



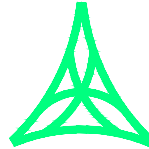
REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA

DIREZIONE CENTRALE
INFRASTRUTTURE, MOBILITA', PIANIFICAZIONE TERRITORIALE E LAVORI PUBBLICI

SOGGETTO DELEGATARIO:



PROGETTAZIONE:



S.p.A. AUTOVIE VENETE

34123 TRIESTE - Via V. Locchi, 19 - tel. 040/3189111
 Società soggetta all'attività di direzione e coordinamento da parte di
 Friulia S.p.A. - Finanziaria Regionale Friuli-Venezia Giulia

CONCESSIONARIA AUTOSTRADE
 A4 VENEZIA - TRIESTE
 A23 PALMANOVA - UDINE
 A28 PORTOGRUARO - CONEGLIANO

**COLLEGAMENTO TRA LA S.S. 13 PONTEBBANA E LA A23
 TANGENZIALE SUD DI UDINE (II LOTTO)**

AGGIORNAMENTO PROGETTO DEFINITIVO dd.14.12.2006

SISTEMAZIONE IDRAULICA

Bacini imbriferi
 Bacino imbrifero torrente Cormor
 Modellazione bidimensionale del torrente Cormor tra Basaldella e Terenzano

TEMATICA

M

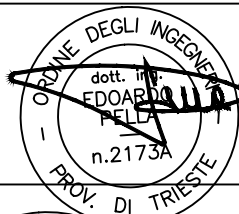
N. ALLEGATO e SUB.ALL.

02.01 .0.1

3					
2					
1					
0	30.08.2012	EMISSIONE	NA	VCP	EP
REV.	DATA		REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

COORDINAMENTO E PROGETTAZIONE GENERALE:

S.p.A. AUTOVIE VENETE :
 dott. ing. Edoardo PELLA
 dott. ing. Stefano DI SANTOLO



IL CAPO COMMESSA:
 dott. ing. Edoardo PELLA

PROGETTAZIONE SPECIALISTICA:

Idraulica :
 dott. ing. Nino APRILIS
 dott. ing. Valentina CANCIAN PUTTON



IL DIRETTORE DELL'AREA OPERATIVA:
 dott. ing. Enrico RAZZINI

IL RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO:

NOME FILE:
 1207M0201010.pdf

DATA PROGETTO:
 30.08.2012

312TN

CODICE MASTRO

12 07 0

ANNO N.PROGETTO REVISIONE

Modellazione bidimensionale del Cormor tra Basaldella e Terenzano e della cassa di laminazione a valle di Zugliano

1. Premessa

Si esegue il modello bidimensionale a moto vario corrispondente ad un'onda di piena con tempo di ritorno $T_R = 200$ anni (Figura 1) sul torrente "Cormor" tramite il codice Basement dell'ETH al fine della verifica idraulica del nuovo tracciato del rilevato stradale della Tangenziale Sud di Udine e della sua interconnessione con la cassa di laminazione in derivazione prevista dall'Autorità di bacino regionale a valle di Zugliano. Il tratto del corso d'acqua di cui si esegue la simulazione è compreso tra l'abitato di Basaldella (monte) e Terenzano (valle) ed è lungo circa 4 km. Il rilevato stradale della Tangenziale Sud di Udine attraversa l'alveo e la zona golenale circa 700 m a valle dell'abitato di Zugliano (a circa 1400 m dall'abitato di Basaldella). La cassa di laminazione comprende tutta l'area golenale destra da circa 550 m a valle di Basaldella fino alla sacca (all'altezza dell'azienda agricola) creata dall'argine golenale destro che quasi si chiude sull'alveo.

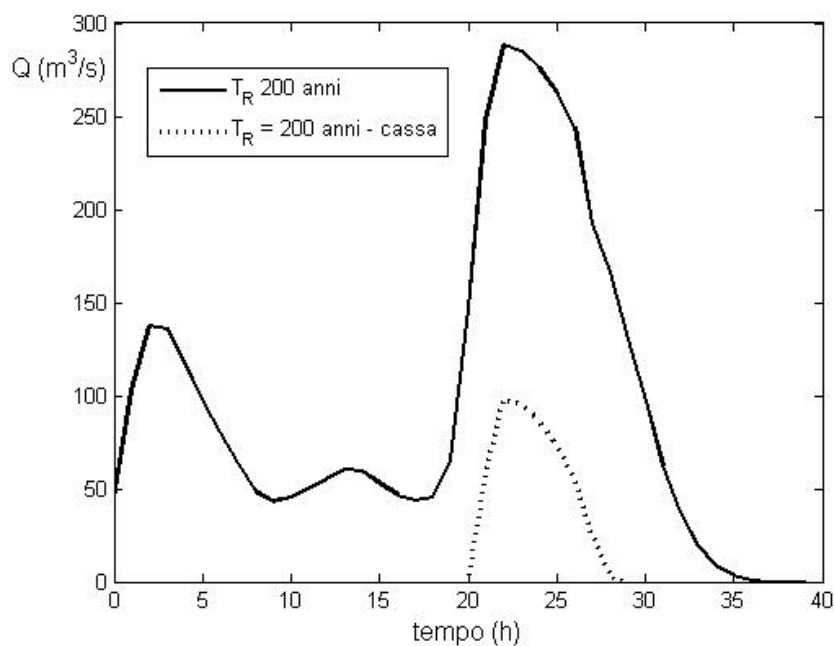


Figura 1. *L'onda di piena corrispondente ad un tempo di ritorno di 200 anni.*

La modellazione viene eseguita per l'onda di piena $T_R = 200$ anni per il torrente Cormor, sia allo stato attuale che allo stato di progetto, ovvero in presenza del tracciato del rilevato stradale della Tangenziale Sud di Udine. Viene, inoltre, simulato il caso della presenza della cassa di espansione di Zugliano con

un'onda di piena già laminata degli interventi di monte. Secondo quanto previsto dal Progetto di Piano Stralcio, la massima portata esitabile a valle della piana è di 100 mc/s. Lo stesso Progetto di Piano impone l'inizio dello sfioro nella cassa al transito nel Cormor di una portata di 90 mc/s. Senza considerare l'effetto benefico di sfasamento dell'onda di piena prodotto dalla cassa, la propagazione all'interno della stessa viene effettuata imponendo una portata scaricata a valle non superiore a 10 mc/s che, sommati ai 90 mc/s defluenti in alveo, non superano la portata massima esitabile del corso d'acqua nel tratto di valle. Per quanto riguarda la simulazione relativa al torrente Cormor per la definizione del limite superiore dell'area di calcolo, si è scelta la sezione di monte in corrispondenza dell'abitato di Basaldella perchè il corso d'acqua scorre incassato tra due sponde elevate. L'area golenale del torrente Cormor a valle di Basaldella si allarga sulla destra e presenta una forte pendenza trasversale con le quote minori, se si esclude il letto del corso d'acqua, in corrispondenza della sponda naturale destra. All'altezza dell'azienda agricola la sponda destra viene a chiudere l'area golenale creando una sacca. A valle della sacca, l'area golenale si riduce presentando un minor gradiente trasversale. La sezione di valle viene quindi scelta 500 m circa a valle della sacca per la presenza di un tratto rettilineo con un minor gradiente trasversale tra le sponde golenali. Per quanto riguarda il contorno laterale dell'area di calcolo, in destra coincide con la sponda mentre in sinistra è stato determinato anche in base alla carta delle aree inondate redatte dall'ing. Foramitti per conto del Consorzio Ledra – Tagliamento dopo l'evento di piena del Settembre 1998, il cui colmo è stato stimato da Aprilis (2006) in $250 \text{ m}^3/\text{s}$ sulla base dei livelli rilevati al ponte di Basaldella. La batimetria è stata ottenuta dal rilievo Lidar dell'Autorità di Bacino Regionale. La mesh è stata realizzata utilizzando elementi rettangolari per l'alveo e triangolari per l'area golenale. In alveo in corrispondenza del precedente tracciato del rilevato ed in corrispondenza dei due ponti la mesh è stata realizzata con un alta densità di elementi per raffinare il calcolo di velocità e profondità. Per quanto riguarda la condizione al contorno di valle, alle portate $Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$ e $Q = 350 \text{ m}^3/\text{s}$ corrispondono rispettivamente le seguenti quote del pelo libero: 67.0 e 67.3 m.

La taratura del modello del moto della corrente del torrente Cormor viene eseguita basandosi sulle quote raggiunte dall'acqua in piazza a Zugliano per una piena il cui picco stimato è $250 \text{ m}^3/\text{s}$ adottando i seguenti coefficienti di scabrezza in tabella 1 per cui si ottiene una profondità media di 0.15 m sulla piazza di Zugliano (secondo lo studio dell'ing. Foramitti riguardo la piena del Settembre 1998 precedentemente citato). La taratura viene eseguita simulando a moto permanente il picco di piena $Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabella 1 . Valori del coefficiente di scabrezza utilizzati

fondo	K_s (m ^{1/3} /s)	n (s/m ^{1/3})
alveo	30	0.033
sponda	27	0.037
area golenale	15.38	0.065
alberi	9.1	0.11
case sparse	6.25	0.16
centro abitato	4	0.25

In Figura 2 l'andamento delle profondità simulate in corrispondenza della piazza di Zugliano ed aree limitrofe. Per rendere meglio la figura si è utilizzata una scala delle profondità tra 0 escluso e 0.5 m incluso, con quote superiori a 0.5 m dello stesso colore di quelle a 0.5 m.

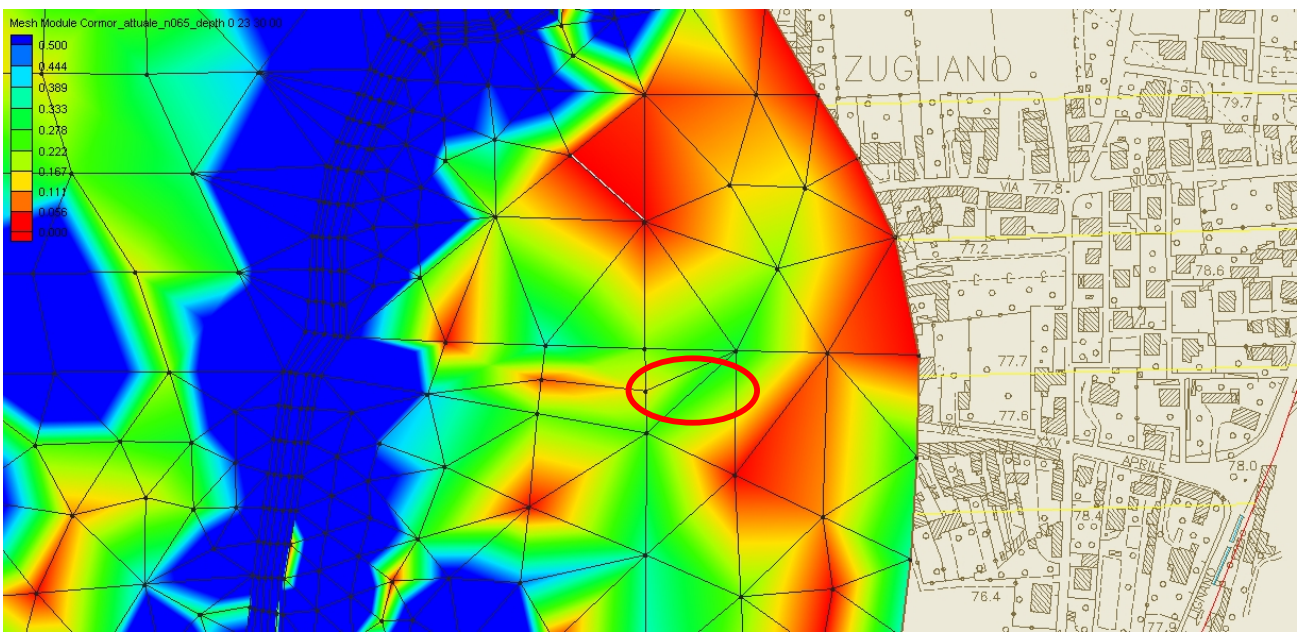


Figura 2. I valori di profondità simulati dal modello a regime permanente per una portata $Q = 250$ m³/s (le aree con profondità superiore a 0.5 m sono rappresentate con lo stesso colore di quelle a profondità 0.5 m); nell'ovale in rosso la piazza di Zugliano.

La cassa di laminazione (Figura 3) è conforme al "Progetto di Piano Stralcio per la difesa idraulica del torrente Cormor" a pagina 222 da qui in avanti indicato con l'acronimo "PPS_Cormor222" sbarra l'intera area golenale destra circa 550 m a valle dell'abitato di Zugliano ed è delimitata in destra orografica dal terrazzo alluvionale ed in sinistra dalla sponda destra dell'alveo del Cormor. L'entrata della cassa è in corrispondenza del vertice Nord orientale e l'uscita della cassa in corrispondenza della

sacca dove si congiungono l'argine golenale destro e la sponda destra dell'alveo del Cormor. L'entrata della cassa corre lungo la sponda destra dell'alveo del Cormor per circa 150 m e come nel caso precedente vi si è realizzato un imbocco per meglio regolarizzare il flusso in entrata. La cassa è realizzata da due compartimenti comunicanti tra loro mediante uno stramazzo in parete grossa. La distanza tra i due compartimenti è di 14 m per tener conto di una larghezza arginale sommitale di 6.5 m imposta da motivi di viabilità (PPS_Cormor222). L'uscita dalla cassa è realizzata con altro stramazzo in parete grossa. Oggetto delle simulazioni per la cassa di laminazione è il dimensionamento dei due stramazzi e la verifica. Oggetto delle simulazioni per la cassa di laminazione è il dimensionamento dei due stramazzi affinché la portata in uscita dalla cassa non superi il valore di $10 \text{ m}^3/\text{s}$ e la verifica della capacità d'invaso del volume [180000 m^3]. Secondo il PPS_Cormor222 il limite massimo di invaso del primo comparto è pari a 73 m e quello del secondo è 71 m. La mesh della cassa di laminazione (Figura 3) è stata realizzata utilizzando quanto più possibile elementi rettangolari, aumentando la densità degli elementi in corrispondenza del bordo esterno di entrata ed uscita della portata e del confine tra i due compartimenti per raffinare il calcolo di profondità e velocità. Nella tabellina sottostante si riassumono le simulazioni da eseguire con le rispettive onde di piena.

