1	9/2018	REVISIONE	DUTTO	BERTERO	CASSANI
0	11/2017	PRIMA EMISSIONE	DUTTO	BERTERO	CASSANI
Revisione	**Data**	**Oggetto revisione**	**Redatto**	**Verificato**	**Approvato**

REGIONE LIGURIA

#ItaliaSicura
Presidenza del Consiglio dei Ministri

COMUNE DI GENOVA

PIANO STRALCIO PER LE AREE METROPOLITANE E LE AREE URBANE CON ALTO LIVELLO DI POPOLAZIONE ESPOSTA AL RISCHIO DI ALLUVIONI

Presidenza del Consiglio dei Ministri

PRESIDENZA DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI
COMMISSARIO STRAORDINARIO
delegato per l'attuazione degli interventi inseriti nell'A.d.P. del 16.09.2010 e ss.ii.
(ex art. 10 del D.L. n. 91 del 24.06.2014)

Commissario straordinario
Dott. Giovanni TOTI

PROGETTISTI

CAPOGRUPPO MANDATARIA:

ROCKSOIL S.p.A.
CONSULENZA E ASSISTENZA TECNICA
nel campo della GEOINGEGNERIA

MANDANTI:

art ambiente risorse territorio

HYDRODATA INGEGNERIA DELLE RISORSE IDRICHE

Ing. Mario CANGIANO

Ing. Paolo GALLO

Ing. Francesco DE SANCTIS

Dott.ssa Francesca GIOMI

RESPONSABILE STRUTTURA COMMISSARIALE
Ing. Luca BERRUTI

RESPONSABILE UNICO PROCEDIMENTO
Ing. Stefano PINASCO

Progettista responsabile integrazioni prestazioni specialistiche e Direttore Tecnico della mandataria.
Rocksoil S.p.A.
Ing. Giovanna Cassani
Ord. Ingg. Milano N° 20997

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI MILANO
DOTT. ING. CASSANI GIOVANNA
Sez. A Settori:
a) civile e ambientale
b) industriale
c) dell'informazione
n° A 20997

Progettista/Progettisti responsabili elaborato
Hydrodata S.p.A.
Ing. Roberto Bertero
Ord. Ingg. Torino N° 7570L

ORDINE INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI TORINO
Dott. Ing. ROBERTO BERTERO
n. 7570 L

Intervento/Opera

SECONDO LOTTO DEI LAVORI RELATIVI ALLA REALIZZAZIONE DELLA GALLERIA SCOLMATRICE DEL TORRENTE BISAGNO IN COMUNE DI GENOVA

PROGETTO ESECUTIVO

N° Progr. ----

Codice elaborato BIS2E - H - SDB05 -RE01- 1

Oggetto della tavola

MODELLO FISICO

Risultanze delle simulazioni idrauliche

Scala

Data
14 SETT. 2018

Codice FILE BIS2E-H-SDB05-RE01-1.DWG

I DISEGNI E LE INFORMAZIONI IN ESSI CONTENUTE SONO PROPRIETA' ESCLUSIVA DELLA STRUTTURA COMMISSARIALE E NON POSSONO ESSERE MODIFICATI, RIPRODOTTI, RESI PUBBLICI O UTILIZZATI PER USI DIFFERENTI DA QUELLI PER CUI SONO STATI REDATTI, SALVO AUTORIZZAZIONE SCRITTA.

INDICE

1 INTRODUZIONE 3
2 CONDIZIONI DI SIMILITUDINE IDRAULICA 4
3 ALLESTIMENTO DEL MODELLO 4
4 PROVE IDRAULICHE 8
4.1 SIM-0: Simulazione di riferimento 9
4.1.1 Opere in alveo 9
4.1.2 Canale collettore, camera di dissipazione, manufatto di imbocco 18
4.1.3 Galleria 25
4.1.4 Determinazione dell'effetto della mancata apertura di una delle paratoie 29
4.2 Determinazione di possibili configurazioni alternative di apertura delle paratoie 31
4.2.1 Risultati della SIM-1 31
4.2.2 Risultati della SIM-2 33
4.2.3 Risultati della SIM-3 35
4.2.4 Risultati della SIM-4 36
4.2.5 Risultati della SIM-5 39
4.2.6 Scelta della configurazione di progetto 42
4.3 Deflusso di portate superiori a quelle di progetto 47
4.3.1 Scala di deflusso del canale collettore 47
4.3.2 Comportamento dello sfioro e della galleria di adduzione 49
5 CONCLUSIONI 51

1 INTRODUZIONE

Per la validazione della funzionalità idraulica delle opere in progetto, con particolare riferimento alle varianti introdotte (rispetto al Progetto Definitivo – "PD2007") nell'impostazione del nodo di presa nel tratto a valle dello sfioratore laterale di alimentazione, i progettisti hanno provveduto all'esecuzione di analisi e simulazioni con modellistica fisica specificamente allestita.

Il modello fisico in particolare è stato innanzitutto predisposto per rappresentare le opere di imbocco dello scolmatore, costituite dallo sfioratore sul Bisagno con relativo canale collettore, dalla canalizzazione di imbocco verso la galleria a sezione policentrica e dal primo tratto della galleria stessa. Il modello è stato poi esteso, come da indicazione del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, in modo da risultare rappresentativo anche dell'alveo del torrente Bisagno (nel tratto oggetto di sistemazione) e per riprodurre il tratto della galleria di adduzione fino a valle della curva, potendo così descrivere l'entità dei fenomeni di sovralzo e distanziando la sezione di imposizione delle condizioni al contorno dal tratto di principale interesse per lo studio.

Le finalità di indagine all'origine di tale impostazione riguardano la distribuzione dei flussi all'interno della vasca di dissipazione e le modalità di imbocco della galleria di adduzione, punto in cui la modellistica numerica bidimensionale allestita in progetto mostra una significativa variazione trasversale di livelli e velocità, che può dare origine a perturbazioni periodiche (onde) in grado di propagarsi lungo la galleria. Il modello fisico consente di valutare con maggiore affidabilità l'entità e frequenza di tali perturbazioni, per confermare le ipotesi adottate in progetto (rilevanza accettabile rispetto al franco idraulico disponibile). La riproduzione dell'alveo consente inoltre l'indagine delle condizioni idrodinamiche a monte e a valle del tratto in studio e di indagare/validare altri elementi del progetto, quali ad esempio l'andamento dei flussi in alveo e il conseguente rispetto dei franchi idraulici rispetto alle sponde.

Il presente documento descrive le attività di progettazione e di allestimento del modello nonché i risultati delle prove idrauliche eseguite.

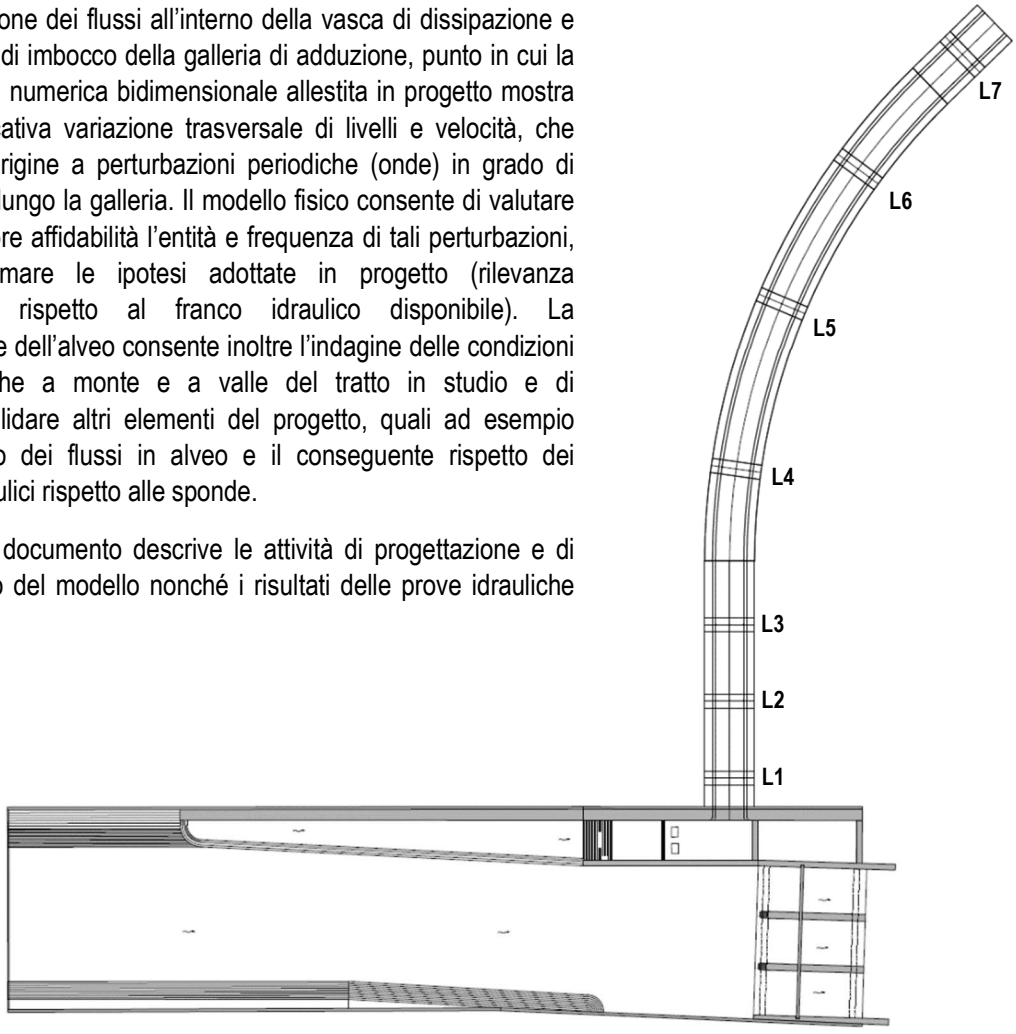


Figura 1-1 – Schema di progetto del modello fisico comprensivo del tratto di alveo del Bisagno interessato dall'opera di sbarramento, dallo sfioratore, dall'opera di imbocco e dal tratto di galleria a sezione policentrica fino a valle della curva del tracciato. Lungo la galleria è riportata l'identificazione delle fenditure di accesso realizzate nella calotta in plexiglass per consentire il rilievo di velocità e livelli.

2 CONDIZIONI DI SIMILITUDINE IDRAULICA

Il modello fisico è realizzato a fondo fisso e **scala geometrica indeformata 1:43**, individuata come miglior compromesso tra le esigenze di rappresentatività e sensibilità delle misure (livelli e velocità), la significatività idraulica (conservazione del numero di Froude e funzionamento in campo pienamente turbolento) e la logistica di laboratorio (considerando anche di poter utilizzare elementi standard con geometrie commerciali).

La definizione delle corrispondenti scale dei parametri idraulici deriva dalla condizione di similitudine del comportamento idrodinamico tra modello e prototipo:

Lunghezze	=	L_R	= 1/43	= 0,0233.
Tempi	=	T_R	$= (1/43)^{1/2} \cdot 1$	= 0,1525.
Velocità	=	V_R	$= (1/43)^{1/2} \cdot 1$	= 0,1525.
Portate	=	Q_R	$= (1/43)^{5/2} \cdot 1$	= 0,0000825 = 1:12124
Scabrezza	=	C_R	$= (1/43)^{-1/6}$	= 1,8717

Risulta in particolare che le portate di progetto (nel prototipo: 1.050 m^3/s in alveo, 450 m^3/s derivati dallo scolmatore) sono rappresentate nel modello con le portate di 86,6 l/s in alveo e 37,1 l/s derivati dallo scolmatore.

3 ALLESTIMENTO DEL MODELLO

Il modello fisico è stato allestito nel sito della stazione Idrometrica Sperimentale di Santhià, di proprietà della Coutenza Canali Cavour.

Esso è inserito in un circuito idraulico di prova di tipo aperto, costituito da:

- derivazione per pompaggio da un canale a pelo libero regolato a livello costante (Naviglio di Ivrea), che dal punto di vista del modello si può considerare alla stregua di un serbatoio di capacità infinita;
- immissione della portata in una vasca di smorzamento e regolarizzazione, con valvola di regolazione in testa;
- alimentazione del modello per sfioro diretto; è presente un primo tratto d'alveo (di estensione pari a circa 65 m in scala del prototipo – 1,5 m in scala del modello) a monte di quello oggetto di indagine, realizzato con la geometria effettiva di sistemazione ma non da considerarsi rappresentativo in termini di similitudine idraulica, che ha la funzione di regolarizzare le condizioni idrodinamiche all'imbocco, così da svincolare la prima sezione utile del modello dalla condizione di monte dovuta all'alimentazione;
- collettamento delle portate in uscita dall'alveo e dalla galleria entro due vasconi attrezzati con schermi di dissipazione e stramazzi triangolari in parete sottile per la misura della portata defluente; tali vasconi sono stati strumentati anche con sonde idrometriche per la misura in continuo del battente idrico a monte degli stramazzi, così da meglio rilevare le eventuali oscillazioni nel tempo dei deflussi.
- rilascio della portata entro un canale di scarico secondario.

Le opere rappresentate nel modello presentano complessivamente uno sviluppo longitudinale (in asse al Bisagno) di circa 7,5 m e in senso trasversale (in asse alla galleria di scarico) di circa 1,5 m (alveo) e circa 6,1 m (sviluppo curvilineo della galleria), corrispondenti in scala reale a circa 320 m di alveo e 260 m di galleria.

Il modello idraulico vero e proprio è stato costruito come struttura combinata in elementi prefabbricati in polistirolo ad alta densità (30 kg/m^3), polistirene ad alta densità (60 kg/m^3), PVC espanso (FOREX) e componenti in plexiglas. Tale impostazione ha consentito di unire le caratteristiche di lavorabilità e leggerezza dei materiali plastici, che permettono di riprodurre agevolmente e con elevata accuratezza le complesse geometrie delle opere in progetto e delle sistemazioni d'alveo e sono stati adottati per rappresentare le parti a sezione aperta (alveo, sfioratore, canale collettore), alla trasparenza del plexiglass, necessaria per la rappresentazione in scala della calotta superiore della galleria policentrica a sezione chiusa, in modo da consentire la visualizzazione dei fenomeni idrodinamici al suo interno. La differenziazione tra i vari materiali plastici è resa necessaria dalle diverse caratteristiche di resistenza meccanica, lavorabilità e durabilità richieste alle diverse componenti.

Il basamento della galleria è stato realizzato in un unico blocco di resina colata e successivamente fresata con macchinari a controllo numerico, in totale assenza di giunti e con possibilità di realizzare le perforazioni per i piezometri in totale assenza di trafilamenti e con modalità che garantiscono maggiore durabilità.

Sono state realizzate in scala anche le paratoie a settore previste in progetto per la traversa di sbarramento, utilizzando lamierini in acciaio inox calandrati e bracci di supporto in lamierino inox tagliato a laser.

Il modello è stato equipaggiato con idonea strumentazione di misura della portata, dei livelli e delle velocità.

- Misuratori di portata a stramazzo e aste micrometriche con nonio per la misura delle portate defluenti nelle due porzioni del modello, necessari per definire accuratamente le condizioni di prova e effettuare le eventuali regolazioni; la lettura micrometrica è effettuata in tubo piezometrico laterale alimentato da prese comunicanti ubicate sul fondo del vascone nelle due pareti laterali, poste ad adeguata distanza dal setto di sfioro. Quale misura integrativa di controllo, il livello idrico a monte degli stramazzi è stato letto in continuo nel corso delle prove utilizzando sonde idrometriche a immersione (funzionanti con principio piezometrico), in modo da verificare l'entità delle eventuali oscillazioni di portata nel corso delle simulazioni.
- Punte micrometriche con nonio per la mappatura delle quote idriche nelle aree e nelle sezioni di interesse del modello (in particolare: tratto canalizzato tra il canale collettore dello sfioratore e l'imbocco della galleria, sezioni della galleria con accesso da apposite fenditure praticate nella calotta in plexiglass).
- Prese piezometriche su sette sezioni rappresentative della galleria, ubicate sul fondo in tre posizioni (centro e pareti), per la misura entro una batteria di tubazioni piezometriche (mediante micrometri con nonio) della distribuzione trasversale dei carichi, con smorzamento delle oscillazioni di rapido periodo.
- Micromulinello elettromeccanico per la misura delle velocità di flusso in punti caratteristici.

Per imporre adeguatamente la condizione idraulica al contorno di monte agli elementi di specifico interesse (ingresso di portata ai manufatti a valle dello sfioro) è stato rappresentato l'intero sfioratore e il tratto d'alveo adiacente fino all'opera di sbarramento, in quanto dalle analisi con modello numerico è emerso un significativo spostamento del flusso verso la sponda sinistra, con conseguente rilevante inclinazione longitudinale dei vettori velocità in ingresso al canale collettore (a tergo dello stramazzo). La rappresentazione dell'alveo, ritenuta necessaria per riprodurre adeguatamente questo fenomeno (inserendo in input al modello l'intera portata di piena di progetto e non solo la quota parte derivata dallo scolmatore), è finalizzata anche a indagare l'idrodinamica del tratto di Bisagno sistemato, essendo esso stato rappresentato con criterio di similitudine idraulica.

Per migliorare la rappresentatività di simulazione nel tratto d'alveo immediatamente a monte dello sfioro, il modello è stato inoltre prolungato verso monte, distanziando la sezione di alimentazione dal tratto di maggiore interesse (allungamento di circa 1,5 m in scala del modello). Per meglio dissipare l'energia della

corrente in ingresso (alimentazione a stramazzo) e regolarizzare il flusso sulla sezione, i 2/3 di monte di questo tratto sono stati realizzati con un'elevata scabrezza del fondo (mediante inserimento di rete in materiale plastico annegata nel conglomerato di finitura) e delle sponde (con annegamento di ghiaia), realizzando così delle macroscabrezze a scala del modello.

Per la corretta definizione delle condizioni idrauliche al contorno di valle sono state predisposte strutture specifiche di regolazione dei livelli.

- In alveo al Bisagno, a valle dello sfioratore, la traversa di regolazione è rappresentata in similitudine al progetto esecutivo per gli elementi che incidono sull'idrodinamica del tratto a monte: pile di sostegno (realizzate a tutta altezza per semplicità di realizzazione) che supportano paratoie a settore sostenute da bracci e dotate di guarnizioni laterali, con perno centrale che ne consente il movimento in apertura e chiusura a regolazione continua.
- Nella sezione di controllo di valle del tratto di galleria rappresentato nel modello è stato introdotto un dispositivo che consente l'inserimento di un setto di sfioro regolabile, calibrato nel corso delle diverse prove eseguite per riprodurre, nel tratto terminale di sviluppo rettilineo a valle della curva, il livello idrico corrente risultante dai calcoli idraulici di progetto. Tale dispositivo è stato utilizzato anche per analizzare la sensitività del comportamento idrodinamico della galleria alla variazione dei livelli di valle.



