

YPF – Young Professional Forum ITCOLD
ITCOLD – Italian Committee on Large Dams

Open Day on Dams

Dighe e cambiamento climatico: quali sinergie?

Firenze,
31 maggio 2024

Lombardi

2020.0352.002



Diga di Pàvana: Esempio di Progettazione Idraulica Integrata, Analitica e CFD

Franco Maugliani, Lombardi Italia

Scuola di Ingegneria
Università degli Studi di Firenze
31 Maggio 2024

Lombardi

Agenda



Diga di Contra, 1965, 220 m

1. Presentazione Gruppo Lombardi
2. Diga di Pàvana
3. Progetto di Manutenzione
4. Intervento di Modifica dello Scarico di Fondo
5. Progetto Definitivo e Dimensionamento Analitico
6. Istruttoria
7. Progetto Esecutivo e Verifica CFD

1. Presentazione Gruppo Lombardi

La nostra storia:

Le nostre origini

Una vita trascorsa alla ricerca di una migliore ingegneria.

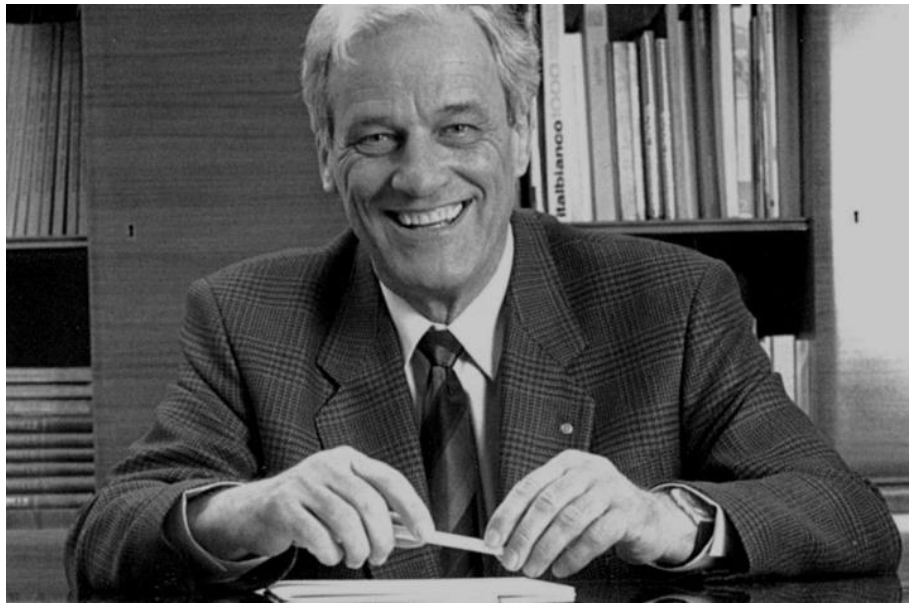
La storia del Gruppo Lombardi dal 1955 è strettamente legata alla vita e alle idee del suo fondatore:

Dr. Giovanni Lombardi (1926-2017).

"La continua volontà di abbattere barriere, combinata con una metodologia rigorosa, permette la realizzazione di strutture eccezionali e complesse".

"L'ingegnere deve saper immaginare anche soluzioni che escano dallo schema tradizionale, ma poi anche saperle analizzare e valutare pacatamente senza lasciarsi trascinare dagli eccessivi entusiasmi sollevati, se caso, dall'originalità della sua proposta."

Sito istituzionale: https://lombardi.group/ita



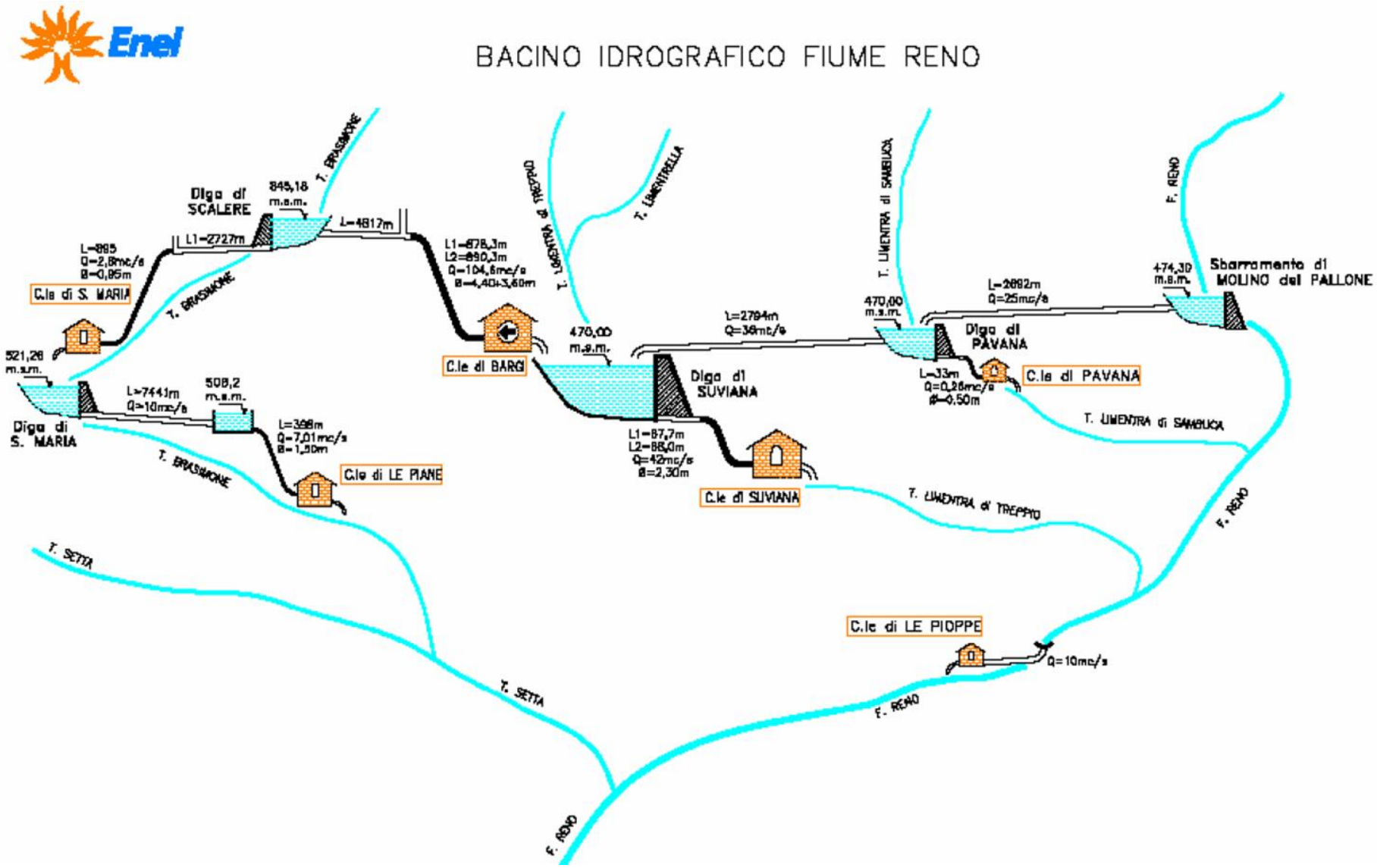


Settori di competenza

1. Gallerie ed Opere Sotterranee
2. Energia ed Acqua
3. Expertise Tecnica e Consulenza

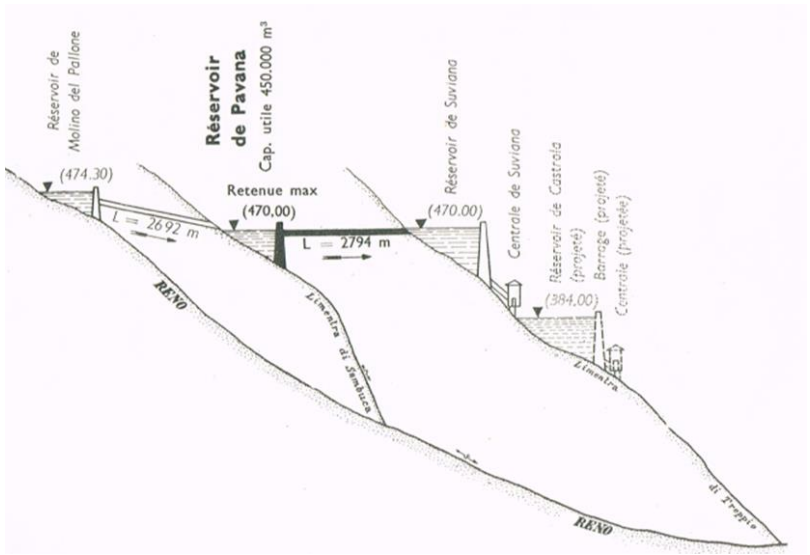
2. Diga di Pàvana
Schema Idraulico Alto Reno

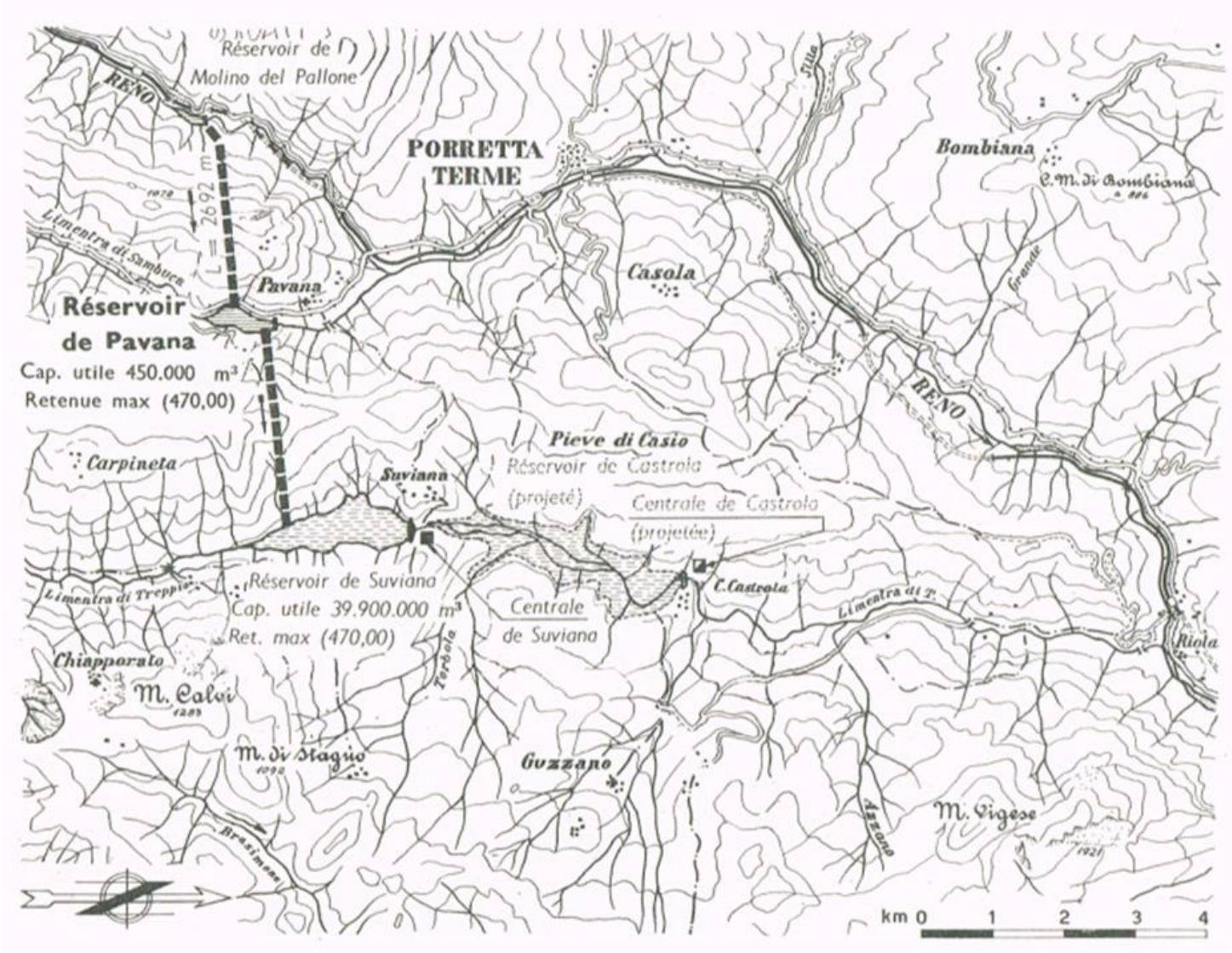




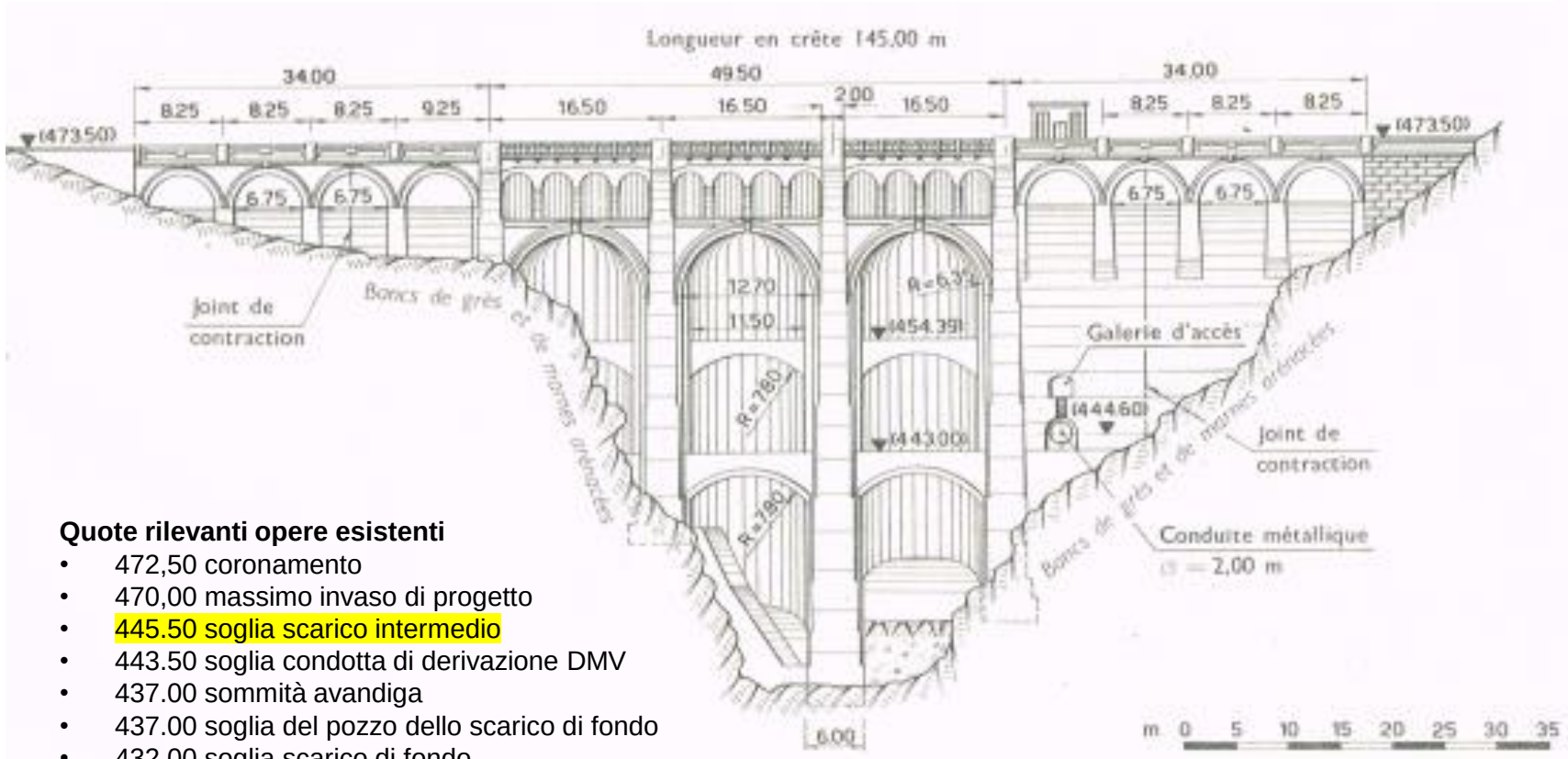
2. Diga di Pàvana: Dati

Periodo costruzione: 1923-25
Tipo: mista, a volte multiple in calcestruzzo
H = 52 m
L = 145 m
Vutile: 450’000 m^3
Bacino sotteso: 41 km^2
Bacino allacciato: 91 km^2
Capacità scarichi: - sfioratore 260 m^3/s
- scarico intermedio 40 m^3/s
- scarico di fondo 150 m^3/s
Portata millenaria 450 m^3/s, rivalutata in 420 m^3/s





