

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale
Università di Genova

"Prove su modello fisico della confluenza del rio Ruscarolo nel torrente Chiaravagna"

Relazione finale
(Maggio 2018)

Committente: **ITEC Engineering s.r.l.**

Relatori:

Prof. Ing. Marco Colombini

Prof. Ing. Alessandro Stocchino

Premessa

Il Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA) dell'Università di Genova ha stipulato in data 30 Settembre 2018 una convenzione con la società ITEC Engineering s.r.l. dal titolo "Prove su modello fisico della confluenza tra il torrente Chiaravagna e il rio Ruscarolo". Nell'ambito di tale convenzione è prevista la realizzazione di un modello fisico in scala ridotta del tratto del torrente Chiaravagna in cui insiste la confluenza del rio Ruscarolo e di un breve tratto di quest'ultimo. Obiettivo delle prove sperimentali è quello di verificare che le modifiche proposte dal Committente rispetto alla configurazione analizzata nel progetto preliminare non pregiudichino il corretto funzionamento idraulico del nodo di confluenza tra il torrente Chiaravagna e il rio Ruscarolo.

La nuova configurazione progettuale prevede alcune modifiche dell'assetto altimetrico del nodo, in particolare per quanto riguarda l'area della copertura ELSAG, che si è ritenuto opportuno verificare attraverso prove sperimentali su modello fisico.

La presente relazione costituisce il rapporto finale previsto nell'ambito della convenzione, in cui verranno presentati i risultati delle prove sperimentali realizzate sul modello fisico della confluenza, realizzato nel Laboratorio Marchi del DICCA sulla base delle indicazioni progettuali fornite dal Committente. Verranno inoltre esaminate e discusse alcune soluzioni progettuali che si ritiene di suggerire alle luce degli esiti delle prove sperimentali effettuate sul modello.

1 Caratterizzazione del sito

Nella Figura 1, è riportata una vista aerea della zona interessata, ripresa da valle verso monte. Si riconoscono sul lato sinistro il torrente Chiaravagna e su quello destro il rio Ruscarolo. In alto nella foto il doppio attraversamento di via Giotto e il ponte ad arco sul Ruscarolo. L'attraversamento di Via Luciano Manara è nascosto dall'edificio Elsag in primo piano e indicato in trasparenza al centro dell'immagine. La Figura 2 mostra un'immagine della confluenza ripresa da Via Manara, guardando ancora verso monte, con il palazzo a cavallo della confluenza (che appare di colore rosa nell'immagine precedente) in primo piano, il ponte ad arco sul Ruscarolo a destra e il ponte di Via Giotto sulla sinistra.



Figura 1: Vista aerea del tratto considerato.



Figura 2: La confluenza vista da Via Manara.

2 Scala di riduzione

La scala di riduzione di un modello fisico è, in generale, determinata da un confronto tra le dimensioni del prototipo e quelle delle aree disponibili in laboratorio per la realizzazione del modello. In questo caso, si è scelta una scala di riduzione geometrica $\lambda = L_P/L_M = 35$, definita come il rapporto tra le lunghezze sul prototipo (indicate con il pedice P) rispetto alle lunghezze sul modello (indicate con il pedice M).

Va ricordato che la riproduzione in scala ridotta di un qualsiasi fenomeno idraulico è assimilabile a un cambiamento di unità di misura, per cui risulta necessario conservare, nel passaggio dal prototipo al modello, i numeri puri che regolano il fenomeno stesso, in questo caso il numero di Froude e il numero di Reynolds:

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gD}} \qquad Re = \frac{\rho U D}{\mu}$$

dove U e D sono la velocità media e la profondità della corrente, g l'accelerazione di gravità, ρ la densità e μ la viscosità dinamica del fluido.

Tali grandezze adimensionali possono essere interpretate come rapporti tra la scala caratteristica degli effetti di inerzia e, rispettivamente, la scala degli effetti gravitazionali e viscosi. È facile dimostrare come una similitudine totale sia possibile, mantenendo lo stesso fluido, solo per un rapporto di scala unitario, riproducendo cioè il fenomeno alla stessa scala del prototipo. Volendo ridurre la scala, si deve dunque ricorrere alle similitudini parziali, dette di Froude o di Reynolds a seconda di quale numero adimensionale si scelga di conservare. Avremo quindi, rispettivamente:

$$Fr_P = Fr_M \rightarrow Re_P = \lambda^{\frac{3}{2}} Re_M \qquad Re_P = Re_M \rightarrow Fr_P = \lambda^{-\frac{3}{2}} Fr_M$$

La riproduzione in scala di moti a superficie libera viene tipicamente realizzata attraverso una similitudine parziale di Froude, accettando, di conseguenza, che il numero di Reynolds non venga conservato su modello.

Una volta scelta la scala di riduzione geometrica, la similitudine di Froude determina dunque le scale di riduzione delle altre quantità; in particolare, la velocità del fluido, il tempo e la portata liquida vengono riscalati su modello come segue:

$$\frac{U_P}{U_M} = \lambda^{1/2} = 5.92 \qquad \frac{T_P}{T_M} = \lambda^{1/2} = 5.92 \qquad \frac{Q_P}{Q_M} = \lambda^{5/2} = 7247$$

In questo caso, la riproduzione su modello delle resistenze richiede una particolare attenzione in quanto il numero di Reynolds sul modello risulta ridotto di circa duecento volte rispetto al vero. Ciò implica, ad esempio,

che il regime di moto su modello fisico non sia *di parete scabra*, così come avviene sul prototipo e, in generale, nel deflusso di correnti in alvei naturali, ma, al contrario, si realizzi un regime *di parete liscia*, conducendo ad una dipendenza del coefficiente di conduttanza C dal solo numero di Reynolds e non dalla scabrezza adimensionale.

Definendo ancora il numero di Reynolds di scabrezza:

$$Re_S = \frac{\rho u k}{\mu}$$

dove u è la velocità di attrito e k la scabrezza omogenea equivalente, si assume convenzionalmente che il moto sia in regime liscio quando $Re_S < 5$ e in regime scabro quando $Re_S > 70$.

Nel caso in esame possono essere utili le seguenti valutazioni:

- al valore del coefficiente di Gauckler-Strickler $k_S = 70\ m^{\frac{1}{3}}/s$, tipicamente utilizzato per alvei plateati come quello in esame, corrisponde una scabrezza omogenea equivalente pari a circa 2 mm;
- considerando un raggio idraulico pari a 1 m, si ottiene, assumendo regime scabro, un valore del coefficiente di conduttanza C_P pari a circa 22;
- considerando una velocità media pari a 1 m/s, la velocità di attrito corrispondente risulta pari a 0.045 m/s;
- il numero di Reynolds di scabrezza Re_S risulta, al vero, pari a 90, confermando l'ipotesi di regime scabro, mentre su modello il valore risulterebbe inferiore all'unità, e, quindi, in regime liscio.
- considerando la legge di Blasius, valida per regime liscio, il coefficiente di conduttanza C_M su modello risulta pari a circa 17;

A tale valore del coefficiente di conduttanza sul modello corrisponde, al vero e in regime scabro, un coefficiente di Strickler pari a circa 55 $m^{\frac{1}{3}}/s$, adeguato per pareti in cemento degradate, con depositi sul fondo. Tale aspetto andrà quindi opportunamente tenuto in considerazione nel confronto con i calcoli di progetto e, in generale, nelle valutazioni relative al caso esaminato. Si noti peraltro che le prove sperimentali effettuate sul modello sono svolte a favore di sicurezza, poiché utilizzando un coefficiente di Strickler più elevato si otterrebbero, a parità di portata, valori di profondità leggermente inferiori e, quindi, franchi di sicurezza superiori.

Si noti infine che tale limite delle prove sperimentali effettuate su modello fisico, non è superabile se non attraverso la realizzazione di modelli di

dimensioni molto grandi o in cui la scala verticale sia distorta rispetto a quelle orizzontali. Volendo riprodurre le stesse profondità di moto uniforme sul modello, sarebbe infatti necessario deformare le pendenze secondo la legge:

$$\frac{S_M}{S_P} = \left(\frac{C_P}{C_M}\right)^2 = \left(\frac{22}{17}\right)^2 \simeq 1.7$$

Al fine di riprodurre correttamente le condizioni di scabrezza nel tratto terminale del modello, dove l'alveo non è plateato ed è stato stimato un valore al vero del coefficiente di Stricker pari a 30-35 $m^{\frac{1}{3}}/s$, il fondo del modello è stato in quel tratto reso artificialmente scabro attraverso l'incollaggio di uno strato di ghiaia vagliata di dimensioni medie pari a 2-4 mm. Si noti che tale scabrezza non riproduce in scala i sedimenti presenti nell'alveo del Chiaravagna ma riproduce in scala sul modello, questa volta in regime scabro, le stesse resistenze al deflusso.

3 Obiettivi delle prove sperimentali su modello

Come precedentemente sottolineato, il principale obiettivo delle prove sperimentali è quello di verificare che le modifiche proposte dal Committente rispetto alla configurazione analizzata nel progetto preliminare non pregiudichino il corretto funzionamento idraulico del nodo di confluenza. Particolare attenzione sarà dunque rivolta a:

- verificare la regolarità del deflusso nei tratti immediatamente a monte della confuenza, sul Chiaravagna e sul Ruscarolo;
- verificare il corretto funzionamento idraulico della copertura ELSAG, articolata su tre fornici di geometria complessa;
- verificare la regolarità del deflusso nel tratto a valle della copertura ELSAG;
- determinare l'entità dei franchi di sicurezza nelle sezioni più critiche.

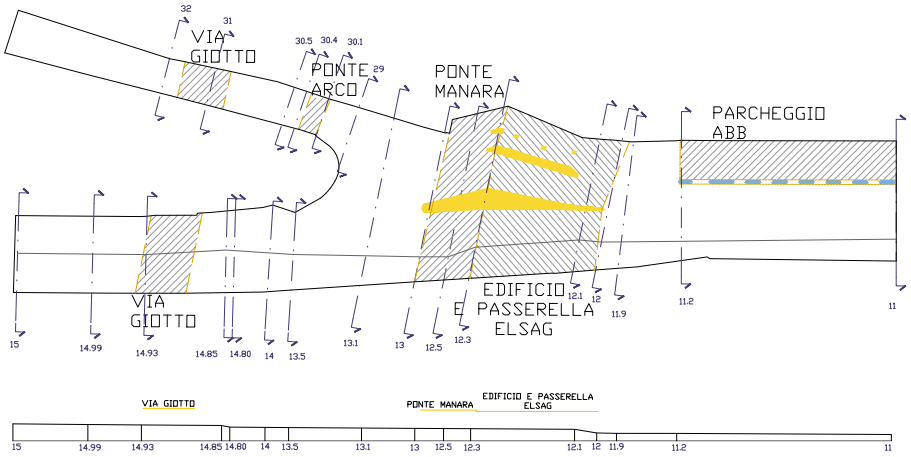


Figura 3: Planimetria del modello fisico della confluenza.

4 Descrizione delle prove sperimentali

4.1 Le configurazioni analizzate

Il modello fisico è stato costruito a partire dal progetto del nodo della confluenza consegnato da ITEC Engineering la cui planimetria e profilo longitudinale sono mostrati in Figura 3. L'area riprodotta sul modello fisico è approssimativamente contenuta in un rettangolo di lati 220 m per 90 m al vero così composto:

- un duplice tratto di imbocco, di lunghezza pari a circa 50 metri al vero, a sezione rettangolare con larghezza costante che raccordi le vasche di alimentazione (separate per Chiaravagna e Ruscarolo) al modello vero e proprio (sezioni 0-15, sezioni 0-33);

- un tratto di circa 60 m del torrente Chiaravagna posto a monte della confluenza (Figura 4) e comprendente il ponte di via Giotto e due briglie (sezioni 15-13.5);

- un tratto di circa 60 m del rio Ruscarolo posto a monte della confluenza (Figura 4) e comprendente il ponte di via Giotto, il ponte pedonale ad arco in pietra ed una briglia (sezione 31-30.1);

- un tratto di circa 70 m dove insiste la confluenza, che comprende l'attraversamento di Via Manara, la copertura ELSAG (Figura 5) articolata su tre fornici e una briglia a valle della copertura stessa (sezioni 13.5/30.1-12);

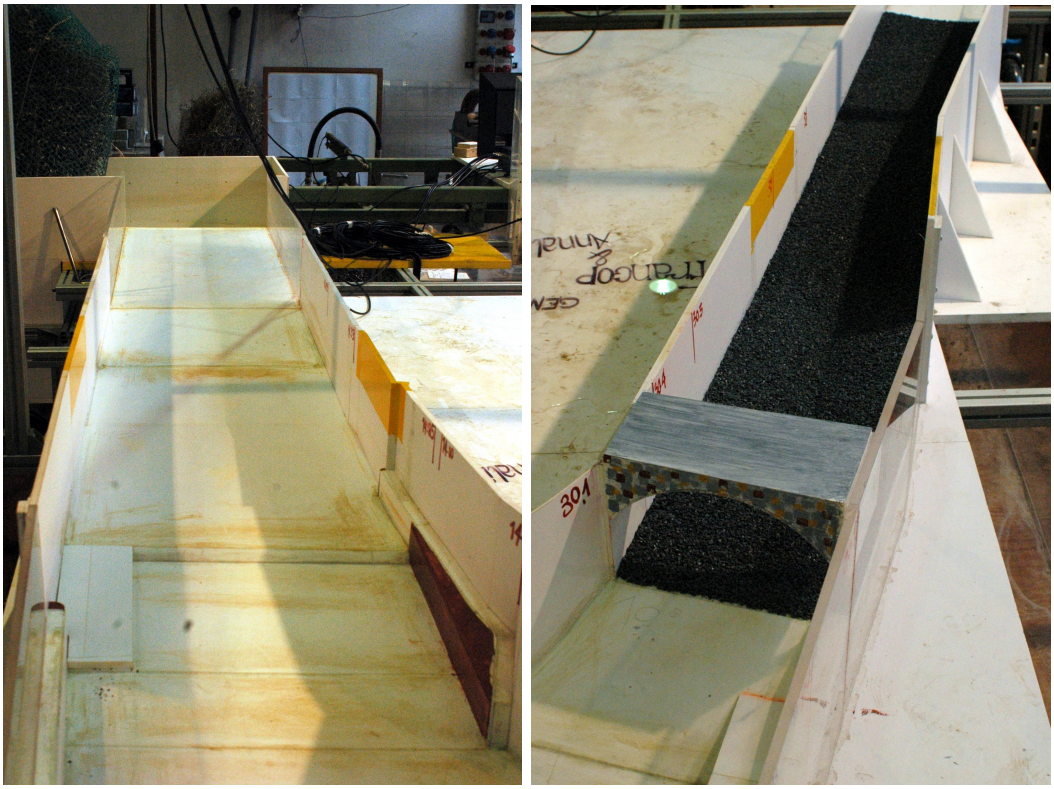


Figura 4: Il tratto a monte della confluenza: il Chiaravagna (sinistra) e il Ruscarolo (destra).