Figura 3-1 – Sito di allestimento del modello (sopra); dettaglio del tratto di alveo verso monte (sotto).



Figura 3-2 – Rappresentazione modellistica della galleria di adduzione, dell'alveo e dello sfioratore.



Figura 3-3 – Paratoie a settore della traversa di regolazione e batteria di tubi piezometrici equipaggiati con nonio micrometrico.

Le superfici dei materiali utilizzati per la rappresentazione delle diverse aree del modello sono state trattate in modo da riprodurre condizioni di scabrezza congruenti (in termini di similitudine idraulica) con quelle dei materiali previsti in progetto.

In particolare la galleria, alla quale in progetto è associato un valore di scabrezza (espressa secondo Strickler) di 65 $m^{1/3}/s$, richiede nel modello l'utilizzo di un materiale con scabrezza di circa 120 $m^{1/3}/s$, valore tipico del plexiglas e riprodotto anche nella porzione inferiore di galleria realizzata in resina.

Relativamente all'alveo, alla sistemazione in massi sciolti sono associabili valori di scabrezza di 30-35 $m^{1/3}/s$, cui corrisponde un valore medio di circa 60 $m^{1/3}/s$ nel modello, realizzato grazie ad una vernice all'acqua (chimicamente compatibile con i materiali sottostanti) addizionata con sabbia, realizzando una superficie scabra analoga a quella di un calcestruzzo ammalorato. Il fondo del canale collettore, con rivestimento in blocchi lapidei regolari e cementati, è caratterizzabile con un coefficiente di scabrezza di 40-45 $m^{1/3}/s$, riprodotto nel modello con una verniciatura in grado di realizzare una superficie analoga a

quella di un calcestruzzo ben lisciato (circa 80 $m^{1/3}/s$). Il setto di sfioro e le pareti in calcestruzzo sono stati rivestiti in resina analoga a quella della galleria, così da risultare adeguatamente lisci.

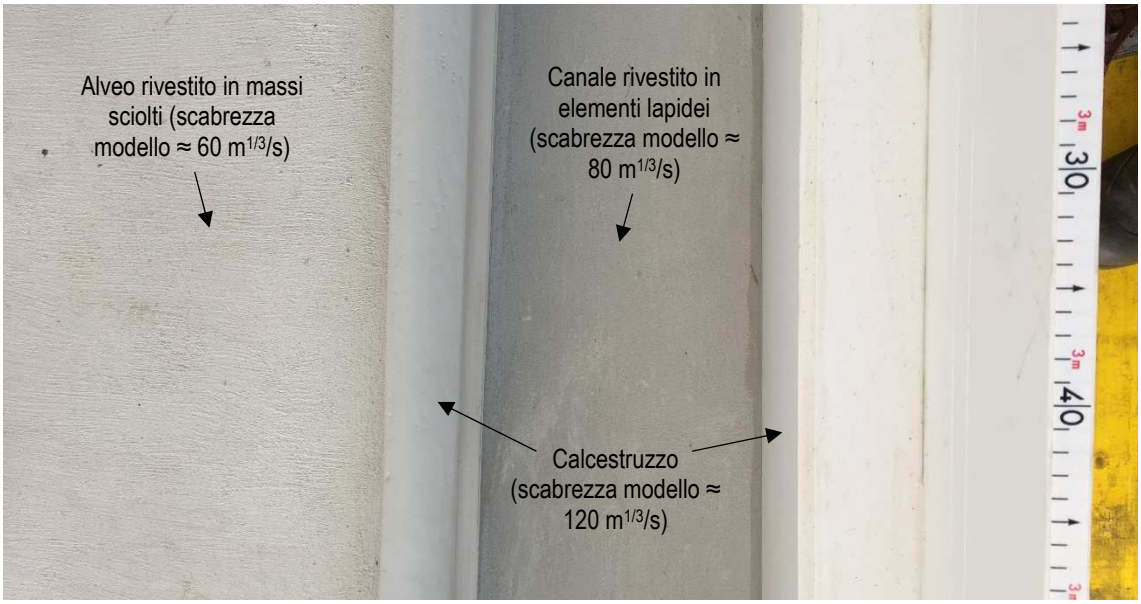


Figura 3-4 – Esempio di diverso trattamento delle superfici per rappresentare nella corretta scala la scabrezza dei diversi materiali e l'effetto di resistenza distribuita al moto dell'acqua.

4 PROVE IDRAULICHE

Il modello fisico è stato oggetto di numerose prove preliminari per calibrare correttamente i dispositivi di assegnazione delle condizioni al contorno e individuare le condizioni di simulazione maggiormente rappresentative.

Lo studio si è concentrato prevalentemente sul comportamento della galleria e della vasca di imbocco posta subito a monte, indagando le modalità di deflusso di diverse portate, sia in condizioni "di progetto" con deflusso ripartito tra l'alveo a valle e lo stramazzo di derivazione, sia con paratoie di sbarramento chiuse e portata immessa interamente in galleria. Con riferimento alla condizione di progetto si sono indagate anche le condizioni idrodinamiche in alveo.

Prove successive sono poi state effettuate al fine di:

1) individuare posizionamenti alternativi delle paratoie dello sbarramento che consentano la ripartizione di progetto delle portate;
2) analizzare gli effetti sui manufatti collettore e di derivazione dei vari set di posizionamento delle paratoie;
3) verificare il possibile effetto della mancata apertura di una delle paratoie.

Di seguito si fornisce una sintesi dei risultati ottenuti per i diversi elementi delle opere in progetto.

4.1 SIM-0: Simulazione di riferimento

Eseguite le prove preliminari e la calibratura dei dispositivi di assegnazione delle condizioni al contorno, la simulazione di riferimento è stata effettuata nelle condizioni maggiormente simili a quelle originariamente simulate mediante modello numerico bidimensionale (rif. elaborato BIS2E-H-SDB04-RE02-1).

Si evidenzia come dalle simulazioni numeriche si fosse raggiunta la corretta ripartizione di progetto (tra alveo e scolmatore) della portata in ingresso per un'apertura delle tre paratoie costante e pari a 2,55 m. Durante le attività di calibrazione del modello fisico sono stati invece osservati scostamenti nel comportamento idrodinamico del tratto fluviale immediatamente a monte delle paratoie; per l'ottenimento della ripartizione di progetto è risultato necessario modificare il grado di apertura. Nella condizione finale simulata le aperture delle tre paratoie sono state assunte pari ai valori (arrotondati ai 5 cm) riportati in Tabella 1.

Paratoia	Apertura [m]
Sinistra	3,00
Centro	3,05
Destra	2,50

Tabella 1 – Apertura delle tre paratoie dello sbarramento nella simulazione assunta come riferimento.

4.1.1 Opere in alveo

Nel complesso l'andamento dei flussi di corrente descritto dal modello fisico risulta congruente con quello ipotizzato a seguito di analisi dei risultati delle simulazioni con modello numerico bidimensionale (Figura 4-1), con particolare riferimento allo spostamento della corrente verso la sponda sinistra a causa della derivazione dovuta allo sfioratore laterale, con successiva nuova espansione verso le paratoie, che comporta uno sbilanciamento in senso trasversale sulla sezione di sbocco (in particolare la paratoia in destra contribuisce meno al deflusso e mostra livelli idrici a monte inferiori, v. Figura 4-2 e Figura 4-3).

Il modello fisico evidenzia come la conseguente formazione in sponda destra di un flusso di ritorno verso monte, che origina una struttura a vortice, sia responsabile di oscillazioni volumetriche in alveo che causano una variabilità (fluttuazione attorno al valor medio) nel valore di portata derivata dallo stramazzo, nonostante la stabilità nelle condizioni di alimentazione del modello, come meglio evidenziato nel seguito.

I livelli idrici riscontrati nel modello fisico nel tratto tra l'estremità di valle dello sfioratore e lo sbarramento mostrano una buona congruenza con gli omologhi del modello numerico 2D; entrambi risultano superiori (di 0,5÷1,0 m) a quelli restituiti dal modello 1D che in questo tratto è meno rappresentativo, in relazione ai significativi flussi trasversali.

I risultati del modello fisico confermano il rispetto dei franchi idraulici richiesti dal Piano di Bacino per l'evento di piena duecentennale. La quota del muro arginale a monte delle paratoie risulta infatti pari a circa 46,5 m s.m. in sinistra e 45,0 m s.m. in destra, a fronte di un livello idrico rilevato nel modello di circa 44,0 m s.m. in sponda sinistra e 43,4 m s.m. in sponda destra.

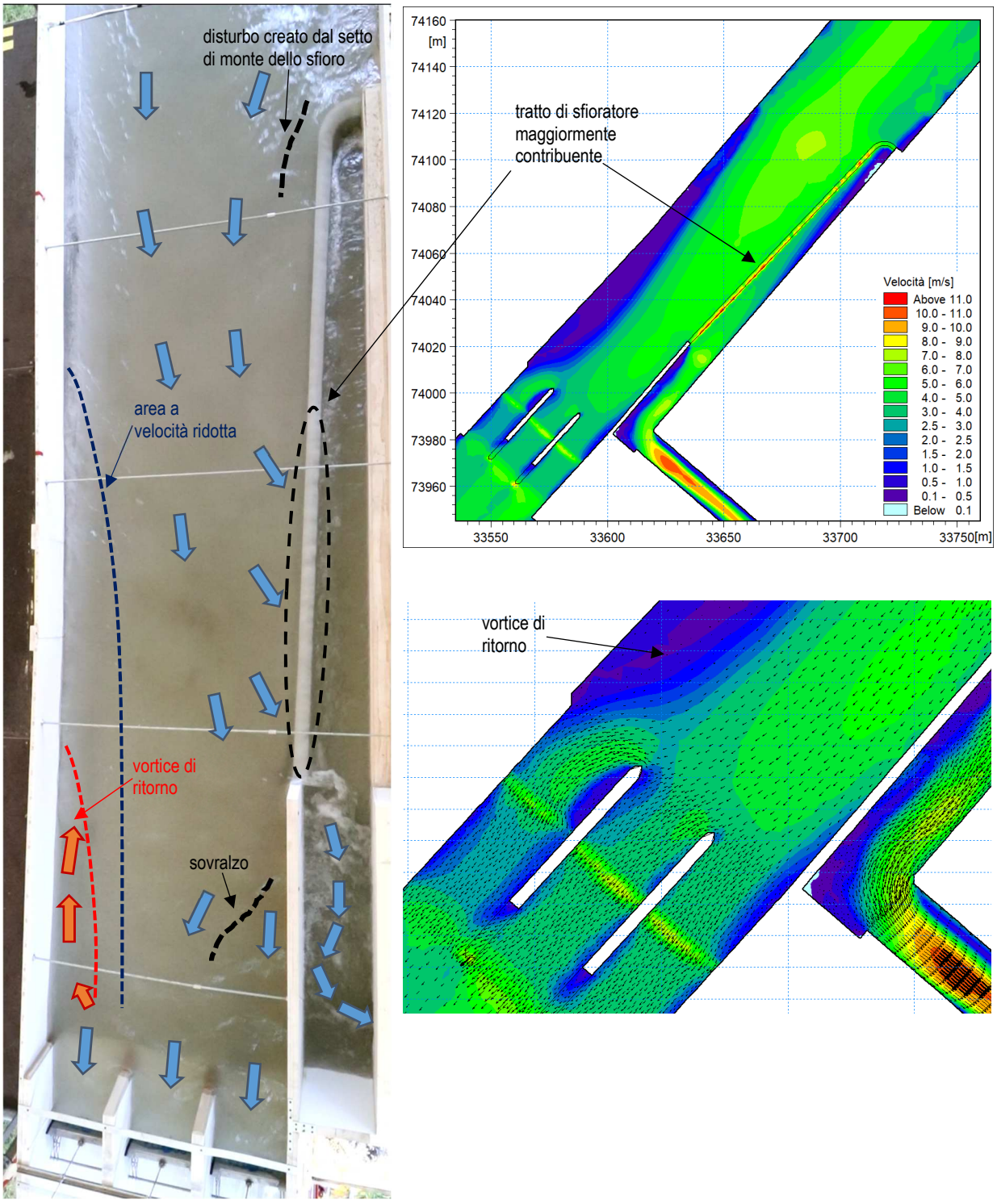


Figura 4-1 – Vista dall'alto del deflusso in alveo della portata di progetto (Q=1050 m³/s) con alimentazione dello scolmatore (Q=450 m³/s) a confronto con i risultati del modello numerico (distribuzione delle velocità).

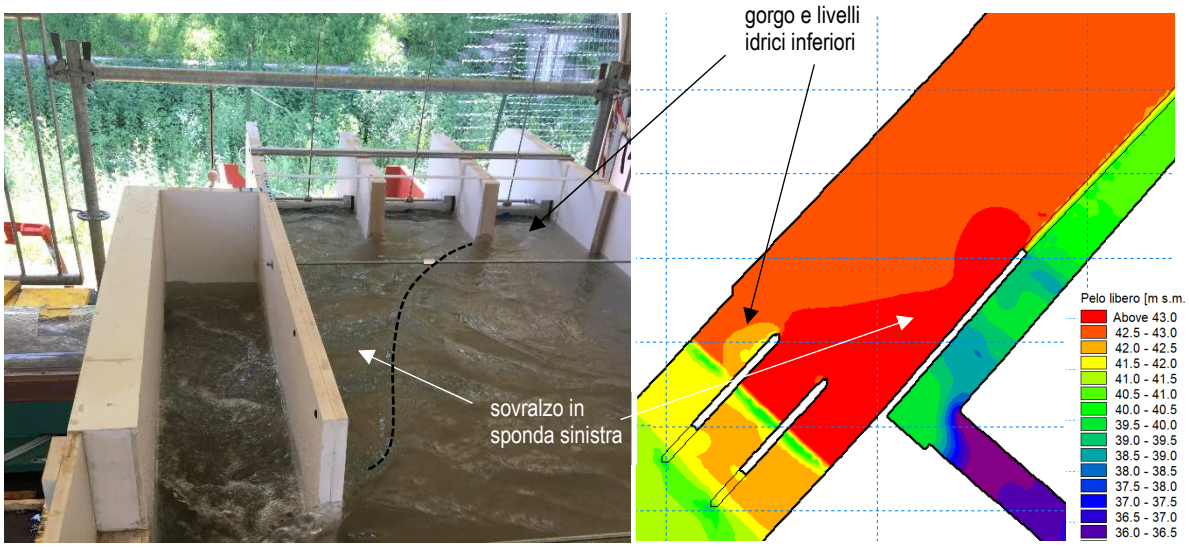


Figura 4-2 – Tratto d'alveo a valle dello sfioro nelle condizioni di progetto (Q=1050 m³/s da monte, Q=450 m³/s nello scolmatore), a confronto con i risultati del modello numerico.



Figura 4-3 – Dettaglio da monte delle paratoie nelle condizioni di progetto (Q=1050 m³/s da monte, Q=450 m³/s nello scolmatore); si notino i livelli inferiori in sponda destra e il gorgo che si forma a monte della paratoia.

In congruenza con quanto restituito dal modello numerico, anche nel modello fisico si riscontra una significativa componente longitudinale della corrente sullo sfioro, legata all'inclinazione planimetrica del setto e alla presenza di un cospicuo flusso verso le paratoie. La porzione centrale e di valle dello sfioratore risultano maggiormente contribuenti, come atteso (Figura 4-1).

La presenza di tale significativa componente longitudinale di velocità lungo lo sfioro è evidenziata nel modello fisico anche dal sovralzo che si genera al termine dello sfioratore, quando essa si annulla per impatto contro il setto terminale (Figura 4-4). Il sovralzo sostanzialmente scompare se si esegue la simulazione con le paratoie di regolazione completamente chiuse, alimentando il modello unicamente con la portata derivata dalla galleria: come si nota in Figura 4-4 (a dx) vi è assenza di sovralzo anche al deflusso di portate superiori a quella di progetto (nel caso riportato in foto vi era infatti il deflusso verso il canale scolmatore di 550 m³/s nel prototipo). In questo caso il flusso di alimentazione dello stramazzo è in direzione pressoché trasversale a quest'ultimo.

Nella condizione di progetto il sovralzo risulta pari a circa 1,2-1,3 m nel prototipo (scala reale; 3,20-3,30 m totali di altezza idrica sulla soglia dello stramazzo), che corrisponde al termine cinetico relativo a una velocità longitudinale di modulo poco inferiore a 5 m/s. Il modulo delle velocità longitudinali misurate in alveo in questa zona è di circa 5,6-5,7 m/s.

Il sovralzo è atteso anche nel funzionamento effettivo del manufatto. Nonostante esso non provochi particolari disturbi al flusso interno alla vasca di dissipazione e non abbia un'estensione tale da poter raggiungere la sponda opposta, si è proceduto alla verifica di una possibile variante costruttiva con stondamento del profilo del setto terminale, che tuttavia non ha prodotto un'apprezzabile mitigazione di tale effetto (lo stondamento è quindi stato rimosso).



Figura 4-4 – Confronto presso il tratto terminale dello sfioro di scenari con deflusso verso la galleria: di 450 m^3/s in condizioni di progetto - portata in alveo di 1050 m^3/s (sx); di circa 550 m^3/s in galleria con portata residua in alveo nulla (dx). Le righe gialle indicano il sovralzo legato all'annullamento del termine cinetico contro il setto di valle.

Nell'alveo, in corrispondenza dello sfioratore e nella porzione più a monte, sono stati misurati per transetti significativi gli andamenti di livello e velocità, mediante utilizzo di punta micrometrica con nonio e di micromulinello elettromeccanico (Figura 4-5).

È stata inoltre eseguita una misura di portata correntometrica con metodologia affine a quanto definito dalla norma ISO 748-2007 per gli alvei fluviali nel tratto di alveo a monte dello sfioro; essa mostra una buona regolarità della distribuzione di livelli e velocità, confermando l'idoneità delle modalità di alimentazione del modello (Figura 4-7).

Sulla base dei dati raccolti in questa sezione è stato calcolato il numero di Reynolds della corrente, sia per il modello che per il prototipo, così da verificare la significatività della rappresentazione. I risultati ottenuti (circa Re=83.000.000 per il prototipo, Re=300.000 per il modello) collocano entrambe le condizioni idrodinamiche in regime turbolento di tubo scabro completamente sviluppato, per cui il comportamento osservato nel modello è da considerarsi rappresentativo del reale.

Le velocità e i livelli misurati in alveo sono in linea con quelli restituiti dal modello numerico 2D (Figura 4-6, Figura 4-8), confermando una buona congruenza tra le diverse rappresentazioni idrodinamiche.



Figura 4-5 – Attività di misura delle velocità e delle altezze d'acqua.