Tabella 2 . Elenco delle simulazioni

simulazione	Regime di moto	Portata
Taratura (piena 1998)	permanente	$Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$
Situazione attuale	vario	Idrogramma di piena, $T_R = 200$ anni (Fig. 1)
Situazione con rilevato	vario	Idrogramma di piena, $T_R = 200$ anni (Fig. 1)
Cassa di laminazione	vario	Idrogramma di piena cassa, $T_R = 200$ anni (Fig. 1)

2 Il codice Basement

Il software *Basement* (*Basical Simulation Environment*) – versione 2.2 - è stato sviluppato da VAW (laboratorio di idraulica idrologia e glaciologia di Zurigo) in collaborazione con ETH (laboratorio federale svizzero di tecnologia). Il codice risolve le equazioni di De Saint Venant bidimensionali, nell'ipotesi di pressione idrostatica lungo la verticale. Per la soluzione il codice utilizza la tecnica dei volumi finiti su griglia non strutturata. La tecnica dei volumi finiti consente di rappresentare in modo corretto sia correnti in moto subcritico che supercritico, come pure di descrivere fronti d'onda ripidi

come quelli che si verificano in caso di rottura d'argini o dighe. La tecnica dei volumi finiti consente inoltre il controllo preciso dell'equazione di continuità nei problemi di flood and dry (relativi agli elementi che vengono parzialmente bagnati o che ad istanti successivi risultano bagnati o asciutti) , continuità non sempre strettamente garantita nei metodi agli elementi finiti e differenze finite. BASEMENT è perciò particolarmente adatto a descrivere propagazioni di onde su asciutto come quelle che si verificano durante gli allagamenti delle zone golenali.

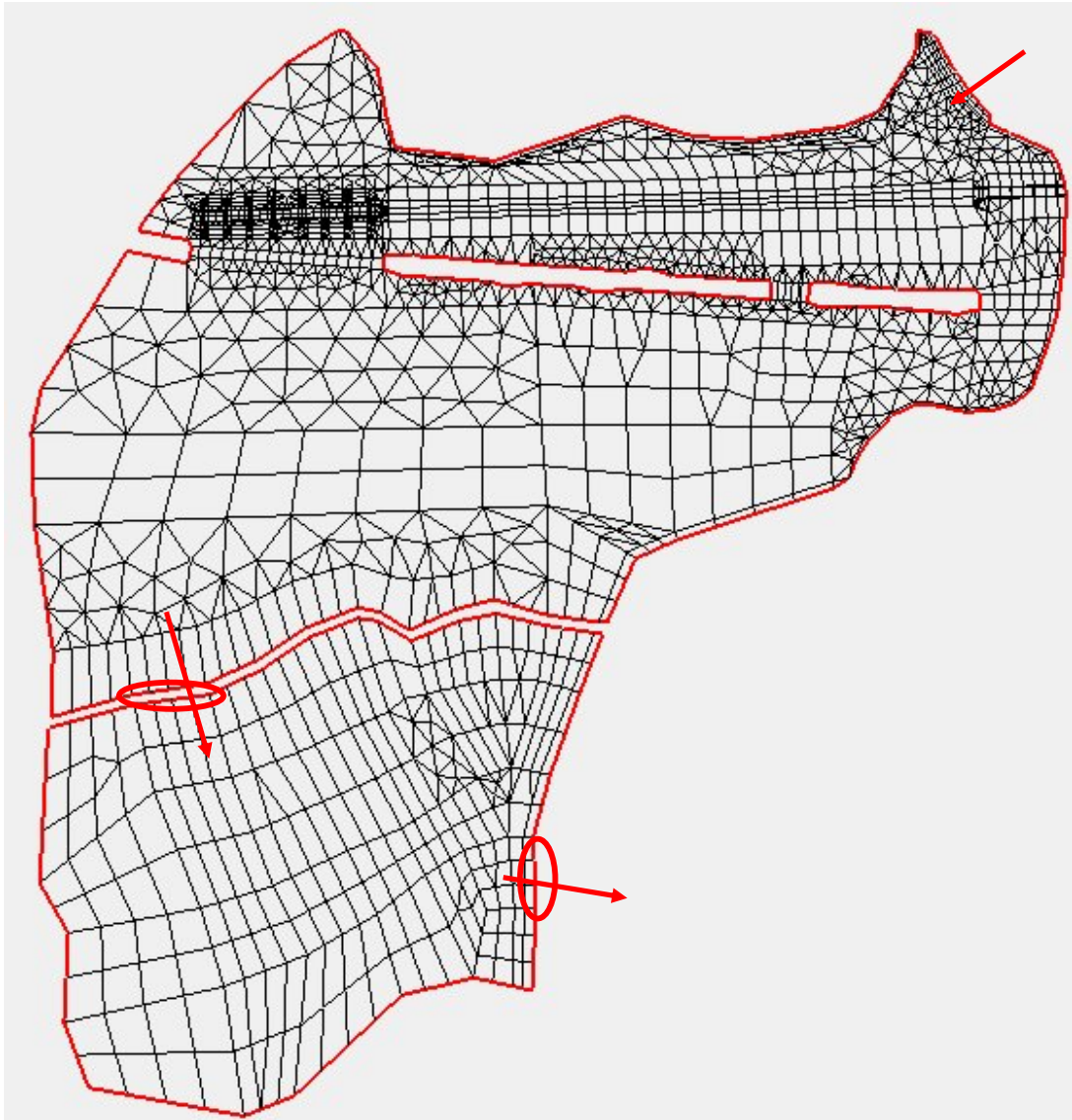


Figura 3. *Mesh della cassa di laminazione con cerchiato in rosso le posizioni dei due stramazzi.*

Le griglie non strutturate consentono di descrivere in dettaglio il dominio di calcolo, permettendo di variare le dimensioni degli elementi infittendo la griglia di calcolo dove le variazioni geometriche sono più accentuate e/o dove si vuole un livello di dettaglio più accurato.

Nei modelli costruiti con BASEMENT è possibile definire come condizioni al contorno di valle condizioni di moto uniforme o relazioni livello e portata. Come condizioni al contorno interne è inoltre possibile definire strutture come stramazzi e tombini.

3 Svolgimento delle simulazioni

Nel presente capitolo si illustra lo svolgimento delle simulazioni. Le simulazioni sono state eseguite in moto vario utilizzando le onde di piena in Figura 1 per la condizione al contorno di monte.

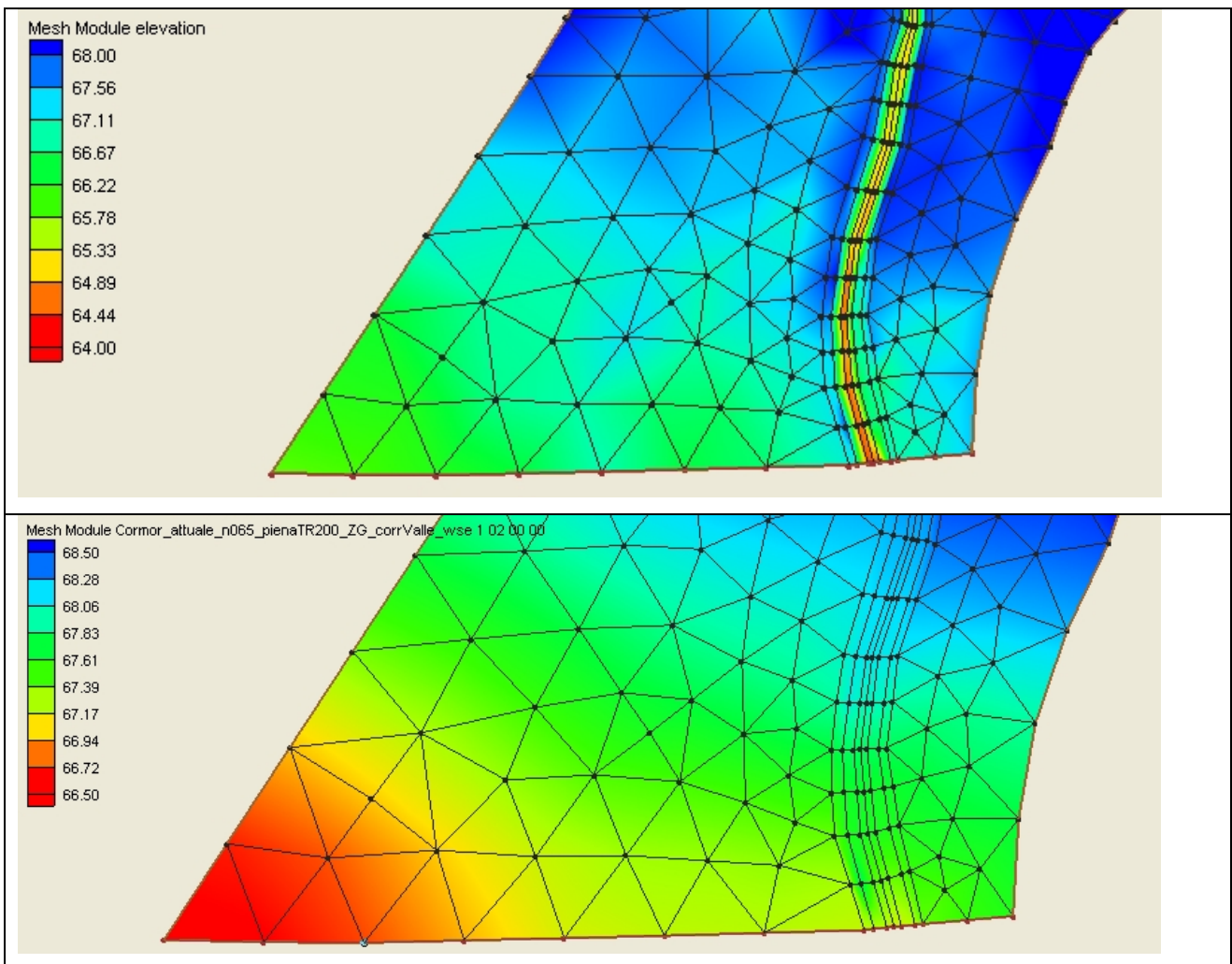


Figura 4. La zona di valle del campo di moto con le quote del terreno (in alto) e della superficie libera (in basso) simulata per la situazione attuale in corrispondenza della portata massima transitante.

A monte nel caso della simulazione della piena sul Cormor si è realizzato un imbocco con sezioni fittizie per tre motivi. Il primo è che per portate inferiori al primo picco di piena non tutta la sezione di monte risulta bagnata. Il secondo è che anche quando dovesse risultare tutta bagnata è impossibile ripartire la portata che corrisponde realmente ad ogni elemento della sezione di monte. Il terzo motivo è che per i due motivi precedentemente illustrati vi possono essere instabilità di tipo numerico e/o valori simulati non corretti. Nel caso della simulazione della cassa di laminazione si è altresì proceduto a creare un imbocco per evitare problemi di instabilità numerica causati da topografia irregolare.

Nel caso della simulazione della piena sul torrente Cormor, per la condizione al contorno di valle non si è potuto utilizzare la scala delle portate poichè in destra idrografica la golena presenta una profonda depressione rispetto alla sommità della sponda del torrente Cormor (Figura 4a). Questo significa che durante la fase ascendente della piena l'acqua esondata a monte della sezione di valle viene incanalata in questa depressione prima ancora che tutta la destra idrografica della sezione di valle sia bagnata. Inoltre anche quando per portate elevate tutta la sezione di valle risulta bagnata la quota nella depressione risulta 0.5 m più bassa che in alveo (Figura 4b) e quindi a maggior ragione l'utilizzo di una scala delle portate non risulta fisicamente valida. Quindi per la condizione al contorno di valle si è utilizzata la condizione a gradiente nullo ovvero imponendo che la derivata della velocità e della superficie libera siano nulle.

Nel caso della simulazione della cassa di laminazione si è utilizzato uno stramazzo in parete grossa come condizione al contorno di valle. Il coefficiente di portata è stato assunto pari a 0.333 invece che a 0.385 (coefficiente di portata teorico in regime permanente) per tener conto sia delle contrazioni di vena laterali, del moto vario ed anche del rapporto tra carico idraulico e profondità dello stramazzo come suggerito sia dal Reference Manual del Basement che da Longo e Petti (2005). Lo stesso coefficiente di portata viene assunto per lo stramazzo interno che collega i due compartimenti.

All'interno del campo di moto si definiscono delle stringhe di nodi corrispondenti alle aperture dei tre ponti per cui si è richiesto il calcolo della portata. Nel caso della cassa di laminazione la stringa corrispondente al ponte principale è ridotta alla parte effettivamente contenuta nella cassa. L'intervallo temporale scelto per la scrittura dei file di output è 5 minuti. Le simulazioni sono state eseguite assumendo la CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) pari a 0.85 (condizione di stabilità) ed una profondità minima nell'elemento per cui si abbia propagazione pari a 0.05 m. Il tempo di inizio della simulazione per la piena del Cormor viene fatto coincidere con l'ora zero di Figura 1 mentre per la cassa di laminazione per l'ora 20 di Figura 1.

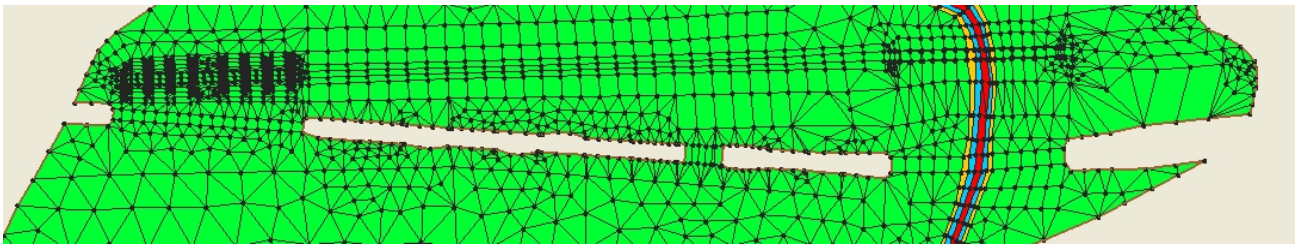


Figura 5. *La mesh in corrispondenza del nuovo tracciato della Tangenziale Sud di Udine.*

4 Risultati delle simulazioni

Nel presente capitolo si illustrano i risultati delle simulazioni per il torrente Cormor allo stato attuale, allo stato di progetto con tre ponti (Figura 5) e per la cassa di laminazione (Figura 3). Per quanto riguarda il Cormor, essendo il moto vario si è scelto di rappresentare l'intero campo di moto in un istante prossimo a quello in cui si hanno i valori massimi di velocità e profondità in corrispondenza del nuovo tracciato della tangenziale.