- un tratto di circa 65 m al vero a valle dell'edificio ELSAG (Figura 5) dove insiste in sponda sinistra l'area del parcheggio ABB (sezioni 12-11).

A partire dalla planimetria di progetto sono state verificate su modello diverse configurazioni geometriche, che prevedono due tipologie costruttive per le condutture della fogna presente in sponda sinistra. Inoltre, alcune piccole modifiche planimetriche sono state introdotte a valle delle prime prove preliminari, allo scopo di regolarizzare il profilo delle sottomurazioni previste; tali modifiche sono riportate nelle diverse planimetrie delle Figure 7-9 in colore rosso. Durante le prove preliminari si sono anche osservate importanti oscillazioni trasversali della superficie libera soprattutto nella zona in corrispondenza della confluenza, prima del transito della corrente sotto l'edificio Elsag. Con l'obiettivo di smorzare tali oscillazioni, sono stati provati su modello gli effetti associati all'inserimento di un setto longitudinale di altezza circa pari alla profondità della corrente, posizionato in corrispondenza della pila centrale (vedi Figura 6).



Figura 5: Il tratto a valle della confluenza: la copertura ELSAG (sopra) e quella ABB (sotto).

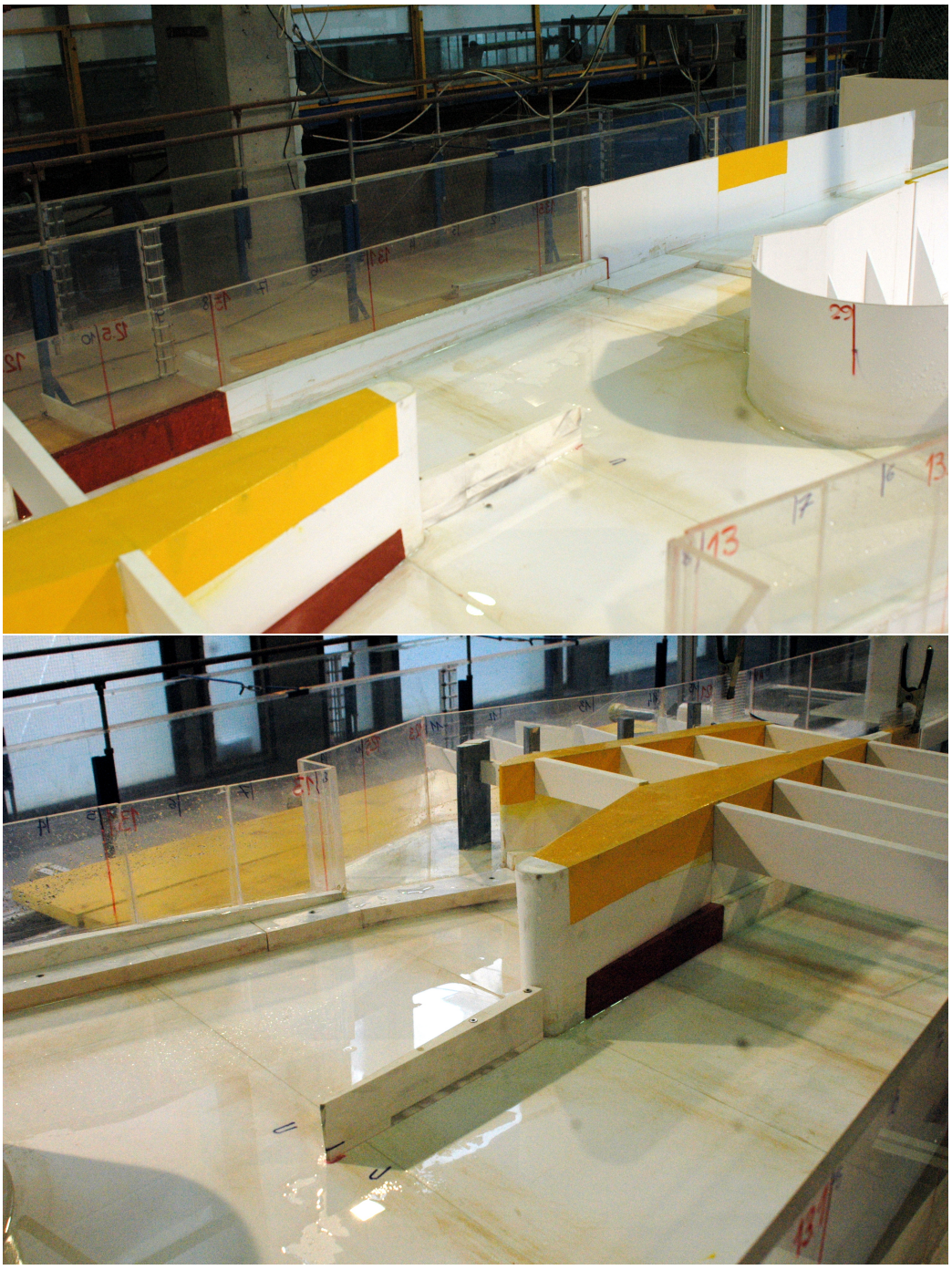


Figura 6: Il setto longitudinale visto da valle (sopra) e da monte (sotto).

E' stata infine esaminata e discussa la possibilità di eliminare una parte del bauletto della fognatura in sponda sinistra attraverso la realizzazione di un sifone.

Le configurazioni analizzate sul modello sono le seguenti:

1. *Configurazione 1*: la fognatura si sviluppa su un tracciato superficiale fino alla sezione 12.1. Un ulteriore bauletto è presente a valle della sezione 11.9. La fogna è rappresentata in colore marrone in figura figura 7;

2. *Configurazione 2*: stesso tracciato superficiale della fognatura della Configurazione 1, ma con la presenza del setto longitudinale, rappresentato in colore blu. Questa configurazione è rappresentata in figura 8;

3. *Configurazione 3*: setto longitudinale come in Configurazione 2, ma con fognatura in parte realizzata con un sifone, in modo da eliminare il tratto di bauletto compreso tra le sezione 30.1 e 13.1. Questa configurazione è rappresentata in figura 9;

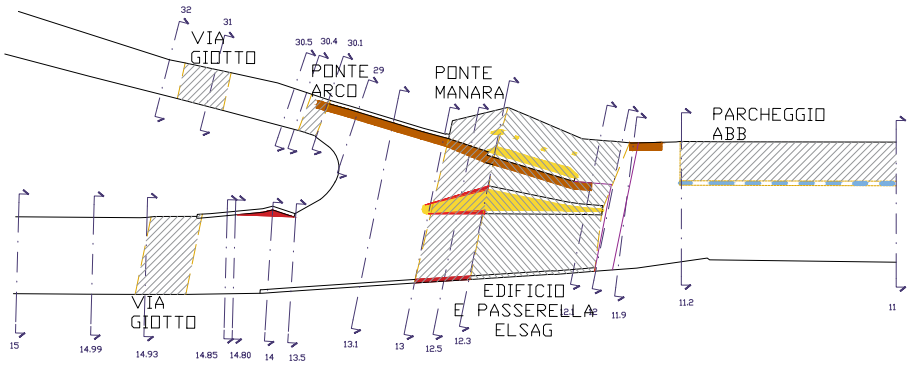


Figura 7: Planimetria della configurazione 1.

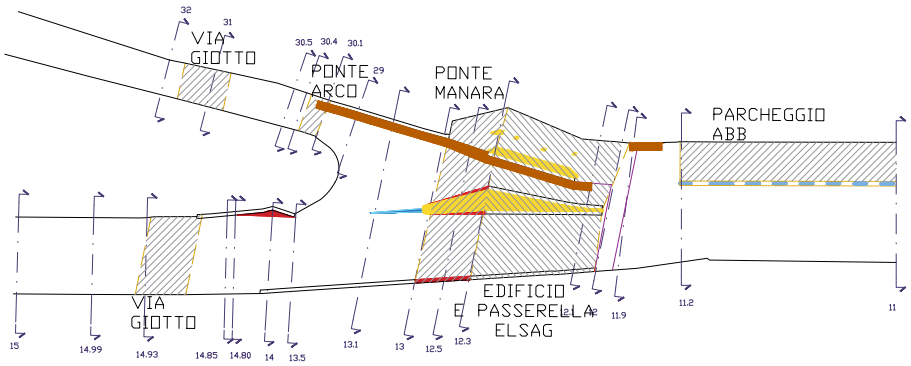


Figura 8: Planimetria della configurazione 2.

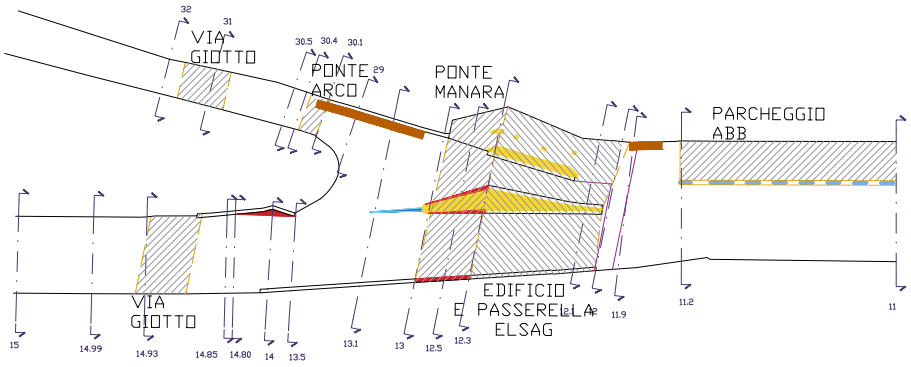


Figura 9: Planimetria della configurazione 3.

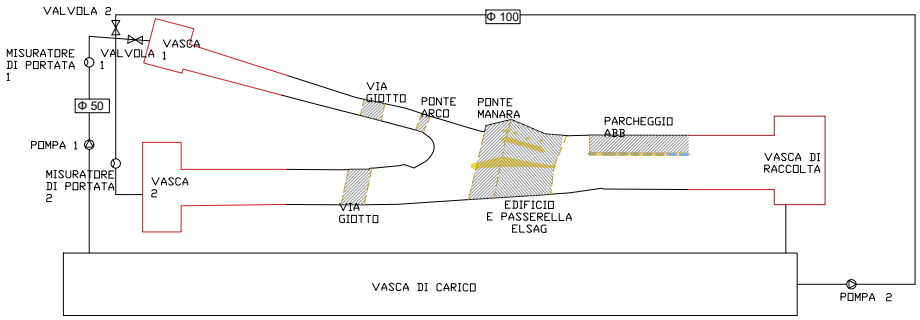


Figura 10: Planimetria modello completa con indicazione impianto idraulico.

4.2 Impianto idraulico e materiali di costruzione

Il modello fisico è stato realizzato nel Laboratorio Marchi del DICCA, su un'apposita piattaforma sopraelevata di dimensioni 2x10 m. Il serbatoio generale, posto al piano terra del laboratorio, è collegato a diverse canalette attraverso una pompa centrifuga SAER (H = 37 m, Q = 70-195 m^3/h). Il modello del torrente Chiaravagna è stato alimentato attraverso un'apposita tubazione che collegherà la tubazione di mandata della pompa alla vasca di carico posizionata sulla piattaforma. Il modello del rio Ruscarolo è stato alimentato attraverso un circuito separato. Lo schema generale del modello è rappresentato in figura 10.

Il fondo del modello, così come le opere in alveo e i ponti, è stato realizzato in Polivinilcloruro (PVC) espanso (FOREX), un materiale plastico di facile lavorabilità e di basso costo, in modo che fosse possibile eventualmente modificare, alla luce delle osservazioni sperimentali, il layout del tratto così come identificato dai progettisti. Le pareti laterali, così come la copertura ELSAG, sono state invece realizzate in Polimetilmetacrilato (PERSPEX) un materiale plastico trasparente in modo da consentire la visualizzazione della corrente in prossimità delle sponde.

Inoltre, il tratto terminale è stato artificialmente reso scabro attraverso l'incollaggio di uno strato di ghiaia vagliata di dimensioni medie pari a 2 mm, al fine di riprodurre le condizioni al vero (alveo non plateato).

4.3 Strumenti di misura e analisi dei segnali acquisiti

La portata transitante su ciascuno dei due rami del modello è stata determinata attraverso un misuratore elettromagnetico di portata PROMAG P, in grado di misurare la portata defluente con un'accuratezza inferiore al l/min, e una valvola di regolazione installati lungo le tubazioni di adduzione che collegano il circuito principale e quello secondario alle vasche di carico del modello. Vista la natura stazionaria delle simulazioni, i misuratori elettromagnetici di portata non sono stati collegati al sistema di acquisizione dati. In particolare, in ogni prova che prevedeva l'acquisizione di segnali delle sonde di livello, descritte nel seguito, la portata defluente in ciascun ramo è stata verificata e registrata.