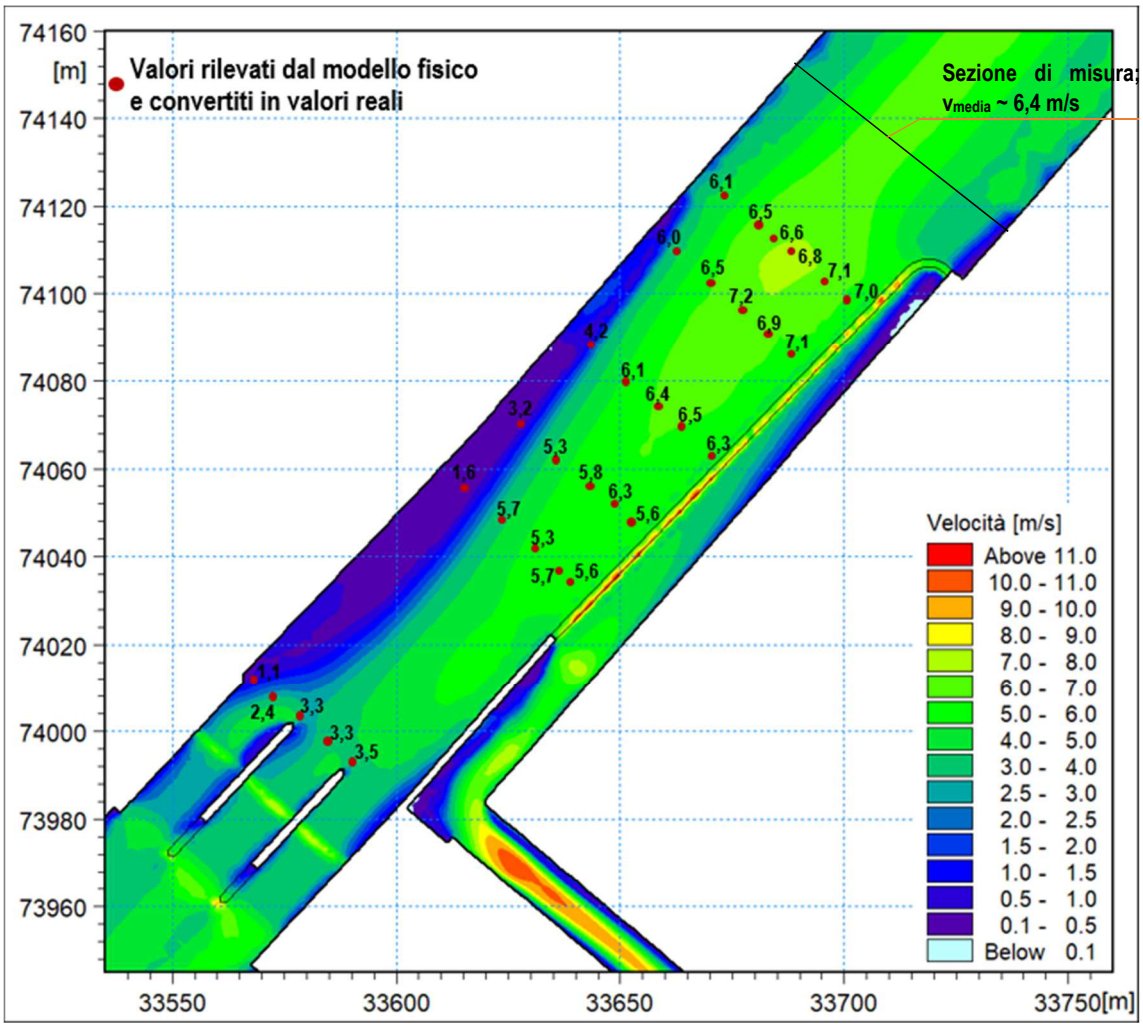


Figura 4-6 – Rilievo di velocità in alveo a confronto con la distribuzione restituita dal modello 2D.

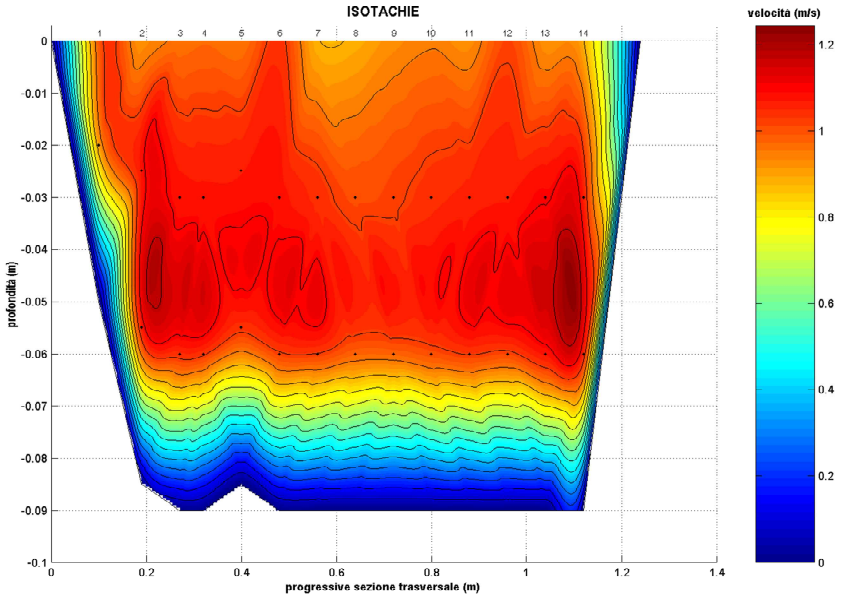


Figura 4-7 – Isotachie lungo la sezione di misura della portata (i valori di velocità rappresentati sono quelli rilevati nel modello fisico).

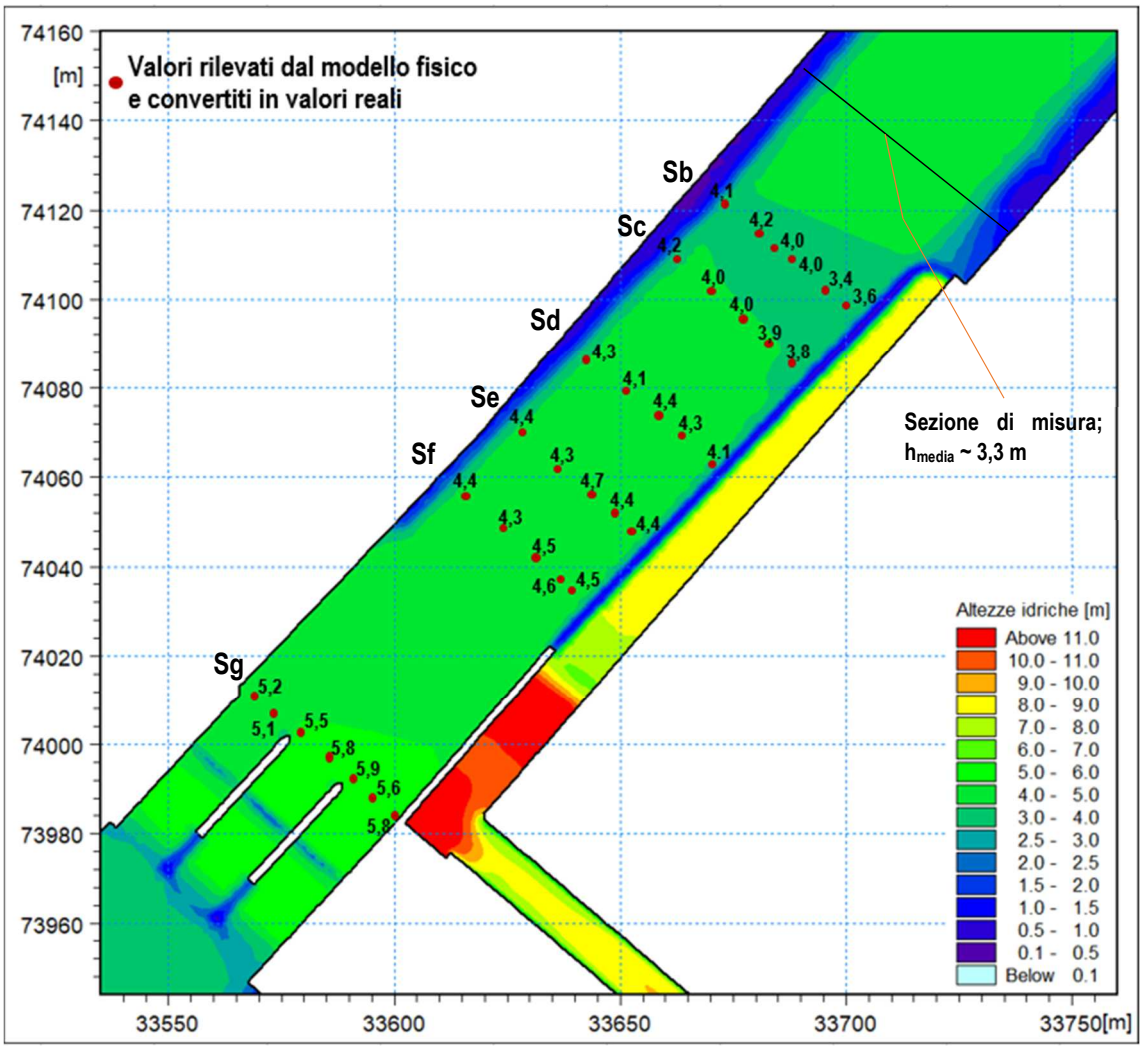


Figura 4-8 – Rilievo di altezze idriche in alveo a confronto con la distribuzione restituita dal modello 2D.

L'andamento dei livelli idrici rilevati in alveo lungo le sezioni trasversali di Figura 4-8 (denominate da "Sb" a "Sg" da monte verso valle) è rappresentato in Figura 4-11 a confronto con il corrispondente andamento rilevato nel modello bidimensionale; in maniera analoga si è proceduto confrontando l'andamento dei livelli lungo i tre profili longitudinali di Figura 4-9. I risultati sono presentati nelle immagini che seguono.

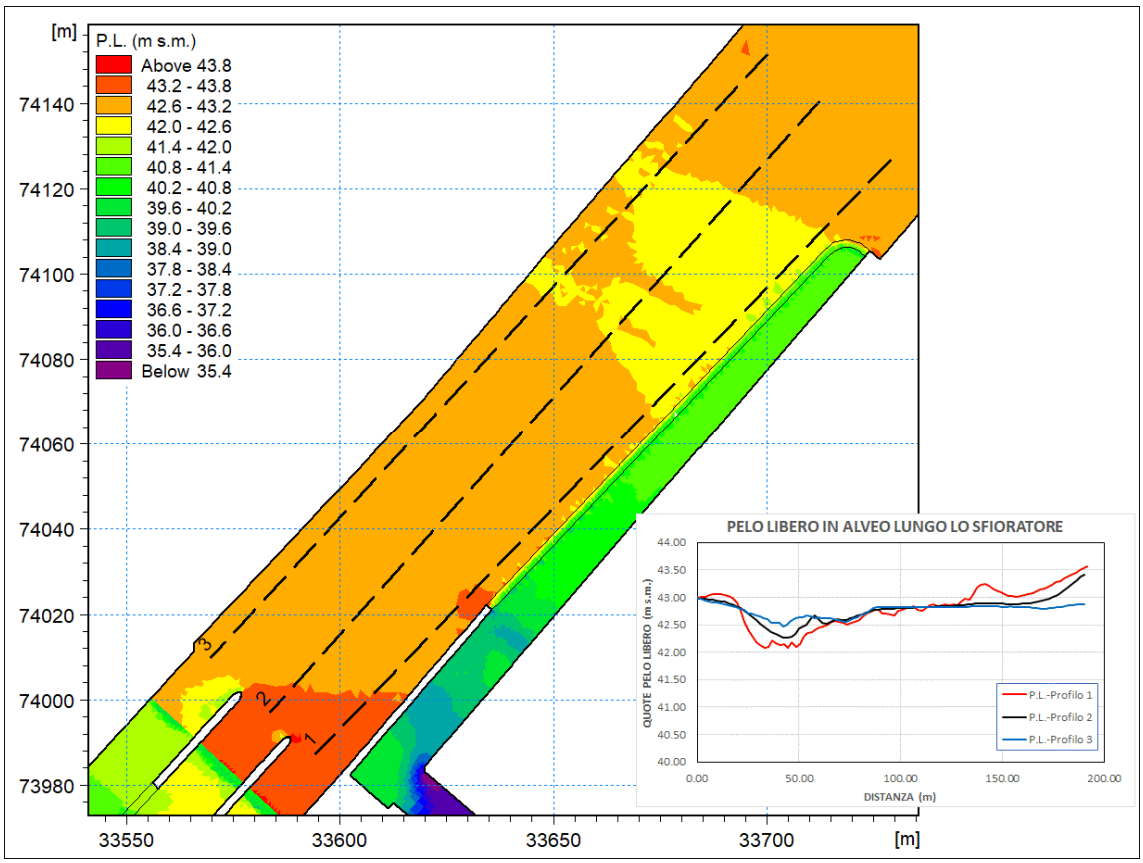


Figura 4-9 – Planimetria con indicazione dei PL estratti dal modello 2D e corrispondenti profili di pelo libero in alveo lungo lo sfioratore.

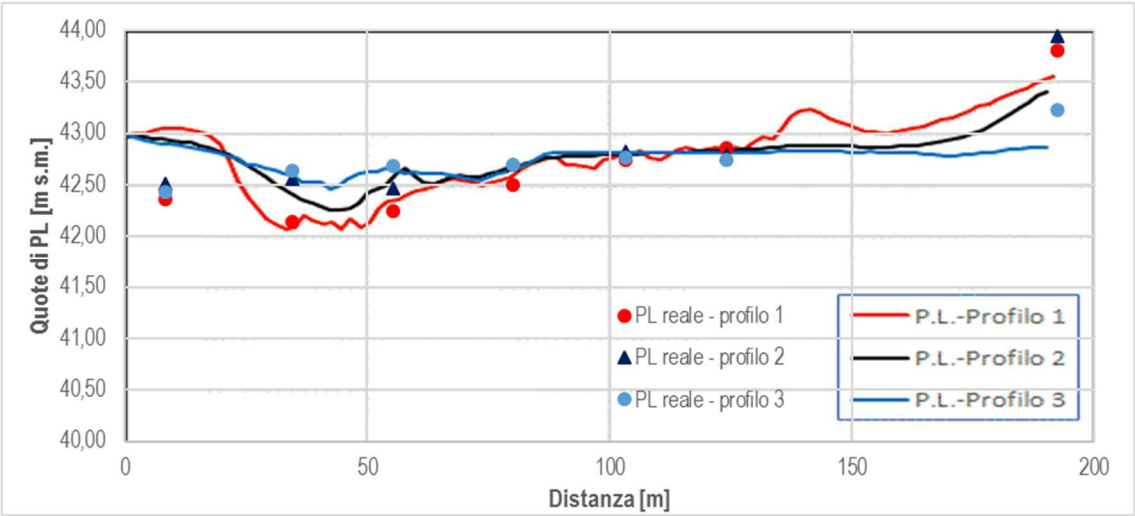


Figura 4-10 – Profili di pelo libero in alveo lungo lo sfioratore estratti dal modello 2D a confronto con i corrispondenti punti sperimentali.

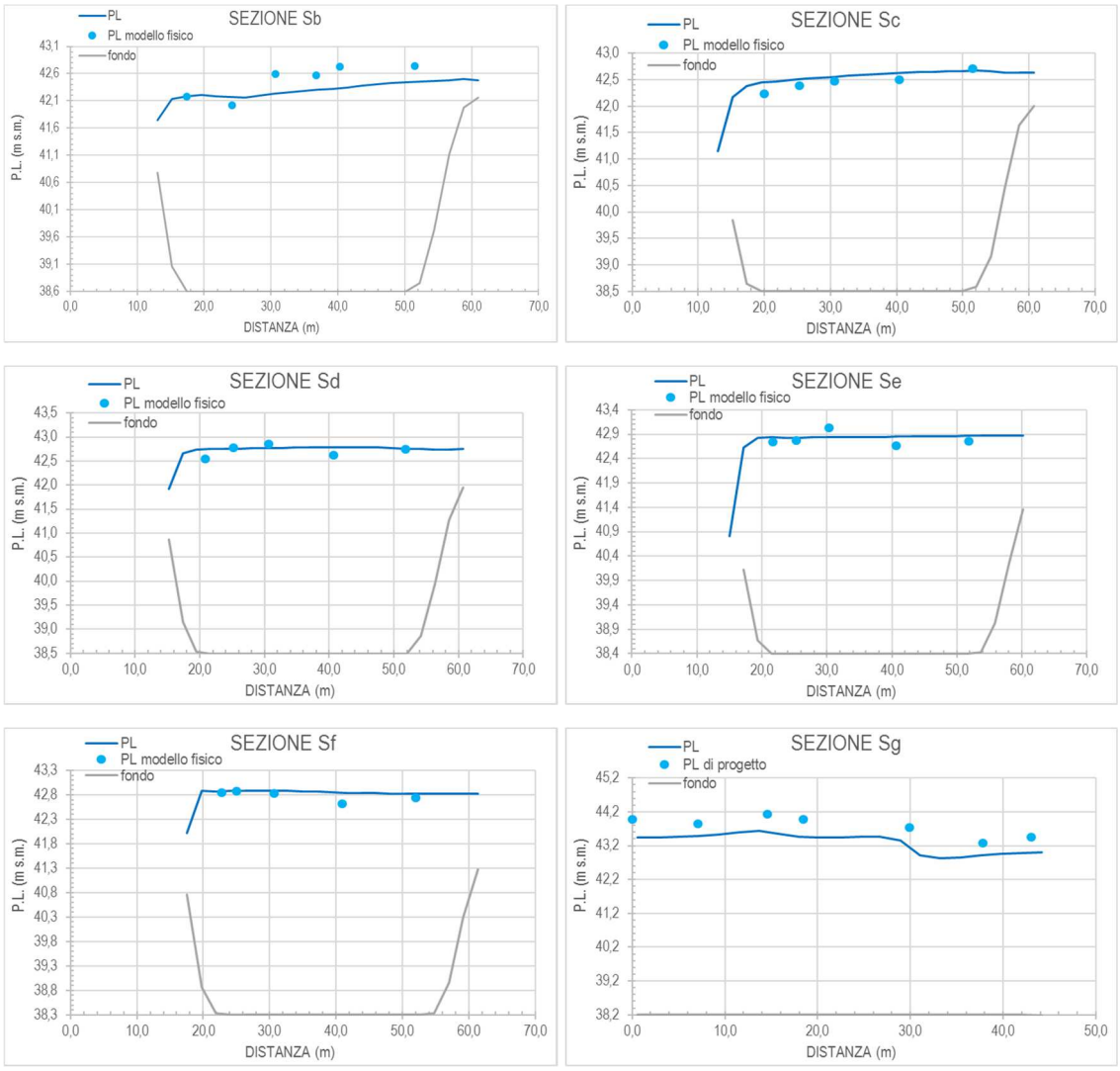


Figura 4-11 – Sezioni trasversali in alveo estratte dal modello 2D a confronto con i valori sperimentali ricavati nei punti di Figura 4-8.

