

# REGIONE LOMBARDIA

## CONSORZIO DEL CHIESE DI BONIFICA DI SECONDO GRADO

Via Vittorio Emanuele II n° 76 - 25011 CALCINATO (BS)  
Tel. 030 9637012

# PROGETTO PRELIMINARE

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

PROGETTAZIONE A.T.I.



MANDATARIA

Alpina S.p.A.



ALTAIR s.a.s.  
Laboratorio Terre e Rocce

STUDIO DOTT. GEOL. L. GRIFFINI  
GEOLOGIA - GEOTECNICA



TITOLO ELABORATO:

## ELABORATI GENERALI RELAZIONE IDRIOLOGICA E IDRAULICA

SCALA:

N. DOCUMENTO:

SCALA

FASE PR. REDATTORE ARGOMENTO DISCIPLINA TIPO EL. N. PROGR. EL. REVISIONE

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | A | 0 | 0 | 0 | I | D | R | T | 0 | 1 | A |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

| REV. | DATA       |           | REDAZIONE | VERIFICA | CONTROLLO |
|------|------------|-----------|-----------|----------|-----------|
| A    | 17/12/2007 | EMISSIONE | MAZZELLA  | MAZZOTTI | PERI      |
| B    |            |           |           |          |           |
| C    |            |           |           |          |           |

IL PROGETTISTA:

IL RESPONSABILE UNICO  
DEL PROCEDIMENTO

## INDEX

|       |                                                                     |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------|----|
| 1.    | IDROLOGIA                                                           | 3  |
| 1.1   | Inquadramento territoriale                                          | 3  |
| 1.1.1 | Il bacino idrografico sopralacuale                                  | 3  |
| 1.1.2 | Il fiume Chiese                                                     | 3  |
| 1.1.3 | Il lago d'Idro                                                      | 3  |
| 1.2   | Studi idrologici pregressi                                          | 4  |
| 1.2.1 | Breve descrizione dello studio                                      | 4  |
| 1.3   | La scelta dell'idrogramma di progetto                               | 8  |
| 1.4   | Il calcolo del deflusso minimo vitale                               | 8  |
| 2.    | IDRAULICA                                                           | 10 |
| 2.1   | Scenario ante-operam                                                | 10 |
| 2.1.1 | Capacità e funzionalità idraulica                                   | 10 |
| 2.1.2 | Considerazioni sul rischio idraulico                                | 12 |
| 2.2   | Scenario di progetto                                                | 15 |
| 2.2.1 | Traversa di regolazione e riprofilatura dell'alveo del fiume Chiese | 15 |
| 2.2.2 | La Galleria di by-pass                                              | 30 |
| 2.2.3 | L'Opera di dissipazione e il canale di restituzione                 | 42 |

## **1. IDROLOGIA**

### **1.1 Inquadramento territoriale**

#### ***1.1.1 Il bacino idrografico sopralacuale***

Il lago d'Idro si origina dal fiume Chiese che a monte del lago stesso sottende un bacino imbrifero di 617 km<sup>2</sup>, avente un'altitudine media pari a 1480 m s.l.m., e situato quasi interamente in Trentino.

Il bacino imbrifero del Chiese costituisce uno dei maggiori esempi di sfruttamento idroelettrico montano. In un'area geograficamente limitata si contano infatti ben quattro bacini artificiali e tre centrali idroelettriche questo solamente nell'area trentina del bacino. Altri impianti di sfruttamento sono presenti nell'area Lombarda.

#### ***1.1.2 Il fiume Chiese***

Il fiume Chiese che è sia immissario che emissario del lago tra origine dai ghiacciai dell'Adamello, percorre le valli di Fumo e di Daone formando i laghi artificiali di Bissina e di Boazzo e a Pieve di Bono entra nella valle del Chiese che appartiene alle valli giudicarie inferiori accogliendo le acque del torrente Adanà.

Poche centinaia di metri a monte dell'immissione nel lago d'Idro riceve il contributo del torrente Caffaro.

A valle del lago, percorre la val Sabbia fino a Roè Volciano, entrato in pianura, scorre in direzione nord-sud bagnando nel bresciano: Gavardo, Montichiari, Carpenedolo e in Provincia di Mantova Asola, prima di confluire da sinistra nell'Oglio a valle di Acquanegra sul Chiese. Nel bresciano il fiume è chiamato anche Clisi o Clisio.

#### ***1.1.3 Il lago d'Idro***

Il lago è caratterizzato da una superficie media pari a circa 11 Km<sup>2</sup> e da un perimetro di 29,4 km, sottende un volume d'acqua di circa 680 milioni di metri cubi con una profondità massima di circa 120 m

## **1.2 Studi idrologici pregressi**

Lo studio idrologico più completo eseguito sul bacino del Chiese sopralacuale è lo studio eseguito dal professor Luigi Natale dell'università di Pavia.

Lo studio in oggetto ha come titolo: “studio della capacità di laminazione delle piene del lago d'Idro”, è stato commissionato dal Consorzio del Chiese di bonifica di secondo grado nel 2005 ed è stato ultimato nel maggio del 2006.

Lo studio viene ritenuto completo ed adeguato al progetto preliminare da sviluppare pertanto si rimanda completamente ad esso, in tale sede ci si limita ad una breve descrizione dello stesso.

Come si evince dal titolo, lo studio non tratta soltanto la parte idrologica del bacino ma esamina anche le dinamiche idrauliche connesse alle opere di regolazione esistenti.

### ***1.2.1 Breve descrizione dello studio***

Le onde di piena di progetto sono state ricavate mediante elaborazione statistica di una serie storica di portate in ingresso al lago nel periodo compreso tra gli anni 1960 e 2004, ricavata a partire dalle registrazioni delle manovre della traversa di regolazione e dei livelli del lago e applicando l'equazione di continuità all'intero lago.

La statistica è stata condotta sugli eventi caratterizzati da portata superiore ai  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ , sono stati quindi considerate 37 onde di piena.

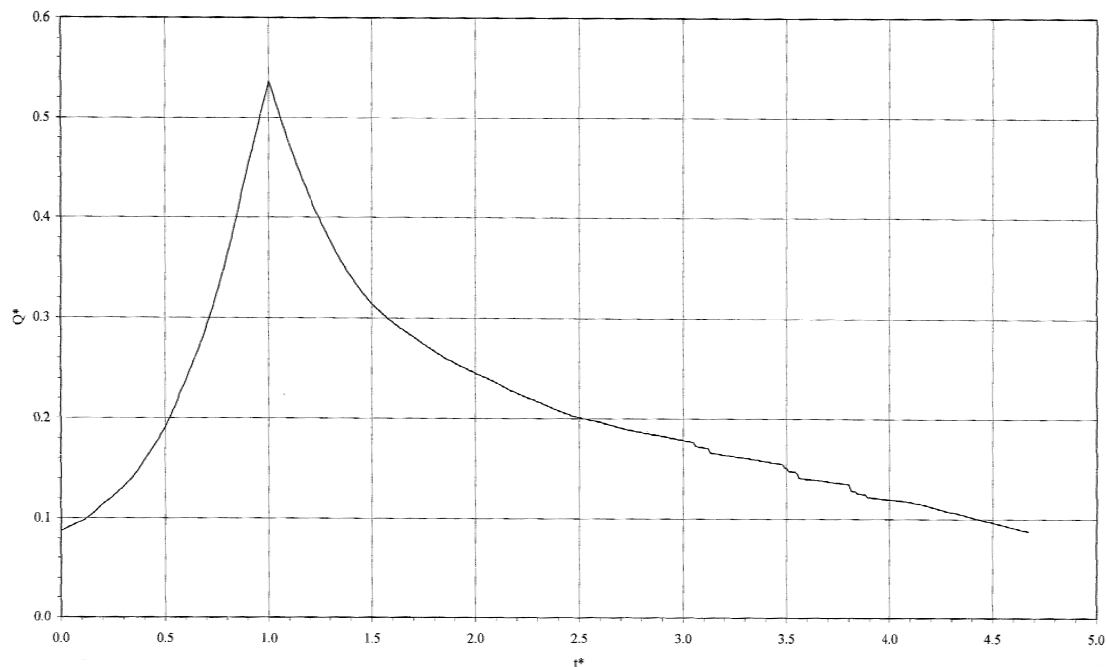
Sono state applicate due differenti metodologie statistiche per la stima di due forme differenti di onde di piena, tali procedure vengono descritte nel seguito:

#### ***Stima dell'onda di piena (semplice) dalla statistica della portata***

E' una procedura strutturata nel seguente modo:

- stima della distribuzione di probabilità della portata al colmo mediante metodo delle serie parziali;
- individuazione di un legame statistico tra le portate al colmo e i volumi di piena;
- definizione della forma dell'idrogramma.

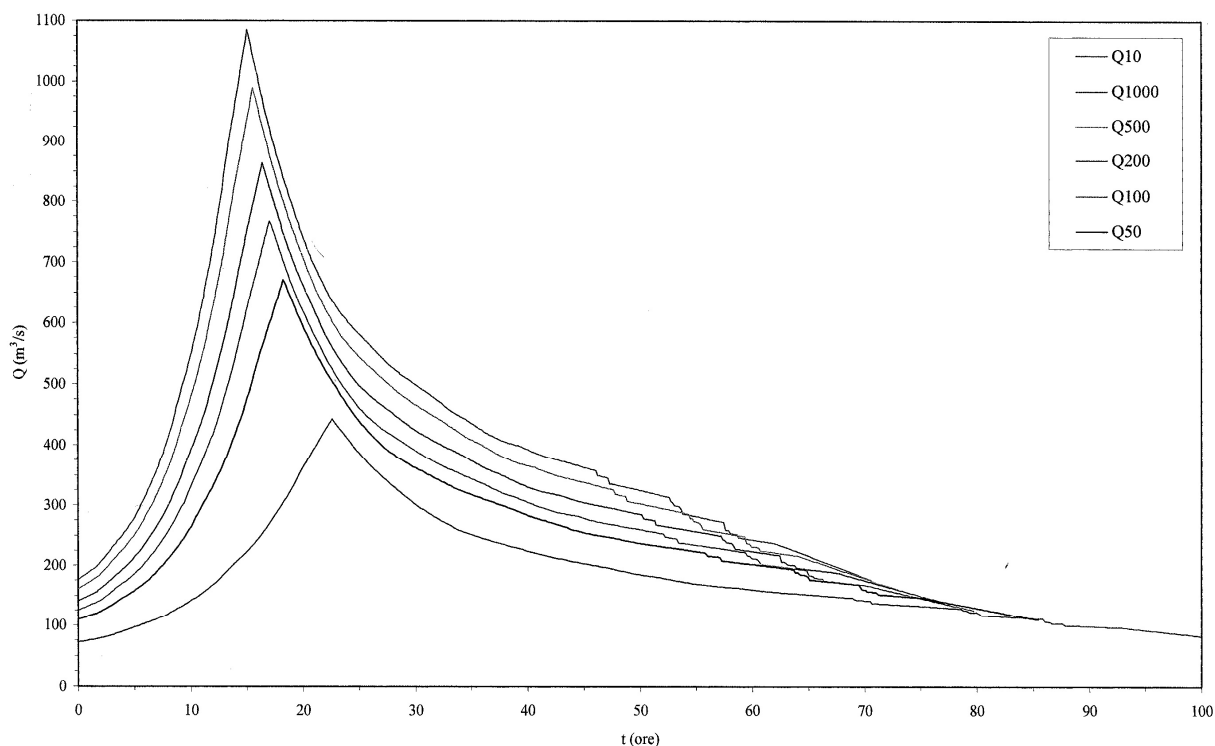
Per la determinazione dell'onda adimensionale sono stati considerati 35 eventi, scartando le due onde “doppie” del 1977 e del 2000.



**Fig. 1.1: onda di piena adimensionale.**

Per la determinazione del legame tra portata e volume di piena è stata operata una regressione lineare ottenendo una legge lineare.

Imponendo infine il valore della portata al colmo con tempo di ritorno assegnato, sono stati ricavati cinque idrogrammi di piena corrispondenti ai seguenti tempi di ritorno: 10, 50, 100, 200, 500, 1000.



**Fig. 1.2: onde di piena per differenti tempi di ritorno.**

### ***Stima dell'onda di piena (a due colmi) partendo dalla statistica dei volumi***

Questo metodo di analisi statistica conduce a risultati meno attendibili dei precedenti in quanto il campione di dati è molto più limitato (uniche onde registrate: anno 1977 e 2000) essendo le onde a più colmi molto meno ricorrenti di quelle semplici.

I picchi di un'onda di piena fanno parte dello stesso evento se nel lasso di tempo che li separa il lago non fa a tempo a ritornare al livello di normale regolazione.

La procedura è strutturata nel seguente modo

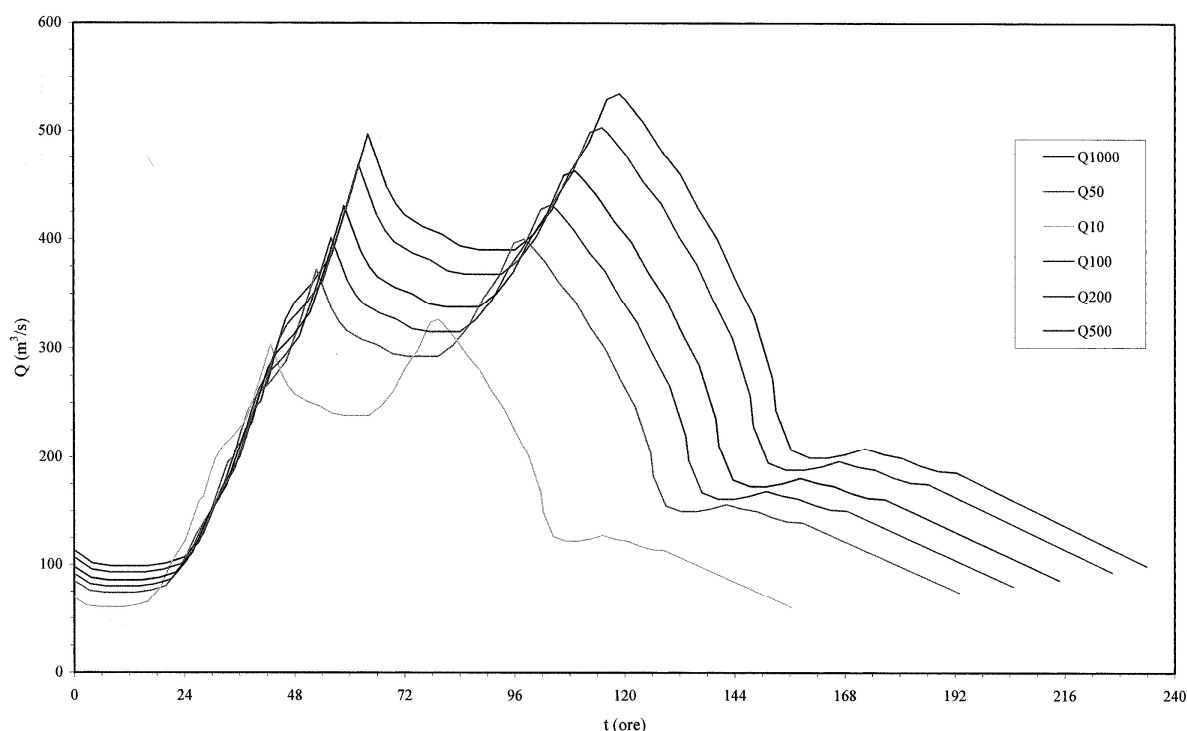
- stima della distribuzione di probabilità dei volumi mediante metodo delle serie parziali;
- individuazione di un legame statistico tra i volumi di piena e le portate al colmo;
- definizione della forma dell'idrogramma.