L'assetto della superficie libera è stato determinato attraverso misure puntuali di profondità, utilizzando 6 sonde a ultrasuoni Honeywell modello 946-A4V-2D-2C0-380E, posizionate su modello con supporti mobili. I supporti sono stati preparati con profilati estrusi in alluminio, su cui le sonde venivano posizionate tramite una piastra imbullonata alla cava del profilo stesso. Tre delle sonde di livello sono state mantenute sempre in pozioni fisse ed, in particolare, una sul tratto di ingresso del Chiaravagna in corrispondenza della sezione 14.99, una sul tratto di ingresso del Ruscarolo, in corrispondenza della sezione 31, e una terza nella parte terminale del modello a monte della sezione 11. Tali sonde sono servite per verificare le condizioni al contorno, in termini di profondità, imposte sul modello. Le altre sonde sono state posizionate in diversi punti durante la singola prova, in modo da ottenere informazioni sull'andamento plano-altimetrico della superficie libera. Lo schema delle posizioni utilizzate è riportato in figura 11. Le posizioni delle sonde coprono con buona risoluzione il tratto del modello che va dalla sezione sulla confluenza, in corrispondenza della sezione 29 sul Ruscarolo, fino ad una sezione appena a valle delle sezione 11.2. Questo tratto è stato suddiviso in 22 sezioni, lungo le quali la superficie libera è stata rilevata in sei diversi punti, ad eccezione delle ultime due sezioni lungo le quali sono state utilizzate solo tre punti di misura.

Le sonde sono state collegate, tramite cavi BNC, a un modulo di condizionamento e alimentazione, a sua volta collegato a una scheda di acquisizione National Instrument modello 6250. Le acquisizione dei segnali in Volt sono state gestite tramite un applicativo Labview appositamente predisposto, in cui poteva essere gestita la durata e la frequenza di campionamento delle acquisizioni. A seguito delle prove preliminari si è scelto di utilizzare una frequenza di 50Hz in modo da ben descrivere anche le oscillazioni della superficie libera. La singola acquisizione aveva una durata di circa 120 secondi, producendo circa 6000 misurazioni. Prima dello svolgimento delle prove su

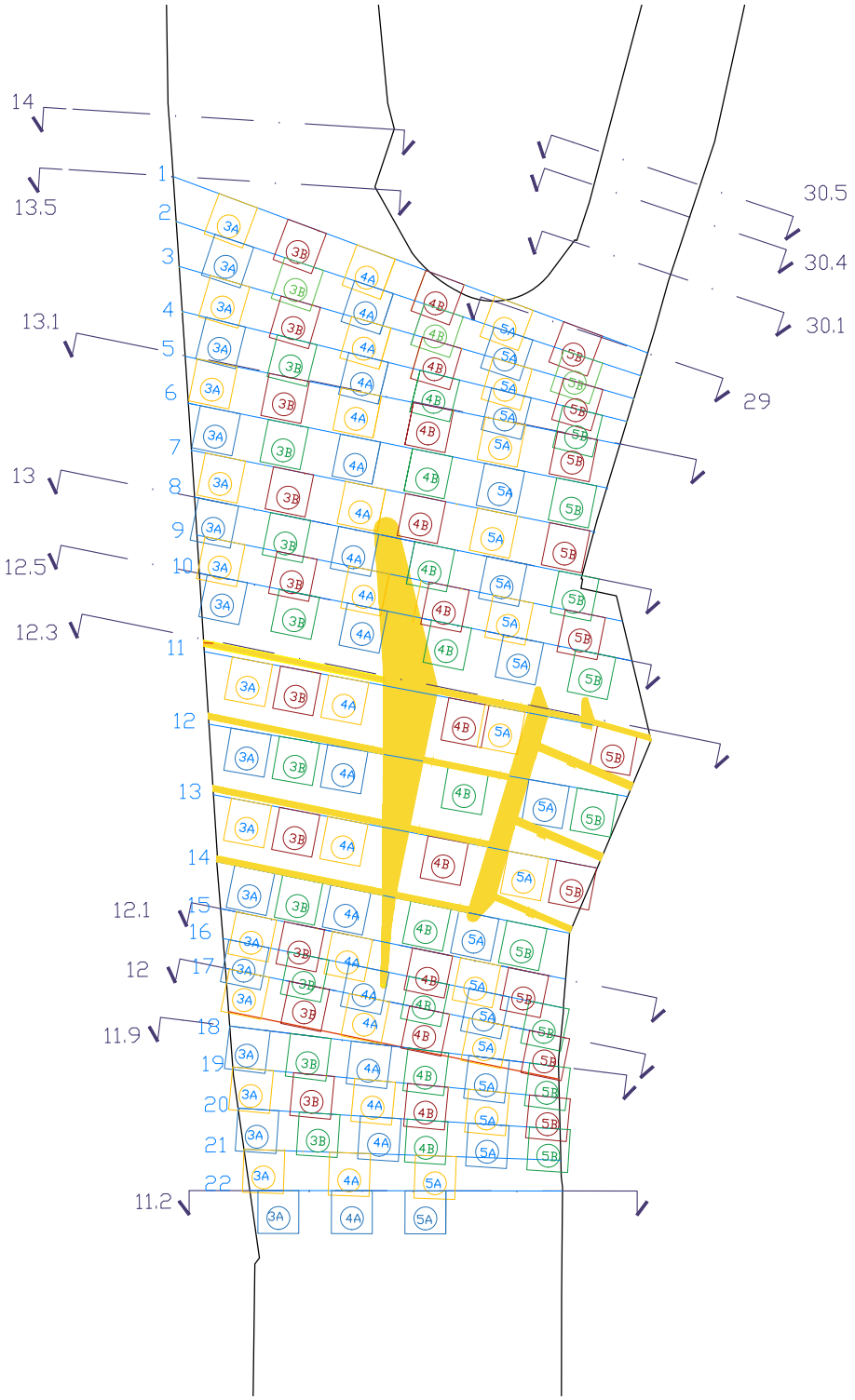


Figura 11: Mappa delle posizioni planimetriche delle sonde di livello.

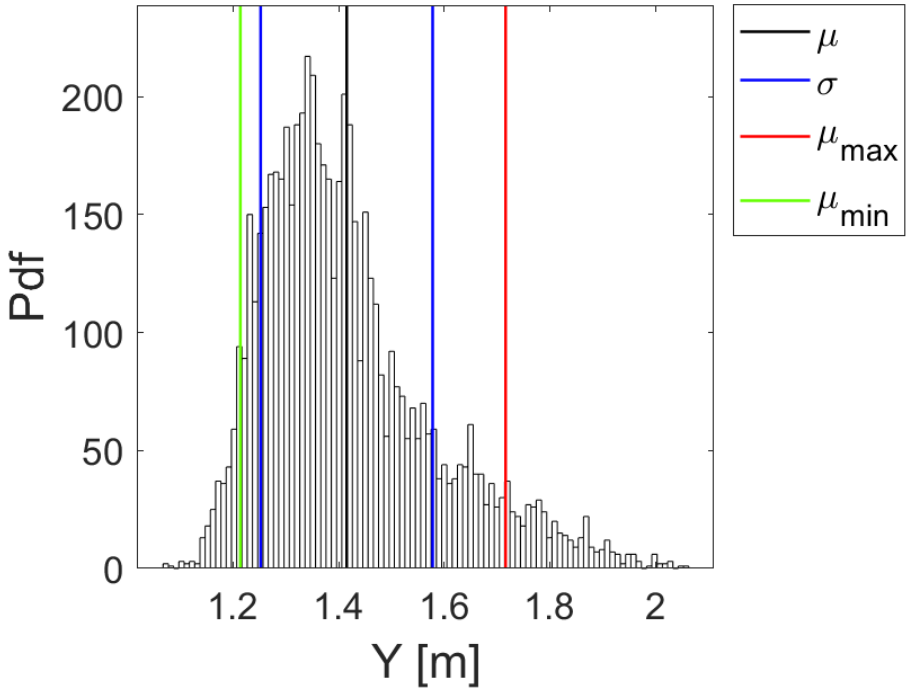


Figura 12: Esempio di Probability Density Function (pdf) per un segnale acquisito. Sono evidenziati i valori calcolati della media (μ), della media $\pm$ deviazione standard ($\mu \pm \sigma$) e delle media dei massimi ($\mu + \mu_{max}$) e dei minimi ($\mu - \mu_{min}$).

modello, tutte le sonde di livello sono state tarate. La taratura è stata eseguita con un cilindro graduato in cui si fissava un predeterminato livello d'acqua. Tale livello è stato messo poi in relazione alla lettura in volt delle singole sonde, costruendo in questo modo una relazione di conversione tra Volt e distanza in mm. Come atteso, la curva di taratura delle sonde è risultata essere lineare su praticamente tutto il range di misura. Si noti che le sonde ultrasuoni restituiscono una lettura della distanza tra il sensore e l'interfaccia oggetto della misura. La profondità della corrente è stata quindi ricostruita per differenza, conoscendo la posizione del sensore rispetto al fondo del modello e la lettura della posizione della superficie libera.

I segnali acquisiti sono stati processati in modo da eliminare picchi non fisici, dovuti ad errori non sistematici della misura (riflessioni, falsi echi etc), scartando le misure eccedenti la soglia di tre deviazioni standard oltre la media del segnale.

I segnali così filtrati sono stati poi analizzati in modo da caratterizzarne

la statistica (vedi Figura 12) calcolando, per ogni segnale acquisito:

1. il valore medio, μ;
2. la deviazione standard, σ;
3. la media del segnale eccedente la soglia $\mu \pm \sigma$, rispettivamente μ_{max} e μ_{min};
4. la distribuzione di densità di probabilità (pdf);
5. la distribuzione della densità spettrale (psd).

I segnali così processati sono stati anche utilizzati per ricostruire i profili longitudinali della superficie libera lungo diverse coordinate curvilinee. In figura 13 sono rappresentati in pianta lo sviluppo dei profili ottenuti. I profili sono stati ricostruiti in base ai valori medi, μ, con un barra di variazione stimata in base ai valori di μ_{max} e μ_{min}.

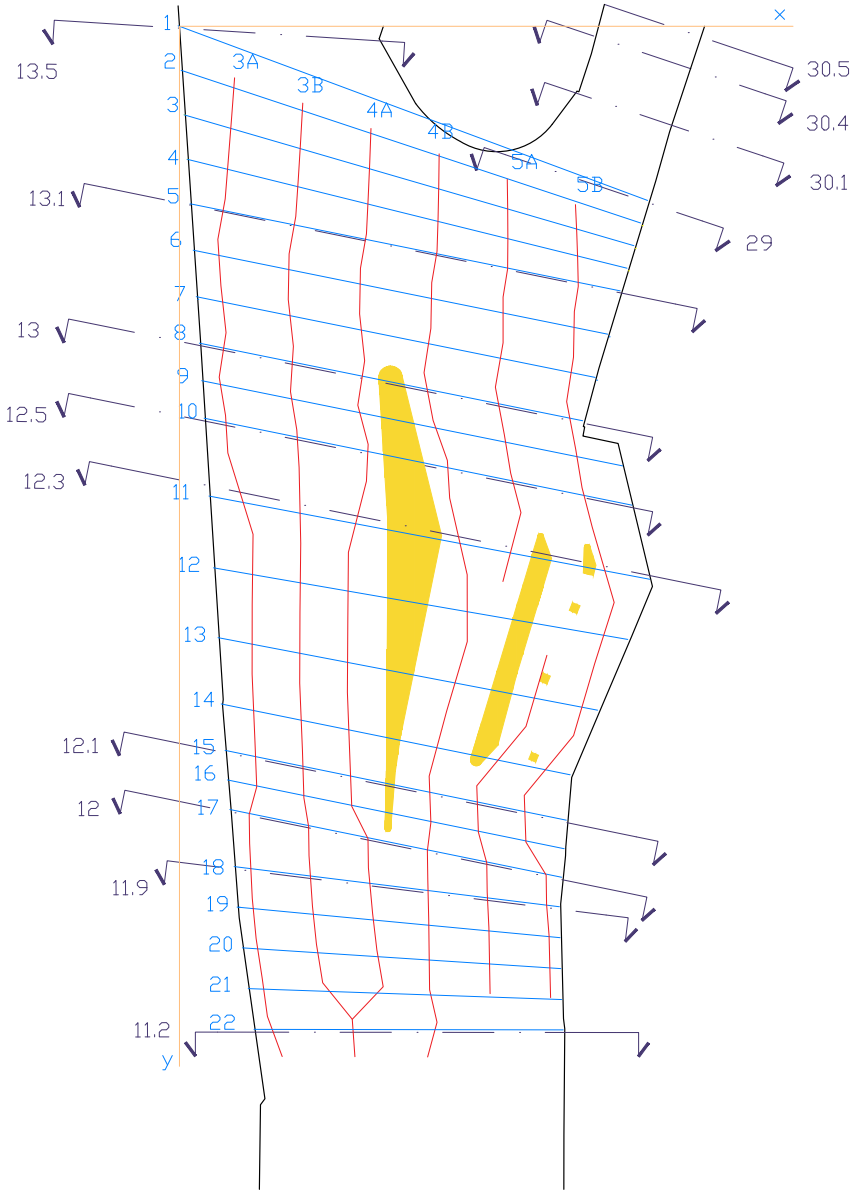


Figura 13: Indicazione in pianta delle tracce dei diversi profili longitudinali della superficie libera.

4.4 Condizioni al contorno

Sono state realizzate solo prove stazionarie, nelle quali, esaurito il transitorio iniziale, la portata che defluisce nel modello risulta costante. In particolare, sono state realizzate due combinazioni di valori di portata in ingresso (per il Chiaravagna e per il Ruscarolo) la cui somma assume lo stesso valore, pari a 257 m^3/s e corrispondente ad un evento duecentennale sul bacino del torrente Chiaravagna chiuso a valle della confluenza.