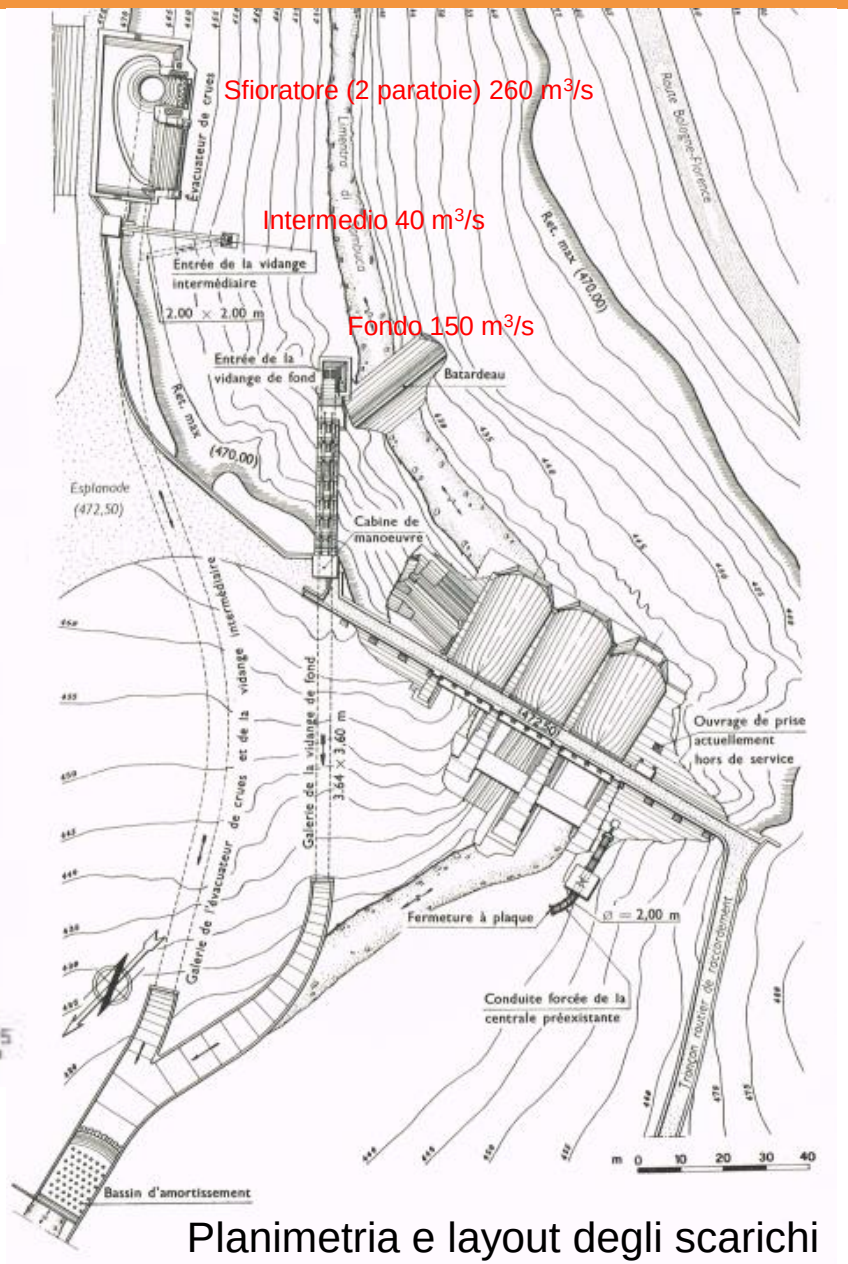
2. Diga di Pàvana: Architetture



Quote rilevanti opere esistenti

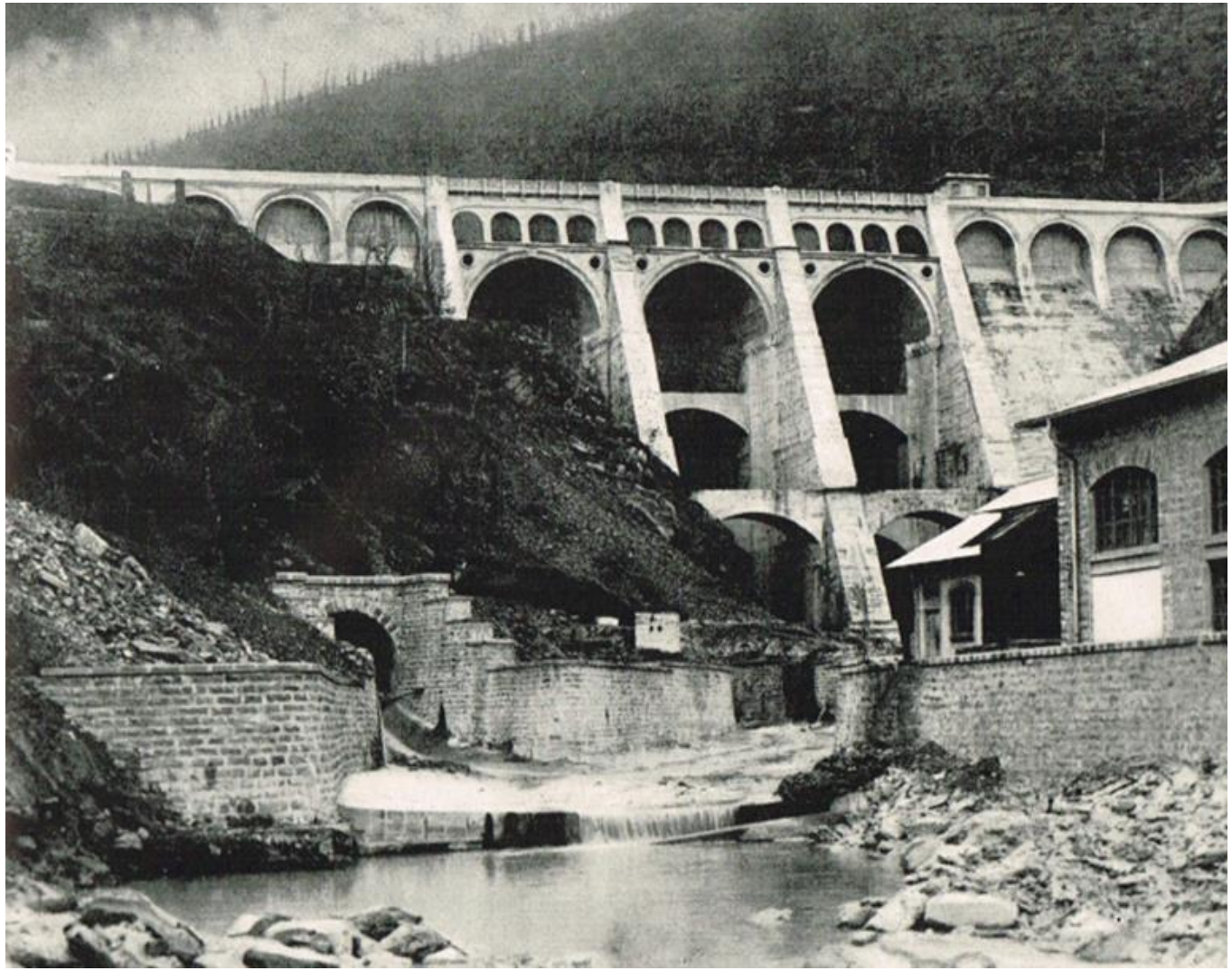
- 472,50 coronamento
- 470,00 massimo invaso di progetto
- 445.50 soglia scarico intermedio
- 443.50 soglia condotta di derivazione DMV
- 437.00 sommità avandiga
- 437.00 soglia del pozzo dello scarico di fondo
- 432.00 soglia scarico di fondo

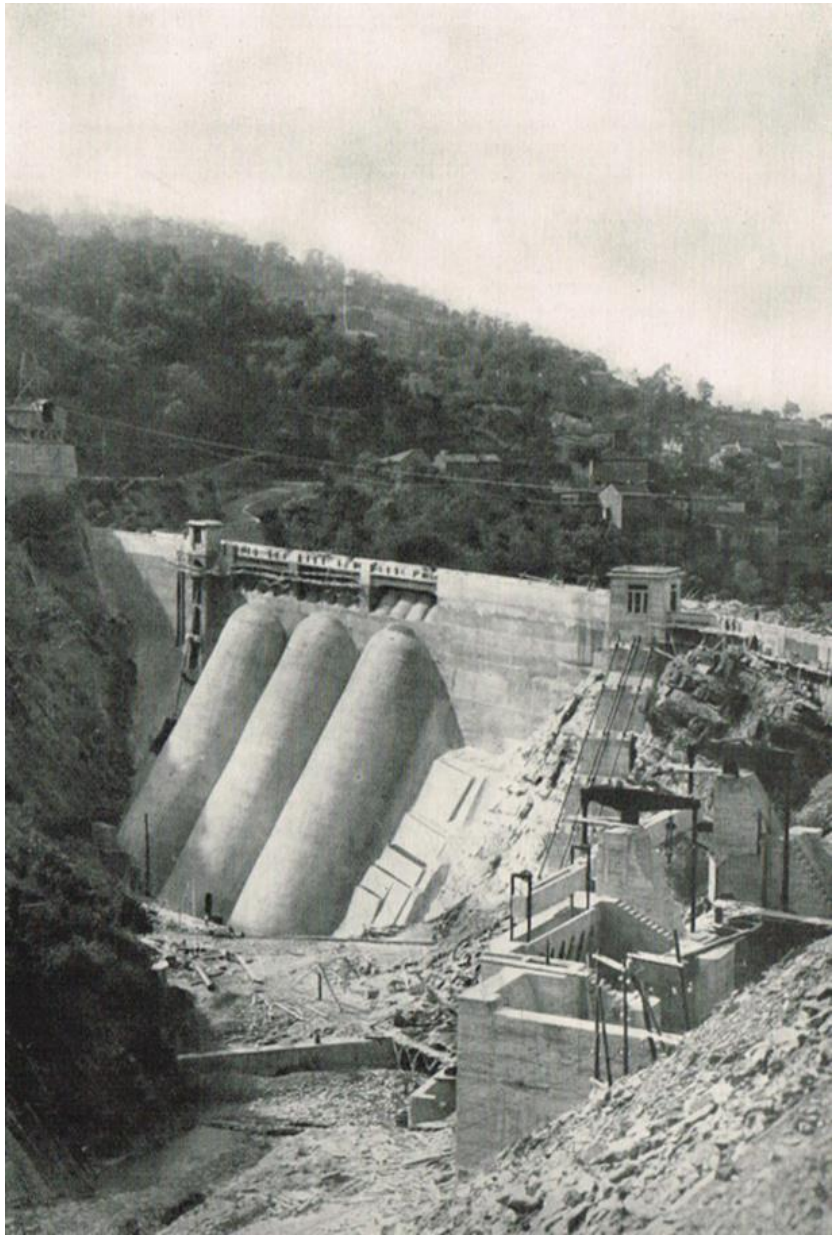
Paramento di valle



Planimetria e layout degli scarichi

2. Diga di Pàvana: Ieri……





2. Diga di Pàvana: ……oggi





4. Intervento di Modifica dello Scarico di Fondo

Nel 2020 a Lombardi SA veniva assegnato l'incarico relativo ai servizi di ingegneria per la progettazione esecutiva dell'intervento di manutenzione straordinaria della diga, comprendente il recepimento delle prescrizioni istruttorie sul progetto definitivo.

Nell'ambito del progetto complessivo è stato successivamente implementato l'incarico di progettazione della modifica dello scarico di fondo esistente con la finalità di preservare la capacità di scarico di progetto, salvaguardandola dal rischio di seppellimento per accumulo di sedimenti.

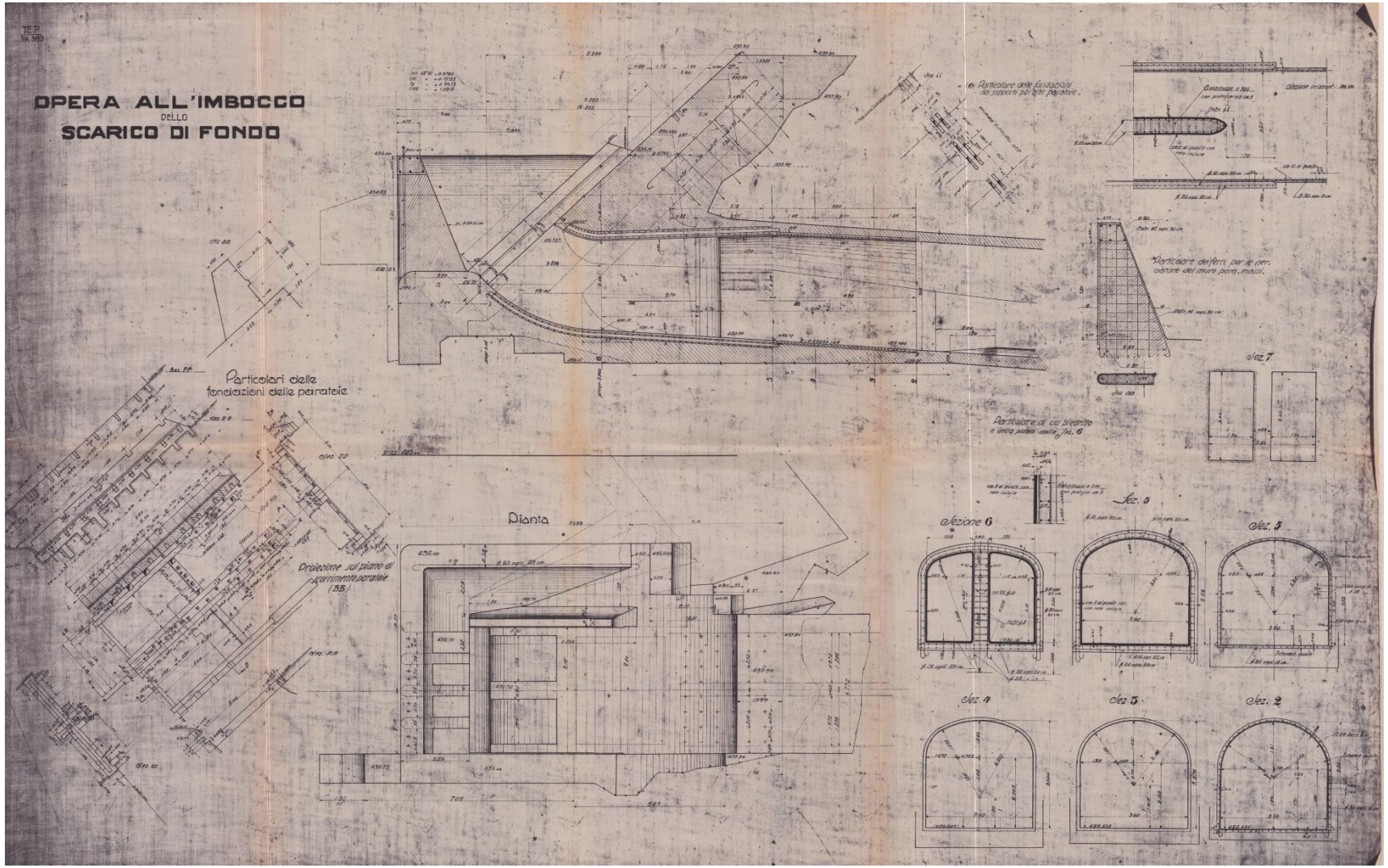
La modifica necessariamente deve confrontarsi con le condizioni attuali delle opere: l'attuale scarico di fondo, sottoposto ad una manutenzione straordinaria nel 1996 mediante la sostituzione delle paratoie di sezionamento, è già stato modificato in tempi storici mediante la costruzione di un pozzo rettangolare filtrante in muratura e materiali diversi fino alla quota 437.00.

Il raggiungimento della sommità del pozzo, per ogni ipotesi di sopraelevazione, deve tener conto di:

- Condizione attuale delle opere murarie esistenti (la consistenza non è nota, certamente costruite in più fasi, una parte del perimetro del pozzo appare realizzata in geoblocchi, il rilievo diretto non è possibile)
- Accumuli di limi sulla testa del pozzo fino alla 445.50 e nell'invaso dove è necessario realizzare gli accessi all'area di lavoro, per quanto possibile con limitati movimenti di materiale e quindi rilasci di sedimento.

4. Intervento di Modifica dello Scarico di Fondo

Informazioni di consistenza



4. Intervento di Modifica dello Scarico di Fondo

Foto storiche: Agosto 1997








5. Progetto Definitivo e Dimensionamento Analitico

Soluzioni praticabili:

Gruppo A, con utilizzo del pozzo esistente

A1 Elementi prefabbricati in c.a. inseriti su pilastrini strutturali in acciaio

A2 Telaio strutturale in acciaio con inserimento di elementi prefabbricati in c.a.

