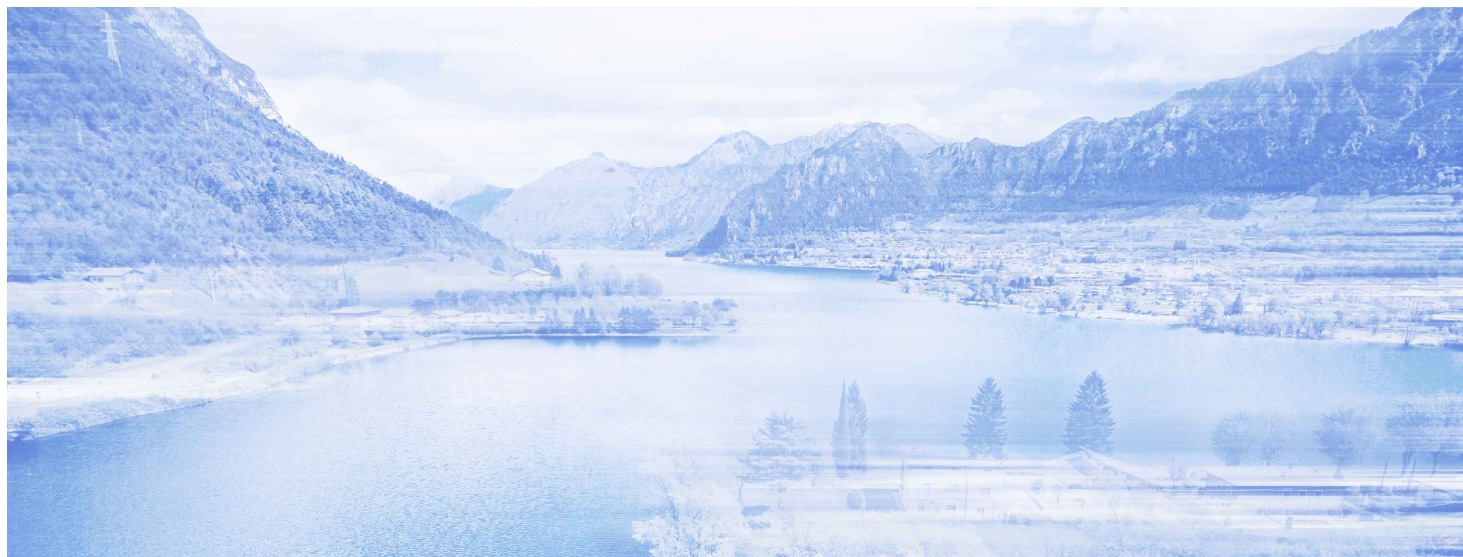


# NUOVE OPERE DI REGOLAZIONE PER LA MESSA IN SICUREZZA DEL LAGO D'IDRO



RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO DI PROGETTISTI




## PROGETTO ESECUTIVO

### GENERALE

### IDROLOGIA - IDRAULICA

### Relazione idrologica-idraulica

Fase PE	Ambito 000	Opera IDR	Argomento ID	Progressivo 001	Tipo elaborato RH	Revisione A
Redatto N. M. Colombo		Controllato N. M. Colombo		Approvato S. Croci		Scala - Data 30/09/22

 Agenzia Interregionale per il fiume Po	IL RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO	
	Ing. M. Vergnani	
RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE ALPINA S.p.A.  Ing. Paola Erba	PROGETTAZIONE ETATEC STUDIO PAOLETTI s.r.l.  Ing. Stefano Croci	

REV.	DATA	OGGETTO REVISIONE	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO
A	30/09/2022	Prima emissione	N. M. Colombo	N. M. Colombo	S. Croci
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-



## SOMMARIO

1	INTRODUZIONE.....	3
2	MODIFICHE RISPETTO ALLA PRECEDENTE VERSIONE DEL PROGETTO ESECUTIVO .....	6
3	CONTENUTI DELLA RELAZIONE IDROLOGICO-IDRAULICA DEL PROGETTO ESECUTIVO - 2018.....	11

## 1 INTRODUZIONE

Il presente elaborato, che costituisce parte integrante della progettazione esecutiva delle “Nuove opere di regolazione per la messa in sicurezza del lago d’Idro”, riporta le metodologie e gli esiti delle analisi idrauliche condotte nell’ambito della prima versione del progetto esecutivo, redatto nel 2018 dal raggruppamento temporaneo costituito da SINA S.p.A., S.E.P.I. s.r.l. e Ing. Yos Zorzi per conto dell’impresa appaltatrice ITINERA S.p.A., che sono ritenute idonee e sufficienti alla redazione del presente aggiornamento del progetto esecutivo. Tali elaborazioni sono state condotte con l’ausilio di un **modello numerico bidimensionale di dettaglio dell’intera opera in progetto, calibrato in base ai risultati ottenuti con il modello fisico**, in scala 1:30, dell’intero manufatto scolmatore, a partire dalle paratoie di sezionamento e regolazione presenti all’imbocco, fino ed un tratto sufficientemente significativo del fiume Chiese tale da riprodurre debitamente i fenomeni allo sbocco della galleria e gli eventuali effetti di rigurgito.

In particolare, il modello fisico è stato progettato, realizzato e condotto dal Prof. Marco Mancini del Politecnico di Milano - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale e dalla società d’ingegneria MMI s.r.l.. Per i dettagli si rimanda all’elaborato PE-000-IDR-ID-002-RT-A del presente progetto esecutivo.

Le prove sul modello fisico e le analisi idrauliche condotte su modello numerico hanno portato alle seguenti modifiche rispetto al progetto definitivo approvato:

- il diametro della galleria è passato da 6.5 m a 6.95 m, per consentire il transito della portata di progetto (332 m<sup>3</sup>/s) con adeguati livelli di riempimento (funzionamento a pelo libero con riempimenti attorno al 73%);
- sono state apportate variazioni nella distribuzione delle pendenze lungo la galleria, in particolare:
  - è stata introdotta una prima disconnessione idraulica (tratto a forte pendenza – 11.9% per 44 m), nel convergente a valle delle paratoie;
  - è stata introdotta una seconda disconnessione idraulica in galleria, al termine del tratto rettilineo (tratto a forte pendenza – 12% per 17 m);
  - è stata eliminata la discontinuità idraulica al termine della galleria e la vasca di dissipazione;
- è stata ottimizzata la forma del setto centrale che divide i due canali di restituzione;
- è stato ottimizzato il manufatto di sbocco della galleria per migliorare l’immissione in Chiese, in modo tale da ridurre le velocità della corrente da circa 9 a circa 6 m/s (sono state introdotte delle soglie nel manufatto di restituzione, la cui altezza e distribuzione è stata definita con il modello fisico).

Le suddette modifiche, già apportate nell’ambito della prima versione del progetto esecutivo, assolvono alle osservazioni formulate al progetto definitivo da parte degli enti competenti, in quanto:

- si riduce il grado di riempimento in galleria
- sono state condotte analisi con modelli numerici 2D ad elevata risoluzione ed anche mediante modello fisico
- sono state eliminate le incertezze relative all’ubicazione del risalto e degli aerofori nel manufatto di restituzione, rimuovendo la vasca di dissipazione e mantenendo la corrente in condizione supercritica (veloce)
- si sono ridotte sensibilmente le velocità della corrente in uscita dal manufatto di restituzione verso il fiume Chiese.

L’attività di modellazione fisica è stata seguita anche dal **Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - Direzione Generale per le Dighe e le Infrastrutture idriche ed elettriche**, che nel

corso delle attività di modellazione ha formalizzato alcune osservazioni e richieste di studio di soluzioni progettuali alternative, che sono state recepite.

Per quanto riguarda la **nuova traversa di regolazione**, nel Progetto Esecutivo del 2018 e anche nel presente progetto non sono state apportate modifiche rispetto a quanto previsto e già approvato nell'ambito del Progetto Definitivo.

Inoltre, l'aggiornamento del Progetto Esecutivo mantiene inalterata la configurazione del **manufatto di imbocco** previsto nella versione del Progetto Definitivo di maggio 2012 e già confermato nella prima versione del Progetto Esecutivo del 2018, quindi senza la soglia che innalzi la quota di presa della nuova galleria.

L'opera così progettata rispetta gli obiettivi e i vincoli posti alla base della progettazione, di seguito elencati:

- La galleria di by-pass consente l'evacuazione delle portate di piena anche nell'ipotesi di collasso della frana con ostruzione dell'emissario del lago. L'imbocco e lo sbocco sono al di fuori del perimetro di frana
- L'opera di scarico è dimensionata in modo tale da garantire la sicurezza idraulica delle zone rivierasche a valle del lago. La sua portata massima rilasciata è pari a quella scaricata in piena lungo il Chiese
- Le opere sono dimensionate per garantire un livello massimo di regolazione pari a 368.00 m s.m. (quote assolute IGM, pari a circa 370.00 m s.m. in quote idrometriche) ed una escursione del lago tra la quota di massima e minima regolazione di 3.25 m
- La nuova traversa di regolazione è dimensionata per tempi di ritorno di 1000 anni e posizionata esternamente alla perimetrazione di frana
- La configurazione della traversa consente di far defluire il D.M.V. anche con il minimo livello di regolazione del lago
- La scala di risalita della fauna ittica è predisposta per funzionare per ogni livello di regolazione presente nel lago

Di seguito si riportano le principali grandezze idrauliche considerate nell'ambito della progettazione esecutiva delle opere:

- Portata di progetto del manufatto scolmatore: 332 m<sup>3</sup>/s
- Quota di massimo invaso per T=1000 anni: 371.23 m s.m.
- Quota di massima regolazione: 368.00 m s.m.
- Quota di minima regolazione: 364.75 m s.m.
- Escursione di livello: 3.25 m

Tutte le suddette quote altimetriche sono coerenti con le quote IGM, che sono inferiori rispetto alle quote idrometriche di circa 2.07-2.09 m (per comodità +2 m)

Per quanto riguarda, infine, gli effetti dell'opera in progetto nei confronti del sistema fluviale di monte e di valle, si rimanda allo "Studio idrologico e idraulico per l'individuazione delle aree esondabili del fiume Chiese a valle del Lago d'Idro" e allo "Studio idrologico e idraulico per l'individuazione degli effetti di rigurgito sui fiumi Chiese e Caffaro a monte del Lago d'Idro" condotti nel 2014 dal RTP che ha redatto il progetto definitivo.

Relativamente all'influenza dell'opera in progetto sul reticolo idrografico afferente al Lago d'Idro, si riportano di seguito alcuni estratti della relazione del suddetto studio:

"Sono stati esaminati gli eventi di piena caratterizzati da tempi di ritorno di 200 e 1000 anni, considerando due diversi scenari di regolazione del lago:

- Assenza di svaso preventivo: livello iniziale del lago alla quota di massima regolazione 368 m s.l.m.



- *Svaso preventivo fino alla quota di minima regolazione: livello iniziale del lago alla quota 364.75 m s.l.m.*

...

*Le simulazioni condotte hanno evidenziato come il pericolo di allagamento al quale sono esposte le aree localizzate a monte del lago d'Idro, ed attraversate dal fiume Chiese e dal torrente Caffaro, sia originato da due diversi fenomeni: l'esondazione dei due corsi d'acqua, dovuta al transito di portate superiori alla capacità di deflusso dell'alveo, e la risalita verso monte del lago, il cui livello aumenta man mano che il volume di piena si riversa in esso. Si è inoltre mostrato come i due fenomeni siano tra loro sfasati, poiché il deflusso delle portate più alte nei due corsi d'acqua avviene molte ore prima che il lago cresca fino a raggiungere il suo livello massimo.*

...

Per un evento caratterizzato da un tempo di ritorno pari a 200 anni, nell'ipotesi che il lago venga preventivamente svasato fino alla quota di minima regolazione (364.75 m s.m.):

- Il fiume Chiese e il torrente Caffaro esondano in prossimità della confluenza;
- Gli allagamenti dovuti all'innalzamento del livello del lago sono pressoché nulli; il livello massimo che il lago raggiunge è minore della quota di massima regolazione.

Per un evento caratterizzato da un tempo di ritorno pari a 200 anni, nell'ipotesi che non vi sia nessuno svaso preventivo e il livello del lago all'inizio dell'evento sia pari alla quota di massima regolazione (368.00 m s.m.):

- Le esondazioni da parte dei due corsi d'acqua sono le stesse dello scenario precedente;
- L'innalzamento del livello del lago, che raggiunge un livello massimo di 370.07 m s.m., coinvolge un'ampia fascia di territorio, interessando il campeggio in riva al lago e diverse abitazioni.

Per un evento millenario le esondazioni da parte dei corsi d'acqua sono praticamente identiche nei due scenari, con o senza svaso preventivo; gli allagamenti determinati dall'innalzamento del livello del lago, già significativi nello scenario che prevede lo svaso preventivo del lago, diventano molto gravosi nello scenario senza svaso. In quest'ultimo caso, il lago risale ben oltre la confluenza tra i due immissari, inglobandone i tratti terminali. La quota massima del livello idrico del lago in tale scenario è pari a 371.23 m s.m.

Per quanto riguarda il tratto vallivo, il suddetto studio giunge alle seguenti conclusioni:

*"Le analisi sono state condotte in diversi scenari corrispondenti a: tempi di ritorno dell'evento di 20, 200 e 500 anni; livelli del lago a inizio evento, pari alla quota di massima regolazione (assenza di svasi preventivi – 368 m s.l.m.), alla quota di minima regolazione (con svaso preventivo – 364.75 m s.l.m.) ed alla quota di massimo svaso emergenziale (7.0 m a partire dalla massima regolazione) compatibile con i manufatti di scarico (361.0 m s.m.).*

*Il modello matematico di simulazione idraulica ha consentito di mappare per i diversi scenari le aree di esondazione, evidenziando le seguenti principali criticità:*

- Zona di Via Santa Lucia nei pressi di Vestone,
- Abitato di Nozza in destra idraulica,
- Abitato di Barghe in destra e sinistra orografica a monte del ponte storico,
- Abitato di Sabbio Chiese a monte del ponte storico
- Centro storico di Vobarno,
- Abitato di Ponte Pier.

*Le criticità si manifestano generalmente con tempi di ritorno di 200 e 500 anni, a parte via Santa Lucia a Vestone e zone non abitate che presentano allagamenti anche con tempi di ritorno di 20 anni. Lo svaso preventivo dei livelli lacuali dalla massima alla minima regolazione (368.00 - 364.75 m s.l.m.), risulta di fondamentale importanza per la salvaguardia dei territori circumlacuali, mentre assume una minore importanza per i territori sublacuali. Estremamente significativo, sia per i territori circumlacuali che per la valle del Chiese, è il possibile abbassamento dei livelli con svasi eccezionali fino alla quota di 361.00 m s.l.m. (7 m dalla massima regolazione). Tale svaso*

*consentirebbe infatti di limitare le esondazioni nel tratto sublacuale a sole aree non urbanizzate, anche con tempi di ritorno di 200-500 anni".*

Tenuto conto di quanto sopra, si è ritenuto non necessario effettuare ulteriori analisi idrauliche rispetto a quelle già condotte nell'ambito della prima versione del progetto esecutivo del 2018, che sono state ritenute adeguate e sufficienti a consentire la redazione dell'aggiornamento del progetto esecutivo delle "nuove opere di regolazione per la messa in sicurezza del Lago d'Idro".

## 2 MODIFICHE RISPETTO ALLA PRECEDENTE VERSIONE DEL PROGETTO ESECUTIVO

Dal punto di vista delle opere idrauliche, nell'ambito del presente progetto sono state apportate due modifiche rispetto a quanto emerso nella precedente versione del progetto esecutivo. La prima modifica è relativa al profilo longitudinale dell'intradosso della calotta del tratto convergente della galleria di by-pass a valle delle paratoie. Nelle figure sottostanti sono riportati il profilo previsto nella prima versione del progetto esecutivo, il profilo previsto nel presente progetto e il relativo confronto; in particolare si evidenzia che nella prima versione del progetto esecutivo la sommità della calotta è orizzontale, mentre nella presente versione è inclinata (come prevista nel progetto definitivo).

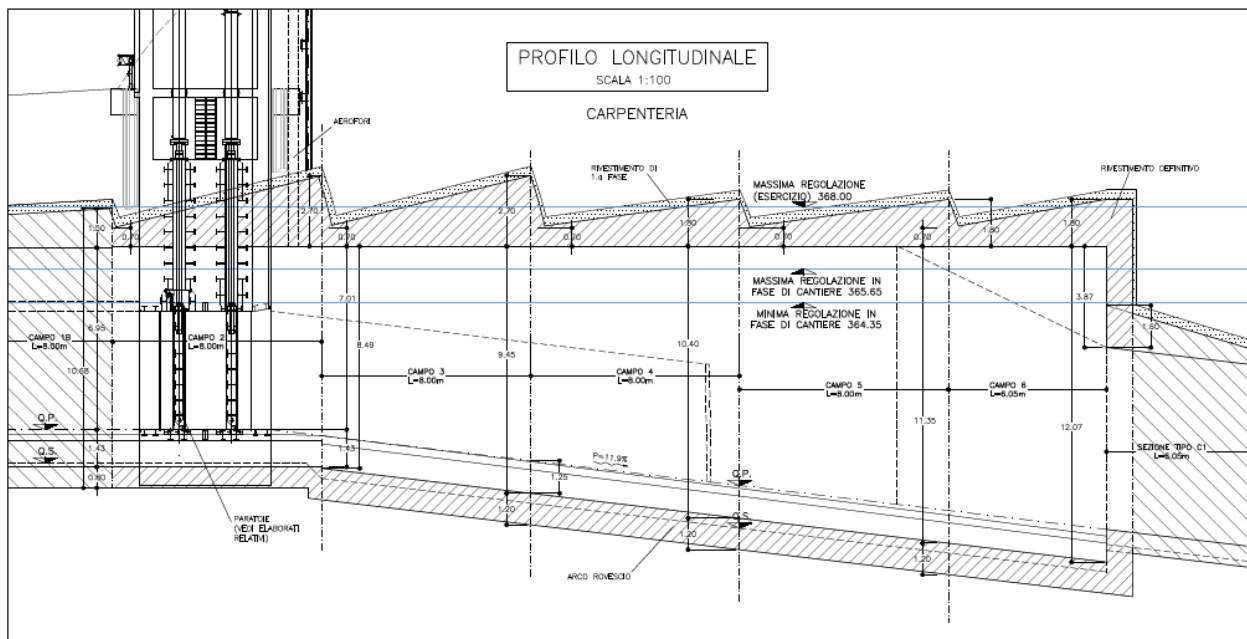


Figura 1 – profilo longitudinale del tratto di convergente della galleria di by-pass a valle delle paratoie, come previsto nella prima versione del progetto esecutivo del 2018

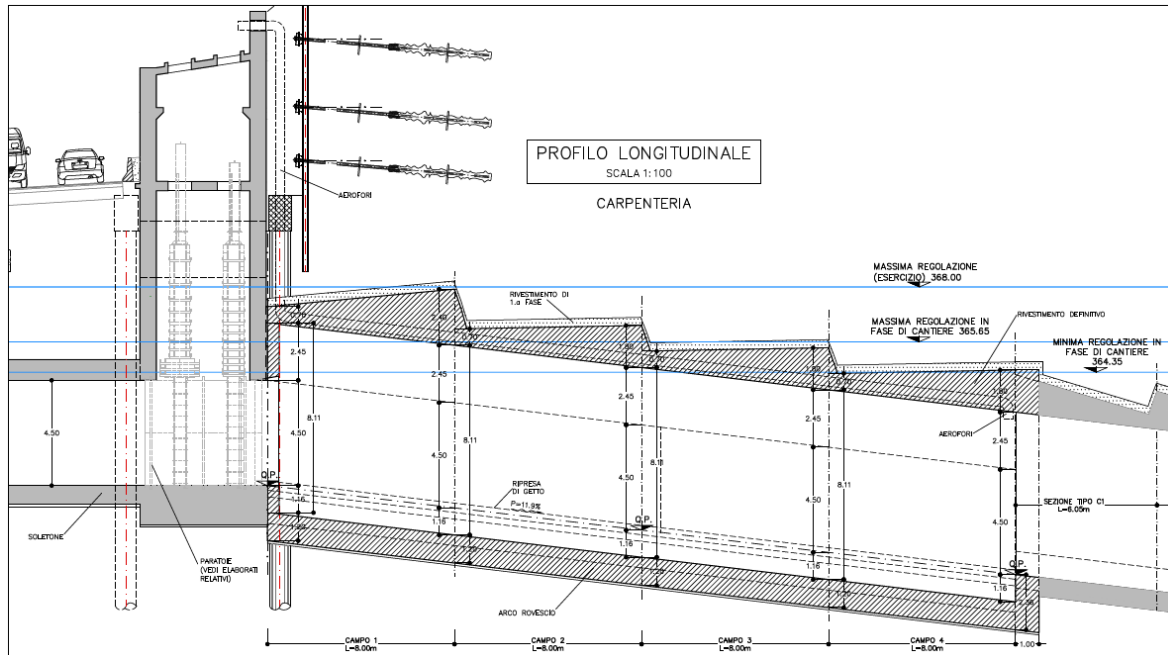


Figura 2 – profilo longitudinale del tratto di convergente della galleria di by-pass a valle delle paratoie, come previsto nella presente versione del progetto esecutivo

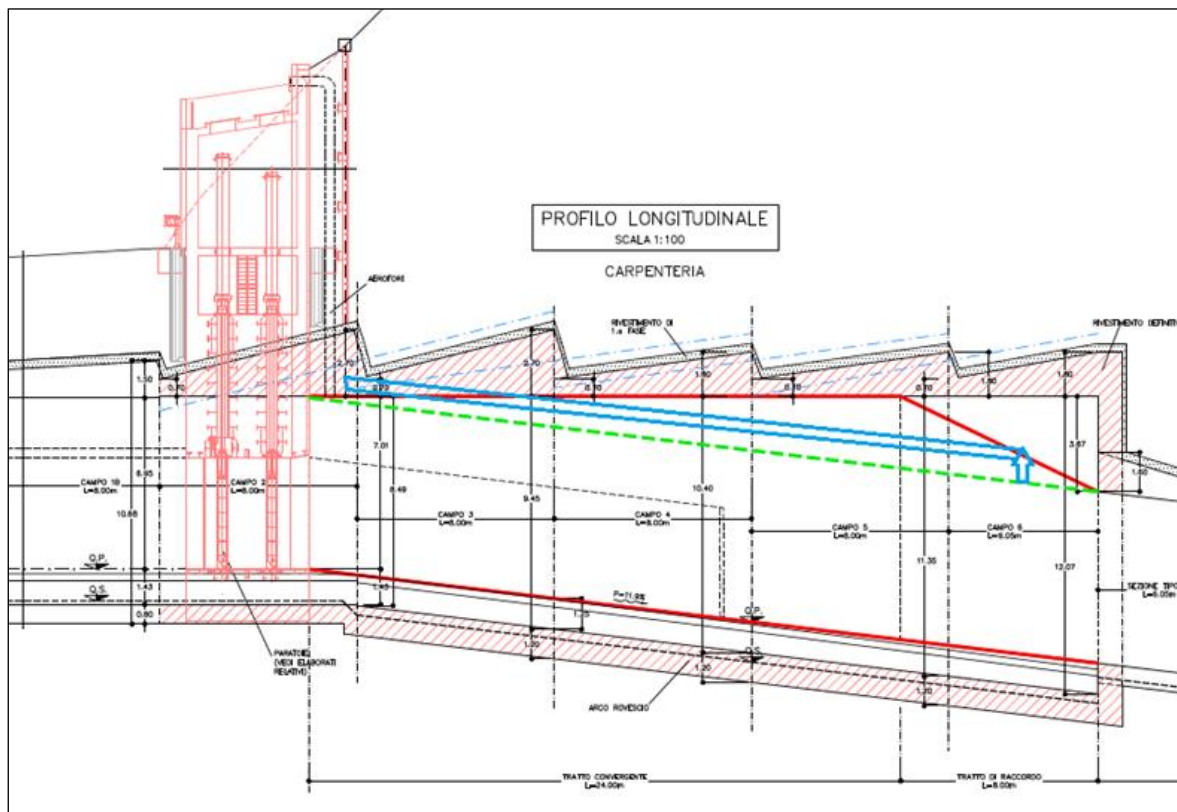


Figura 3 – confronto fra il profilo longitudinale della calotta del tratto di convergente della galleria di by-pass a valle delle paratoie. Il disegno è relativo alla versione del progetto esecutivo del 2018, mentre la linea verde tratteggiata rappresenta il profilo della calotta considerato nella presente versione del progetto esecutivo. La linea rossa continua rappresenta il profilo considerato nel modello fisico.



Tale modifica, che deriva da una scelta di ottimizzazione della geometria di scavo che comporta minori tempi di realizzazione e la riduzione delle quantità di consolidamenti e supporti, non induce problematiche idrauliche, in quanto:

- l'altezza del manufatto, pari a 6.95 m (stesso valore dell'altezza netta della galleria), si mantiene sempre costante lungo l'intero tratto, e siccome il profilo della corrente corrispondente alla portata di progetto assume valori di tirante compresi tra 4.2 m e 4.74 m (misure condotte con il modello fisico), il franco è sempre superiore a 2.2 m;
- il punto più delicato per la problematica associata alle depressioni è notoriamente posto appena a valle delle paratoie, dove si verifica il passaggio tra deflusso in pressione e deflusso a pelo libero, ma in tale posizione il profilo è coincidente alla versione precedente ed inoltre in tale posizione sono già previsti gli aerofori.

Siccome il modello fisico ha messo in evidenza che in corrispondenza del tratto di raccordo tra il convergente e la galleria possono verificarsi delle depressioni, seppur minime e pari a -2.3 cm di colonna d'acqua (punto P1, progressiva 218 cm del modello fisico, concio 42 – cfr. pag. 39 della relazione del modello fisico contenuta nell'elaborato PE-000-IDR-ID-002-RT-A), si è deciso di posizionare ulteriori aerofori con sbocco in corrispondenza di tale punto, delle medesime misure di quelli già previsti appena a valle delle paratoie (4 tubazioni DN400).

La seconda modifica è relativa alle opere di difesa del fiume Chiese in corrispondenza del punto di scarico del manufatto di sbocco della galleria. Nel progetto del 2018, analogamente a quanto previsto nel progetto definitivo, sono previste solo opere di difese spondali, come rappresentato nella figura sottostante.

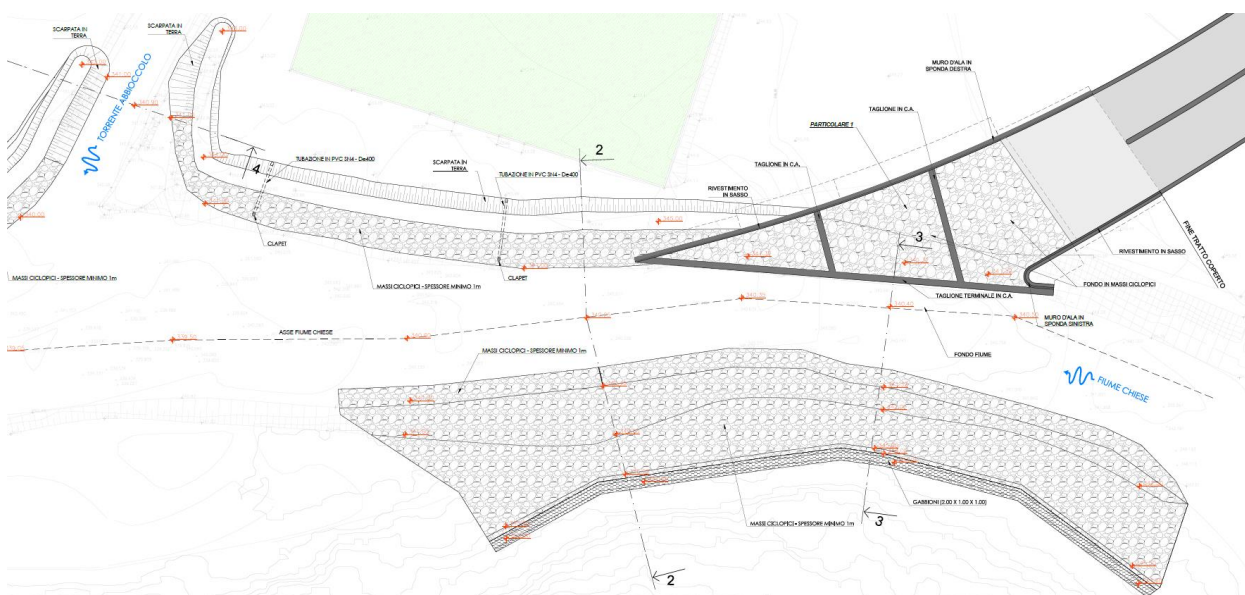
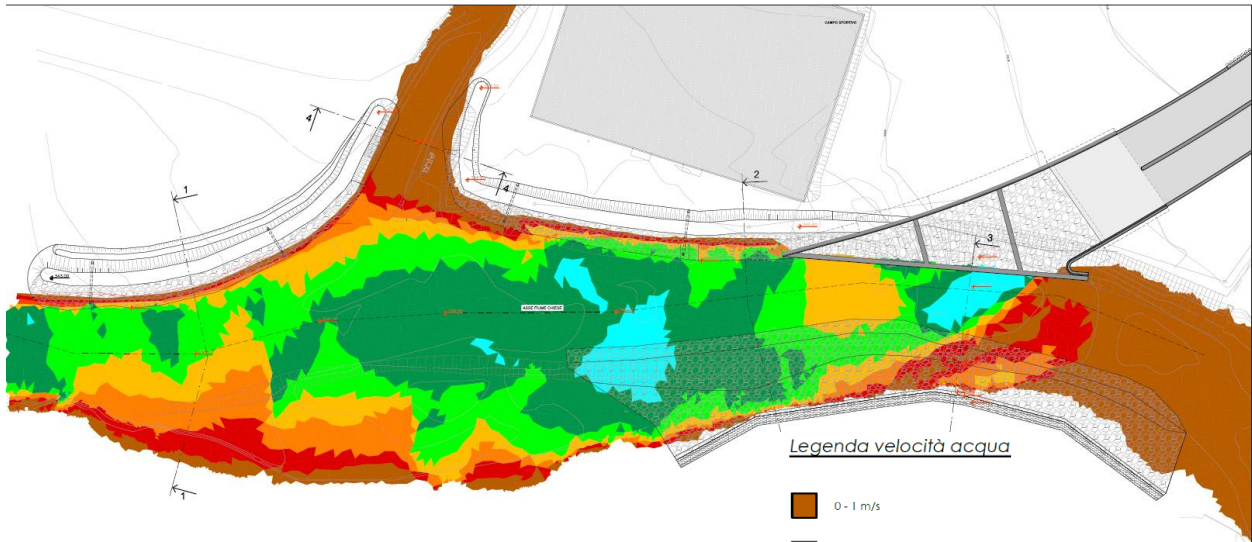


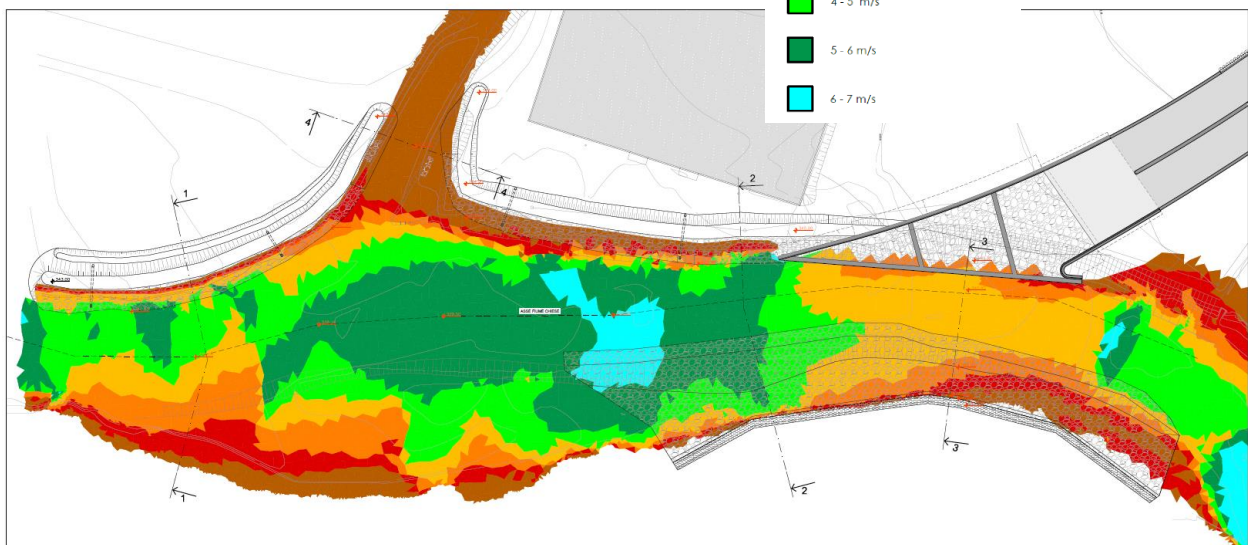
Figura 4 – estratto planimetria di progetto esecutivo del 2018 relativa alle opere di sistemazione dell'alveo in corrispondenza del manufatto di sbocco della galleria

Siccome le analisi idrauliche effettuate hanno messo in luce nei diversi scenari valori di velocità in alveo compresi tra 4 e 6 m/s (v. figure successive), nell'ambito del presente progetto si è deciso di prevedere una protezione in massi ciclopici anche per la parte di fondo alveo compreso tra le opere di protezione delle sponde.