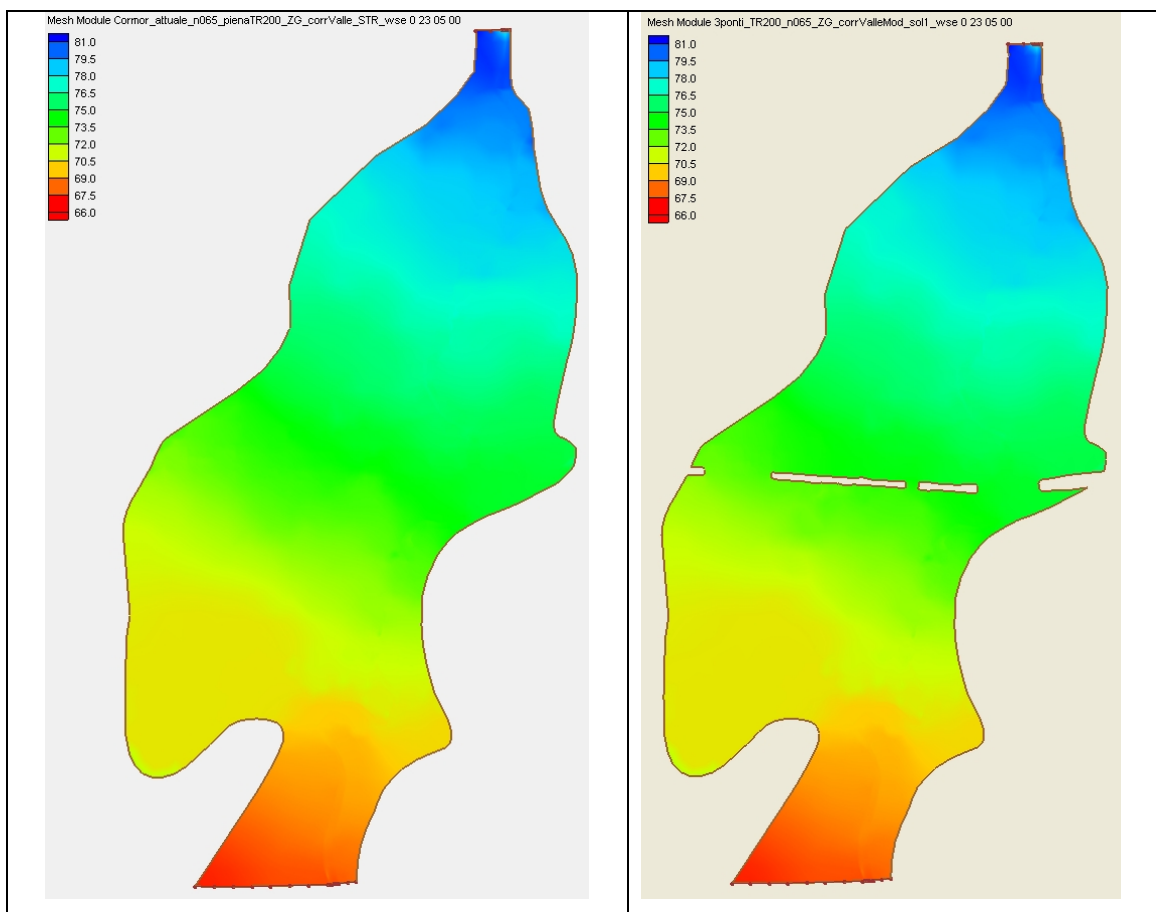


Figura 6. *I valori di superficie libera per le simulazioni allo stato attuale (sinistra) e di progetto (destra) campo di variazione tra 66.0 (rosso) e 81 (blu) metri.*

Facendo riferimento alla simulazione eseguita per lo stato attuale i valori massimi di portata alla sezione di valle si hanno con 128 minuti di ritardo rispetto alla sezione di monte. I valori massimi di portata relativamente al nuovo tracciato si hanno con 45 minuti di ritardo per l'alveo del torrente Cormor, con 50 minuti di ritardo per il secondo ponte ed infine con 65 minuti di ritardo per il terzo ponte. Si presentano quindi alle figure seguenti i valori di profondità, velocità e quota della superficie libera per le simulazioni allo stato attuale e di progetto alle ore 23.05 dopo l'inizio della simulazione (ovvero con 1 ora e 5 minuti di ritardo rispetto al picco di portata in entrata).

Si sottolinea che tutti i valori relativi all'imbocco non sono da prendere in considerazione perchè l'imbocco stesso è stato creato artificialmente per impedire malfunzionamenti nella condizione al contorno di monte come spiegato al punto precedente.

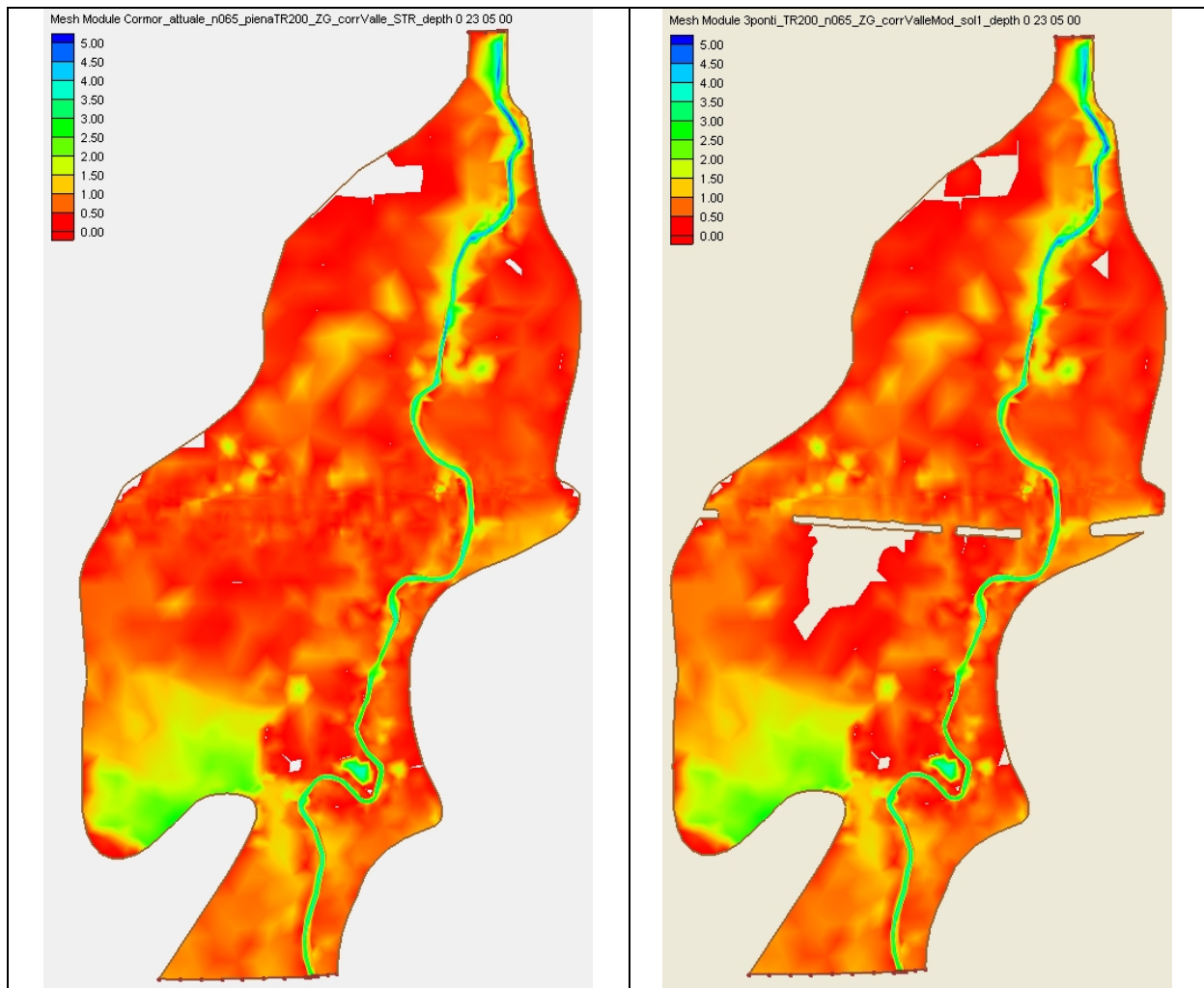


Figura 7. I valori di profondità per le simulazioni allo stato attuale (sinistra) e di progetto (destra); campo di variazione tra 0.0 (rosso) e 5 (blu) metri.

In Figura 6 viene rappresentata la superficie libera dell'intero campo di moto per le due configurazioni che risulta compresa tra circa 66.0 (valle) e 81 m (monte).

In Figura 7 vengono rappresentati i valori di profondità relativi all'intero campo di moto, che risultano compresi tra 0 e 5 m circa. Dall'esame della Figura 7, parte centrale e sinistra (destra idrografica), si evince che ci sono tre zone a valle del rilevato che rimangono asciutte (colore bianco).

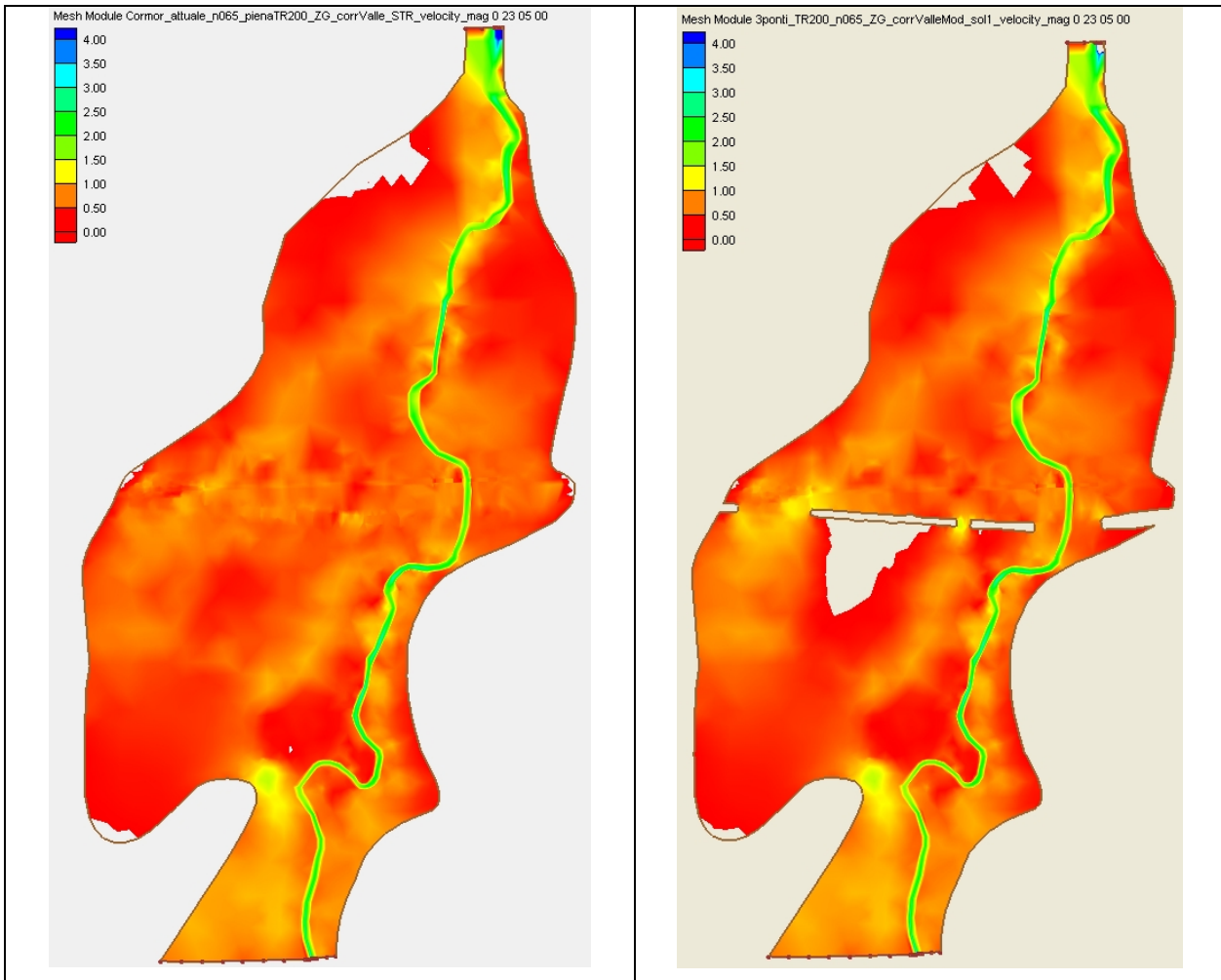


Figura 8. *I valori di velocità per le simulazioni allo stato attuale (sinistra) e di progetto (destra); campo di variazione tra 0.0 (rosso) e 4 (blu) metri su secondo.*

In Figura 8 vengono rappresentati i valori di velocità per l'intero campo di moto che risultano compresi, escluso l'imbocco, tra 0 e 4 m/s. Si evince che nelle aree golenali sono mediamente inferiori a 1 m/s.

In Figura 9 viene rappresentato il campo di velocità in termini vettoriali: per ogni nodo della mesh viene disegnato il vettore velocità. Di conseguenza il raffittimento dei vettori, rappresentanti direzione, modulo e verso della velocità, dipende unicamente dalla densità dei nodi e non significa un

raffittimento delle linee di corrente. La densità dei nodi aumenta in alveo ed in corrispondenza dei ponti. Poichè la mesh è stata costruita a partire da quella utilizzata nel Dicembre 2006 dal sottoscritto per la relazione idraulica allegata alla precedente revisione del progetto definitivo, vi è un raffittimento nelle aree dove erano posizionati i ponti del precedente tracciato della tangenziale.