A3 Camino in calcestruzzo armato realizzato con cassero a perdere in acciaio

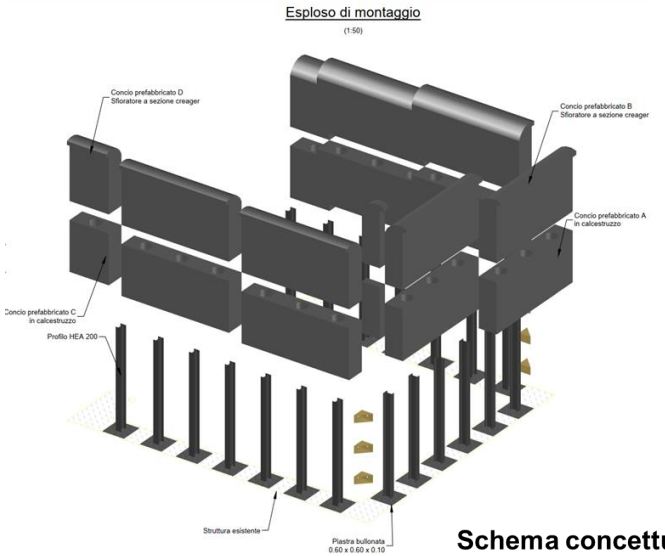
A4 Calcestruzzo armato ordinario gettato in opera

Gruppo B, con abbandono del pozzo e dello scarico di fondo esistenti

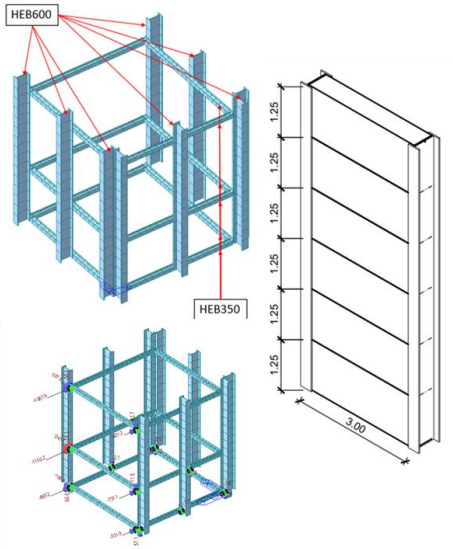
B1 Collo d'oca in sotterraneo dalla galleria di scarico esistente a nuova opera di presa alla quota desiderata

B2 Nuovo scarico di fondo realizzato nella parte della diga da sottoporre a manutenzione

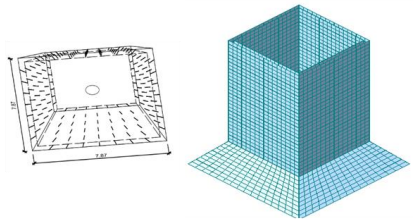
Schema concettuale proposta A1

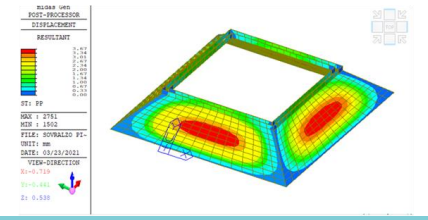


Schema concettuale proposta A2



Schema concettuale proposta A3





5. Progetto Definitivo e Dimensionamento Analitico

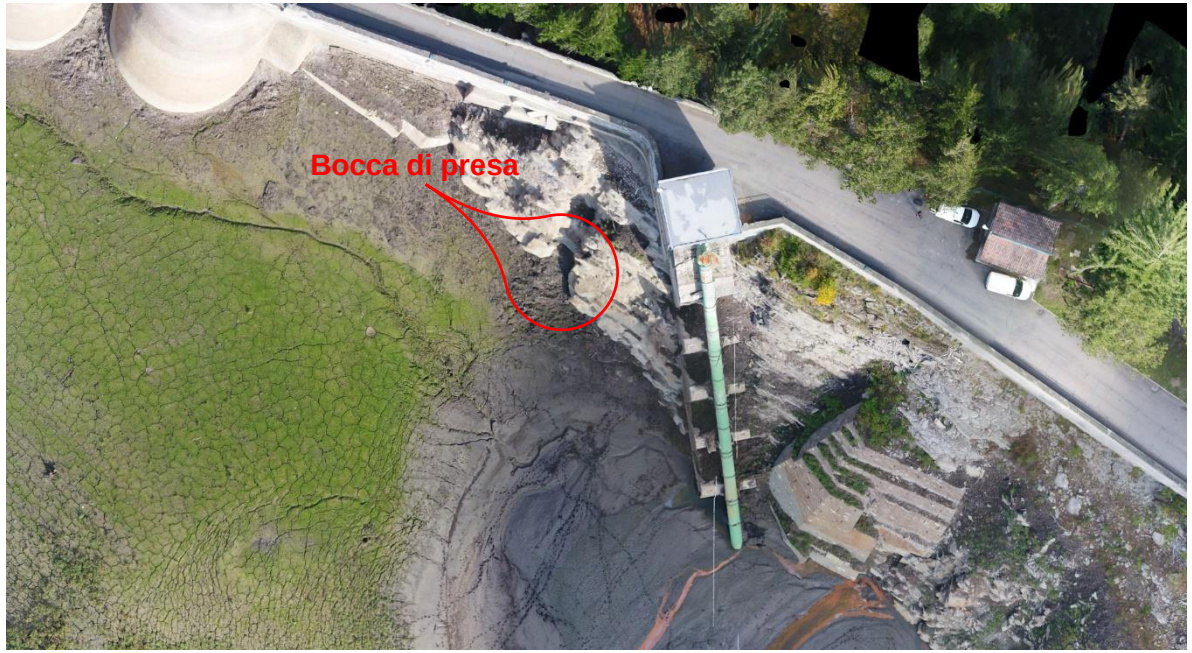
Soluzione prescelta: Proposta B1, collo d'oca con nuova presa dalla galleria dello scarico di fondo attuale

- Sopraelevazione della soglia di contenimento dei sedimenti di 7.5 m, da 438.00 a 445.50 (quota della soglia dello scarico intermedio);
- Lavori in sotterraneo limitati (circa 14 m di pozzo e 8-10 m di galleria)
- Area di lavoro esterna sul pendio, al limite superiore del deposito attuale
- **Nessuna pista di accesso nel bacino, nessuna esigenza di rimozione sedimenti:** esecuzione dal pendio e dalla galleria sotterranea
- Richiede una nuova installazione idromeccanica (2 paratoie), possibile dalla centralina attuale: può essere eseguita in un secondo tempo, al completamento della manutenzione della diga, e temporaneamente sostituita da una griglia

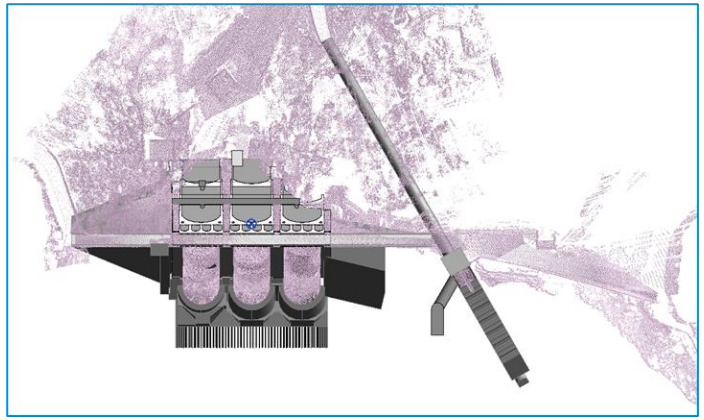
Linee guida del progetto:

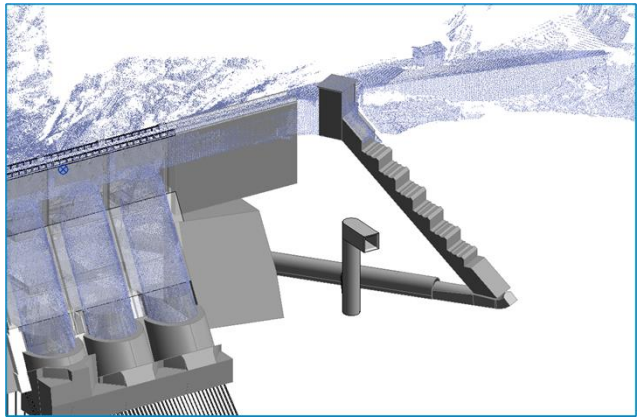
- Portata di dimensionamento: pari all'attuale (150 m^3/s) o comunque adeguata allo smaltimento della millenaria rivalutata (non inferiore a 120 m^3/s)
- Modalità di esercizio
- Contributo al controllo delle piene ai fini della sicurezza di cantiere durante la manutenzione: in associazione ad altre opere di protezione

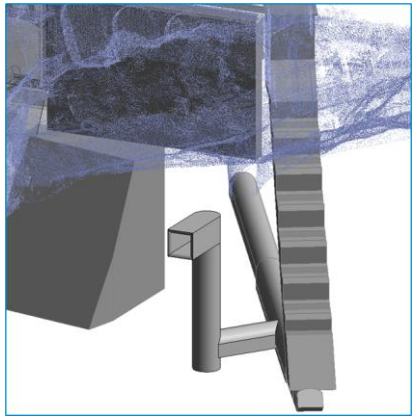
5. Progetto Definitivo e Dimensionamento Analitico







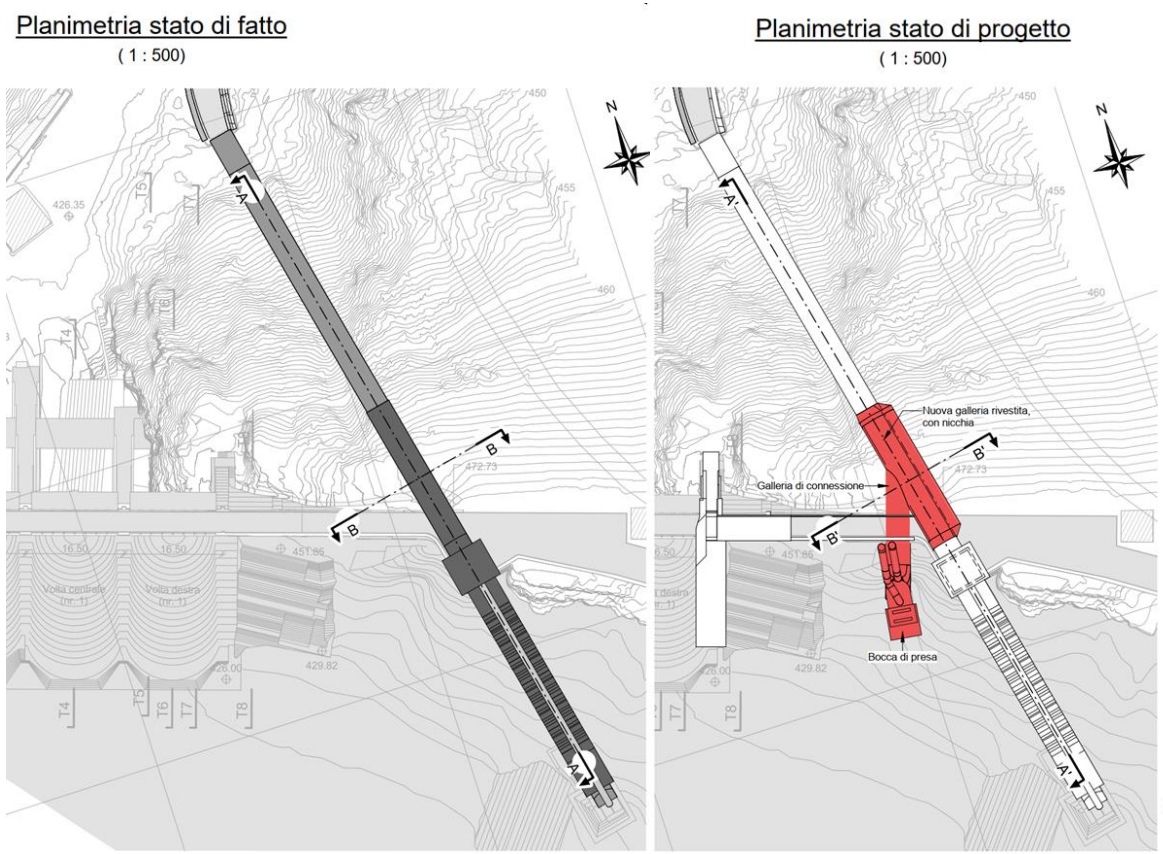


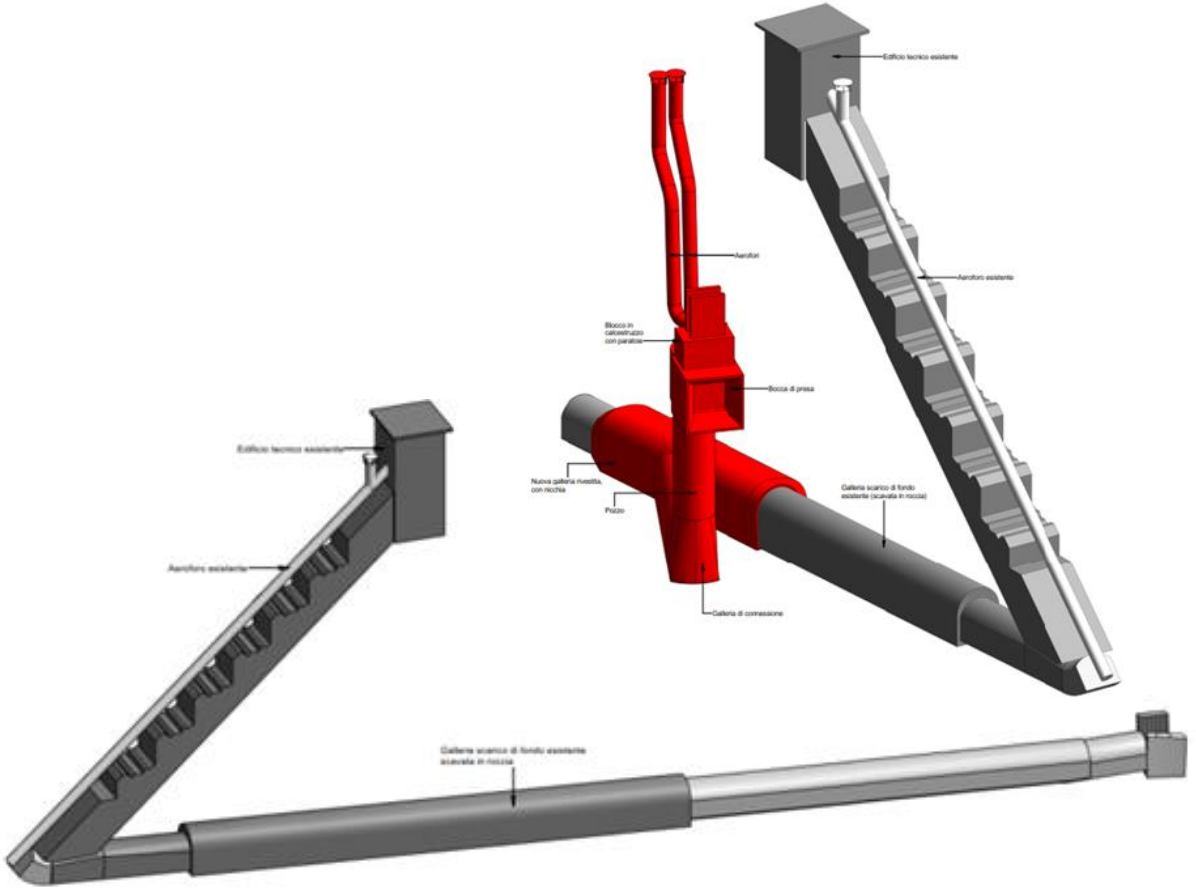




5. Progetto Definitivo e Dimensionamento Analitico

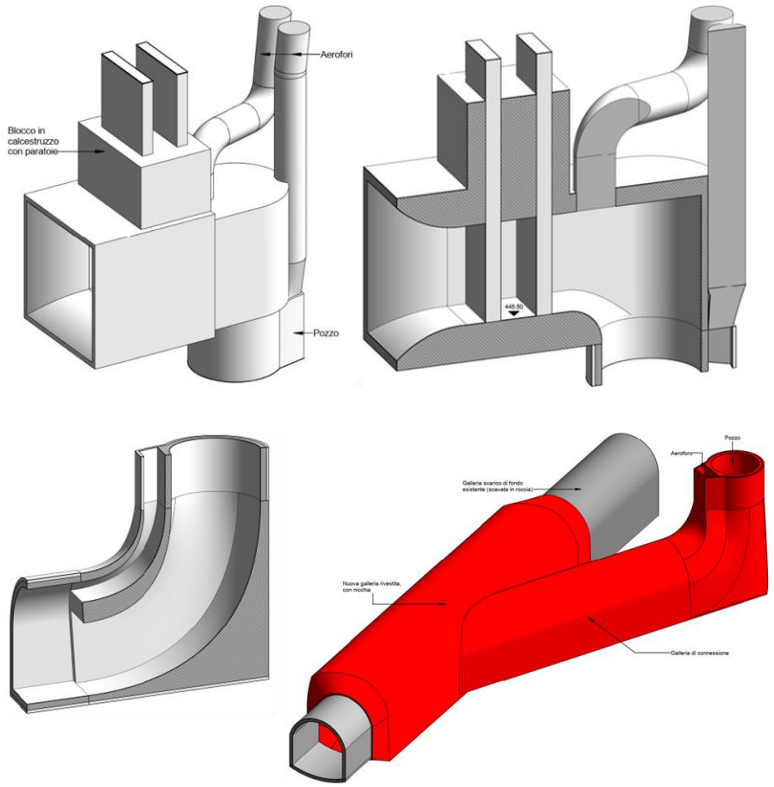
Le opere sono state dimensionate con metodo analitico in riferimento a letteratura ricavata da prove sperimentali su modello. Imbocco di monte (445.50 m s.m.) regolato con paratoie piane 3.0mx3.0m, immissione nella galleria dello scarico di fondo esistente tramite galleria di connessione