PLANIMETRIA ANDAMENTO VELOCITA' - Q=330mc/s - scala 1:500



PLANIMETRIA ANDAMENTO VELOCITA' - Q=220mc/s dal Chiese + 110 mc dalla galleria - scala 1:500





PLANIMETRIA ANDAMENTO VELOCITA' - Q=220mc/s dal Chiese - scala 1:500

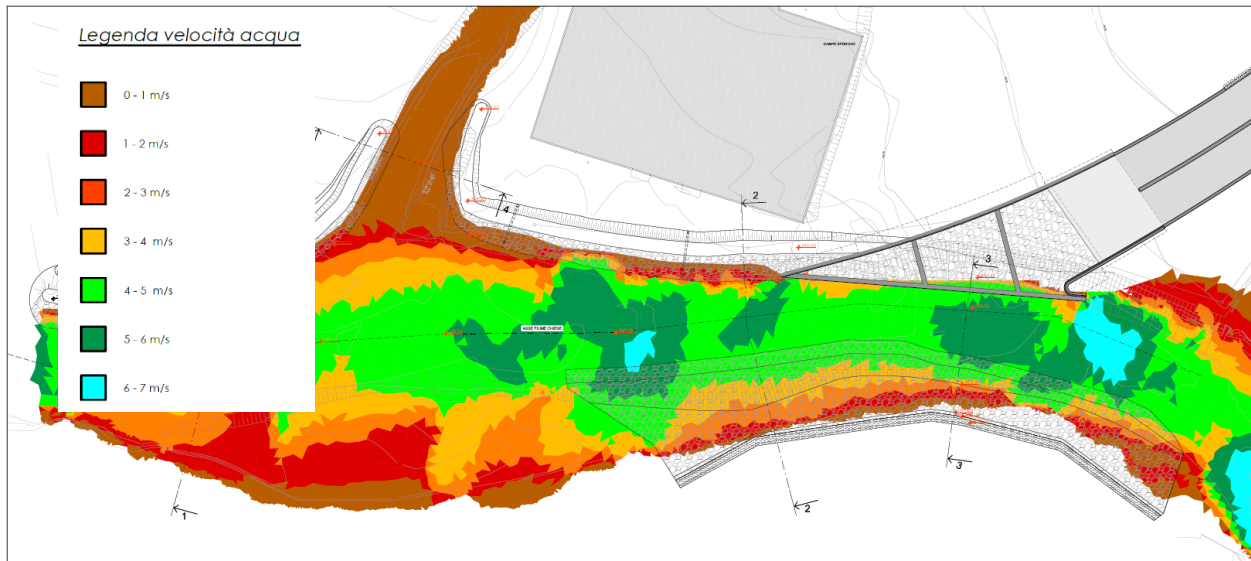


Figura 5 – risultati del modello 2D implementato nell'ambito del progetto esecutivo del 2018 – velocità della corrente

Nella figura seguente si riporta uno stralcio della planimetria di progetto delle opere di difesa in alveo. Per maggiori dettagli si rimanda agli elaborati grafici PE-ALV-ZSB-GE-001-PT-A, PE-ALV-ZSB-GE-002-PT-A e PE-ALV-ZSB-GE-003-SZ-A.

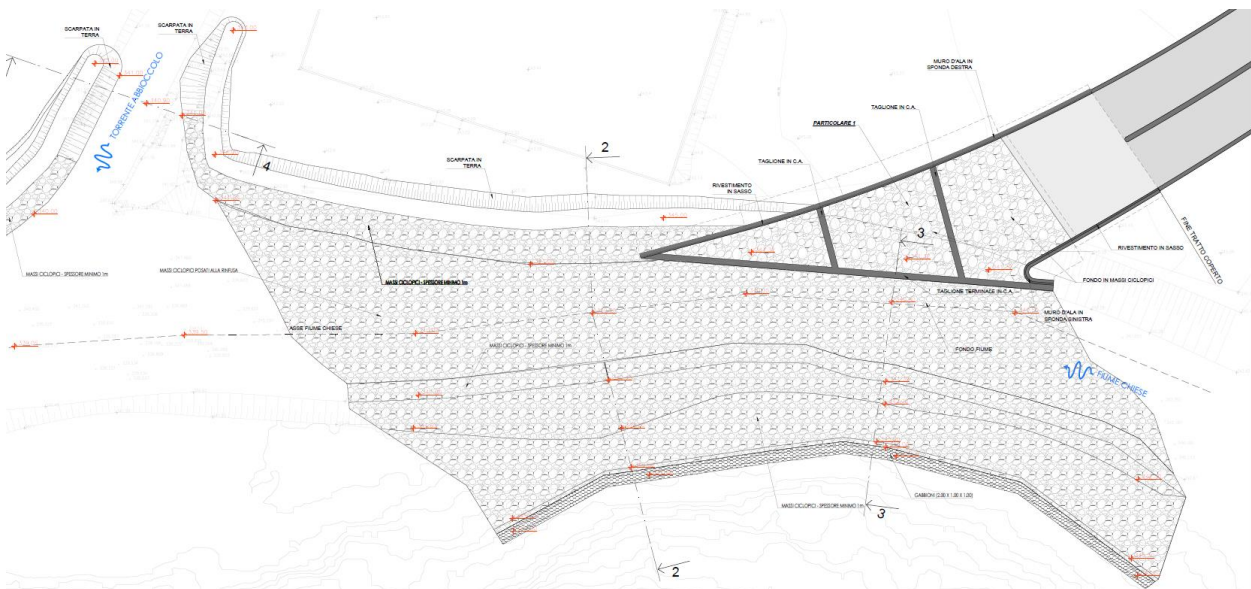


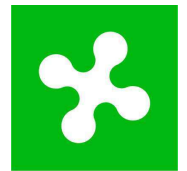
Figura 6 – estratto planimetria di progetto delle opere di sistemazione dell'alveo in corrispondenza del manufatto di sbocco della galleria

Di seguito vengono riportati i contenuti della relazione idrologico-idraulica del progetto esecutivo del 2018.

### 3 CONTENUTI DELLA RELAZIONE IDROLOGICO-IDRAULICA DEL PROGETTO ESECUTIVO - 2018



# REGIONE LOMBARDIA



INFRASTRUTTURE LOMBARDE SpA

Via Pola, 12/14 - 20124 Milano

## NUOVE OPERE DI REGOLAZIONE PER LA MESSA IN SICUREZZA DEL LAGO D'IDRO PROGETTO ESECUTIVO

APPALTATORE



ITINERA S.p.A.  
Via M. Balustra, 15  
15057 Tortona (AL)



A.T.I. PROGETTAZIONE



SINA S.p.A.  
Viale Isonzo, 14/1  
20135 Milano

PROGETTISTI:

Ing. Fabrizio Colla  
Ordine degli Ingegneri di Milano al n. A 20355

RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE  
DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE

Ing. Fabrizio Colla  
Ordine degli Ingegneri di Milano al n. A 20355



S.E.P.I. S.r.l.  
Via F.lli Perini, 93  
38122 Trento

Ing. Marco Meneguzzi  
Ordine degli Ingegneri di Trento al n. 1483, Sez. A

COORDINATORE PER LA SICUREZZA  
IN FASE DI PROGETTAZIONE

Ing. Marco Meneguzzi  
Ordine degli Ingegneri di Trento al n. 1483, Sez. A



Ing. Yos Zorzi  
Via Medicine, 183/f  
41057 Spilamberto (MO)

Ing. Lorenzo Belicchi  
Ordine degli Ingegneri di Parma al n. 1685, Sez. A

Ing. Yos Zorzi  
Ordine degli Ingegneri di Modena al n. 2127, Sez. A

TITOLO ELABORATO

ELABORATI GENERALI  
IDROLOGIA - IDRAULICA  
Idraulica  
Relazione Idraulica

PROGETTISTA



CODICE ELABORATO

progetto fase lotto zona opera tratto ambito tipo progressivo rev.

E 0 0 6 0 9 A E - X 0 0 R I 0 0 0 0 I R R I 0 0 1 0

DATA

31.10.2018

SCALA

NOME FILE

E00609A\_E\_X00\_RI000\_0\_IR\_RI\_001\_0

REV.	DATA	OGGETTO REVISIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
0	31.10.2018	Prima emissione	Bolognesi	Zorzi	Zorzi

INFRASTRUTTURE LOMBARDE S.p.A.



## SOMMARIO

1.	PREMESSA.....	1
2.	IL SISTEMA DI OPERE PER LA REGOLAZIONE DEL LAGO DI IDRO.....	2
2.1.	Opere esistenti – capacita' attuali e future.....	2
2.2.	Opere in progettazione.....	3
3.	MODELLI E STRUMENTI A SUPPORTO DELLA PROGETTAZIONE.....	4
3.1.	Modello 2D.....	4
3.2.	Modello fisico.....	7
4.	IL PROGETTO DEL NUOVO SCOLMATORE.....	8
4.1.	Generalità.....	8
4.2.	Percorso progettuale.....	8
4.3.	Tratto 1 – Imbocco.....	11
4.4.	Tratto 2 – Convergente.....	13
4.4.1.	Modello 2D.....	15
4.4.2.	Dimensionamento degli aerofori.....	18
4.5.	Tratto 3 – Galleria corrente (1° parte).....	19
4.6.	Tratto 4 – Rampa al termine del rettilineo.....	21
4.6.1.	Verifiche a supporto dell'incremento di pendenza nel Tratto 4.....	22
4.7.	Tratto 5 – Galleria corrente (2° parte).....	30
4.8.	Tratto 6 – Manufatto di restituzione al Chiese.....	30
4.9.	Tratto C – Fiume Chiese.....	36
4.9.1.	Dimensionamento delle opere di difesa spondale.....	38
4.10.	Conclusioni sullo scolmatore.....	42
5.	IL PROGETTO DELLA NUOVA TRAVERSA.....	44
5.1.	Scala di deflusso della nuova traversa.....	46
5.2.	Dimensionamento delle opere di difesa spondale.....	48
5.3.	Scala di risalita per la fauna ittica.....	49
5.3.1.	Modello 2D.....	50
5.4.	Conclusioni sulla Traversa.....	54
A.1	Appendice: Descrizione sintetica del modello 2D – InfoWorks ICM.....	55

## 1. PREMESSA

Nella presente relazione idraulica si illustrano le principali assunzioni e le relative verifiche numeriche alla base della progettazione esecutiva delle opere che compongono il sistema di regolazione del lago di Idro, per la messa in sicurezza idraulica del lago stesso.

Cuore dell'intervento, come si vedrà in seguito, è il progetto esecutivo di una nuova galleria con funzione di scolmatore del lago, il cui scopo è quello di ovviare alla minaccia di ostruzione dell'emissario naturale (fiume Chiese) da parte di corpi franosi, i quali già attualmente riducono la funzionalità dalla traversa di regolazione esistente. L'intervento infatti prevede, oltre al nuovo scolmatore, anche la costruzione di una nuova traversa di regolazione circa 300 metri più a monte della attuale.

L'analisi progettuale in parte accoglie ed in parte modifica ipotesi e risultati derivati da precedenti studi e/o da fasi precedenti della progettazione, ma si avvale di strumenti di analisi aventi dettaglio superiore, quali modelli numerici full 2D ed un modello fisico in scala 1:30 che riproduce l'intera galleria di by-pass ed il tratto di Chiese in cui si immette.

Nell'individuazione delle soluzioni tecniche per il nuovo progetto esecutivo, descritte in dettaglio nel paragrafo 4, l'attenzione è stata primariamente posta alle osservazioni mosse al progetto definitivo posto a base gara, da parte degli enti competenti.

Esse si sintetizzano in:

- Elevato grado di riempimento in galleria
- Necessità di approfondimento sull'andamento trasversale dei peli liquidi con verifiche della formazione di roll-waves
- Elevate velocità della corrente in uscita dall'opera di restituzione nel fiume Chiese.

Nell'approfondire gli aspetti di cui sopra, anche grazie all'utilizzo dei sopraccitati strumenti di analisi di livello superiore, sono state riscontrate problematiche che hanno richiesto variazioni talvolta rilevanti rispetto a quanto proposto nel progetto di gara. Tali variazioni verranno elencate nel paragrafo 4.2 introduttivo alle logiche di progettazione e giustificate analiticamente nei successivi paragrafi 4.3 – 4.9.

Le soluzioni sviluppate per il progetto esecutivo e qui rappresentate sono la sintesi di un complesso percorso iterativo, condotto sempre d'intesa con la stazione appaltante, nel quale si è in ogni caso perseguita l'ottemperanza ai seguenti vincoli / dati progettuali:

- Portata di progetto pari a 332 m<sup>3</sup>/s
- Quota di massimo invaso nel lago pari a 371.23 m s.l.m.;
- Livello di attivazione del bypass (quota di massimo svaso ad opera del solo bypass e/o quota di fondo dell'imbocco della galleria) pari a 359.50 m s.l.m.;
- Immodificabilità della geometria e delle quote dell'imbocco della galleria nella parte esterna a monte delle paratoie

## 2. IL SISTEMA DI OPERE PER LA REGOLAZIONE DEL LAGO DI IDRO

### 2.1. OPERE ESISTENTI – CAPACITA' ATTUALI E FUTURE

Le opere di regolazione del lago d'Idro sono ad oggi costituite da:

1. una traversa di sbarramento con paratoie mobili;
2. uno scarico di fondo denominato "galleria degli agricoltori";
3. una derivazione ad uso idroelettrico della centrale ENEL di Vobarno.

Si descrivono sinteticamente le caratteristiche di tali opere, indicando se siano coinvolte o meno nella progettazione esecutiva e facendo riferimento alla loro attuale e futura capacità di scarico.

- 1) Traversa attuale: la capacità di scarico-teorica della traversa attuale è espressa dalla scala di deflusso rappresentata nel grafico di figura 1, scala già presente nel progetto preliminare e riportata nel progetto definitivo. Tuttavia, tale traversa è minacciata da un corpo di frana che ha parzialmente occluso una delle due luci, portandola da 11 a 9 metri. È pertanto prevista la costruzione di un nuovo manufatto, con le stesse finalità, ma posto più a monte.

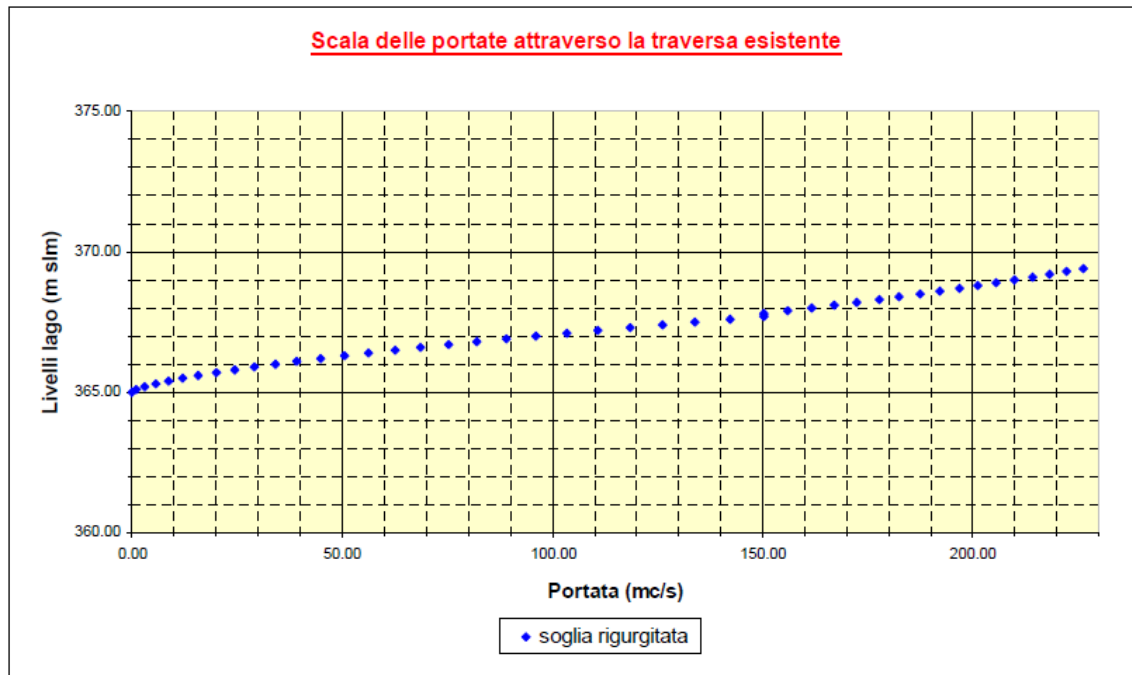


Figura 1 –Scala delle portate attraverso la traversa esistente

- 2) la galleria degli agricoltori è inutilizzata da anni e resterà non utilizzabile in ragione di gravi problematiche strutturali, pertanto la sua capacità è nulla e tale resterà anche nello stato di progetto.
- 3) la centrale idroelettrica di Vobarno riceve acqua attraverso una galleria dedicata, la cui portata massima (prelievo massimo consentito) è di 30 m<sup>3</sup>/s e tale viene considerata anche nelle future condizioni di progetto ad opere ultimate.

## 2.2. OPERE IN PROGETTAZIONE

Le opere oggetto di progettazione esecutiva e trattate nella presente relazione sono rappresentate nella seguente planimetria di inquadramento generale.

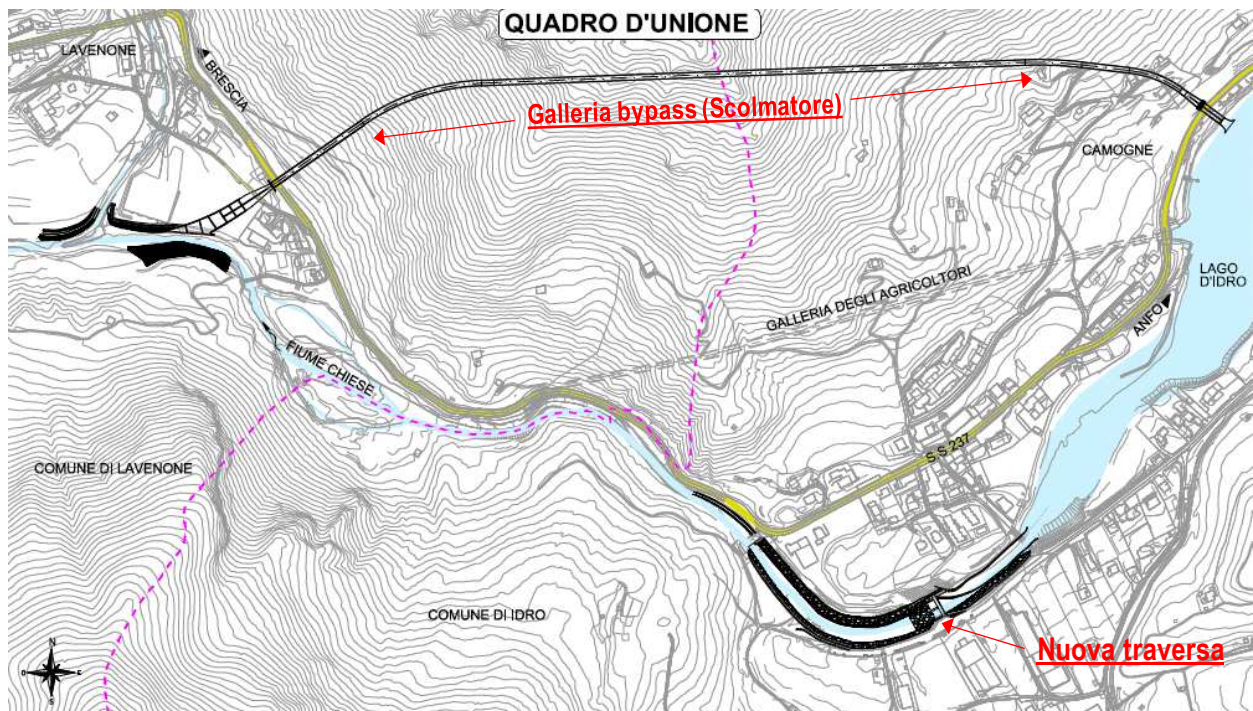


Figura 2 – Planimetria di inquadramento

Si tratta in sintesi di:

- 1) Una nuova traversa sull'emissario naturale del lago (fiume Chiese), posta circa 300 m a monte della traversa esistente, la quale, come si è detto, ha visto ridurre la propria officiosità a causa di un corpo franoso.
- 2) Una galleria con funzione di by-pass (scolmatore), che recapita le acque del lago nel fiume Chiese, a valle del tratto minacciato da movimenti franosi e quindi a possibile rischio di occlusione. La galleria viene progettata per fare fronte ad un evento di piena con tempo di ritorno di 1000 anni e di farlo anche in qualità di unica opera di scarico del lago (in caso l'emissario naturale sia ostruito da detriti di frana).

Entrambe le opere concorrono alla regolazione del lago di Idro, nell'ottica della protezione idraulica degli insediamenti e degli abitati in prossimità del lago stesso.

Per i dettagli sulle caratteristiche delle opere in progetto, si rimanda alle successive sezioni dedicate della relazione.

### 3. MODELLI E STRUMENTI A SUPPORTO DELLA PROGETTAZIONE

Nell'ambito delle ingegnerizzazioni necessarie allo sviluppo del progetto esecutivo, si è dovuto indagare ed ottemperare in maniera rigorosa alle osservazioni mosse al progetto definitivo ovvero agli aspetti evidenziati dalla struttura ministeriale in conferenza dei servizi. L'approccio metodologico utilizzato nel progetto a base gara, che era basato sulla verifica per singole sezioni delle opere in progetto, è stato dunque reso sinergico e sequenziale mediante la realizzazione di un modello bidimensionale unico, il quale ha permesso di investigare le fenomenologie idrauliche sull'intero sviluppo del bypass in progetto, dalle sezioni di imbocco (in particolare per ciò che avviene a valle delle paratoie) fino a quelle di sbocco, prima dell'immissione in Chiese.

Il modello unico viene completato includendo le sezioni poste a valle della sezione di sbocco nel Chiese del bypass in progetto: tali informazioni risultano dunque rappresentative delle condizioni specifiche del progetto esecutivo che rispetto al progetto definitivo ha inteso riprodurre l'intero by-pass, sia attraverso il modello numerico 2D, sia attraverso il modello fisico.

Al modello 2D si è affiancato l'uso del modello 1D (HEC-RAS) per valutazioni di massima e/o per confronto, in particolare quando l'elevato grado di riempimento delle sezioni chiuse (tipo policentrica) portavano ad uscire dal campo di piena rappresentatività del modello 2D.

#### 3.1. MODELLO 2D

Per le modellazioni bidimensionali si è utilizzato INFOWORKS ICM® le cui caratteristiche peculiari vengono illustrate in una Appendice dedicata.

Il modello è stato costruito in primo luogo riproducendo la geometria dello scolmatore mediante un CAD tridimensionale, poi convertito in una superficie TIN (Triangular Irregular Network).

InfoWorks infatti, per costruire la propria mesh di calcolo, accetta come superfici di background, sia superfici di tipo "grid", sia TIN. Quest'ultima non avendo limiti di discretizzazione si è rivelata più adatta a descrivere le geometrie dei manufatti in modo preciso.

Il maggior limite del suddetto programma, utilizzato per le modellazioni bidimensionali, è dato tuttavia dall'impossibilità di rappresentare pienamente le sezioni "chiuse". Esso risulta da un lato "trascurabile" per le camere e i manufatti sub-rettangolari dove il moto a pelo libero avviene in sezioni caratteristiche prive di convergenze dello speco verso il soffitto o dove il moto si svolge "lontano" dall'incipit di tale convergenza, richiede attente valutazioni di equivalenza idraulica nel caso specifico del moto in galleria dove l'altezza idrometrica si spinge oltre al valore del raggio della policentrica.

A puro titolo esemplificativo si veda nell'immagine seguente due sezioni del modello il primo in ingresso nella galleria a valle della convergenza nella tratta di monte, il secondo preso in prossimità del convergente, a valle delle paratoie:

- La sezione 1 rappresenta un tirante idrometrico veritiero in quanto le pareti sono verticali
- La sezione 2 necessita di considerazioni di equivalenza idraulica che "innalzano" il valore del tirante idrometrico.



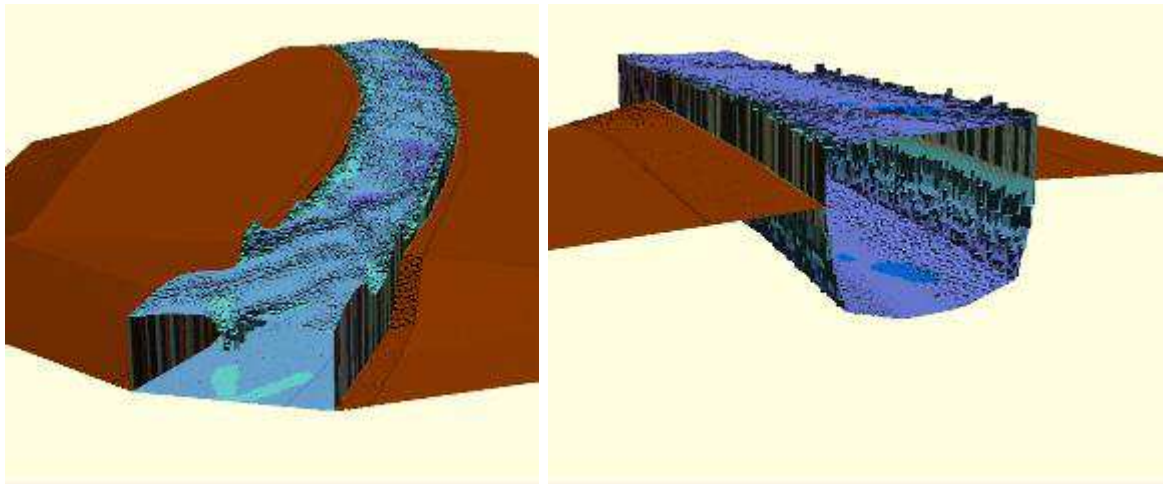


Figura 3 – Esempio di limite di rappresentazione di una sezione chiusa da parte di un modello 2D. A sinistra la Sezione 1 (scatolare) a destra la Sezione 2 (policentrica)

Una volta costruita la superficie TIN, si è proceduto a generare la mesh di calcolo, come sempre nell'intento di trovare un equilibrio fra una rappresentazione di elevato dettaglio ed i tempi di calcolo, nonché la possibilità di riuscire poi a gestire i risultati in maniera efficiente.

Volendo privilegiare il dettaglio, in particolare per i fenomeni interni alla galleria, si è scelto di generare una mesh particolarmente fitta. Le dimensioni caratteristiche delle celle sono dell'ordine di  $10^{-2}$  m nella parte di galleria e manufatto di restituzione, il che ha comportato conseguenti aggravamenti nei tempi di calcolo.

Per il tratto di fiume invece, il background è costituito da un modello digitale del terreno ricavato mediante volo LIDAR avente risoluzione  $1 \times 1$  m, sul quale si è generata una mesh avente dimensioni caratteristiche delle celle dell'ordine di 1 m. La mesh sul Chiese però è stata generata avvalendosi della funzione adaptive, una funzione che permette di raffittire la maglia in corrispondenza di rapide variazioni di quota. In pratica maggiore è la pendenza, più fitta è la magliatura.

Una volta costruita la mesh, si sono operate differenti combinazioni di configurazioni modificate delle sezioni del manufatto oggetto di verifica e di macro-scabrezze che interessavano per lo più il manufatto di restituzione in corrispondenza del setto dove l'intento di ottenere una corrente veloce, ritardata, ma che rimanesse tale fino allo sbocco nel Chiese, ha richiesto l'inserimento di un tratto a scabrezza diffusa nei due collettori scatolari di valle, quantificata in sede di calibrazione in una scabrezza equivalente pari a 0.045 (secondo Manning). Tali accorgimenti, poi tradotti nel modello fisico (ed infine nel progetto) in 4 soglie da 60 cm, hanno nei fatti permesso di verificare la bontà della proposta in termini concettuali e di raggiungere, come si vedrà, velocità medie caratteristiche dell'ordine di 6-6.5 m/s contro gli oltre 9 m/s del progetto definitivo.

La figura seguente mostra i diversi valori di scabrezza associati alla mesh del modello per la galleria, il tratto con macro-scabrezze e l'alveo del Chiese.

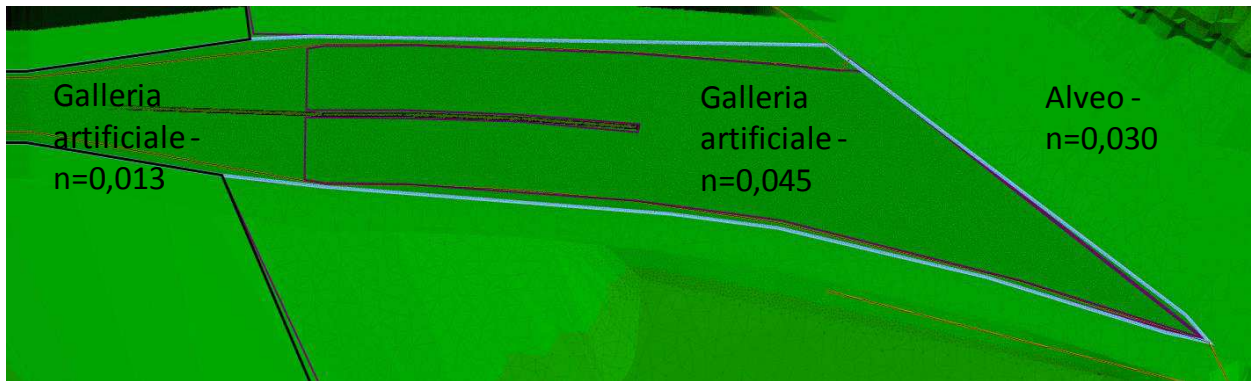


Figura 4 –Valori di scabrezza secondo Manning associati alle diverse parti del modello

Per quanto riguarda le condizioni al contorno, particolare attenzione è stata dedicata a quella di imbocco. Infoworks infatti prevede l'inserimento di organi specifici, quali le paratoie piane. In prima istanza si era pensato di avvalersi di queste funzionalità, rappresentando il lago come un livello imposto ed i condotti di imbocco semplicemente mediante le paratoie, ossia trascurando le perdite di carico lungo i condotti stessi.

Essendo tuttavia l'elemento paratoia del modello un elemento matematico e non una geometria 2D, questa scelta non permetteva di riprodurre correttamente le velocità in uscita dai condotti e/o gli effetti di contrazione dovuti ad aperture parziali delle paratoie.

Purtroppo Infoworks non permette l'attribuzione simultanea di condizioni di portata e velocità o livello. Pertanto, al fine di riprodurre correttamente le caratteristiche idrodinamiche della corrente a valle delle paratoie, sono state costruite nel modello due rampe a monte delle paratoie, calibrate in modo da poter conferire la giusta velocità e tirante in ingresso al convergente.

Un lungo processo di calibrazione ha quindi permesso di trovare la struttura "virtuale" che fosse in grado di generare mediante una corrente a pelo libero le condizioni che si verificano in due condotti in pressione a sezione quadrata 4.5x4.5, quando attraverso loro transita una portata di 332 m<sup>3</sup>/s, ossia tale da generare in corrispondenza delle paratoie, un livello di 4.50 m ed una velocità di 8.2 m/s.

Per quanto riguarda le condizioni di valle nel fiume Chiese, si è imposta una condizione di tipo "normal", condizione nella quale il software impone al confine del dominio di calcolo un'altezza pari a quella di moto uniforme, associata alle pendenze locali.

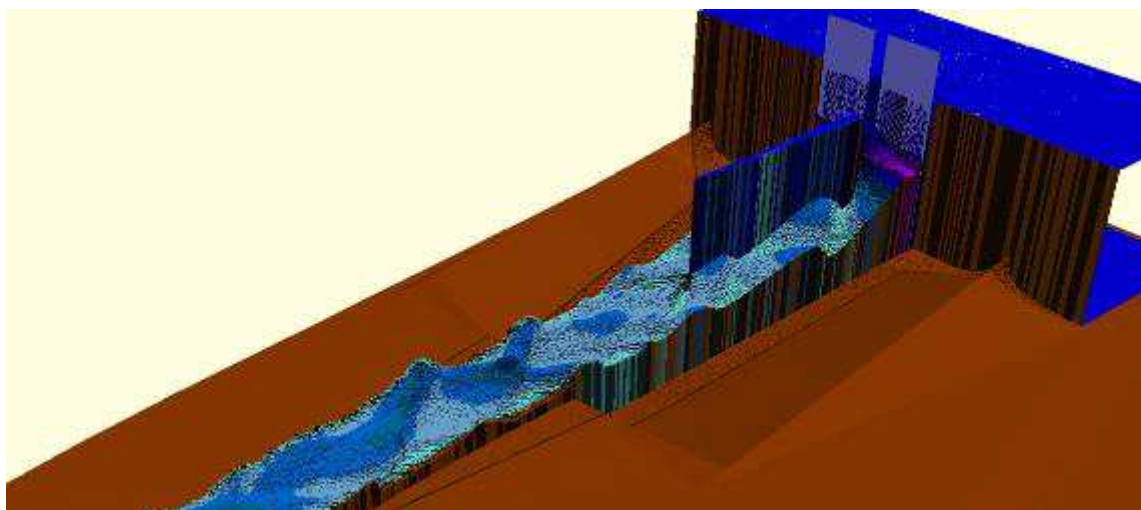


Figura 5 – Vista tridimensionale dell'imbocco, modellato mediante l'elemento paratoia presente nel software. Da notare la riproduzione delle onde di riflessione lungo il manufatto convergente

### 3.2. MODELLO FISICO

Vista la particolarità delle fenomenologie indagate e la rilevanza della forma da assegnare a certi dettagli costruttivi, dettagli sulla cui rappresentazione la modellistica numerica non sempre può dirsi efficace, la progettazione esecutiva dell'opera ha dovuto avvalersi anche della modellazione fisica dell'opera stessa.