La distribuzione di probabilità del volume è stata assunta esponenziale, di conseguenza la probabilità del massimo annuale è distribuita secondo la legge di Gumbel.

Per ricavare il legame statistico tra il volume di piena e la portata al colmo sono state utilizzate le onde dell'intero campione (37) in quanto le sole onde a due colmi (2) non costituiscono un campione sufficiente.

Poiché non è possibile ricavare una forma media dell'onda a più colmi, è stata scelta la forma dell'onda di piena verificatasi nel 1977 che è la più gravosa tra le due registrate.

Gli idrogrammi risultanti vengono riportati nella seguente figura:



**Fig. 1.3: onde di piena a due colmi per differenti tempi di ritorno.**

E' stata condotta infine una statistica riducendo il campione delle onde di piena nel periodo primaverile Maggio – Luglio ricavando degli idrogrammi aventi valori di picco e di volume sotteso inferiori a quelli ricavati per l'intero anno. Tali risultanze sono quindi utili in un ottica gestionale previsionale delle piene piuttosto che in un ottica di progetto delle nuove opere di regolazione.

### 1.3 La scelta dell'idrogramma di progetto

Al fine del dimensionamento delle opere in progetto si prende a riferimento l'idrogramma a singolo colmo corrispondente ad un tempo di ritorno di 1000 anni salvo poi verificare il funzionamento del sistema anche per eventi meno gravosi.

Vengono riportate in tabella le caratteristiche principali degli idrogrammi di progetto.

| TEMPO<br>DI RITORNO | PORTATA AL COLMO  | DURATA | VOLUME             |
|---------------------|-------------------|--------|--------------------|
| anni                | m <sup>3</sup> /s | ore    | mln m <sup>3</sup> |
| Tr 1000             | 1086              | 70     | 111                |
| TR500               | 990               | 72     | 104                |
| TR200               | 864               | 75     | 94                 |
| TR100               | 768               | 80     | 89                 |
| TR50                | 671               | 85     | 82                 |
| TR10                | 443               | 100    | 65                 |

### 1.4 Il calcolo del deflusso minimo vitale

Il deflusso minimo vitale (DMV) è il deflusso che in un corso d'acqua deve essere presente a valle delle captazioni idriche al fine di mantenere vitali le condizioni di funzionalità e qualità degli ecosistemi interessati.

Il DMV si compone di una componente idrologica e da eventuali fattori correttivi che dipendono dalla morfologia dell'alveo e dal bacino idrografico.

Per i corsi d'acqua ricadenti nel bacino del Po si fa riferimento all' allegato B della deliberazione n.7 del 13 marzo 2002 dell'autorità di bacino; la formula di calcolo è la seguente:



$$DMV = k \cdot q_{media} \cdot S \cdot M \cdot Z \cdot A \cdot T$$

Dove:

K = parametro sperimentale determinate per single aree idrografiche;

$q_{media}$  = portata media annua per unità di superficie del bacino (l/s/Km<sup>2</sup>);

S = superficie del bacino sottesa dalla sezione del corso d'acqua (Km<sup>2</sup>);

M= parametro morfologico;

Z= il massimo dei valori dei parametro N,F,Q;

Dove:

N = parametro naturalistico;

F = parametro di fruizione;

Q = parametro relativo alla qualità delle acque fluviali;

A= parametro relativo all'interazione tra acque superficiali e sotterranee

T = parametro relativo alla modulazione del tempo.

Il coefficiente K è pari a 0,1 per l'area idrologica del chiese sopralacuale.

Il valore di  $q_{media} \times S$  è definito all'interno del PTUA della regione Lombardia ed è pari a 25,1 m<sup>3</sup>/s.

Lo stesso PTUA (allegato 14) non fornisce indicazioni sui valori correttivi da utilizzare ma fornisce soltanto indicazioni generali per l'applicazione degli stessi e rimanda ai gestori delle aree protette e ad un eventuale futuro *“regolamento per la determinazione e l'applicazione dei fattori correttivi”*.

Come valore di progetto viene pertanto preso in considerazione il valore massimo del DMV che in un futuro potrebbe realizzarsi, il valore massimo della somma dei fattori correttivi è pari a 2.

Il DMV risulta in definitiva pari a 5,02 m<sup>3</sup>/s.

## **2. IDRAULICA**

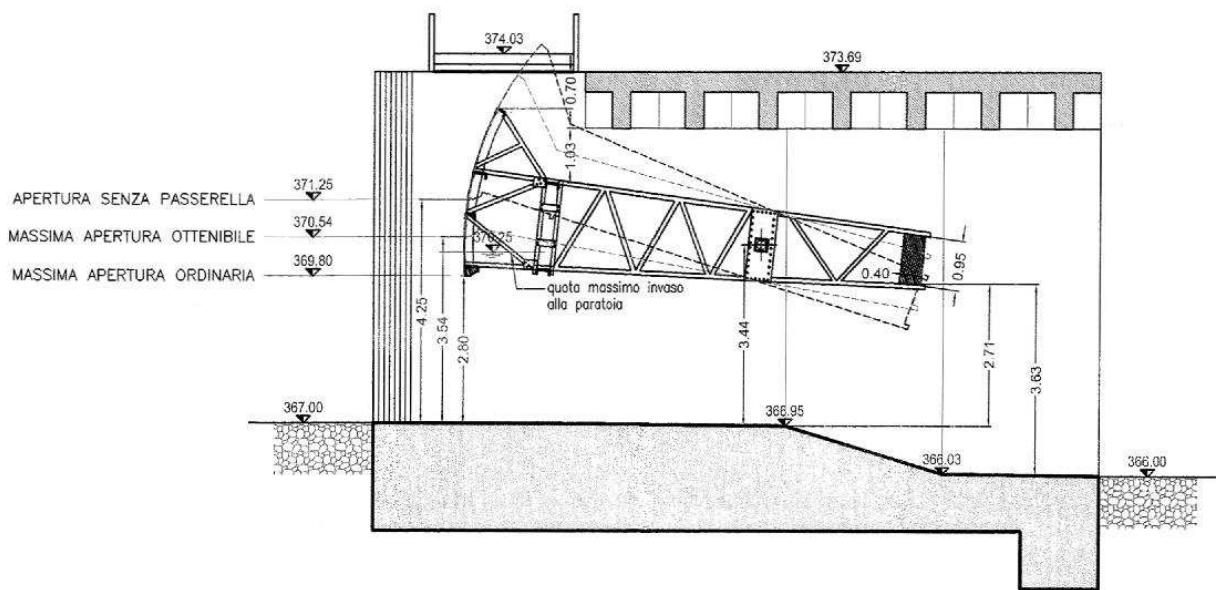
### **2.1 Scenario ante-operam**

#### **2.1.1 Capacità e funzionalità idraulica**

L'attuale traversa di regolazione posta lungo l'alveo del Fiume Chiese è l'opera che storicamente veniva utilizzata per la regolazione dei volumi idrici compresi tra le quote 365 e 368 m s.l.m. IGM. Il funzionamento dell'opera di sbarramento regola evidentemente le portate defluenti nell'emissario e determina in particolare la presenza d'acqua nel tratto d'alveo tra Pieve Vecchia e Lavenone poiché in tale zona il Chiese non riceve altri apporti ad eccezione del Lago e la traversa non prevede la restituzione in alveo del Deflusso Minimo Vitale.