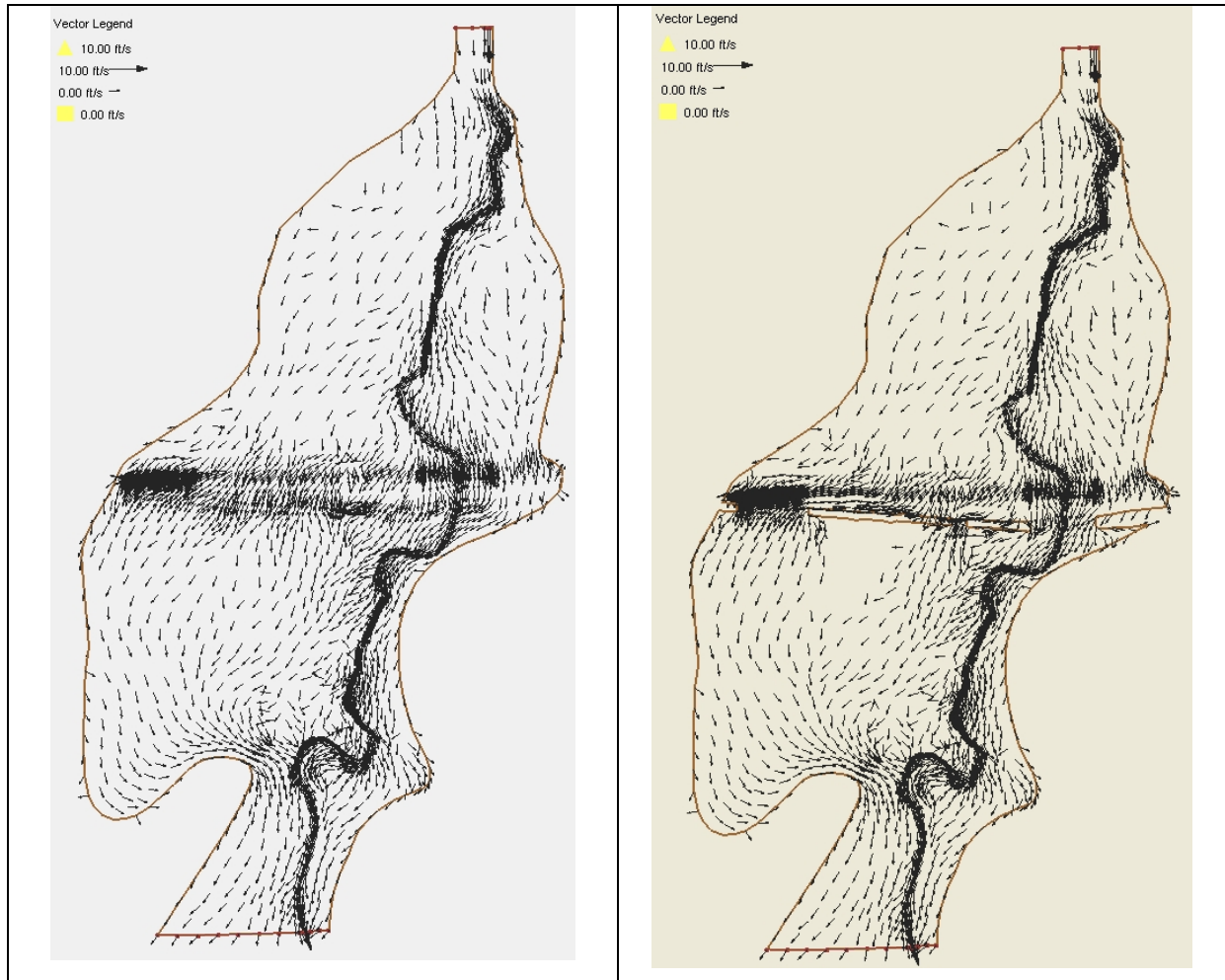


Figura 9. **Rappresentazione del vettore velocità per le simulazioni allo stato attuale (sinistra) e di progetto (destra); campo di variazione tra 0.0 e 4 metri su secondo (10 ft/s).**

In Figura 10, infine, è rappresentato l'andamento delle portate in entrata ed in uscita per le due configurazioni attuale e di progetto: si evince che le curve di uscita sono quasi identiche per tutti e due i casi. Ovvero l'introduzione del rilevato stradale non ha alcun effetto tangibile di laminazione. Una controprova di ciò si può avere plottando gli idrogrammi relativi ai 3 ponti per le due configurazioni in Figura 11. In questa figura la scala delle ordinate è diversa per ciascun ponte preso in considerazione per rendere gli idrogrammi leggibili. Nonostante la diversa scala delle ordinate, si evince che i picchi

sono tutti mediamente in fase e ciò giustifica l'assenza di laminazione tra la configurazione attuale e quella di progetto.

L'ultima verifica idraulica riguarda il rigurgito a monte dovuto alla presenza del rilevato. Al nodo 644 della mesh situato nell'alveo centrale in linea d'aria, 270 m circa a valle della piazza di Zugliano e 435 m a monte dal previsto ponte sull'alveo, alle ore 22.40 dopo l'inizio dell'onda di piena, si ha un rigurgito di 0.002 m.

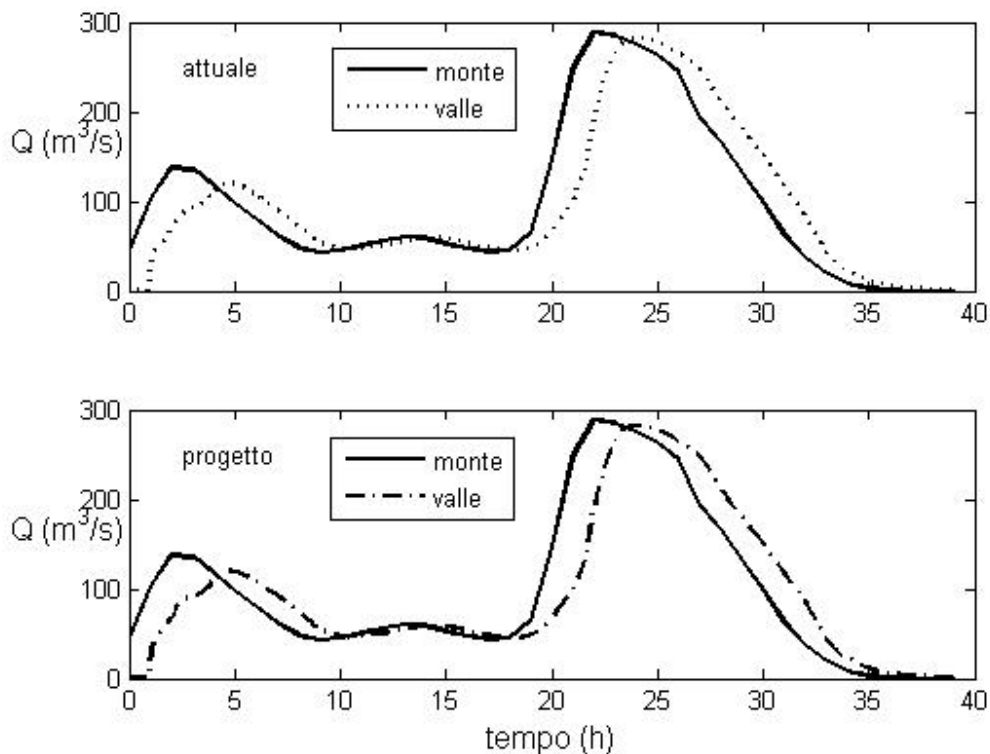


Figura 10. *Gli idrogrammi di entrata ed uscita per la situazione attuale (in alto) e di progetto (in basso).*

In Figura 12 si illustra la quota del pelo libero compresa tra 74 e 76 m del campo di moto per la situazione attuale e per la soluzione con tre ponti, la più gravosa per quanto riguarda il rigurgito. Si evince che i bordi superiori relativi alla quota 76 m sono quasi praticamente coincidenti. Al nodo 644 cerchiato in rosso la quota del pelo libero per la situazione attuale è 75.553 m mentre per quella con tre ponti è 75.555 m.

Si presentano ora i risultati delle simulazioni per la cassa di laminazione. Come nel caso precedente si sceglie di rappresentare il campo di moto negli istanti in cui si hanno i valori massimi di velocità e

profondità in corrispondenza sia dello stramazzo di comunicazione tra i due compartimenti della cassa e che in quello di uscita, ovvero corrispondenti al picco della portata transitante.

Assumendo come zero l'inizio dell'onda di piena entrante nella cassa che corrisponde a 20 ore dall'inizio della piena sul Cormor, i valori massimi di profondità e velocità in corrispondenza dello stramazzo interno si hanno con 3 ore e 30 minuti di ritardo rispetto al valore di picco di portata entrante e quindi con 5 ore e 30 minuti dopo l'inizio dell'onda di piena nella cassa e 25 ore e 30 minuti dopo l'inizio dell'onda di piena sul Cormor per la sezione di monte considerata. Invece per quanto riguarda lo stramazzo di uscita dal secondo compartimento della cassa di laminazione i valori massimi di velocità e profondità si hanno 7 ore e 45 minuti in ritardo rispetto al valore di picco di portata entrante e quindi con 9 ore e 45 minuti dopo l'inizio dell'onda di piena nella cassa e 29 ore e 45 minuti dopo l'inizio dell'onda di piena sul Cormor per la sezione di monte considerata. Il ritardo del picco di portata in uscita dalla cassa (stramazzo compartimento di valle) rispetto a quello in uscita dal primo compartimento è quindi di 4 ore e 15 minuti.

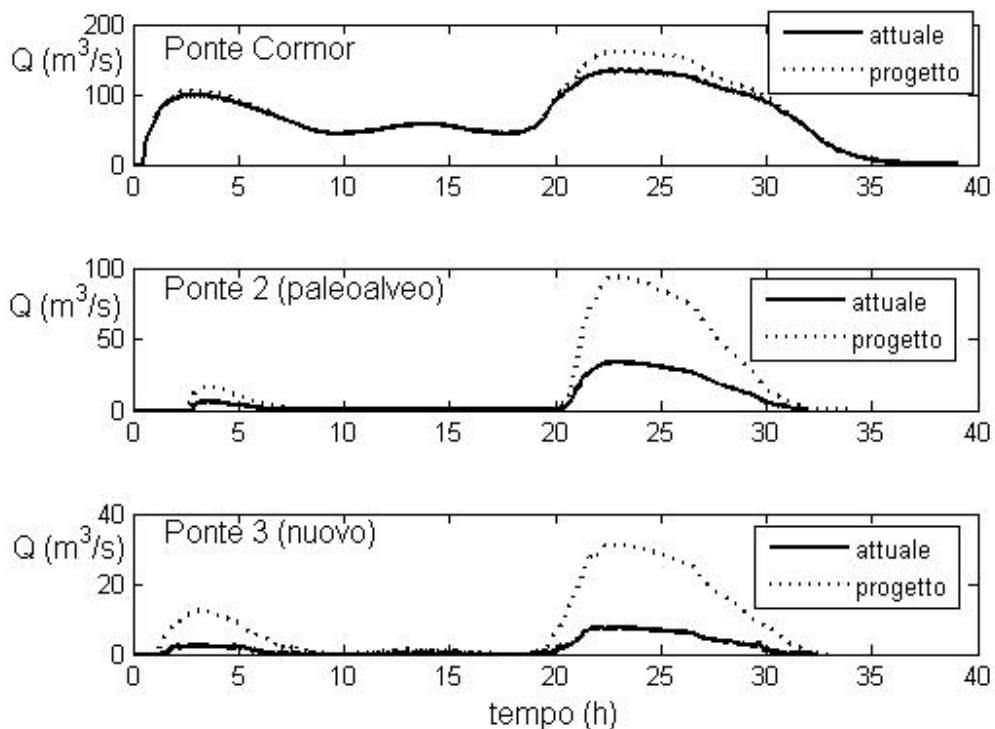


Figura 11. *Gli idrogrammi in corrispondenza del ponte del Cormor (in alto), ponte 2 (al centro) e ponte 3 (in basso) per le due configurazioni (attuale e progetto).*

Il primo stramazzo (quello di comunicazione tra i due compartimenti) è lungo 98.4 m e la quota del petto è 72.4 m; il secondo stramazzo (quello di uscita dal secondo compartimento) è lungo 62.7 m e la quota del petto è 71.03 m.

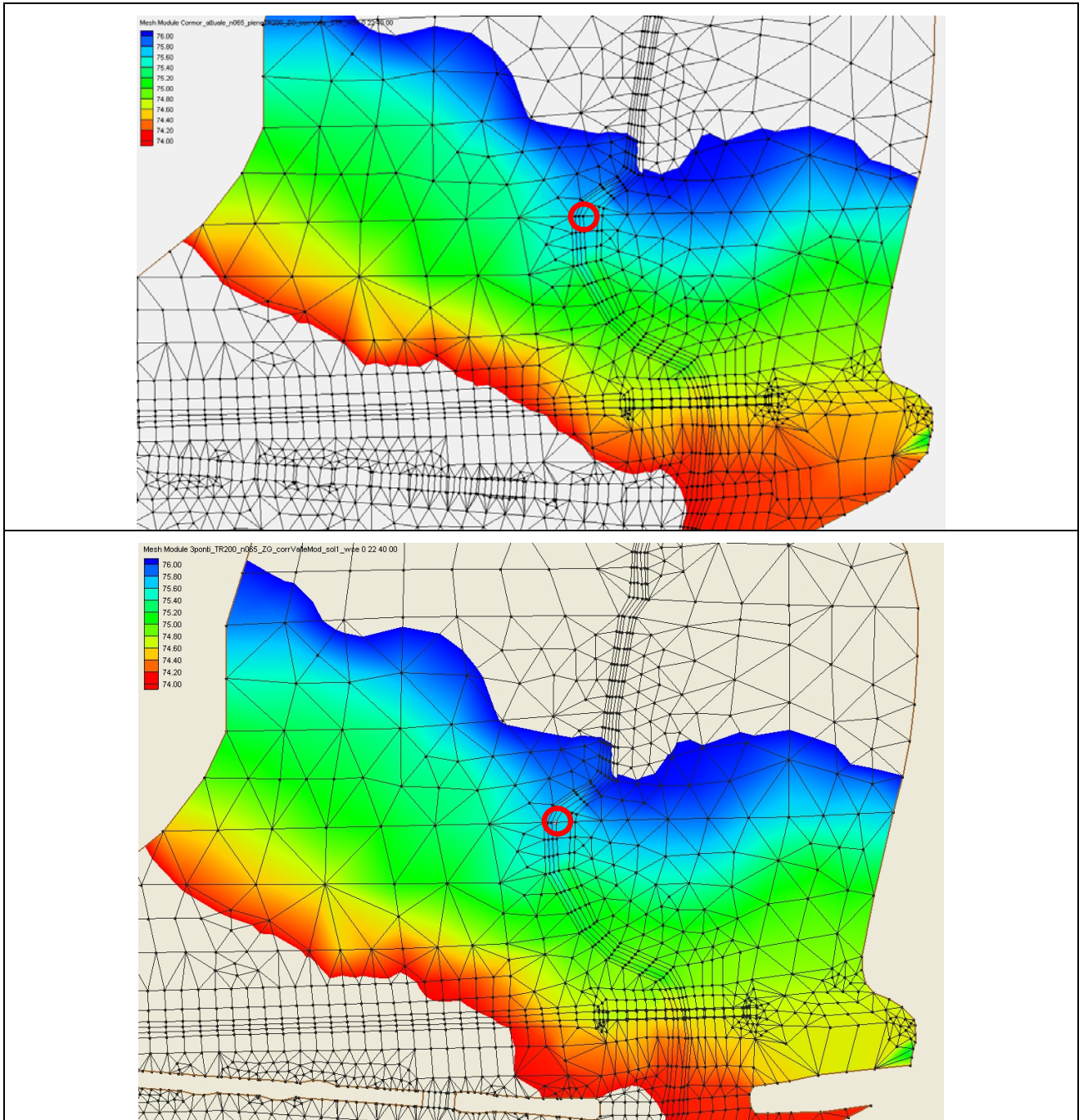


Figura 12. *Rappresentazione delle quote del pelo libero del campo di moto comprese tra 74 e 76 m per la situazione attuale (sopra) e di progetto (sotto). Cerchiato in rosso il nodo 644 della mesh.*