Il modello, interamente a fondo fisso, è stato realizzato in scala 1:30 secondo la similitudine di Froude ed ha rappresentato l'intero manufatto scolmatore (partendo dalle paratoie) ed un tratto sufficientemente significativo del fiume Chiese tale da riprodurre debitamente i fenomeni allo sbocco della galleria e gli eventuali effetti di rigurgito.

Le attività di modellazione, la cui descrizione ed illustrazione dei risultati sono incluse in un elaborato specifico, sono state condotte presso il Politecnico di Milano ed hanno richiesto due fasi: una principale ed una di affinamento (definite "ANTE" e "POST" al paragrafo 4.6) sulle problematiche evidenziate proprio dalla fase iniziale e che non erano state appieno previste o descritte dai modelli numerici. Nello specifico:

#### PRIMA FASE

La prima fase ha previsto la modellazione di un manufatto avente le seguenti caratteristiche:

Tratto da imbocco a paratoie:	Come da progetto a base gara.
Da paratoie a inizio galleria	Nuovo tratto a forte pendenza, test condotti per pendenze pari a 8% e 11.9%. Tale pendenza interessa anche i primi metri della galleria, a sezione policentrica, con diametro 6.95 m (in scala reale).
Galleria	Tratto a sezione costante (policentrica $D=6.95$ m) e pendenza costante pari a 0.85%, fino a circa 20 m dall'immissione nel manufatto di restituzione
Disconnessione	Tratto a forte pendenza (circa 12%) che separa la galleria dal manufatto di restituzione.
Manufatto di restituzione	Sezione divergente e separazione in due canali di restituzione a mezzo di setto. Macroscabrezze inserite nei canali di restituzione rappresentate da 4 ordini di soglie alte 60 cm (in scala reale). Pendenza costante pari a 0.3%.

#### SECONDA FASE

Nella prima fase si fissa a 11.9% la pendenza del tratto fra paratoie ed inizio galleria.

Tuttavia, in ragione di elevati gradi di riempimento riscontrati al termine del rettilineo principale della galleria, si provvede a traslare in quella posizione il tratto a forte pendenza (circa 12%) che separa la galleria dal manufatto di restituzione.

Viene quindi rimossa la disconnessione (salto di quota) fra la galleria policentrica ed il manufatto divergente di restituzione.

Viene inoltre affinata la forma del setto centrale che divide la corrente nei due canali di restituzione.

## 4. IL PROGETTO DEL NUOVO SCOLMATORE

### 4.1. GENERALITÀ

La galleria di by-pass a servizio del lago di Idro, per le prestazioni che le sono richieste in qualità di derivatore di emergenza del lago stesso, nonché per i vincoli di natura plano-altimetrica e geologica che ne condizionano il tracciato, si presenta come opera complessa dal punto di vista idraulico. In particolare il deflusso attraverso l'opera alterna tratti in pressione (da imbocco sotto battente a paratoie – Tratto 1), e tratti a pelo-libero (galleria vera e propria e restituzione in alveo - Tratti da 2 a 6)

### 4.2. PERCORSO PROGETTUALE

In base ai vincoli elencati al paragrafo 1, lo scolmatore ed in particolare la parte in galleria, deve veicolare le acque da quota 359.50 m s.l.m., che è sia quota di imbocco dell'opera, sia quota del fondo in corrispondenza delle paratoie (inizio del Tratto 2, figura 6), fino a quota 341.61 m s.l.m., termine della galleria a sezione corrente (fine Tratto 5, inizio Tratto 6).

Si tratta di un dislivello di quasi 18 metri, che nel progetto a base gara venivano così distribuiti:

- Circa 8 metri assorbiti da una rampa a forte pendenza (16.7%) posta nel tratto finale della galleria, la quale terminava in una vasca di dissipazione
- Circa 10 metri distribuiti in modo omogeneo sui restanti 1200 metri di galleria, alla pendenza costante di 0.85%

Nel corso delle analisi di dettaglio svolte, come si vedrà giustificato in dettaglio nei successivi paragrafi, si è riscontrato che l'assetto sopra descritto non fosse in grado di garantire la dovuta officiosità dell'opera, ossia non garantiva il transito della portata di progetto in condizioni di efficienza e sicurezza.

Ricordando che la galleria è progettata per funzionare a pelo libero (non in pressione), si rammenta che il motore del moto a pelo libero è la forza di gravità, in questo caso rappresentata dalla pendenza e/o dai dislivelli. Pertanto, in primo luogo, per superare le problematiche emerse è stato necessario rivedere la distribuzione delle pendenze e dei dislivelli di cui sopra. Congiuntamente, si è rivelato necessario anche un incremento del diametro della sezione policentrica della galleria, portato a 6.95 m, rispetto ai 6.50 m previsti nel progetto a base gara. Le ragioni analitiche alla base della nuova distribuzione delle pendenze e della scelta del nuovo diametro sono riportate in dettaglio ai paragrafi 4.4 e 4.5.

Il progetto esecutivo sviluppa soluzioni tecniche che consentono un corretto funzionamento dell'opera, combinando in maniera ottimale i risultati emersi (in fasi successive) nel corso della progettazione stessa e le risultanze derivanti dalle attività di modellazione fisica.

Per meglio comprendere il funzionamento dello scolmatore nelle parti che lo compongono e conseguentemente comprendere le ragioni alla base delle scelte progettuali (dimensionamento), si rimanda allo schema di figura 6.

Per le ragioni sopra introdotte e di seguito giustificate analiticamente, la nuova soluzione progettuale individuata:

- **introduce** e dimostra la necessità di una disconnessione idraulica (tratto a forte pendenza), nel convergente a valle delle paratoie, dalle paratoie stesse fino poco oltre il raccordo con la sezione policentrica.
- **Mantiene** la forma policentrica della sezione corrente della galleria, ma ne aumenta il diametro da 6.50 m a 6.95 m
- **introduce** e dimostra la necessità di una seconda disconnessione idraulica in galleria, al termine del tratto rettilineo (Tratto 3). Tale necessità e la problematica che l'ha generata sono emerse

grazie alle prove su modello fisico.

- **elimina**, dimostrandone la sostenibilità sia mediante modello numerico ed attraverso le evidenze sperimentali del modello fisico, la discontinuità idraulica (“dislivello”) al termine della galleria
- **elimina** (conseguentemente) la vasca di dissipazione al termine del sopraccitato “dislivello” al termine della galleria
- **ottimizza** l'immissione in Chiese del manufatto di sbocco della galleria, modificandone l'ingombro planimetrico da Via Marconi verso valle, allargando (nel rispetto delle aree di esproprio) il canale di restituzione di circa 2.50 m verso Ovest
- **rimuove** circa 30 metri della soletta di copertura del doppio canale di restituzione, anticipando quindi il momento in cui l'acqua fluisce a cielo aperto
- **mantiene** pertanto il moto in corrente veloce nel manufatto di restituzione, ritardandolo progressivamente ed **esclude** i casi di formazione di risalto idraulico nei tratti a sezione chiusa (limitando conseguenti oneri di dimensionamento e/o incertezze nel posizionamento degli aerofori).

Come più volte evinto (e come per altro evidenziato nella relazione descrittiva della modellazione fisica dell'opera di scarico allegata al progetto definitivo a base gara) la camera di dissipazione proposta nel progetto a base gara non sortiva gli effetti desiderati. Infatti, nel progetto a base gara le velocità di immissione nel fiume Chiese (in uscita dai canali di restituzione) risultavano analoghe a quelle riscontrate nelle sezioni conclusive della sezione corrente della galleria (circa 9.5 m/s), rendendo nei fatti pleonastico il ruolo della camera di dissipazione.

In aggiunta alla mutata gestione della corrente nel tratto terminale dello scolmatore, si sono resi necessarie ulteriori apprestamenti, volti sia al perseguimento di condizioni di funzionamento in sicurezza, sia all'ottimizzazione degli effetti dovuti a perturbazioni locali. Effetti evidenziati dal modello numerico 2D e dalle prove svolte su modello fisico.

In sostanza, il nuovo assetto progettuale conferisce pendenza (sinonimo di energia cinetica/velocità) alla corrente nei punti più critici, ossia ove il livello e quindi in grado di riempimento della galleria tenderebbero a crescere verso valori non affidabili o non sostenibili.

Il dislivello di quasi 18 metri viene così ridistribuito:

- Circa 5 metri assorbiti da una rampa a forte pendenza (11.9%) posta nei primi 44 metri a valle delle paratoie (Tratto 2)
- 2 metri associati ad un breve tratto (circa 17 metri) al termine del rettilineo in galleria (Tratto 4)
- 11 metri distribuiti in modo omogeneo sui restanti 1250 metri di galleria alla pendenza costante di 0.85% (Tratti 3 e 5)

I benefici di tale nuovo assetto sono possibili anche in ragione del dovuto incremento del diametro della Galleria, sulle cui ragioni, come già detto, si approfondisce al par. 4.5.

A valle di questa ridistribuzione viene mantenuta la pendenza costante dello 0.3% lungo tutta l'opera di restituzione, conservando una quota compatibile di sbocco nel fiume Chiese.

Nelle pagine seguenti verranno approfondite le scelte progettuali di cui sopra. L'esposizione si baserà sui tratti numerati come da figura 6 e da tabella associata.



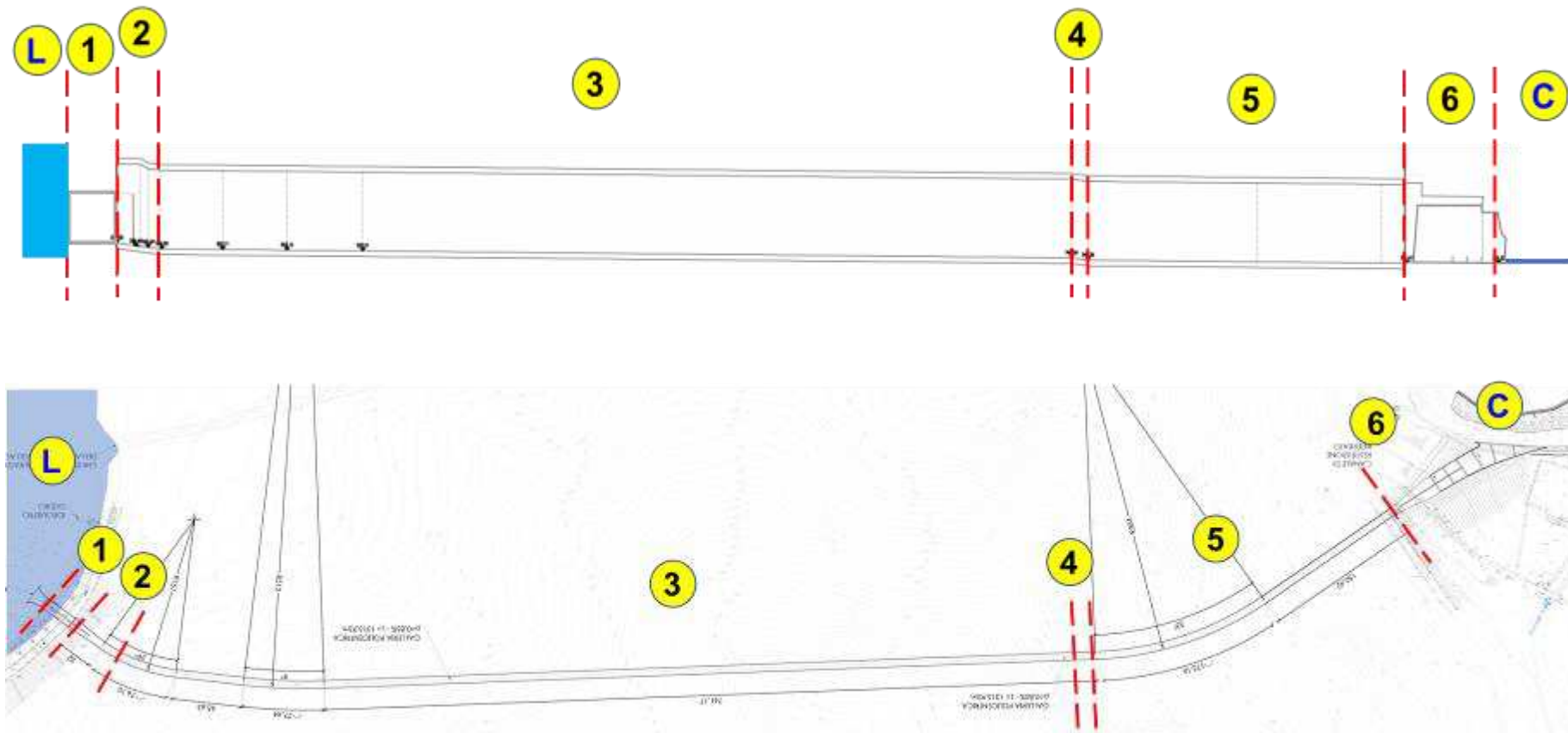


Figura 6 - Profilo longitudinale e planimetria dello scolmatore in progetto con indicazione dei tratti omogenei per caratteristiche idrauliche

Tratto	Tipo di sezione	Pendenza	Progressiva (m)	Tipo di moto ( $Q = 332 \text{ m}^3/\text{s}$ )
L	Lago di Idro	---	-40	---
1	Scatolare 2x (4.5 x 4.5m)	0.0%	Da -40.00 a 0.00	Luce sotto battente
2	Convergente	11.9%	Da 0.00 a 24.00	Corr. veloce accelerata
2	Policentrica (6.95 m)	0.85%	Da 24.00 a 44.10	Corr. veloce accelerata
3	Policentrica (6.95 m)	0.85%	Da 44.10 a 975.59	Corr. veloce ritardata
4	Policentrica (6.95 m)	11.9%	Da 975.59 a 992.34	Corr. veloce accelerata
5	Policentrica (6.95 m)	0.85%	Da 992.34 a 1315.93	Corr. veloce ritardata
6	Divergente (doppio canale)	0.30%	Da 1315.93 a 1411.81	Corr. veloce ritardata
C	Fiume Chiese	---	1411.81	Corr veloce

#### 4.3. TRATTO 1 – IMBOCCO

L'ingresso dell'acqua nello scolmatore avviene mediante due condotti a sezione quadrata di lato 4.5 m. I condotti sono progettati per essere sempre sommersi. La sezione di imbocco prevede muri ad ala leggermente inclinati ed una forma arrotondata della sommità del condotto (il cosiddetto "bevel").

I due condotti, lunghi circa 40 metri, sono assimilabili a due culvert che funzionano in modalità "outlet control" e nello specifico secondo il funzionamento "Type 6" definito dalla USGS (figura 7).

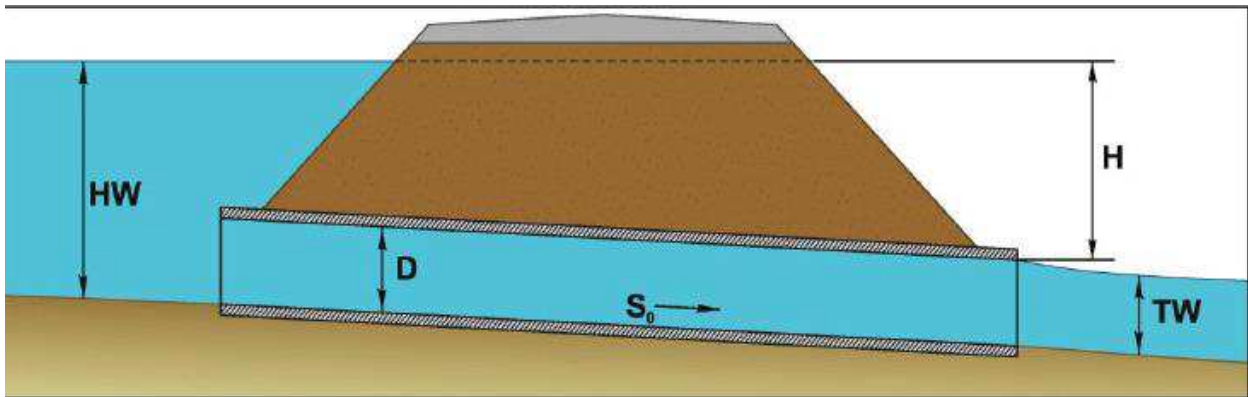


Figura 7 – Funzionamento di tipo 6 (Outlet Control) in base alla classificazione USGS.

Quando i condotti funzionano in pressione la perdita totale di carico attraverso di essi ( $\Delta H$ ) è valutata adottando la seguente formula:

$$\Delta H = h_{en} + h_f + h_{ex}$$

dove:

- $h_{en}$  sono le perdite di carico di ingresso (m),
- $h_f$  sono le perdite per attrito lungo il condotto (m),
- $h_{ex}$  sono le perdite di carico in uscita (m).

Le perdite per attrito sono computate adottando la formula di Manning:

$$h_f = L \left( \frac{Qn}{AR^{2/3}} \right)^2$$

dove:

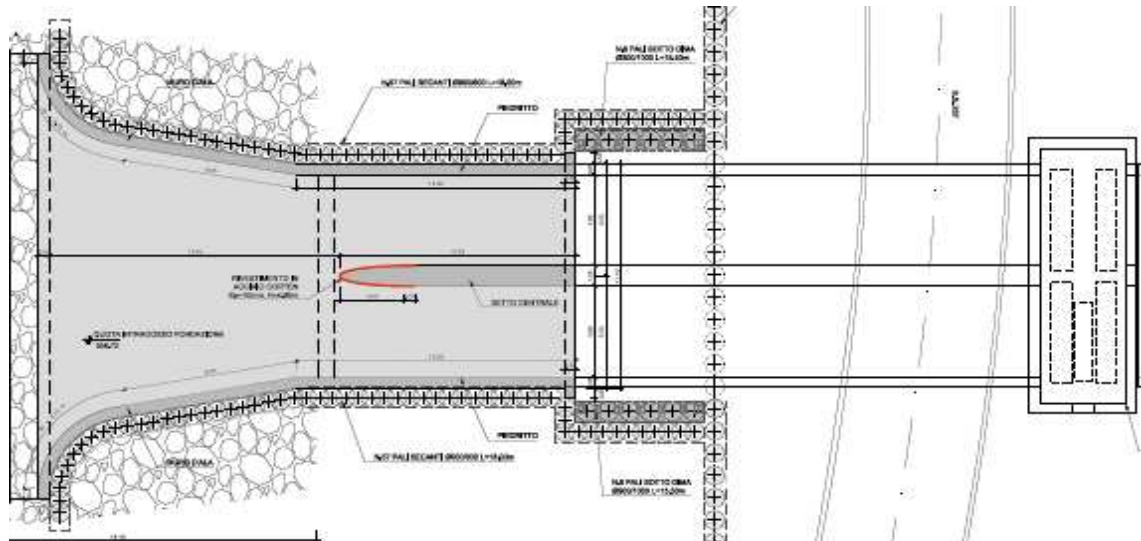
- L è la lunghezza del culvert misurata lungo l'asse del condotto (m),
- Q la portata transitante (m<sup>3</sup>/s),
- n il coefficiente di attrito di Manning (s/m<sup>1/3</sup>),
- A l'area della sezione fluida (m<sup>2</sup>),
- R il raggio idraulico (m).

Pertanto:

$$\Delta H = \left( k_{en} + k_{ex} + \frac{2gLn^2}{R^{4/3}} \right) \frac{V^2}{2g}$$

dove, trattandosi di casi in cui il condotto è sicuramente pieno,  $V = Q/A$

Applicando le equazioni proprie dei culvert in regime di "Outlet control", si sono analizzati i numerosi coefficienti disponibili in letteratura e ricavati sperimentalmente. Nel caso con muri d'ala aventi inclinazione pari a 0 gradi (muri paralleli ai condotti) ed il bevel arrotondato, si ha un valore del coefficiente di ingresso  $k_{en}$  pari a 0.54. Considerando che i muri d'ala sono leggermente inclinati (svasati), tale coefficiente potrebbe risultare inferiore. Per il coefficiente di uscita, si è adottato l'usuale e cautelativo  $k_{ex} = 1$ .





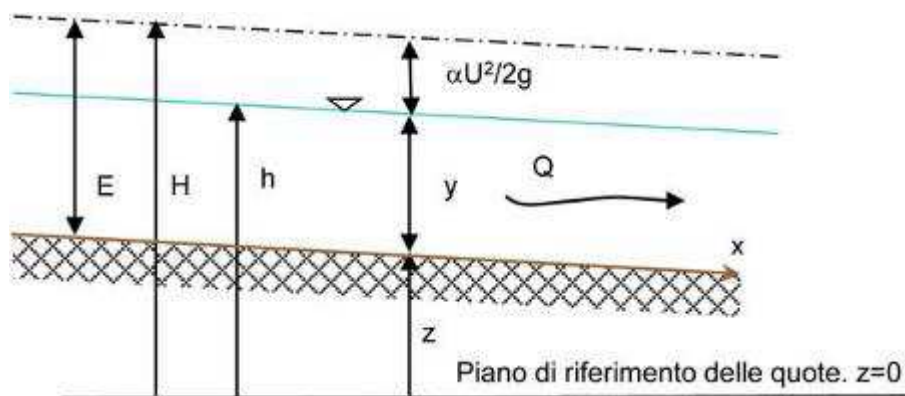


Figura 9 – Rappresentazione dei livelli energetici in una corrente a pelo libero

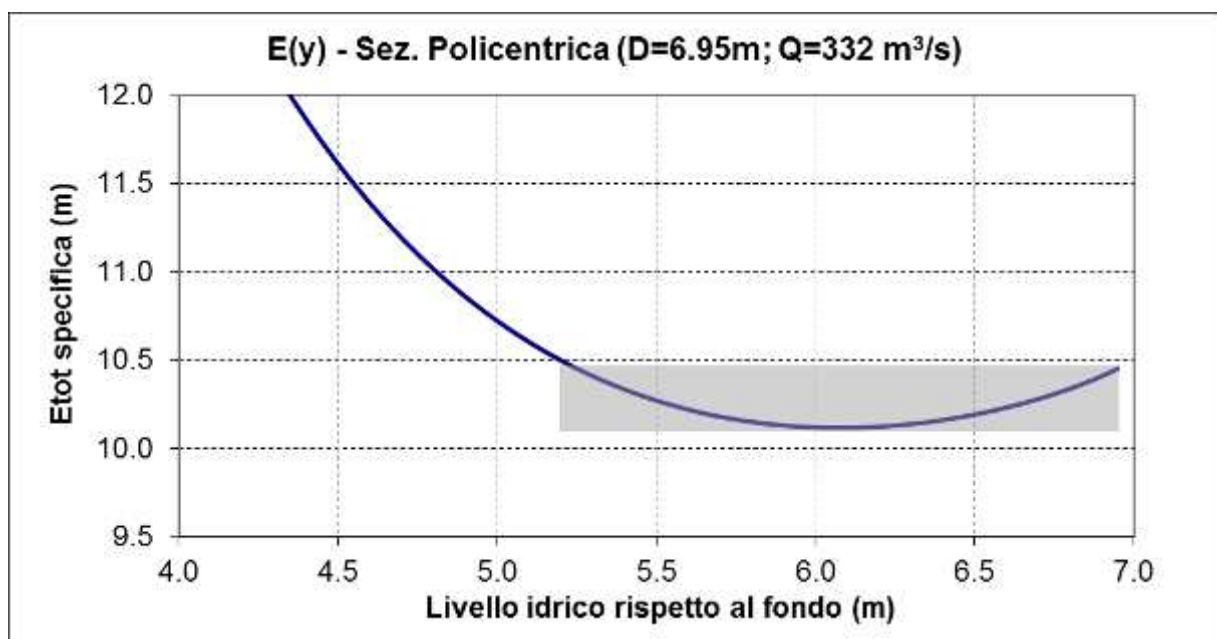


Figura 10 – Energia specifica in funzione del livello idrico per una sezione policentrica e per  $Q = 332 \text{ m}^3/\text{s}$

Per una data portata (qui fissata in  $332 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e per una certa sezione (Sezione policentrica avente diametro 6.95 m, per la cui definizione si rimanda al successivo paragrafo sul Tratto 3) il grafico di figura 10 rappresenta un legame funzionale tra energia specifica e altezza d'acqua.

Ciò significa che, affinché in quella sezione transiti la portata prevista, la corrente deve possedere una data energia, la quale è funzione del livello (grado di riempimento) della sezione.

Riferendosi alla figura 10, come si dirà anche in seguito relativamente al grado di riempimento della galleria, è bene che il punto di funzionamento sia al di fuori della zona campita in grigio, luogo di elevati riempimenti e funzionamento instabile.

Pertanto, considerando la sezione di imbocco della galleria policentrica, posta 32 m a valle delle paratoie si vuole che essa raggiunga un valore di energia specifica pari almeno a:  $E = 10.5 \text{ m}$ , valore al quale corrisponde un grado di riempimento della sezione del 75% circa.

Grazie alla pendenza imposta, la quota di scorrimento della sezione di imbocco della galleria corrente è 355.69 (vedi figura 11), aggiungendovi 10.50 m, si ottiene un valore di carico totale pari a 366.19, che



rappresenta il valore di energia minimo ( $E_{min}$ ) affinché la portata di progetto transiti attraverso la galleria nelle condizioni previste.

In sostanza, anche considerando le perdite di carico che possono avvenire lungo i suddetti 32 metri e che porteranno l'energia totale 367.42 a ridursi, la pendenza del 11.9% fornisce un buon margine di sicurezza.

Nel caso di pendenze pari a 10% e 8%, il valore di  $E_{min}$  sarebbe rispettivamente pari a 366.80 e 367.44, risultando assai meno cautelativo, se non insufficiente, rispetto al 11.9% scelto.

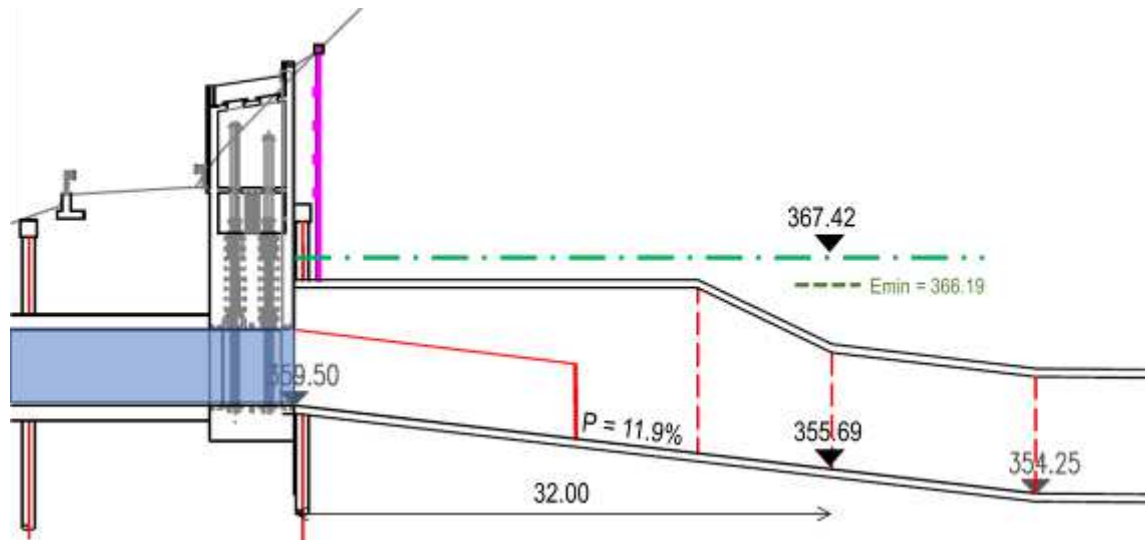


Figura 11 – Rappresentazione schematica delle linee dei carichi (energia) totali nel Tratto 2

I valori sopra esposti, poi sostanziati dalle prove di laboratorio testimoniano la assoluta necessità di introdurre questa variazione rispetto al progetto a base gara, nel quale, si rammenta, la pendenza del tratto in esame risultava pari a 0.85%.

Le prove di laboratorio hanno poi confermato che pendenze inferiori (ad esempio 8% o 10%) anche se mantenute per una lunghezza maggiore (ossia a parità di dislivello) non forniscono uguali garanzie in termini di sicurezza ed officiosità all'imbocco della sezione corrente. Tale necessità di garantire un idoneo franco, ossia una congrua porzione di sezione libera dall'acqua è determinante per garantire il transito di aria all'interno della galleria. Si rammenta infatti che l'unico punto di alimentazione di aria è dato dagli aerofori posti immediatamente a valle delle paratoie ed è pertanto fondamentale garantire che la sezione scelta per la galleria, pure al suo massimo grado di riempimento, possa permettere il corretto transito dell'aria entrata tramite gli aerofori nella camera a valle delle paratoie.

#### 4.4.1. Modello 2D

Vengono di seguito mostrati i risultati delle simulazioni estratte dal modello 2D e relative al Tratto 2. Preme sottolineare che i modelli 2D non sono in grado di riprodurre sezioni chiuse, pertanto tutte le sezioni esaminate vengono riprodotte fedelmente nel modello solo la sezione della galleria al di sotto del piano d'imposta (strozzo e arco rovescio). La parte al di sopra del piano di imposta (calotta) viene invece rappresentata da pareti verticali, prolungamento delle tangenti verticali delle sezioni; in pratica una sezione circolare verrebbe rappresentata da una a forma di "U".

Ovviamente tale aspetto gioca a sfavore di sicurezza, ossia i livelli idrici nelle sezioni chiuse tendono ad essere leggermente sottostimati nel modello e pertanto occorre tenerne conto nella valutazione dei franchi di sicurezza, i quali sono comunque stati verificati mediante modello fisico.