A parità di portata in uscita, nel primo caso è stata assegnata in ingresso al Chiaravagna la portata corrispondente ad un evento duecentennale per il bacino chiuso a monte della confluenza (204 m^3/s), mentre al Ruscarolo la differenza tra i due valori (53 m^3/s). Questo scenario, denominato nel seguito PC, corrisponde ad un evento con tempo di ritorno duecentennale sul bacino del Chiaravagna.

Nel secondo caso è stata assegnata al Ruscarolo la portata corrispondente ad un evento duecentennale sul rio stesso (76 m^3/s) e al Chiaravagna la portata differenza, pari a 181 m^3/s. Questo scenario, denominato nel seguito PR, corrisponde ad un evento con tempo di ritorno duecentennale sul Ruscarolo e pari a circa 100 anni sul bacino del Chiaravagna chiuso a monte della confluenza.

Prova	Q_C^P $[m^3/s]$	Q_R^P $[m^3/s]$	Q_V^P $[m^3/s]$	Q_C^M $[l/min]$	Q_R^M $[l/min]$	Q_V^M $[l/min]$
1	204	53	257	1689	439	2128
2	181	76	257	1499	629	2128

I tratti di imbocco al modello sono stati realizzati attraverso due canali rettangolari a larghezza e pendenza costante, allo scopo di consentire lo svilupparsi di un moto uniforme, così come avviene nel tratto terminale del modello se si esclude il breve tratto posto immediatamente a monte dello stramazzo dove si risente di un piccolo effetto di chiamata allo sbocco.

Le misure effettuate durante ciascuna prova nei tratti di imbocco del Chiaravagna e del Ruscarolo e nel tratto terminale, hanno consentito di stimare, attraverso l'assunzione di moto uniforme, i coefficienti di Strickler k_s al vero simulati sul modello nel tratto di valle (alveo non plateato) e nei tratti di monte del Chiaravagna (alveo plateato) e del Ruscarolo (alveo non plateato).

$$k_s = \frac{Q}{\sqrt{i_f}\Omega R^{2/3}} \tag{1}$$

dove Q è la portata volumetrica, i_f la pendenza del fondo, Ω la sezione liquida e R il raggio idraulica (rapporto tra sezione liquida e contorno bagnato).

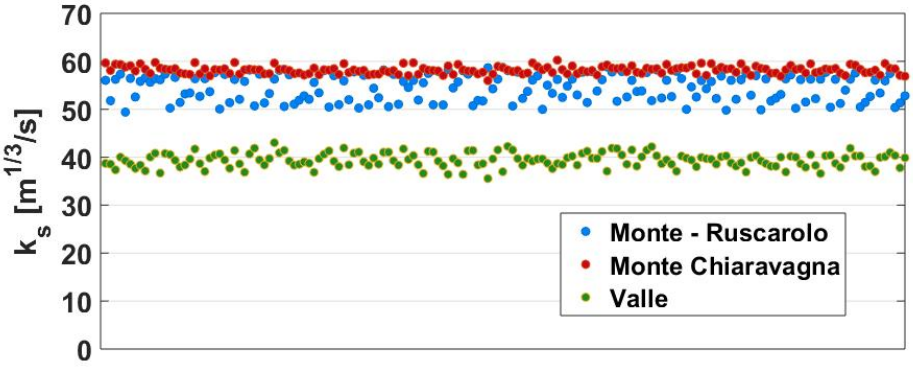


Figura 14: Cofficiente di Strickler al vero calcolato attraverso la relazione di moto uniforme per le tre sonde posizionate nei tratti di monte e di valle.

In Figura 14 si può osservare come sul Chiaravagna, il funzionamento del modello in regime liscio conduca ad una conduttanza al vero pari a circa 60 $m^{1/3}/s$, valore ben compatibile con un alveo plateato, mentre sul tratto terminale del modello, reso artificialmente scabro con ghiaia di diametro 2-4 mm, la conduttanza si riduca a circa 40 $m^{1/3}/s$, valore appropriato per un fondo naturale. Il valore intermedio che si osserva sul Ruscarolo è dovuto al fatto che l'effetto delle pareti (lisce) è confrontabile, per estensione del contorno bagnato, a quello del fondo (scabro), essendo la sezione molto più stretta rispetto a quella del tratto terminale. Il tratto del Ruscarolo in cui è stata posizionata la sonda è inoltre lievemente convergente, per cui la ricostruzione del coefficiente di Strickler, basata sull'ipotesi di moto uniforme, conduce a una lieve dipendenza dalla portata che si traduce in una maggiore dispersione dei dati.

5 Risultati delle prove sperimentali

Per ogni esperimento sono state eseguite misure di livello in tutte le posizioni indicate in figura 11, ottenendo quindi circa 130 letture della quota della superficie libera. In questa sezione verranno descritti i risultati ottenuti per le diverse configurazioni geometriche ed idrologiche ed, in particolare, l'analisi dei risultati verterà sia sui comportamenti non stazionari della corrente sia sulla costruzione di profili longitudinali di corrente.

I risultati sono stati raggruppati in funzione delle configurazioni analizzate. In particolare:

- la configurazione 1 rappresenta la configurazione di progetto ed è stata utilizzata per descrivere in maniera qualitativa il deflusso nelle due configurazioni PC e PR nei diversi tratti analizzati nel presente studio. In particolare, si discuteranno i tratti del torrente Chiaravagna e del Ruscarolo a monte della confluenza, il tratto compreso tra la confluenza e la copertura ELSAG, i tre fornici sotto quest'ultima, il tratto terminale su cui insiste il parcheggio ABB.

- il confronto tra configurazione 1 (senza setto) e 2 (con setto) vuole dimostrare come la presenza del setto longitudinale sia necessaria per smorzare le oscillazioni trasversali che si manifestano, per entrambe le combinazioni di portata PC e PR, nel tratto dove insiste la confluenza. Diverse orientazioni del setto sono state prese in considerazione e si è identificata la posizione ottimale come quella che garantiva, in entrambe le combinazioni PC e PR, il miglior risultato in termini di attenuazione delle oscillazioni trasversali e di efficiente ripartizione di portate tra i tre fornici della copertura ELSAG. A tale scopo sono stati presi in esame anche i profili all'interno dei fornici stessi.

- il confronto tra configurazione 2 (fognatura in superficie) e 3 (fognatura a sifone) vuole dimostrare come l'effetto della eliminazione di un tratto della fognatura superficiale non produca benefici al deflusso tali da giustificare un intervento più complesso dal punto di vista sia della realizzazione sia della manutenzione dell'opera.

Per comodità di lettura i risultati delle prove verranno nel seguito presentati e discussi sempre in termini di grandezze al vero.

5.1 Analisi qualitativa del deflusso nella configurazione di progetto.

Nel primo tratto del modello, a monte della confluenza, i due torrenti corrono paralleli. Sul torrente Chiaravagna sono presenti due briglie e il ponte di via Giotto senza pile in alveo. In entrambe le configurazioni di portata il deflusso è supercritico. Sul torrente Ruscarolo dove insistono il proseguimento del ponte di via Giotto, il ponte ad arco ed una briglia, il deflusso è ancora supercritico.

Nel tratto in cui insiste la confluenza, le due correnti si miscelano sia in termini di portate liquide sia in termini di flussi di quantità di moto. Le correnti in ingresso sono entrambe veloci, mentre in uscita la corrente è lenta e governata da valle. Ciò implica la presenza di un risalto idraulico obliquo (vedi Figura 17 in alto). Il deflusso è anche fortemente influenzato dalla presenza di un fenomeno di instabilità che induce la formazione di un'onda trasversale non stazionaria che si riflette tra le due sponde, raggiungendo ampiezze confrontabili con la profondità media. In Figura 15, dove sono rappresentate due foto scattate a istanti successivi durante la stessa prova, si può osservare come l'assetto della superficie libera sia, nelle due immagini, molto diverso, arrivando a scoprire completamente il bauletto della fognatura in sponda sinistra.

A valle della confluenza, la corrente si ripartisce tra i tre fornici della copertura ELSAG. A parità di quota del fondo e con una corrente a monte completamente miscelata sulla sezione, un perfetto bilanciamento tra i tre fornici implicherebbe la costanza della portata per unità di larghezza e della profondità, conducendo quindi alla stessa quota della superficie libera in ciascuno dei fornici. Nel caso in esame, il fornice di sinistra è caratterizzato da una quota del fondo circa un metro più alta rispetto agli altri due e risulta inoltre fuori asse rispetto al filone principale della corrente. Il deflusso in questo fornice è dunque sfavorito e la portata per unità di larghezza risulta inferiore. Si noti che la distribuzione delle portate dei due torrenti varia tra 80%-20% per lo scenario PC a 70%-30% per quello PR, mentre il rapporto tra le larghezze è pari a 70%-30%. La corrente in arrivo è dunque relativamente omogenea e questo dovrebbe garantire un buon bilanciamento tra il fornice centrale e quello di destra qualora le oscillazioni trasversali non stazionarie della superficie libera venissero eliminate.

A valle della copertura ELSAG, sono presenti due soglie di eguale pendenza che, a partire dalla sezione 11.9 raccordano verso monte quote del fondo diverse. In particolare, la soglia relativa al fornice di sinistra risulta più estesa di quella posta a valle degli altri due fornici. In corrispondenza delle soglie la corrente attraversa lo stato critico e diventa veloce, per poi

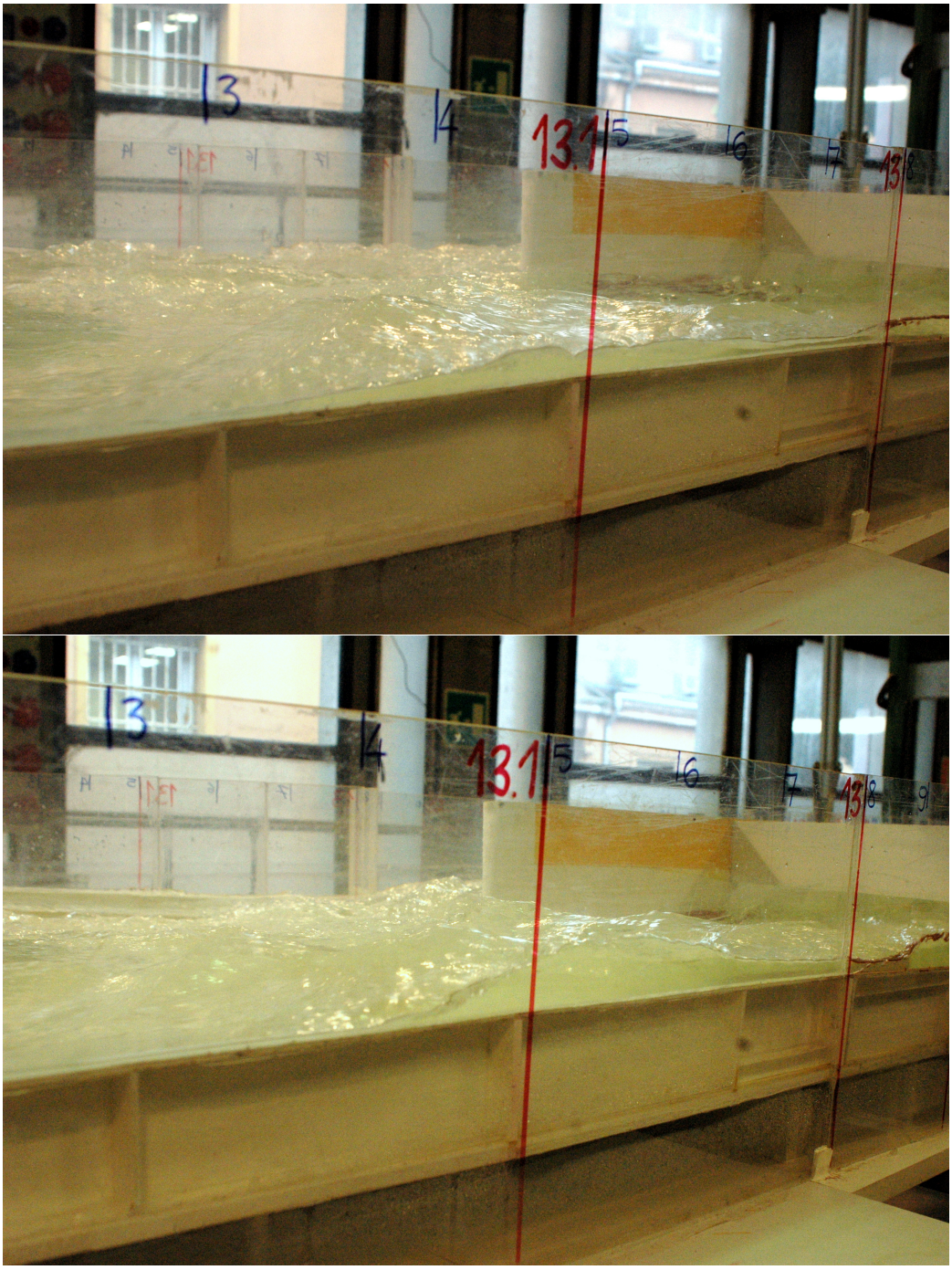


Figura 15: L'onda trasversale non stazionaria. Le immagini sono scattate ad istanti diversi durante la stessa prova.