L'attuale sistema di gestione prevede l'ordinaria regolazione del Lago utilizzando principalmente la derivazione idroelettrica di Vobarno e lo scarico di fondo della galleria detta "degli agricoltori", i volumi idrici defluenti sono utilizzati rispettivamente per scopi energetici ed irrigui. L'utilizzo attuale della traversa a seguito delle limitazioni di invaso imposte da RID è quello di controllare e contenere i deflussi in alveo in condizioni di piena.

In questo paragrafo si prende in esame l'attuale funzionamento idraulico della traversa esistente anche in relazione al deflusso delle portate di piena nel tratto d'alveo del Chiese oggetto dell'intervento; a tal fine si farà largo ricorso ai risultati di analogo studio del Prof. Ing. Luigi Natale risalente al 2006.



**Fig. 2.1: Sezione trasversale dell'attuale traversa di regolazione (le quote sono riferite rispetto allo 0 idrometrico).**

L'attuale traversa di regolazione è caratterizzata da una soglia di battuta di 365 m s.l.m. (IGM) su cui gravano 2 paratoie a settore caratterizzate da 2 luci di 11 m e 9 m; le possibilità di manovra della paratoia consentono una massima apertura ordinaria di 2,80 m che può essere incrementata in condizioni di emergenza a 3,54 m (massima apertura ottenibile).

Il prof. Natale ha messo in evidenza che sarebbe possibile aumentare tale apertura sino a 4,25 m eseguendo aggiustamenti di carpenteria sul corpo dell'opera (Fig. 2.1).

La posizione dell'opera di sbarramento è da considerarsi felice dal punto di vista idraulico poiché gode verso valle di un tratto d'alveo maggiormente pendente rispetto a monte, ovvero, per le portate normalmente defluenti, l'alveo di valle risulta a forte pendenza e quindi le condizioni di efflusso dalla traversa possono ritenersi non rigurgitate da valle.

Il deflusso dell'acqua attraverso la traversa può evidentemente avvenire in 2 diverse condizioni di funzionamento: ad efflusso libero oppure sotto battente.

In condizioni di efflusso libero la portata defluente al di sotto della paratoia è calcolata con la formula dello stramazzo a larga soglia, non rigurgitato e senza contrazione laterale:

$$Q = 1.705 * C_B * C_L * B * H^{3/2},$$

ove:

- $B$ = larghezza complessiva delle 2 luci (20 m),
- $H$ = energia specifica nella sezione delle paratoie,

- $C_B = 1 - 0.069 * (\frac{L}{H} - 1)^{0.8} * Re^{-0.2}$ ;  
coefficiente di perdita per resistenza del fondo della soglia,
- $L$  = lunghezza della soglia (6 m),
- $Re = \frac{H * U_c}{\nu}$  = numero di Reynolds,
- $U_c = \sqrt{\frac{2 * g * H}{3}}$ ,
- $C_L = 1 - 4 * (0.01 * \frac{h}{B})$   
coefficiente di perdita per contrazione laterale della corrente intorno alle pile arrotondate,
- $h$  = tirante idrico nella sezione delle paratoie.

L'efflusso a battente è invece regolato dalla relazione:

$$Q = \mu * a * B * \sqrt{2 * g * (H - C_c * a)},$$

ove:

- $a$  = luce libera sotto la paratoia;
- $0.55 < C_c < 1$  = coefficiente di contrazione della paratoia;
- $0.54 < \mu < 1$  = coefficiente di efflusso.

Applicando le precedenti relazioni risulta che la traversa è in grado di smaltire, nel caso di efflusso a pelo libero, nelle condizioni di massima apertura ordinaria (2,8 m) una portata di 180 m<sup>3</sup>/s.

### **2.1.2 Considerazioni sul rischio idraulico**

L'alveo dell'emissario del Lago d'Idro così come la traversa di regolazione sono gravati dal rischio di venire completamente ostruiti da un eventuale innesco della frana che interessa ampie porzioni del versante in sinistra idrografica, tale considerazione impone conseguentemente la valutazione del comportamento del Lago d'Idro allorché venga a mancare del tutto la principale via di smaltimento dei deflussi idrici, dovendo quindi ricorrere per lo smaltimento delle portate di piena unicamente alla Galleria di derivazione idroelettrica di Vobarno.

Tale scenario è ovviamente catastrofico, in quanto la portata evacuabile da tale galleria non è sufficiente a garantire il contenimento dei sovralti del lago, con conseguente rischio di collasso

della diga naturale che si verrebbe a formare, anche nei confronti di eventi decennali (la portata minima in ingresso dell'idrogramma decennale è superiore a 30 m<sup>3</sup>/s).

A supporto di tali considerazioni si possono esaminare gli effetti indotti e registrati al Lago dall'evento del 23 – 25 novembre 2007. Tra le 00:00 del 22/11/2007 e le 24:00 del 25/11/2007 (nell'arco di 72 ore) presso la stazione pluviometrica di Ponte Caffaro è stata registrata un'altezza di pioggia totale di 161 mm, a tale precipitazione corrisponde un afflusso idrico al Lago di 30,55 milioni di m<sup>3</sup> distribuito nell'arco di 114 ore. Questo evento ha richiesto, per contenere le quote del Lago al di sotto dei livelli di guardia, lo scarico dei volumi idrici oltre che dalla derivazione idroelettrica di Vobarno anche tramite la Galleria degli Agricoltori e l'alveo del Chiese a mezzo di apertura delle paratoie dell'esistente traversa di regolazione; in seguito a queste manovre il sovrizzo del Lago d'Idro è stato contenuto entro gli 82 cm ovvero non si è superata la quota di 368,75 m a partire da un livello iniziale di 367,93 m **(quote riferite all'idrometro).**