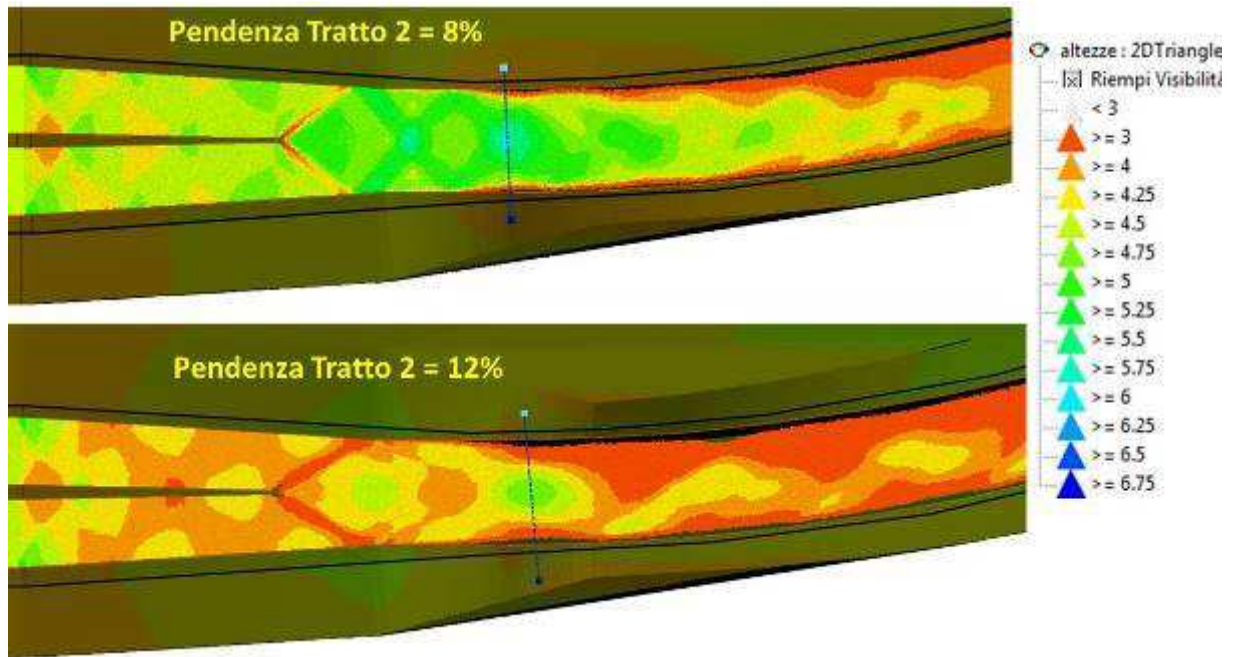


Figura 12 – Altezza del tirante idrico al variare della pendenza del Tratto 2 - simulazioni numeriche full 2D

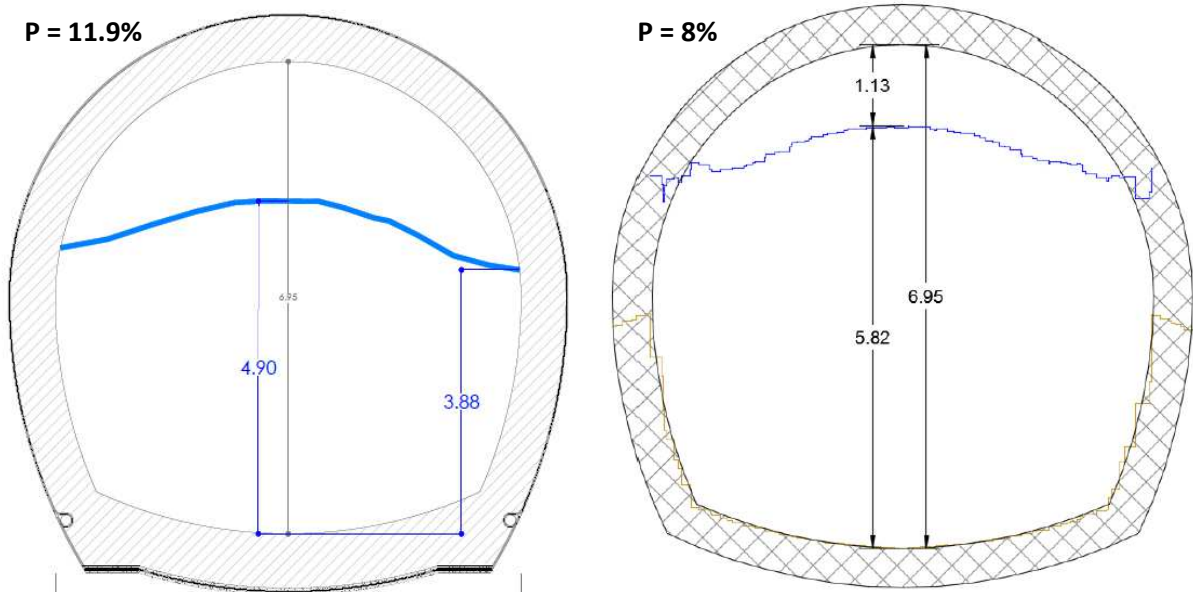
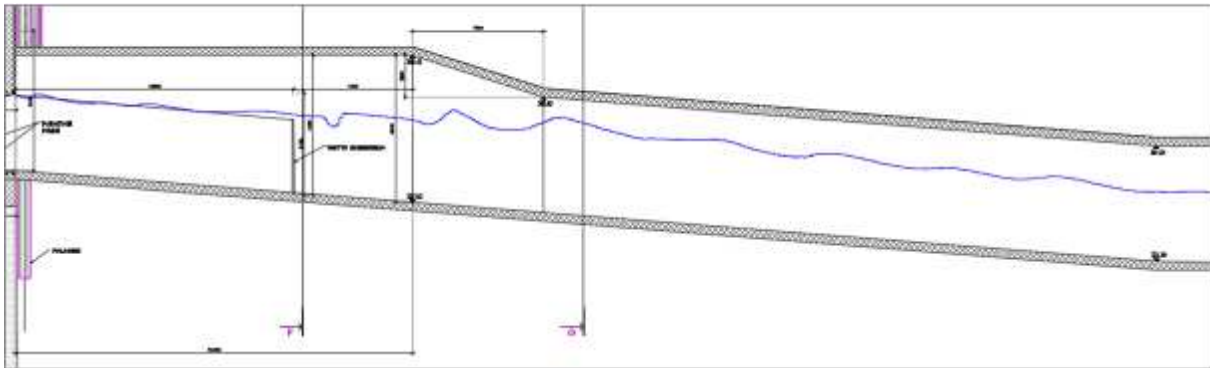


Figura 13 – Profilo idrico all'interno della sezione che presenta il maggior grado di riempimento nel tratto 2 (Sezione G-G negli elaborati di progetto)

Profilo – rampa pendenza 8%



Profilo – rampa pendenza 12%

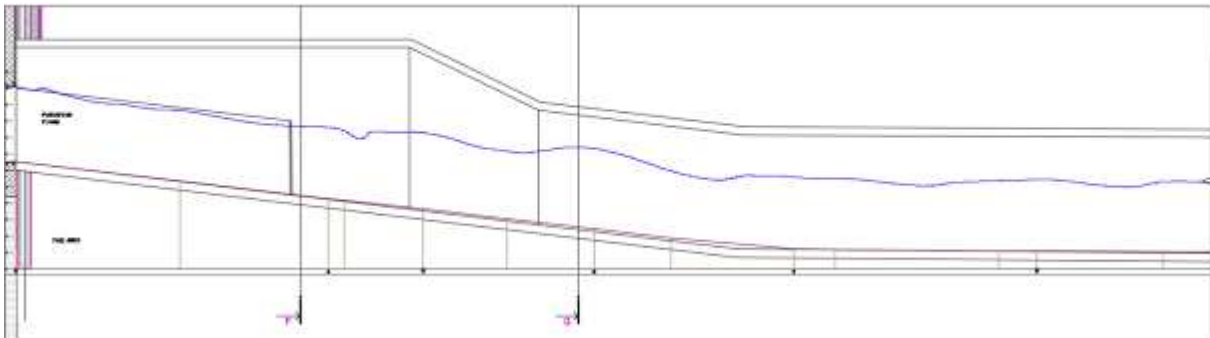


Figura 14 – Profilo longitudinale al variare della pendenza del Tratto 2 - simulazioni numeriche full 2D

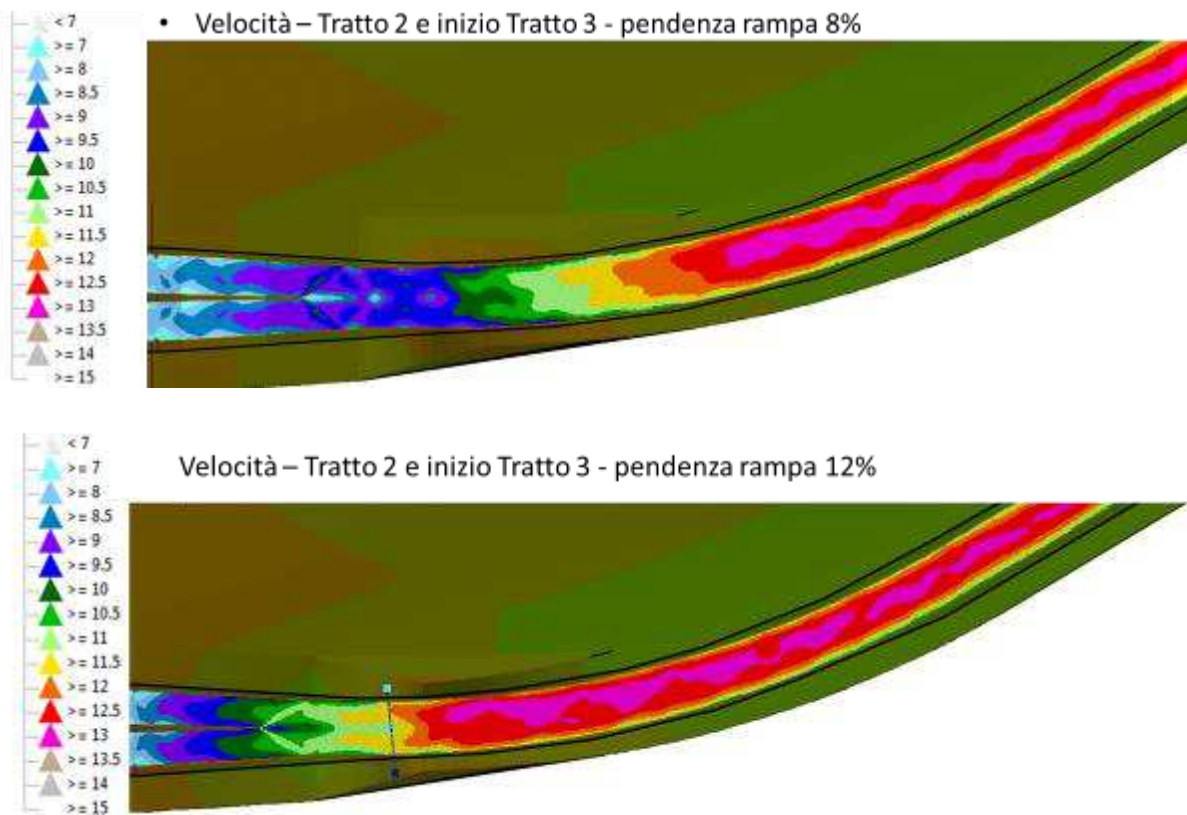


Figura 15 – Mappa delle velocità al variare della pendenza del Tratto 2 - simulazioni numeriche full 2D

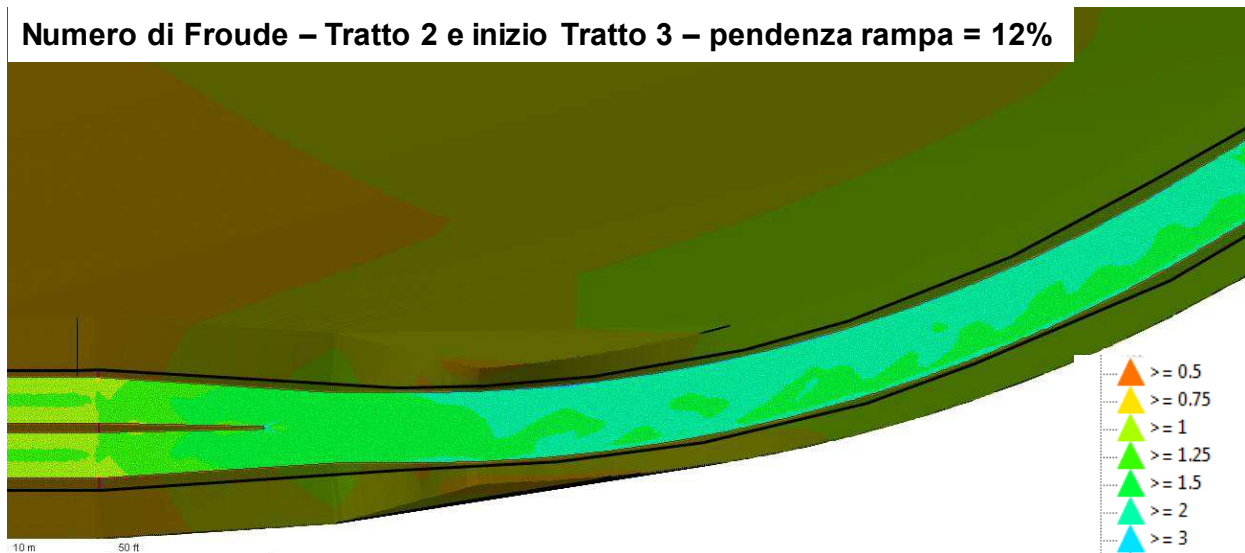


Figura 16 –Mappa del numero di Froude, Tratto 2 - simulazioni numeriche full 2D

#### 4.4.2. Dimensionamento degli aerofori

Il dimensionamento degli aerofori ubicati immediatamente a valle delle paratoie riveste massima rilevanza, in quanto come già segnalato, esso è l'unico punto che consente l'ingresso di aria in galleria fino allo sbocco nel manufatto di restituzione.

Poiché l'opera è progettata per funzionare a superficie libera, è fondamentale che la quantità di aria idonea possa transitare al di sopra della superficie liquida, al fine di evitare fenomeni di depressione, cavitazione e/o incollaggi della vena fluida al soffitto

Il dimensionamento segue la nota formulazione sperimentale della USBR, già adottata nel progetto a base gara:

$$\beta = 0.03 \cdot (Fr - 1)^{1.06}$$

Dove  $\beta$  è il rapporto tra la portata d'aria e quella dell'acqua in funzione del numero di Froude "Fr" di quest'ultima.

La letteratura tecnica indica che il momento di massima richiesta di aria a valle di paratoie aperte è in corrispondenza di gradi di apertura parziali (40% -50%).

Considerando un grado di apertura del 50% ed una conseguente contrazione della vena fluida (fattore 0.6), si genera una lama d'acqua pari a:

$$4.50 \times 0.5 \times 0.6 = 1.35 \text{ m}$$

In base alle equazioni sopraccitate per il funzionamento dei culvert in outlet control e dei relativi coefficienti, si ottiene che al livello massimo di invaso previsto (371.23) e per il grado di apertura in esame, transiterebbe una portata pari a 140 m<sup>3</sup>/s

A tale portata corrisponde un numero di Froude pari a 3.17, a cui consegue un valore di  $\beta$  pari a 0.068.

Pertanto la portata d'aria richiesta è  $Q_{aria} = \beta Q_{acqua} = 140 \times 0.068 = 9.53 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Si giunge pertanto, sebbene sulla base di assunzioni differenti, alla medesima portata d'aria ottenuta nel progetto a base gara.

Pertanto ipotizzando una velocità dell'aria di 20 m/s, e suddividendo l'ingresso d'aria in 4 aerofori, si conferma la presenza di 4 tubazioni avente diametro 0.4 m.



#### 4.5. TRATTO 3 – GALLERIA CORRENTE (1° PARTE)

Dopo i fenomeni di rigonfiamento dovuti al restringimento di sezione la corrente ha ancora qualche metro per accelerare, poi entra nel Tratto 3, dove la pendenza si riduce allo 0.85% ed il moto diviene in corrente veloce ritardata, ossia che tende asintoticamente all'altezza di moto uniforme.

Si è reso necessario incrementare il diametro della sezione corrente della galleria, portandolo a 6.95 m.

L'incremento rispetto al valore previsto dal progetto posto a base gara (6.50 m) risponde alle seguenti esigenze generali:

- Riduzione l'elevato grado di riempimento della sezione, che, in termini di altezza di moto uniforme passa da 88% a 73% circa
- Allontanamento dalla zona critica della scala di deflusso (figura 17)

Inoltre, l'incremento di diametro permette di risentire in maniera inferiore delle perturbazioni del livello dovute a:

- Propagazione delle onde stazionarie
- Roll waves
- Variazioni planimetriche del profilo in curva

La cui esistenza è stata confermata dal modello numerico 2D e poi dimostrata dal modello fisico.

Si intende come zona critica quella campita in grigio nelle scale di deflusso raffigurate nelle figure 17 e 18, ossia la zona della scala di deflusso nella quale la portata transitante è superiore a quella del condotto completamente pieno. E' inoltre la zona nella quale ad un valore di portata sono associati due possibili gradi di riempimento, aspetto di per se sintomo di instabilità.

Il grafico seguente evidenzia come il diametro pari a 6.50 m fa sì che la portata di progetto sia associata a gradi di riempimento prossimi a 90%, oltre a ricadere in pieno all'interno della zona critica ed instabile. Al contrario il diametro pari a 6.95 m dà vita a gradi di riempimento inferiori (73%) e più consoni a quelli di norma suggeriti dalle buone pratiche di progettazione per condotte a pelo libero. Inoltre, permette di mantenere la portata di progetto al di fuori della zona di instabilità campita in grigio.

La scelta del valore finale del diametro scaturisce quindi da molteplici considerazioni: oltre alle ovvie ragioni di natura economica, hanno inciso gli aspetti relativi alla scala di deflusso ed al grado di riempimento sopra esposti, ma anche gli aspetti di bilancio energetico (figura 10) presentati nel paragrafo relativo al Tratto 2.



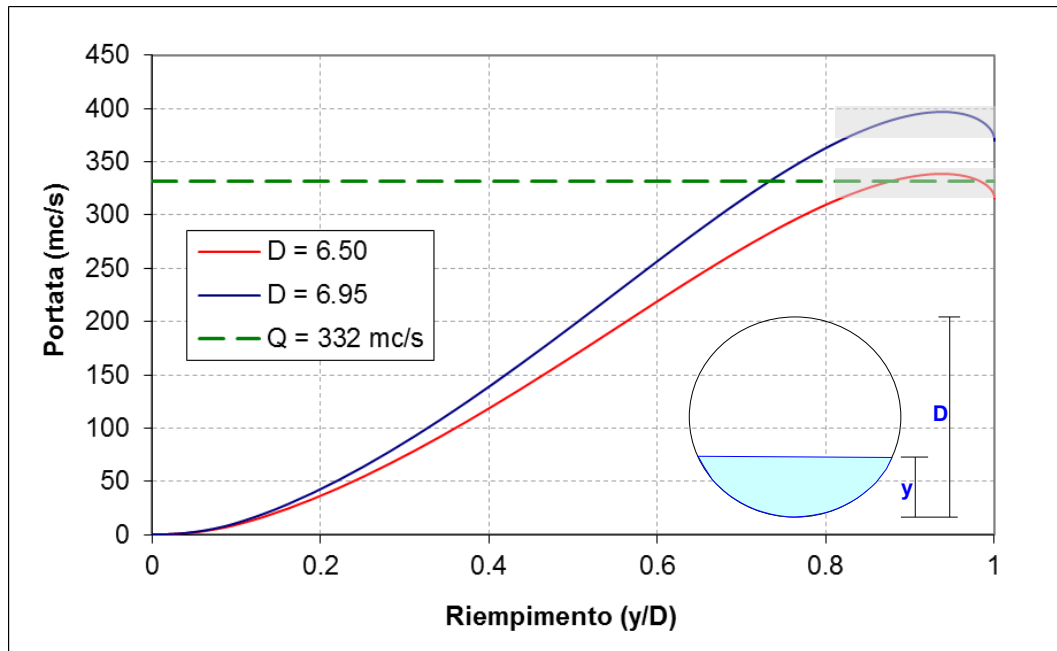


Figura 17 –Scala di deflusso completa ( $K_s = 70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ) per sezioni policentriche con  $D = 6.50$  e  $6.95$  m. In grigio la zona critica

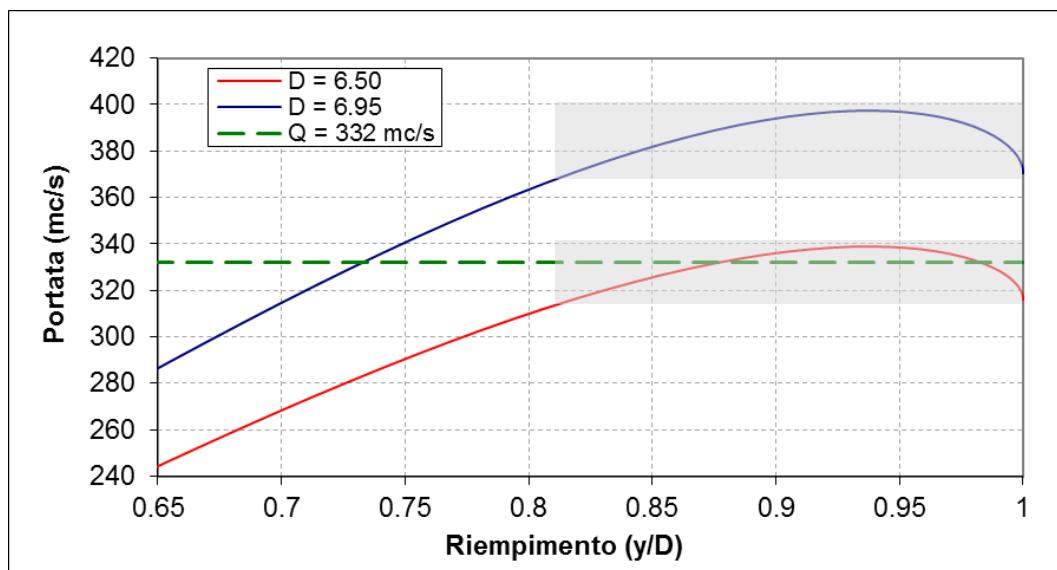


Figura 18 –Dettaglio della scala di deflusso ( $K_s = 70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ) per sezioni policentriche con  $D = 6.50$  e  $6.95$  m. In grigio la zona critica

Le scale di deflusso riportate nelle figure 17 e 18 sono ricavate dalla formulazione analitica sviluppata dallo U.S. Bureau of public Roads e riportata nella figura 19. Esse fanno riferimento ad un valore di scabrezza pari a  $70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ , assunto in sede di dimensionamento e verifica sia a scopo cautelativo, sia ai fini di un diretto confronto con quanto considerato nel progetto a base gara.

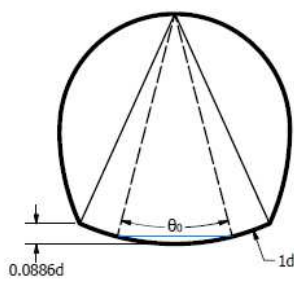


Figure 1.2: Range for  $\theta_0$

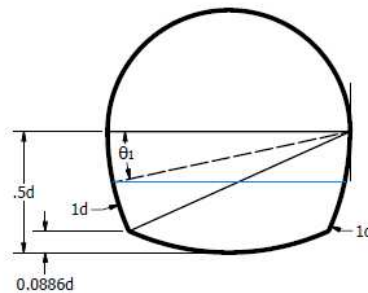


Figure 1.3: Range for  $\theta_1$

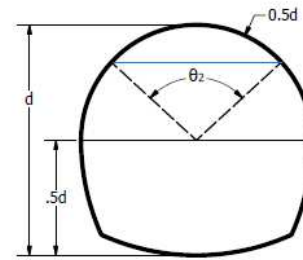


Figure 1.4: Range for  $\theta_2$

$\frac{y}{d}$ Range	$\theta$ Range - Deg.	$\theta$ Range - Rad.	A	P
$0 < \frac{y}{d} \leq 0.0886$	$0^\circ < \theta_0 \leq 48.6^\circ$	$0 < \theta_0 \leq 0.27\pi$	$\frac{d^2}{2} [\theta_0 - \sin \theta_0]$	$d\theta_0$
$0.0886 \leq \frac{y}{d} \leq 0.5$	$24.293^\circ \geq \theta_1 \geq 0^\circ$	$0.13\pi \geq \theta_1 \geq 0$	$d^2 [0.4366 - \theta_1 - 0.5 \sin(2\theta_1) + \sin \theta_1]$	$d [1.6962 - 2\theta_1]$
$0.5 \leq \frac{y}{d} < 1$	$180^\circ \leq \theta_2 \leq 360^\circ$	$\pi \leq \theta_2 \leq 2\pi$	$d^2 [0.4366 + 0.125(\theta_2 - \sin \theta_2 - \pi)]$	$d [1.6962 + 0.5(\theta_2 - \pi)]$

$\frac{y}{d}$ Range	$\theta$ Range - Deg.	$\theta$ Range - Rad.	T	$\frac{y}{d}$
$0 < \frac{y}{d} \leq 0.0886$	$0^\circ < \theta_0 \leq 48.6^\circ$	$0 < \theta_0 \leq 0.27\pi$	$2d \sin\left(\frac{\theta_0}{2}\right)$	$\left[1 - \cos\left(\frac{\theta_0}{2}\right)\right]$
$0.0886 \leq \frac{y}{d} \leq 0.5$	$24.293^\circ \geq \theta_1 \geq 0^\circ$	$0.13\pi \geq \theta_1 \geq 0$	$d(2 \cos \theta_1 - 1)$	$0.5 - \sin \theta_1$
$0.5 \leq \frac{y}{d} < 1$	$180^\circ \leq \theta_2 \leq 360^\circ$	$\pi \leq \theta_2 \leq 2\pi$	$d \sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right)$	$0.5 \left[1 - \cos\left(\frac{\theta_2}{2}\right)\right]$

Figura 19 – Formulazioni analitiche per la scala di deflusso di una sezione policentrica (USBR, 1973)

#### 4.6. TRATTO 4 – RAMPA AL TERMINE DEL RETTILINEO

Al termine del rettilineo del tratto 3, vi è una curva, la quale come noto può generare effetti di innalzamento del livello idrico sul lato esterno della curva. Per le correnti supercritiche (veloci), gli effetti in presenza di curve risultano sensibili e di difficile descrizione. Rari sono inoltre gli esempi nella letteratura tecnico scientifica di studi dedicati alle curve in corrente veloce per sezioni chiuse. Nella sezione chiusa infatti l'eventuale sopralzo del profilo idrico è accresciuto dalla forma della sezione stessa e porta all'innescio di onde trasversali, le quali possono poi degenerare in una sorta di torsione del profilo fluido (cosiddetto "helical flow" o "annular flow"). Riferimenti in tal senso sono riportati attraverso alcune immagini tratte da un recente studio sperimentale (Kolarevic et al., 2015, "Supercritical flow in circular conduit bends") effettuato appunto su condotte circolari percorse da correnti veloci.

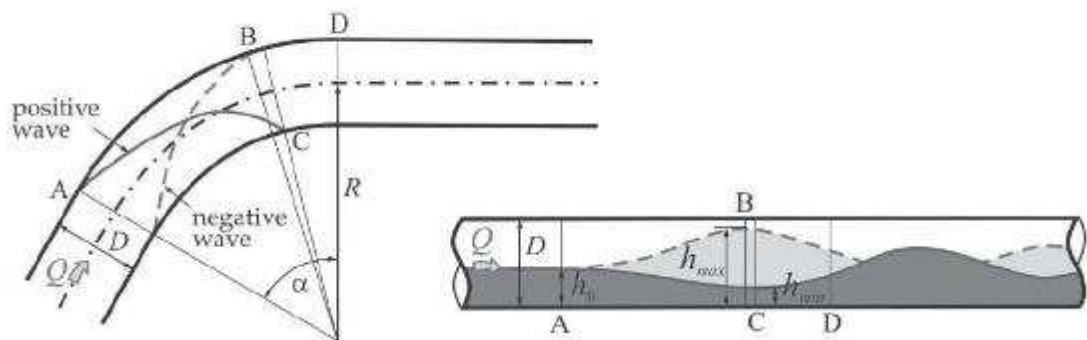


Figura 20 – Effetti dovuti ad una corrente veloce, in curva, in una sezione chiusa (Kolarevic et al., 2015)

I modelli numerici 2D possono descrivere gli effetti di tipo primario e secondario in corrispondenza delle curve e possono farlo mediante processi matematici fisicamente basati, ossia che non ricorrono a semplificazioni o rappresentazioni parametriche, ma che rispondono alle caratteristiche locali della geometria immessa ed alle condizioni istantanee e spazialmente distribuite di deflusso (livello, velocità). I modelli 2D tuttavia non possono rappresentare superfici chiuse e quindi non sono in grado di dare una corretta rappresentazione delle fenomenologie "elicoidali" dovute alla calotta e delle relative onde trasversali.

E' stato quindi solamente grazie alle prove su modello fisico che si sono potuti visualizzare e quantificare gli effetti di riempimento della sezione dovuti alla curva. Infatti, mantenendo la livelletta costante a 0.85%, come da progetto a base gara, pur disponendo di una sezione maggiorata, si raggiungeva al termine del rettilineo un elevato grado di riempimento (82%), non soddisfacente in termini di rischio di attacco della vena fluida al soffitto della galleria e relativo innesco di fenomeni di formazione di sacche d'aria, cavitazione e funzionamento a singhiozzo.

Si è reso quindi necessario ancora una volta imprimere energia cinetica alla corrente, mediante un altro breve tratto (circa 17 metri) a forte pendenza (11.9%, la medesima del tratto 2).

Questa scelta tuttavia ha comportato l'annullamento completo del dislivello e dello scivolo a forte pendenza presente al termine della galleria.

Sono quindi state svolte analisi numeriche preliminari e successive prove in laboratorio per garantire che l'assenza del suddetto scivolo non comportasse effetti secondari e/o fenomeni di rigurgito da valle indotti da alti livelli nel fiume Chiese.

#### 4.6.1. Verifiche a supporto dell'incremento di pendenza nel Tratto 4

Le verifiche sono state condotte mediante modello 1D (HEC-RAS) e mediante modello 2D. Il primo è maggiormente idoneo a verificare la presenza di fenomeni di risalto idraulico all'interno del canale di restituzione, il secondo è in grado di descrivere i fenomeni di alterazione del profilo idrico trasversale dovuti alla presenza di curve.

Pertanto, il focus del modello 1D è stato valutare se la rimozione completa della disconnessione idraulica al termine della galleria avrebbe indotto effetti di rigurgito in galleria. I risultati del modello 2D sono invece stati analizzati per valutare il comportamento sul tratto 4 in cui è prevista la nuova rampa al 11.9%.

Si definisce "POST" la configurazione finale di progetto, con rampa a forte pendenza posta nel tratto 4 e mancanza della disconnessione idraulica prevista al termine della galleria; "ANTE" la configurazione inizialmente sperimentata in laboratorio con i Tratti 3, 4, 5 a livelletta costante (0.85%) e scivolo finale (2 m di salto residuo) al termine della galleria.

Per entrambi i modelli, i risultati ottenuti per il POST, sono stati posti a confronto con quelli ottenuti per

il cosiddetto "ANTE", ossia la configurazione sperimentata in laboratorio. Lo scopo, infatti, viste le numerose incertezze che gravano su entrambi i tipi di modello, non è tanto di fornire valori assoluti di livelli o velocità, quanto di effettuare un'analisi comparativa fra i suddetti Casi per valutare se il POST può dirsi a tutti gli effetti migliorativo rispetto al ANTE.

#### 4.6.1.1. Modello 1D

L'analisi 1D

Il confronto fra ANTE e POST ha interessato due diversi scenari di portata:

Scenario critico per la formazione di risalto idraulico in uscita:	<b><math>Q_{galleria} = 110 \text{ m}^3/\text{s}; Q_{chiese} = 222 \text{ m}^3/\text{s}</math></b>
Scenario con portata di progetto della galleria	<b><math>Q_{galleria} = 332 \text{ m}^3/\text{s}; Q_{chiese} = 0 \text{ m}^3/\text{s}</math></b>

Le condizioni al contorno di monte e di valle (livello nel Chiese alla confluenza col canale di restituzione) prendono a riferimento quanto riscontrato nel modello fisico. Il modello 1D rappresenta quindi il tratto compreso fra l'inizio del rettilineo della galleria e lo sbocco nel Chiese. I risultati seguenti mostrano il dettaglio dei soli ultimi 200 metri dell'opera.

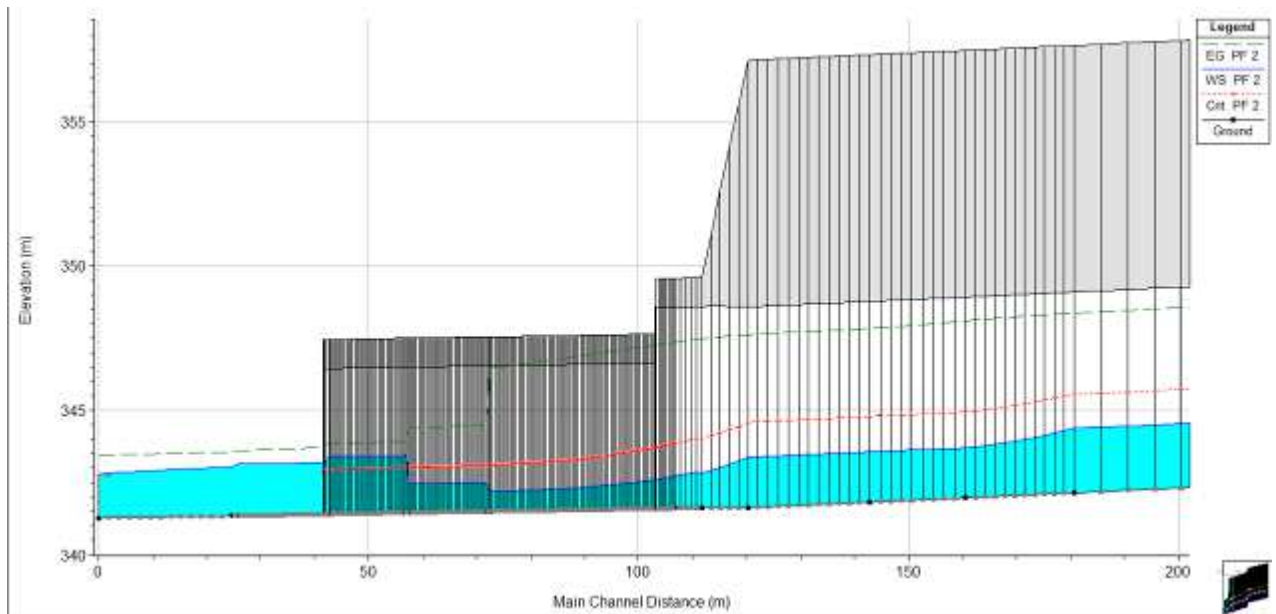
Dal confronto fra ANTE e POST non emergono differenze rilevanti. Nello scenario 110-222, per entrambi i Casi, si palesa un risalto idraulico tra la fine del tratto coperto ed il tratto scoperto; risalto che tuttavia non è stato riscontrato nelle sperimentazioni in laboratorio.