Nel complesso i livelli misurati in alveo sono quindi in generale ben concordi con quelli restituiti dal modello numerico 2D. Si evidenziano i seguenti scostamenti:

- nella sezione più a monte (Sb) i livelli da modello fisico risultano superiori nella porzione destra e centrale della sezione, e concordi in prossimità dello stramazzo di derivazione;
- immediatamente a monte delle paratoie livelli massimi di oscillazione risultano superiori a quelli teorici (sezione Sg, incremento pari a circa 0,50 m), pur, come già descritto in precedenza, nel rispetto dei franchi idraulici di sicurezza;
- a monte dello sfioratore i livelli in alveo risultano inferiori rispetto ai valori restituiti dal modello numerico (di circa 0,5 m, v. Figura 4-10); in questo tratto tuttavia le condizioni di deflusso potrebbero ancora risentire dell'influenza delle condizioni al contorno di monte.

Mediante utilizzo del mulinello correntometrico si è inoltre proceduto rilevando l'estensione delle aree a velocità ridotta e interessate dal vortice di ritorno che si genera in sponda destra a monte delle paratoie (cfr. Figura 4-1). Analogamente a quanto rilevato per i valori puntuali, si osserva nel complesso una buona congruenza con i risultati del modello bidimensionale.

Come già anticipato, la presenza di una struttura a vortice in alveo è responsabile di oscillazioni delle portate derivate dallo scolmatore e rilasciate a valle. L'andamento delle portate nel prototipo durante la simulazione di progetto, determinato a partire dai dati registrati dalle sonde installate presso i misuratori a stramazzo del modello fisico, è rappresentato in Figura 4-12. Si riscontrano oscillazioni puntuali massime della portata pari a ±10% del valor medio, ma nel complesso il valore di portata immesso in galleria presenta un coefficiente di variazione (σ = deviazione standard / media) pari a circa il 3%.

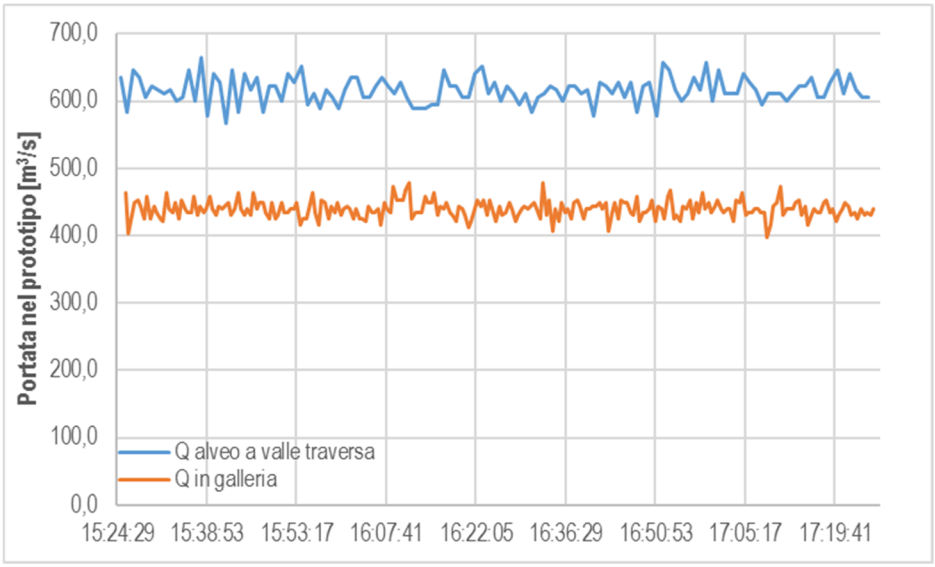


Figura 4-12 – Andamento delle portate del prototipo nella condizione di progetto in alveo a valle scolmatore e in galleria ricavato a partire dai dati registrati dalle sonde idrometriche installate.

È stata infine condotta una prova con paratoie completamente aperte e portata crescente, per verificare l'entità del massimo deflusso in alveo senza attivazione dello sfioro. La portata di sfioro incipiente risulta pari a circa 310 m³/s (Figura 4-13; portata misurata nel modello pari a 25,6 l/s), corrispondente a un colmo di piena con tempo di ritorno di poco inferiore ai 10 anni.



Figura 4-13 – Condizioni di sfioro incipiente con paratoie completamente aperte.

Come già anticipato, nelle condizioni di progetto (portata in alveo di 1050 m³/s), la corretta ripartizione delle portate tra scolmatore (450 m³/s) e alveo a valle (600 m³/s) è stata verificata con aperture delle paratoie a settore pari a circa 3,0 m per le luci sinistra e centrale, e circa 2,5 m per quella destra.

Si evidenzia come tale condizione non sia univoca: il medesimo effetto può essere ottenuto con differenti combinazioni di apertura in grado di realizzare a monte il livello idrico idoneo a derivare la portata di progetto. In questa configurazione di apertura le paratoie iniziano a interferire con la corrente pressoché in concomitanza con la condizione di sfioro incipiente in assenza di rigurgito (300 m^3/s).

In Figura 4-14 si rappresenta la distribuzione, al crescere della portata in ingresso, delle portate tra l'alveo e lo scolmatore con lo schema di aperture adottato. Si osserva come inizialmente la portata in ingresso defluisca interamente a valle, mentre per portate maggiori, con l'attivazione dell'effetto di rigurgito da parte delle paratoie, si incrementi molto la quota parte derivata dallo scolmatore, a fronte di uno "spianamento" dei valori rilasciati in alveo a valle dello sbarramento.

Nel capitolo 4.3 si riportano i risultati di ulteriori prove condotte sul modello fisico per l'analisi di possibili configurazioni alternative di apertura.

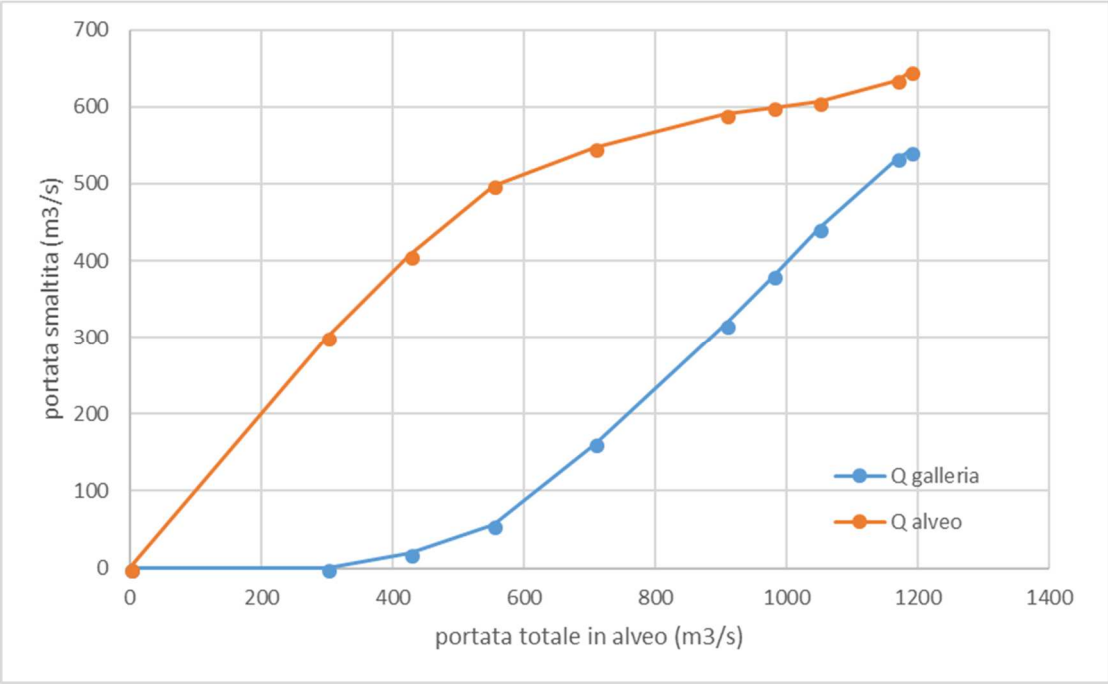


Figura 4-14 – Andamento delle portate derivate e rilasciate a valle in funzione della portata in ingresso, con la condizione di apertura imposta nella SIM-0.

4.1.2 *Canale collettore, camera di dissipazione, manufatto di imbocco*

Il **canale collettore** nelle condizioni di progetto presenta livelli idrici che non rigurgitano mai lo sfioro, risultando anzi pressoché sempre compresi nel tratto verticale del muro, al di sotto del profilo Creager (ovvero un franco minimo di circa 1,2 m rispetto al ciglio sfiorante).

All'interno del canale è stato tracciato un profilo dei livelli idrici al deflusso della portata di progetto, rilevando all'incirca i valori massimi dovuti alle oscillazioni periodiche; sono state inoltre misurate le velocità di flusso medie in centro canale.

Complessivamente i risultati ottenuti sono in linea con quanto ottenuto in progetto dalla modellistica numerica. Poiché il tratto di monte dello stramazzo contribuisce di meno alla derivazione, come già evidenziato, nella porzione di monte del canale il livello idrico risulta inferiore a quello considerato per i dimensionamenti di progetto (cautelativamente desunti per questo manufatto dal modello 1D).

Nella condizione di progetto, nel punto più sfavorito il franco residuo rispetto al ciglio di sfioro risulta prossimo a 0,85 m, garantendo quindi un funzionamento libero dello stramazzo (Figura 4-15).

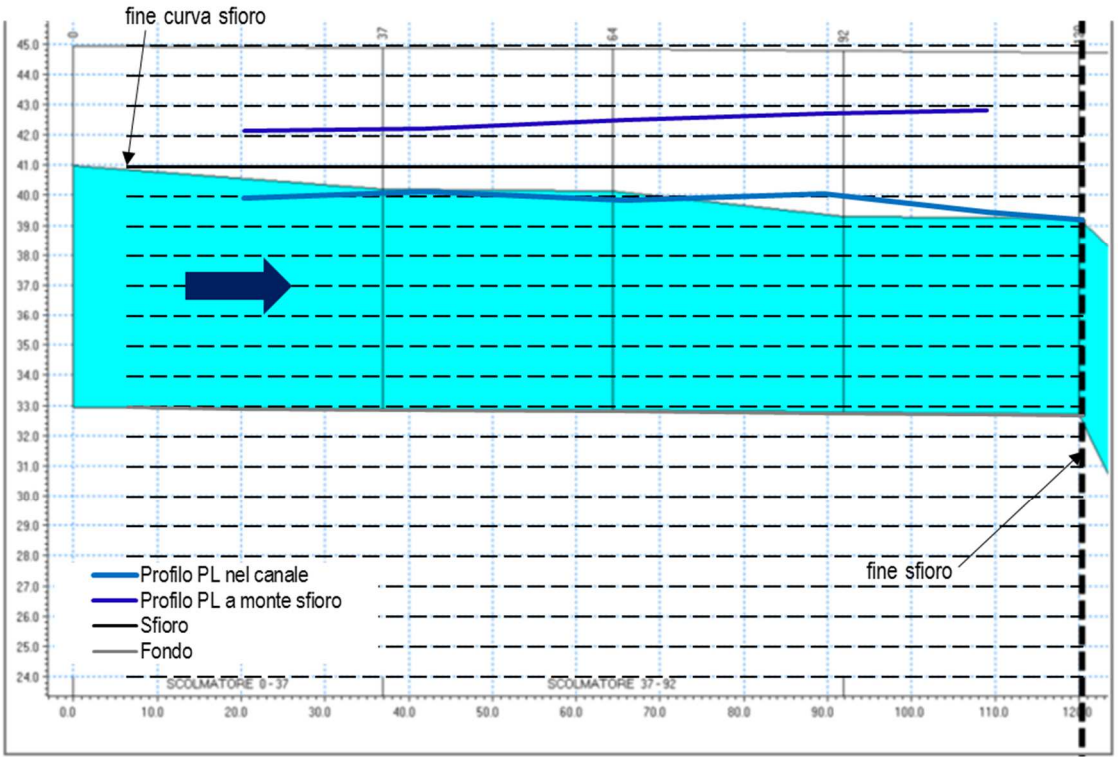


Figura 4-15 – Condizioni di deflusso nel canale collettore in corrispondenza della portata di progetto desunte dal modello 1D a confronto con quelle ricavate nel modello fisico: linea azzurra: livelli rilevati in centro canale; linea blu: livelli rilevati in alveo in prossimità dello sfioro (battente idraulico).

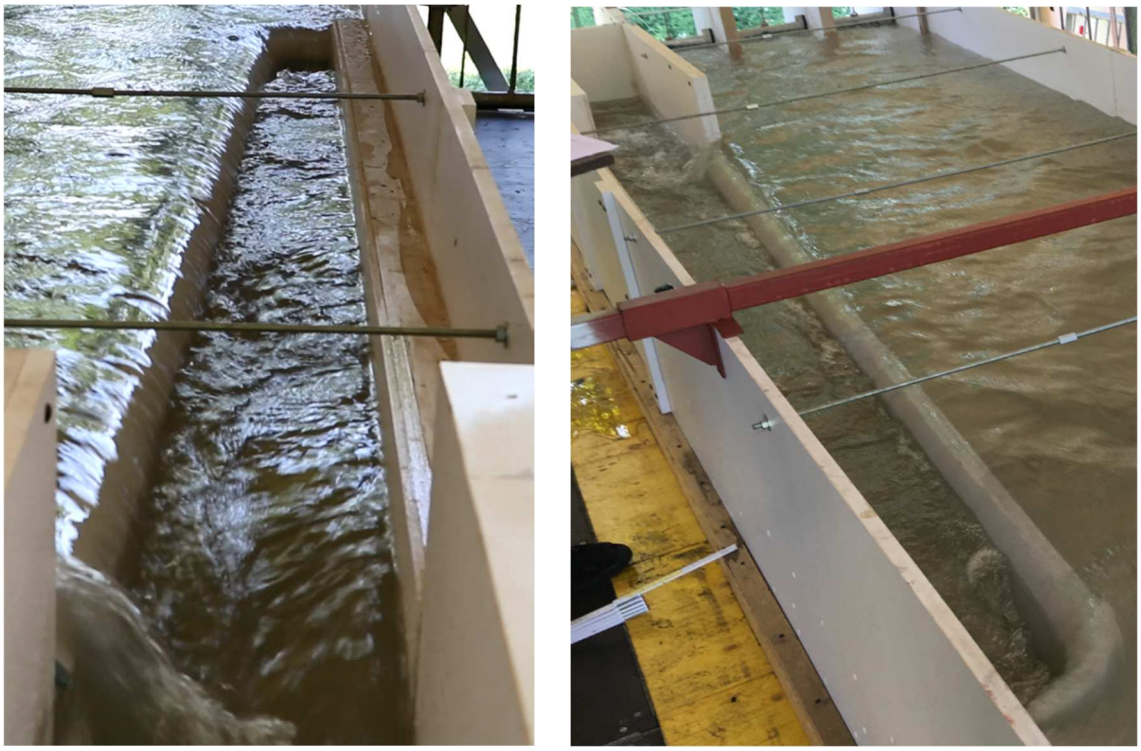


Figura 4-16 – Condizioni di deflusso nel canale collettore in corrispondenza della portata di progetto.

La **camera di dissipazione** mostra nel complesso un'adeguata funzionalità di rallentamento e regolarizzazione della corrente in ingresso, con buona stabilità trasversale e longitudinale dei livelli idrici, a meno di contenute oscillazioni legate alla distribuzione idrodinamica descritta in precedenza (vortice di ritorno dovuto all'espansione della corrente verso le paratoie, che produce oscillazioni periodiche della portata sfiorata).

Per la portata di progetto lo scivolo di raccordo con il canale collettore risulta rigurgitato, come atteso, dai livelli che si instaurano a valle a imbocco galleria. Il salto idraulico tuttavia non risulta mai annegato ed è sempre visibile una disconnessione idraulica (Figura 4-18). Per una portata inferiore a quella di progetto (300 m^3/s) il livello idrico nel camerone è prossimo alla quota di testa dello scivolo di raccordo (condizione di incipiente rigurgito del canale collettore).

Per la portata di progetto i livelli idrici nel camerone variano tra 38,8-39,0 m s.m. a valle scivolo e 40,20-40,30 m s.m. contro la parete di valle (valori assolutamente congruenti con quelli previsti dalla modellistica numerica, che mostrano un franco idraulico di circa 3,5 m rispetto all'intradosso della soletta di copertura di 43,75 m s.m.).

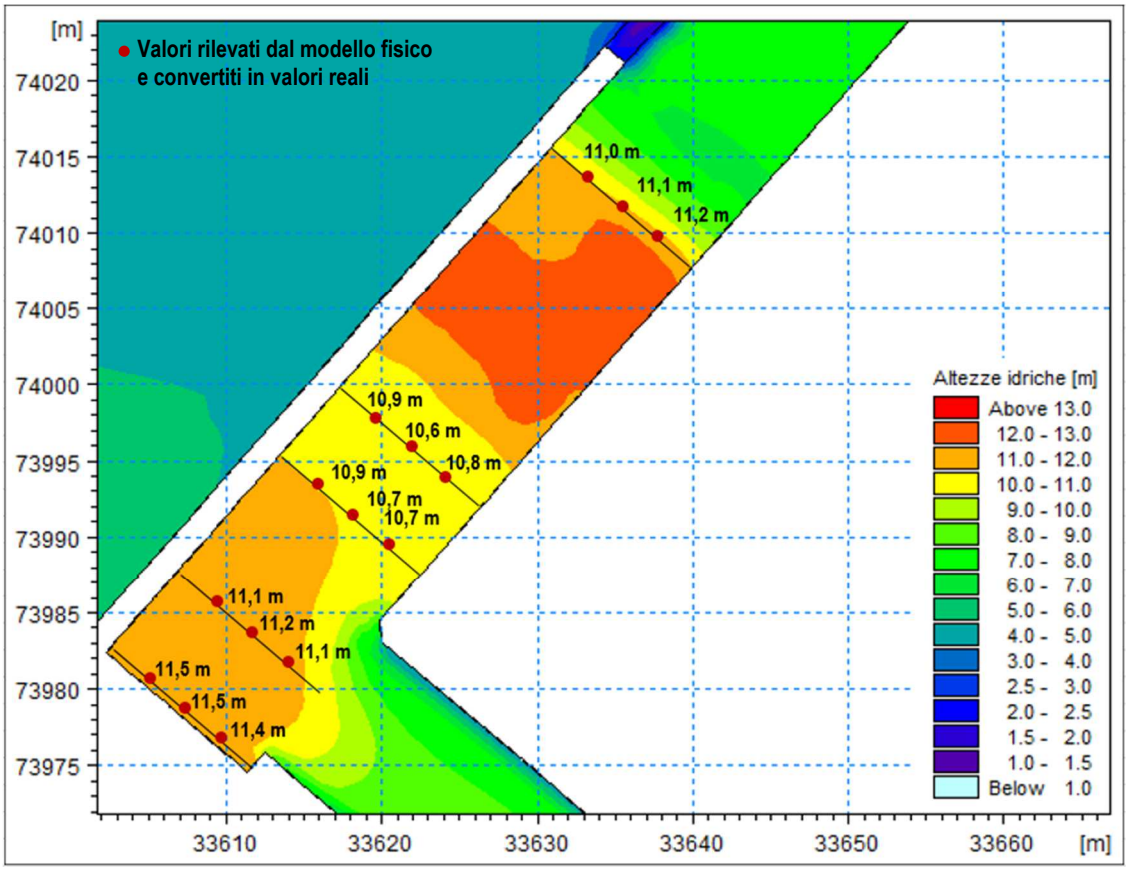


Figura 4-17 – Rilievo su modello fisico di altezze idriche nella camera di dissipazione a confronto con la distribuzione restituita dal modello 2D (portata di progetto).