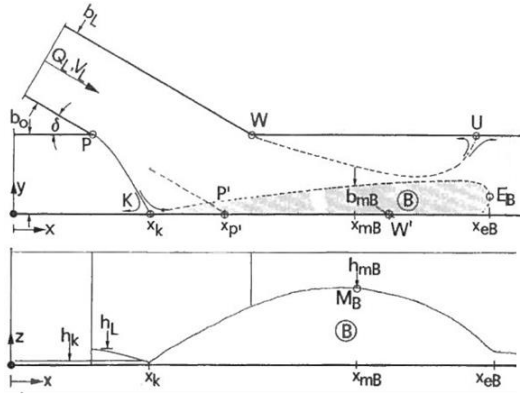
5. Progetto Definitivo e Dimensionamento Analitico

Il dimensionamento idraulico del nuovo assetto dello scarico di fondo, in fase di progetto definitivo redatto ai fini di approvazione dell'autorità di controllo e di autorizzazione ambientale, è stato eseguito perfezionando un modello idraulico, sulla base di formule dell'idraulica analitica, che investigasse per ogni portata le condizioni di deflusso nelle diverse parti della nuova opera (a pelo libero od in pressione, per sezioni di controllo).

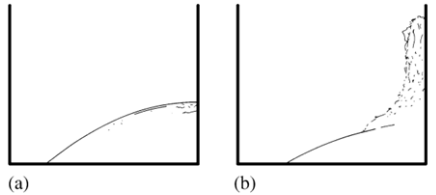


Dimensionamento della confluenza: angolo $\delta = 30°$ corrispondente al più acuto analizzato in letteratura, con perdite descritte dalla formulazione di Schwalt ottenuta da prove sperimentali su modello in scala con sola immissione laterale (tesi di dottorato: *Schwalt, M. (1994). Vereinigung schiessender Abflüsse und ihre Optimierung durch die Deckplatte. Doctoral dissertation, ETH Zürich)*: $\xi_L = 0.42$

Poiché l'immissione laterale presenta un numero di Froude elevato ($F_L = 4.33$), è presumibile che possa verificarsi un'onda di parete di tipo aderente.



Schema di confluenza con portata in arrivo solo lateralmente e formazione dell'onda di parete B (Schwalt, 1993).

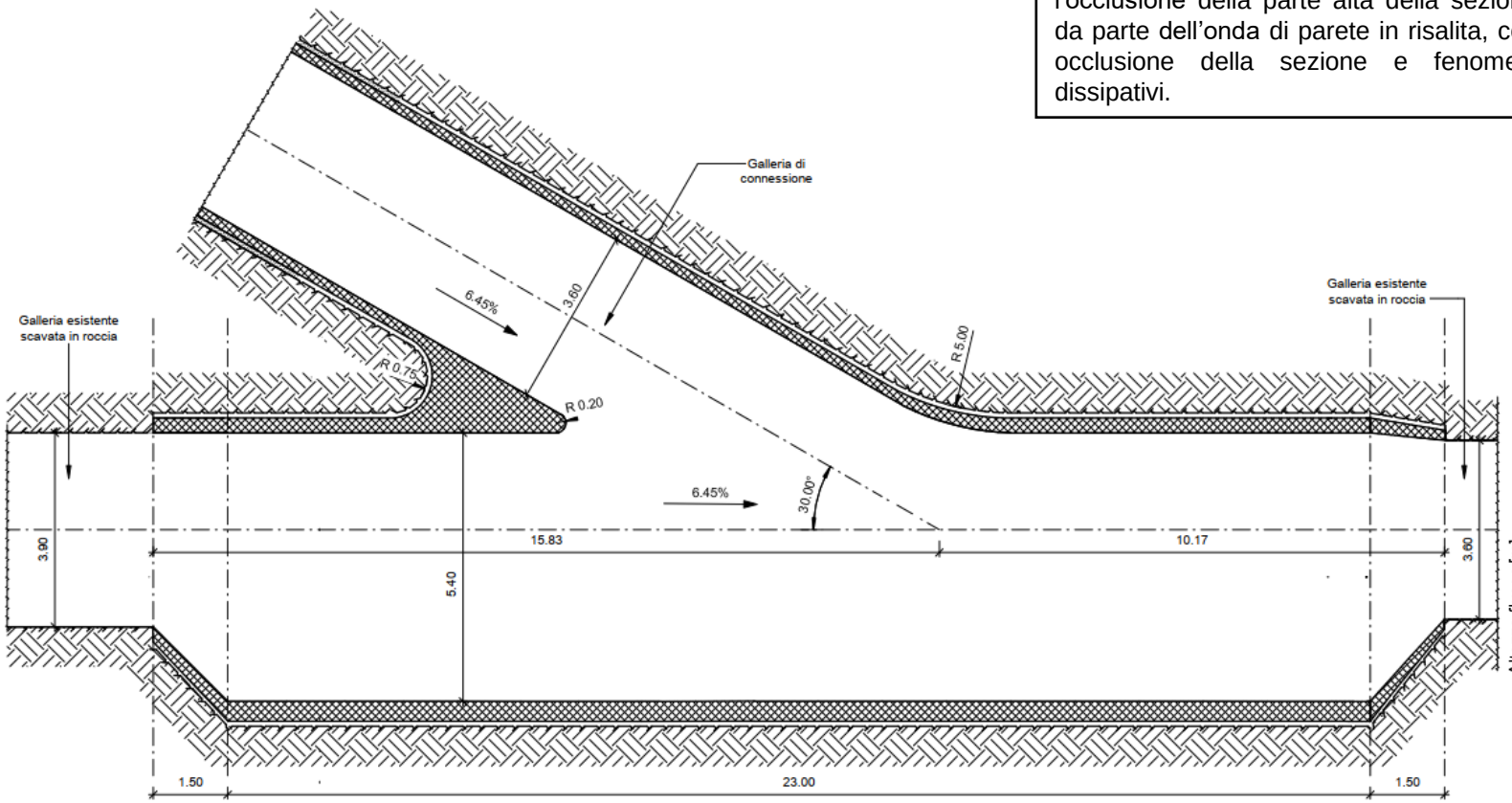


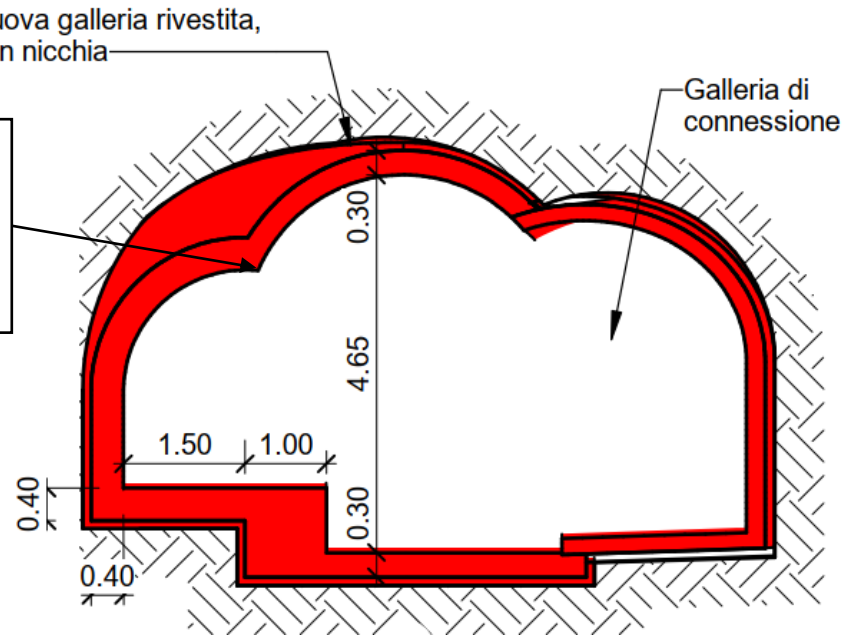
Tipologie di onde di parete; (a) onda di tipo compatto (b) onda aderente (Gisonni & Hager, 2013)

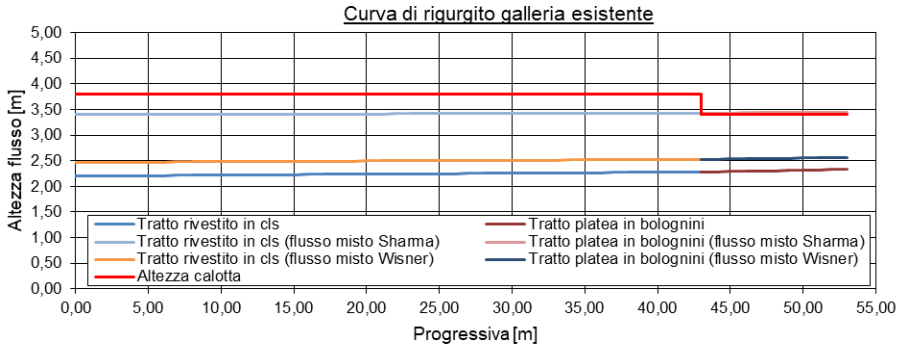
5. Progetto Definitivo e Dimensionamento Analitico

Risultato del dimensionamento

Profilo del rivestimento sostitutivo della mensola di Schwalt al fine di impedire l'occlusione della parte alta della sezione da parte dell'onda di parete in risalita, con occlusione della sezione e fenomeni dissipativi.







6. Istruttoria

L'istruttoria presso l'Autorità di controllo (DGD del MI ed UTD Firenze) relativa al progetto definitivo della modifica allo scarico di fondo si è conclusa nel marzo 2022, con *«Nulla osta tecnico con richiesta di integrazioni»*.

Per quanto riguarda gli ASPETTI IDRAULICI:
«la Divisione specialistica ritiene che il progetto esaminato sia stato elaborato secondo idonei standard ingegneristici, ed inoltre evidenzia come il comportamento idraulico dell'opera – pur non essendo stato indagato con prove su modello fisico o di calcolo numerico (metodi di verifica consoni per le verifiche su opere di maggiore rilevanza) – appaia sufficientemente sviluppato mediante il ricorso a formulazioni empiriche idonee alla verifica richiesta, vista anche la tipologia di intervento e la funzione sussidiaria dello scarico»

Fra le osservazioni di UTD Firenze:
3. Capacità idraulica dello scarico di fondo. L'allargamento della galleria esistente nella tratta di immissione della nuova galleria di raccordo determina un allargamento della sezione idraulica (anche verso monte) ed un suo successivo restringimento con la conseguenza di possibili perdite di carico piezometrico della corrente fluida all'interno della medesima galleria. Occorre che nel progetto venga verificato che la variazione delle condizioni idrauliche della galleria esistente determinate dalla immissione in progetto (presenza di una tratta in allargamento e presenza delle turbolenze in immissione) non comporti una variazione in diminuzione della portata idraulica rilasciata dallo scarico di fondo nella condizione di paratoie aperte dell'opera di presa esistente e paratoie chiuse dell'opera di presa in progetto. Inoltre occorre determinare la capacità di scarico complessiva dello scarico di fondo nella condizione di paratoie aperte in contemporanea dell'opera di presa esistente e dell'opera di presa in progetto.»

Obbligato quindi il passaggio ad una modellazione CFD per la risposta ai quesiti sollevati: la modellazione numerica è infatti in grado di descrivere puntualmente il campo di moto, a differenza del modello analitico.

7. Progetto Esecutivo e Verifica CFD

Verifica CFD eseguita con software Flow3D Hydro: il **modello** comprende

Opere esistenti

- Imbocco dello scarico di fondo esistente e semi-gallerie a valle delle paratoie dell'imbocco esistente
- Galleria in roccia dello scarico di fondo, Galleria di scarico rivestita in calcestruzzo e galleria di scarico rivestita in bolognini
- Canale di scarico

Opere di progetto

- Imbocco dello scarico di progetto
- Pozzo e galleria di raccordo tra il nuovo imbocco e la galleria esistente;
- Nuova galleria con nicchia

Simulazioni CFD richieste

- Verifica capacità idraulica scarico attuale
- Verifica capacità idraulica soluzione di progetto
- Verifica capacità idraulica per funzionamento contemporaneo delle due bocche di presa

Simulazioni CFD addizionali eseguite

- Verifica ed affinamento soluzioni di progetto per gli eventuali effetti puntuali non evidenti con dimensionamento analitico

7. Progetto Esecutivo e Verifica CFD

Verifica capacità idraulica scarico attuale

Elementi geometrici e parametrici:

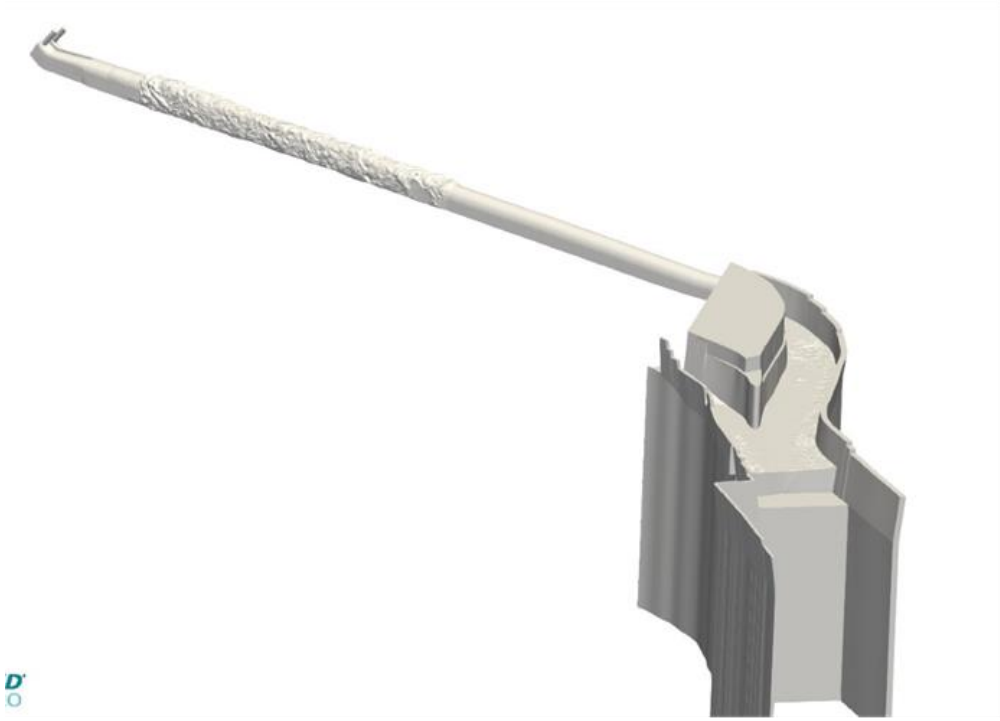
- ✓ Apertura paratoie in 100 sec (per limitare i tempi di simulazione)
- ✓ Definito coefficiente di perdita di carico alle valvole (0.3)
- ✓ Confermato valore del coefficiente di air entrainment (**0.05**)
- ✓ Scabrezza da rilievo Lidar e microscabrezza 5 mm
- ✓ Bulking and buoyancy attivato (volume d'aria intrappolato contribuisce al volume totale del fluido)

Elementi di calcolo:

- ✓ Dt di discretizzazione pari a 0.001 sec
- ✓ Mesh a maglia larga (0.2÷0.8 m)
- ✓ Approssimazione numerica di primo ordine (al posto del secondo ordine eccessivamente oneroso per tempi di calcolo)

Risultati:

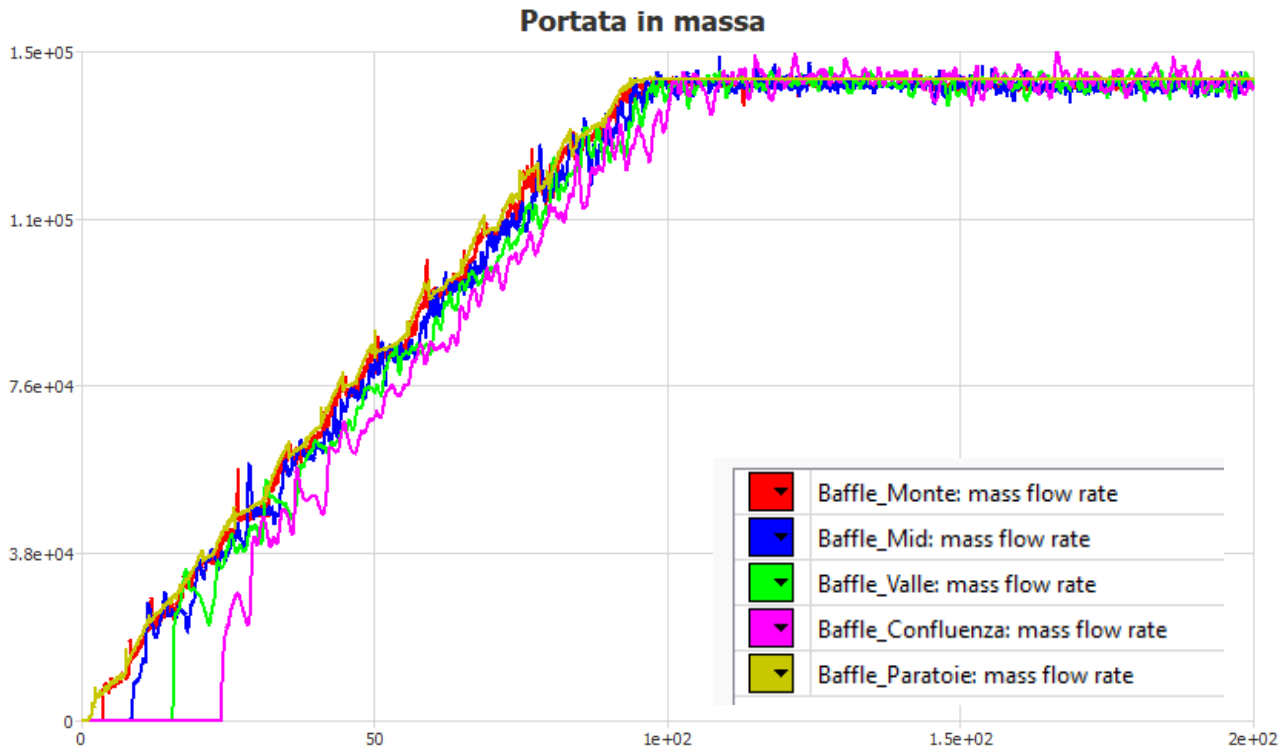
- ✓ La galleria va in leggera pressione a regime nel tratto terminale
- ✓ Portata a regime si aggira intorno **~145 m³/s** a fronte di un valore previsto nel progetto storico pari a 149 m³/s



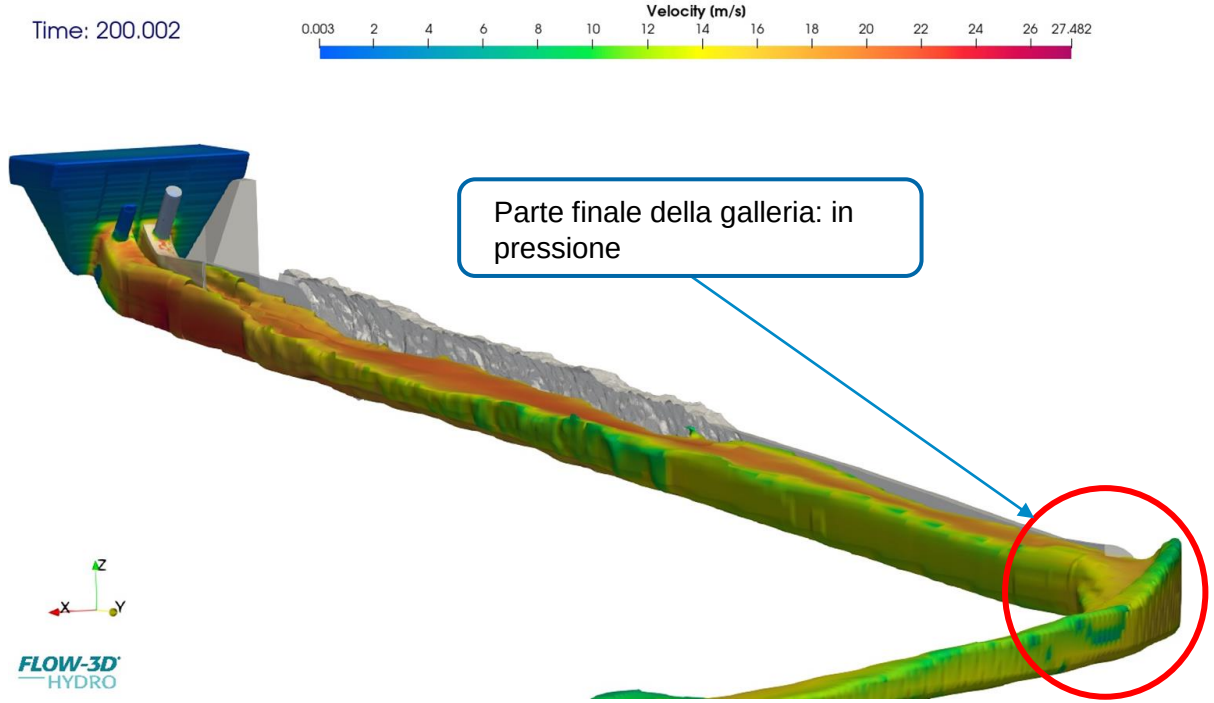
7. Progetto Esecutivo e Verifica CFD

Verifica capacità idraulica scarico attuale

Portata in volume fase liquida 145 m^3/s







7. Progetto Esecutivo e Verifica CFD

Verifica capacità idraulica della soluzione di progetto

Elementi geometrici e parametrici:

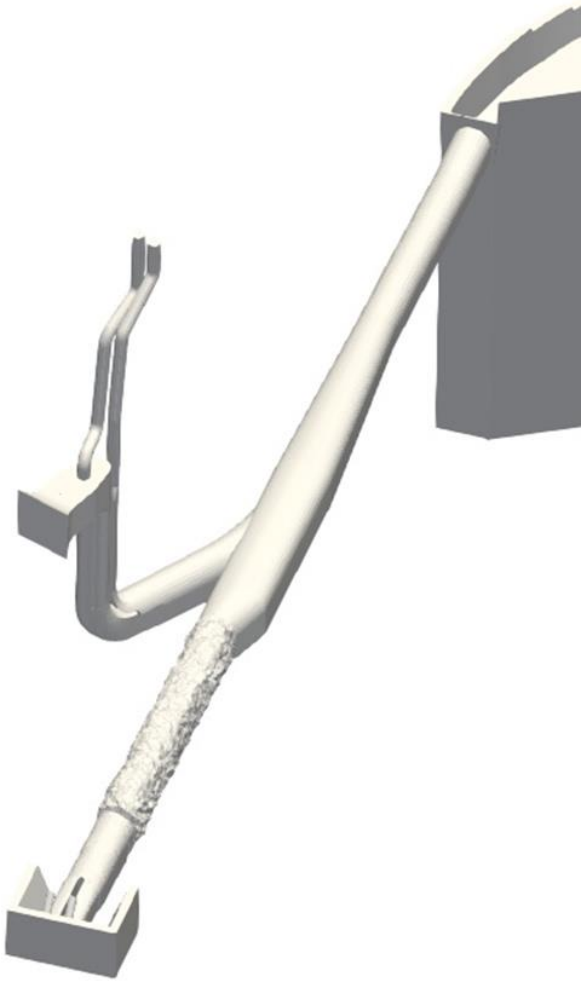
- ✓ Apertura paratoie in 100 sec (per limitare i tempi di simulazione)
- ✓ Definito coefficiente di perdita di carico alle valvole (0.3)
- ✓ Confermato valore del coefficiente di air entrainment (**0.05**)
- ✓ Scabrezza da rilievo Lidar e microscabrezza 5 mm
- ✓ Bulking and buoyancy attivato (volume d'aria intrappolato contribuisce al volume totale del fluido)

Elementi di calcolo:

- ✓ Dt di discretizzazione pari a 0.001 sec
- ✓ Mesh a maglia larga (0.2÷0.4 m)
- ✓ Approssimazione numerica di primo ordine (al posto del secondo ordine eccessivamente oneroso per tempi di calcolo)

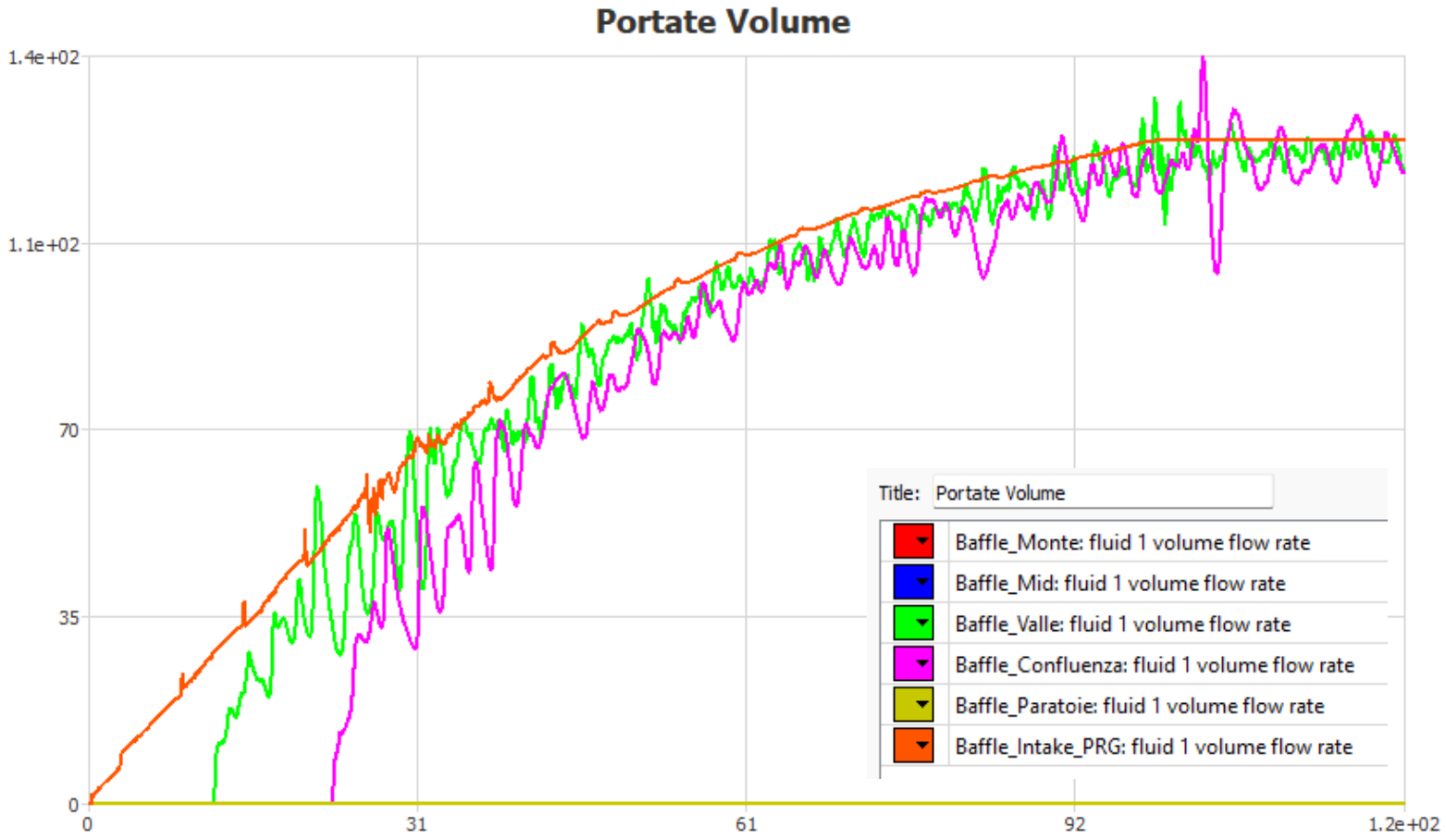
Risultati:

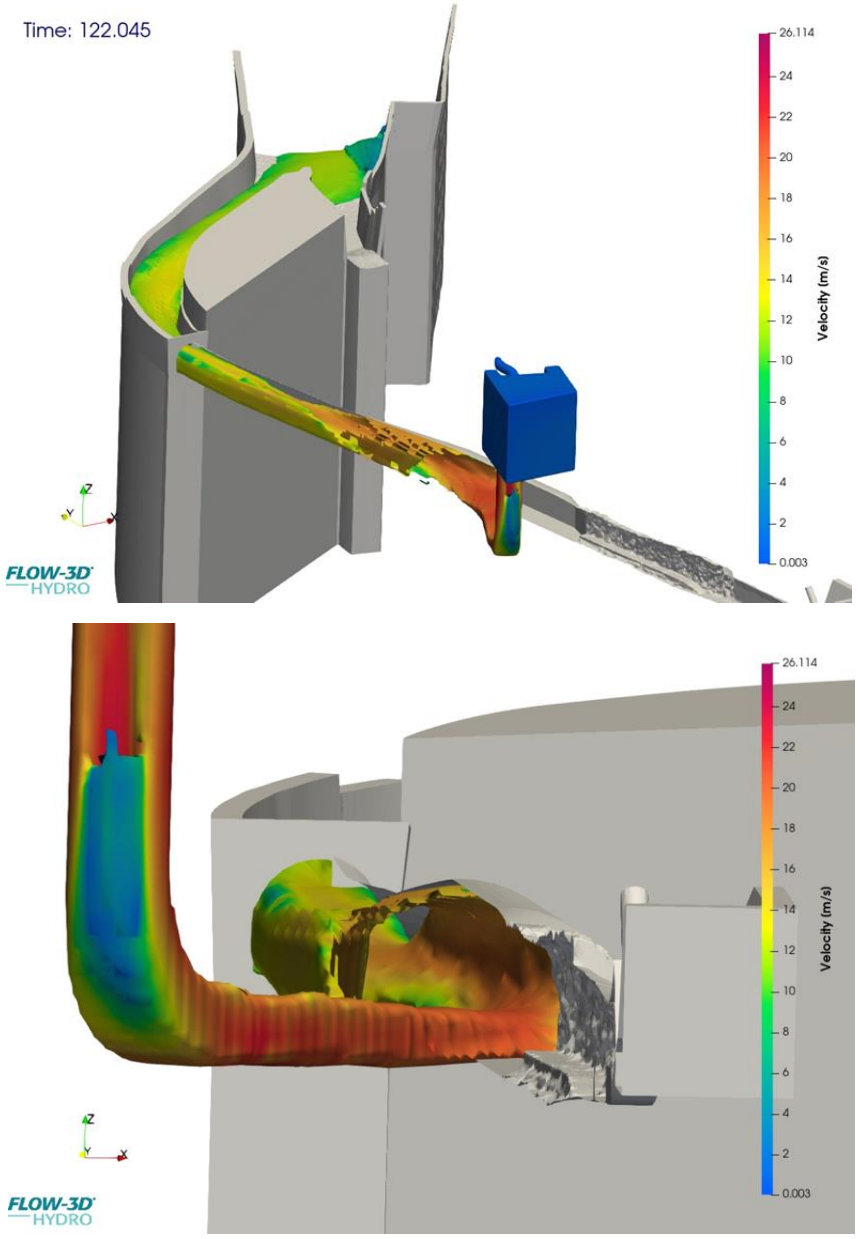
- ✓ Galleria va in pressione ad onde cicliche nella parte finale
- ✓ Portata a regime si aggira intorno ~**139 m^3/s**