I risultati del modello 1D sintetizzati nei profili delle figure seguenti testimoniano che la configurazione POST, per la quale viene a mancare la disconnessione idraulica prevista al termine della galleria, non risulta peggiorativa in termini di formazione di risalto nella parte coperta del manufatto restitutore, riproducendo nei fatti profili, livelli e velocità del tutto simili.

Della formazione del risalto nel restitutore, degli accorgimenti per evitarlo e delle positive evidenze sperimentali in tal senso si dirà nel successivo paragrafo dedicato al Tratto 6.

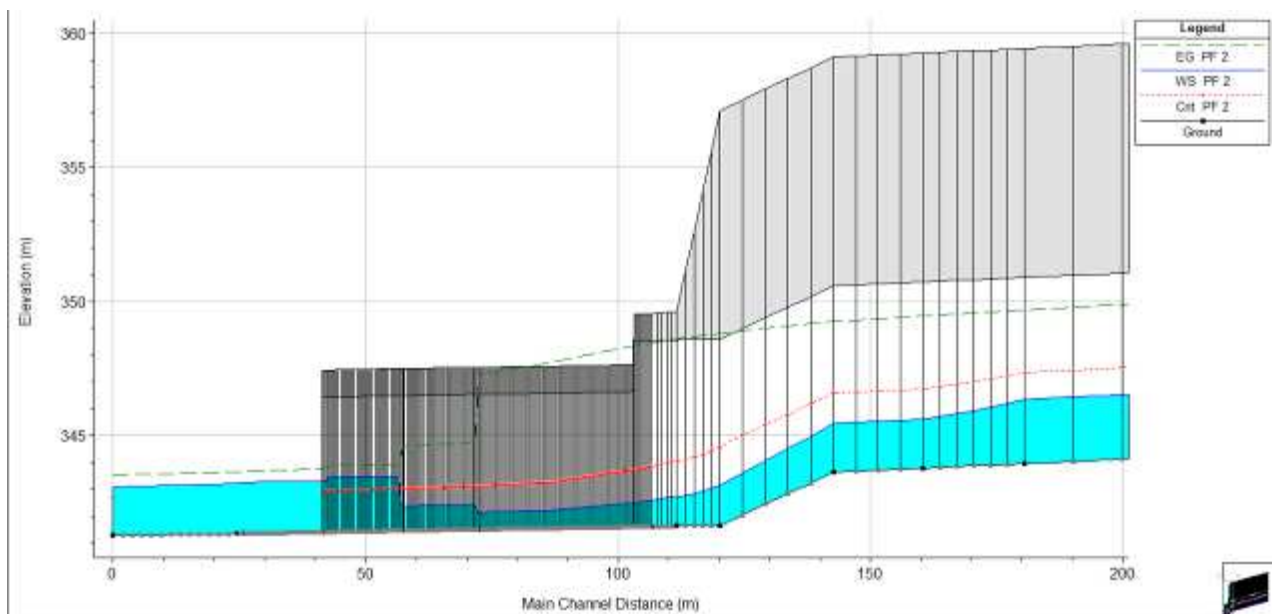
**POST:**

**$Q_{galleria} = 110 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $Q_{chiese} = 222 \text{ m}^3/\text{s}$**



**ANTE:**

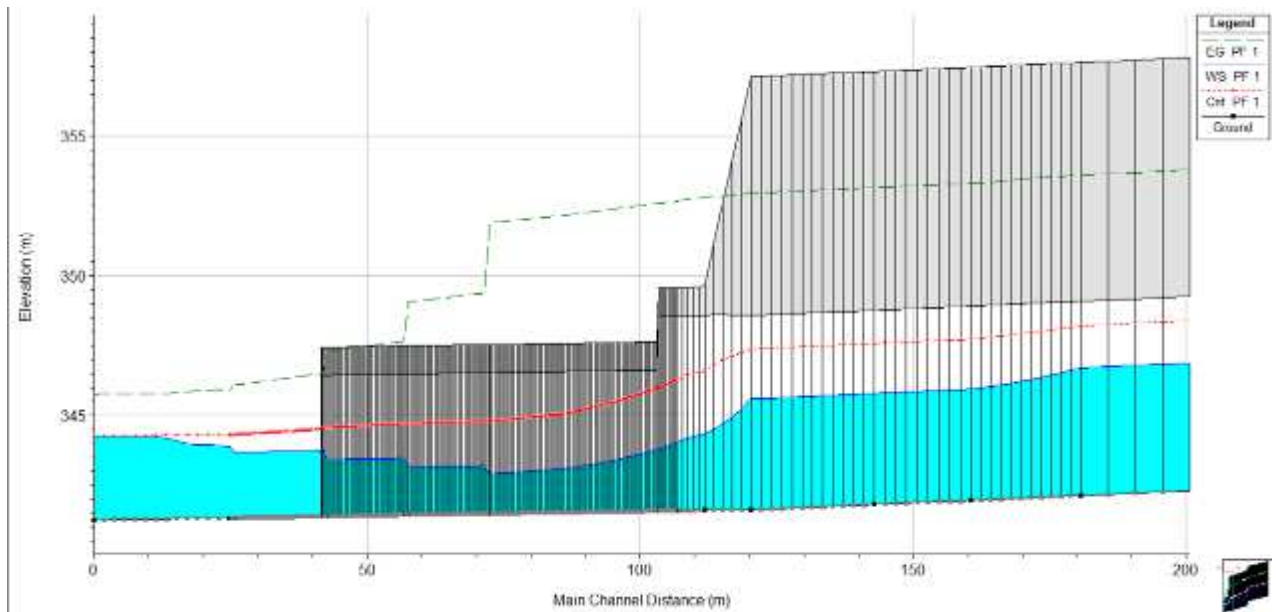
**$Q_{galleria} = 110 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $Q_{chiese} = -222 \text{ m}^3/\text{s}$**





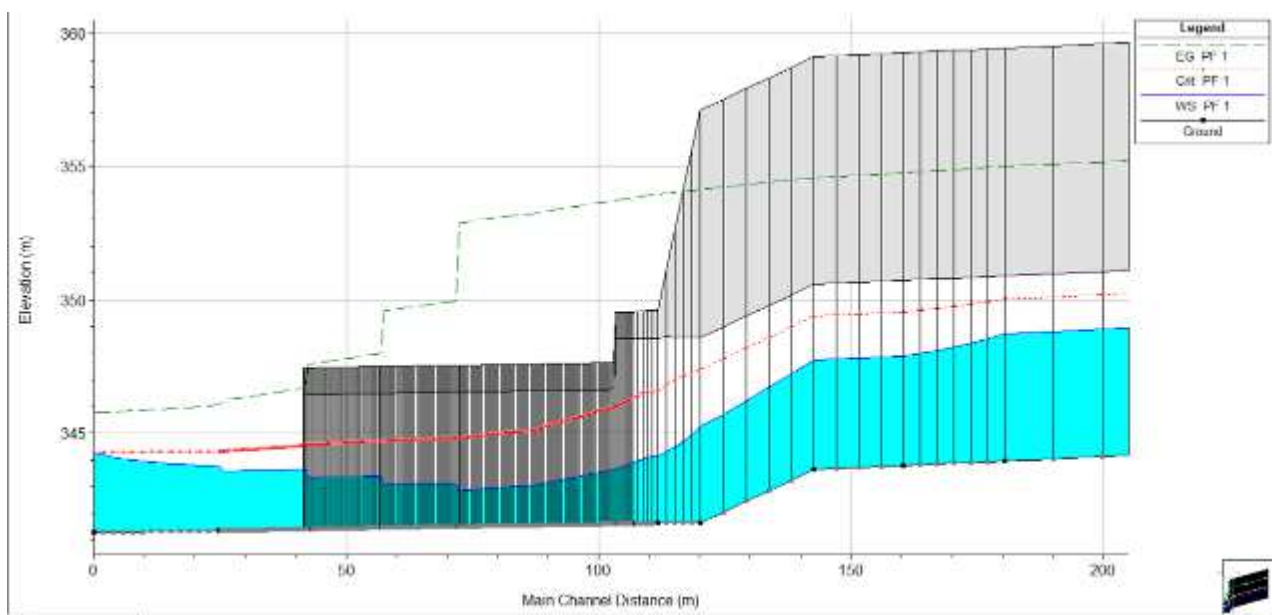
**POST:**

**$Q_{galleria} = 332 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $Q_{chiese} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$**



**ANTE:**

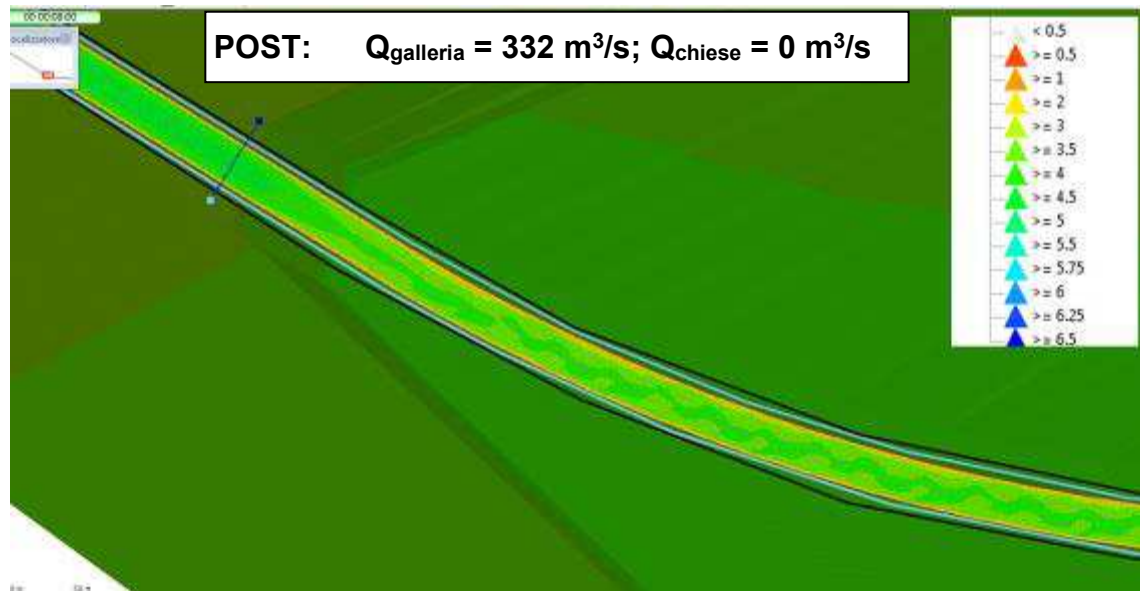
**$Q_{galleria} = 332 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $Q_{chiese} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$**



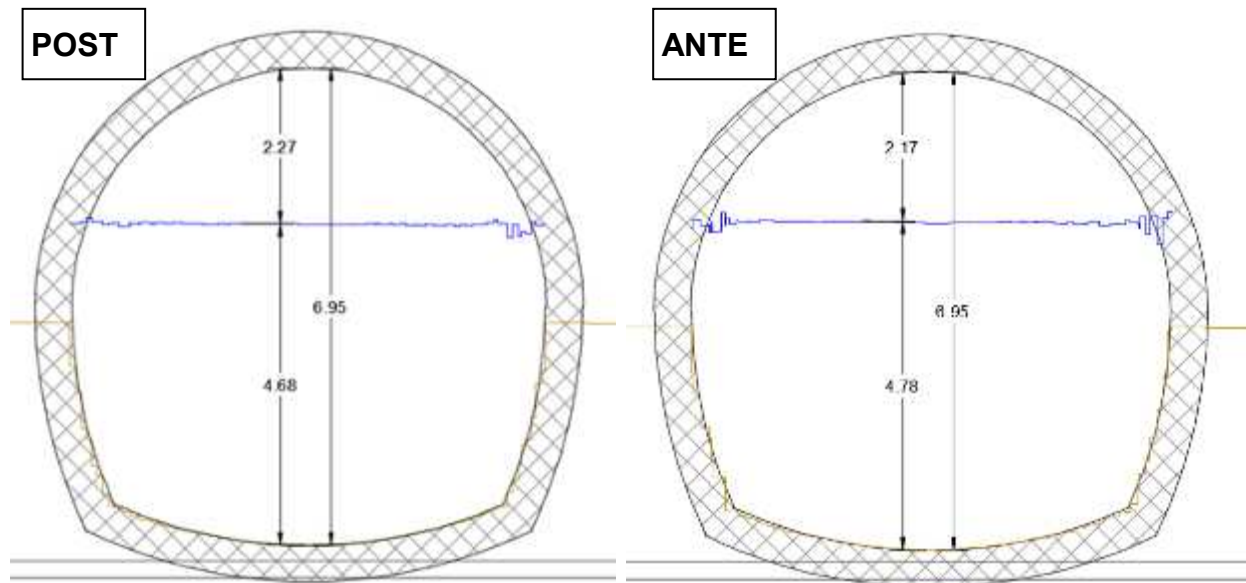
#### 4.6.1.2. MODELLO 2D

Si ricorda che il modello 2D non può simulare sezioni chiuse e, anche per questo, può sottostimare il grado di riempimento della galleria, rispetto a quanto evidenziato nelle prove di laboratorio. Scopo delle simulazioni era quindi di ottenere un risultato comparativo (non peggiorativo) passando dal ANTE al POST. Le figure seguenti mostrano una sostanziale equivalenza di funzionamento fra i due casi in termini di grado di riempimento, con un leggero miglioramento adottando il POST.

#### MAPPA DELLE ALTEZZE IDRICHE AL TERMINE DEL TRATTO RETTILINEO

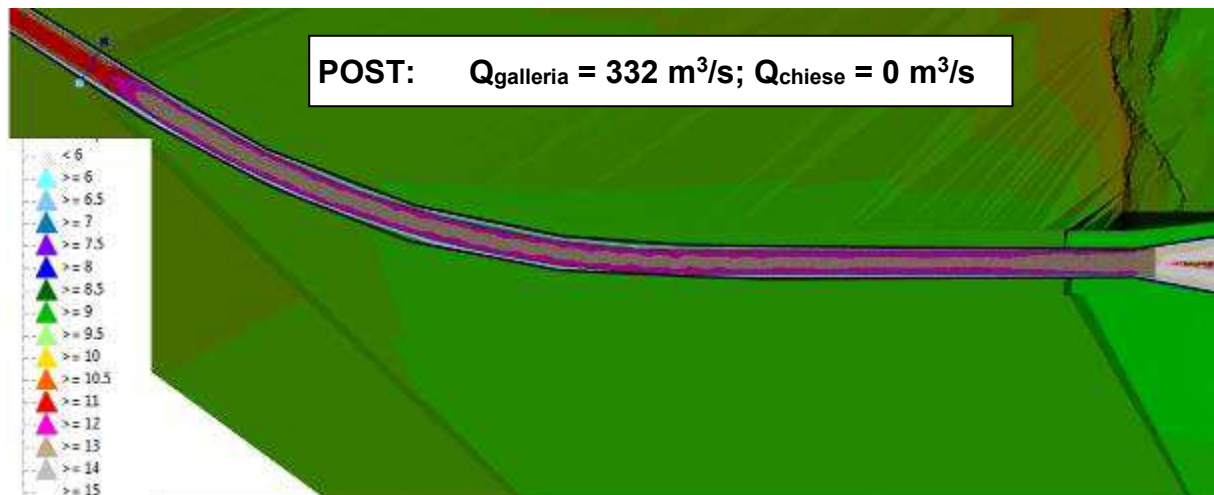


SEZIONE POSTA IN CORRISPONDENZA DELL'INIZIO DEL NUOVO SCIVOLO AL 11.9%

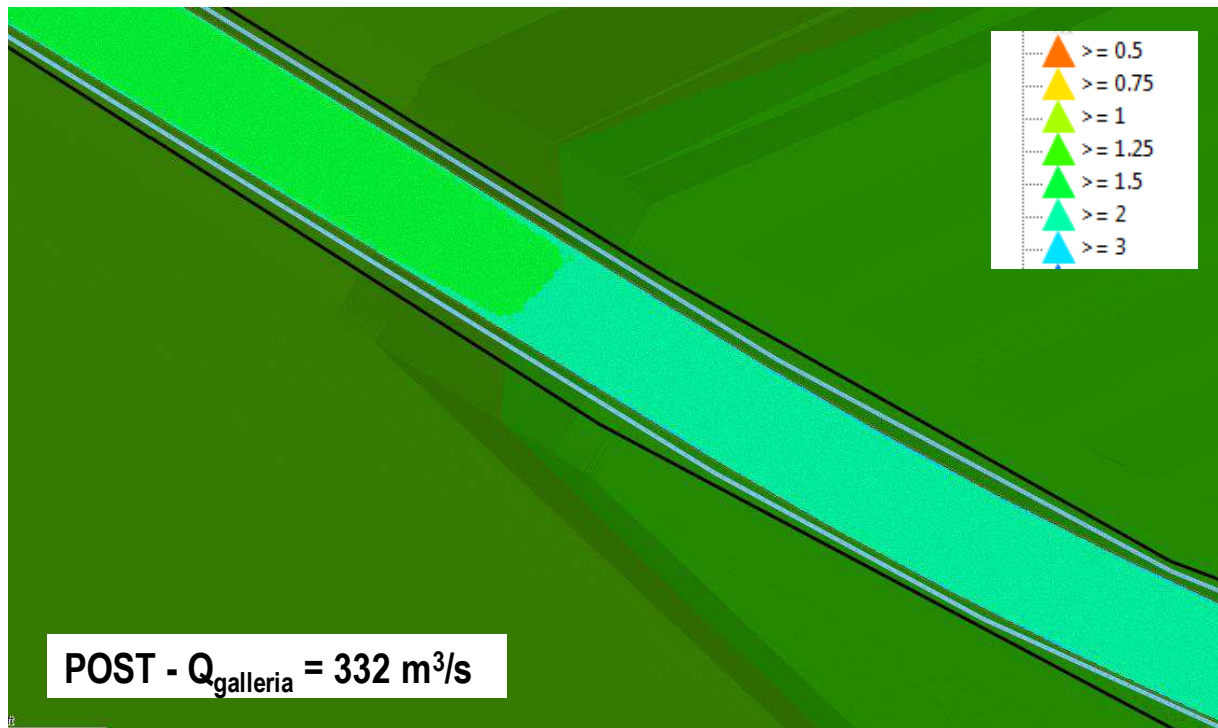


Il modello ha inoltre mostrato valori simili fra le due configurazioni per quanto riguarda i valori di velocità e la loro distribuzione spaziale, comprese le velocità di restituzione nel Chiese, le quali appaiono forse leggermente inferiori nel POST, in particolare per il canale di restituzione di destra.

MAPPE DELLE VELOCITÀ



**MAPPA DEL NUMERO DI FROUDE (Dettaglio su Tratto 4)**



**4.6.1.3. Verifica su modello fisico**

Sulla base delle positive risultanze delle analisi effettuate mediante modelli numerici 1D e 2D, si è poi proceduto alla verifica finale in laboratorio.

Dalle risultanze del modello fisico si è evidenziato un miglioramento del grado di riempimento in occasione della portata massima di progetto pari a 67 l/s (332 mc/s nel prototipo), giungendo a valori medi sulla sezione pari circa al 75% al termine del tratto rettilineo principale subito più a monte del nuovo scivolo con pendenza 11.9%, confermando l'effetto di miglioramento anticipato con l'analisi numerica.

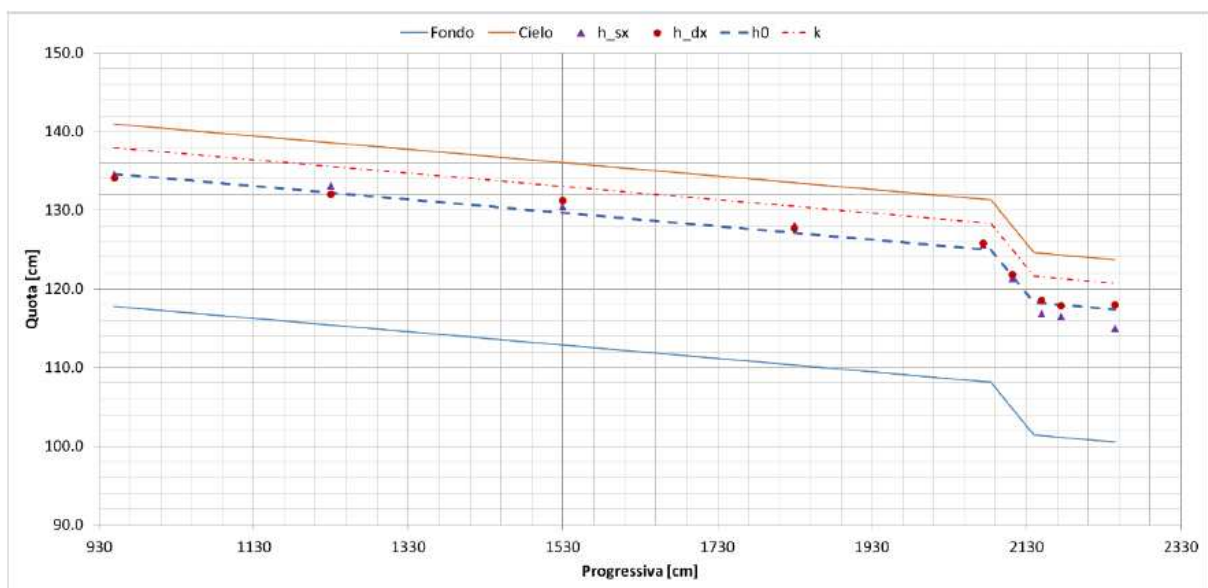


Figura 21 – Misure di livello effettuate sul modello in corrispondenza del tratto 4 portata pari a 67 l/s (332 mc/s nel prototipo)





Figura 22 –Funzionamento della galleria al termine del tratto rettilineo subito più a monte dello scivolo con pendenza 11.9% per portata pari a 67 l/s (332 mc/s nel prototipo)

Lo scivolo posto nel Tratto 4, al termine del rettilineo, produce anche una maggiore stabilità del profilo di moto dalla curva immediatamente a valle fino al canale di restituzione.

Inoltre, come si vedrà in seguito, l'assenza di una disconnessione idraulica a valle non mostra controindicazioni in termini di possibile formazione di risalto idraulico al termine della galleria e nel canale di restituzione.



#### 4.7. TRATTO 5 – GALLERIA CORRENTE (2° PARTE)

Il tratto finale della galleria a sezione corrente (policentrica  $D=6.95$  m) giunge a pendenza costante (0.85%) al manufatto di restituzione, al quale è raccordata mediante un tratto di 24 metri necessario per il passaggio da fondo curvo a fondo piatto.

L'aumento di energia cinetica impresso dallo scivolo del Tratto 4 comporta un aumento dei valori di velocità anche nel Tratto 5, come evidenziato dalla successiva immagine estratta dal modello 2D. Tali valori in occasione della portata di progetto ( $332 \text{ m}^3/\text{s}$ ) raggiungono circa 13 m/s.



Figura 23 –mappa delle velocità nel tratto terminale della galleria (Tratto 5) –  $Q = 332 \text{ m}^3/\text{s}$

#### 4.8. TRATTO 6 – MANUFATTO DI RESTITUZIONE AL CHIESE

Terminata la galleria a sezione corrente, si entra nel manufatto di restituzione al fiume Chiese. Tale manufatto presenta diverse varianti rispetto a quanto contenuto nel progetto a base gara.

Restano tuttavia invariate le quote di recapito nel Chiese, la pendenza motrice del manufatto di restituzione (0.3%), così come il rispetto delle interferenze con la viabilità e gli edifici esistenti.

L'assetto proposto ha come scopo principale quello di mantenere la corrente in condizioni supercritiche. Ciò per due motivi fondamentali:

- La corrente supercritica per definizione non è influenzata dalle condizioni di valle, a meno dell'innesco di fenomeni di risalto
- La corrente presenta, a parità di portata, tiranti inferiori e quindi ben si sposa con la necessità di dover transitare in una sezione chiusa

L'elevata velocità con cui l'acqua veniva restituita al Chiese è stato uno degli aspetti chiave espressi in sede di gara e che hanno quindi comportato proposte di migliorie.

Il funzionamento idraulico previsto dal presente progetto esecutivo si riassume nei seguenti punti:

- L'acqua esce dalla galleria in corrente veloce ad una velocità di 14-15 m/s (contro i 17-18 m/s del progetto a base gara), impatta contro il setto divisorio e, in ragione dell'allargamento progressivo della sezione, riduce il proprio livello.
- Per ridurre la velocità dell'acqua pur rimanendo in corrente veloce occorre sottoporre la vena fluida a ripetute e progressive perdite di carico, le quali devono essere tali da rallentare l'acqua, ma non tanto da trasformare il moto in corrente lenta e quindi causare risalto idraulico.

Per consolidare gli obiettivi di funzionamento sopra esposti si sono attuati i seguenti interventi:

- la riduzione progressiva della velocità, preliminarmente testata mediante modello numerico 2D attraverso l'inserimento di scabrezze equivalenti diffuse, avviene grazie all'impiego di macroscabrezze localizzate. Si tratta in particolare di 4 soglie di fondo alte 60 cm rispetto alla platea di fondo in C.A., larghe 1 m nel senso della corrente e distanti circa 15 metri fra loro (Figura 24), la cui sommità viene rivestita in acciaio corten. L'altezza delle soglie, nonché l'effettiva efficacia della loro azione dissipatrice è stata affinata e verificata sul modello fisico.

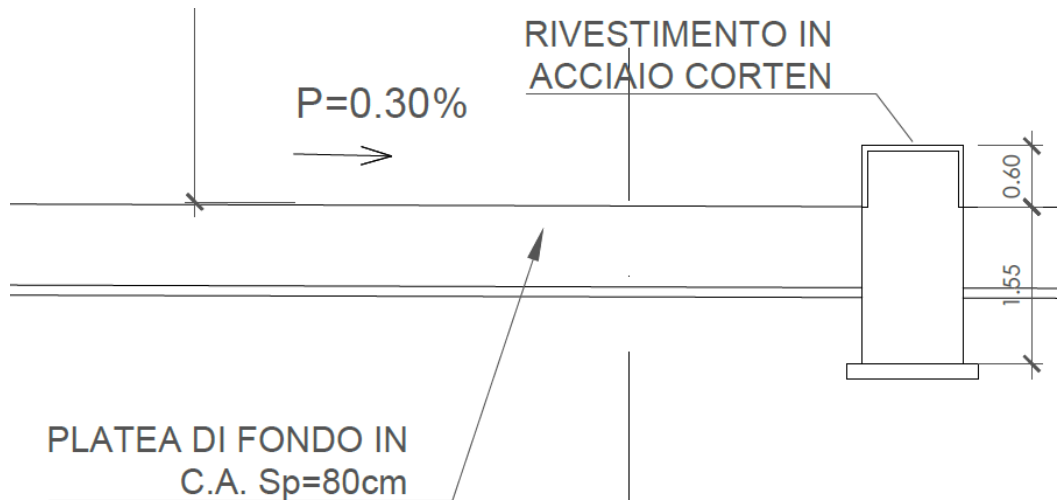


Figura 24 –Dettaglio delle soglie adottate come macroscabrezze nel canale di restituzione



Figura 25 –Effetto di dissipazione delle soglie durante i test su modello fisico  $Q = 67 \text{ l/s}$  ( $332 \text{ mc/s}$  nel prototipo)

- Si è provveduto, previa verifica di compatibilità, all'eliminazione di circa 30 m del solaio nella parte terminale del manufatto di restituzione. Tale modifica permette di risolvere le incertezze legate alla gestione del risalto idraulico che potrebbe formarsi in quella zona nello seguente scenario di portata: 220 m<sup>3</sup>/s nel Chiese in arrivo dalla traversa di monte, 110 m<sup>3</sup>/s in arrivo dallo scolmatore in progetto. Infatti le verifiche numeriche indicano che il risalto possa verificarsi in prossimità della sezione terminale del tratto coperto o immediatamente al di fuori dello stesso. Pertanto, sia per la vicinanza al tratto scoperto, sia per il ridotto grado di riempimento che si verificherebbe nel condotto, si riducono le incertezze legate alla gestione del fenomeno dissipativo.

Si segnala tuttavia che le prove di laboratorio non hanno evidenziato manifesti fenomeni di risalto idraulico, nemmeno nello scenario più temuto ( $Q_{galleria} = 110$ ,  $Q_{chiese} = 220$ ) e che in generale, laddove potevano esserci parvenze sospette di risalto, esse avevano luogo nel tratto a cielo aperto o in prossimità dello stesso.

La rimozione della vasca di dissipazione prevista nel progetto a base gara ha permesso di rimuovere anche gli aerofori, così come erano previsti. Tuttavia, malgrado i riscontri positivi dei modelli numerici e soprattutto le evidenze del modello fisico, si è comunque scelto di mantenere una presa d'aria presidiata da griglia, all'inizio del manufatto di restituzione.

- Si è inoltre operata una ottimizzazione dell'angolo di incidenza del canale restitutore rispetto all'asse ed alla sponda del Chiese, la quale ha anche comportato la traslazione di circa 2.5 m verso Ovest del muro destro del tratto divergente del manufatto.

Grazie agli interventi ed alle modifiche sopra elencate, si è di fatto giunti ad una significativa riduzione delle velocità di restituzione al Chiese. I valori ottenuti dalle simulazioni numeriche 2D e confermati dalle prove su modello fisico nello scenario di progetto ( $Q_{galleria} = 332 \text{ m}^3/\text{s}$ ) si attestano fra 5.5 e 7.5 m/s a seconda della posizione lungo la sezione di sbocco. Infatti, il canale destro, grazie alla maggiore lunghezza, riesce ad ottenere riduzioni maggiori.

Il valor medio lungo la sezione risulta nel modello numerico pari a circa 6 m/s, confermato dalle prove di laboratorio.

Le successive figure 28 mostrano i valori di velocità ottenuti dalle simulazioni numeriche. Nel tratto dove sono presenti le soglie, che il modello rappresenta mediante scabrezza diffusa, si è cercato di calibrare tale valore sulla base dei risultati di laboratorio.

Oltre alla definizione della geometria delle soglie e della loro efficacia nel rallentare la corrente, il modello fisico ha avuto grande rilevanza nel valutare gli effetti idrodinamici del setto centrale che separa la corrente nei due canali di restituzione.



Figura 26 – Testa del setto con nuova conformazione apportata su modello fisico

Nel progetto a base gara il setto era previsto verticale, tuttavia, le prove di laboratorio mostravano per tale configurazione fastidiosi fenomeni di riflessione del getto contro la soletta superiore (figura 25). Si è pertanto proposto di inclinare il setto di 45 gradi e di sagomarlo opportunamente per renderlo debitamente idrodinamico (figura 25).

Le figure seguenti mostrano il diverso comportamento delle due configurazioni proposte (le immagini si riferiscono alla portata di progetto, 332 m<sup>3</sup>/s), nelle quali è evidente la miglioria apportata dal setto ottimizzato, che pertanto è stato adottato nel progetto esecutivo.



