funzionamento della galleria drenante. Infatti viene messo in luce come la galleria drenante sia alimentata prevalentemente dai moti di filtrazione verticali alimentati dalla corrente superficiale in prossimità dello stesso e che le portate legate ai moti di filtrazione subalvea siano esigue e insufficienti.

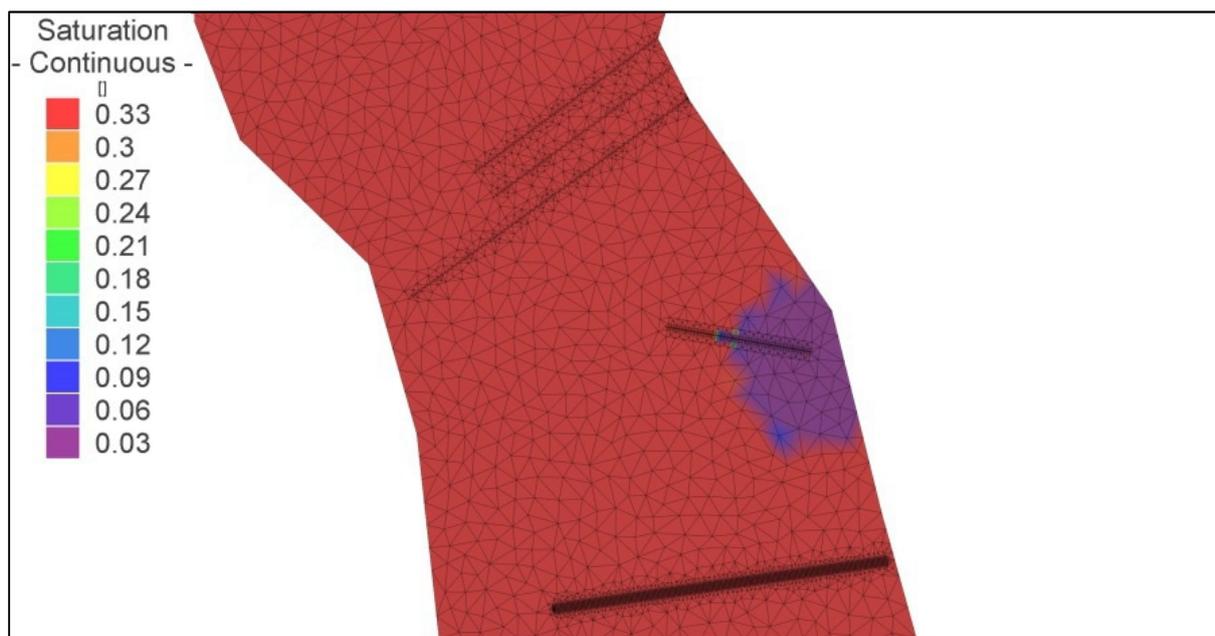


Figura 30. Porzione dello strato contenente la galleria drenante gestita da IREN, al centro dell'immagine, al tempo di simulazione $t = 365$ giorni. In alto le tracce delle fondazioni del manufatto, in basso quelle della soglia di monte. Non tutto l'ammasso permeabile costituente il dominio è saturo. È evidente in questo caso, ottenuto considerando uno strato di materiale fine con conduttività idraulica pari a 10^{-8} m s^{-1} e spessore pari a 0.60 m, una zona insatura attorno al punto di emungimento che interessa estesamente anche la galleria drenante gestita da IREN.