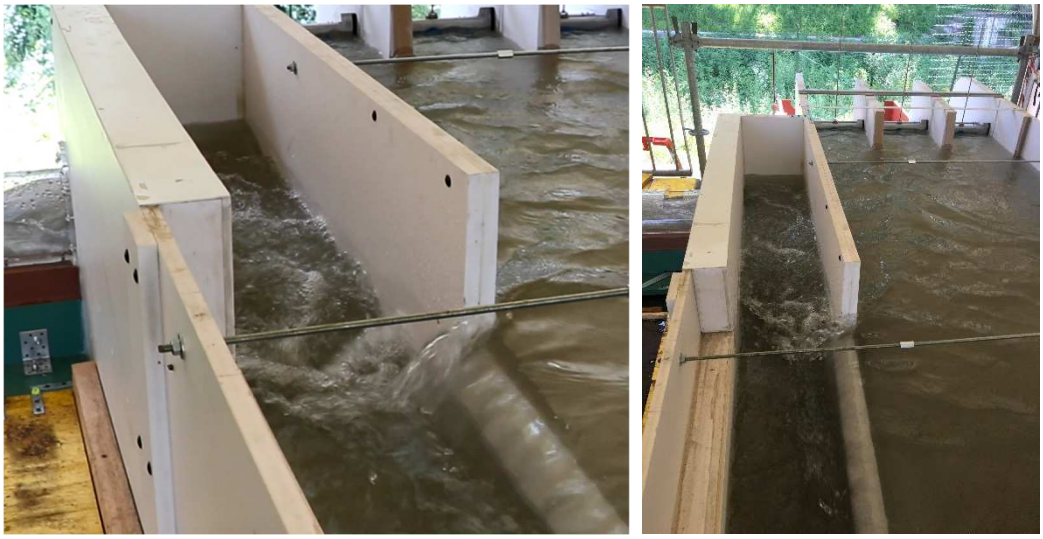


Figura 4-18 – Dettaglio della camera di dissipazione per la portata di progetto.

L'**imbocco** della galleria avviene con sezione quasi piena, a causa dei livelli che si instaurano nel camerone per generare il carico idraulico necessario per la corrente a imboccare la galleria stessa. Non si ha tuttavia la formazione di un moto in pressione.

A tale riguardo sono state condotte prove con inserimento di ostruzioni parziali entro la galleria per innalzare il livello idrico a valle dell'imbocco, senza riuscire a ottenere condizioni in cui venisse meno lo svincolo idraulico dovuto al passaggio in condizioni di corrente critica all'incile della galleria (a meno di non generare un moto completamente in pressione in galleria, occludendo la sezione di sbocco per oltre il 50%). Il funzionamento o meno in pressione dell'imbocco appare pertanto dipendente prevalentemente dall'entità della portata derivata dallo scolmatore.



Figura 4-19 – Portata di progetto; vista dell'imbocco galleria da monte (sx) e da valle (dx).

Le immagini che seguono riportano i confronti tra i livelli desunti dal modello numerico bidimensionale di progetto e quelli ricavati dal modello fisico nelle sezioni e nei profili rappresentati in Figura 4-20.

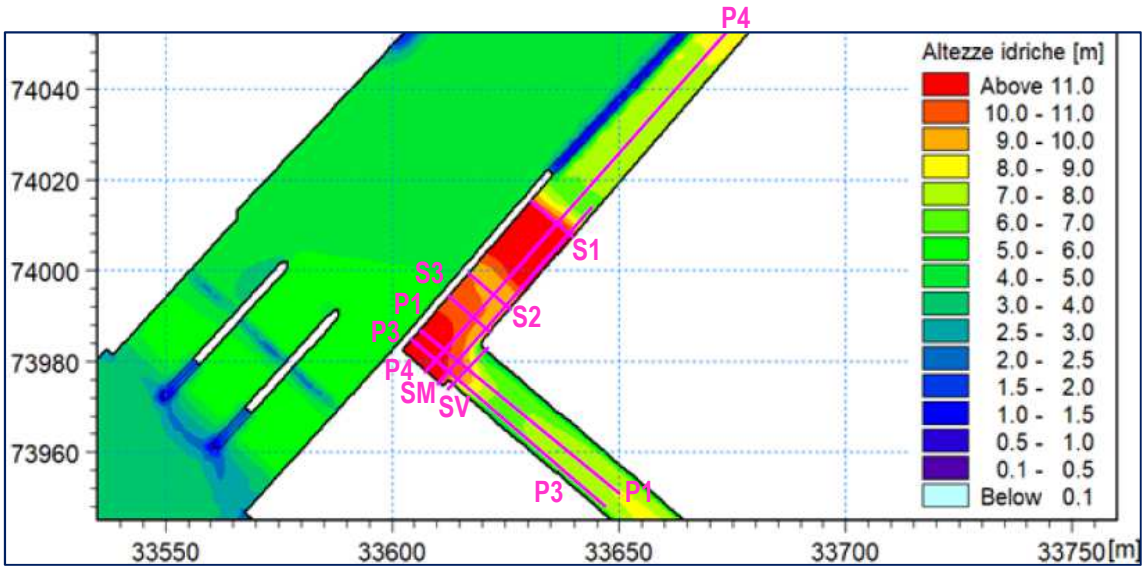


Figura 4-20 – Profili e sezioni di confronto tra i valori teorici e quelli sperimentali all'interno della camera di dissipazione.

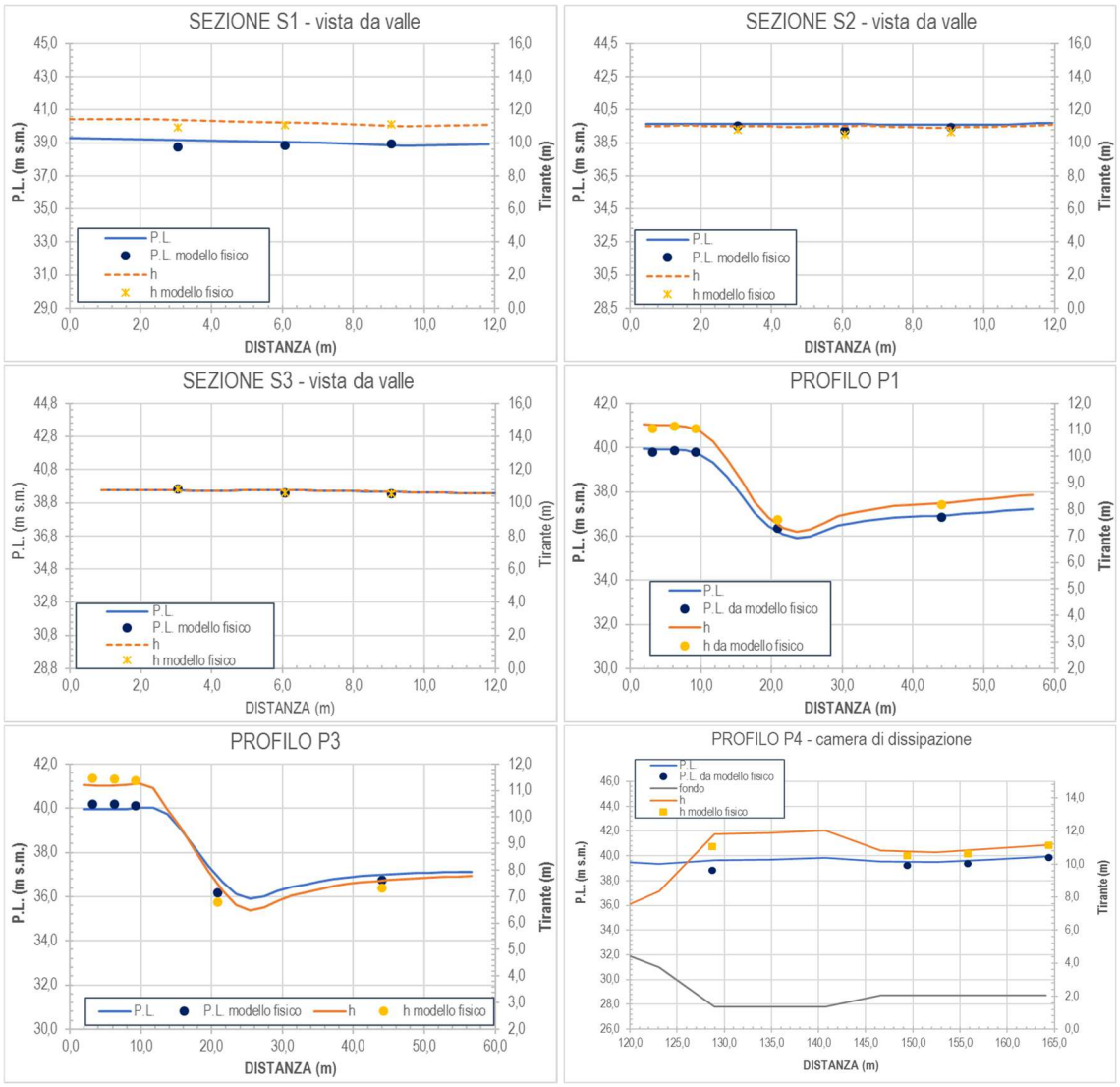


Figura 4-21 – Confronto tra i valori teorici e quelli sperimentali all'interno della camera di dissipazione.

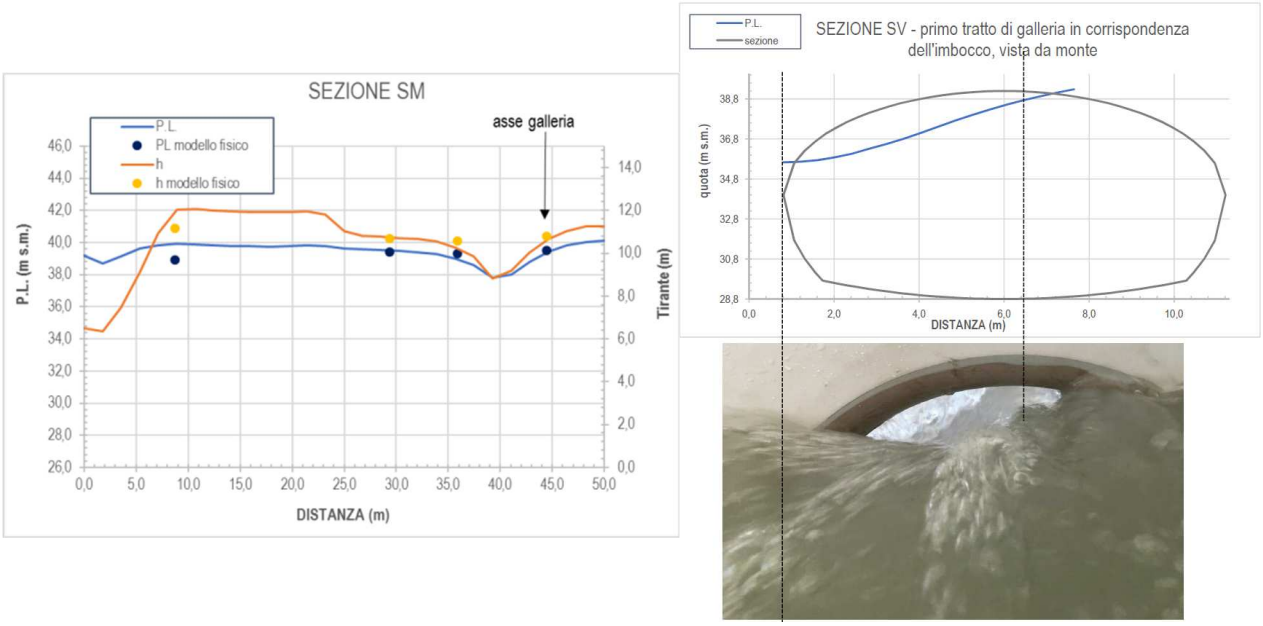


Figura 4-22 – Confronto tra i valori teorici e quelli sperimentali in corrispondenza dell'imbocco della galleria.

La portata derivata dallo scolmatore è stata quindi gradualmente incrementata nel modello fisico per trovare la condizione limite che crea condizioni di alimentazione in pressione della galleria (annegamento completo della luce di imbocco). Tale condizione (Figura 4-23) si ha a partire da una portata derivata di circa 550 m^3/s, situazione in cui lo sfioratore mantiene ancora un comportamento di deflusso libero.

Si osserva a tal proposito come in assenza di portata veicolata nell'alveo a valle mediante le paratoie (chiudendo cioè lo sbarramento e inviando l'intera portata a derivazione), la condizione di rigurgito dello sfioro si raggiunga rapidamente al superare dei 550 m^3/s derivati, in ragione del maggiore effetto di rigurgito in alveo. In condizioni affini a quelle di progetto, con ripartizione dei flussi tra alveo e scolmatore, permangono invece condizioni di deflusso libero per un range più ampio di portate.

Si tratta quindi di valori sensibilmente superiori alla portata di progetto (circa +22%), oltre ai quali lo scolmatore si mantiene ancora funzionale, ma si riduce l'incremento di portata smaltita rispetto alla crescita dei livelli in alveo.

Si evidenzia come le simulazioni di rischio residuale condotte nella relazione idraulica di progetto con i modelli numerici abbiano verificato che in corrispondenza dell'evento di piena cinquecentennale lo sfioratore risulterebbe in grado di derivare (con funzionamento rigurgitato) circa 660 m^3/s, defluenti in pressione nella galleria fino al mare.

Al fine di verificare il comportamento del sistema di derivazione in tali condizioni, nel corso delle prove idrauliche eseguite sul modello fisico si è proceduto riducendo l'apertura delle luci di sbarramento sino a consentire la derivazione di tale portata (SIM-D), in quanto il limite superiore di portata totale con cui risultava possibile l'alimentazione del modello è poco superiore al valore di progetto (circa 1150 m^3/s).

I risultati sono presentati nel capitolo 4.4.2 e confermano come i 660 m^3/s vengano derivati con sfioro rigurgitato e defluiscano in pressione nel tratto di galleria indagato. Si confermano pertanto le considerazioni effettuate in progetto.

Sulla base delle prove eseguite è stata definita una scala di deflusso (curva di correlazione altezza idrica - portata) per la sezione S2 entro il tratto coperto (Figura 4-24), poco a valle dello scivolo e della vasca di dissipazione (v. Figura 4-20).



Figura 4-23 – Condizioni di instaurazione del deflusso in pressione all'imbocco della galleria (sopra a sx: monte imbocco e sopra a dx: valle imbocco); corrispondente condizione di incipiente rigurgito dello sfioratore con ancora comportamento libero (sotto) per portate di circa 550 m³/s.

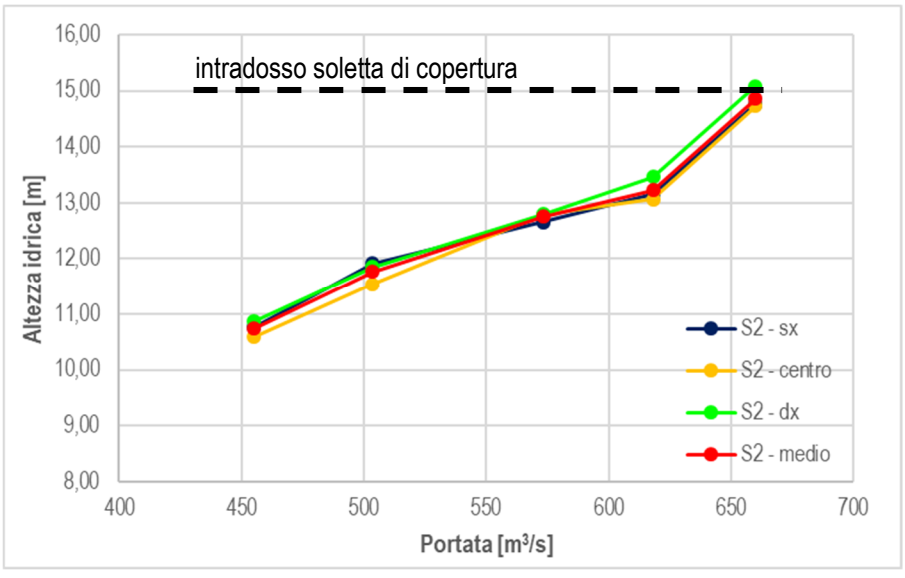


Figura 4-24 – Scala di deflusso nel canale collettore nel tratto coperto (sezione S2).

Si osserva dalla Figura 4-24 il cambio di convessità della scala di deflusso, corrispondente all'avvio di condizioni di moto in pressione della luce di imbocco. Al superamento del punto di flesso a circa 570 m^3/s, i livelli crescono sempre più rapidamente all'aumentare della portata in ingresso, fino a lambire la soletta di copertura per portate di circa 660 m^3/s (+47% della portata di progetto). In queste condizioni l'intero tratto funziona in pressione, e lo stramazzo di alimentazione è rigurgitato.

4.1.3 Galleria di adduzione

L'imbocco della galleria da parte della portata defluente, come già detto, avviene realizzando una stabile disconnessione idraulica, verificata in tutte le condizioni indagate, per le quali si produce a valle un passaggio in corrente critica con presenza di velocità elevate (per la portata di progetto, valori massimi misurati di circa 9 m/s, valori medi di circa 7 m/s).

Poiché la galleria di adduzione è dimensionata per essere caratterizzata da un deflusso in corrente lenta, si genera un fenomeno di risalto, la cui estensione e caratteristiche risultano fortemente dipendenti dalle condizioni idrauliche di valle.

Considerando la condizione di riferimento da progetto, ovvero la presenza a valle di un livello poco superiore a quello di moto uniforme, (simulato circa 7,3 m), si osserva la presenza di un risalto di tipo ondulato ben sviluppato e stabile, ovvero non influenzato significativamente da effetti di disturbo della corrente.

Si osserva in particolare la presenza di una prima onda di maggiore ampiezza tra i 10 e i 20 m a valle dell'imbocco, e di una successiva smorzata che va a raccordarsi con il livello corrente della galleria.