Figura 27 – Effetti di riflessione del getto da parte del setto nel manufatto di restituzione. In alto setto verticale, in basso setto inclinato di 45°  $Q = 67 \text{ l/s}$  (332 mc/s nel prototipo)



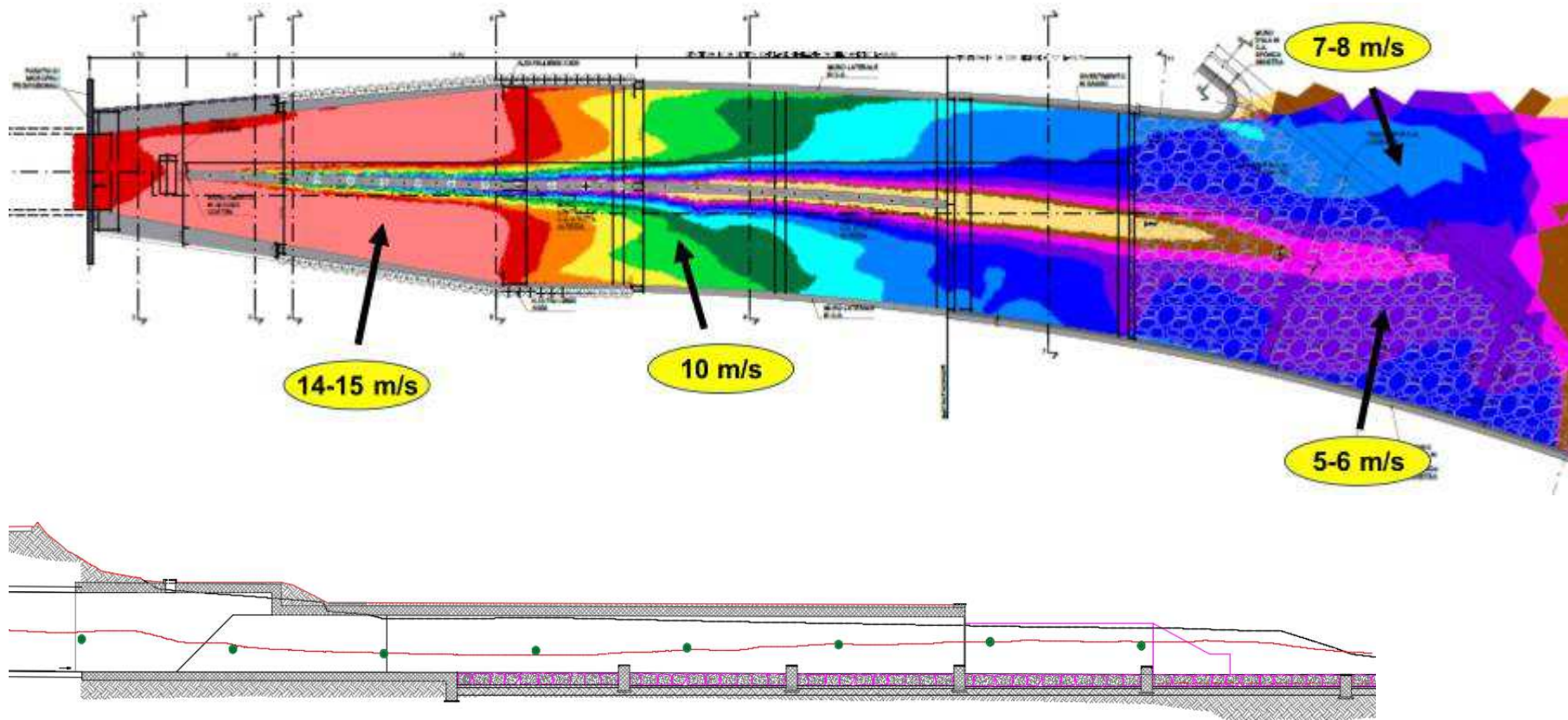


Figura 28 –Mappa delle velocità nell’opera di restituzione (Tratto 6) –  $Q = 332 \text{ m}^3/\text{s}$  e corrispondente profilo longitudinale ottenuti da simulazione 2D calibrata con i risultati del modello fisico (pallini verdi)



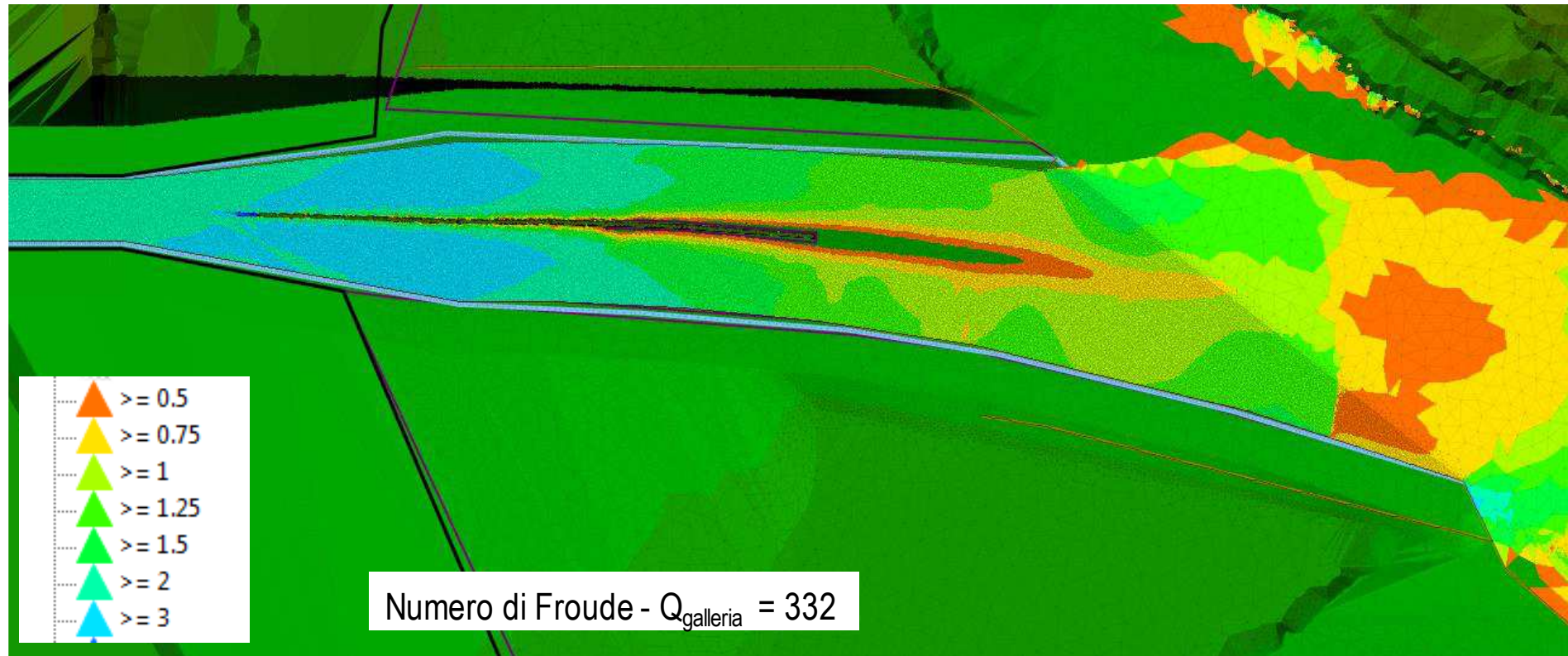


Figura 29 –Mappa del numero di Froude nell’opera di restituzione (Tratto 6) –  $Q = 332 \text{ m}^3/\text{s}$

#### 4.9. TRATTO C – FIUME CHIESE

Gli interventi sopra descritti permettono di raggiungere cospicue riduzioni della velocità con cui lo scolmatore recapita le acque nel fiume Chiese.

La riduzione è così significativa che le velocità di uscita, in particolare quelle del canale destro possono risultare inferiori alle velocità che naturalmente si verificherebbero in quel tratto di alveo se in esso transitasse la portata di progetto (332). Simulazioni numeriche 2D appositamente condotte e relative al solo Chiese (portata in alveo proveniente da monte e non dalla galleria), hanno infatti mostrato valori fino a 7 m/s nell'intorno dello sbocco della galleria, in occasione della portata di progetto.

Si mostrano di seguito i risultati delle simulazioni numeriche svolte nel fiume Chiese in corrispondenza dell'immissione dello scolmatore.

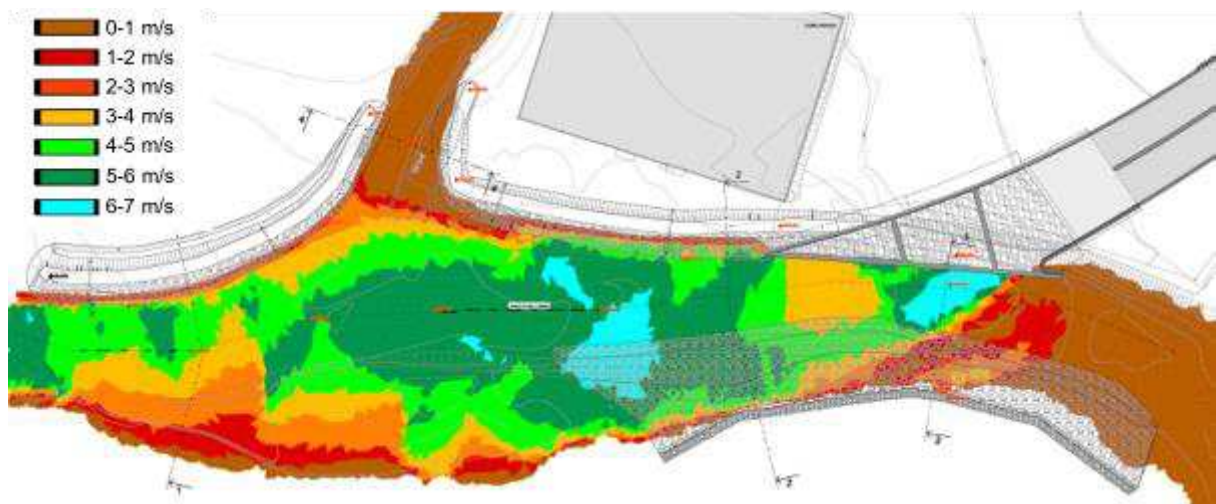


Figura 30 – Fiume Chiese, mappa delle velocità –  $Q_{galleria} = 332 \text{ m}^3/\text{s}$   $Q_{Chiese} = 0$

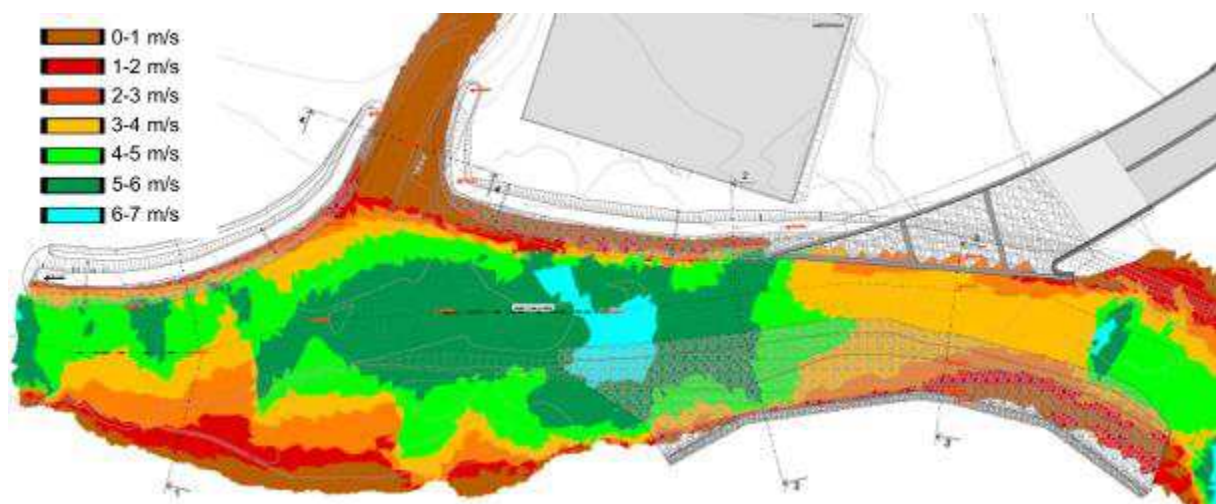


Figura 31 – Fiume Chiese, mappa delle velocità –  $Q_{galleria} = 110 \text{ m}^3/\text{s}$   $Q_{Chiese} = 220 \text{ m}^3/\text{s}$



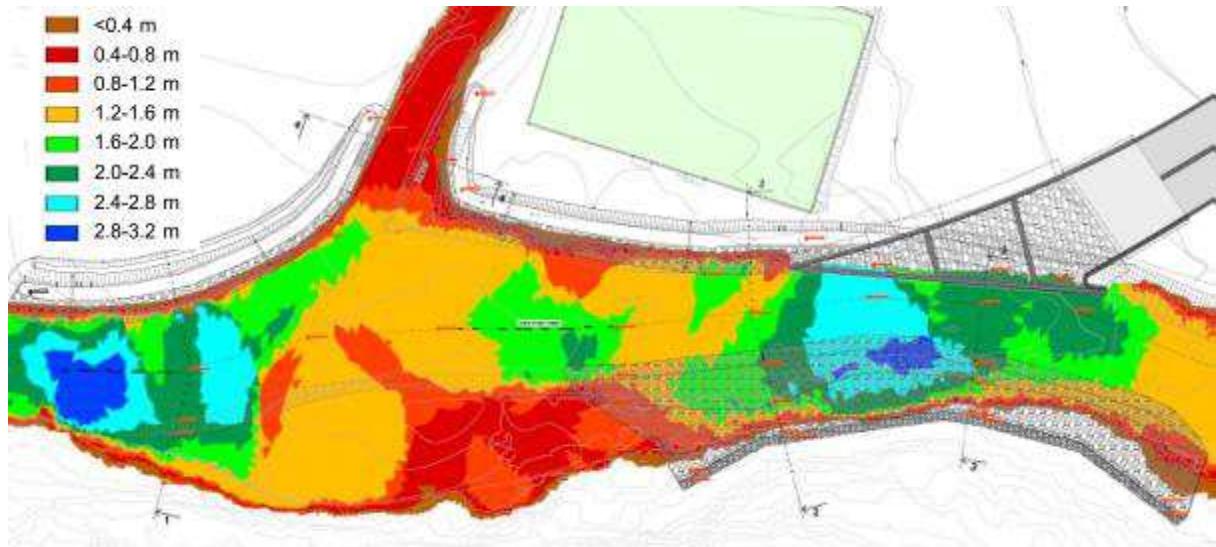


Figura 32 –Fiume Chiese, mappa dei livelli idrici –  $Q_{galleria} = 332 \text{ m}^3/\text{s}$   $Q_{Chiese} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$

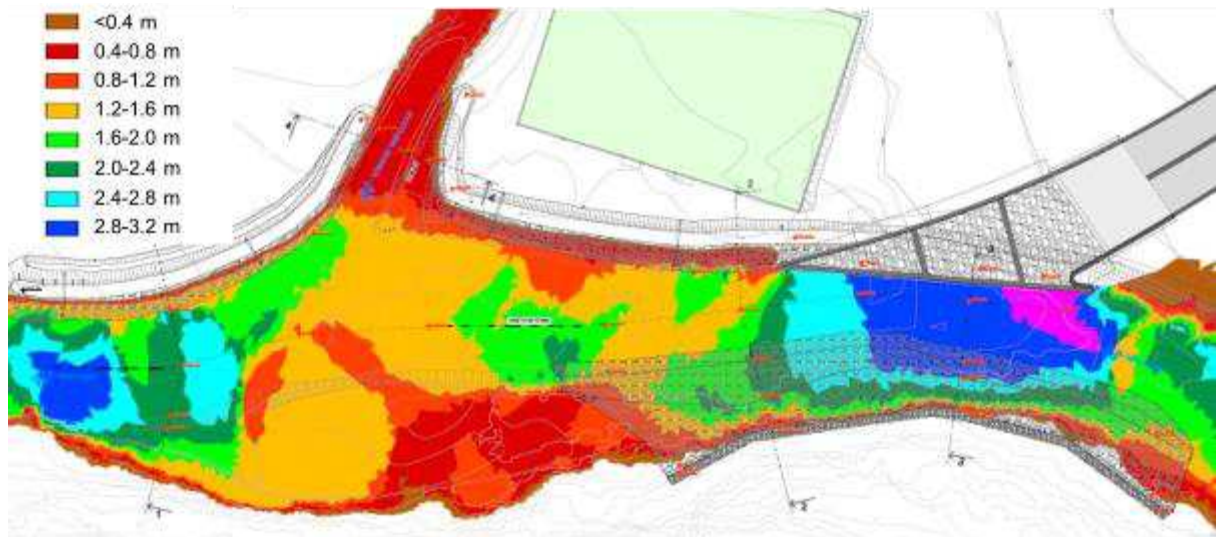


Figura 33 –Fiume Chiese, mappa dei livelli idrici –  $Q_{galleria} = 110 \text{ m}^3/\text{s}$   $Q_{Chiese} = 220 \text{ m}^3/\text{s}$

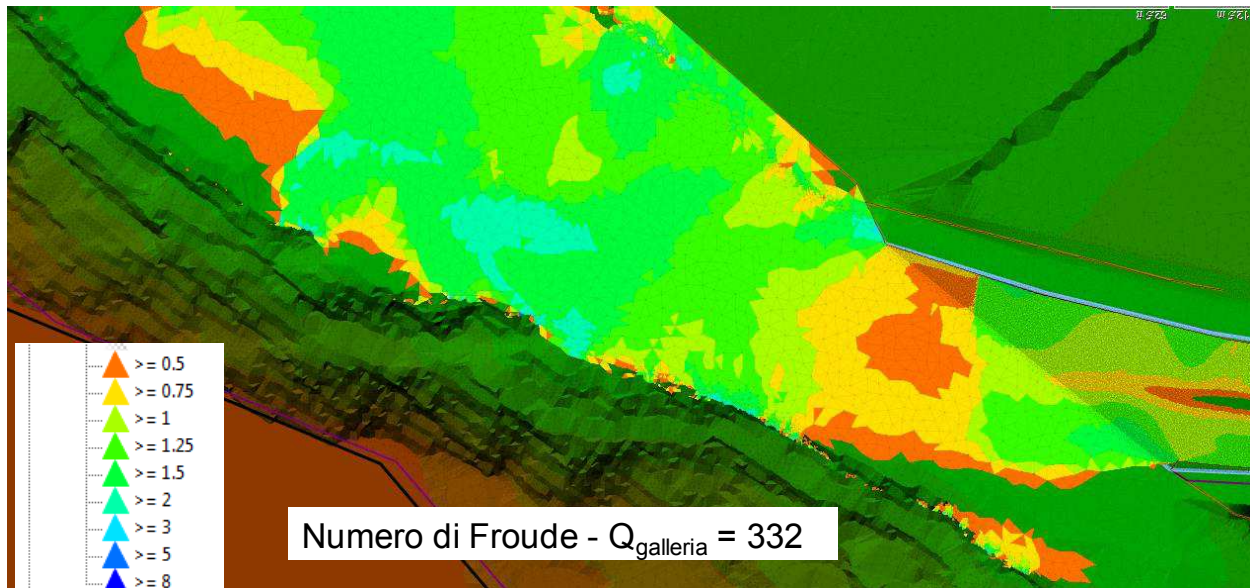


Figura 34 –Fiume Chiese, numero di Froude –  $Q_{galleria} = 332 \text{ m}^3/\text{s}$   $Q_{Chiese} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$

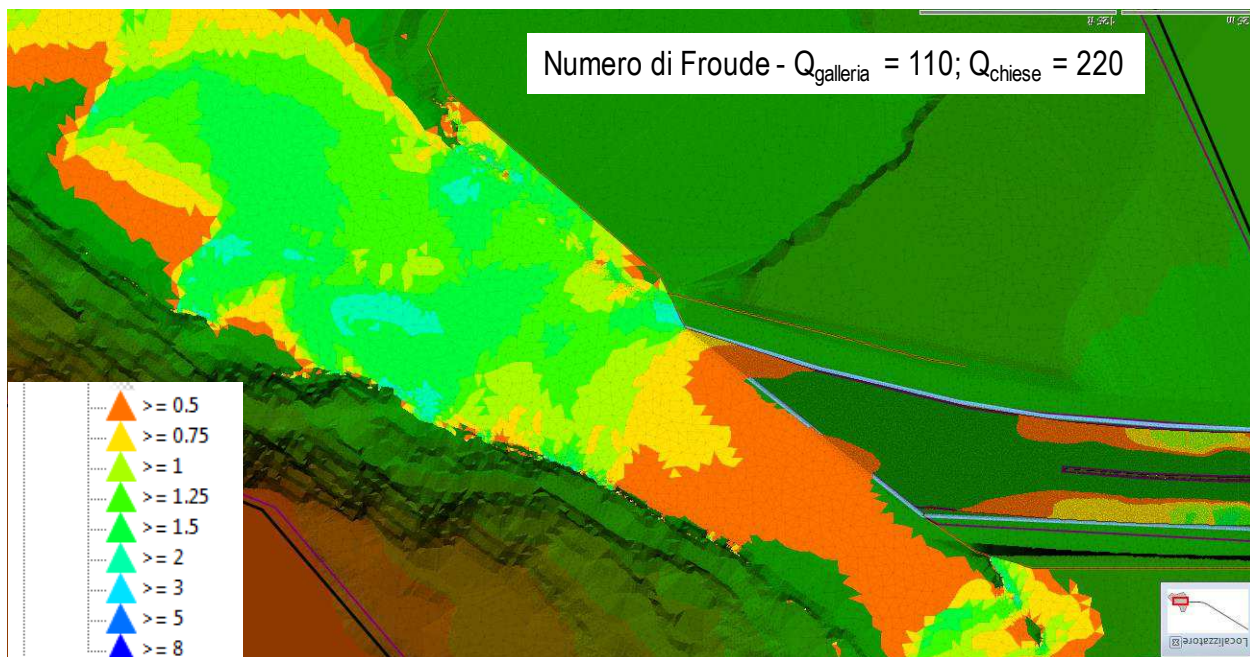


Figura 35 –Fiume Chiese, mappa dei livelli idrici –  $Q_{galleria} = 110 \text{ m}^3/\text{s}$   $Q_{Chiese} = 220 \text{ m}^3/\text{s}$

#### 4.9.1. Dimensionamento delle opere di difesa spondale

Analogamente a quanto si dirà al paragrafo 5.2, con particolare riferimento al peso/pezzatura del materiale da utilizzare, si riprende e si conferma quanto contenuto nel progetto a base gara. Il rivestimento in massi giunge lungo le sponde fino a quota 345.00, superiore al massimo dei livelli idrici ottenuti dalle simulazioni numeriche 2D nei diversi scenari previsti pari alla massima regolazione (vedi figure 36-38).

Per il dimensionamento con massi naturali si riprendono le formulazioni empiriche che tengono conto del grado di turbolenza della corrente. A partire dalla seguente espressione:

$$d = K_d \cdot V^2$$

dove:

$d$  : diametro del masso da determinare;

$K_d$  : coefficiente correttivo;

$V$  : velocità della corrente.

In base alle simulazioni 2D, il valore di velocità della corrente in prossimità delle sponde risulta pari a 2-3 m/s (nello scenario più gravoso con scarico di 332 mc/s attraverso la sola galleria).

Tuttavia, anche in ragione degli elevati gradienti di velocità in prossimità delle sponde (figura 30), ossia di forti variazioni di velocità in breve spazio, si è preferito prendere a riferimento una fascia leggermente più ampia di quella strettamente a ridosso della sponda, ottenendo una velocità pari a 4 m/s.

Pertanto, utilizzando la formulazione più cautelativa per la determinazione del parametro  $K_d$ , che risulta essere quella di Izbash, si ottiene un diametro del masso pari a 0.90 m, arrotondato ad 1, dal quale deriva la prescrizione di utilizzare massi aventi peso unitario non inferiore a 2000 kg.

Si confermano inoltre anche le stime ed i dimensionamenti per l'erosione immediatamente a valle dello sbocco nel Chiese, dimensionamenti che nel progetto di gara si basavano su velocità di uscita pari a 6 m/s, quindi coerenti con quelli in verità ottenuti solo in sede di progetto esecutivo e che, in ogni caso, conducono ad un taglione profondo 3.50 m.



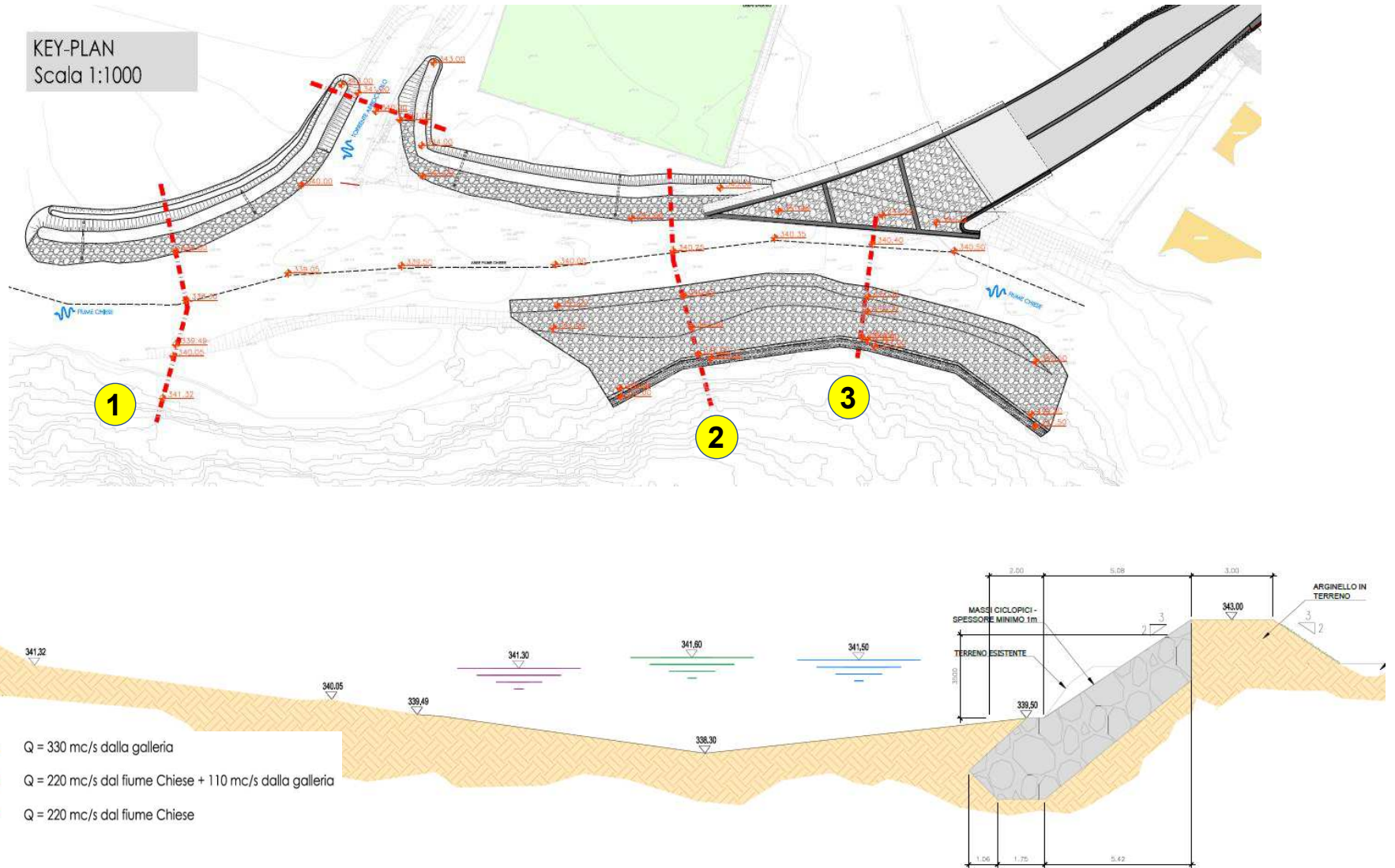


Figura 36 – Sistemazione fiume Chiese - Sezione 1

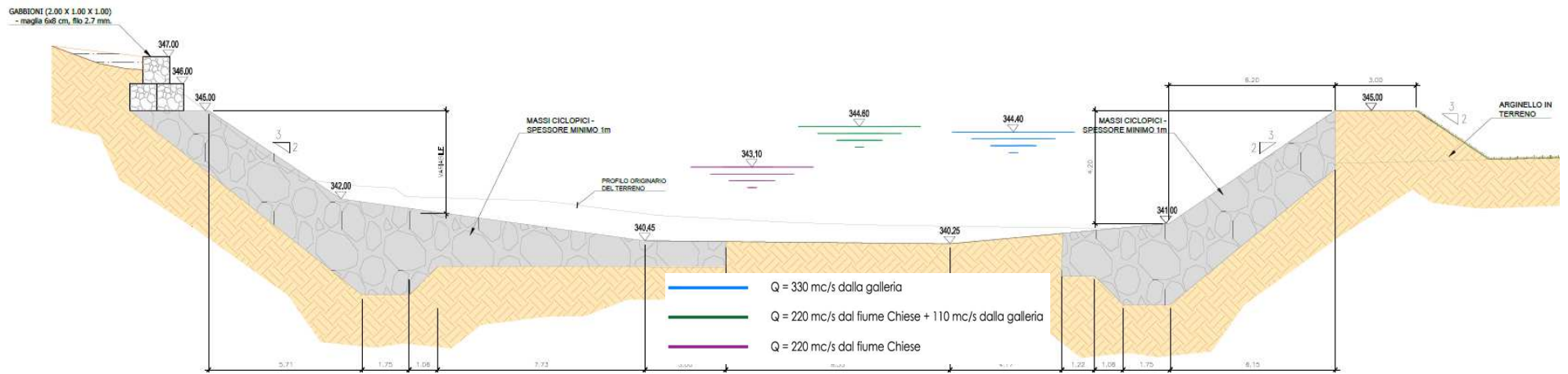


Figura 37 –Sistemazione fiume Chiese - Sezione 2

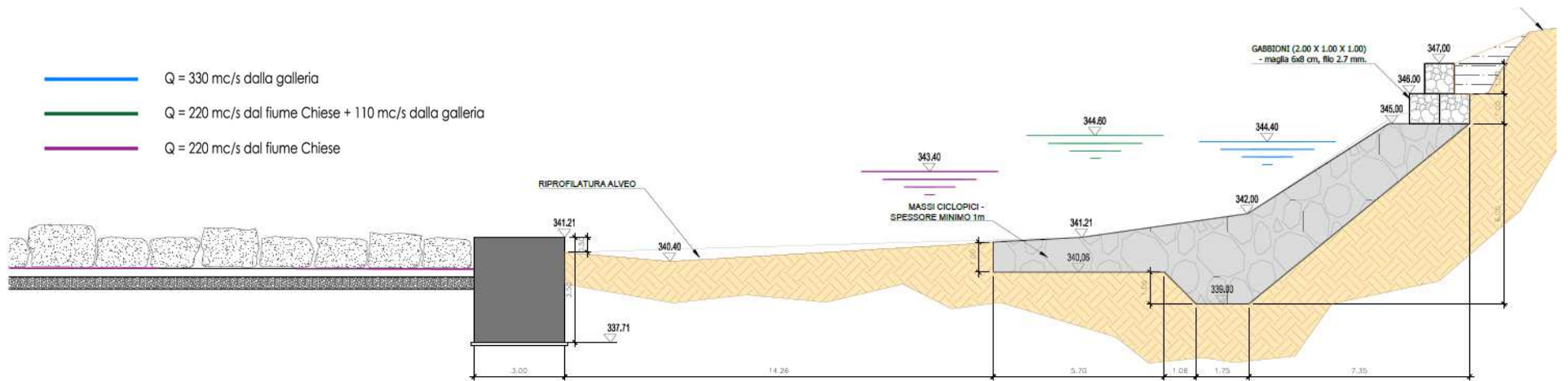


Figura 38 –Sistemazione fiume Chiese - Sezione 3

#### 4.10. CONCLUSIONI SULLO SCOLMATORE

Si riassumono le caratteristiche prestazionali dello scolmatore (galleria di by-pass) frutto del presente progetto esecutivo.

Si rammenta che, supportate dalle analisi numeriche su modello 2D e dalle prove sperimentali su modello fisico e, nel rispetto dei vincoli di cui al paragrafo 1 della presente relazione, le soluzioni proposte:

- Hanno determinato variazioni nella distribuzione delle pendenze interne al manufatto (par. 4.2 e 4.4)
- Hanno eliminato la vasca di dissipazione ed introdotto macro-scabrezze (soglie) nel manufatto di restituzione (par 4.8)
- Hanno richiesto l'incremento del diametro della sezione policentrica (par 4.5)

In sintesi, il progetto esecutivo qui descritto assolve a tutte le osservazioni mosse al progetto definitivo posto a base gara, da parte degli enti competenti, in quanto:

- riduce il grado di riempimento in galleria
- analizza con modelli numerici 2D spinti ad elevata risoluzione (10-2 m) ed anche mediante modello fisico i fenomeni di perturbazione del profilo liquido, dovuti ad onde stazionarie e roll waves
- elimina le incertezze relative all'ubicazione del risalto e degli aerofori nel manufatto di restituzione, rimuovendo la vasca di dissipazione e mantenendo la corrente in condizione supercritica (veloce)
- riduce sensibilmente le velocità della corrente in uscita dal manufatto di restituzione verso il fiume Chiese.

La tabella seguente sintetizza lo spettro dei valori ottenuti per i principali parametri di interesse idraulico, nelle varie simulazioni per le varie configurazioni testate.

Grado di riempimento max in galleria (Mod. Fisico)	78%
Grado di riempimento max in galleria (Mod. Numerico 2D)	71%
Grado di riempimento max in galleria (Scala di Deflusso - Fig. 17)	73%
Velocità max in galleria (Mod Fisico)	11.4 m/s
Velocità max in galleria (Mod Numerico 2D)	13.0 m/s
V max manufatto restituzione (Mod. Fisico)	14.4 m/s
V max manufatto restituzione (Mod. Numerico 2D)	15 m/s
V media allo sbocco in Chiese (Mod. Fisico)	6 m/s
V media allo sbocco in Chiese (Mod. Numerico 2D)	6.5 m/s

Si sottolinea inoltre che:

- nello scenario QGALLERIA = 332 m<sup>3</sup>/s non si verifica mai risalto idraulico nei canali di restituzione
- nello scenario QGALLERIA = 110 m<sup>3</sup>/s, QCHIESE = 220 m<sup>3</sup>/s, c'è la possibilità che il risalto abbia in parte luogo all'interno del tratto chiuso del canale di restituzione, tuttavia sia i modelli numerici sia il modello fisico lo verificano nel tratto a cielo aperto o in prossimità dello stesso e con un buon franco nei confronti del soffitto del canale.
- La rimozione della vasca di dissipazione ha visto rimuovere anche gli aerofori così come previsti nel progetto di gara. Tuttavia è stata mantenuta una presa d'aria mediante una apertura

- presidiata da griglia nella soletta all'inizio del manufatto di restituzione (Tratto 6)
- Le scale di deflusso determinate su modello fisico e quelle che emergono dalla teoria dei culvert concordano nello stabilire che è possibile scaricare la portata di progetto (332 m<sup>3</sup>/s) attraverso la galleria già per un livello nel lago pari a 369.70 m s.l.m.. Qualora il livello fosse pari al massimo invaso (371.23) per limitare la portata attraverso la galleria a quella di progetto, occorrerebbe parzializzare l'apertura delle paratoie all'87%.