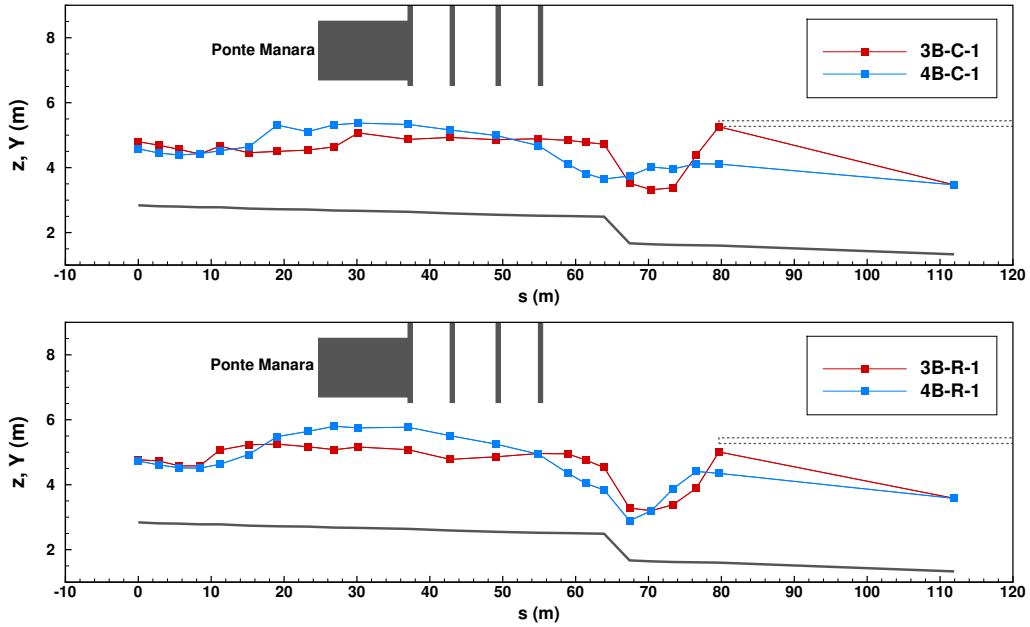


Figura 16: Configurazione 1: Confronto tra i profili longitudinali di corrente 3B (fornice di destra) e 4B (fornice centrale), con evento di piena sul Torrente Chiaravagna (in alto) e Ruscarolo (in basso).

raccordarsi al profilo di corrente lenta di valle attraverso un risalto diretto. Tuttavia, a causa dell'asimmetria delle soglie, anche in questo caso il risalto idraulico risulta obliquo rispetto all'asse principale della corrente, con il fronte in sponda sinistra più vicino alla soglia e con una marcata convergenza nella regione centrale.

L'ultimo tratto del modello, fino alla sezione 11, risulta geometricamente più regolare e il deflusso avviene in corrente lenta fino alla sezione terminale del modello dove si ha un attraversamento delle condizioni critiche. Il lieve profilo di chiamata allo sbocco si esaurisce rapidamente verso monte. In tale tratto, in sponda sinistra è presente la copertura del parcheggio ABB di cui sono state rappresentate sul modello le pile di sostegno e il setto sovrastante (vedi Figura 5). Si noti che in questo tratto il fondo alveo rimarrà non plateato ed è quindi stato reso scabro come il tratto di monte del torrente Ruscarolo.

I profili longitudinali medi (depurati delle oscillazioni non stazionarie) 3B e 4B (vedi Figura 13) sono rappresentati in Figura 16 per i due scenari idrologici PC (in alto) e PR (in basso). Si nota chiaramente la presenza, in entrambi gli scenari, dei due risalti idraulici obliqui, uno posizionato a monte ed uno a valle della copertura ELSAG. Nella scenario PC, la corrente super-

critica proveniente dal Ruscarolo è caratterizzata da un numero di Froude meno elevato rispetto a quella proveniente dal Chiaravagna, e di conseguenza la spinta totale proveniente da monte è meno intensa per il profilo 4B rispetto al profilo 3B. A parità di spinta totale di valle (e quindi di profondità della corrente lenta sotto la copertura ELSAG), ciò conduce ad un fronte del risalto più arretrato a monte del fornice centrale rispetto al fornice di destra e, in ultima analisi, alla formazione del risalto obliquo. La situazione si inverte nello scenario PR, poiché la corrente proveniente dal Ruscarolo è meno intensa e il risalto risulta nuovamente obliquo ma più arretrato a monte del fornice di destra rispetto al fornice centrale.

L'innesto del Ruscarolo nel Chiaravagna si realizza quindi attraverso **il mescolamento di due correnti supercritiche, e alla formazione di un risalto obliquo che si localizza immediatamente a monte del Ponte Manara, in un contesto idraulico complesso e difficilmente analizzabile attraverso una modellazione numerica**. Pur manifestando alcune criticità idrauliche che verranno discusse nel seguito, **la configurazione di progetto risulta complessivamente in grado di smaltire gli eventi di piena duecentennali considerati con adeguati franchi di sicurezza medi al di sotto della copertura ELSAG**.

Il risalto posizionato a valle della copertura ELSAG appare più regolare per quanto riguarda la corrente veloce in uscita dai fornici della copertura, anche se il fronte lato Chiaravagna risulta leggermente più avanzato in entrambi gli scenari idrologici.

Si noti infine come a valle del risalto il valore di profondità sia tale da potenzialmente interagire, almeno nel tratto iniziale, con la copertura ABB in sponda sinistra. In realtà, come si può osservare nella foto in basso di Figura 17, il profilo trasversale è molto variabile, con una evidente sopraelevazione nella regione centrale, a cielo aperto, mentre sotto la copertura i livelli sono più bassi e tali da garantire un franco superiore.



Figura 17: I risalti obliqui a monte (sopra) e a valle (sotto) della copertura ELSAG

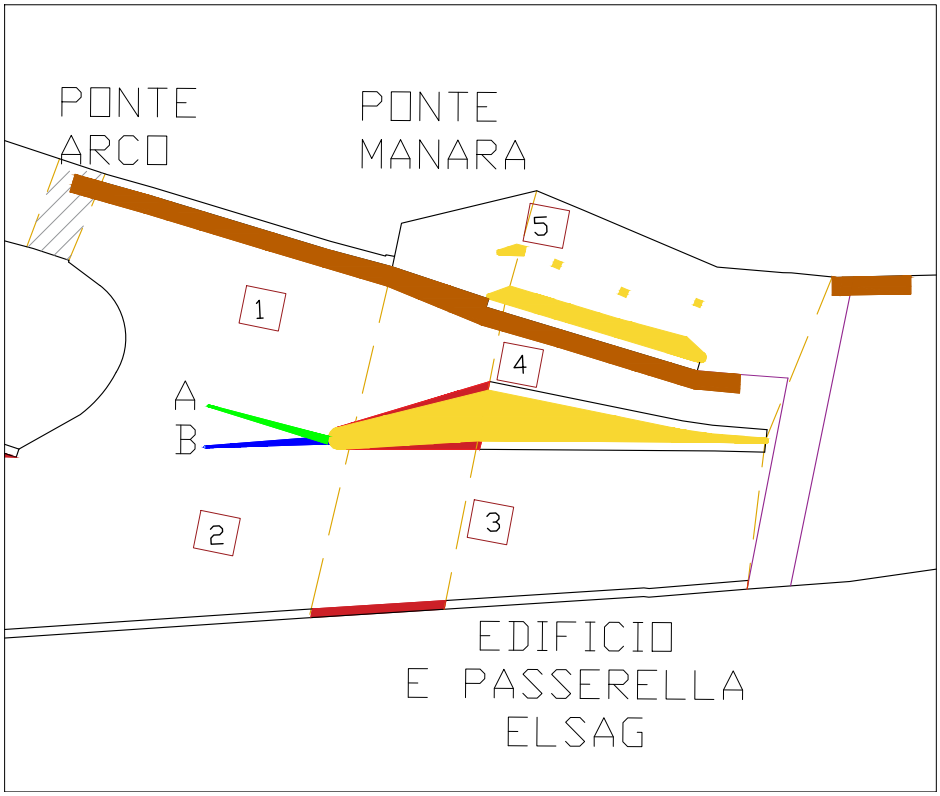


Figura 18: Planimetria con posizionamento setti.

5.2 Analisi delle oscillazioni della superficie libera e posizionamento del setto

Le prime prove effettuate su modello hanno evidenziato la presenza di un fenomeno di instabilità nel tratto in cui insiste la confluenza, che si manifesta attraverso un'onda trasversale non stazionaria che viene riflessa tra le due sponde raggiungendo ampiezze confrontabili con la profondità della corrente, potenzialmente in grado, istantaneamente e localmente, di scoprire il fondo e di portare la superficie libera a lambire le travi che sostengono la copertura ELSAG.

Al fine di smorzare tali oscillazioni, sono stati provati su modello gli effetti associati all'inserimento di un setto longitudinale di altezza circa pari alla profondità della corrente (1.8 m) e di lunghezza pari a circa 10 m, posizionato in corrispondenza della pila centrale (vedi Figura 18). In particolare, sono state analizzate due possibili posizioni del setto, contrassegnate A e B, la prima diretta verso il tratto curvo al centro della confluenza, la seconda verso l'estremità della sottumurazione in sponda sinistra del Chiaravagna

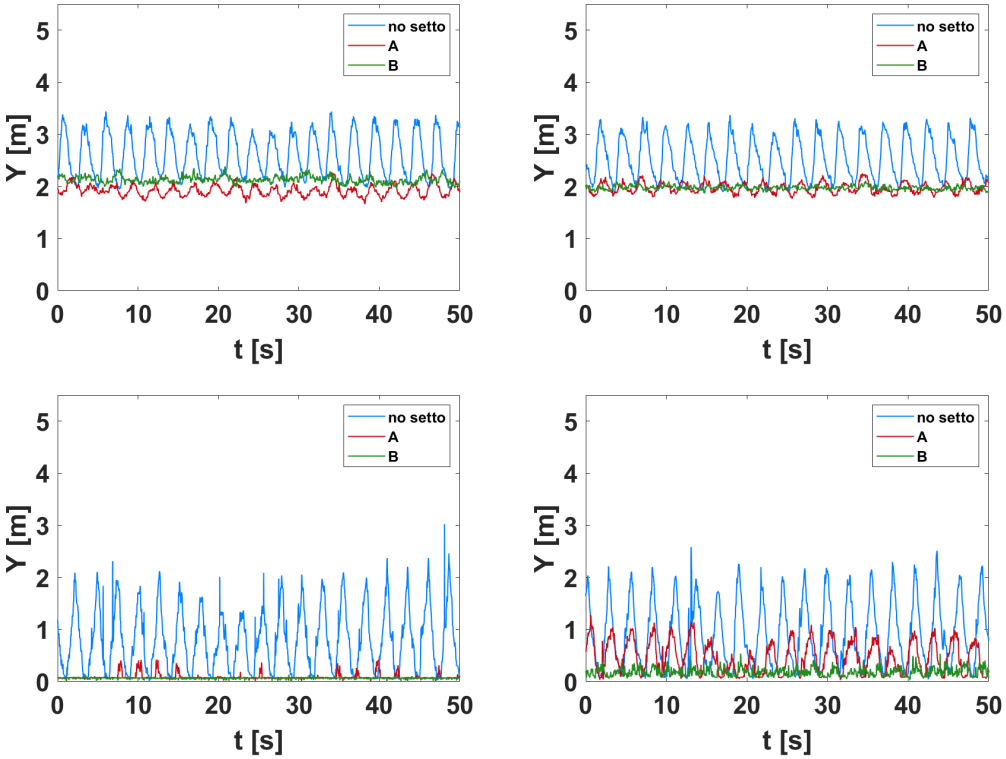


Figura 19: Andamento temporale della profondità Y misurata nelle posizioni 1 (sopra) e 2 (sotto) per gli scenari idrologici PR (sinistra) e PC (destra).

alla sezione 13.5.

Per individuare la soluzione ottimale tra le configurazioni A e B si è scelto di valutare due aspetti in particolare: i) l'ampiezza delle oscillazioni della superficie libera; ii) la distribuzione delle portate nel fornice di destra (in linea con il torrente Chiaravagna) e il fornice centrale. A tale scopo, sono state utilizzate le misure di livello rilevate, nelle diverse configurazioni e scenari idrologici, dalle sonde identificate in Figura 18) con le etichette 1-5. Le sonde nelle posizioni 1 e 2 hanno il principale obiettivo di valutare l'efficacia del setto nello smorzamento delle oscillazioni della superficie libera, mentre le sonde nelle posizioni 3 e 4 sono state utilizzate per valutare il bilanciamento delle correnti defluenti nei rispettivi fornici. La sonda nella posizione 5 fornisce informazioni sul deflusso nel fornice di sinistra, che come precedentemente discusso contribuisce al deflusso in misura inferiore rispetto ai fornici principali.