La quota del petto risulta superiore a quella di massimo invaso prevista per il compartimento di valle della cassa di laminazione (PPS_Cormor222), poichè questa non risulta in grado di laminare l'onda di piena entrante dal primo compartimento in modo di avere una portata in uscita non superiore a $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Una diminuzione del petto comporterebbe infatti un aumento della portata uscente. Il petto dello stramazzo di comunicazione tra i due compartimenti è quello che permette una quota di invaso pari a 73 m che è quella di massimo invaso per il compartimento di monte della cassa di laminazione come riportato in PPS_Cormor222. Si è infatti scelto di mantenere invariata la quota di massimo invaso del compartimento di monte perchè più esteso e di aumentare quella del compartimento di valle che ha una minor estensione.

In Figura 13 viene rappresentata la superficie libera dell'intero campo di moto per le due condizioni di massima portata transitante sullo stramazzo di comunicazione e sullo stramazzo in uscita dalla cassa. Si evince che dal confine di valle del primo compartimento della cassa fino a monte, eccetto che per le aree corrispondenti al ponte principale sul Cormor e al terzo viadotto la quota del pelo libero è costante ed uguale a quella sullo stramazzo di comunicazione mentre la quota del pelo libero nel secondo compartimento risulta pressochè uguale a quella in corrispondenza dello stramazzo di uscita dalla cassa.

In Figura 14 vengono rappresentati i valori di profondità relativi all'intero campo di moto, che risultano compresi tra 0 e 5 m circa. In Figura 15 vengono rappresentati i valori di velocità per l'intero campo di moto che risultano compresi, escluso l'imbocco, tra 0 e 1 m/s. In Figura 16 viene rappresentato il campo di velocità in termini vettoriali: per ogni nodo della mesh viene disegnato il vettore velocità. Di conseguenza il raffittimento dei vettori rappresentanti direzione modulo e verso della velocità dipende unicamente dalla densità dei nodi e non significa un raffittimento delle linee di corrente. La densità dei nodi aumenta in alveo ed in corrispondenza dei ponti. Poichè si è realizzata la presente mesh a partire da quella utilizzata nel lavoro precedente del 2006, vi è un raffittimento nelle aree dove erano posizionati i ponti del precedente tracciato della tangenziale.

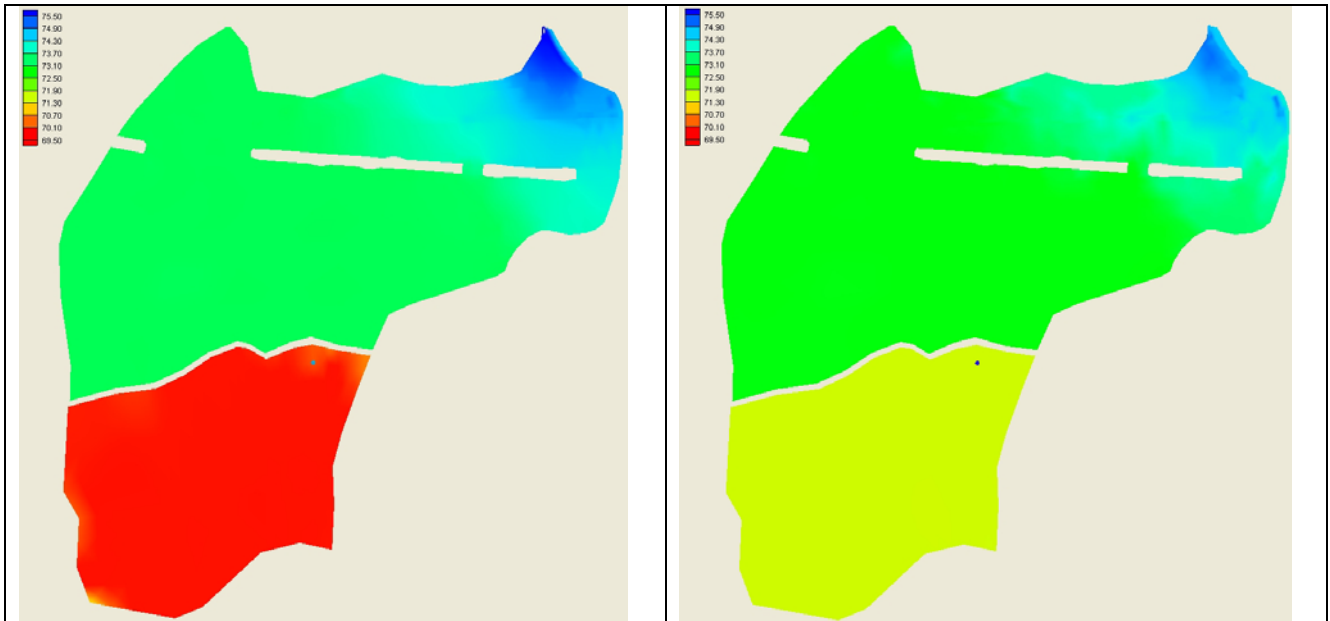


Figura 13. *I valori di superficie libera per le simulazioni corrispondenti alla massima portata transitante sullo stramazzo di comunicazione tra i compartimenti (sinistra) e di uscita dalla cassa (destra); campo di variazione tra 69.5 (rosso) e 75.5 (blu) metri.*

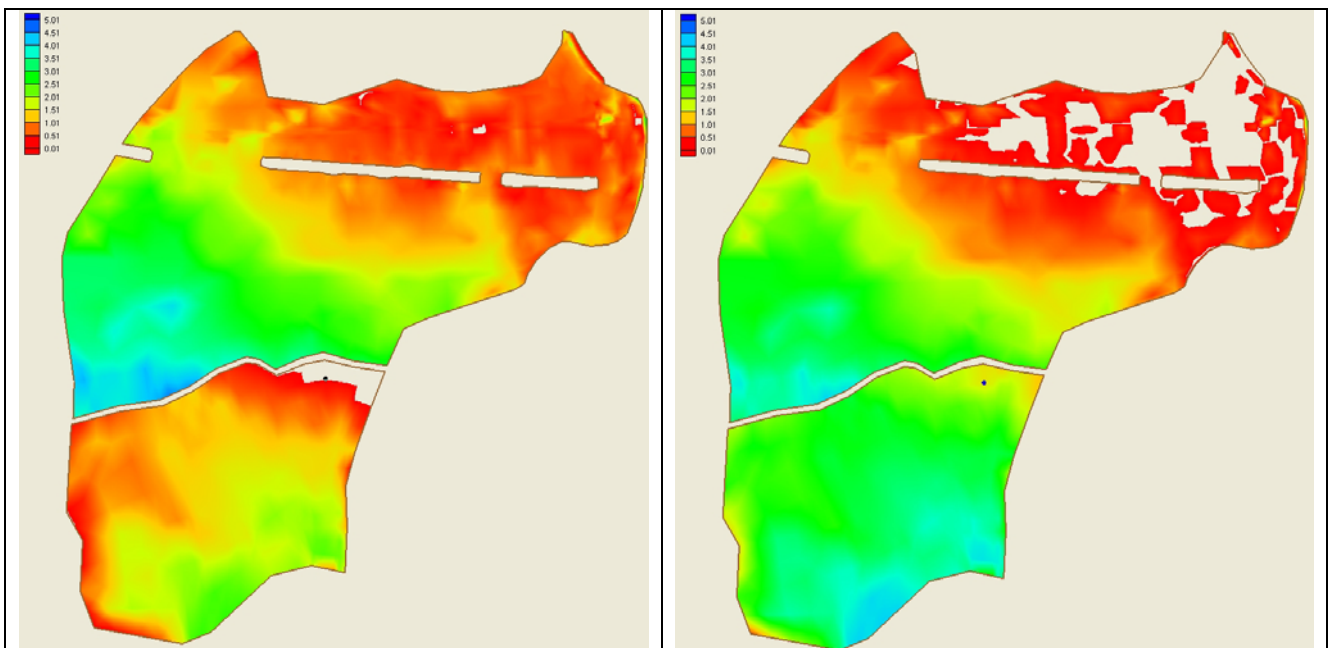


Figura 14. *I valori di profondità per le simulazioni corrispondenti alla massima portata transitante sullo stramazzo di comunicazione tra i compartimenti (sinistra) e di uscita dalla cassa (destra); campo di variazione tra 0.01 (rosso) e 5.01 (blu) metri.*

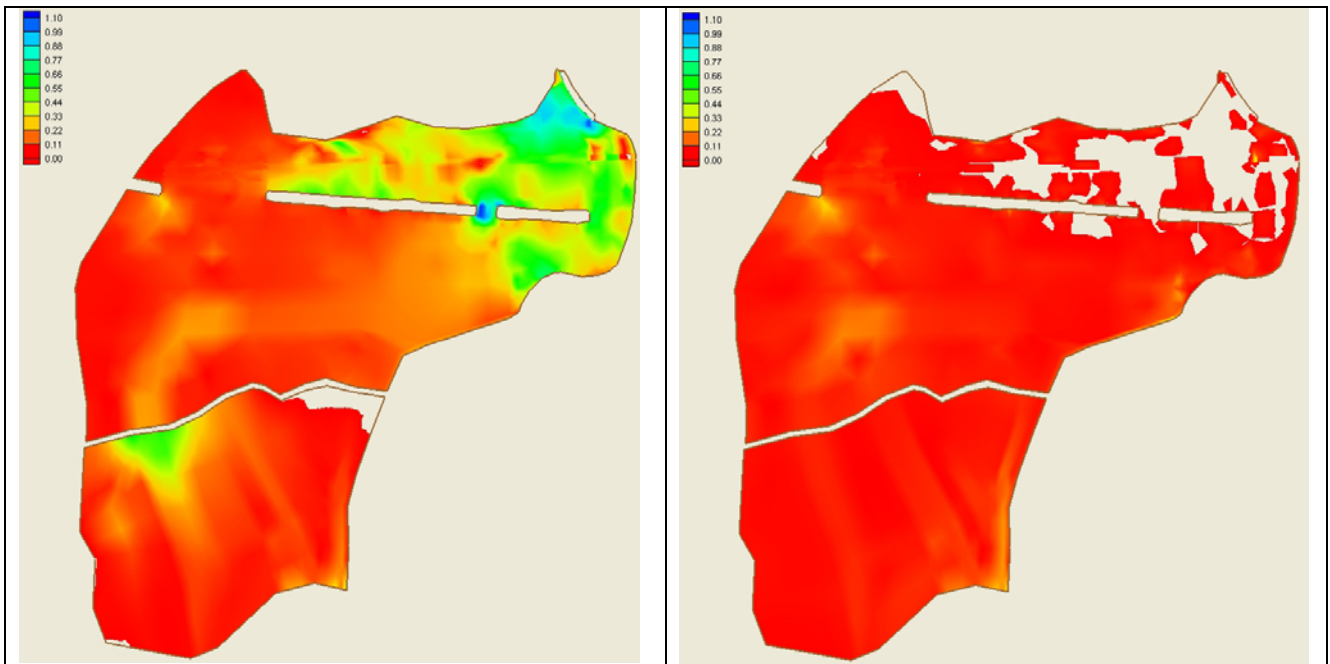


Figura 15. *I valori di velocità corrispondenti alla massima portata transitante per lo stramazzo di comunicazione (sinistra) e per quello di uscita (destra); campo di variazione tra 0.001 (rosso) e 1.101 (blu) metri su secondo.*