7. Progetto Esecutivo e Verifica CFD

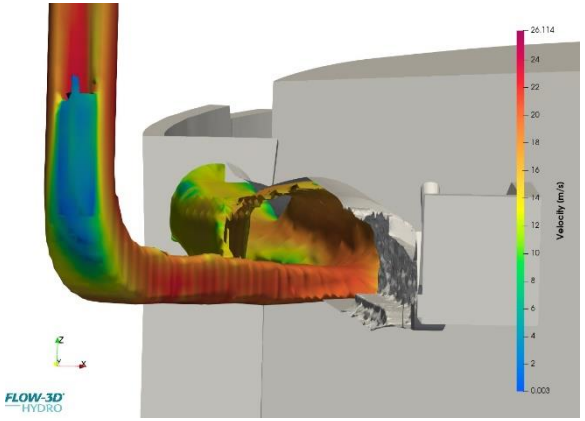
Verifica capacità idraulica della soluzione di progetto



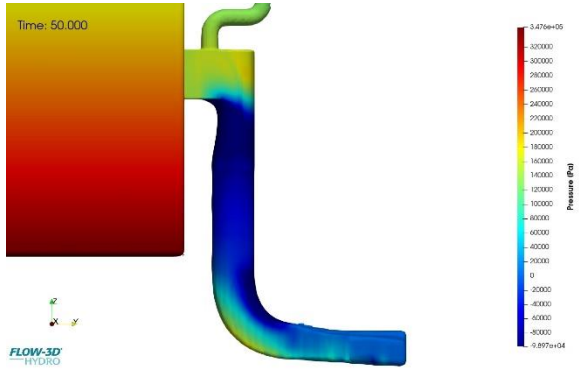


7. Progetto Esecutivo e Verifica CFD

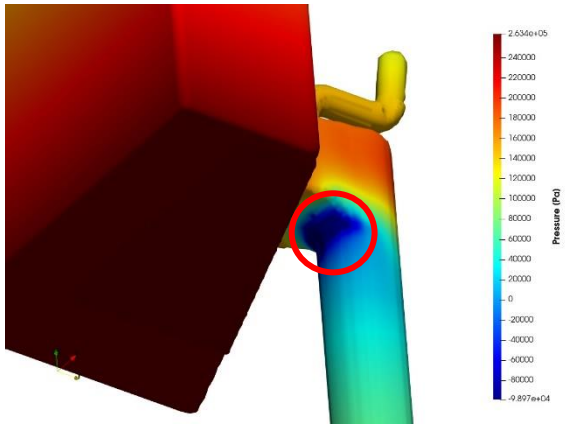
Verifica ed affinamento soluzioni di progetto: punti di attenzione



Moto vorticoso in galleria, funzionamento in pressione con riduzione portata



Pressioni negative lungo tutto lo sviluppo del pozzo nel transitorio



Zona di depressione all'imbocco del pozzo

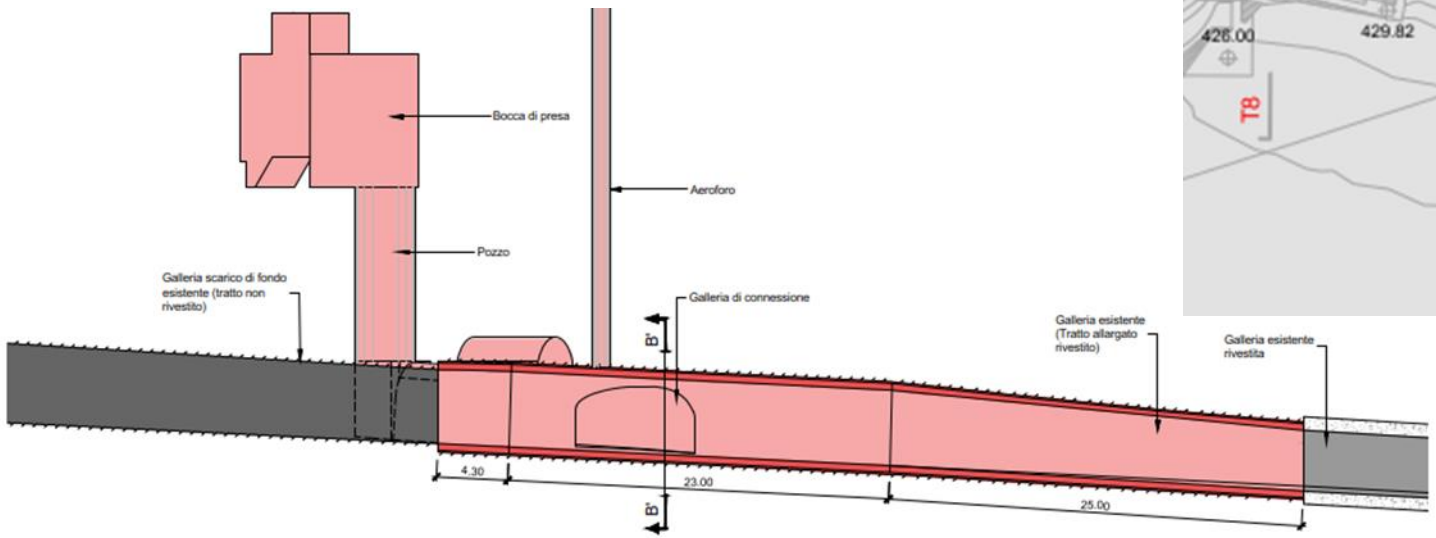
Modifica di progetto:

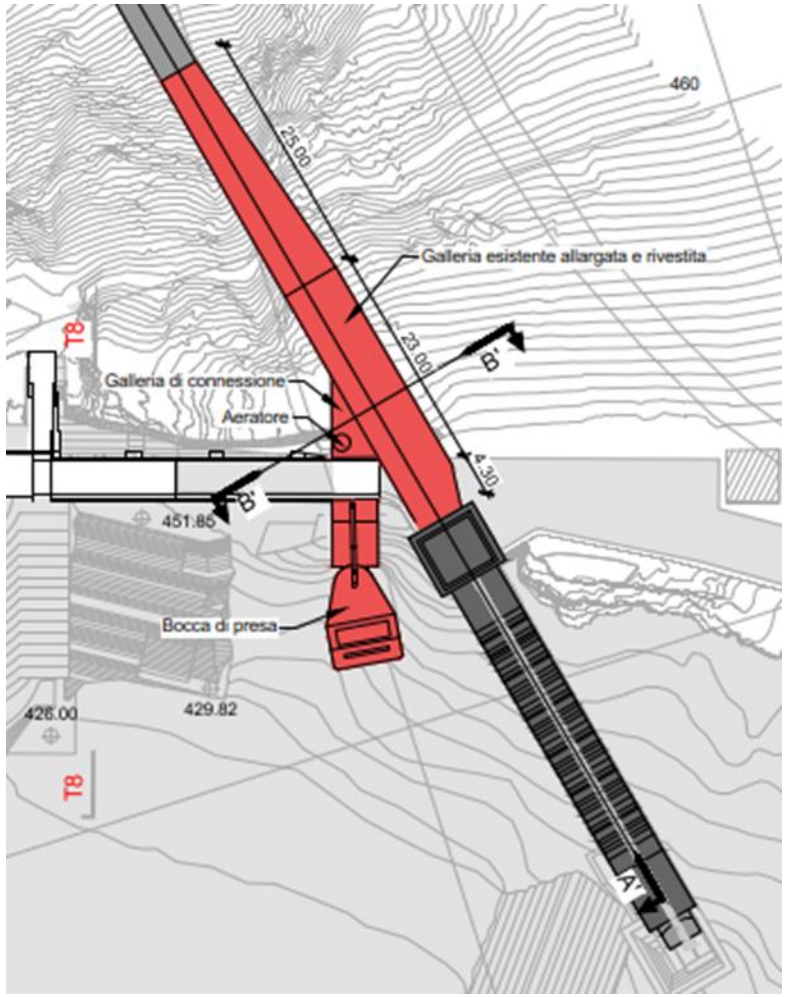
- mantenimento in pressione della parte di monte (imbocco e pozzo)
- inserimento deflettore nel camerone

7. Progetto Esecutivo e Verifica CFD

Verifica ed affinamento soluzioni di progetto: disegno finale

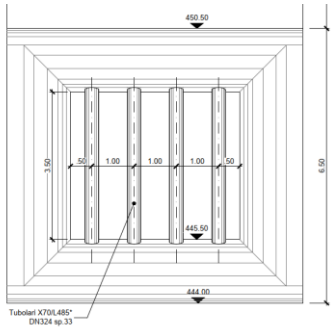
Imbocco di monte 4.0mx3.5m con paratoia piana apri/chiudi, strozzatura a piedi e pozzo 2.8mx2.0m regolata da paratoia a settore, immissione nella galleria dello scarico di fondo esistente tramite galleria di connessione

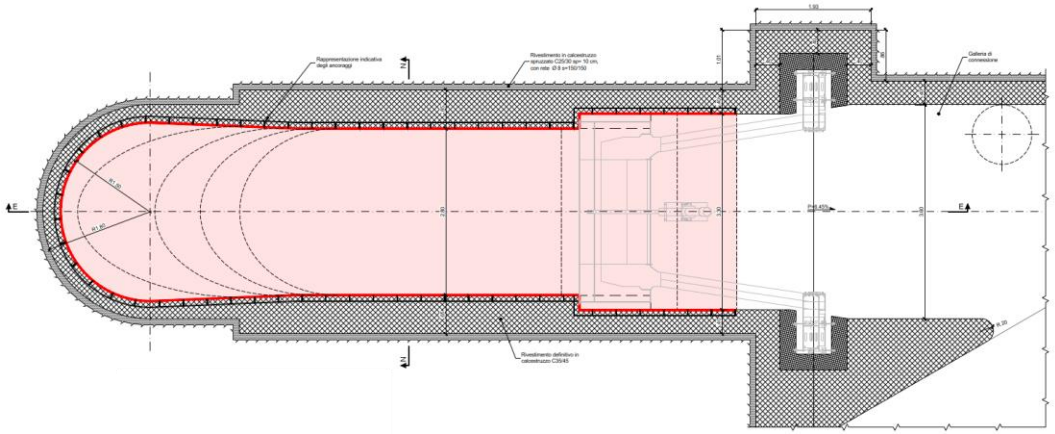


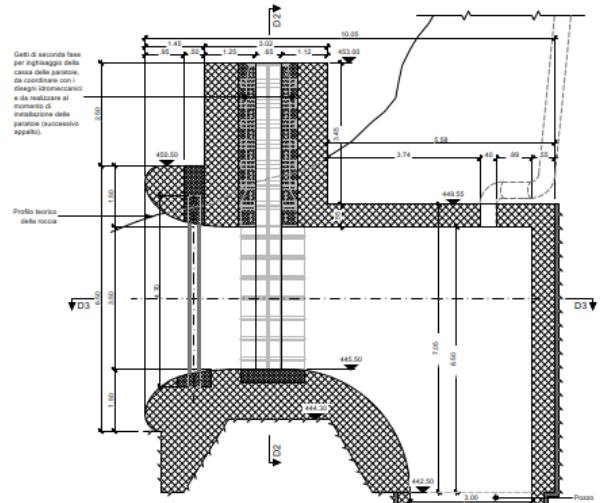


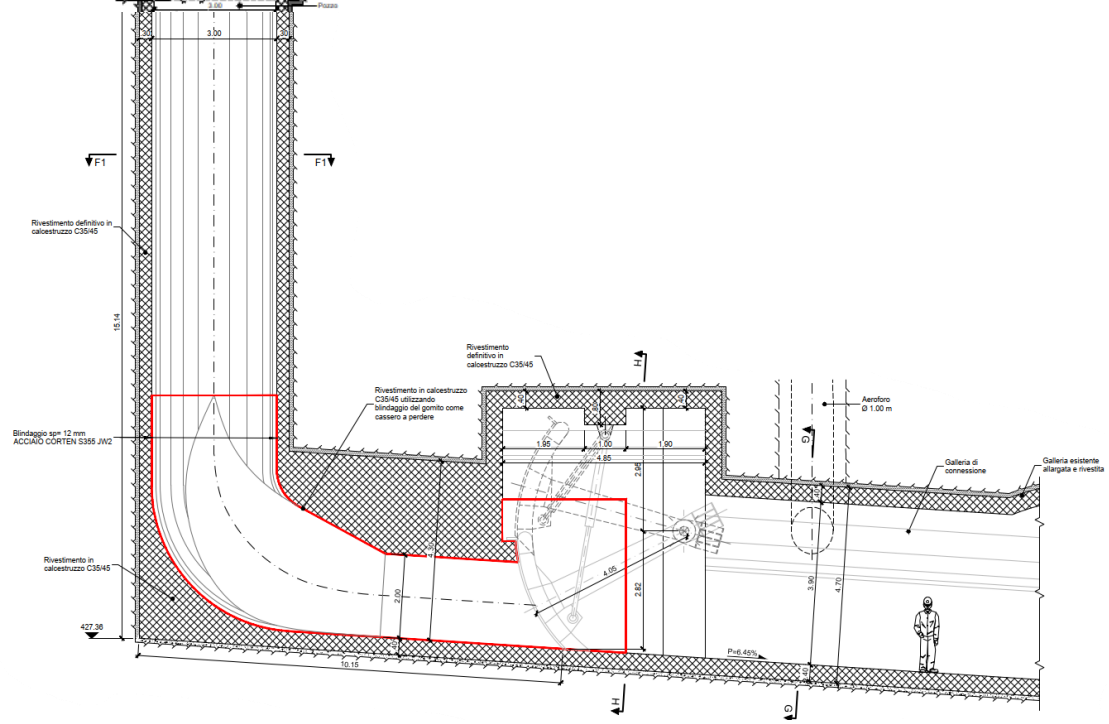
7. Progetto Esecutivo e Verifica CFD

Verifica ed affinamento soluzioni di progetto: disegno finale



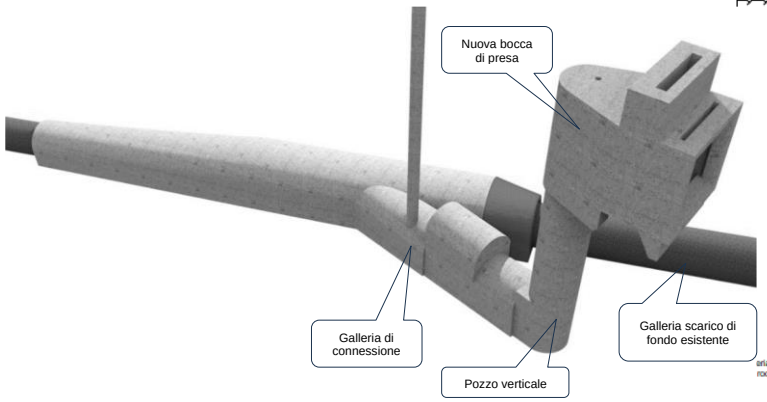


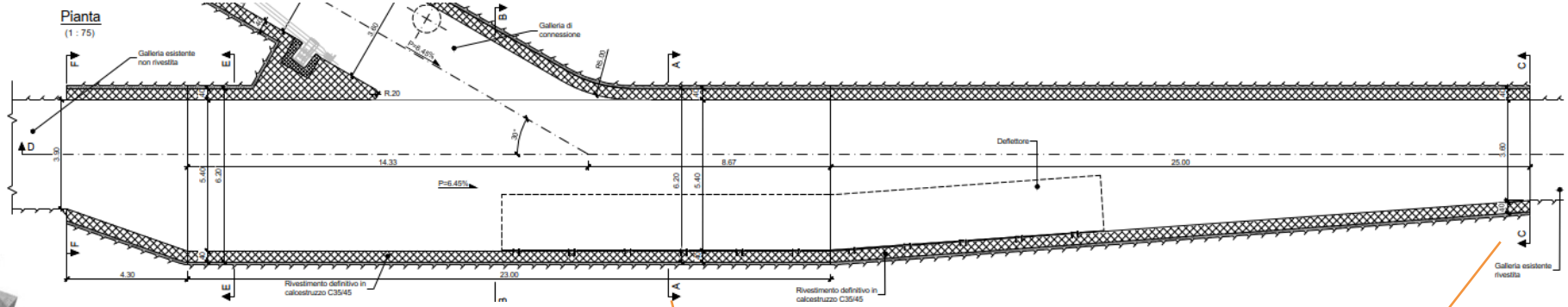


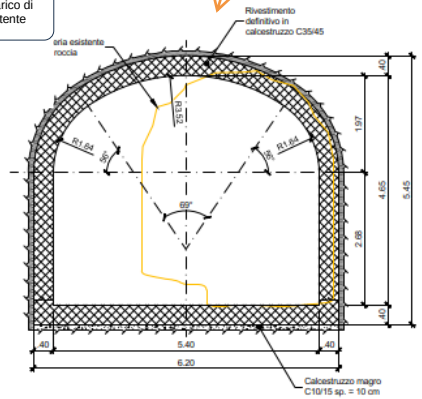


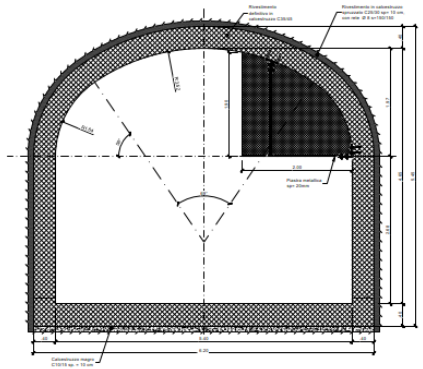
7. Progetto Esecutivo e Verifica CFD

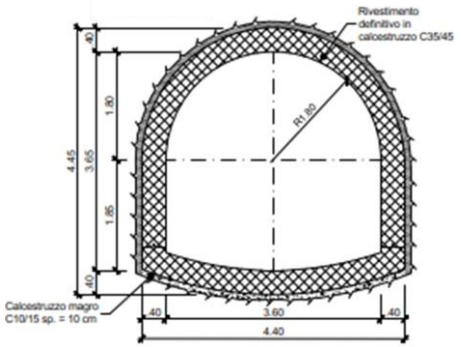
Verifica ed affinamento soluzioni di progetto: disegno finale