In ciascuno dei grafici di Figura 19 è mostrato l'andamento temporale della profondità misurata nelle tre configurazioni: progetto (senza setto),

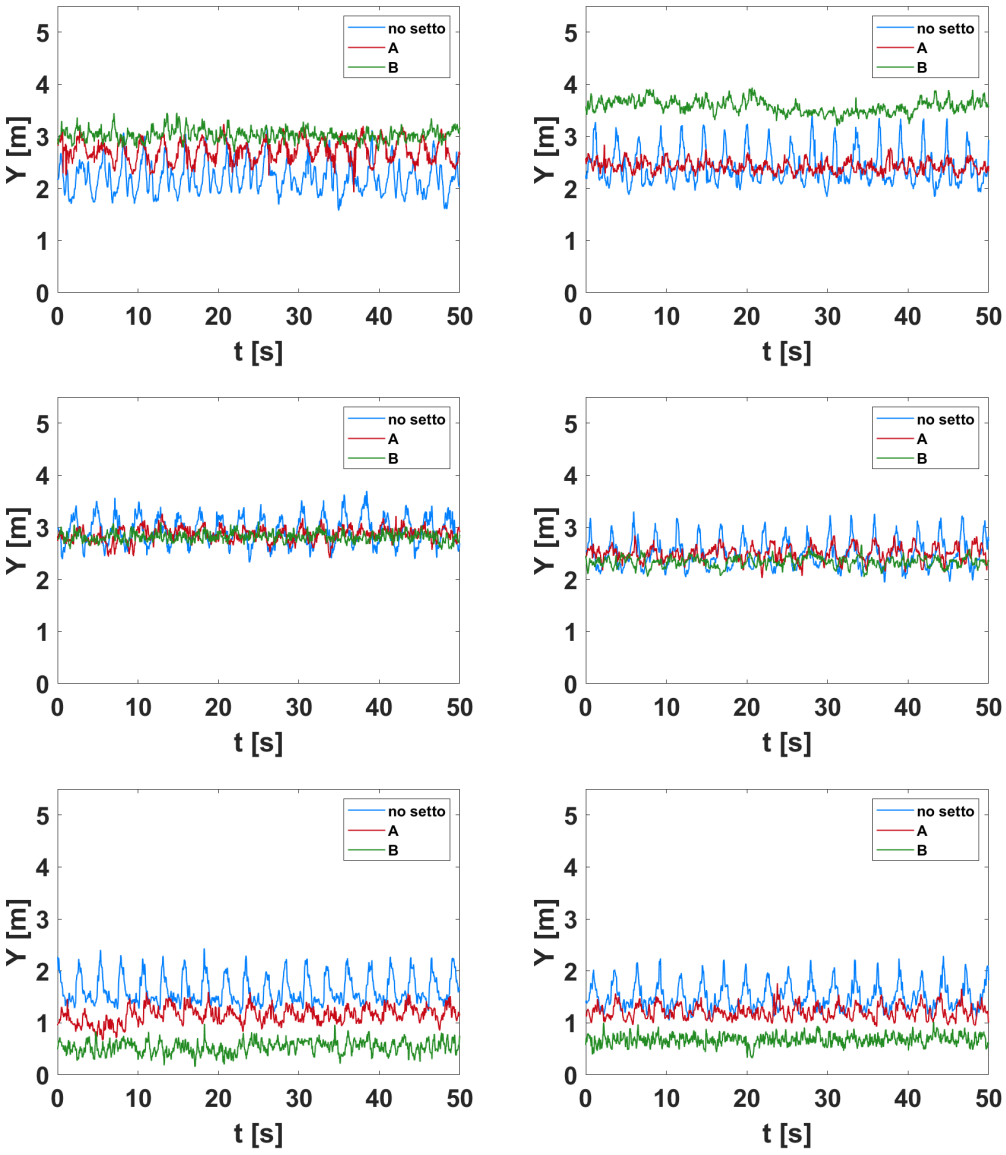


Figura 20: Andamento temporale della profondità Y misurata nelle posizioni 3 (riga in alto, fornice destro), 4 (riga al centro, fornice centrale) e 5 (riga in basso, fornice sinistro) per gli scenari idrologici PR (sinistra) e PC (destra).

setto in posizione A e B.

Le misure della sonda 1 (riga superiore) mostrano chiaramente come, indipendentemente dallo scenario idrologico, la presenza del setto assolva efficacemente al compito di attenuare le oscillazioni della superficie libera in entrambe le posizioni A e B. Infatti, l'ampiezza media di tali oscillazioni passa da ca. 1.5 m a ca. 0.56 m per il setto A e a ca. 0.3 m per il setto B. Un analogo comportamento è riscontrabile nelle misure relative alla sonda 2 (riga inferiore) posizionata in sponda sinistra del Ruscarolo. Si noti che quest'ultima risente della presenza della fogna superficiale che rimane esposta tagliando il segnale sui valori più bassi.

In Figura 20 sono riportate le misure delle sonde 3 (riga superiore), 4 (riga centrale) e 5 (riga inferiore) negli scenari PR (sinistra) e PC (destra). Il positivo effetto del setto sull'attenuazione delle oscillazioni si risente anche all'interno dei fornici, seppure in modo meno evidente. Inoltre, la posizione del setto (A o B) influisce marcatamente sul valore medio della profondità nei diversi fornici. In particolare, posizionando il setto in B si osserva un sensibile innalzamento del livello medio nel fornice di destra e un contemporaneo abbassamento nel fornice opposto, mentre il livello medio nel fornice centrale risulta poco influenzato. Al contrario, il setto in posizione A conduce a livelli medi più simili nei due fornici principali. Va sottolineato come ad uguale profondità corrisponda, in questo caso, uguale portata per unità di larghezza, e quindi un bilanciamento ottimale della corrente defluente, almeno per quanto riguarda i due fornici principali. Si noti inoltre come il fondo nel fornice di sinistra sia sopraelevato di circa un metro rispetto a quello negli altri due fornici, per cui la superficie libera, nell'intera sezione, risulta praticamente orizzontale.

Le considerazioni appena svolte trovano conferma anche nei profili longitudinali rappresentati nelle Figure 21-22. Con riferimento alla Figura 13, sono rappresentati i profili della superficie libera relativi al fornice di destra (3B) e a quello centrale (4B), nei due scenari PC (evento di piena sul Chiaravagna) e PR (evento di piena sul Ruscarolo). In rosso sono indicate le misure relative alla Configurazione 1 (senza setto) e in blu quelle relative alla Configurazione 2 (con setto in posizione A). I profili sono costruiti a partire dalle misure puntuali, elaborate in termini di valore medio. Per ogni valore è riportato l'intervallo costruito in base al valore μ_{max} e μ_{min} che fornisce una stima dell'ampiezza media delle oscillazioni.

Il confronto tra i profili in colore rosso e blu, mostra immediatamente come la presenza del setto conduca ad una sensibile attenuazione delle oscillazioni della superficie libera, in particolare nel tratto a monte del Ponte Manara. Tale effetto è particolarmente evidente nello scenario idrologico PR, rappresentato in Figura 22.

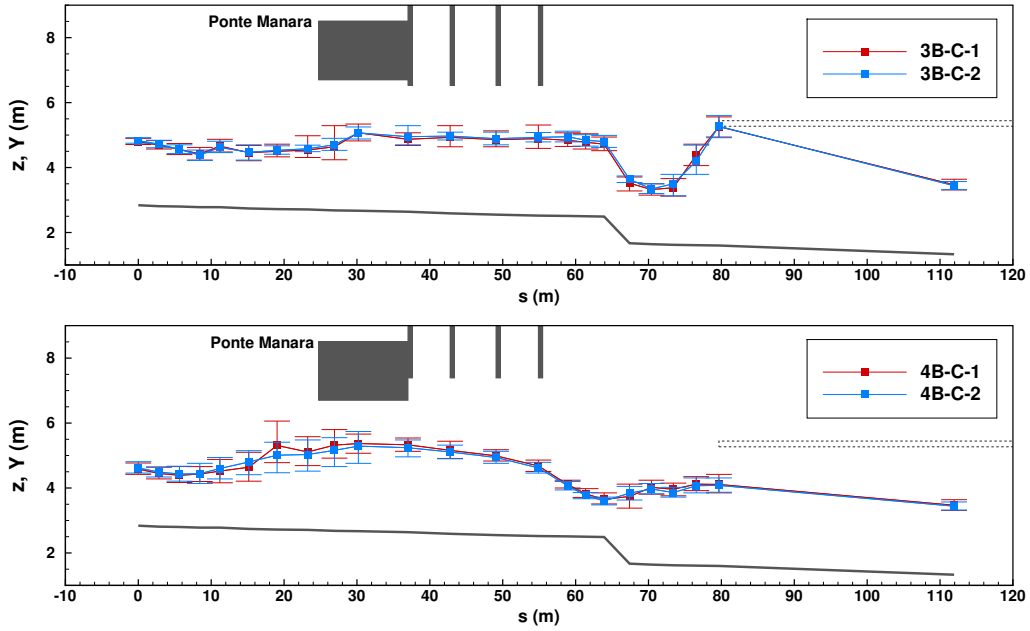


Figura 21: Confronto tra le configurazioni 1 (in rosso) e 2 (in blu) in termini di profili longitudinali di corrente nel fornice di destra (3B) e centrale (4B), con evento di piena sul Torrente Chiaravagna.

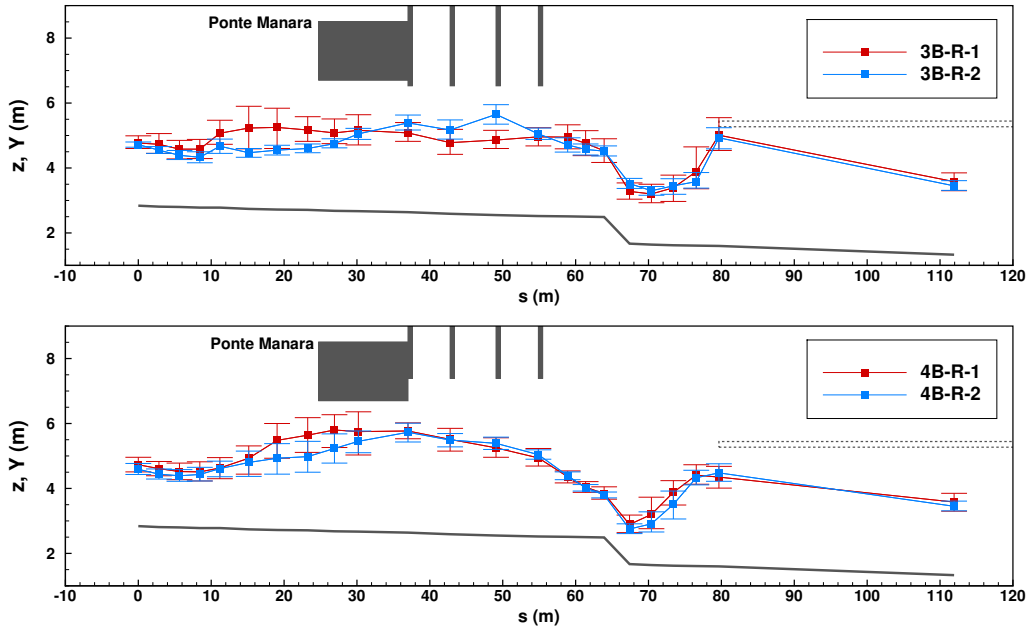


Figura 22: Confronto tra le configurazioni 1 (in rosso) e 2 (in blu) in termini di profili longitudinali di corrente nel fornice di destra (3B) e centrale (4B), con evento di piena sul Torrente Ruscarolo.

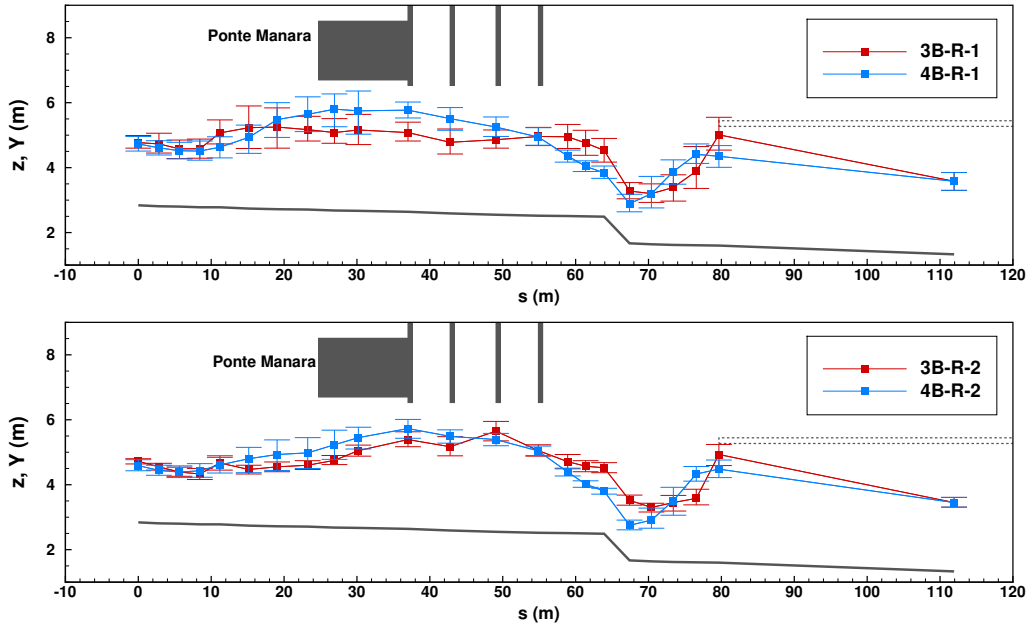


Figura 23: Confronto tra i profili longitudinali di corrente 3B (fornice di destra, in rosso) e 4B (fornice centrale, in blu), con evento di piena sul Torrente Ruscarolo nella configurazione 1 (in alto) e 2 (in basso).

Per quanto riguarda infine il bilanciamento tra i due fornici principali, in Figura 23 sono confrontati, per il solo scenario PR, i profili 3B (in rosso) e 4B (in blu) nelle configurazioni 1 (in alto) e 2 (in basso). Oltre alla già discussa attenuazione delle oscillazioni, la presenza del setto in posizione A induce una distribuzione delle portate ottimale, dimostrata dalla quasi totale sovrapposizione dei due profili nel grafico inferiore.

Nello scenario PR il profilo 3B (fornice di destra) della configurazione 1 risulta complessivamente più alto a monte della copertura e più basso all'interno della copertura stessa rispetto al corrispondente profilo nella configurazione 2 (Figura 22, in alto). In questo caso, infatti, il risalto a monte del fornice di destra assume le caratteristiche di un risalto ondulato, generando delle oscillazioni che si propagano all'interno della copertura stessa. Pur conducendo, in questo caso, ad una lieve riduzione dei franchi nel fornice di destra, l'effetto della presenza del setto risulta complessivamente positivo.

Sulle base delle considerazioni appena svolte si propone di modificare il progetto originale introducendo un setto nella posizione A. Il dimensionamento di tale opera è da ritenersi di massima, in quanto su modello sono stati solamente verificati i suoi effetti sul funzionamento idraulico della confluenza.

5.3 Analisi degli effetti sul deflusso della presenza di fognatura superficiale o a sifone

In questa sezione viene analizzato l'effetto di una modifica della configurazione di progetto che prevede l'eliminazione di un tratto della fognatura superficiale che corre all'interno del fornice centrale attraverso il funzionamento a sifone della stessa, come evidenziato nella planimetria di Figura 9.

Il confronto è stato realizzato mantenendo il setto nella posizione A, al fine da eliminare o quantomeno attenuare le oscillazioni superficiali discusse nella sezione precedente.