## 5. IL PROGETTO DELLA NUOVA TRAVERSA

La nuova traversa per la regolazione del lago d'Idro situata al termine meridionale del lago e precisamente circa 130 m a valle dell'attuale ponte d'Idro e circa 300 m a monte dell'attuale traversa. Prevede due luci principali aventi larghezza 11.5 m, quindi superiore a quella esistente.

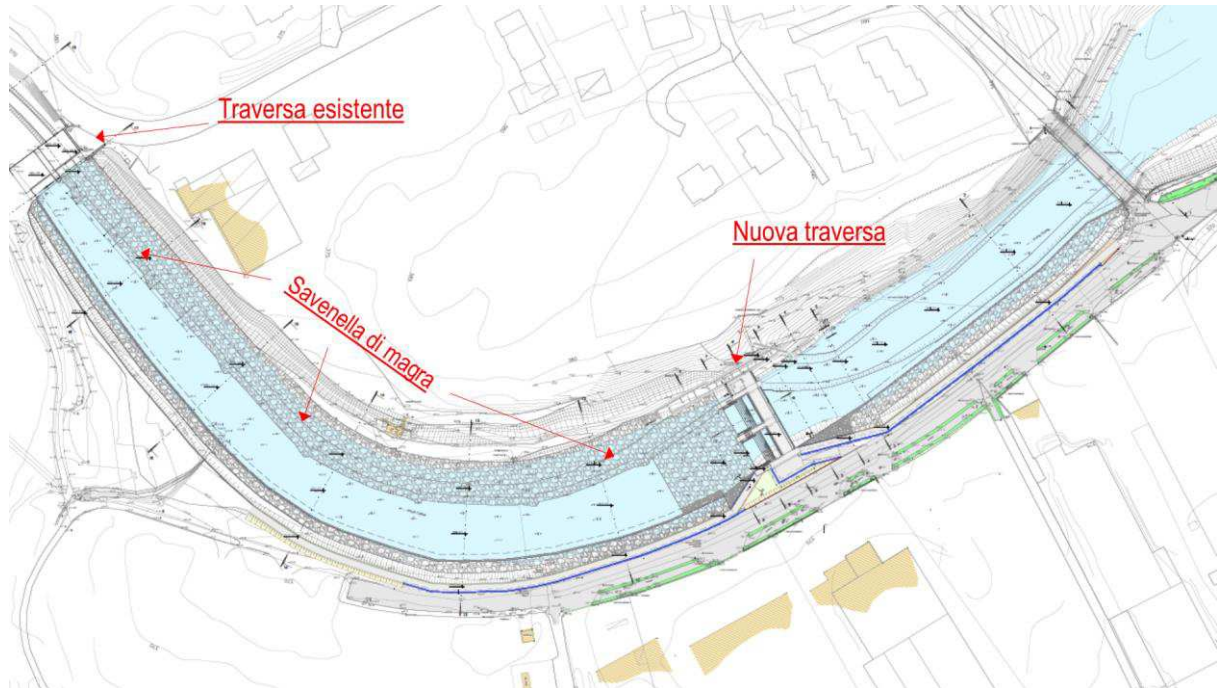


Figura 39 –

Le luci sono presidiate da paratoie mobili a ventola, che consentono varie possibilità di regolazione. Una paratoia minore regola inoltre la gestione del canale destinato al DMV (savenella di magra) ed alla risalita pesci. E' inoltre prevista, sempre in destra idraulica una scala per la risalita pesci, appositamente ottimizzata nel corso della presente progettazione esecutiva.

La soglia delle luci principali è posta alla quota di 365.00 m s.l.m. come emerso nel progetto definitivo e qui confermato. Le paratoie delle luci principali, quando chiuse contro la soglia inferiore, presentano la soglia superiore alla quota di 368.00 m s.l.m. pari alla massima regolazione.

Le stesse paratoie delle luci principali, in posizione di massima apertura, presentano una luce libera inferiore di circa 4.20 m.

Come accennato, a valle della traversa, in destra idraulica, verrà realizzata una savenella rivestita in massi conformata e dimensionata per:

- Consentire il passaggio di una portata pari al doppio del minimo deflusso vitale (circa 5 m<sup>3</sup>/s) con un livello del lago pari alla minima regolazione di 364.75 m s.l.m.
- Consentire la risalita della fauna ittica



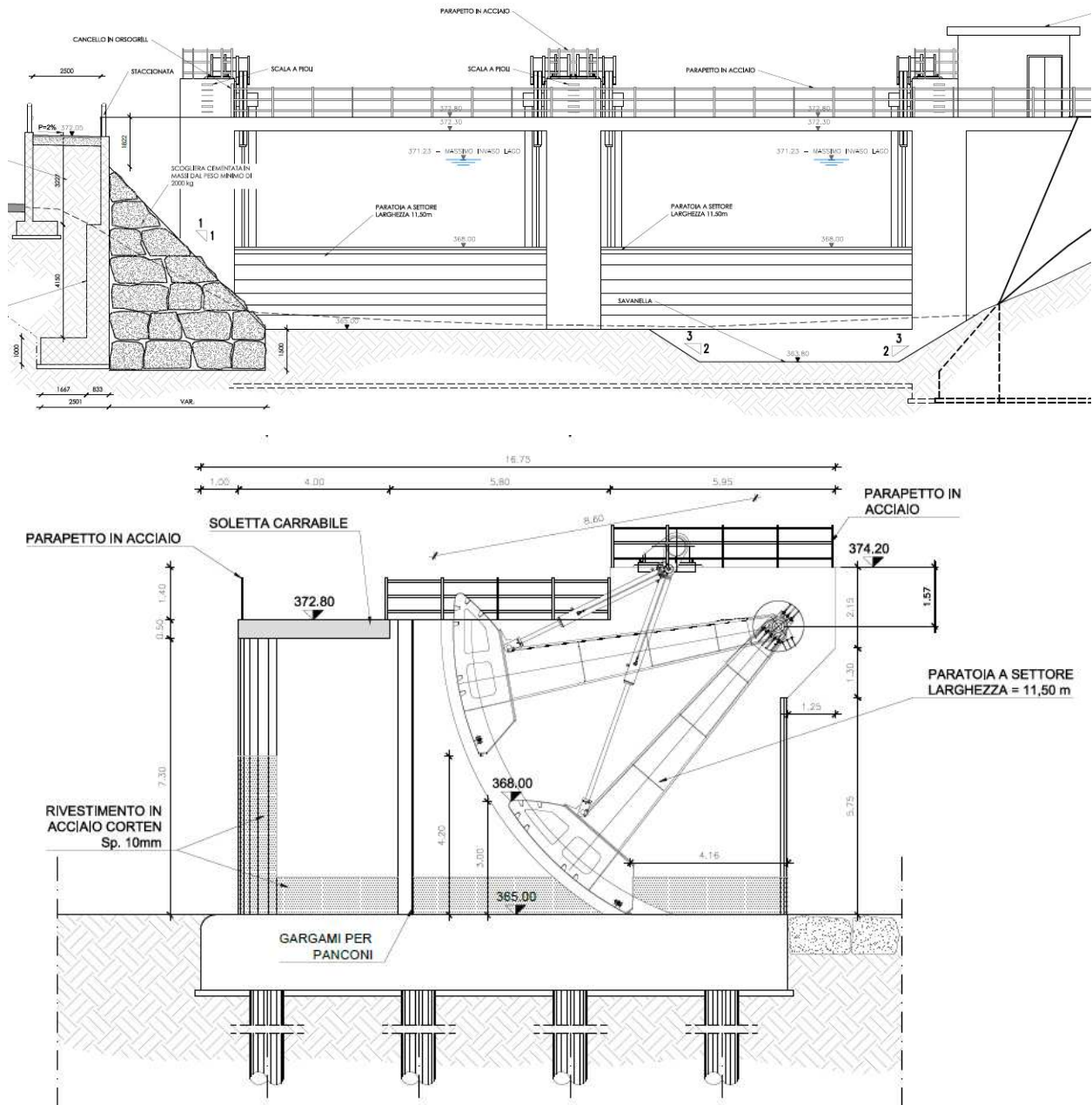


Figura 40 – Vista prospettica da monte e sezione longitudinale della nuova traversa

A parte la savenella laterale in sponda destra, la cui quota di fondo passa da 363.80 in corrispondenza della nuova traversa a 363.25 presso la traversa esistente, l'alveo non verrà abbassato tra la nuova traversa e quella esistente, ma semplicemente livellato omogeneizzando il fondo alla quota di 365.00 m s.l.m.

Rispetto al progetto a base gara, la quota della soletta superiore è stata alzata a 372.80 m s.l.m., con sotto trave ugualmente innalzato a 372.30 m s.l.m., ovvero al di sopra della quota di massimo invaso di 371.23 m s.l.m. (livello di massimo invaso previsto).

Il franco tra l'intradosso della soletta e la quota di massimo invaso è pertanto incrementato a di 1.07 m.

A valle del nuovo sbarramento si conferma la protezione delle sponde mediante scogliere in massi del peso minimo di 2000 kg e, in sponda sinistra ove la corrente raggiungerà le maggiori velocità, superiormente, anche con materassi metallici tipo Reno Sp=25cm, riempiti con pietrame di media pezzatura, sormontati da georete intasata con terreno vegetale e fissata con ancoraggi su strato portante

di base e terreno vegetale inerbito. La sponda sinistra verrà rialzata fino alla quota di sicurezza di 370.50 m s.l.m. (1.07 m superiore al livello massimo raggiunto in caso di piena con TR=200 anni -369.43- e superiore alla massima piena millenaria in tutti gli scenari già analizzati nel progetto a base gara, del quale si confermano i risultati).

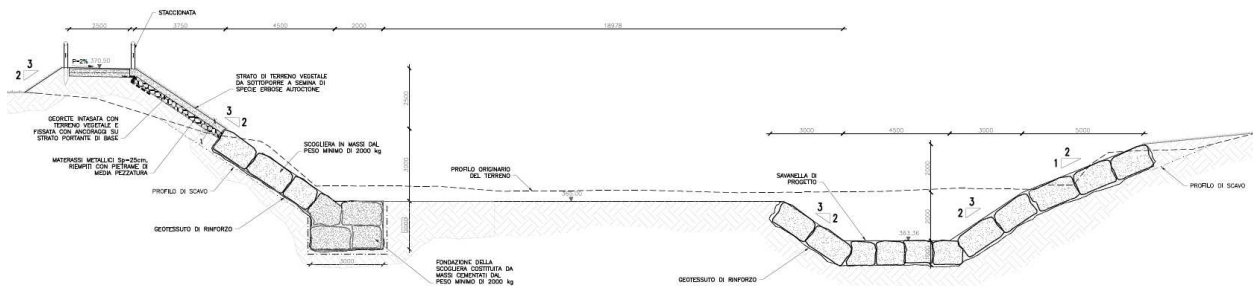


Figura 41 –Sistemazione tipo a valle della nuova traversa

A monte della traversa di progetto si conferma l'innalzamento della sponda sinistra fino alla quota di 372.00 m s.l.m. (superiore al massimo invaso previsto a 371.23); tale innalzamento si rende necessario per evitare l'aggiramento incontrollato dello sbarramento, durante le piene, attraverso le zone produttive ubicate a quote altimetricamente depresse. Sulla sommità della sponda verrà realizzato un camminamento ciclo-pedonale protetto mediante staccionate in legno. La sponda verrà protetta dal lato dell'alveo mediante una scogliera in massi del peso minimo di 2000 kg alla base e superiormente con materassi metallici tipo Reno Sp=25cm, riempiti con pietrame di media pezzatura, sormontati da georete intasate con terreno vegetale e fissate con ancoraggi su strato portante di base e terreno vegetale inerbito.

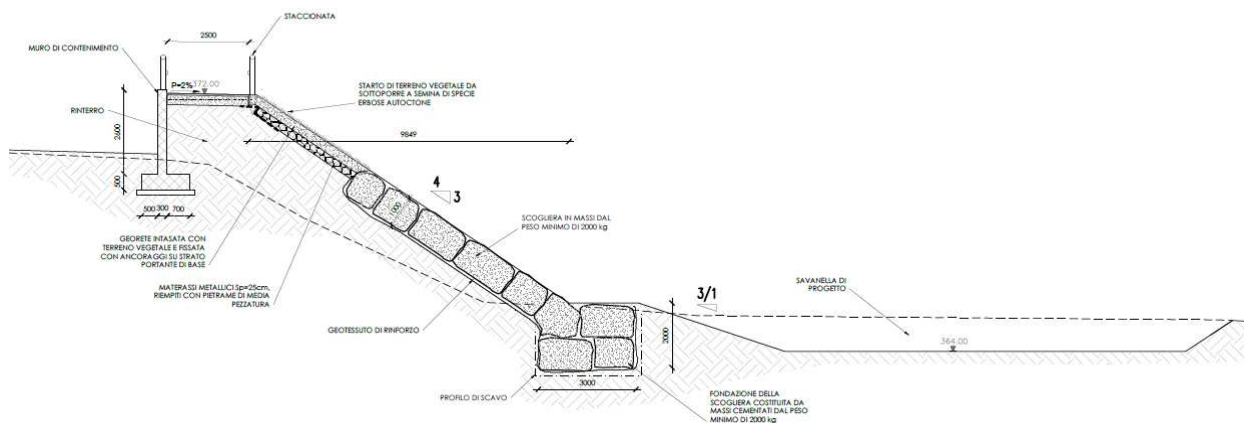


Figura 42 –Sistemazione tipo a monte della nuova traversa

## 5.1. SCALA DI DEFUSSO DELLA NUOVA TRAVERSA

Per quanto riguarda le prestazioni idrauliche della nuova traversa, restano di fatto immutate rispetto al progetto a base gara le geometrie che determinano la scala di deflusso del manufatto.

In dettaglio, sono invariate le seguenti grandezze:

- Quota di imposta del manufatto (livello della soglia) pari a 365.00
- Larghezza delle luci, pari a 11.50 m
- Sommità sfiorante delle paratoie in condizioni di chiusura totale, pari a 368.00

- Massima apertura delle paratoie, pari a 4.20 m
- Quote e forma della sezione fluviale nel tratto a valle della nuova traversa, con particolare riferimento alla pendenza dello stesso, pari a 0.

Pertanto, in ragione degli invarianti sopra esposti, si confermano le valutazioni svolte e contenute nel progetto a base gare relative alla scala di deflusso del nuovo manufatto ed alla sua capacità di esitare portata al variare del livello nel lago e del grado di apertura delle paratoie.

Si riporta di seguito una sintesi delle valutazioni estratte dal progetto a base gara.

Con un livello di 368.00 del lago, pari alla massima regolazione, procedendo con l'apertura graduale della paratoia, si avrà una portata effluente variabile tra 0 e 130 m<sup>3</sup>/s secondo la scala di deflusso riportata nella seguente figura. Il deflusso, data la pendenza nulla dell'alveo tra la traversa esistente e quella di progetto avviene con moto sotto battente rigurgitato.

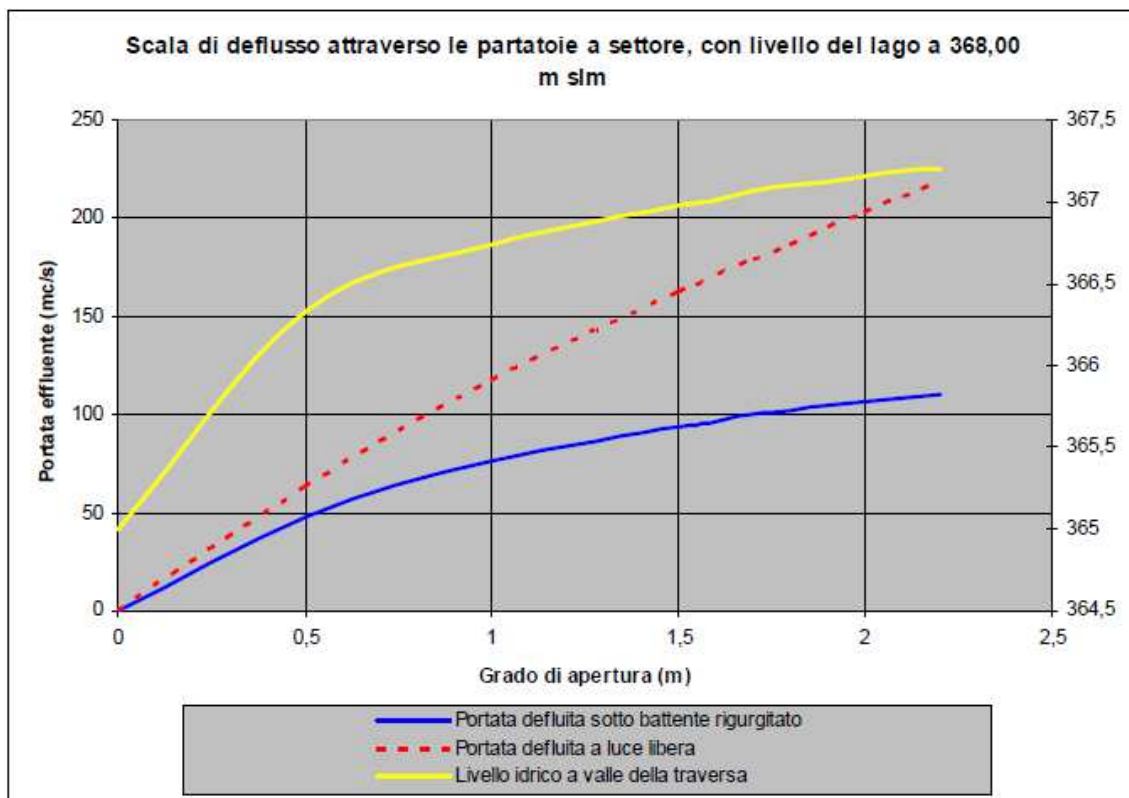


Figura 43 –Scala di deflusso della traversa con livello del lago a 368.00 (Progetto Definitivo a base gara)

Con gradi di apertura maggiori di 2.2 m, il moto non è più da considerarsi sotto battente (seppur rigurgitato), in quanto i livelli di valle tendono a bilanciarsi con i livelli del lago e la differenza di quote sono pari alle perdite di carico attraverso l'infrastruttura. Con paratoie completamente aperte, la portata defluita attraverso la traversa, con lago alla massima regolazione è stimabile in 130 mc/s.

Con livello del lago a 367.00 m s.l.m., le portate sono le seguenti ed il moto è comunque rigurgitato:

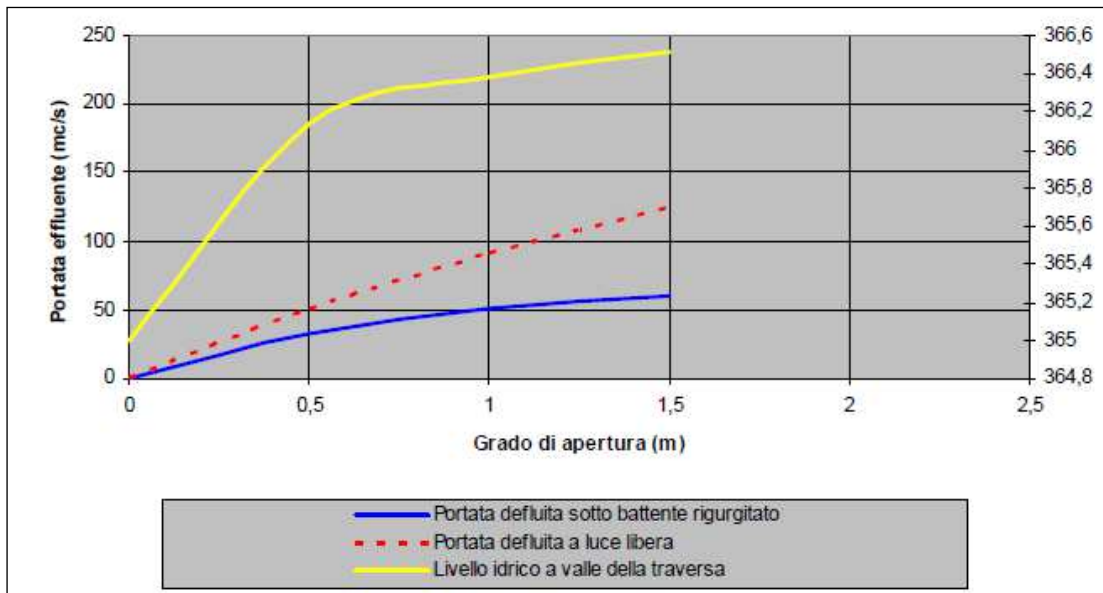


Figura 44 –Scala di deflusso della traversa con livello del lago a 367.00 (Progetto Definitivo a base gara)

Per aperture maggiori di 1.50 m, con un carico di monte di 2.00 m, la portata defluita tende a valori di 80 mc/s. Infine con livelli di 366.00 m s.l.m. del lago si hanno portate variabili tra 0 e 30 m<sup>3</sup>/s.

Il moto risulta sempre rigurgitato, con annegamento del risalto. La lunghezza del risalto  $l_r$  come si ricava da dati sperimentali americani risulta prossimamente pari a  $l_r=6(hv)$ . Da tali verifiche si ritiene opportuno proteggere il fondo del Chiese a valle della traversa per

una lunghezza di circa 30 m

## 5.2. DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE DI DIFESA SPONDALE

Anche per quanto riguarda il dimensionamento delle difese di sponda, con particolare riferimento al peso/pezzatura del materiale da utilizzare, si riprende e si conferma quanto contenuto nel progetto a base gara. Il rivestimento in massi giunge lungo le sponde fino a quota 368.00, pari alla massima regolazione (vedi figure 41 e 42).

Per il dimensionamento con massi naturali si riprendono le formulazioni empiriche che tengono conto del grado di turbolenza della corrente. A partire dalla seguente espressione:

$$d = K_d \cdot V^2$$

dove:

$d$  : diametro del masso da determinare;

$K_d$  : coefficiente correttivo;

$V$  : velocità della corrente.

Utilizzando la formulazione più cautelativa per la determinazione del parametro  $K_d$ , che risulta essere quella di Izbash e considerando una velocità pari a 4 m/s (valore confermato dalle simulazioni 2D), si ottiene un diametro del masso pari a 0.90 m, arrotondato ad 1, dal quale deriva la prescrizione già precedentemente menzionata di utilizzare massi aventi peso unitario non inferiore a 2000 kg.

### 5.3. SCALA DI RISALITA PER LA FAUNA ITTICA

Come già indicato, sulla parte destra della traversa verrà realizzata la scala per la risalita dei pesci, il cui dimensionamento era già stato eseguito nel progetto a base gara in modo tale da avere un corretto funzionamento della stessa per ogni livello del lago.

La tipologia di scala proposta è realizzata mediante una serie di bacini comunicanti tra loro attraverso delle fessure verticali. La scelta di tale tipologia di scala deriva dall'elevata variazione dei livelli nel lago.

Per la conferma della tipologia scelta, nonché per la definizione dei requisiti progettuali si è fatto riferimento ad apposite Linee Guida redatte della Regione Piemonte in base alla quale è stato condotto il dimensionamento. I valori proposti nelle Linee Guida sono peraltro i medesimi riportati nel progetto a base gara e vengono di seguito elencati:

- Il dislivello dell'acqua da un bacino al successivo inferiore ai 40 cm;
- La velocità massima dell'acqua effluente da ciascuna fessura non superiore a 1-1.5 m/s affinché sia possibile la risalita per tutti i pesci;
- La velocità minima dell'acqua effluente da ciascuna fessura non inferiore a 0.8 m/s;
- Il dimensionamento dei bacini eseguito tenendo presente che il volume dei bacini deve essere tale da consentire di disperdere l'energia della corrente fino ad una potenza di dispersione ottimale per unità di volume d'acqua P/V pari a 150/250 Watt/m<sup>3</sup>.

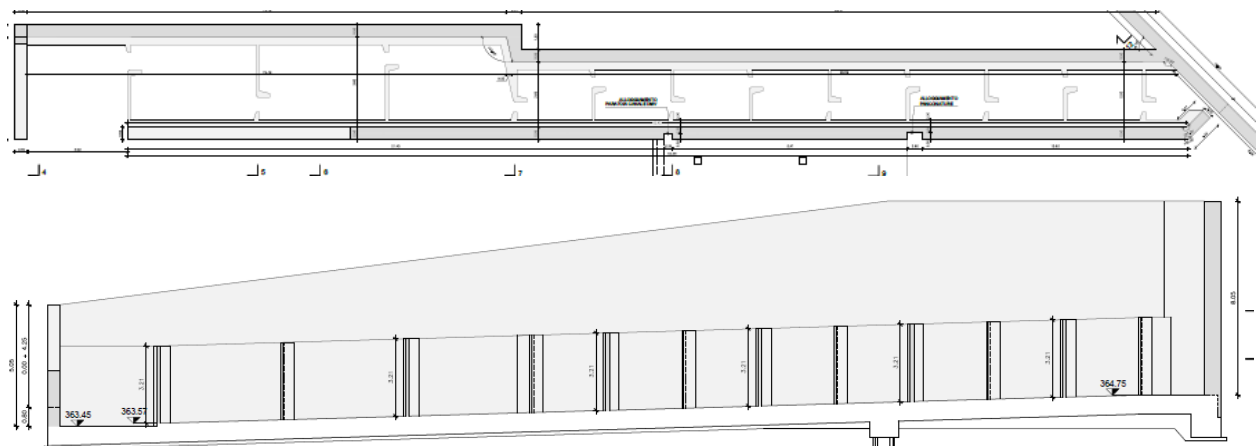


Figura 45 –Pianta e profilo longitudinale della scala per la risalita della fauna ittica

Le fessure verticali mettono in comunicazione i vari bacini della scala sono di dimensioni variabili comprese fra 40 e 70 cm, come raccomandato nelle suddette Linee Guida, così come alle stesse ci si è rifatti per la definizione della geometria dei setti stessi.

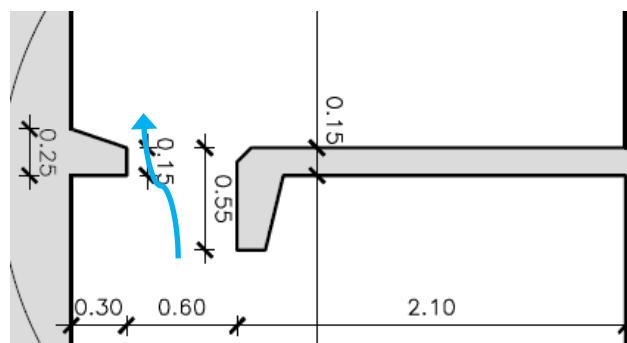


Figura 46 –Dettaglio della forma di un setto della scala pesci. Fessura per il passaggio dell'acqua e della fauna = 0.60 m. La freccia indica il verso della corrente



Uno dei maggiori problemi delle vasche di risalita è la necessità di pulizia del fondo per mantenere un buon funzionamento nel tempo. Infatti, a causa dei setti da cui è formata una quantità rilevante di materiale tende a depositarsi sul fondo. Devono quindi essere previste soluzioni per garantire la continua efficienza del sistema.

Per ovviare a tale problema sono state previste delle paratoie costituite da setti estraibili manualmente, proprio in corrispondenza dei muri che delimitano i bacini. Sollevando tali paratoie è la velocità stessa dell'acqua a spostare il materiale depositato sul fondo.

Per implementare tale soluzione verranno realizzate paratie poste a valle di ciascun setto, con sportello a sollevamento manuale.

### 5.3.1. Modello 2D

Le immagini seguenti mostrano i risultati delle simulazioni numeriche su modello 2D volte alla verifica dei requisiti idraulici per la scala di risalita.

I risultati qui presentati nel caso più gravoso di livello del lago a 368.00 (quota di massima regolazione) confermano la validità delle soluzioni adottate.

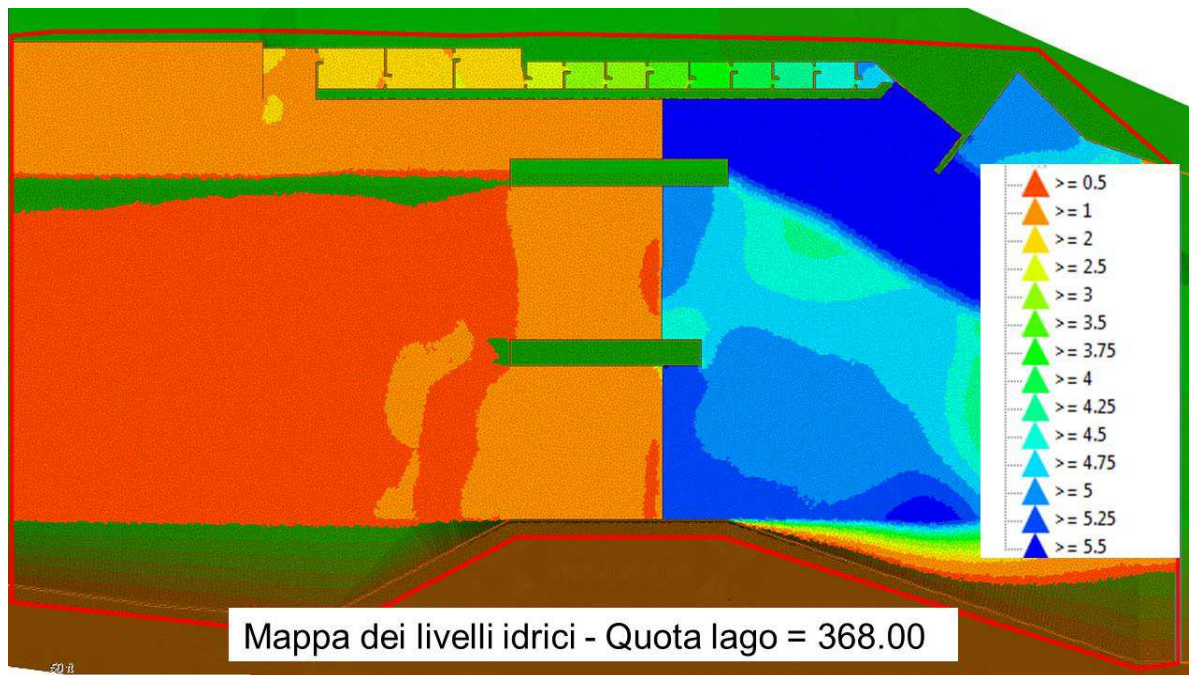


Figura 47 – Simulazione 2D della nuova traversa e della scala pesci - Mappa dei livelli

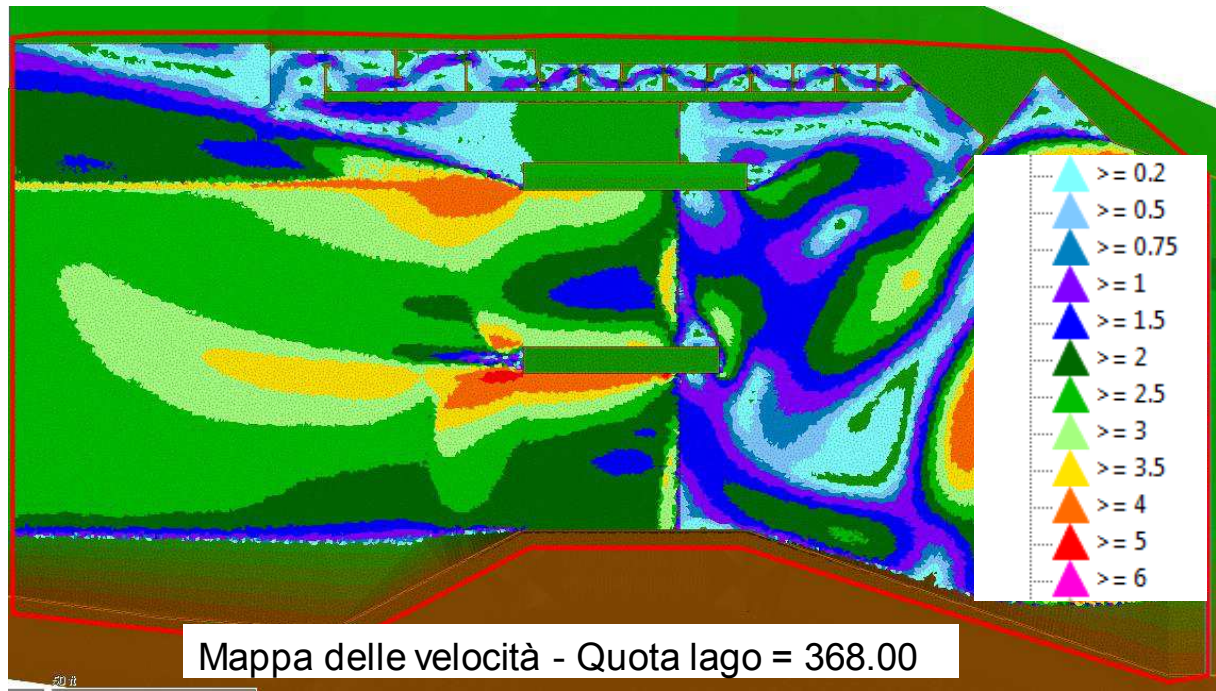


Figura 48 – Simulazione 2D della nuova traversa e della scala pesci - Mappa delle velocità e dettaglio della scala pesci