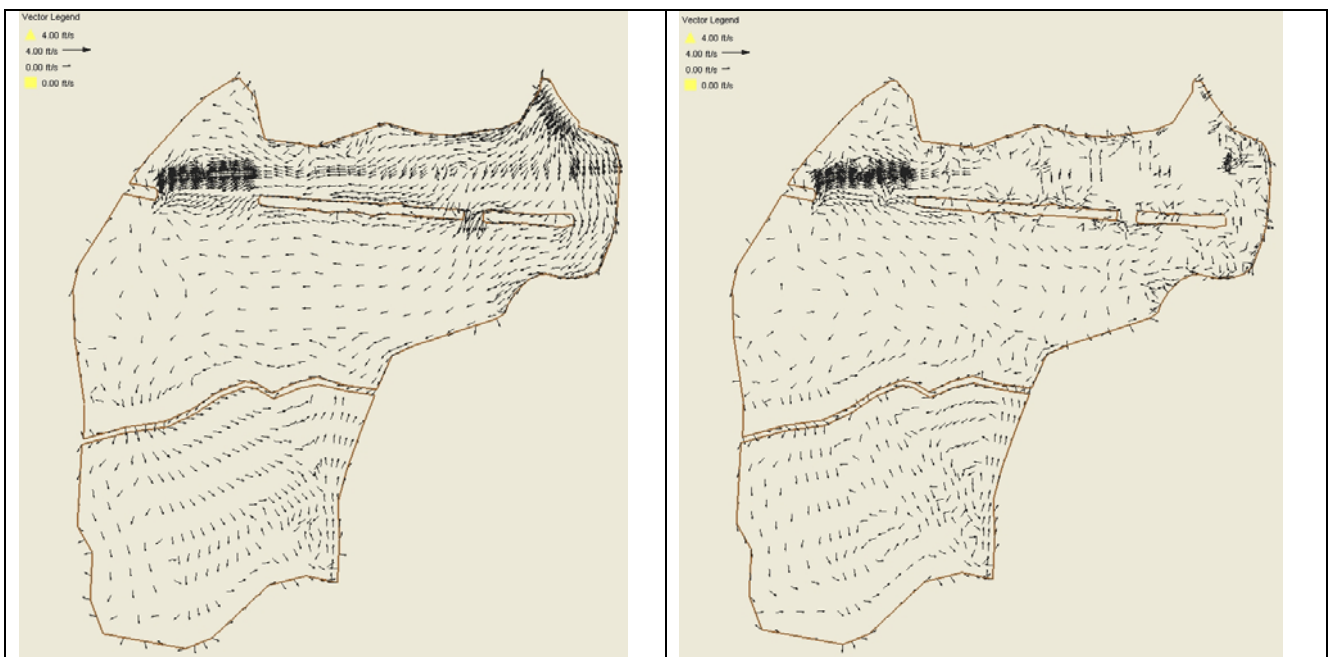


Figura 16. *Rappresentazione del vettore velocità corrispondente alla massima portata transitante sullo stramazzo di comunicazione (sinistra) e di uscita dalla cassa (destra); campo di variazione tra 0.0 e 1.21 metri su secondo (4 ft/s).*

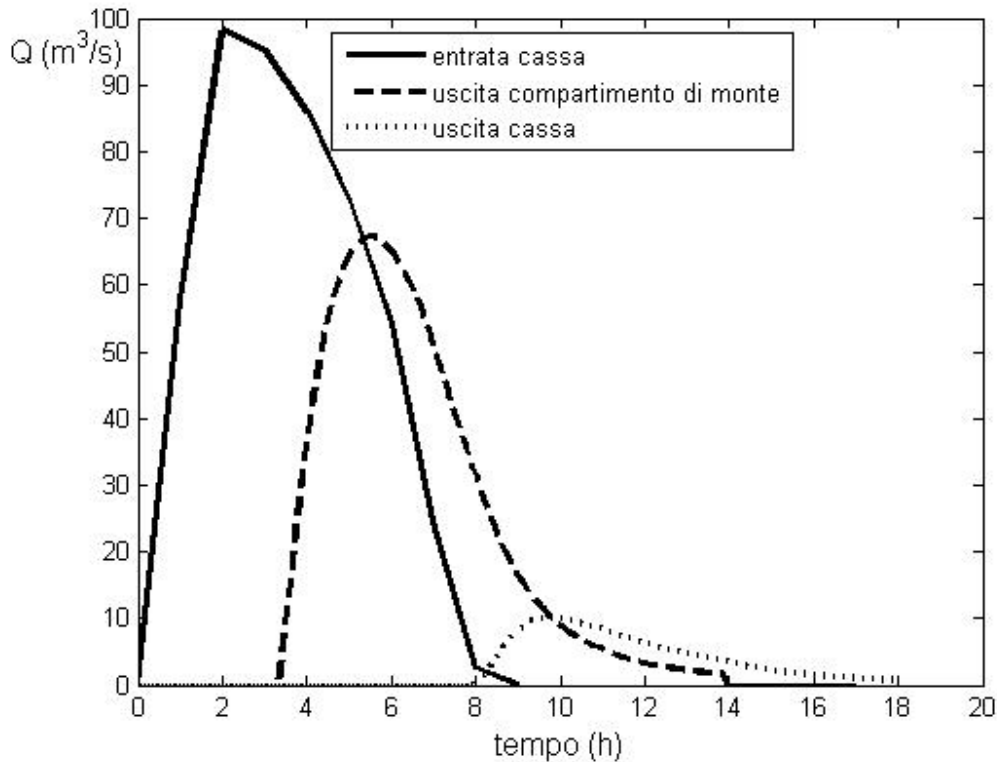


Figura 17. *Gli idrogrammi di entrata ed uscita dalla cassa di laminazione e tra i due compartimenti.*

In Figura 17 si mostra l'andamento della portata in entrata insieme a quello in uscita dallo stramazzo di comunicazione ed a quello in uscita dalla cassa.

Poichè l'esaurimento dell'onda di piena in ingresso è concomitante con l'inizio dell'onda uscente dalla cassa, risulta che quasi tutto il volume corrispondente all'onda di piena (1767132 m^3) rimane invaso nella cassa di laminazione e che da questa fuoriesce un volume pari a 169080 m^3 , per cui risulta invaso un volume pari a 1598052 m^3 . In Figura 18 l'andamento della quota del pelo libero (P.L.) in corrispondenza dei due stramazzi. Per il primo la quota massima risulta pari a 73 m mentre nel secondo a 71.26 m, 0.26 m superiore al limite fissato dal PPS_Cormor222.

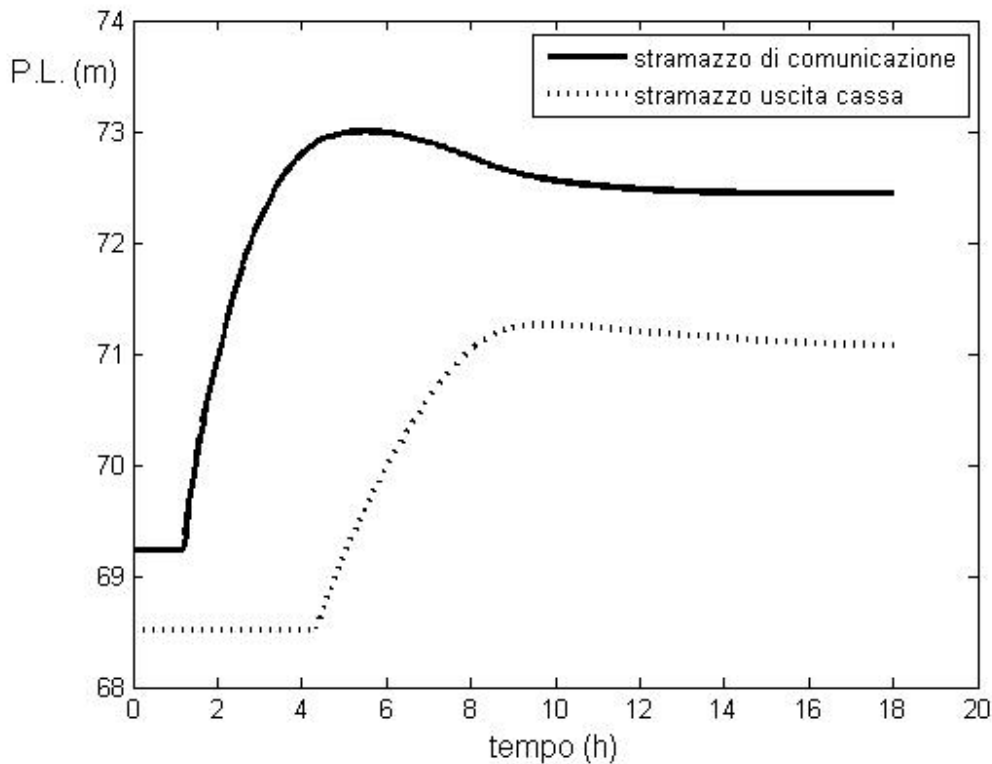


Figura 18. *Andamento della quota del pelo libero (P.L.) in corrispondenza dello stramazzo di comunicazione tra i due compartimenti della cassa e dello stramazzo di uscita dalla cassa.*

In Figura 19 si riportano l'onda di piena Tr 200 in entrata utilizzata per la simulazione allo stato attuale ridotta di $100 \text{ m}^3/\text{s}$ per tener conto della presenza dello scolmatore, l'onda di piena Tr 200 anni in entrata al Cormor ridotta dagli interventi dello scolmatore e dalla cassa di laminazione e la stessa onda traslata di 2 ore (tempo che occorre al picco di piena per arrivare alla sezione di valle) ed infine l'onda in entrata alla cassa di laminazione e quella uscente. Alla portata massima di $10 \text{ m}^3/\text{s}$ in uscita dalla cassa (vedi figura 17) corrisponde una portata in uscita dal Cormor (quella traslata), corrispondente all'onda di piena Tr 200 ridotta dalla presenza scolmatore e cassa, pari a $50 \text{ m}^3/\text{s}$. La somma dei due contributi è quindi di $60 \text{ m}^3/\text{s}$ e risulta inferiore alla portata massima transitabile in alveo secondo il Progetto di Piano Stralcio richiamato in precedenza che è $100 \text{ m}^3/\text{s}$.

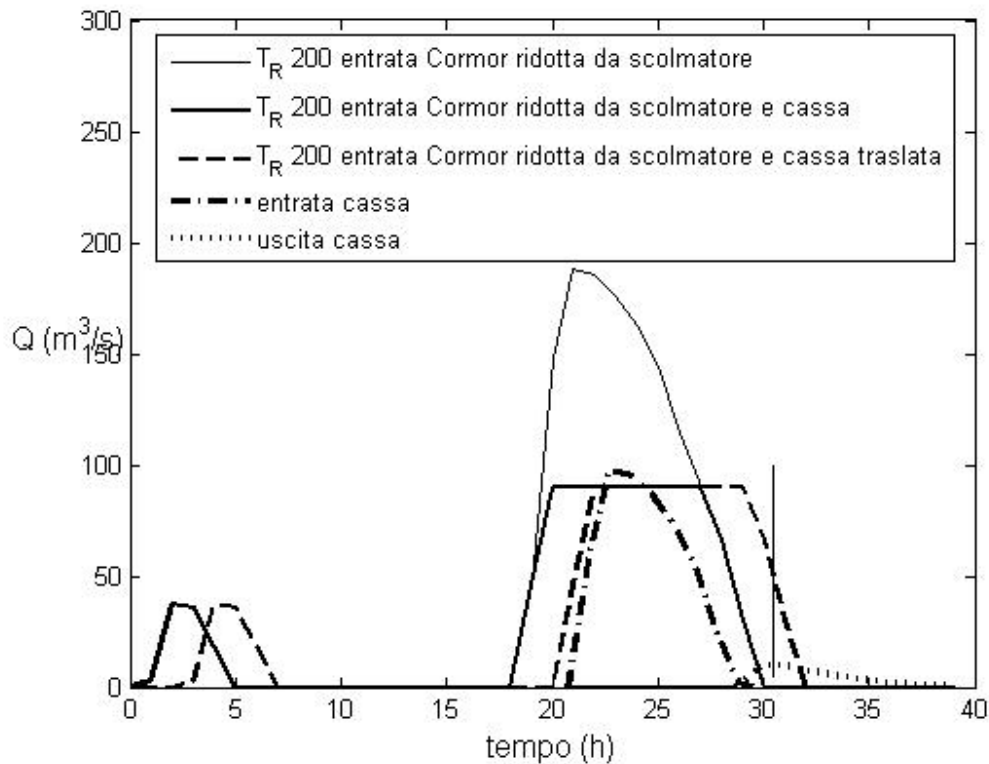


Figura 19. *Andamento dell'onda di piena T_R 200 anni ridotta dalla presenza scolmatore in entrata al Cormor, l'onda di piena T_R 200 anni ulteriormente ridotta dalla presenza della cassa in entrata al Cormor e la corrispondente traslata di 2 h ed infine l'onda entrante ed uscente dalla cassa di laminazione.*

In Figura 20 l'andamento delle portate transittive in corrispondenza dei tre ponti (per il ponte del Cormor si intende la portata transittiva nell'apertura compresa nella cassa). Si evince che il ponte sul Cormor e sul terzo viadotto hanno un deflusso superiore a quello sul paleo alveo perchè la maggior parte del flusso si incanala nelle corrispondenti aperture, come si può osservare nella Figura 21.

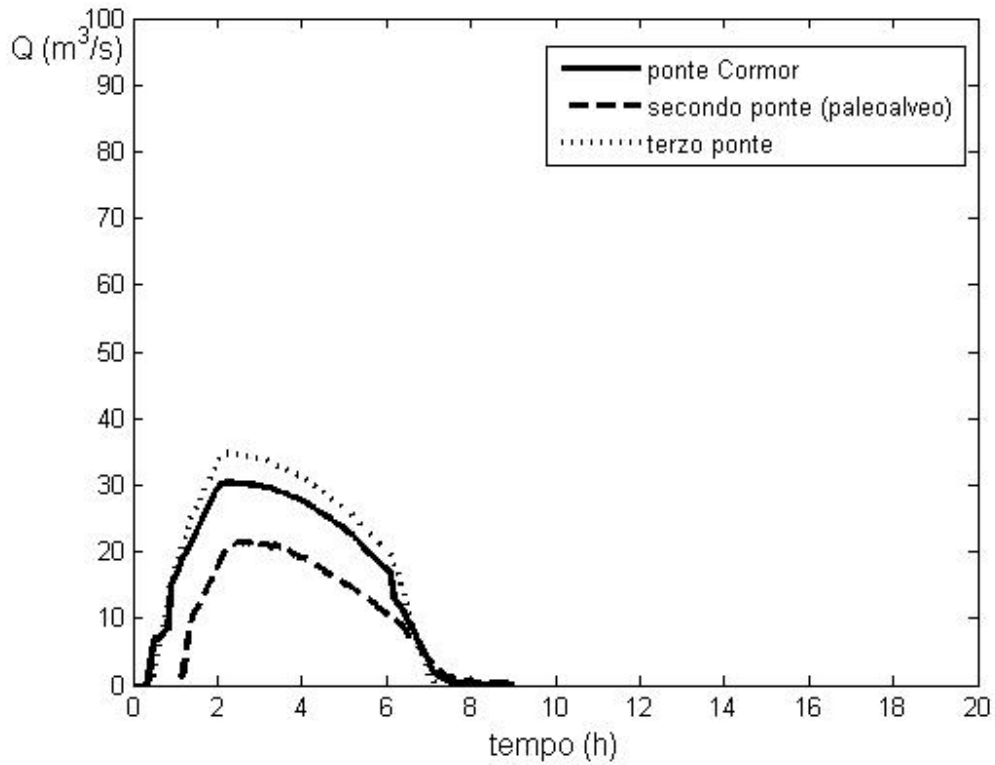


Figura 20. *Gli idrogrammi in corrispondenza del ponte del Cormor (per la parte facente parte della cassa, secondo ponte (paleo alveo) e terzo ponte).*