In Figura 24 sono mostrati i profili di corrente ottenuti sperimentalmente nelle configurazioni 2 (in rosso, fogna superficiale) e 3 (in blu, fogna a sifone). I due grafici in alto sono relativi allo scenario idrologico PC e ai profili nel fornice di destra (3B, riga superiore) e centrale (4B, riga inferiore). Gli analoghi profili per lo scenario PR sono riportati nei due grafici in basso.

Si può notare come gli effetti dell'eliminazione di parte della fognatura superficiale sono molto limitati, sia in termini di profili medi, sia in termini di ampiezza delle oscillazioni della superficie libera. L'unico caso in cui si osserva qualche differenza è quello presentato nel terzo grafico dall'alto e corrispondente al profilo nel fornice di destra (lato Chiaravagna) con evento di piena duecentennale sul Ruscarolo. In questo caso l'eliminazione di parte della fognatura superficiale conduce a un profilo leggermente più basso e, quindi, a franchi di sicurezza superiori.

L'effetto complessivo sul deflusso non appare comunque sufficiente a giustificare la realizzazione di un intervento più complesso dal punto di vista costruttivo e manutentivo.

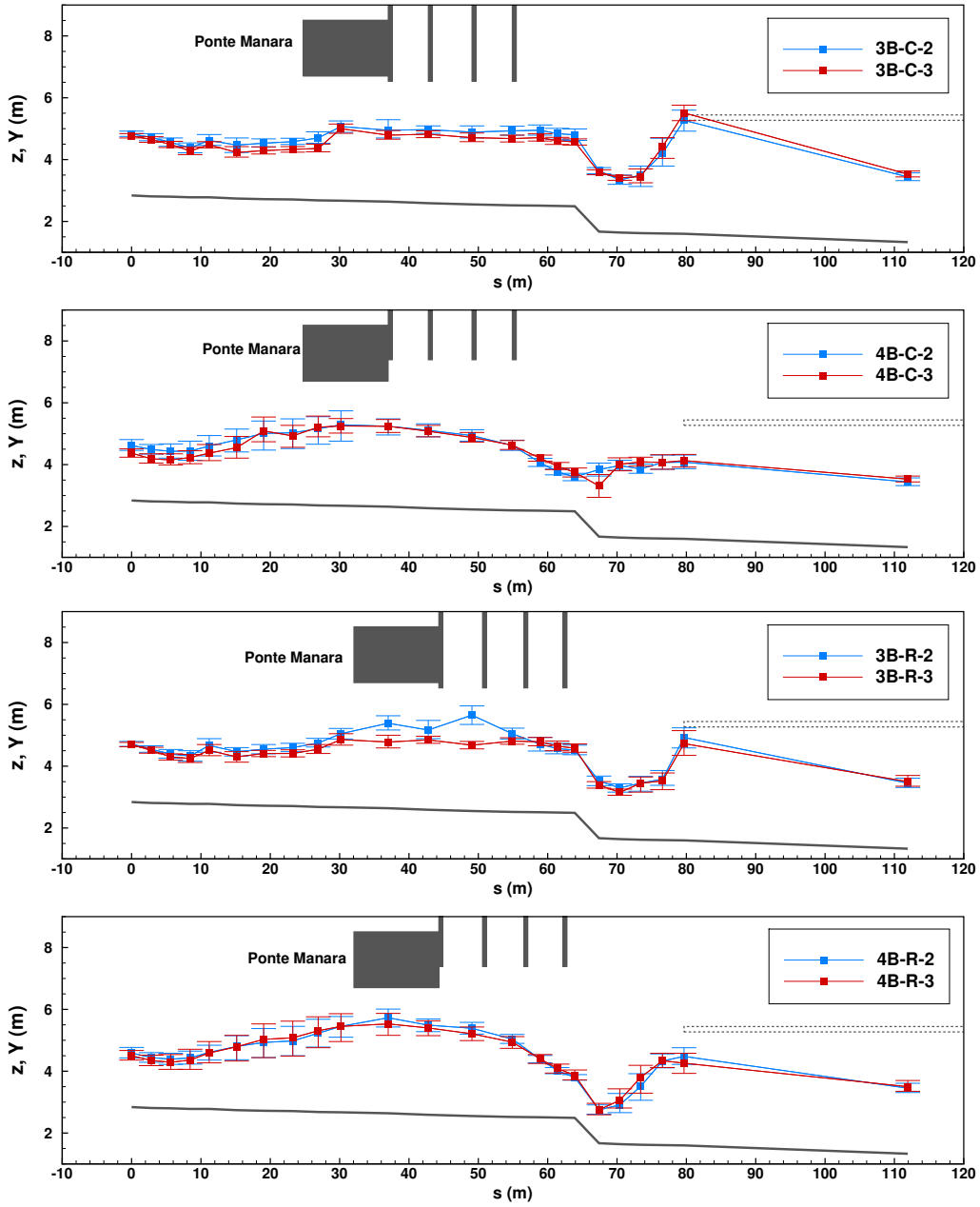


Figura 24: Confronto tra i profili longitudinali di corrente 3B (fornice di destra) e 4B (fornice centrale), con evento di piena sul Torrente Chiaravagna (in alto) e Ruscarolo (in basso) tra configurazione 2 (in rosso) e 3 (in blu).

5.4 Analisi dei franchi di sicurezza sotto la copertura ELSAG.

Nella presente sezione sono svolte alcune considerazioni sui franchi di sicurezza nel tratto della copertura ELSAG.

In Figura 25 sono presentati i franchi di sicurezza misurati rispetto al punto più basso dell'intradosso considerando sia la quota media della superficie libera (h_{media}) sia la quota massima ($h_{max} = h_{media} + \mu_{max}$). Nella configurazione 1 (di progetto) i franchi calcolati rispetto ai valori medi sono in generale sempre superiori al metro, tranne che per alcune sezioni nel fornice centrale (scenario PR) dove il franco si riduce lievemente. Si noti che per il Ponte Manara, lievemente arcuato, è stata considerata una quota media dell'intradosso pari a 6.7 m. Prendendo in considerazione i franchi calcolati con il livello h_{max}, che descrive la media delle massime quote raggiunte dalla superficie libera, la situazione peggiora naturalmente in tutte le sezioni, ma risulta particolarmente penalizzante nelle sezioni prima citate, dove il franco si riduce fino ad un minimo di 34 cm per effetto delle forti oscillazioni presenti nella configurazione 1.

Confrontando le elaborazioni, si può notare un complessivo incremento dei franchi di sicurezza nella configurazione 2 rispetto alla 1. Ciò è dovuto all'introduzione del setto che riduce le oscillazioni della superficie libera e meglio equilibra il deflusso tra i due fornici principali. Si noti, in particolare, come i franchi calcolati con il livello massimo siano, nella configurazione 2, confrontabili con quelli calcolati con il livello medio, a testimoniare la riduzione generalizzata delle oscillazioni.

Permane una lieve criticità nella sezione 13 all'interno del fornice di destra, per il solo evento di piena sul Ruscarolo. In questo caso, come già discusso precedentemente, il risalto a monte del fornice di destra assume la forma di un risalto ondulato, generando delle oscillazioni che si propagano all'interno della copertura. Il franco medio in quella sezione risulta comunque pari a 0.88 m, che si può considerare ancora accettabile visto che la quota dell'intradosso utilizzata corrisponde al lembo inferiore delle travi e non alla soletta vera e propria.

CONFIGURAZIONE 1

SCENARIO PR - Piena torrente Ruscarolo

PROFILO 3B - Fornice di destra

sezione	s (m)	η (m)	h_{medio} (m)	h_{max} (m)	$h_{intradosso}$ (m)	Franco - h_{medio}	Franco - h_{max}
8 (13)	23.24	2.71	5.17	5.58	6.7	1.53	1.12
9	26.91	2.68	5.08	5.50	6.7	1.62	1.20
10 (12.5)	30.19	2.67	5.16	5.65	6.7	1.54	1.05
11 (12.3)	37	2.64	5.08	5.40	6.53	1.45	1.13
12	42.78	2.59	4.78	5.19	6.53	1.75	1.34
13	49.08	2.55	4.86	5.16	6.53	1.67	1.37
14	54.89	2.52	4.96	5.24	6.53	1.57	1.29

PROFILO 4B - Fornice centrale

sezione	s (m)	η (m)	h_{medio} (m)	h_{max} (m)	$h_{intradosso}$ (m)	Franco - h_{medio}	Franco - h_{max}
8 (13)	23.24	2.71	5.64	6.17	6.7	1.06	0.53
9	26.91	2.68	5.80	6.28	6.7	0.90	0.42
10 (12.5)	30.19	2.67	5.75	6.36	6.7	0.95	0.34
11 (12.3)	37	2.64	5.77	6.02	7.39	1.62	1.37
12	42.78	2.59	5.51	5.85	7.39	1.88	1.54
13	49.08	2.55	5.25	5.56	7.39	2.14	1.83
14	54.89	2.52	4.94	5.22	7.39	2.45	2.17

PROFILO 5B - Fornice di sinistra

sezione	s (m)	η (m)	h_{medio} (m)	h_{max} (m)	$h_{intradosso}$ (m)	Franco - h_{medio}	Franco - h_{max}
9	26.91	3.68	5.05	5.41	6.55	1.50	1.14
10 (12.5)	30.19	3.68	5.08	5.41	6.55	1.47	1.14
11 (12.3)	37	3.62	5.39	5.90	7.39	2.00	1.49
12	42.78	3.53	5.15	5.61	7.39	2.24	1.78
13	49.08	3.46	4.96	5.26	7.39	2.43	2.13
14	54.89	3.4	4.35	4.60	7.39	3.04	2.79

SCENARIO PC - Piena torrente Chiaravagna

PROFILO 3B - Fornice di destra

sezione	s (m)	η (m)	h_{medio} (m)	h_{max} (m)	$h_{intradosso}$ (m)	Franco - h_{medio}	Franco - h_{max}
8 (13)	23.24	2.71	4.54	4.97	6.7	2.16	1.73
9	26.91	2.68	4.64	5.29	6.7	2.06	1.41
10 (12.5)	30.19	2.67	5.07	5.33	6.7	1.63	1.37
11 (12.3)	37	2.64	4.87	5.06	6.53	1.66	1.47
12	42.78	2.59	4.93	5.29	6.53	1.60	1.24
13	49.08	2.55	4.86	5.14	6.53	1.67	1.39
14	54.89	2.52	4.89	5.32	6.53	1.64	1.21

PROFILO 4B - Fornice centrale

sezione	s (m)	η (m)	h_{medio} (m)	h_{max} (m)	$h_{intradosso}$ (m)	Franco - h_{medio}	Franco - h_{max}
8 (13)	23.24	2.71	5.11	5.58	6.7	1.59	1.12
9	26.91	2.68	5.32	5.79	6.7	1.38	0.91
10 (12.5)	30.19	2.67	5.37	5.66	6.7	1.33	1.04
11 (12.3)	37	2.64	5.33	5.54	7.39	2.06	1.85
12	42.78	2.59	5.16	5.44	7.39	2.23	1.95
13	49.08	2.55	4.99	5.17	7.39	2.40	2.22
14	54.89	2.52	4.68	4.86	7.39	2.71	2.53

PROFILO 5B - Fornice di sinistra

sezione	s (m)	η (m)	h_{medio} (m)	h_{max} (m)	$h_{intradosso}$ (m)	Franco - h_{medio}	Franco - h_{max}
9	26.91	3.68	4.74	5.07	6.55	1.81	1.48
10 (12.5)	30.19	3.68	4.83	5.23	6.55	1.72	1.32
11 (12.3)	37	3.62	5.05	5.51	7.39	2.34	1.88
12	42.78	3.53	4.86	5.25	7.39	2.53	2.14
13	49.08	3.46	4.77	5.00	7.39	2.62	2.39
14	54.89	3.4	4.18	4.37	7.39	3.21	3.02

CONFIGURAZIONE 2

SCENARIO PR - Piena torrente Ruscarolo

PROFILO 3B - Fornice di destra

sezione	s (m)	η (m)	h_{medio} (m)	h_{max} (m)	$h_{intradosso}$ (m)	Franco - h_{medio}	Franco - h_{max}
8 (13)	23.24	2.71	4.60	4.73	6.7	2.10	1.97
9	26.91	2.68	4.75	4.89	6.7	1.95	1.81
10 (12.5)	30.19	2.67	5.05	5.22	6.7	1.65	1.48
11 (12.3)	37	2.64	5.39	5.63	6.53	1.14	0.90
12	42.78	2.59	5.17	5.48	6.53	1.36	1.05
13	49.08	2.55	5.65	5.95	6.53	0.88	0.58
14	54.89	2.52	5.05	5.22	6.53	1.48	1.31

PROFILO 4B - Fornice centrale

sezione	s (m)	η (m)	h_{medio} (m)	h_{max} (m)	$h_{intradosso}$ (m)	Franco - h_{medio}	Franco - h_{max}
8 (13)	23.24	2.71	4.98	5.44	6.7	1.72	1.26
9	26.91	2.68	5.23	5.67	6.7	1.47	1.03
10 (12.5)	30.19	2.67	5.45	5.77	6.7	1.25	0.93
11 (12.3)	37	2.64	5.73	6.01	7.39	1.66	1.38
12	42.78	2.59	5.49	5.69	7.39	1.90	1.70
13	49.08	2.55	5.39	5.58	7.39	2.00	1.81
14	54.89	2.52	5.04	5.18	7.39	2.35	2.21

PROFILO 5B - Fornice di sinistra

sezione	s (m)	η (m)	h_{medio} (m)	h_{max} (m)	$h_{intradosso}$ (m)	Franco - h_{medio}	Franco - h_{max}
9	26.91	3.68	4.46	4.68	6.7	2.24	2.02
10 (12.5)	30.19	3.68	4.70	5.12	6.7	2.00	1.58
11 (12.3)	37	3.62	4.95	5.25	7.39	2.44	2.14
12	42.78	3.53	4.70	4.94	7.39	2.69	2.45
13	49.08	3.46	4.64	4.88	7.39	2.75	2.51
14	54.89	3.4	4.22	4.38	7.39	3.17	3.01