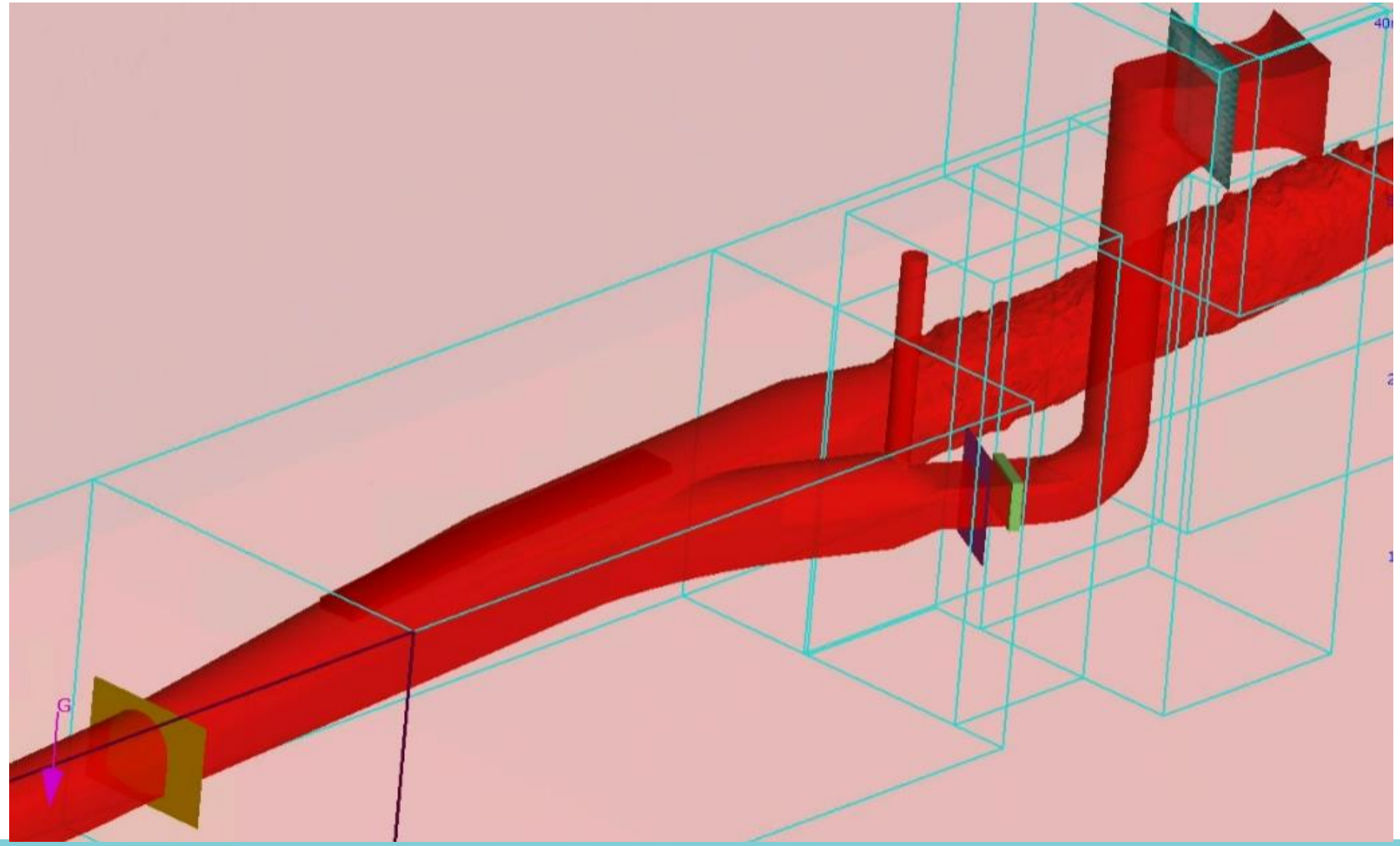






7. Progetto Esecutivo e Verifica CFD

Verifica ed affinamento soluzioni di progetto: modello CFD del disegno finale

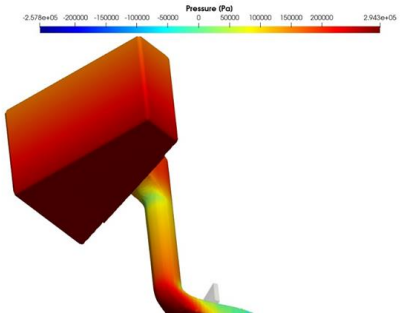


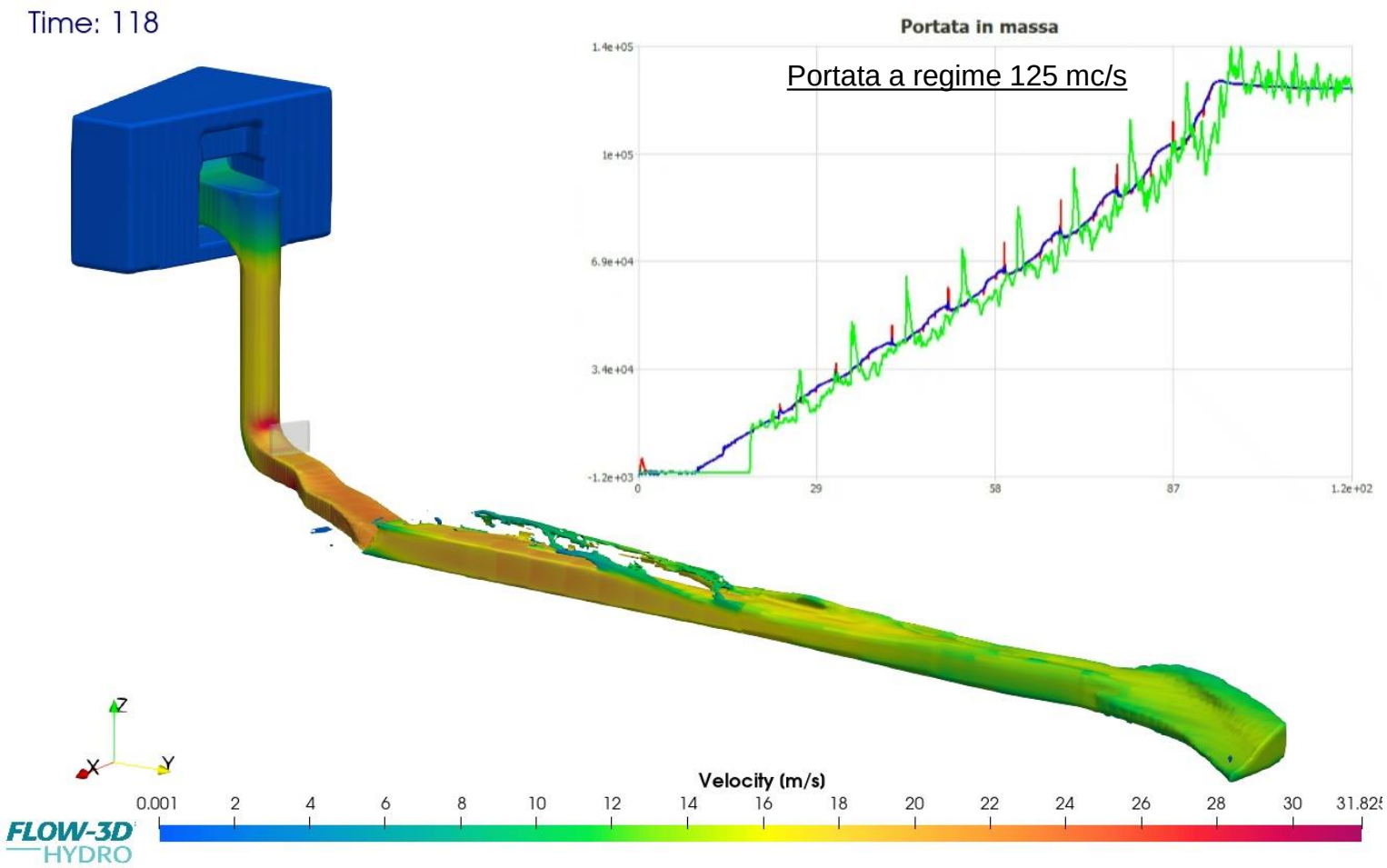
7. Progetto Esecutivo e Verifica CFD

Verifica ed affinamento soluzioni di progetto: verifica assetto finale (invaso 470 m s.l.m.)

Il nuovo layout implementato in Progetto Esecutivo permette la risoluzione delle criticità individuate sul modello di Progetto Definitivo

Il valore di portata esitato (125 m^3/s) è compatibile con la necessità di scarico della piena di progetto (420 m^3/s, valore massimo rivalutato) ripartita sugli scarichi di superficie (266 m^3/s), scarico di alleggerimento (45 m^3/s) e scarico di fondo (> 109 m^3/s).

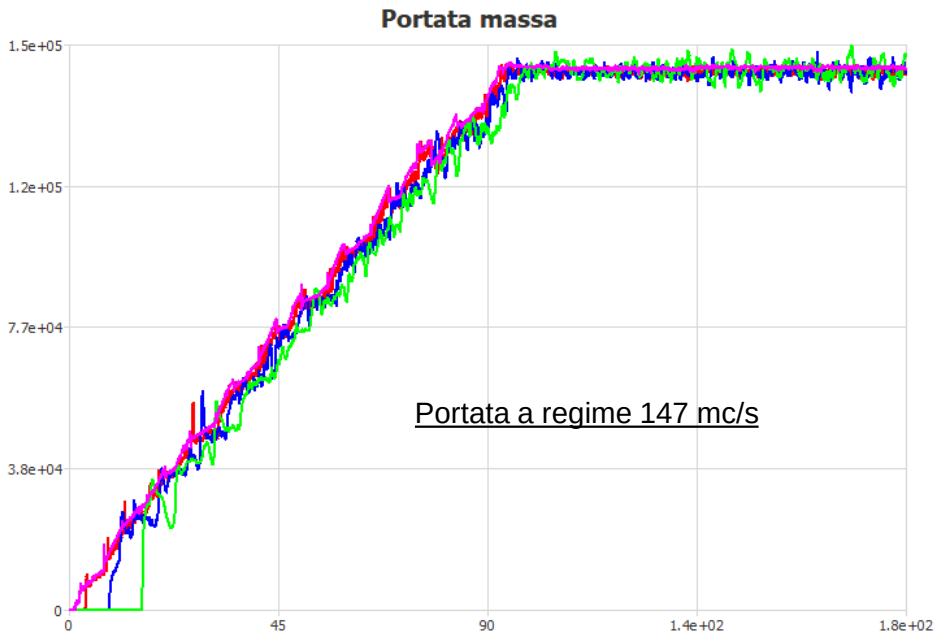


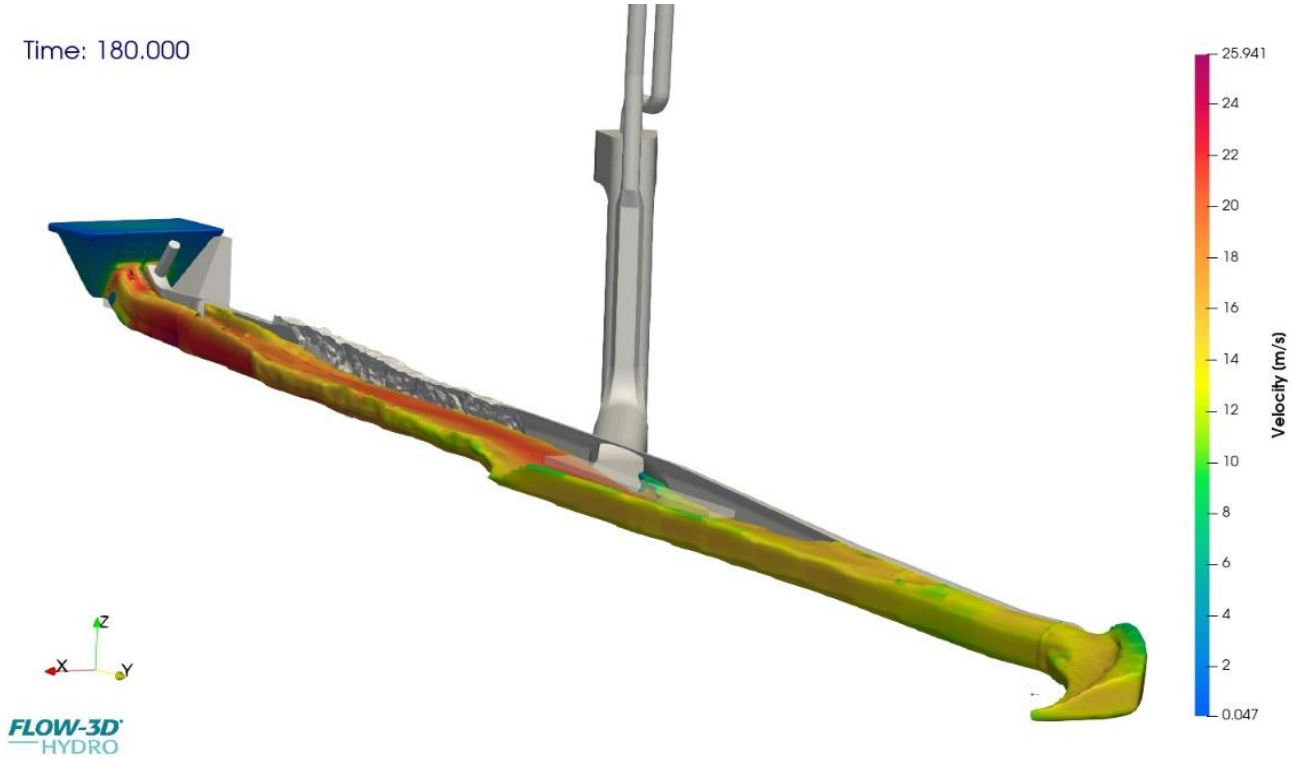


7. Progetto Esecutivo e Verifica CFD

Verifica ed affinamento soluzioni di progetto: verifica scarico esistente in assetto finale (470 m s.l.m.)