La massima ampiezza raggiunta da queste perturbazioni è pari all'80% dell'altezza della galleria. Il livello si attesta poi rapidamente sul valore di progetto (riempimento inferiore al 75%); il numero di Froude allo sbocco è pari a circa 0,84.

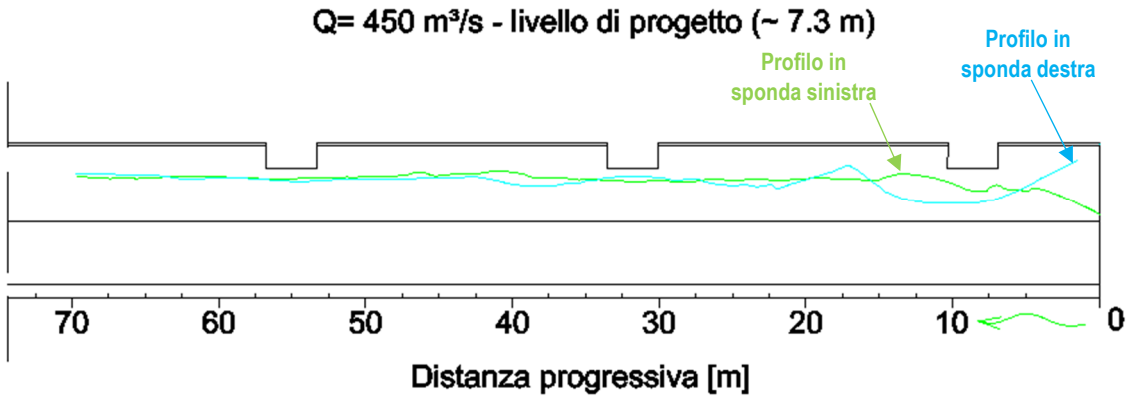


Figura 4-25 – Portata di progetto: condizione stabile con livello di valle di progetto rilevata nel modello fisico nel tratto interessato dai livelli massimi (tratto rettilineo di monte).



Figura 4-26 – Risalto all'imbocco della galleria (con la portata di progetto) e sua propagazione verso valle.

La perturbazione dovuta alla modalità di imbocco della galleria (rotazione a 90° dei filetti fluidi) si propaga verso valle come onde stazionarie trasversali al flusso, visibili sulla superficie idrica. In termini di differenza di livello tra sponda destra e sinistra, i valori massimi si osservano in corrispondenza della quinta luce a partire da monte (centro curva, circa 150 m a valle imbocco), ove all'effetto di tali perturbazioni di livello si somma quello del sopralzo in curva.

L'andamento del pelo libero nella sezione trasversale in corrispondenza della luce 5 è rappresentato in Figura 4-28; la massima differenza di livello è pari a 0,44 m, congruente con quanto desunto dal modello bidimensionale realizzato in sede di progettazione esecutiva (era stato infatti valutato un innalzamento complessivo di circa 0,40 m del livello idrico, cfr. Relazione idraulica). In corrispondenza della luce successiva, la differenza di livello scende a 0,40 m per poi appianarsi allo sbocco della tubazione.

Si tratta pertanto di valori assoluti che non incidono significativamente sul corretto funzionamento idraulico della galleria, rapportati all'altezza in chiave di 10,4 m e al franco idraulico medio di oltre 2,5 m.

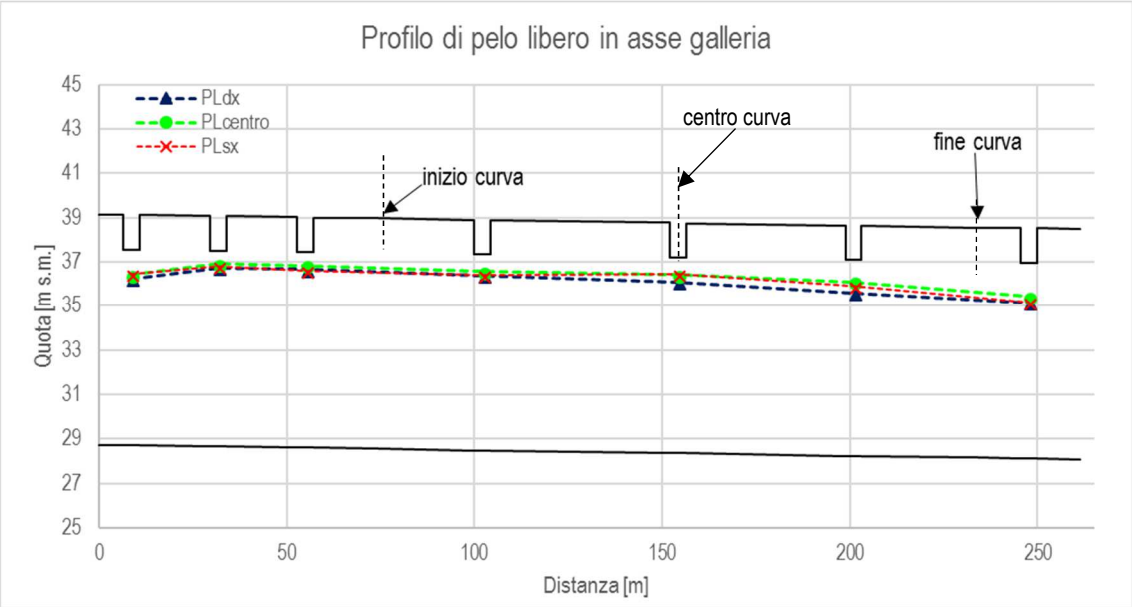


Figura 4-27 – Portata di progetto: condizione stabile con livello di valle di progetto rilevata nel modello fisico lungo l'intero sviluppo longitudinale della galleria.



Figura 4-28 – Portata di progetto: sezione trasversale in asse alla luce di centro curva (5), ove si ha il massimo dislivello tra il pelo libero in sponda destra e in sponda sinistra.

La situazione descritta è quella di progetto, in cui la condizione al contorno di valle, assegnata allo sbocco della galleria, è pari al livello risultante dall'analisi condotta con modello numerico (altezze d'acqua un poco superiori rispetto al moto uniforme, considerando l'effetto di rigurgito atteso da parte delle condizioni idrodinamiche più cautelative nel camerone di montaggio della fresa).

L'imposizione di tale livello di valle in posizione discosta dall'imbocco galleria ne limita l'incidenza sull'idrodinamica del primo tratto di monte, consentendo una rappresentazione accurata di quest'ultima. Osservando i livelli che si generano in galleria si evince come il massimo livello idrico non superi, nel tratto di galleria rappresentato, un valore di circa l'80% dell'altezza in chiave, attestandosi come livello medio nella sezione, a meno del primissimo tratto di monte, su valori congruenti con quelli di progetto (riempimenti inferiori al 75%).

Nelle prove preliminari, comunque, è stata condotta un'analisi di sensitività al livello di valle imposto, ipotizzando una condizione di maggior rigurgito rispetto a quella di progetto (+40 cm, circa 7,7 m di livello di valle rispetto al fondo scorrevole: Figura 4-29). Si precisa come tale condizione, stanti le ipotesi già cautelative nella definizione del livello idrico massimo nel camerone di montaggio fresa, sia ipotizzabile solo considerando una parziale ostruzione della galleria (poco probabile in considerazione delle rilevanti velocità della corrente).



Figura 4-29 – Risalto al deflusso della portata di progetto con $y_{valle}>y_{uniforme}$ e sua propagazione verso valle.

L'analisi ha evidenziato che, con livelli idrici allo sbocco corrispondenti a circa il 74% di riempimento, il valore di riempimento massimo a monte (oscillazione massima) si mantiene di poco inferiore all'85%. In termini di velocità, i valori massimi in galleria all'imbocco sono risultati pari a 8 m/s, per un valor medio che si attesta attorno a 7 m/s.

In conclusione, nelle condizioni ordinarie di funzionamento dell'opera, per la portata di riferimento duecentennale, occorre attendersi nei primi 100 m circa di galleria la presenza di fenomeni di dissipazione dell'energia di imbocco (risalto ondulato), con sovralzo locale dei livelli fino a un grado di riempimento massimo dell'80-85%, e successivo attestamento sui livelli di deflusso di corrente lenta già individuati mediante applicazione della modellistica numerica di progetto.

L'analisi effettuata con una portata inferiore a quella di progetto (Q = 300 m^3/s) ha mostrato in galleria lo sviluppo di un più modesto effetto di risalto con oscillazioni di piccola ampiezza. Le altezze idriche

massime arrivano a circa il 60% dell'altezza della sezione, le velocità medie sono pari a circa 5 m/s, il numero di Froude allo sbocco è pari a circa 0,82 (Figura 4-30).

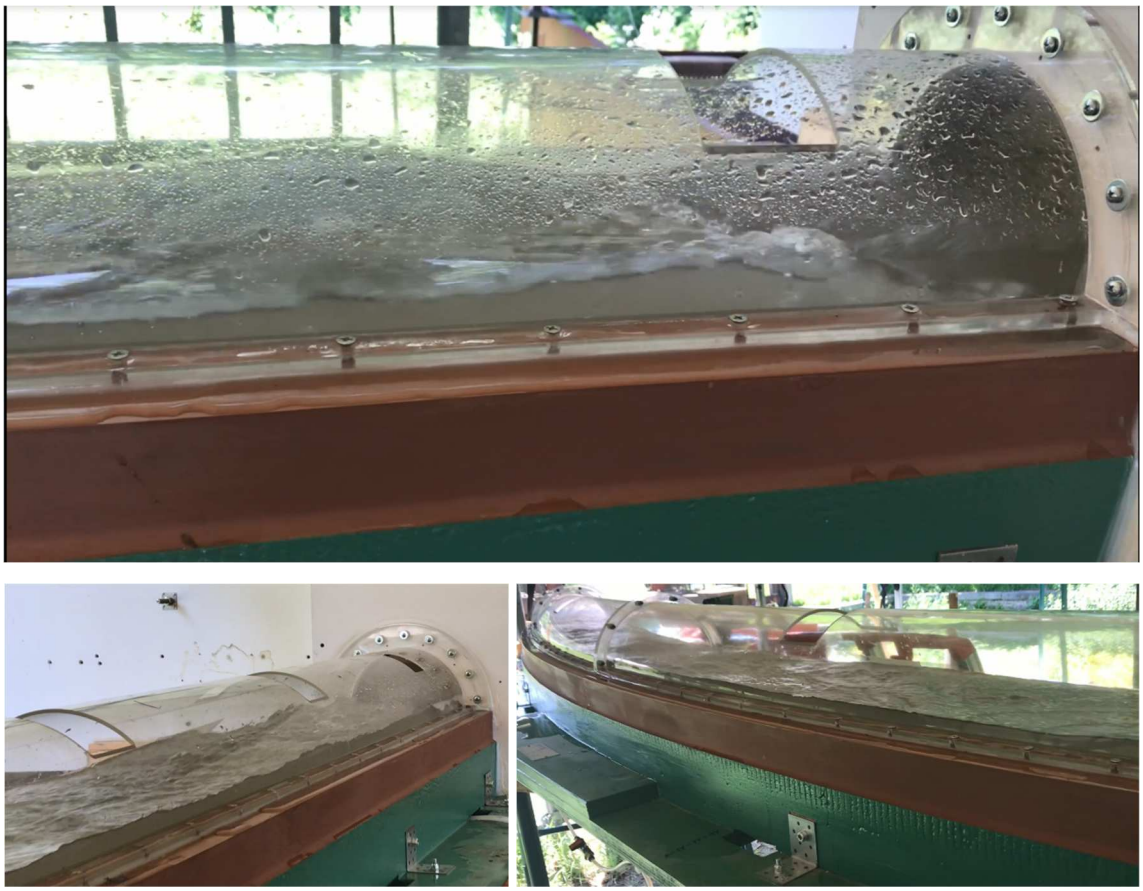


Figura 4-30 – Risalto al deflusso della portata di 300 m³/s e, sotto, sua propagazione verso valle.

4.2 Analisi dell'effetto della mancata apertura di una delle paratoie

In riferimento alla condizione di apertura delle luci di sbarramento propria della SIM-0, si è proceduto verificando l'effetto sulle portate e sui livelli generato dalla mancata apertura di una delle tre paratoie con portate in ingresso prossime al valore di riferimento con tempo di ritorno duecentennale. Nel dettaglio, sono state eseguite le prove seguenti:

- SIM-B: luci di sinistra e centrale mantenute con le aperture della SIM-0 e paratoia destra completamente chiusa;
- SIM-E: luci di destra e centrale mantenute con le aperture della SIM-0 e paratoia sinistra completamente chiusa.

In termini di portata, la mancata apertura di una delle paratoie determina ovviamente una riduzione dei deflussi in alveo a valle sbarramento e, al contempo, un incremento delle portate derivate dallo scolmatore.

In entrambe le simulazioni si ha uno sfioro al di sopra della paratoia posta in posizione chiusa, elemento che limita l'incremento di livello idrico in alveo.



Figura 4-31 – Deflusso con una paratoia chiusa: SIM-B (sopra) e SIM-E (sotto).

Nel dettaglio, a fronte di circa 1020 m^3/s defluenti nel modello, nella SIM-B sono risultati derivati circa 575 m^3/s; i livelli rilevati a monte delle paratoie (sotto le quali defluiscono i restanti circa 445 m^3/s) sono risultati confrontabili con quelli della SIM-0, con i franchi idraulici pari a 2,60 m in sinistra e 1,88 m in destra (quote di pelo libero corrispondenti: 43,90 m s.m. in sinistra e 43,13 m s.m. in destra).

La chiusura della luce in sponda sinistra, simulata nella SIM-E, determina invece pressoché a parità di portata una minor derivazione da parte dello scolmatore; in particolare a fronte di circa 1030 m^3/s defluenti nel modello sono risultati derivati circa 560 m^3/s. I franchi idraulici rilevati a monte delle paratoie sono risultati di poco inferiori a quelli della SIM-B e pari a circa 2,47 m in sponda sinistra e 1,83 m in sponda destra (quote di pelo libero corrispondenti: 44,03 m s.m. in sinistra e 43,17 m s.m. in destra).

Nel complesso, rispetto alla SIM-0, nella quale viene derivato il circa 43% del deflusso complessivo da monte lasciando defluire a valle il restante 57%, nelle due simulazioni SIM-B e SIM-E si osserva una inversione della distribuzione percentuale, con il convogliamento nel sistema scolmatore di una portata pari a circa il 55% di quella in arrivo da monte (circa 575 m^3/s considerando la portata di progetto) e il deflusso a valle sbarramento del restante 45%. Tali valori di portata derivata corrispondono a condizioni di incipiente moto in pressione all'imbocco della galleria (cfr. capitolo 4.1.2).

4.3 Studio di possibili configurazioni alternative di apertura delle paratoie

Come anticipato, la SIM-0 è stata assunta come riferimento in quanto è quella che garantisce la corretta ripartizione delle portate con un set di aperture delle paratoie il più possibile simile a quello originariamente simulato mediante modellistica numerica.

Si è comunque proceduto ipotizzando diverse condizioni alternative di apertura delle luci dello sbarramento al fine di identificare quelle che garantiscono il rispetto della ripartizione di progetto delle portate e di verificare l'effetto dei diversi set di apertura sul comportamento idrodinamico del nodo di derivazione. In funzione di tali valutazioni è possibile identificare la configurazione ritenuta maggiormente idonea per il funzionamento ordinario del sistema.

Nell'esecuzione di tale analisi è stato anche verificato l'effetto della totale chiusura di una delle paratoie e della contemporanea gestione delle restanti in modo da garantire comunque la ripartizione di progetto delle portate tra alveo e sistema scolmatore; in tutte le condizioni simulate è stato rilevato il livello a monte delle paratoie stesse, al fine di verificare il rispetto dei franchi idraulici richiesti dal Piano di Bacino.

Le prove eseguite sono le seguenti:

- SIM-1: paratoia in destra completamente chiusa, luci sinistra e centrale aperte di circa 5 m;
- SIM-2: paratoia centrale completamente chiusa, con luci laterali aperte di circa 5 m;
- SIM-3: paratoia in sinistra completamente chiusa, luci destra e centrale aperte di circa 5 m;
- SIM-4: paratoie aperte di circa 3 m;
- SIM-5: paratoie con gradi di apertura diversi, incrementali da sinistra verso destra.

4.3.1 Risultati della SIM-1

Nella prima condizione simulata, volutamente estrema, è stato esaminato l'effetto della totale chiusura della paratoia in destra, che nella simulazione di riferimento SIM-0 risultava quella meno contribuente al deflusso a valle (cfr. capitolo 4.1.1).

Al fine di consentire una ripartizione dei deflussi tra alveo e scolmatore in linea con quella di progetto, le luci di sinistra e centrale sono state mantenute aperte (apertura di 4,99 m reali) e sono risultate totalmente emerse (non interferenti con il pelo libero). Viceversa, la paratoia in destra è risultata sormontata.

In tali condizioni, la portata defluente a valle sbarramento è risultata piuttosto stabile, con oscillazioni dell'ordine del ±2% rispetto al valor medio; la portata derivata ha anch'essa evidenziato una riduzione delle oscillazioni massime rispetto alla simulazione di riferimento SIM-0, attestandosi attorno al ±5% rispetto al valor medio.

In media, il deflusso defluente nello scolmatore è risultato pari a 445 m^3/s, in linea con il valore di progetto, per una portata defluente a valle sbarramento di circa 610 m^3/s.



Figura 4-32 – Deflusso in corrispondenza delle paratoie nella SIM-1: paratoie di sinistra e centrale (sopra) e di destra (sotto).

A monte paratoie, come visibile in Figura 4-32, i livelli sono risultati tali da rispettare i franchi idraulici richiesti dal Piano di Bacino per evento con tempo di ritorno duecentennale: i franchi sono infatti risultati pari a 3,07 m in sponda sinistra e a 2,13 m in sponda destra, ove i livelli sono risultati maggiori per il sormonto della paratoia.

In galleria, le condizioni sono risultate del tutto in linea con quelle della simulazione di riferimento, con imbocco libero e riempimento in corrispondenza della luce 6 pari a circa il 74%. Lo sfioro di derivazione è risultato libero (non rigurgitato).



Figura 4-33 – SIM-1, sopra: deflusso in corrispondenza dell'imbocco (sx) e del primo tratto della galleria (dx); sotto: deflusso in galleria (sx) e tratto terminale dello sfioro (dx).

4.3.2 *Risultati della SIM-2*

In analogia con quanto riportato nel capitolo precedente è stata effettuata una prova chiudendo completamente la paratoia centrale e mantenendo quelle laterali aperte di 4,99 m reali. Rispetto alla SIM-1, i livelli in alveo a monte sbarramento sono risultati maggiori e, in particolare, i franchi si sono ridotti del circa 10%, risultando pari a 2,73 m in sponda sinistra e a 1,92 m in sponda destra.

La paratoia centrale è risultata sormontata in maniera più netta rispetto a quanto verificato per la luce di destra nella SIM-1. Quest'ultima è risultata totalmente emersa, mentre la paratoia in sinistra è risultata a tratti a contatto con il pelo libero.