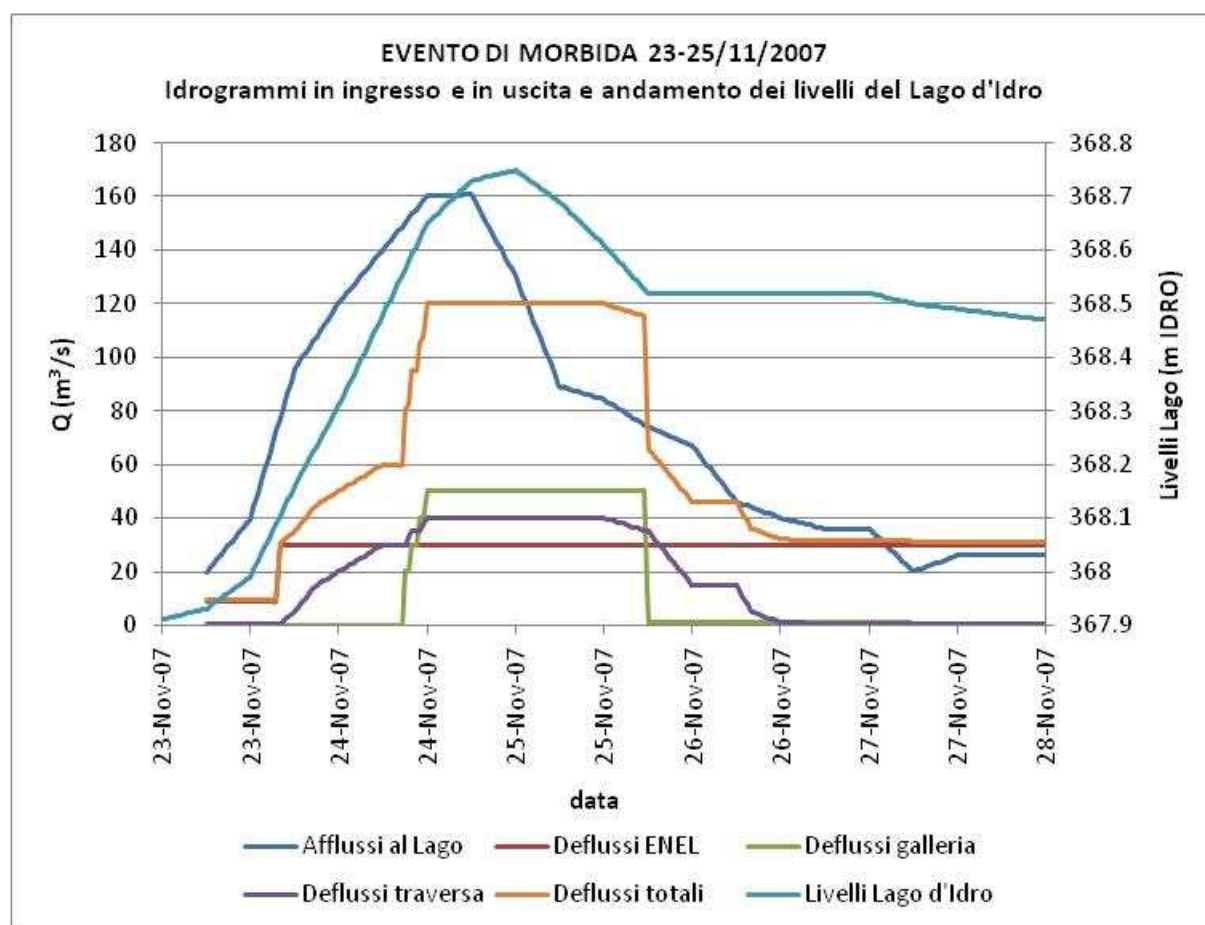
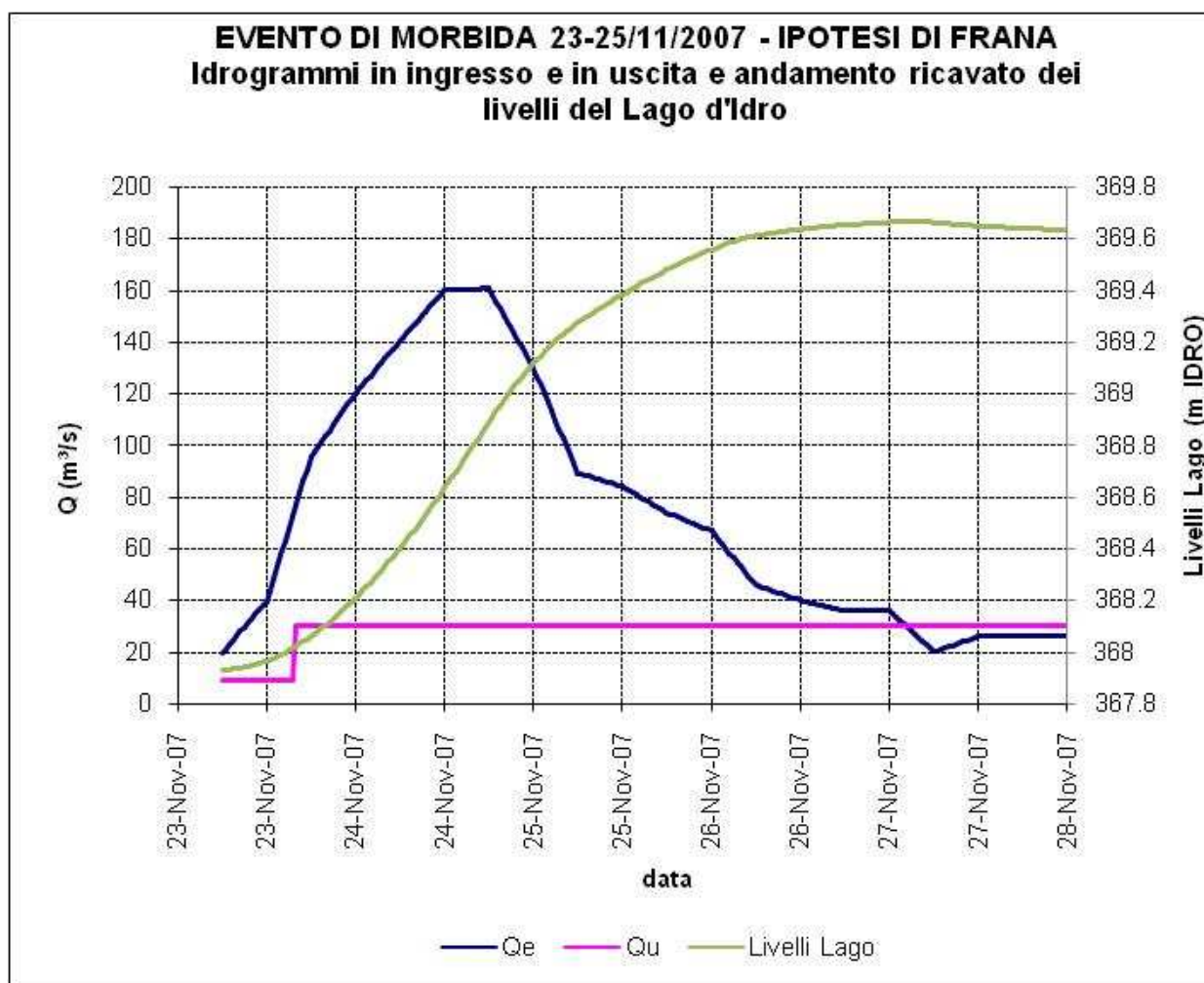


Fig. 2.2: Idrogrammi in ingresso e in uscita e livelli idrici nel Lago d'Idro registrati.

In condizioni di frana non si sarebbero avute le medesime possibilità di regolare e contenere in piena sicurezza i livelli del Lago, in effetti con il solo scarico attraverso la galleria dell'ENEL si ricava che il comportamento del Lago sarebbe stato molto diverso con un sovrizzo di 1,74 m con quota massima raggiunta di 369,67 m sempre a partire da quota 367,93 m (**quote riferite all'idrometro**).



**Fig. 2.3: Idrogrammi in ingresso e in uscita e conseguenti livelli idrici nel Lago d'Idro per l'evento del 23-25 novembre in caso di frana.**

## 2.2 Scenario di progetto

### 2.2.1 *Traversa di regolazione e riprofilatura dell'alveo del fiume Chiese*

#### 2.2.1.1 La nuova traversa

Si può quindi passare ora all'analisi della condizione di progetto che si intende realizzare nell'alveo del Fiume Chiese in seguito all'attivazione degli interventi previsti ovvero la nuova traversa e la sistemazione e riprofilatura dell'alveo nel tratto immediatamente a valle.