La portata scaricata non è influenzata dal nuovo layout di progetto (camerone e deflettore inseriti lungo la galleria di scarico esistente)



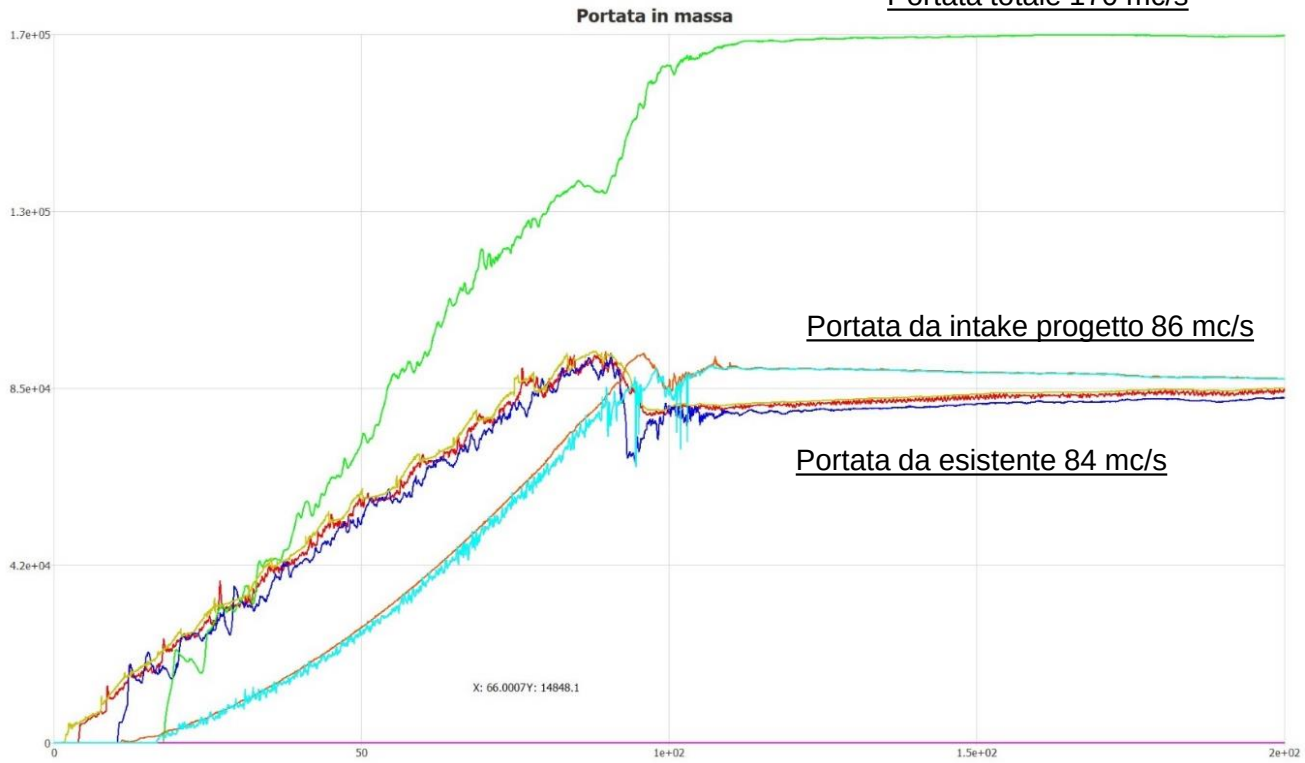


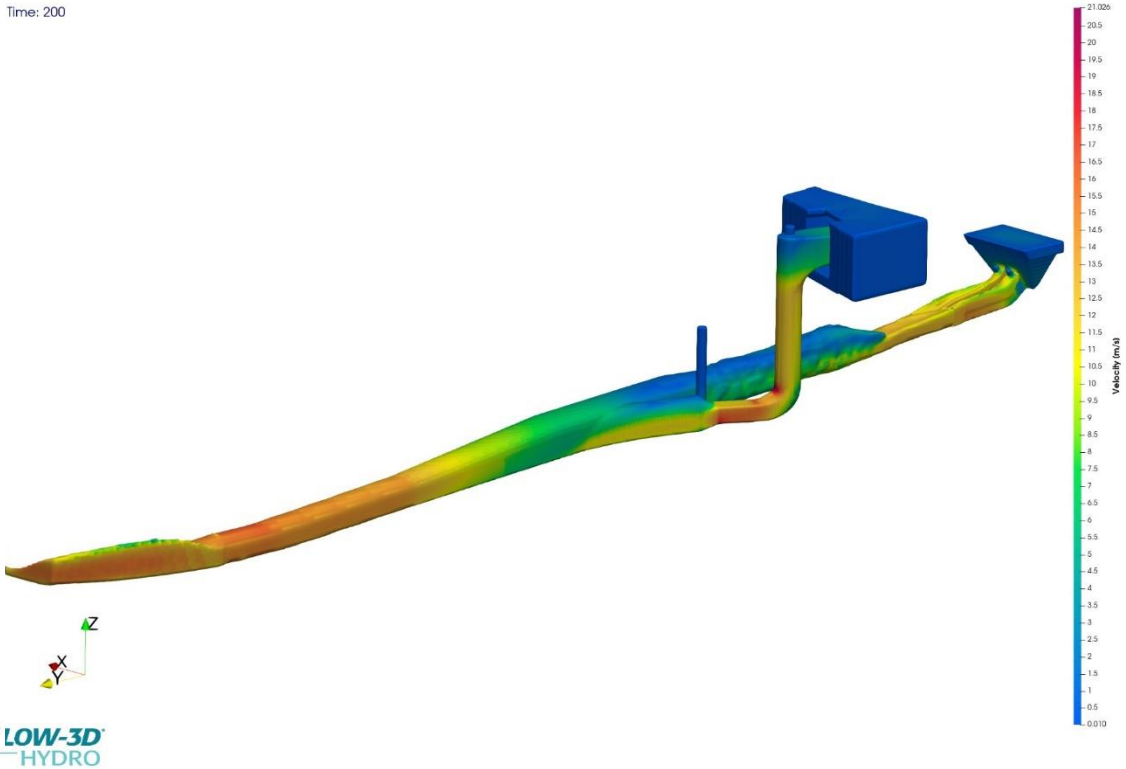
7. Progetto Esecutivo e Verifica CFD

Verifica capacità idraulica per funzionamento contemporaneo delle due bocche di presa (451 m s.l.m.)

Fase di cantiere diga - apertura di entrambi gli scarichi (invaso 451 m s.l.m.): Il sistema va in pressione: condizione accettabile provvisoriamente fino alla conclusione del cantiere

Portata totale 170 mc/s

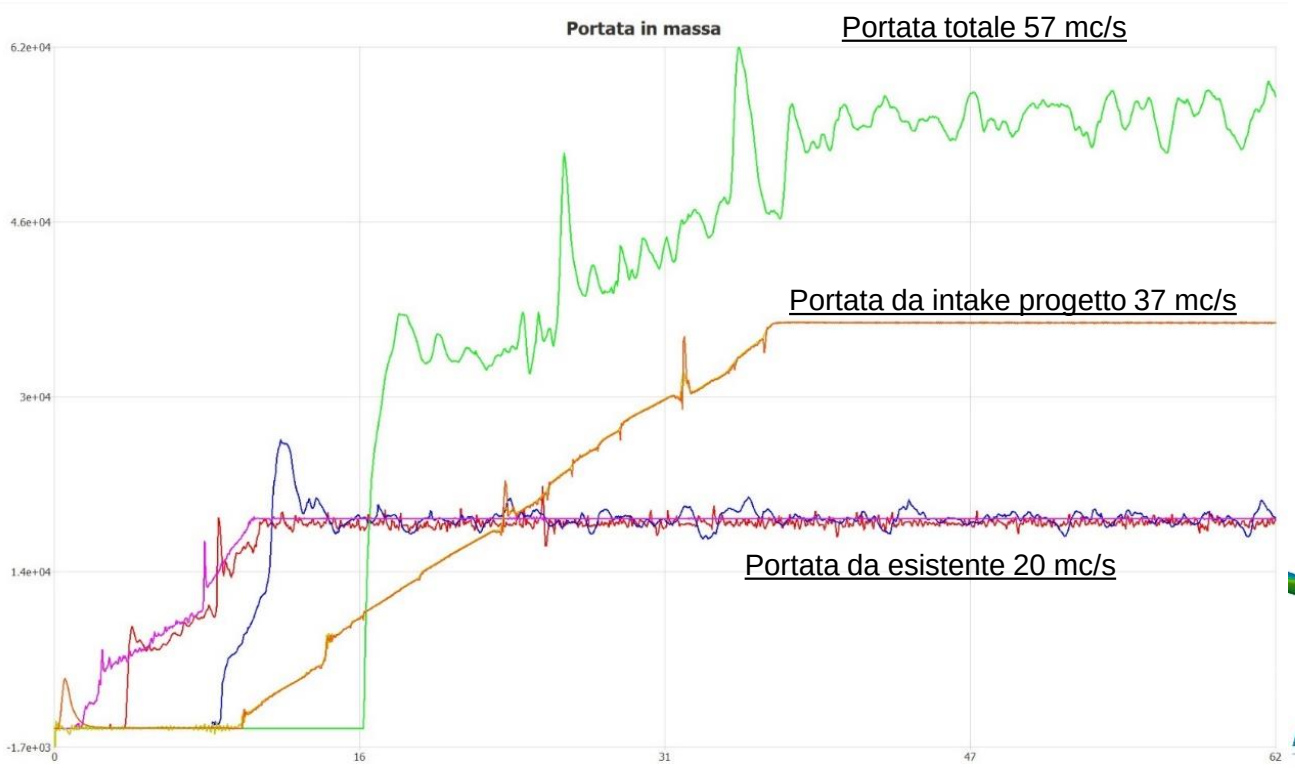


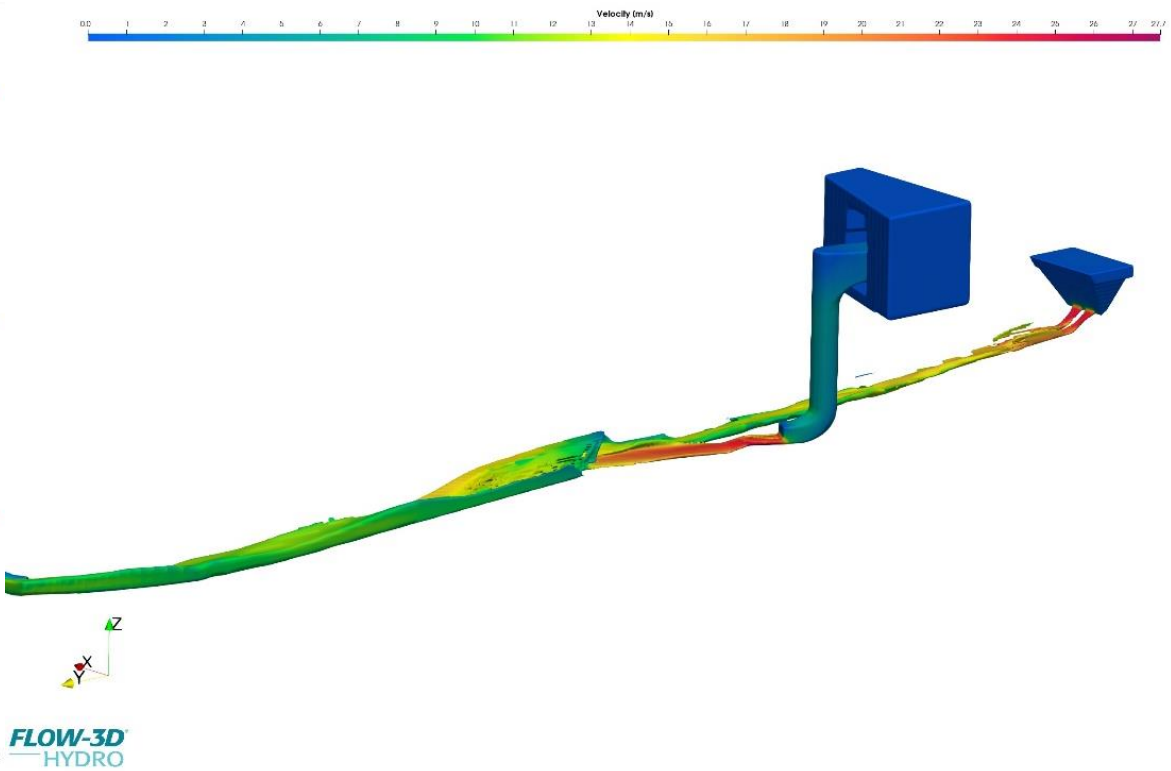


7. Progetto Esecutivo e Verifica CFD

Verifica capacità idraulica per funzionamento contemporaneo delle due bocche di presa

Diluizione - apertura di entrambi gli scarichi 30% nuovo e 10 % esistente (invaso 470 m s.l.m.)

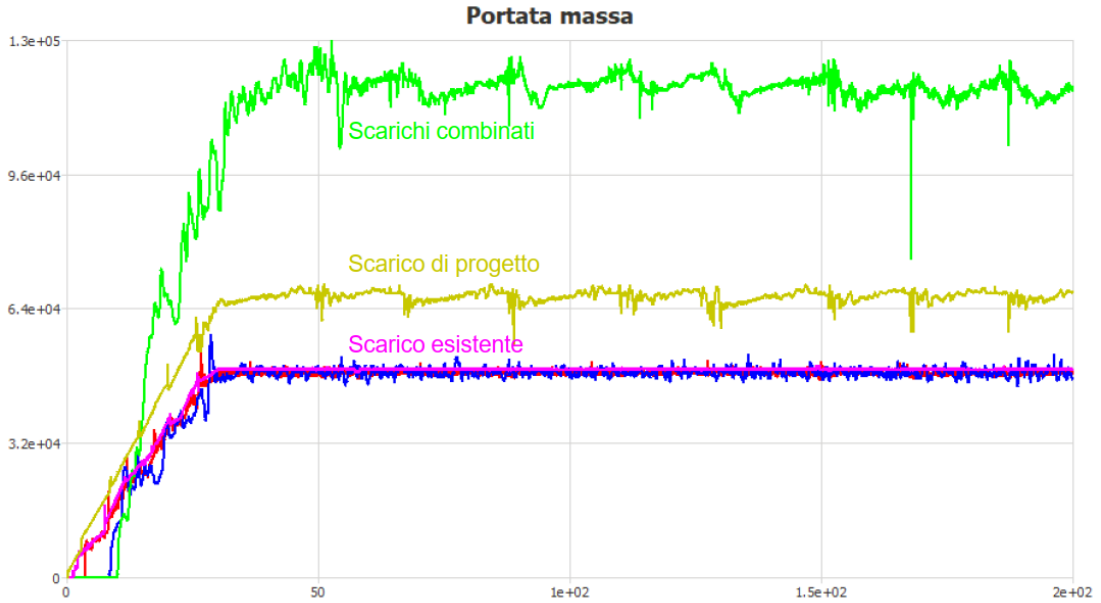




7. Progetto Esecutivo e Verifica CFD

Verifica capacità idraulica per funzionamento contemporaneo delle due bocche di presa

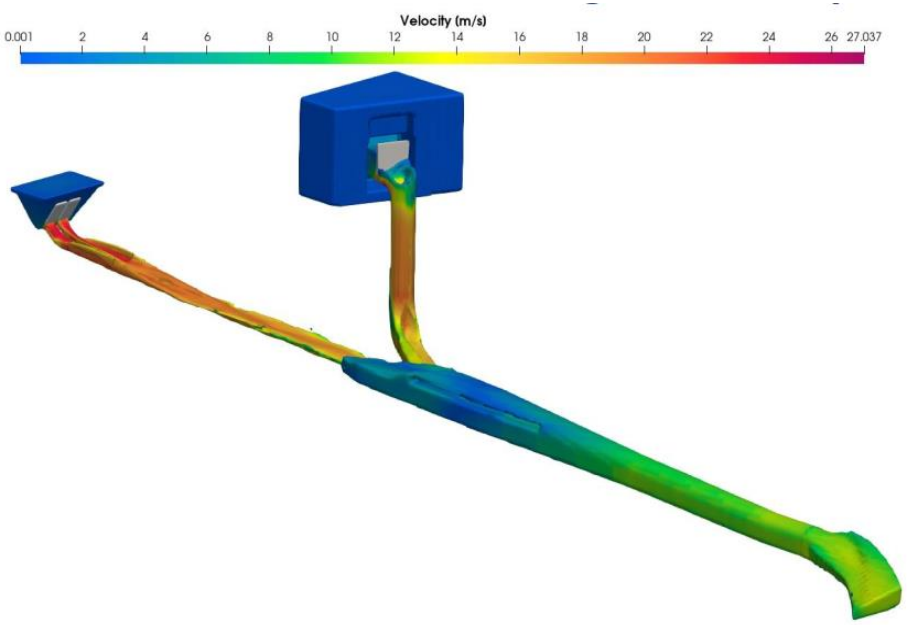
Esercizio - apertura di entrambi gli scarichi al 30% (invaso 470 m s.l.m.) Il funzionamento congiunto delle due bocche di presa, non previsto in PD, non è efficiente dal punto di vista idraulico e, ad apertura completa delle paratoie, la portata scaricata risulta inferiore a quanto esitabile con l'apertura di un solo scarico, funzionamento che tra l'altro determina condizioni di minor sollecitazione per la galleria.



Portata in volume fase liquida
~ 117 m³/s

Portata in volume fase liquida
67 m³/s

Portata in volume fase liquida
49 m³/s



With energy for the future

Franco Maugliani, Senior Engineer & PM
franco.maugliani@lombardi.group

Lombardi Ingegneria S.r.l.
Via Giotto 36, IT-20145 Milano, Italy
tel: +39 02 583 03 324
cell. +39 348 367 8724

Unità locale Roma
Via XX Settembre 98/G, IT-00185 Roma, Italy

Unità locale Torino
Via Raimondo Montecuccoli 9, IT-10121 Torino, Italy

www.lombardi.group

Ringraziamenti
- Silvia Danesi, Senior Project Engineer
- Daniele Polverelli, Project Engineer & CFD Engineer
- Andrea Balestra, Head of Lo04 Idraulica 01

Lombardi