Le oscillazioni di portata attorno al valor medio sono risultate più contenute rispetto alla SIM-1, con variazioni dell'ordine del ±1% in alveo e del ±2% in galleria. All'interno di quest'ultima le condizioni di deflusso sono risultate confrontabili con quelle delle due simulazioni precedenti, con riempimenti in corrispondenza della luce L6 dell'ordine del 73,5%. L'imbocco della galleria e lo scolmatore sono risultati con funzionamento libero.



Figura 4-34 – Deflusso in corrispondenza delle paratoie nella SIM-2: paratoie di sinistra e centrale (sopra) e di destra (sotto). Individuata dalla freccia verde la sezione di misura dei livelli, in ogni simulazione, per la verifica dei franchi.



Figura 4-35 – SIM-2, sopra: deflusso in corrispondenza dell'imbocco (sx) e del primo tratto della galleria (dx); sotto: deflusso in galleria (sx) e tratto terminale dello sfioro (dx).

4.3.3 *Risultati della SIM-3*

La terza simulazione con una luce totalmente chiusa è stata eseguita chiudendo la paratoia in sinistra e mantenendo le altre aperte di 4,99 m reali. I livelli in alveo a monte sbarramento in sponda destra sono risultati invariati rispetto alla SIM-2, mentre sono ulteriormente cresciuti in sponda sinistra, per un franco pari a 2,34 m.

La paratoia sinistra è risultata sormontata, con le restanti due totalmente emerse.

Le oscillazioni di portata attorno al valor medio in alveo sono risultate in linea con quelle della SIM-2, mentre quelle in galleria si sono attestate sul ±1%. Il deflusso in galleria è risultato assolutamente in linea con quello delle simulazioni precedenti.



Figura 4-36 – Deflusso in corrispondenza delle paratoie nella SIM-3.

4.3.4 *Risultati della SIM-4*

Un'ulteriore simulazione è stata eseguita equiparando, per quanto possibile, le aperture delle tre paratoie (Tabella 2). Tale condizione consente, al deflusso della portata di progetto, di evitare il sormonto di una delle tre paratoie in quanto, come descritto nella relazione idraulica, *"la paratoia non è dimensionata per essere tracimabile (o meglio non ne è previsto il funzionamento in tal senso)"*.

Paratoia	Apertura [m]
Sinistra	2,97
Centro	2,84
Destra	2,88

Tabella 2 – Apertura delle tre paratoie dello sbarramento nella SIM-4.

Analogamente a quanto effettuato per la SIM-0 si è proceduto incrementando per step la portata defluente nel modello e verificandone la ripartizione tra alveo e galleria; a differenza di tale simulazione, in questa configurazione di apertura nella condizione di sfioro incipiente in assenza di rigurgito (300 m^3/s) le paratoie non risultano ancora interferire con la corrente. L'inizio dell'interferenza si rileva, per le sole paratoie sinistra e centrale, al deflusso di una portata totale pari a circa 450 m^3/s, di cui poco meno di 30 m^3/s vengono derivati.

Al deflusso di una portata complessiva pari a circa 1050 m^3/s la ripartizione è risultata in linea con quella di progetto, con il deflusso a valle sbarramento di circa 600 m^3/s. In tali condizioni la quota di pelo libero a monte sbarramento è risultata analoga a quella della SIM-0 in sponda sinistra, mentre in sponda destra, per la maggiore apertura imposta alla paratoia, è risultata inferiore, benché confrontabile, e pari a circa 43,1 m s.m.. Rispetto alla SIM-0, la SIM-4 in esame è risultata maggiormente stabile in termini di oscillazioni di portata, con variazioni rispetto al valor medio pari a ±1,5% in alveo e a ±3% in galleria.

Il sovralzo al termine dello sfioro di derivazione è risultato in linea con quello rilevato nella SIM-0 e corrispondente a circa 3,20 m totali di altezza idrica sulla soglia dello stramazzo in scala reale. Lo sfioro di derivazione è risultato non rigurgitato; l'imbocco della galleria non in pressione.



Figura 4-37 – SIM-4: portata di progetto. Alveo a monte delle paratoie (in alto) e, sotto, risalto in galleria al deflusso della portata di circa 450 m³/s e sua propagazione verso valle.

Al deflusso dell'intera portata disponibile nel modello (circa 1200 m³/s), l'imbocco della galleria è risultato in condizioni di inizio di moto in pressione (saltuariamente è stato rilevato un ingresso di aria), con lo sfioro di derivazione libero e la galleria in sostanziale moto in pressione nel primo tratto per la presenza di molte perturbazioni di livello. In tali condizioni, inoltre, in alveo è stata rinvenuta una condizione di sormonto incipiente della paratoia centrale. I franchi idraulici sono risultati pari a circa 2,34 m in sponda sinistra e circa 1,36 m in sponda destra. Le portate sono risultate ripartite per circa 565 m³/s medi in galleria e per circa 625 m³/s in alveo.



Figura 4-38 – SIM-4: portata massima. Condizione di incipiente sfioro sulla paratoia centrale (in alto, freccia azzurra) e, sotto, risalto in galleria al deflusso della portata di circa 560 m^3/s, sua propagazione verso valle e condizioni di funzionamento dello sfioro di derivazione.

Nel complesso, la ripartizione delle portate tra alveo e galleria al variare della portata totale in ingresso da monte è rappresentata nel capitolo 4.3.6.

4.3.5 *Risultati della SIM-5*

Le SIM-1, SIM-2 e SIM-3 hanno evidenziato come una riduzione dell'apertura della paratoia in sponda sinistra e un contestuale incremento del grado di apertura di quella in destra consentano di limitare le oscillazioni della portata derivata in galleria.

Si è pertanto proceduto ricercando un set di apertura delle tre paratoie che, pur rispettando tale condizione, eviti la completa chiusura di una delle luci. Le aperture imposte sono descritte in Tabella 3.

Paratoia	Apertura [m]
Sinistra	1,63
Centro	2,84
Destra	4,86

Tabella 3 – Apertura delle tre paratoie dello sbarramento nella SIM-5.

Analogamente a quanto effettuato per la SIM-0 e la SIM-4 si è proceduto incrementando per step la portata defluente nel modello e verificandone la ripartizione tra alveo e galleria; a differenza delle precedenti simulazioni, per il maggior grado di chiusura imposto la paratoia in sinistra inizia ad interferire con la corrente per portate pari a circa 230 m^3/s, inferiori a quella della condizione di sfioro incipiente in assenza di rigurgito.

La paratoia centrale inizia ad interferire con la corrente per una portata complessiva di circa 430 m^3/s (di cui circa 30 m^3/s derivati); la paratoia in destra è invece risultata totalmente emersa per tutto il range di portate indagato (ad eccezione di una lieve interferenza al solo deflusso della portata massima). Al deflusso a valle sbarramento di circa 530 m^3/s si verifica la condizione di sfioro incipiente sulla paratoia sinistra; lo sfioro vero e proprio ha inizio per portate defluenti di circa 560 m^3/s.

Al deflusso di una portata complessiva pari a circa 1050 m^3/s la ripartizione è risultata in linea con quella di progetto, con il deflusso a valle sbarramento di circa 600 m^3/s. In tali condizioni la quota di pelo libero a monte sbarramento è congruente con quelle delle simulazioni precedenti, con un franco in sponda sinistra pari a circa 2,6 m e in sponda destra pari a circa 1,8 m.

Come atteso, in ragione del maggior grado di chiusura della paratoia in sponda sinistra, la SIM-5 è risultata maggiormente stabile in termini di oscillazioni di portata rispetto sia alla SIM-0 che alla SIM-4, con variazioni rispetto al valor medio pari a ±1% in alveo e a ±1,5% in galleria.

Il sovralzo al termine dello sfioro di derivazione è risultato di poco inferiore a quello rilevato nelle due simulazioni sopracitate e corrispondente a circa 3,10 m totali di altezza idrica sulla soglia dello stramazzo in scala reale.

Analogamente a quanto rilevato per le precedenti simulazioni, lo sfioro è risultato non rigurgitato e l'imbocco della galleria non in pressione.



Figura 4-39 – SIM-5: condizioni in corrispondenza dello sbarramento ad inizio interferenza della paratoia in sinistra (sopra, 230 m^3/s rilasciati a valle) e di quella centrale (centro, 430 m^3/s rilasciati a valle); sotto: condizione di sfioro incipiente sulla paratoia sinistra (530 m^3/s rilasciati a valle).



Figura 4-40 – SIM-5: portata di progetto. Alveo a monte delle paratoie (in alto) e, sotto, risalto in galleria al deflusso della portata di circa 450 m3/s.

Al deflusso dell'intera portata disponibile nel modello (circa 1200 m^3/s), l'imbocco della galleria è risultato in condizioni di inizio moto in pressione (saltuariamente è stato rilevato un ingresso di aria), con lo sfioro di derivazione libero. A differenza di quanto rilevato nelle precedenti simulazioni, la galleria non risulta in pressione, in virtù delle minori perturbazioni di portata e livello osservate.

In alveo è stata rinvenuta una condizione di sormonto incipiente sulla paratoia centrale, con quella in sinistra totalmente sormontata e quella in destra interferente solo in corrispondenza delle "onde" che perturbano il pelo libero. I franchi idraulici sono risultati pari a circa 2,26 m in sponda sinistra e circa 1,49 m in sponda destra. Le portate sono risultate ripartite per circa 560 m^3/s medi in galleria e per circa 635 m^3/s in alveo.

Nel complesso, la ripartizione delle portate tra alveo e galleria al variare della portata totale in ingresso da monte è rappresentata nel capitolo 4.3.6.



Figura 4-41 – SIM-5: portata massima. Risalto in galleria al deflusso della portata di circa 560 m³/s e sua propagazione verso valle. Si osservi l'assenza di moto in pressione vero e proprio, con un riempimento nel tratto iniziale pari a circa l'85% (bordo inferiore delle "finestrelle" di ispezione).

4.3.6 Scelta della configurazione di progetto

4.3.6.1 Analisi della stabilità delle portate e dei livelli

Le analisi presentate nei capitoli precedenti, e in particolare la SIM-1, SIM-2 e SIM-3, hanno evidenziato come un minor grado di apertura della paratoia in sponda sinistra consenta di "stabilizzare" maggiormente i deflussi, riducendo le oscillazioni attorno al valor medio sia delle portate residue in alveo che, soprattutto, di quelle derivate in galleria.

Ovviamente, una configurazione come le tre sopracitate che preveda la totale chiusura di una delle luci non è proponibile come riferimento di progetto per lo smaltimento degli eventi di piena gravosi, anche in considerazione del verificarsi del sormonto della paratoia di volta in volta considerata chiusa.

Le prove SIM-4 e SIM-5 sono dunque state eseguite per simulare l'effetto di differenti condizioni di apertura rispetto alla SIM-0 assunta come riferimento iniziale. Nel dettaglio, la SIM-5 è stata eseguita proprio con la finalità di identificare un set di aperture che consentisse di mantenere maggiormente chiusa la paratoia in sinistra per attenuare il più possibile le oscillazioni.

Il confronto tra la ripartizione delle portate medie tra l'alveo e la galleria rilevata per le tre simulazioni poste a confronto (SIM-0, SIM-4 e SIM-5) è rappresentata in Figura 4-42. In riferimento alla condizione di progetto, le oscillazioni di portata rilevate in galleria si riducono progressivamente dal ±10% del valor medio rilevato nella SIM-0, al ±3% della SIM-4 e al ±1,5% della SIM-5. In riferimento all'alveo le oscillazioni sono confrontabili per le ultime due simulazioni (1-1,5%), mentre la SIM-0 presenta variazioni più marcate e dell'ordine dell'8% del valor medio.

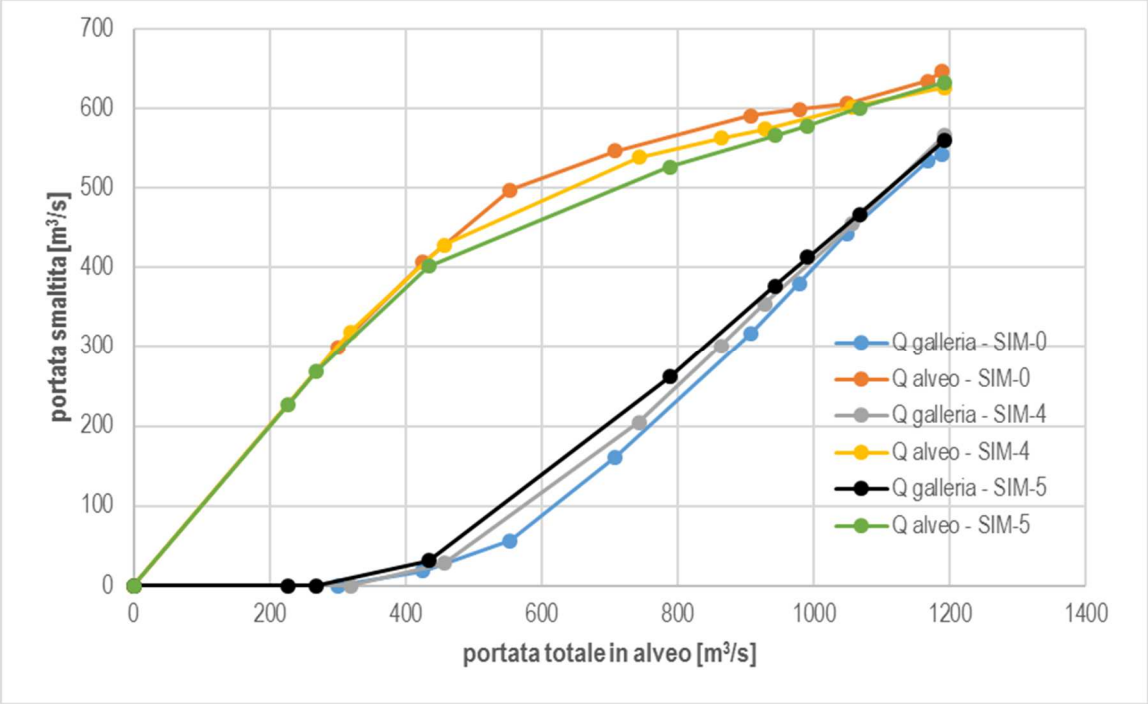


Figura 4-42 – Andamento delle portate derivate e rilasciate a valle in funzione della portata in ingresso, con le tre condizioni di apertura imposte nella SIM-0, SIM-4 e SIM-5.

Nel complesso, pertanto, come atteso la SIM-5 appare la condizione maggiormente stabile, per quanto in termini di oscillazioni di portata anche la SIM-4 mostri un significativo miglioramento rispetto alla configurazione iniziale.

Le minori oscillazioni dei deflussi si ripercuotono sui livelli in galleria, che nella SIM-5 risultano nel complesso più stabili, in particolar modo per le portate elevate (superiori a quelle di progetto).

In riferimento al comportamento idrodinamico tuttavia la SIM-5 appare meno adeguata rispetto alla SIM-4, in quanto la paratoia di sinistra, aperta di poco più di 1,5 m, risulta sormontata al deflusso della portata di progetto e potrebbe generare problematiche di intasamento dovuto al materiale flottante anche di grosse dimensioni (alberi, oggetti ingombranti, ecc.) trasportato dalla corrente. Inoltre, come descritto, la paratoia di destra in tale configurazione risulta non influente sul deflusso per praticamente tutto il range di portata indagato.



Figura 4-43 – Portata di progetto. Risalto in galleria al deflusso della portata di circa 450 m³/s nella SIM-4 (sopra) e nella SIM-5 (sotto).



Figura 4-44 – Portata massima. Risalto in galleria al deflusso della portata di circa 560 m³/s nella SIM-4 (sopra) e nella SIM-5 (sotto).



Figura 4-45 – Portata massima. Propagazione del risalto in galleria verso valle al deflusso della portata di circa 560 m^3/s nella SIM-4 (sopra) e nella SIM-5 (sotto).

4.3.6.2 Analisi dell'effetto delle diverse aperture delle paratoie sui livelli in alveo

Per ogni configurazione di apertura simulata sono stati rilevati i livelli idrici in corrispondenza delle sponde a monte dello sbarramento, al fine di verificare il rispetto dei franchi idraulici e l'influenza sui livelli dei diversi gradi di apertura delle paratoie.

Le valutazioni sono state effettuate per ogni portata simulata, ma sono significative soprattutto per la condizione di progetto e per quella caratterizzata da una portata superiore. La tabella seguente riporta il confronto tra i franchi rilevati nelle varie simulazioni analizzate.

Simulazione	Condizione	Portata in alveo a valle sbarramento [m³/s]	Franco sponda sx [m]	Franco sponda dx [m]
SIM-0	Progetto	610	2,55	1,59
	Q>Qprogetto	n.d.	n.d.	n.d.
SIM-4	Progetto	602	2,52	1,88
	Q>Qprogetto	626	2,34	1,36
SIM-5	Progetto	601	2,60	1,79
	Q>Qprogetto	633	2,26	1,49

Tabella 4 – Franchi idraulici rispetto alla sommità del muro arginale nelle tre simulazioni per portate pari e superiori a quella di progetto.

I valori dei franchi idraulici ottenuti sono tra loro confrontabili nelle varie simulazioni, sia in riferimento alla condizione di progetto che al deflusso di una portata superiore. Nella condizione di progetto, in tutte le simulazioni si osserva il rispetto dei franchi richiesti dal Piano di Bacino per l'evento di piena con tempo di ritorno duecentennale.

4.3.6.3 Considerazioni conclusive

Le analisi riportate nei capitoli 4.3.6.1 e 4.3.6.2 evidenziano come le configurazioni che garantiscono la corretta ripartizione di progetto della portata duecentennale, il rispetto dei franchi idraulici e al contempo la maggiore stabilità dei deflussi siano quelle definite nelle SIM-4 e SIM-5.

La SIM-5 presenta le minori oscillazioni di portata (sia derivabile che in alveo), con variazioni percentuali comunque confrontabili con la SIM-4 e nettamente inferiori a quelle della SIM-0. In termini di franchi idraulici le tre configurazioni si ritengono sostanzialmente equivalenti.

Relativamente alle condizioni idrodinamiche di deflusso in alveo, la SIM-5 appare tuttavia meno adeguata, in quanto la ridotta apertura della paratoia in sinistra potrebbe generare problemi di intasamento, ed essa sarebbe sormontata col deflusso della portata di progetto, condizione di funzionamento per la quale non è stata dimensionata (in particolare la presenza dei bracci potrebbe favorire l'intercettazione di materiale flottante). Al contempo, in tale simulazione la paratoia di destra non risulta contribuire alla regolazione delle portate e dei livelli.

In conclusione, pertanto, si ritiene che la configurazione ottimale delle aperture delle paratoie tra le varie soluzioni analizzate sia quella della SIM-4.

In Tabella 5 si forniscono i valori di riferimento da considerare in progetto, arrotondati ai 5 cm per semplicità di applicazione.