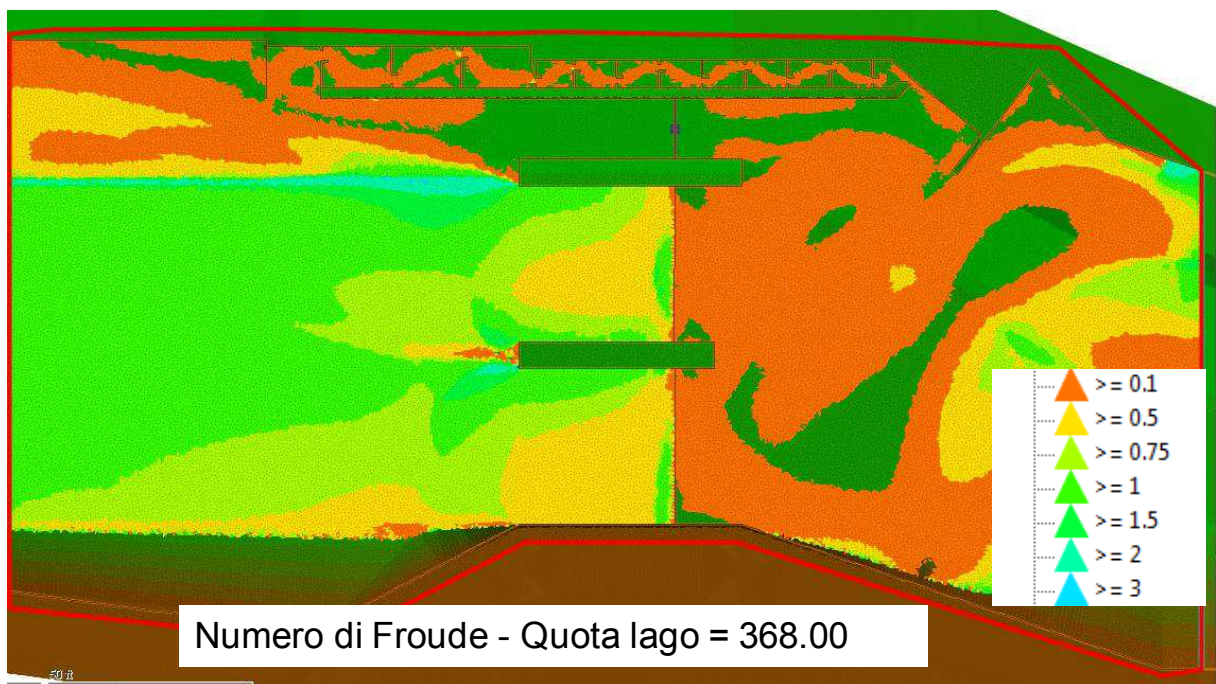


Figura 49 – Simulazione 2D della nuova traversa e della scala pesci - Mappa del numero di Froude



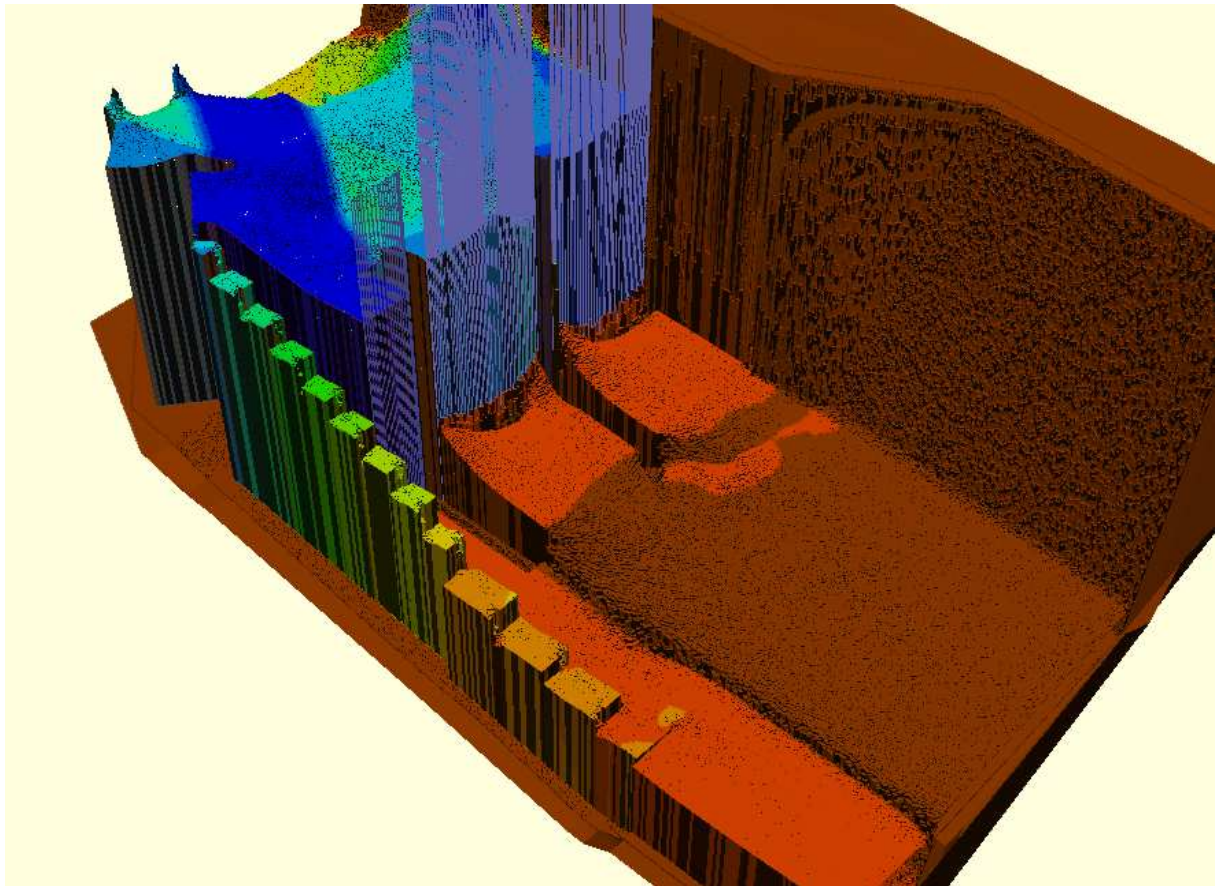


Figura 50 – Simulazione 2D della nuova traversa e della scala pesci – Vista tridimensionale

Per quanto riguarda il dimensionamento della savenella di magra ed il suo funzionamento sinergico con la scala di risalita pesci, ai fini di garantire il passaggio a valle del DMV (qui inteso nell'intento di essere raddoppiato e portato a  $5.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ), si confermano le considerazioni conclusive tratte dal progetto a base gara.

Nel dettaglio:

- la savenella (Figura 41) avrà una larghezza di base pari a 4.5 m e quota di fondo variabile da 363.45 (nuova traversa) a 363.25 (traversa esistente).
- La soglia della luce (4.50x1.55 m) presso la nuova traversa sarà posta a 363.80 m e presidiata da paratoia.

Tale soluzione garantisce il passaggio del DMV con la quota minima di regolazione del lago (364.75).

Si confermano, come già detto, anche le valutazioni in merito al funzionamento congiunto fra savenella e scala pesci per concorrere al rilascio del DMV e rappresentate nelle figure seguenti

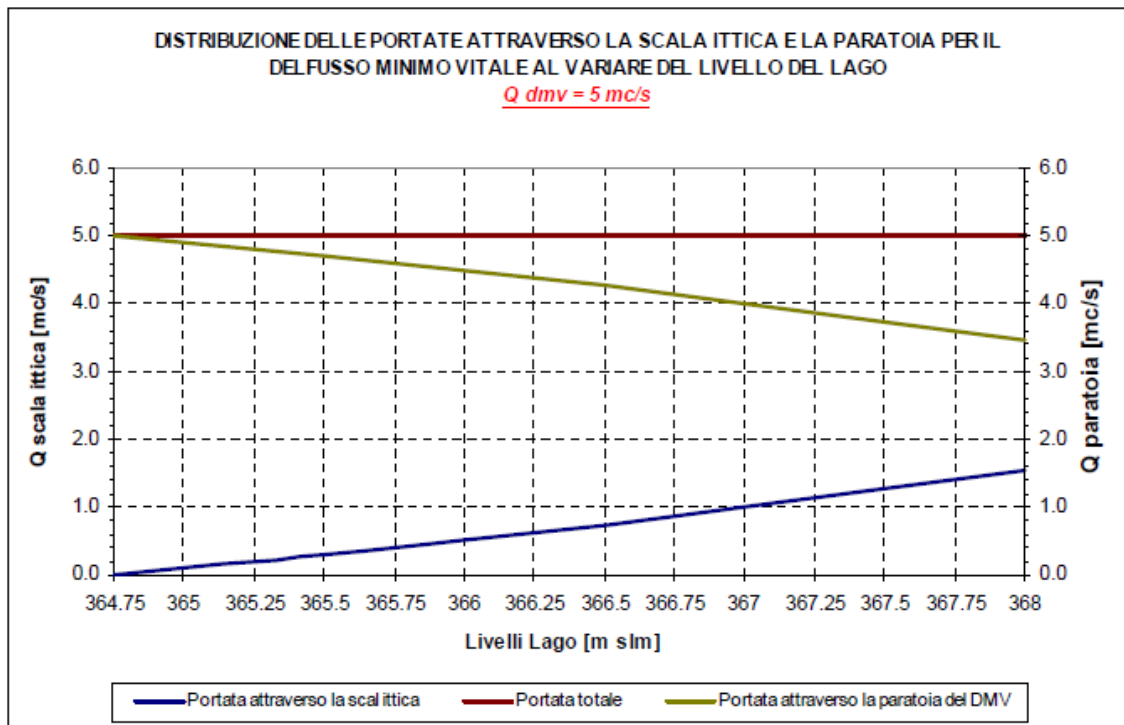


Figura 51 –Ripartizione delle portate tra scala pesci e paratoia per il rilascio del DMV (Progetto Definitivo a base gara)

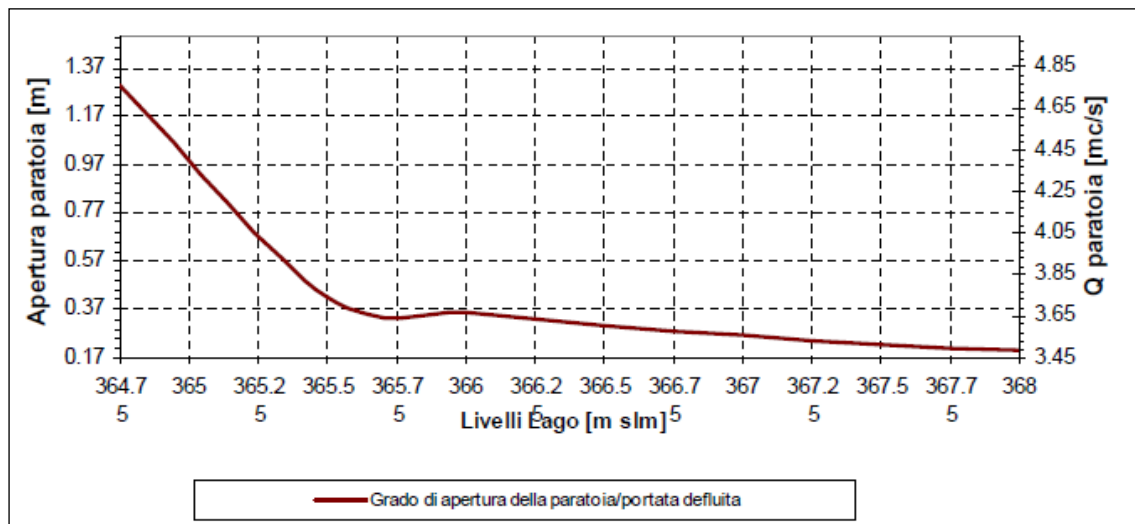


Figura 52 –Gradi di aperture della paratoia che presidia la savenella di magra, al variare del livello del lago, per garantire il rilascio del DMV congiuntamente alla scala pesci (Progetto Definitivo a base gara)



## 5.4. CONCLUSIONI SULLA TRAVERSA

Le prestazioni idrauliche della nuova traversa restano di fatto immutate rispetto al progetto a base gara in quanto immutate sono le geometrie che determinano la scala di deflusso del manufatto, nel dettaglio:

- Quota di imposta del manufatto (livello della soglia) pari a 365.00
- Larghezza delle luci, pari a 11.50 m
- Sommità sfiorante delle paratoie in condizioni di chiusura totale, pari a 368.00
- Massima apertura delle paratoie, pari a 4.20 m
- Quote e forma della sezione fluviale nel tratto a valle della nuova traversa, con particolare riferimento alla pendenza dello stesso, pari a 0.

Pertanto, in ragione degli invarianti sopra esposti, si confermano le valutazioni svolte e contenute nel progetto a base gare relative alla scala di deflusso del nuovo manufatto ed alla sua capacità di esitare portata al variare del livello nel lago e del grado di apertura delle paratoie.

In particolare, la nuova traversa, in ragione della sua posizione (necessaria per garantire un'ubicazione esterna all'area di frana) e soprattutto avendo a valle del tratto di alveo a pendenza pressoché nulla fino alla traversa esistente, è soggetta ad un funzionamento idraulico del tipo luce a battente rigurgitata a partire da un grado di apertura delle paratoie di 2.20 m. Inoltre, considerando un livello di 368,00 del lago (massima regolazione), la portata effluente, variabile in ragione del grado di apertura delle paratoie, raggiunge a paratoie completamente aperte i 130 m<sup>3</sup>/s.

Qualora si dovesse scaricare attraverso la nuova traversa l'intera portata di progetto (332 m<sup>3</sup>/s), sarebbe necessario un livello del lago pari a 372.17 m s.l.m.

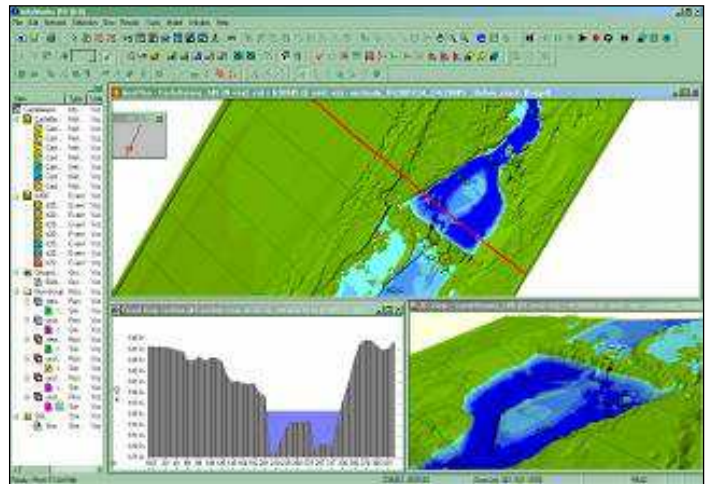
Ne consegue che la galleria di by-pass è più efficiente della traversa, in quanto, come indicato nei paragrafi precedenti, riesce a scaricare la portata di progetto già per un livello del lago pari a 369.70 m s.l.m.

Come già suggerito nel progetto definitivo, al fine di limitare livelli elevati nel lago oltre alla corrente in Chiese e relativi possibili inneschi di dissesti, la nuova galleria di bypass si presta ad essere utilizzata non solo laddove si verificasse la temuta ostruzione dell'emissario del lago, ma anche quale regolatore più efficiente dei fenomeni di piena che investono il lago.

## A.1 APPENDICE: DESCRIZIONE SINTETICA DEL MODELLO 2D – INFOWORKS ICM

InfoWorks ICM è un “applicativo” sviluppato dalla società inglese Wallingford Software, che nasce dalla combinazione di potenti risolutori matematici (come HydroWorks) e un ambiente di lavoro di tipo GIS.

InfoWorks RS rappresenta lo stato dell’arte della modellazione bidimensionale combinando la versatilità del suo codice di calcolo con la compatibilità del supporto con i principali Sistemi Informativi Territoriali in cui risultano essere mappati il sistema idrografico principale e quello secondario.



### INTERFACCIA GRAFICA DEL SOFTWARE

In ottemperanza alla normativa sulla pirateria informatica il software utilizzato risulta regolarmente licenziato da Wallingford Software a favore di Sinergia SRL con N° di licenza ID MWH10980001.

### IL BACKGROUND MATEMATICO DEL SOFTWARE

InfoWorks RS combina il calcolo idrologico, con varie metodologie disponibili, al calcolo idraulico a moto vario integrando le complesse equazioni di continuità e del moto.

La parte idrologica viene affrontata con dei metodi ampiamente testati come, ad esempio: coefficiente di deflusso fisso (che ipotizza che una quota parte costante della pioggia netta venga intercettata dalla rete di drenaggio).

Metodo SCS, classico metodo sviluppato negli Stati Uniti e per il quale l’utente definisce un valore di CN per il tipo di suolo, Metodo Green-Ampt, metodo di Horton, metodo dell’infiltrazione costante.

L’utente seleziona a suo piacere uno di questi metodi (o diversi metodi per diverse parti del territorio rappresentato) e ha completo controllo sui parametri di controllo del metodo (ovvero il metodo si può adattare intervenendo su opportuni coefficienti alla specificità del bacino modellato).

A valle del calcolo idrologico, che si limita a calcolare i contributi in rete delle singoli bacini di influenza, InfoWorks RS utilizza le equazioni di De Saint Venant complete, risolvendole con una approccio detto dei 4 punti di Priessman.

Le equazioni di De Saint Venant sono le equazioni che stanno alla base del moto in condotta e che se

integrate correttamente, permettono di ricostruire i profili idraulici a moto vario in un reticolo di drenaggio.

Le equazioni sono le seguenti:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (2)$$

dove:

- A area bagnata del condotto;
- Q portata;
- x distanza lungo l'asse del condotto;
- t tempo;
- g costante gravitazionale;
- H carico idraulico totale dato da z+h;
- z quota dello scorrimento;
- h livello idrico;
- Sf cadente piezometrica.

In particolare, la (1) è l'equazione di continuità in moto vario in assenza di afflussi e deflussi laterali, la (2) è l'equazione del momento della quantità di moto; quest'ultima può essere scritta in più forme, dipende dalla scelta delle variabili dipendenti.

La cadente piezometrica viene computata con varie possibili metodologie (a scelta dell'utente): in InfoWorks sono infatti disponibili le equazioni di Colebrook-White, Manning e Strickler.

Per poter essere integrate queste equazioni devono essere opportunamente semplificate e linearizzate in modo tale che il sistema di equazioni possa essere risolto con la teoria delle matrici.

Lo schema di linearizzazione usato è quello di Priessmann mentre il risolutore adottato è quello di Newton-Raphson.

Le equazioni di cui sopra sono valide fino a quando il condotto non entra in pressione, per permettere a InfoWorks di simulare anche situazioni di condotte in pressione (senza problemi nella transizione da uno stato all'altro) il motore di calcolo adotta la tecnica dello slot per il quale si ipotizza una piccola fessura alla sommità della condotta e fino al piano campagna. Così facendo il motore di calcolo non incontra nessuna discontinuità efficace nella transizione da moto a gravità a quello in pressione.

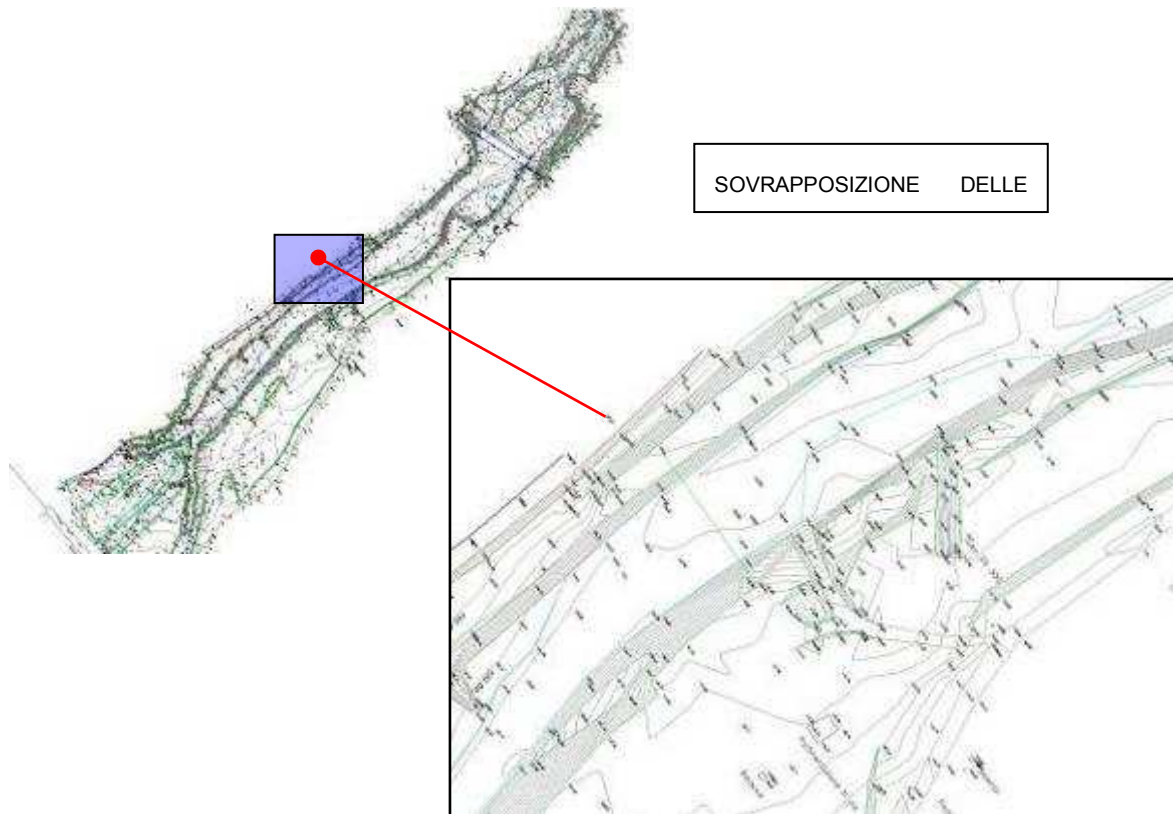
L'applicabilità di questo metodo di soluzione è stato abbondantemente testato in centinaia di studi e applicazione anche con riscontri di misure ottenuti su dei test reali.

Si noti che la metodologia di calcolo a moto vario e' in grado di tener conto anche delle volumi in gioco e quindi di tener conto delle attenuazioni dell'onda di piena quando questa riempie dei volumi disponibili in rete (tubazioni, canali, alvei naturali, pozzetti), in vere e proprie vasche di espansione opportunamente rappresentate nel modello o, infine, quando il sistema va in pressione e esonda si tiene conto anche dell'invaso che può avvenire in superficie quando si allaga il territorio.

In InfoWorks si possono anche rappresentare in modo semplice e efficace anche i manufatti speciali che normalmente si incontrano in fognatura, dagli sfioratori, alle stazioni di sollevamento, paratoie, sifoni ecc.

Infoworks unisce alle funzionalità di tipo idrologico ed idraulico una notevole versatilità della gestione dei DTM finalizzata alla ricostruzione digitale dei sedimenti all'interno dei quali il sistema di deflusso esercita le sue funzioni.

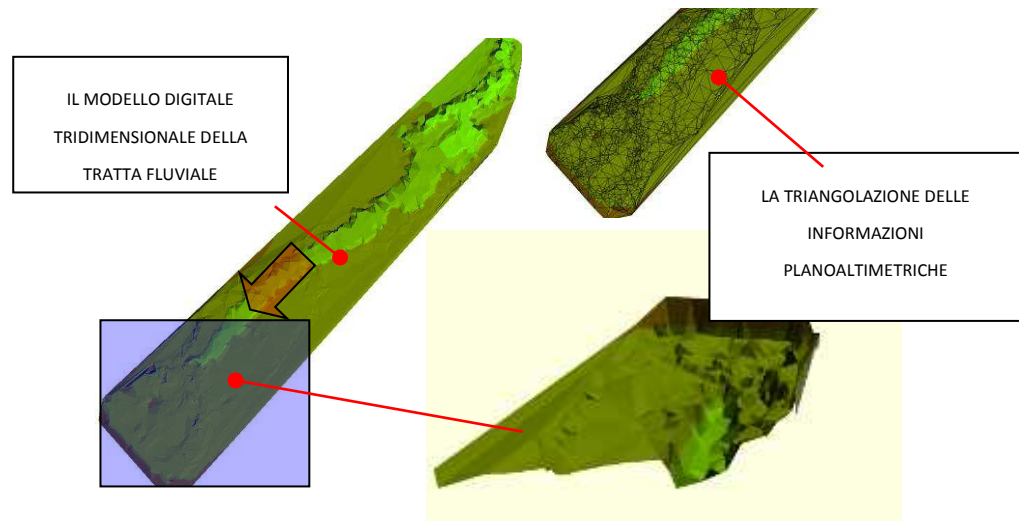
Modello digitale del terreno



*La sovrapposizione dei dati planoaltimetrici*

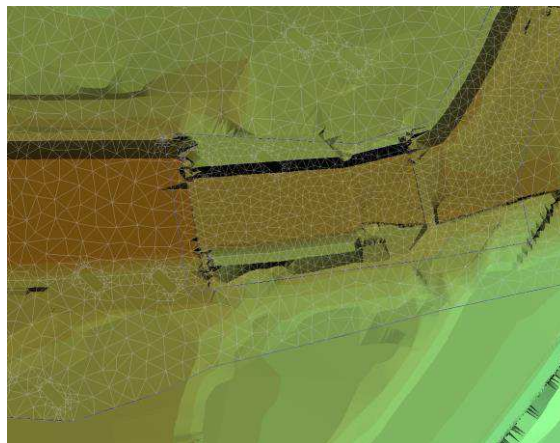


L'insieme dei rilievi costituisce una base su cui Infoworks applica la procedura di triangolazione necessaria alla creazione del modello digitale su cui sono poi effettuate le necessarie considerazioni morfologiche ed idrauliche:



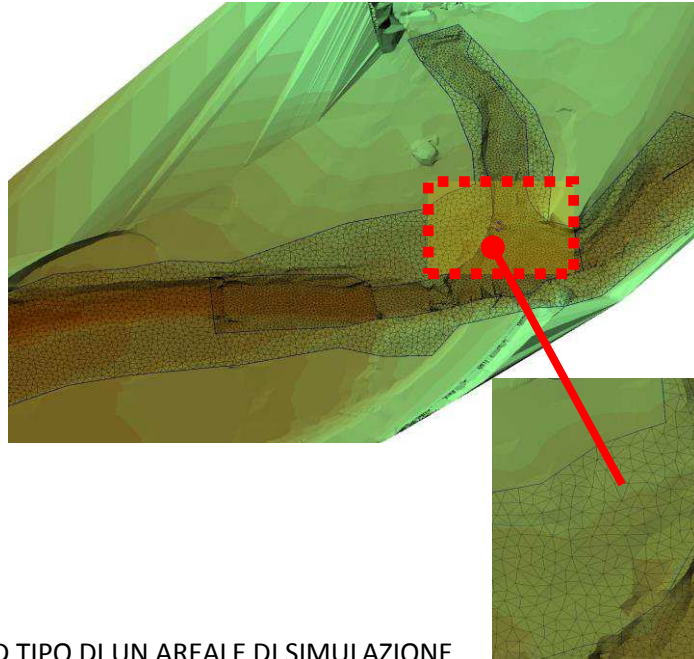
#### LA MESH 2D

La mesh dell'areale di simulazione viene definita con passi differenti a seconda del punto caratteristico oggetto di modellazione idraulica: come risulta evidente dall'immagine sotto riportata il passo di mesh nelle aree di golena risulta essere maggiore di quello utilizzato per l'alveo e ulteriormente rinfittito in prossimità dei manufatti caratteristici – pile del ponte briglie ecc.



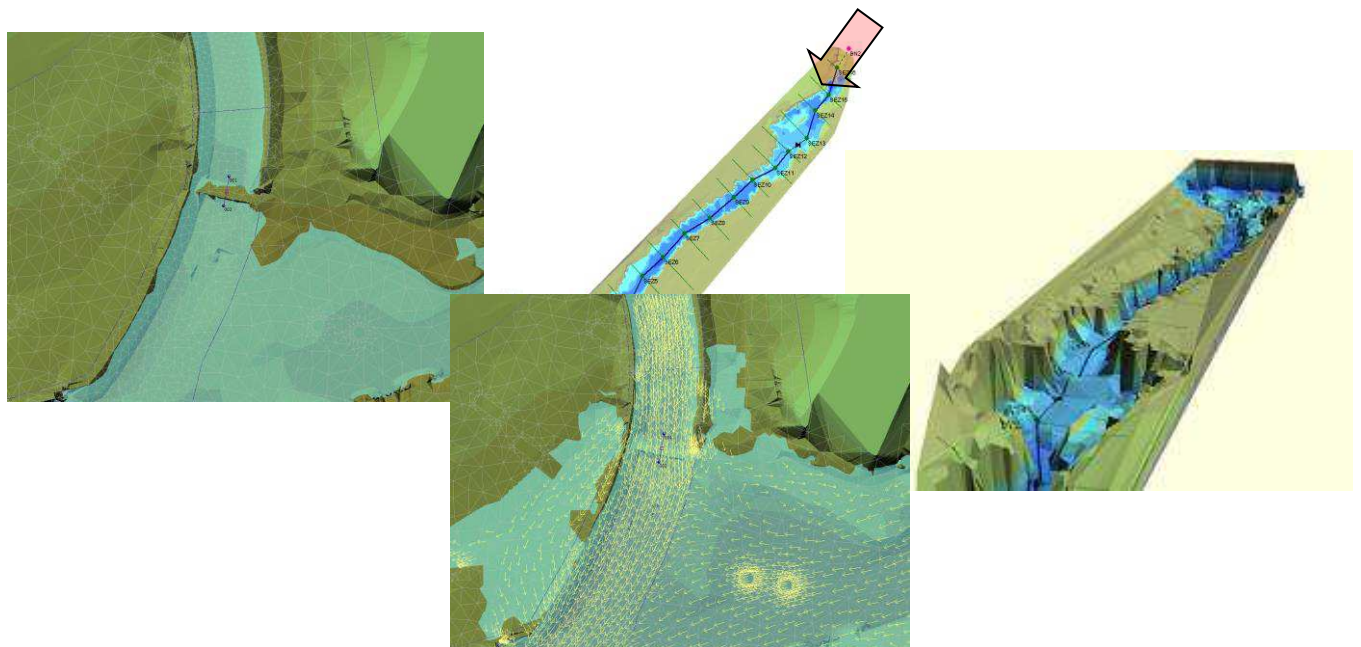
*Vista tridimensionale DTM stato di progetto: il passo caratteristico della mesh 2d*

Alla mesh viene attribuito il valore di scabrezza caratteristico per le condizioni in cui l'alveo e le golene delle tratte oggetto di modellazione si vengono a trovare nello stato di fatto e nello stato di progetto. La scabrezza è stato anche il parametro di taratura del modello bidimensionale affinché ci fosse il più possibile coincidenza tra i risultati ufficiali e quelli di cui le nuove simulazioni.



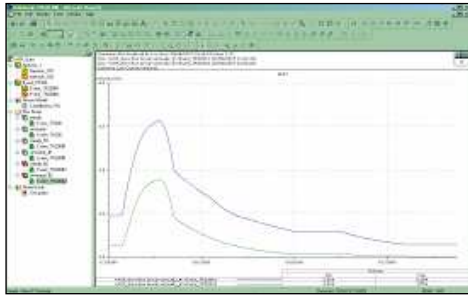
#### CREAZIONE MESH 2D TIPO DI UN AREA DI SIMULAZIONE

Infoworks ICM rappresenta in definitiva lo stato dell'arte della simulazione numerica in campo fluviale consentendo modellazioni mono- e bi-dimensionali sia in moto permanente che in moto vario producendo una gestione tridimensionale dei risultati ottenuti, come di seguito illustrato:



*Esempio di risultato della simulazione idraulica: rappresentazione tridimensionale della corrivazione di una piena -*

Dall'analisi sintetica delle modellazioni effettuate è possibile mettere a confronto i benefici delle infrastrutture previste per il riassetto di un alveo, mediante confronti "virtuali" dello stato di progetto rispetto allo stato di fatto.



- *Esempio: beneficio indotto dalla predisposizione di alcune briglie su un tratto di fiume in termini di riduzione delle velocità di scorrimento dell'onda di piena e innalzamento del pelo libero della vena fluida.*

#### Idrogrammi velocità di corrivazione della piena stato di fatto/progetto

Dalla realizzazione del modello digitale del terreno, Infoworks è in grado di definire compiutamente le aree di esondazione di differenti eventi meteorologici in funzione di differenti tempi di ritorno, nonché determinare con assoluta precisione le curve altezza/area da cui è possibile determinare con esattezza numero e altezza dei manufatti che consentono il riassetto idraulico di una specifica tratta di alveo, ciò in funzione delle fenomenologie di erosione legate a quelle di trasporto solido; la rappresentazione tridimensionale dell'esondazione consente una valutazione percettiva immediata delle aree potenzialmente a rischio idraulico.