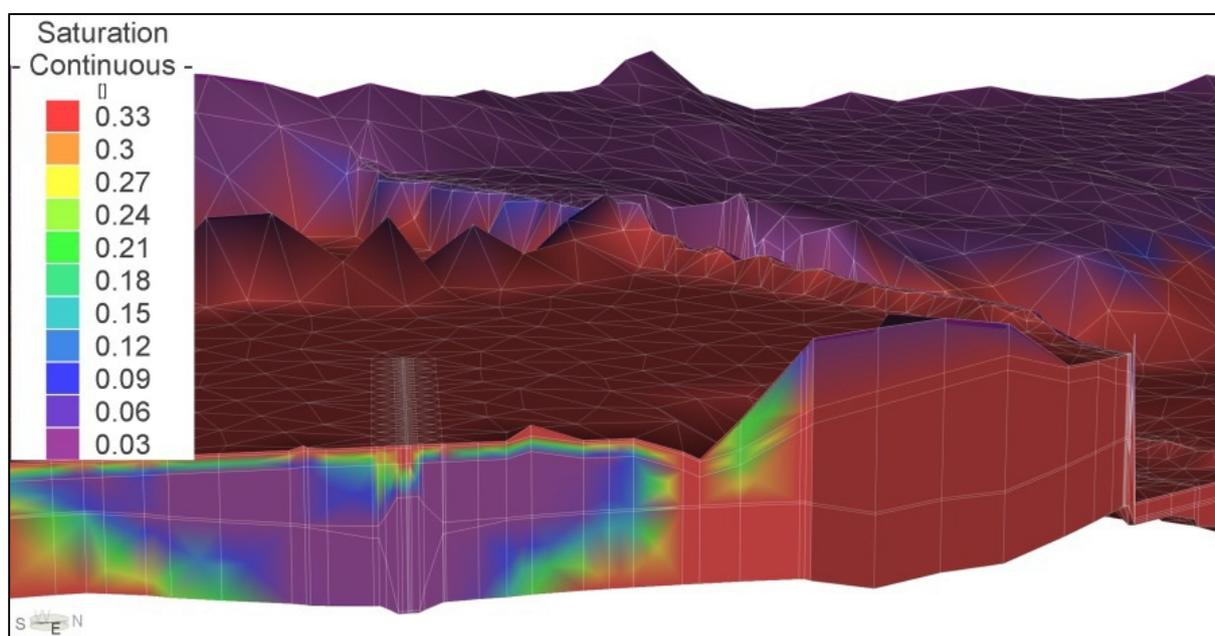


Figura 31. Sezione longitudinale del dominio in prossimità del pozzetto gestito da IREN al tempo di simulazione $t = 365$ giorni. Ipotizzando uno strato di materiale fine con conduttività idraulica pari a 10^{-8} m s^{-1} e spessore pari a 0.60 m, si nota come attorno al punto di emungimento si crea una zona insatura che interessa la galleria drenante gestita da IREN.

Queste conclusioni sono coerenti con il fatto che in passato lo spostamento della parte attiva della corrente in sponda sinistra aveva determinato una diminuzione della funzionalità della galleria drenante. Inoltre il semplice calcolo della portata di filtrazione utilizzando la formula di Darcy con

gradiente idraulico pari alla pendenza del fondo e conduttività idraulica pari a 10^{-3} m s^{-1} , si ottengono valori approssimativamente pari a 4 L s^{-1} notevolmente inferiori alla capacità di emungimento della galleria drenante. Analizzando i risultati si può notare che in questo caso attorno al punto di emungimento si può creare una zona insatura che interessa la galleria drenante gestita da IREN. Tale zona si espande riducendo la conduttività e aumentando lo spessore dello strato insaturo fino ad arrivare al caso estremo riportato nelle Figure 30 e 31. In tal caso la zona insatura si estende ampiamente lungo la galleria drenante interessandone più della metà in lunghezza. In definitiva, nel caso in cui si abbia una galleria drenante in perfetta efficienza e lo strato di materiale fine all'interfaccia tra deposito alluvionale e corpo idrico superficiale abbia valori di conduttività idraulica non inferiori a 10^{-5} m s^{-1} e spessori non superiori a 0.60 m, tale strato ha un'influenza insignificante sull'azione della galleria drenate.

Deflussi subalvei a valle della traversa

Utilizzando i casi esposti in precedenza è stata valutata anche la variazione dei deflussi al di sotto della traversa nelle differenti configurazioni. In generale si evince che i setti al di sotto della traversa limitano i deflussi subalvei verso valle, Al contrario l'aumento di livello a monte della traversa li aumenta. Inoltre, lo scavo del serbatoio si comporta come una sorta di trincea drenante e induce la riemersione dei deflussi subalvei poco a valle della soglia di ingresso allo stesso. Poiché i cinque casi sopra esposti sono una combinazione dei tre comportamenti descritti, il flusso al di sotto della traversa nei casi considerati è il risultato della somma dei singoli effetti. I risultati sono riportati nella Tabella 4. Come si può notare dai valori di portata riportati nella Tabella 4 all'aumentare della lunghezza del setto sotto la traversa, rispettivamente Caso 1, Caso 2 e Caso 3, a parità di condizione al contorno sulla superficie a monte della traversa, si ha una diminuzione della portata transitante. Tale portata aumenta nel Caso 4 poiché in questo caso aumenta il carico a monte della traversa, che è imposto pari alla quota elemento gonfiabile sollevato, 205 m slm. Infine nel Caso 5, considerando uno strato impermeabile di spessore 0.15 m e con conduttività pari a 10^{-4} m s^{-1} , si può notare una diminuzione della portata transitante legata al fatto che diminuiscono gli apporti legati all'invaso in superficie.