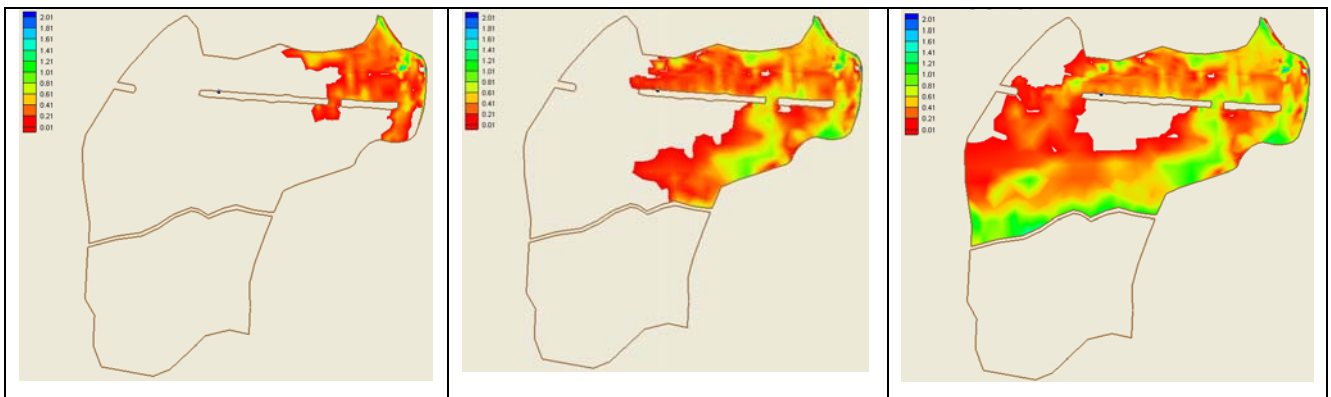


Figura 21. *Rappresentazione della profondità dopo 30 (sinistra), 60 (centro) e 90 minuti (destra) dall'inizio dell'onda di piena; campo di variazione tra 0.0 e 2 metri).*

6. Calcolo della stabilità del rilevato stradale

La stabilità del rilevato stradale dipende dal dislivello che si viene a creare tra monte e valle della superficie libera. Gregoretti et al. (2010) hanno studiato sperimentalmente il collasso di uno sbarramento omogeneo in ghiaia posto su di un suolo impermeabile ed hanno individuato tre modalità di rottura: una per sovrizzo (overtopping) e due per instabilità del pendio di valle per sifonamento all'interno del corpo arginale (piping). La prima avviene per angoli di inclinazione del pendio di valle $\alpha \leq 7^\circ$, la seconda per $7^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$, la terza per $\alpha > 25^\circ$ (Figura 22).

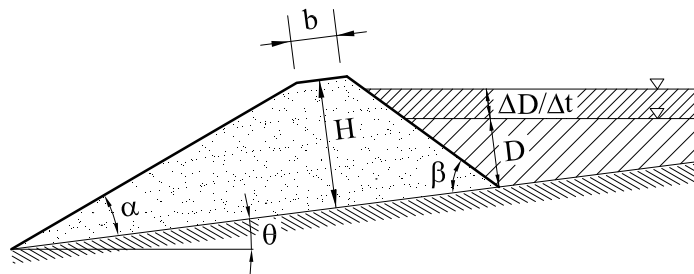


Figura 22. *Caratteristiche geometriche dello sbarramento.*

La seconda modalità di rottura avviene, dopo che la falda ha raggiunto il pendio di valle, per erosione del piede di valle con formazione di un canale che risale verso la sommità dello sbarramento fino a raggiungere l'invaso determinando la fuoriuscita dell'acqua ed il crollo (Figura 23).

La terza inizia con una frana superficiale del pendio di valle sempre dopo che la falda ha raggiunto il pendio di valle, seguita dalla formazione di un canale che risale verso monte come nel caso precedente. Questo tipo di rottura è stato indicato anche da Foster et al. (2000) come la prevalente. I risultati sperimentali indicano che per la seconda e terza modalità di rottura la quota critica di invaso di monte dipende dall'angolo di inclinazione del pendio di valle, α , dall'angolo di inclinazione del terreno, θ e dal rapporto H/d_{50} , dove H è l'altezza del rilevato e d_{50} si riferisce al materiale costituente il rilevato (Figura 23) e per valori di b/H superiori a 0.8 anche da b/H , essendo b la larghezza del rilevato alla sommità.

Per la seconda modalità di rottura Gregoretti et al. (2010) hanno individuato, combinando i risultati sperimentali con l'analisi dimensionale la seguente relazione che fornisce la quota critica di invaso a monte dello sbarramento in funzione di α , H/d_{50} e θ per $b/H < 0.8$.

$$\frac{D_{CRIT}}{H} = (a_1 + a_2 \tan \theta) \left(a_3 + a_4 \left(\frac{H}{d_{50}} \right)^{a_5} (a_6 + a_7 \tan \alpha) \right)$$

e $a_1=0.0855$, $a_2 = 0.4359$, $a_3 = 2.4661$, $a_4 = 51.22$, $a_5 = -1.1967$, $a_6 = 4.1901$, and $a_7 = -2.4952$.

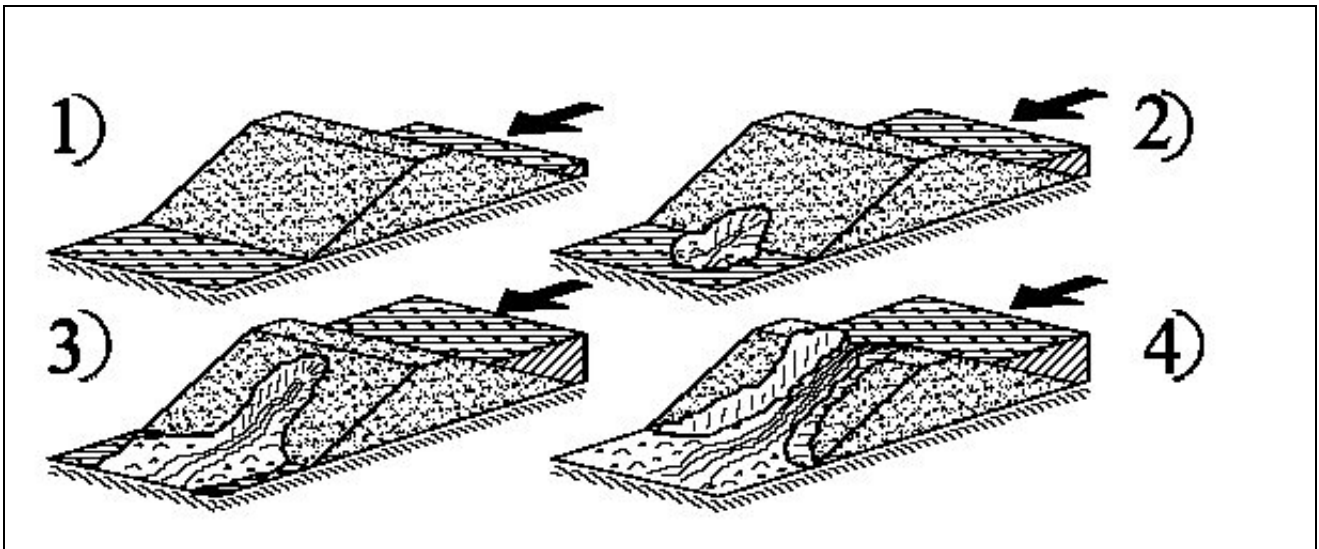


Figura 23. **Evoluzione temporale del fenomeno di instabilità arginale corrispondente alla seconda modalità di rottura secondo Gregoretti et al. (2010).**

Sfortunatamente per la terza modalità di rottura, Gregoretti et al. (2010) non sono riusciti a determinare alcuna relazione tra le caratteristiche dello sbarramento e la quota critica di invaso. Resta però individuato il tipo di rottura che avviene dopo che la falda ha raggiunto il pendio di valle.

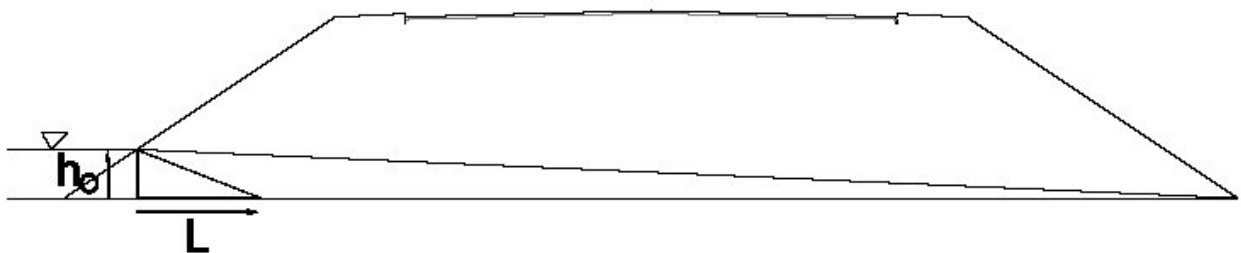


Figura 24. **Schema di riempimento del rilevato stradale (sezione 327).**

Per verificare la stabilità del rilevato stradale occorre quindi calcolare il tempo che occorre alla falda per raggiungere il pendio di valle. Si schematizza il processo di riempimento come l'allungamento progressivo di un triangolo rettangolo. Questo ha come altezza e cateto la profondità massima h_0 che si ha durante il fenomeno di piena e come base il cateto L . Il cateto L parte da 0 ed aumenta

progressivamente fino a raggiungere l'estremità del piede di valle del rilevato. Il tempo che occorre al cateto per raggiungere il piede è il tempo che occorre alla falda per raggiungere il piede di valle. In Figura 24 si rappresenta la sezione 327 del rilevato da progetto ed il triangolo con cui si schematizza il processo di riempimento. Assumendo una profondità nel piano del disegno pari ad 1 m, l'area del triangolo moltiplicata per la porosità, n , è il volume V di liquido che riempie il rilevato. L'equazione di continuità dei serbatoi porge:

$$\frac{dV}{dt} = Q_e - Q_u \quad (1)$$

essendo Q_e la portata entrante e Q_u la portata uscente. La portata entrante è $Q_e = k i_E h_o$, mentre la portata uscente è assunta nulla. Passando alle differenze finite l'equazione (1) dopo aver esplicitato Δt diventa:

$$\Delta t = \frac{\Delta V}{Q_e - Q_u} = \frac{\Delta V}{k i_E h_o} \quad (2)$$

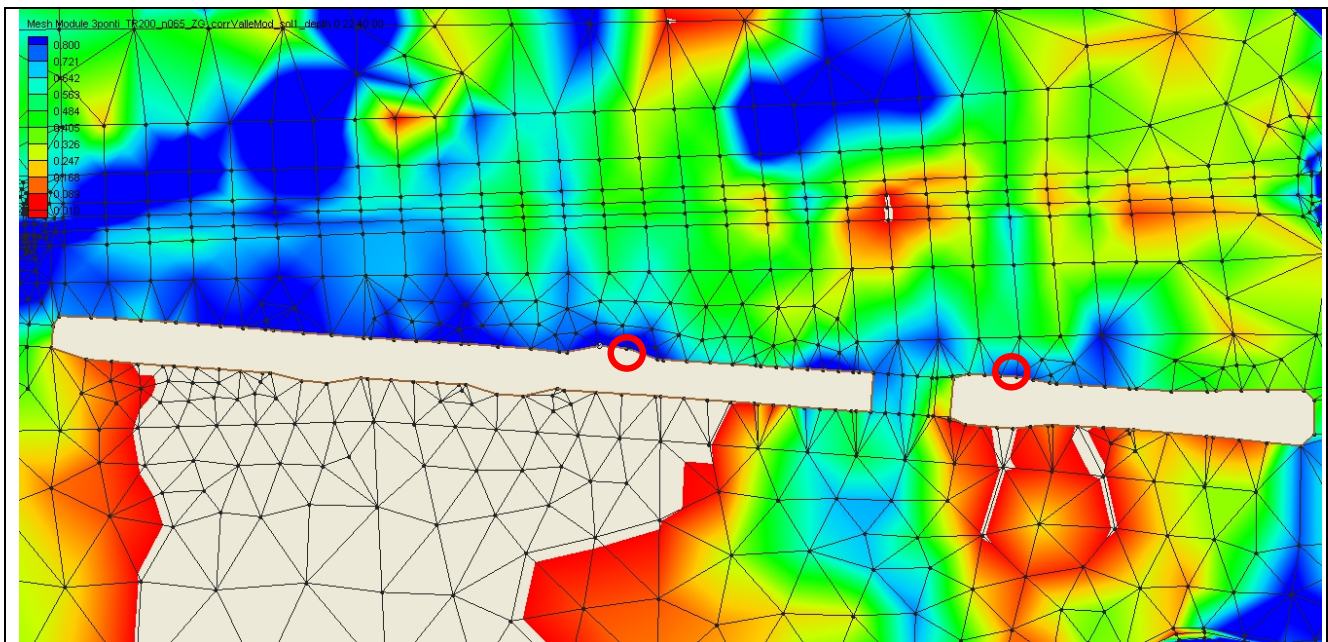


Figura 25. *La posizione dei punti (nodi della mesh a partire da sinistra 1544 e 1314) con maggior dislivello monte-valle del rilevato stradale); il campo di variazione della profondità è tra 0.01 (rosso) e 0.8 (blu) m con in bianco le aree asciutte (i valori di profondità superiori a 0.8 m sono in blu).*

Per calcolare Δt , occorre determinare il valore massimo che può assumere h_o . Le zone critiche sono le aree in bianco di Figura 7 a valle del rilevato evidenziate dalla simulazione. Le zone asciutte di Figura