Paratoia	Apertura [m]
Sinistra	**3,00**
Centro	**2,80**
Destra	**2,90**

Tabella 5 – Apertura delle tre paratoie di riferimento per la gestione delle opere.

4.4 Deflusso di portate superiori a quelle di progetto

4.4.1 Scala di deflusso del canale collettore

Mediante il modello fisico si è studiata la variabilità dei livelli idrici nel canale collettore, a monte dell'imbocco della galleria, al variare della portata derivata, indagando in particolare le condizioni prossime al funzionamento in pressione del portale di imbocco, così da verificare l'entità del rigurgito prodotto verso i manufatti di monte, che influenza le condizioni idrodinamiche in alveo e la capacità complessiva di smaltimento dello scolmatore.

In particolare si è proceduto rilevando, per diverse portate derivate, i livelli all'interno del canale collettore, manufatto per il quale è stata verificata la congruenza con i risultati forniti dal modello 2D nella condizione di progetto, così come mostrato nel capitolo 4.1.2.

Nel dettaglio, le prove eseguite per la determinazione della scala di deflusso sono le seguenti:

- SIM-0: $Q_{galleria}$ pari a circa 450 m^3/s;
- SIM-A: $Q_{galleria}$ pari a circa 500 m^3/s;
- SIM-B: $Q_{galleria}$ pari a circa 570 m^3/s, ottenuta mantenendo le paratoie di sinistra e centrale con le aperture della SIM-0 e chiudendo completamente la destra;
- SIM-C: $Q_{galleria}$ pari a circa 620 m^3/s, deflusso ottenuto mantenendo le paratoie in alveo aperte di circa 2,24 m e facendo defluire all'interno del modello tutta la portata disponibile;
- SIM-D: $Q_{galleria}$ pari a circa 660 m^3/s, deflusso ottenuto mantenendo le paratoie in alveo aperte di circa 0,90 m e facendo defluire all'interno del modello tutta la portata disponibile.

I livelli corrispondenti ad ogni portata sono stati rilevati nelle sezioni S2 e S3 (individuate in Figura 4-20 nel capitolo 4.1.2) in tre punti significativi lungo la sezione trasversale. L'andamento dei peli liberi rilevato al crescere della portata defluente è rappresentato in Figura 4-46.

Nella Figura 4-24 è fornita invece in modo esplicito la scala di deflusso (livelli al variare della portata) per la sezione S2.

La SIM-D evidenzia innanzitutto come il deflusso di una portata pari a circa 660 m^3/s determinerebbe la formazione di moto in pressione nel canale collettore (intradosso della soletta di copertura posto a 43,75 m s.m.), comportamento non analizzabile compiutamente mediante il modello fisico in quanto il tratto di imbocco è stato realizzato a cielo aperto per le necessità di misura e visualizzazione della corrente nel manufatto.

Tale valore di portata, per quanto precedentemente osservato, corrisponde anche al funzionamento in pressione dell'intera galleria.

Si nota come in tali condizioni l'incremento di livello idrico al crescere della portata derivata sia marcato (occorre costituire il carico idraulico per consentire il deflusso della portata entro la galleria); per valori non troppo inferiori (circa 620 m^3/s) infatti si riscontra ancora un franco idraulico minimo rispetto all'intradosso della soletta di copertura pari a circa 80-90 cm (SIM-C). In tale condizione è tuttavia osservabile un comportamento impulsivo, con locali riduzioni (sino quasi all'annullamento) del franco per la presenza di onde generate in particolare dall'impatto contro la parete al termine del canale (Figura 4-47).

Per portate inferiori a 600 m^3/s il franco idraulico risulta superiore a 1 m e le oscillazioni sono meno rilevanti. La portata di circa 570 m^3/s corrisponde a una condizione di incipiente moto in pressione, in accordo con quanto già valutato mediante le simulazioni di progetto con modello numerico.

Per la portata di progetto (TR=200 anni), come già descritto i livelli idrici nel camerone variano tra 38,8 m s.m. e 39,0 m s.m. a valle scivolo e tra 40,20 m s.m. e 40,30 m s.m. contro la parete di valle (valori

assolutamente congruenti con quelli previsti dalla modellistica numerica, che mostrano un franco idraulico di circa 3,5 m rispetto all'intradosso della soletta di copertura di 43,75 m s.m.).

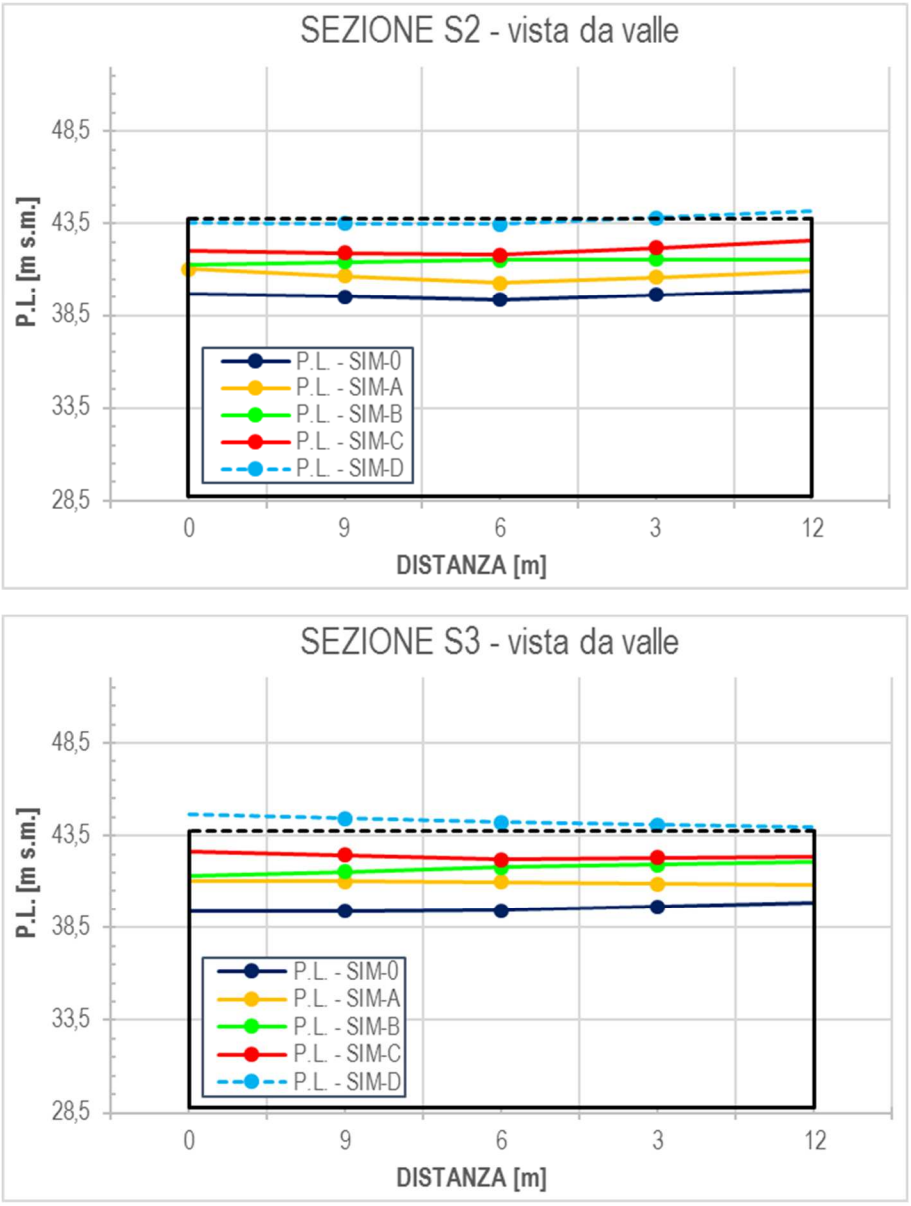


Figura 4-46 – Profili di pelo libero rilevati al variare della portata defluente nel canale collettore.



Figura 4-47 – Pelo libero nel canale collettore al deflusso della portata di progetto (sx) e della portata di circa 620 m³/s (dx - SIM-C) in corrispondenza della quale si osservano locali riduzioni del franco (fino quasi all'annullamento) per effetto delle onde all'imbocco della galleria (cerchio rosso).

4.4.2 *Comportamento dello sfioro e della galleria di adduzione*

Il funzionamento della galleria di adduzione al deflusso della portata di progetto è descritto nel capitolo 4.1.3; i gradi di riempimento attesi sono stati confermati, come già descritto nei capitoli 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3, dalle simulazioni eseguite a parità di portata ma con differenti set di apertura della paratoia.

In tali condizioni pertanto il moto in galleria risulta svincolato dalla modalità di gestione della traversa e dalle conseguenti variazioni nell'idrodinamica dell'alveo.

Mantenendo le aperture delle paratoie di riferimento definite al capitolo 4.3.6.3, per portate superiori a quelle di progetto si osserva il raggiungimento del moto in pressione all'imbocco della galleria, come già anticipato, per circa 560-570 m³/s. In tali condizioni, come descritto in precedenza, la galleria è risultata sostanzialmente in pressione nel primo tratto per la presenza di significative perturbazioni di livello.

La condizione sopra descritta è la massima simulabile, mediante le portate disponibili sul modello, mantenendo invariate le condizioni allo sbarramento; per consentire la simulazione della derivazione di una maggiore portata è stato pertanto necessario ridurre il grado di apertura delle paratoie (SIM-C e SIM-D).

I risultati della SIM-C presentata in precedenza evidenziano come al raggiungimento di una portata pari a circa 620 m³/s la galleria risulti in pressione nel tratto corrispondente alle luci L1-L4, con la sezione in cui avviene il passaggio a moto a pelo libero che oscilla tra la L4 e la L5 (Figura 4-48). In tali condizioni lo sfioro risulta in condizione limite tra il comportamento libero e il rigurgitato.

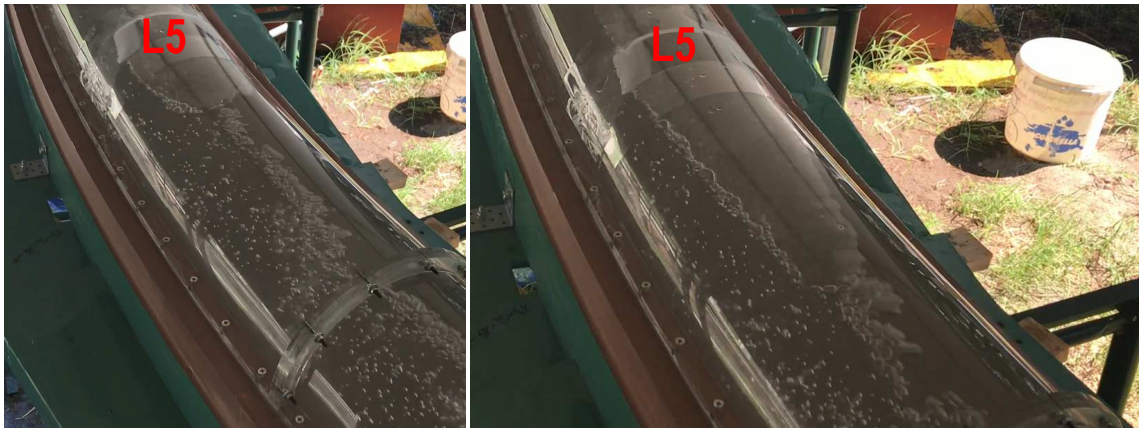


Figura 4-48 – Oscillazione della sezione in cui avviene il passaggio da moto in pressione a pelo libero nella SIM-C.

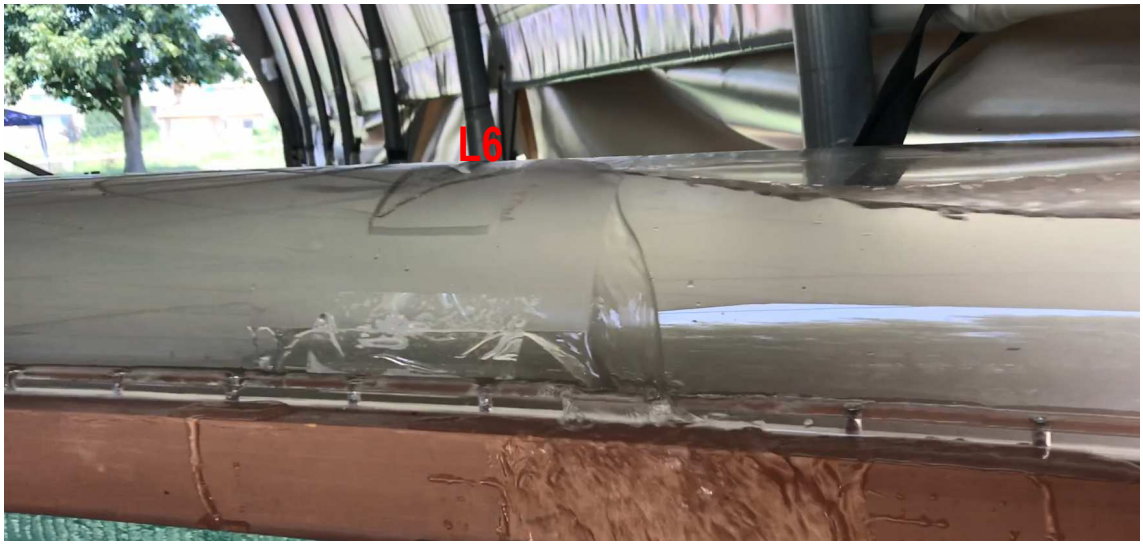




Figura 4-49 – Luce L6 subito a valle della quale avviene il passaggio da moto in pressione a pelo libero nella SIM-D (sopra) e luce L7 che risente del richiamo dello sfioro (sotto).

Un ulteriore incremento della portata derivata (SIM-D, Q=660 m³/s) determina invece il rigurgito dello sfioro di derivazione nonché la formazione di un moto in pressione più stabile ed esteso pressoché per tutto il tratto di galleria simulato dal modello (ad eccezione della luce più a valle L7, che risente del richiamo generato dal salto posto al termine della tubazione - cfr. Figura 4-49). Nel canale collettore in corrispondenza dello sfioro, in sponda sinistra, il pelo libero si mantiene inferiore alla quota del piano strada di via Adamoli (~45 m s.m.).

Come descritto nel capitolo 4.1.2, le simulazioni di rischio residuale condotte nella relazione idraulica di progetto con i modelli numerici avevano verificato che in corrispondenza dell'evento di piena cinquecentennale lo sfioratore risulterebbe in grado di derivare (con funzionamento rigurgitato) circa 660 m³/s, defluenti in pressione nella galleria fino al mare. Le analisi eseguite mediante modello fisico (SIM-D) confermano pertanto, per il tratto di opera indagato, quanto atteso.



Figura 4-50 – Sopra: sfioro di derivazione nella SIM-C (portata derivata pari a circa 620 m³/s - sx) e nella SIM-D (portata derivata pari a circa 660 m³/s - dx).

5 CONCLUSIONI

Le simulazioni eseguite su modello fisico hanno innanzitutto mostrato nel complesso una buona congruenza con i risultati ottenuti dalla modellistica numerica bidimensionale originariamente eseguita, validando per gli elementi sostanziali i risultati di quest'ultima, alla base dei dimensionamenti di progetto.

Si riscontra in particolare un buon accordo dei flussi in alveo sia qualitativo (con particolare riferimento alle dinamiche dovute ai flussi trasversali) che quantitativo (in riferimento ai valori di livello e velocità).

Come evidenziato nella simulazione di riferimento SIM-0, il modello fisico risulta maggiormente rappresentativo di quelli numerici nelle immediate prossimità delle paratoie, in relazione ai significativi elementi di tridimensionalità della corrente; i livelli idrici misurati sono superiori rispetto alle simulazioni numeriche, ma garantiscono comunque il rispetto dei franchi idraulici richiesti dal Piano di Bacino. Nel tratto più a monte si riscontra invece una congruenza assai buona con i valori della modellistica numerica.

Relativamente al manufatto scolmatore, risultano confermati la corretta capacità di smaltimento della portata di progetto, il funzionamento idraulico non rigurgitato dello sfioratore in tutte le condizioni di esercizio (verificato fino a portate superiori di circa il 25% a quella di progetto), l'adeguato funzionamento

della camera di dissipazione con livelli idrici sostanzialmente pari a quelli attesi e funzionamento non in pressione dell'imbocco della galleria.

Entro la galleria il modello fisico evidenzia meglio l'effetto di risalto ondulato conseguente al passaggio in condizioni di corrente critica all'imbocco, e la sua variabilità in relazione alle condizioni di valle. In tutte le configurazioni simulate la massima ampiezza di oscillazione dei livelli risulta contenuta entro l'85% dell'altezza della galleria (80% nella configurazione di progetto), valore ritenuto accettabile vista la ridotta estensione (il fenomeno si esaurisce in alcune decine di metri) e la prossimità all'imbocco; più a valle nella configurazione di riferimento ci si attesta su livelli correnti analoghi a quelli di progetto (riempimento del 70% circa, condizioni di corrente lenta).

Anche in merito alla propagazione verso valle di perturbazioni ondulatorie e del fenomeno di sovralzo dei livelli idrici in curva si riscontra una buona congruenza con i risultati della modellistica numerica (dalla quale nella Relazione idraulica di progetto era ricavato un sovralzo massimo complessivo di circa 0,4 m): il massimo sovralzo rilevato, in centro curva, risulta pari a circa 0,44 m (circa il 6% dell'altezza idrica).

I risultati ottenuti consentono pertanto di confermare l'adeguata funzionalità dell'impostazione idraulica del progetto relativamente al nodo di presa indagato e alla galleria di adduzione.

In aggiunta alla SIM-0 si è anche proceduto testando diversi set di apertura delle paratoie dello sbarramento al fine di identificare la configurazione che, consentendo la corretta ripartizione delle portate al deflusso dell'evento di piena con tempo di ritorno duecentennale, permetta di contenere le oscillazioni di portata rispetto al valor medio (sia in alveo che in galleria), che nella simulazione di riferimento risultavano di entità non trascurabile.

Tale configurazione è stata identificata nella prova denominata SIM-4, sulla base della quale sono state definite le aperture di riferimenti indicate in Tabella 6. Al deflusso della portata di progetto, con tali aperture non si sono osservate sostanziali differenze, sia in alveo che nel canale collettore e in galleria, rispetto alla configurazione originaria di progetto.

Gli elementi raccolti mediante modellistica fisica sono poi stati utilizzati per tarare l'aggiornamento della modellistica bidimensionale presentato nella relazione idraulica, a cui si rimanda per maggiori approfondimenti, eseguito in funzione della condizione di Tabella 6.

Paratoia	Apertura [m]
Sinistra	**3,00**
Centro	**2,80**
Destra	**2,90**

Tabella 6 – Aperture, di riferimento per la gestione delle opere, delle tre paratoie dello sbarramento.