Tabella 4. Le portate stimate transitanti in una sezione in corrispondenza della traversa in una condizione pseudostazionaria.

Caso	Scenario	Q (L s ⁻¹)
1	Stato attuale con assenza di setti nella traversa esistente	2.98
2	Stato attuale con presenza di setti nella traversa esistente	2.79
3	Stato di progetto con nuovi setti a monte e valle della traversa esistente	1.62
4	Stato di progetto con nuovi setti a monte e valle della traversa esistente e nuovo invaso a monte	2.24
5	Stato di progetto con nuovi setti a monte e a valle della traversa esistente, nuovo invaso a monte, e strato di materiale fine con spessore pari a 0.15 m e conduttività idraulica pari a 10^{-4} m s^{-1}	2.14

CAPITOLO 4: CONCLUSIONI

L'analisi Monte Carlo di come il bacino idrografico del torrente Enza chiuso a Cerezzola risponde alle precipitazioni estreme ha prodotto valutazioni delle portate al colmo con assegnato periodo di ritorno in ragionevole accordo con quelle basate su analisi di frequenza tradizionali. Tali valori risultano stabili rispetto alla ripetizione delle simulazioni e si riscalano con il periodo di ritorno secondo una legge logaritmica come atteso dalla teoria dei valori estremi. Questo supporta l'attendibilità dell'analisi Monte Carlo nel suo complesso. L'alveo fluviale in prossimità delle opere previste per la riqualificazione del nodo idraulico di Cerezzola risulta mediamente stabile per eventi di piena con periodo di ritorno inferiori a 20 a o anche per periodi di ritorno superiori nelle configurazioni di progetto dove la pendenza del fondo è ridotta rispetto al valore attuale prossimo a 0.006. Il rilascio di sedimenti dal bacino idrografico contribuente appare tollerabile anche per eventi con periodo di ritorno elevati, soprattutto in previsione di poter rimuovere il materiale depositato dopo gli eventi di piena in modo che non si accumuli nel tempo.

L'analisi di flussi idrici sotterranei rivela che la costruzione di setti in corrispondenza delle fondazioni dei manufatti in progetto non pregiudica il funzionamento della galleria drenante di captazione subalvea gestita da IREN, mantenendo inalterate le condizioni di saturazione dell'ammasso poroso anche in corrispondenza dei massimi emungimenti. La presenza di setti più estesi al di sotto della traversa ammorsati allo strato impermeabile che vanno a chiudere la sezione subalvea influisce naturalmente sulle portate che proseguono al di sotto della traversa stessa verso valle. In questo caso si può riscontrare una diminuzione delle portate subalvee verso valle che viene solo parzialmente compensata dall'aumento di carico, per altro variabile lungo tutto l'anno, nell'invaso a monte della traversa. Nel caso in cui vi siano fenomeni di deposito di materiale fine all'interfaccia tra deposito alluvionale filtrante e corpo idrico superficiale si evidenziano differenti comportamenti in funzione della quantità di materiale che si sedimenta e della riduzione di permeabilità che caratterizza il deposito sedimentato. Nel caso in cui la galleria drenante sia in condizioni di perfetta efficienza idraulica, per spessori del deposito inferiori a 0.60 m e conduttività idrauliche non inferiori a 10^{-5} m s⁻¹ viene comunque garantita un'adeguata alimentazione della galleria drenante gestita da IREN.

I risultati ottenuti non indicano gravi problemi connessi all'ipotetica realizzazione degli interventi di riqualificazione del nodo idraulico di Cerezzola sul torrente Enza a condizione che venga attuata un'adeguata manutenzione per l'asportazione del materiale ghiaioso entrante nel serbatoio durante gli eventi di piena e per il controllo del materiale finè che può depositarsi all'interfaccia tra deposito alluvionale drenato dall'opera di captazione gestita da IREN e corpo idrico superficiale durante i periodi di riempimento del serbatoio. Per quanto i risultati riportati nella presente nota siano basati su metodi tecnicamente solidi e appaiano realistici, nel caso di approvazione del progetto di fattibilità si suggerisce di organizzare una campagna sperimentale mirata all'osservazione delle principali proprietà idrauliche dei sistemi superficiali e sotterranei e al monitoraggio delle più rilevanti variabili idrologiche al fine di confermare le conclusioni riportate nella presente nota che siano ritenute utili ai fini dello sviluppo di un efficace progetto definitivo delle opere di riqualificazione del nodo idraulico di Cerezzola sul Torrente Enza.