SCENARIO PC - Piena torrente Chiaravagna

PROFILO 3B - Fornice di destra

sezione	s (m)	η (m)	h_{medio} (m)	h_{max} (m)	$h_{intradosso}$ (m)	Franco - h_{medio}	Franco - h_{max}
8 (13)	23.24	2.71	4.58	4.69	6.7	2.12	2.01
9	26.91	2.68	4.70	4.91	6.7	2.00	1.79
10 (12.5)	30.19	2.67	5.07	5.25	6.7	1.63	1.45
11 (12.3)	37	2.64	4.95	5.29	6.53	1.58	1.24
12	42.78	2.59	4.97	5.09	6.53	1.56	1.44
13	49.08	2.55	4.89	5.09	6.53	1.64	1.44
14	54.89	2.52	4.93	5.08	6.53	1.60	1.45

PROFILO 4B - Fornice centrale

sezione	s (m)	η (m)	h_{medio} (m)	h_{max} (m)	$h_{intradosso}$ (m)	Franco - h_{medio}	Franco - h_{max}
8 (13)	23.24	2.71	5.03	5.48	6.7	1.67	1.22
9	26.91	2.68	5.16	5.56	6.7	1.54	1.14
10 (12.5)	30.19	2.67	5.29	5.74	6.7	1.41	0.96
11 (12.3)	37	2.64	5.24	5.48	7.39	2.15	1.91
12	42.78	2.59	5.11	5.32	7.39	2.28	2.07
13	49.08	2.55	4.94	5.13	7.39	2.45	2.26
14	54.89	2.52	4.62	4.79	7.39	2.77	2.60

PROFILO 5B - Fornice di sinistra

sezione	s (m)	η (m)	h_{medio} (m)	h_{max} (m)	$h_{intradosso}$ (m)	Franco - h_{medio}	Franco - h_{max}
9	26.91	3.68	4.58	4.80	6.7	2.12	1.90
10 (12.5)	30.19	3.68	4.69	5.10	6.7	2.01	1.60
11 (12.3)	37	3.62	4.95	5.19	7.39	2.44	2.20
12	42.78	3.53	4.78	5.00	7.39	2.61	2.39
13	49.08	3.46	4.61	4.79	7.39	2.78	2.60
14	54.89	3.4	4.11	4.25	7.39	3.28	3.14

Figura 25: Franchi di sicurezza sotto la copertura ELSAG nelle configurazioni 1 e 2. Scenari idrologici PR e PC, profili nel fornice di destra (3B), centrale (4B) e di sinistra (5B).

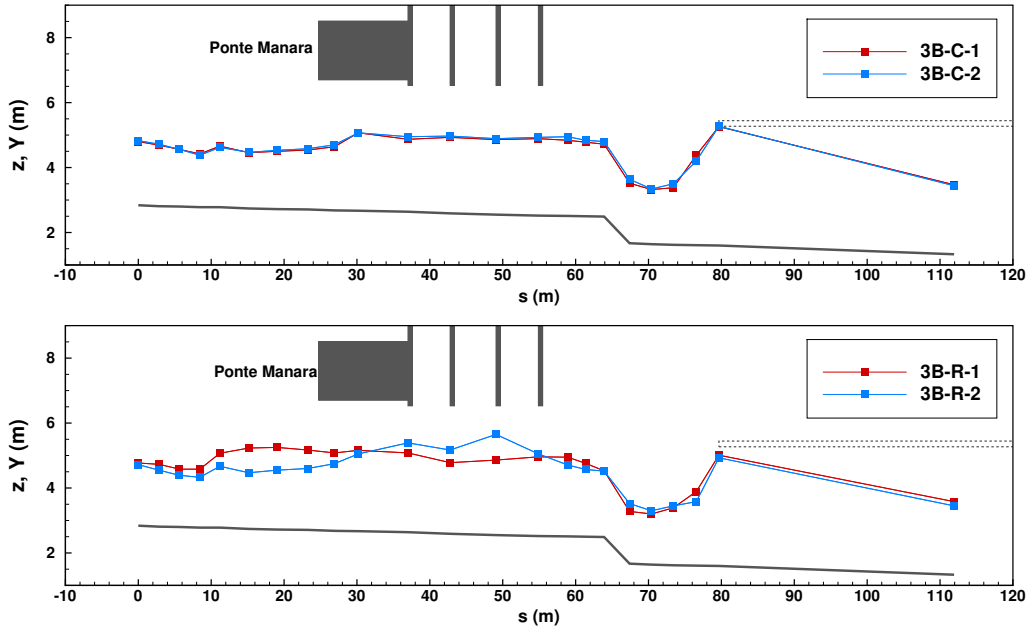


Figura 26: Confronto tra i profili longitudinali di corrente ottenuti nelle configurazioni 1 e 2 per il fornice di destra (3B), con evento di piena sul Torrente Chiaravagna (in alto) e Ruscarolo (in basso).

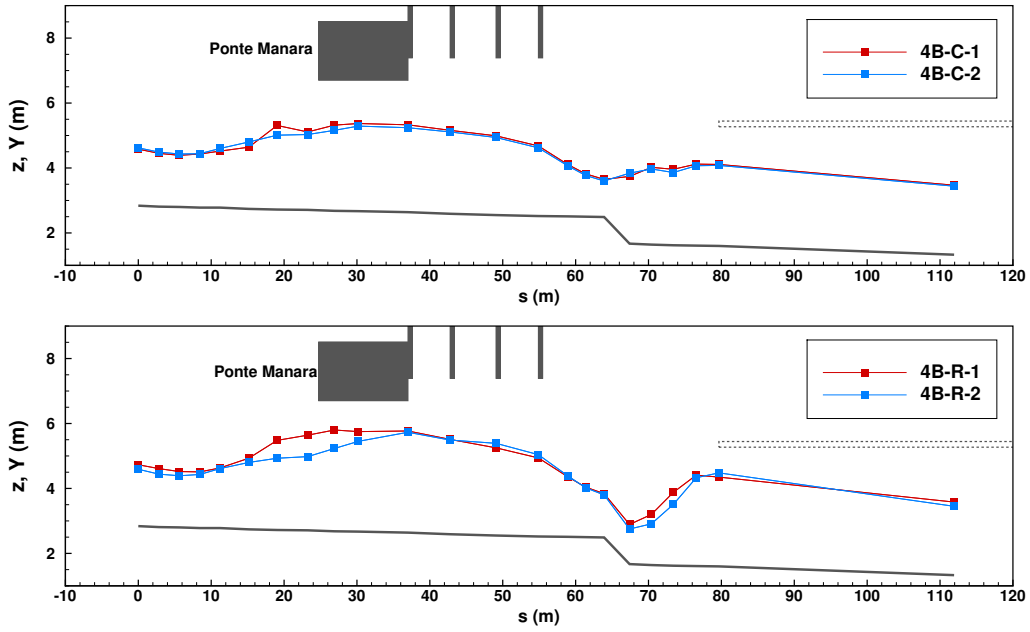


Figura 27: Confronto tra i profili longitudinali di corrente ottenuti nelle configurazioni 1 e 2 per il fornice centrale (4B), con evento di piena sul Torrente Chiaravagna (in alto) e Ruscarolo (in basso).

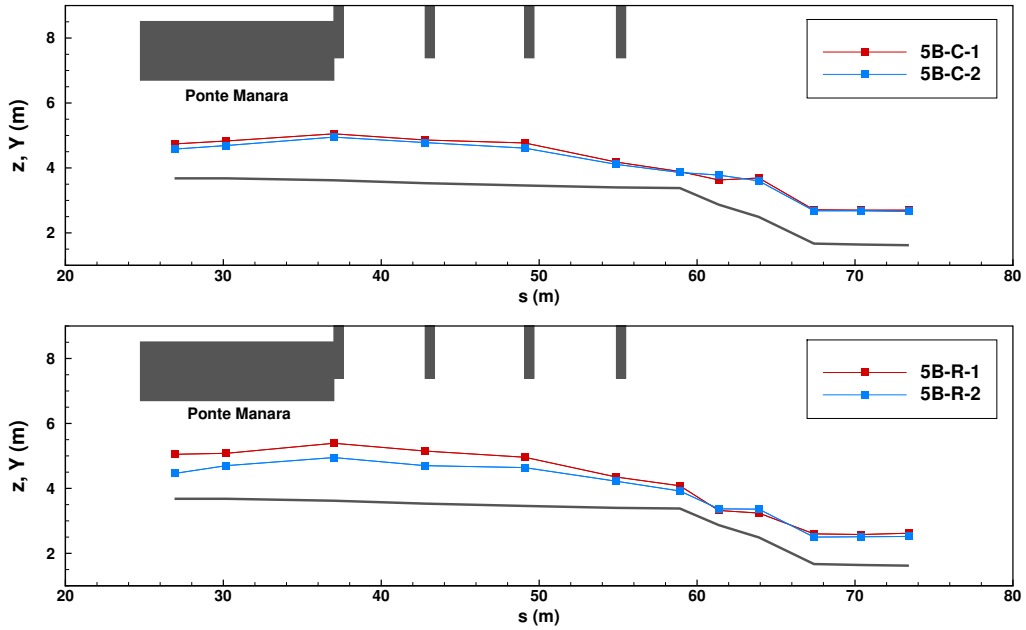


Figura 28: Confronto tra i profili longitudinali di corrente ottenuti nelle configurazioni 1 e 2 per il fornice di sinistra (5B), con evento di piena sul Torrente Chiaravagna (in alto) e Ruscarolo (in basso).

Per completezza, sono infine riportati nelle figure 26-28 i profili medi corrispondenti ai valori riportati nella tabella di Figura 25. Si noti come nello scenario *PC* le differenze tra i profili medi nelle due configurazioni siano minime. Come più volte discusso in precedenza, infatti, il principale obiettivo dell'inserimento del setto è stato quello di smorzare le oscillazioni legate al fenomeno di instabilità che si è osservato nella Configurazione 1. Nello scenario *PR* gli effetti dell'inserimento del setto sono più sensibili e positivi ai fini dell'incremento dei franchi di sicurezza nel fornice centrale e in quello di sinistra. Nel fornice di destra (Figura 26) a un lieve miglioramento a monte della copertura corrisponde un lieve peggioramento sotto la copertura stessa, per i motivi già discussi precedentemente.

6 Conclusioni

Il complesso delle prove sperimentali eseguite sul modello hanno portato alle seguenti conclusioni:

- La confluenza nella sua configurazione di progetto è soggetta, per entrambe le combinazioni di portata esaminate, ad un fenomeno di instabilità che si manifesta attraverso **la formazione di un'onda trasversale non stazionaria nell'area della confluenza**, onda che viene riflessa tra le due sponde e raggiunge **ampiezze confrontabili con la profondità media della corrente**.

- Tale oscillazione **si riflette sul deflusso all'interno dei fornici della copertura ELSAG**, che risulta non bilanciato tra i fornici stessi, implicando una riduzione dei franchi di sicurezza e la presenza di onde che portano la superficie libera della corrente a lambire le travi che sostengono la copertura stessa.

- Al fine di evitare o quantomeno contenere tale instabilità, **risulta necessario introdurre un setto** posizionato in corrispondenza del fronte del primo pilone della copertura ELSAG (sponda destra, lato Chiaravagna) che si estenda per circa 10 m verso monte, con un'altezza media di circa 1.80 m, opportunamente rastremato verso monte.

- Sono state eseguite diverse prove per scegliere **l'orientamento ottimale** di tale setto, che oltre a inibire la formazione delle onde trasversali incide sulla ripartizione delle portate all'interno dei fornici della copertura ELSAG. La posizione selezionata prevede un orientamento che congiunge idealmente la testa della pila centrale con la fine della sottumurazione in sponda sinistra del Chiaravagna alla sezione 13.5.

- Una volta posizionato opportunamente il setto, si è simulato l'effetto dell'eliminazione di un tratto della fognatura superficiale, ipotizzando la realizzazione di un sifone. Il lieve aumento di sezione utile al deflusso conseguente all'eliminazione della fognatura e del relativo bauletto **non sembra produrre effetti idraulicamente significativi tali da giustificare un'opera relativamente complessa e di più difficile manutenzione**.

- Nella configurazione suggerita (con setto e fognatura superficiale) **i franchi di sicurezza risultano complessivamente accettabili**,

trattandosi comunque di un evento duecentennale e di un tratto dalla geometria particolarmente complessa in cui la corrente, oltre a dover miscelare le diverse portate e i diversi flussi di quantità di moto provenienti dai due torrenti, subisce una considerevole successione di restringimenti ed allargamenti.

- La formazione di diversi risalti obliqui nel tratto considerato testimonia il fatto che la pendenza del tratto è prossima alla critica per l'evento considerato. Il deflusso è dunque caratterizzato da significative oscillazioni della superficie libera che occasionalmente **conducono ad una locale e istantanea riduzione dei franchi che non appare possibile controllare modificando ulteriormente il progetto**.

- Si suggerisce infine di **affinare il progetto di sistemazione del tratto di valle**, dove insiste l'area del parcheggio ABB, che non è stato analizzato in dettaglio sul modello fisico. Le misure, infatti, si sono concentrate principalmente nel nodo della confluenza, fino alle soglie in corrispondenza della passerella ELSAG. Trattandosi del tratto terminale del modello è inoltre possibile un'influenza non trascurabile delle condizioni di valle. La geometria relativamente semplice dell'alveo in tale tratto suggerisce di affidare le valutazioni idrauliche a simulazioni numeriche stazionarie monodimensionali, opzione non praticabile per il nodo della confluenza, dove la modellazione fisica realizzata nell'ambito del presente studio produce risultati indubbiamente più affidabili. Andrebbe inoltre considerata la possibilità di proseguire ulteriormente la pavimentazione dell'alveo per tutto o in parte il tratto prospiciente al parcheggio ABB.