La nuova traversa che si prevede di posizionare nell'alveo a monte dell'analoga esistente si caratterizza geometricamente per due luci principali di ampiezza 11,5 m ciascuna, separate da una pila centrale spessa 2 m; nel corpo dell'opera a fianco delle luci principali in destra idrografica si situa un'ulteriore e più piccola luce posta a quota inferiore avente la funzione di poter garantire il transito del Deflusso Minimo Vitale; sempre in destra idrografica ed in continuità con l'opera principale è posta quindi la scala di risalita dei pesci.

Le due luci principali sono sbarrate da due paratoie a settore aventi soglia di battuta a quota 364,50 m s.l.m. (Quote IGM), ciascuna paratoia sottende un angolo solido di 33° con raggio di 8,50 m, il punto di rotazione è posto a 7,43 m di altezza rispetto alla soglia di battuta ovvero a quota 371,93 m s.l.m., queste caratteristiche geometriche consentono alle paratoie di sbarrare l'alveo per poter contenere la quota di massima regolazione del Lago, che si ricorda essere pari a 368 m s.l.m.; ovvero le paratoie, in condizioni di chiusura, possono contenere, con un opportuno franco, un tirante idrico massimo di 3,5 m.

La luce minore, ampia 3 m, è sbarrata da una paratoia piana avente una soglia di battuta di 363,80 m s.l.m., il funzionamento di questa paratoia consente di regolare i deflussi in qualsiasi condizione di livello del lago, mantenendoli sempre al di sopra del DMV.

#### ***La metodologia progettuale***

La prestazione idraulica della nuova opera deve rispondere ai requisiti di poter efficacemente smaltire una portata dell'ordine di 300 m<sup>3</sup>/s che rappresenta un valore di compromesso tra l'esigenza di contenere il sopralzo del Lago d'Idro durante la piena e nel contempo di non provocare problemi nel tratto d'alveo a valle; se dal punto di vista del deflusso idrico massimo le due opere sembrano simili lo stesso non può tuttavia dirsi per ciò che riguarda l'effettivo funzionamento idraulico, infatti mentre la vecchia traversa godeva della presenza, a breve

distanza dalla soglia, verso valle di un alveo a forte pendenza e quindi il deflusso delle portate di piena poteva avvenire in condizioni non rigurgitate, il necessario spostamento a monte della nuova opera di sbarramento ha comportato un peggioramento delle condizioni idrauliche al contorno, difatti le pendenze nel tratto d'alveo a valle della traversa sono tali da non garantire la condizione di forte pendenza e quindi l'efflusso attraverso le paratoie deve considerarsi, per un'ampia finestra di condizioni di funzionamento ed anche e soprattutto per il campo delle massime portate di progetto, come rigurgitato. L'efflusso rigurgitato quindi, seppur ammissibile idraulicamente, comporta una maggior attenzione nei confronti dell'opera sia nella fase progettuale che in quella gestionale poiché la portata scaricabile attraverso la traversa dipende oltretutto dal battente di monte e dall'apertura delle paratoie anche dalle condizioni idrauliche di moto che si registrano immediatamente a valle. Si rimanda a successiva sezione l'analisi di maggior dettaglio sul comportamento idraulico della traversa, basti qui riportare che la fase progettuale, che ha portato alla definizione dell'ampiezza delle luci e all'apertura delle paratoie, si è articolata in un processo iterativo di prova e successiva verifica delle condizioni di funzionamento con l'ausilio di modelli di moto vario implementati mediante il noto software HEC-RAS 3.1.3, che hanno consentito di simulare il comportamento idraulico del sistema per diverse condizioni geometriche della traversa, per poi quindi tarare e verificare i risultati rispetto al moto rigurgitato nell'intorno della traversa anche in tal caso a mezzo di uno specifico modello matematico implementato al calcolatore (RADGAT) e di cui si discuterà in seguito.

Tale metodologia progettuale ha definito la geometria finale della traversa che consta, quindi, di un'ampiezza complessiva delle luci di passaggio pari a 23 m potendo inoltre innalzare le paratoie sino a 4 m sulla soglia di battuta.

Dal modello di moto vario risulta che la traversa può far defluire in condizioni di efflusso sotto battente rigurgitato con un coefficiente di efflusso di 0,4 e un apertura di 3,2 m una portata massima di 339,75 m<sup>3</sup>/s.

#### 2.2.1.2 La scala di risalita delle speci ittiche.

La scala di rimonta delle speci ittiche è caratterizzata dalla presenza di piccoli bacini successivi, aventi le seguenti caratteristiche:

- Pendenza media inferiore al 9 %
- N.12 bacini di lunghezza 3,15 m e larghezza 1,8 m



- N.13 setti dotati di fessura laterale profonda in grado di permettere il funzionamento del passaggio anche per importanti variazioni del livello del lago
- Dislivello tra due bacini contigui circa 25 cm
- Possibilità di funzionamento anche per livelli del lago particolarmente alti o bassi, grazie alla presenza di due ingressi di monte regolati da paratoie e attivabili ad esclusione in relazione dei livelli idrici di monte.

Il passaggio così dimensionato funziona per il livello di monte di 368,00 m s.l.m. con circa 750 l/s; mentre per il livello di 366,5 (entra in funzione l'ingresso di monte intermedio) la portata transitante è di circa 650 l/s. Per livelli intermedi si hanno portate transitive ridotte che comunque garantiscono la funzionalità del passaggio.

Per le condizioni idrauliche di progetto vengono rispettati i parametri di funzionamento indicati dalla bibliografia di settore, in particolare la potenza specifica dissipata si mantiene intorno ai 150 W/mc.

Inoltre il rilascio del DMV in corrispondenza dello sbocco di valle del passaggio garantisce l'effetto richiamo per la fauna ittica.

### 2.2.1.3 Sistemazione dell'alveo a valle

Lo spostamento della traversa più a monte necessita l'attivazione anche di lavori di sistemazione e riprofilatura del tratto d'alveo compreso tra la nuova traversa e la vecchia opera, ciò al fine di poter garantire una maggiore e più uniforme pendenza nel tratto a valle dello sbarramento e contestualmente migliorare le condizioni di scabrezza idraulica dell'alveo, tali operazioni si rendono necessarie anche per migliorare il deflusso a valle della traversa e quindi limitare gli effetti del rigurgito, inoltre vanno previste nel tratto in esame anche opere di protezione spondale e di fondo che proteggano l'alveo dall'azione erosiva del risalto idraulico che comunque si verifica nel tratto a valle al transito delle portate basse.