7 sono illustrate con maggior dettaglio in Figura 25 dove la scala dei valori di profondità viene fatta variare tra 0 e 0.8 m: in bianco i valori di profondità inferiori a 0.01 m ed in blu quelli pari a 0.8 m o superiori. Rispettivamente da sinistra (dx orografica) a destra i nodi 1544 e 1314 cui corrispondono i maggiori valori di profondità a monte del rilevato ed i maggiori dislivelli monte e valle. In Figura 26 sono rappresentati, insieme all'idrogramma di entrata delle portate, le profondità ai nodi 1544 e 1314:

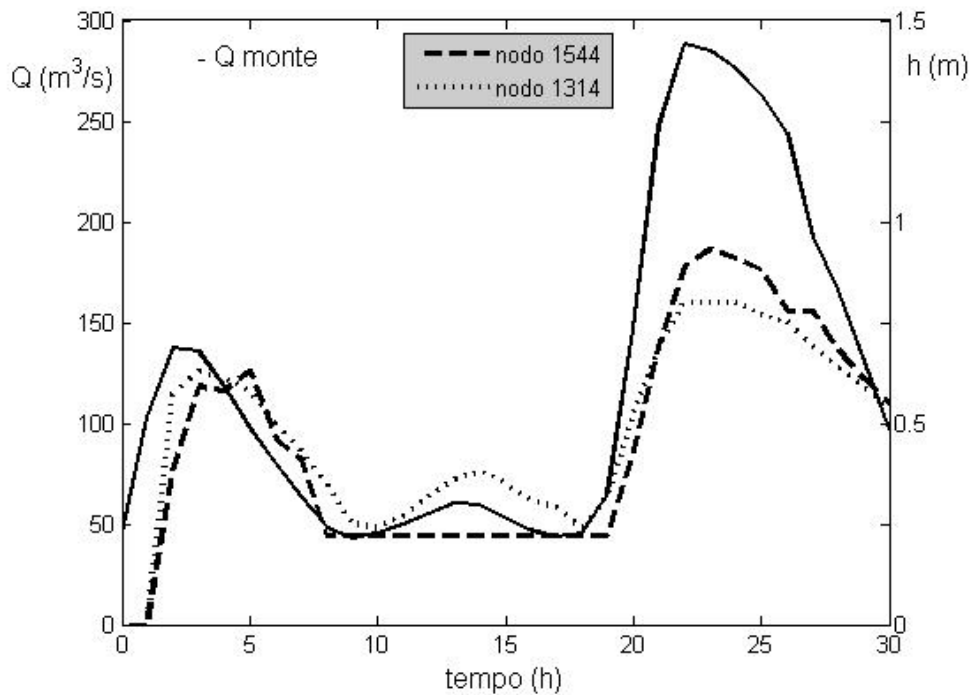


Figura 26. *Andamento delle profondità per i nodi 1544 e 1314 individuati alla precedente figura.*

i valori massimi corrispondenti sono 0.93 e 0.8 m. In Figura 27 sono rappresentati i dislivelli del pelo libero ΔPL ed i valori massimi sono 1.01 e 0.71 m rispettivamente per i nodi 1544 e 1314. Sia in Figura 26 che 27 nell'intermezzo tra i due picchi di piena la quota al nodo 1544 rimane costante perchè zona di acqua morta non più alimentate dall'onda di piena e perchè non si tiene conto del moto di filtrazione nel rilevato che indubbiamente la abbasserebbe.

La situazione più sfavorita è quella del nodo 1544 cui corrisponde all'incirca la sezione 327 di progetto del rilevato. In questa posizione si calcola quindi il tempo di arrivo della falda al pendio di valle.

Il coefficiente di permeabilità per ghiaie compattate di diametro medio 0.002 m è sicuramente inferiore a quello di ghiaia non compattata di diametro medio 3.9 mm che riportato da Gregoretti et al. (2010) e misurato nel laboratorio di Geotecnica del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Padova e riportato da Gregoretti et al. (2010) e è $k = 0.001$ m/s.

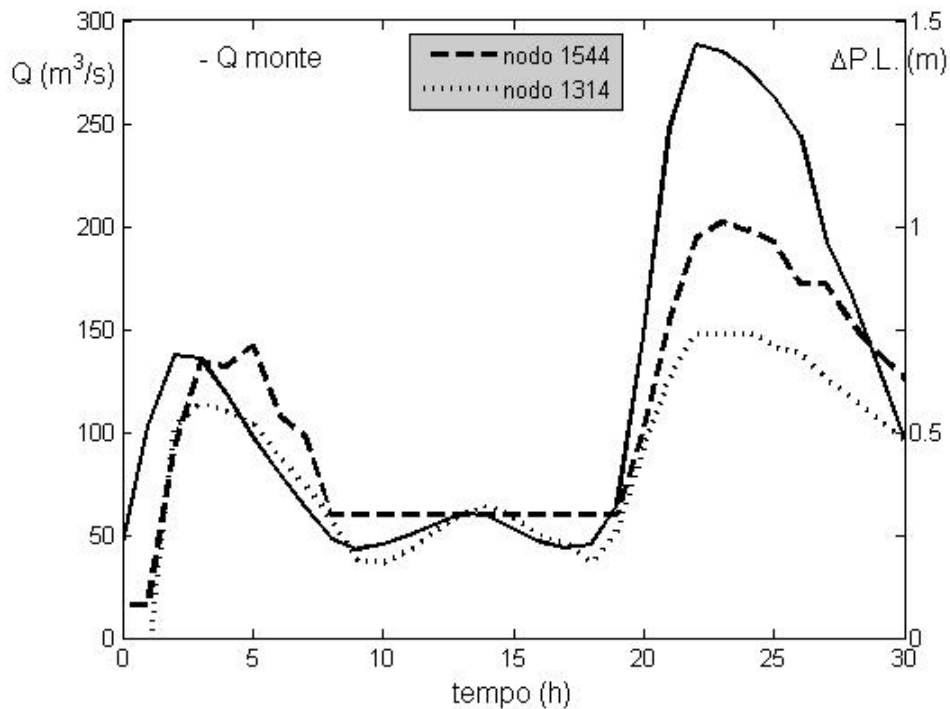


Figura 27. *Andamento dei dislivelli del pelo libero ($\Delta P.L.$) per i nodi 1544 e 1314 individuati alla figura 24.*

Per gradiente idraulico (dislivello/ metà percorso) si assume quello medio: $h_0/\text{metà percorso}$. L'intero percorso è pari a circa 24 m ed $h_0 = 1.0$ m da cui $i_E = 1/12 = 0.0834$. Essendo $\Delta V = n \times 1 \times 24 / 2 \times 1 = n \times 12 \text{ m}^3$, ed assumendo $n = 0.35$ (valore relativo a sfere con il massimo grado di impaccamento; per ghiaia impaccata uniforme Lanzoni (1993) ha misurato valori compresi tra 0.42 e 0.44), si calcola Δt tramite l'equazione (2):

$$\Delta t = \frac{0.35 \times 12}{0.001 \times 0.0834 \times 1.0} = 50360 \text{ sec}$$

che corrisponde a circa 14 ore. Tenendo conto che l'acqua inizia ad arrivare al nodo 1544 alle ore 19.00 e che alle ore 24.00 arriva al massimo e che alle ore 3 ricomincia a scemare abbastanza velocemente, l'intervallo corrispondente è di 8 ore che risulta inferiore a quello di 14 ore stimato per lo stabilirsi di un moto di filtrazione corrispondente alla profondità di 0.93 m al nodo 1544. In base a questi risultati il rilevato stradale non dovrebbe essere soggetto a problemi di stabilità per il dislivello monte-valle che si verrebbe a creare durante la piena.

La possibilità di sifonamento del terreno di fondazione viene valutata tramite la stima del gradiente critico secondo Lane. Assumendo un terreno costituito da sabbia a granulometria grossa il gradiente idraulico critico è 0.2 per cui la profondità critica di monte risulta $0.2 \times 24 / 3 = 1.6$ m. Tenuto conto che il moto di filtrazione corrispondente ad una profondità di 1.6m non fa in tempo ad instaurarsi, il rilevato risulta stabile anche per quanto riguarda il sifonamento del terreno di fondazione.

In aggiunta occorre anche considerare che questa situazione prevede l'occlusione contemporanea di tutti i tombini, il che risulta molto improbabile. In Figura 28 si presenta per la situazione di progetto, il campo di velocità massimo antistante il rilevato stradale per i valori compresi tra 0.2 m/s (rosso) e 1 m/s o superiori (blu), mentre in bianco le aree con velocità inferiore a 0.2 m/s. Si evince che là dove si hanno le maggiori profondità si hanno le minori velocità per cui è difficile che i detriti arborei od altro possano ostruire tutti i tombini.

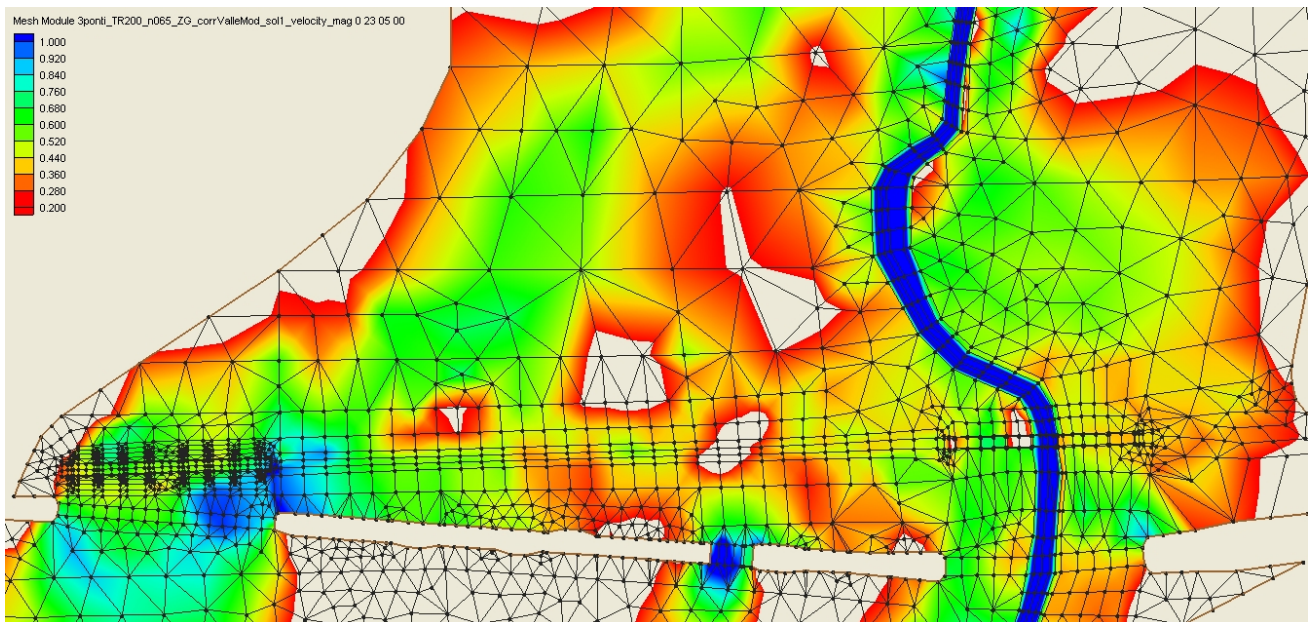


Figura 28. *Campo di velocità a monte del rilevato stradale con valori compresi tra 0.2 m/s (rosso) e 1 m/s o superiore (blu) con in bianco le aree a velocità minore di 0.2 m/s.*

7. Conclusioni

L'analisi delle simulazioni eseguite dimostra che la presenza del rilevato stradale comporta un effetto di rigurgito che si esaurisce a 435 m a monte (in linea d'aria) del previsto ponte sul Cormor, a valle dell'abitato di Zugliano che non risente quindi dal punto di vista idraulico della sua presenza. L'analisi delle simulazioni dimostra altresì che il rilevato non comporta alcun effetto di laminazione dell'onda di

piena. Dal punto di vista della stabilità del rilevato stradale il sifonamento del terreno di fondazione è improbabile secondo il criterio di Lane mentre l'erosione del piede del pendio di valle che porterebbe al sifonamento del corpo arginale non si verificherebbe per mancanza del tempo necessario alla falda di raggiungere il piede di valle. Occorre inoltre considerare che l'ipotesi che tutti i tombini si occludano contemporaneamente durante la piena è molto restrittiva in quanto le velocità in golena a monte del rilevato non sono elevate. Analizzando le Figure 24 e 27 si evince a monte del rilevato un'area un poco spostata in destra orografica rispetto al terzo ponte in cui si hanno bassi valori di velocità e profondità per cui gli eventuali detriti galleggianti trasportati dalla corrente vi si andrebbero a fermare impedendo di fatto l'occlusione dei tombini tra il terzo ed il secondo ponte. Tenendo conto di tutto ciò la soluzione a tre ponti permetterebbe uno smaltimento delle acque a monte del rilevato senza comportare problemi di stabilità al rilevato stradale.

Per quanto riguarda le simulazioni relative alla cassa di laminazione si sono individuate le quote dei petti e la lunghezza degli stramazzi di comunicazione tra i due compartimenti e di uscita dalla cassa che sono rispettivamente 72.4 e 71.03 m (quote del petto) e 98.4 e 62.7 m (lunghezze). Il primo stramazzo permette una quota di massimo invaso pari a 73 m come previsto dal PPS_Cormor222 per il compartimento di monte, mentre, il secondo stramazzo ha un petto ed una quota di massimo invaso superiori rispettivamente di 3 e 26 cm rispetto alla quota di massimo invaso prevista dal PPS_Cormor222 per il compartimento di valle. Questo avviene perché a valle venga sfiorata una portata massima non superiore a $10 \text{ m}^3/\text{s}$ come previsto dal PPS_Cormor222. Una riduzione della quota del petto dello stramazzo di uscita dalla cassa aumenterebbe la portata sfiorata oltre il limite massimo di $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

Bibliografia

- Foster M., Fell R. e Spannagle M. (2000) The statistics of embankments dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 37, 1000-1024.
- Gregoretti C., Maltauro A. e Lanzoni S. (2010) Laboratory Experiments on the Failure of Coarse Homogeneous Sediment Natural Dams on a Sloping Bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, vol. 136, 11, 868-879.
- Lanzoni S. (1993) Meccanica di miscugli solido-liquid in regime granulo-inerziale. Tesi di dottorato.
- Longo S. e Petti M. (2005) Misure e controlli idraulici - Mc Graw-Hill Italia
- PPS_Cormor222 Progetto di Piano Stralcio per la difesa idraulica del torrente Cormor (pag. 222)