La prevista risagomatura trasversale e riprofilatura longitudinale dell'alveo è organizzata nel modo seguente:

- È incisa nell'alveo 24 m a monte della traversa, una savanella larga al fondo inizialmente 3,5 m per poi restringersi a 3 m in corrispondenza della traversa e quindi allargarsi a 5 m a valle. A monte della traversa la savanella assume una pendenza di fondo del 3%, registra quindi uno scivolo di 0,3 m di quota nell'arco di 2 m che porta la quota di fondo da 363,80 a 363,50 m s.l.m., quindi prosegue con pendenza costante dello 0,25% per

raccordarsi quindi con il fondo alveo 400 m a valle della traversa, in tale canale dotato di elementi di naturalizzazione dell'alveo come deflettori e costrittori, passa la portata di DMV;

- a partire dalla sezione del ponte l'alveo viene riprofilato e risagomato al fine di incrementarne l'efficienza idraulica ed eliminare la leggera contropendenza attualmente esistente, ovvero tra il ponte e la traversa si abbassa il fondo alveo a quota 364,50 m s.l.m., subito a valle della traversa è previsto un repentino abbassamento del fondo alveo a mezzo di uno scivolo che in una distanza di 2 m porta la quota di fondo da 364,50 a 363,90 m s.l.m., tale accorgimento si rende necessario per considerazioni principalmente idrauliche infatti consente sia di limitare lo spostamento verso valle del risalto sia di mitigare gli effetti del rigurgito. Dopo lo scivolo il fondo alveo è sagomato e riprofilato in modo da assicurare una pendenza costante dello 0.35% per poi raccordarsi all'alveo naturale 473 m a valle della traversa.

#### 2.2.1.4 Costruzione del modello di moto vario

Nell'implementazione del modello di moto vario ci si è quindi serviti dei dati rilevati sul campo ed in particolare, per ricostruire la geometria del sistema fluviale, sono stati utilizzati i rilievi topografici eseguiti per la definizione delle sezioni d'alveo e le valutazioni sulla copertura vegetale e sul materiale di fondo alveo necessarie per la definizione della scabrezza idraulica.

Le sezioni rilevate sono state quindi integrate con ulteriori sezioni definite già da precedenti studi e che possono considerarsi sostanzialmente invarianti nel tempo poiché sede di manufatti (la vecchia traversa e il ponte stradale).

L'alveo fluviale oggetto dell'analisi si sviluppa per una lunghezza di 2391 m ed è interferito sostanzialmente da tre manufatti trasversali al naturale deflusso idrico, ovvero impostando l'origine delle ascisse curvilinee della linea di centro alveo a valle, troviamo, risalendo verso monte:

- alla progressiva 589 m ponticello di attraversamento non carrabile,
- alla progressiva 1752 m la nuova traversa di sbarramento,
- alla progressiva 1905 m ponte di attraversamento carrabile.

Le condizioni attuali del tratto d'alveo in esame denunciano un'intensa copertura vegetale sulle zone spondali, talvolta con presenza di arbusti vivi anche nell'alveo principale; il materiale di fondo è costituito prevalentemente da massi e ciottoli di pezzatura irregolare che determinano

una consistente turbolenza al moto idrico, ragion per cui si assume come coefficiente medio di scabrezza un valore secondo Manning di 0,033, tale valore si considera invece pari a 0,025 (minore e quindi migliore dal punto di vista idraulico) nel tratto e nelle fasce d'alveo oggetto di risagomatura e riprofilatura.

Definita quindi la geometria del sistema, per l'implementazione del modello mancano unicamente le condizioni idrauliche al contorno necessarie alla risoluzione del modello di moto vario, in particolare tali condizioni si distinguono sostanzialmente in due classi principali:

- condizioni iniziali,
- condizioni ai limiti.

Le condizioni iniziali ( $t=0$ ) definiscono i dati noti iniziali in tutti i nodi di calcolo (ove per nodi di calcolo devono intendersi le sezioni fluviali di rilievo e interpolate) necessari alla risoluzione del modello esplicito di calcolo, in pratica vanno definite le altezze d'acqua iniziali in tutte le sezioni di calcolo, tale procedura viene semplicemente espletata con il software HEC-RAS che risolve inizialmente una simulazione di moto permanente, con un'assegnata distribuzione di portate nel sistema, sulla base della quale si definiscono i tiranti idrici iniziali sezione per sezione. La scelta delle condizioni iniziali da assegnare non è banale ma va opportunamente tarata e deve essere congruente con le condizioni ai limiti al fine di non apportare instabilità al modello.

Le condizioni ai limiti constano sostanzialmente di vincoli di tipo matematico e/o geometrico che vanno assegnati necessariamente ai nodi esterni della rete (sezioni di valle e di monte) o anche a nodi notevoli interni alla rete; le condizioni al contorno sono quindi delle relazioni funzionali che determinano per tutti gli istanti temporali dell'intervallo di simulazione un andamento delle variabili di calcolo (quali portata e tirante idrico).

Nel caso in studio le condizioni ai limiti vanno assegnate a tre sezioni notevoli:

- la sezione di imbocco del Lago d'Idro a cui si assegna l'idrogramma di piena in ingresso definito come una funzione  $Q = Q(t)$ ,
- la sezione finale del tratto d'alveo in studio in cui si impone che ivi il deflusso idrico avvenga in condizioni di moto uniforme e quindi una legge del tipo  $h = h_0(Q(t))$ , non sono evidentemente note a priori le modalità di deflusso nel tempo nella sezione finali ed infatti tale condizione rappresenta una forzatura al modello di calcolo ma si può ritenere che l'influenza sull'affidabilità dei risultati, introdotta da questa assunzione, sia minima poiché sostanzialmente l'errore di valutazione dei tiranti idrici introdotto può ritenersi

contenuto ad un tratto tale da non interferire con la traversa, che è sufficientemente distante dai nodi esterni, e quindi non comporta errori nell'analisi del moto rigurgitato,

- la sezione della traversa, che è interna alla rete di calcolo e introduce un vincolo al funzionamento del sistema legato alla modalità di apertura delle paratoie, ovvero in tale sezione si definisce una legge di apertura che determina una relazione funzionale del tipo  $Q = Q(a(t))$ ; si assegna alla traversa un'apertura costante nel tempo e pari a 3,2 m.

La definizione delle condizioni iniziali è quindi determinata fondamentalmente dai seguenti dati: il valore della portata iniziale dell'idrogramma che va assegnato alla sezione iniziale di ingresso al Lago, la quota iniziale di partenza del Lago d'Idro, che si considera essere quella di massima regolazione (368,0 m s.l.m.), e l'apertura iniziale delle paratoie (3,2 m) che determinano l'iniziale portata defluente nel tratto d'alveo del Chiese.

L'ultima operazione prima di passare alla risoluzione del modello è la determinazione dei passi spaziale e temporale secondo i quali procedere al calcolo, anche in tal caso la scelta deve rispondere a due esigenze contrapposte: i punti e gli istanti di calcolo devono essere sufficientemente fitti per non perdere in accuratezza nei risultati e non eccessivamente ravvicinati per non andare in condizioni di instabilità per il modello esplicito di calcolo come stabilito dalla relazione:

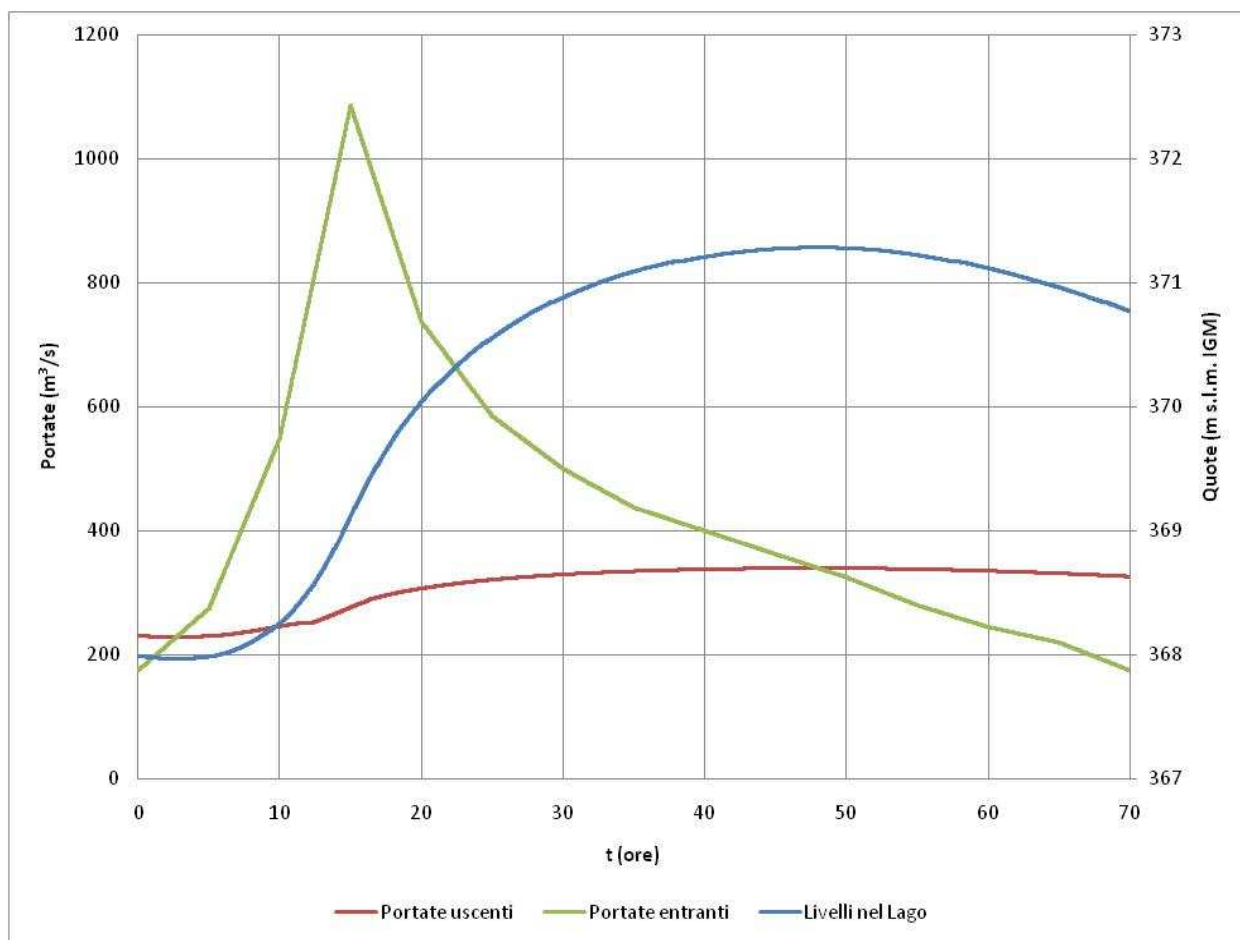
$$C_y = V_w * \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1.0 = \text{numero di Courant};$$

ove:

- $V_w$ = celerità della corrente (generalmente superiore alla velocità della corrente),
- $\Delta t$ = passo temporale,
- $\Delta x$ = passo spaziale.

#### 2.2.1.5 Analisi dei risultati

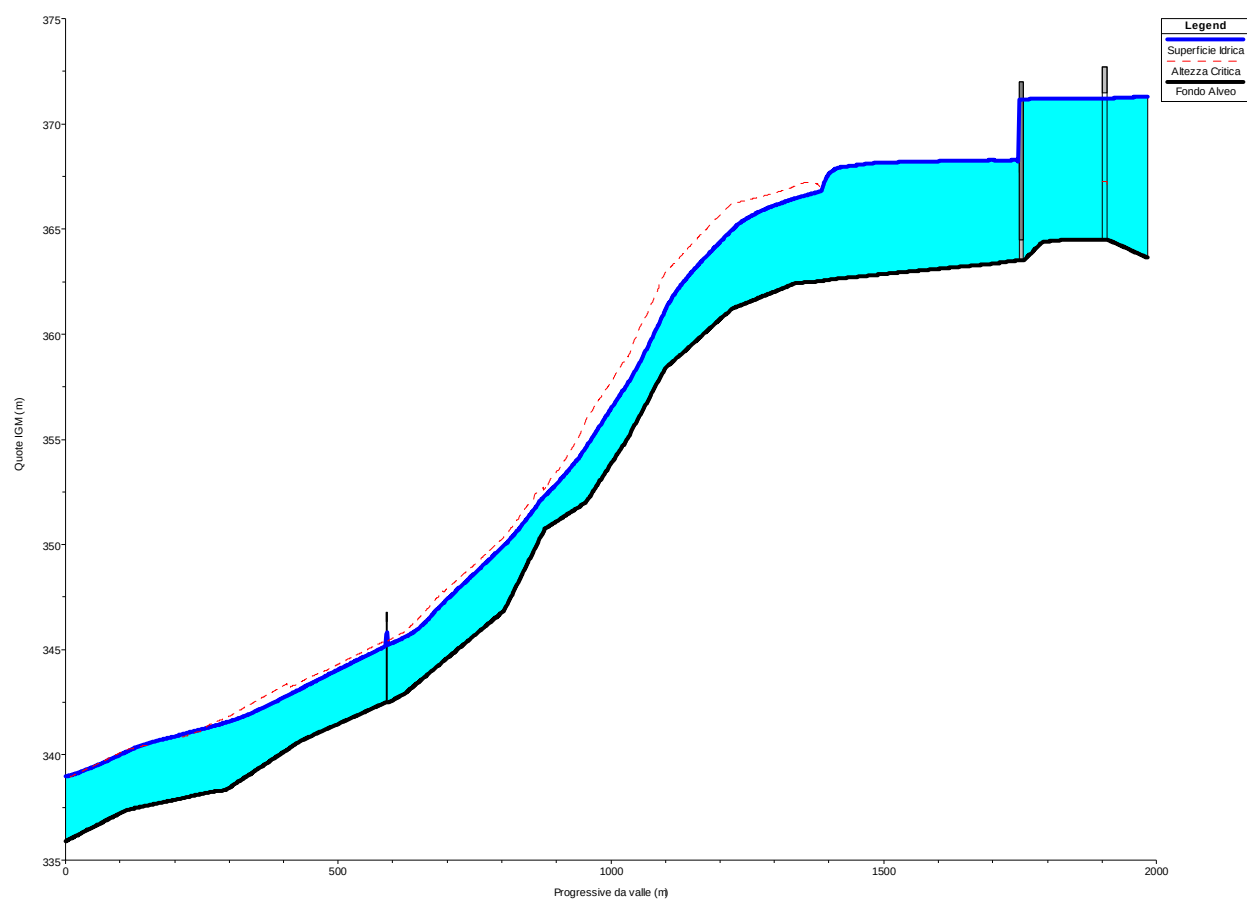
Sono state eseguite diverse simulazioni per diversi tempi di ritorno (T1000, T500, T200) al fine di valutare la capacità di smaltimento delle portate di piena e quindi l'efficacia idraulica della nuova traversa ai fini della mitigazione del rischio idraulico legato al sopralzo del Lago d'Idro, di seguito sono riportati i grafici e le tabelle con i risultati ottenuti.



**Fig. 2.4: Idrogrammi in ingresso e in uscita e conseguenti livelli idrici nel Lago d'Idro (Tr= 1000 anni).**



**Fig. 2.5: Lago a quota massima 371,29 m s.l.m. per evento di piena Tr= 1000 anni.**



**Fig. 2.6: Profilo idrico corrispondente al transito della massima portata nell'alveo del Chiese ( $Tr= 1000$  anni).**

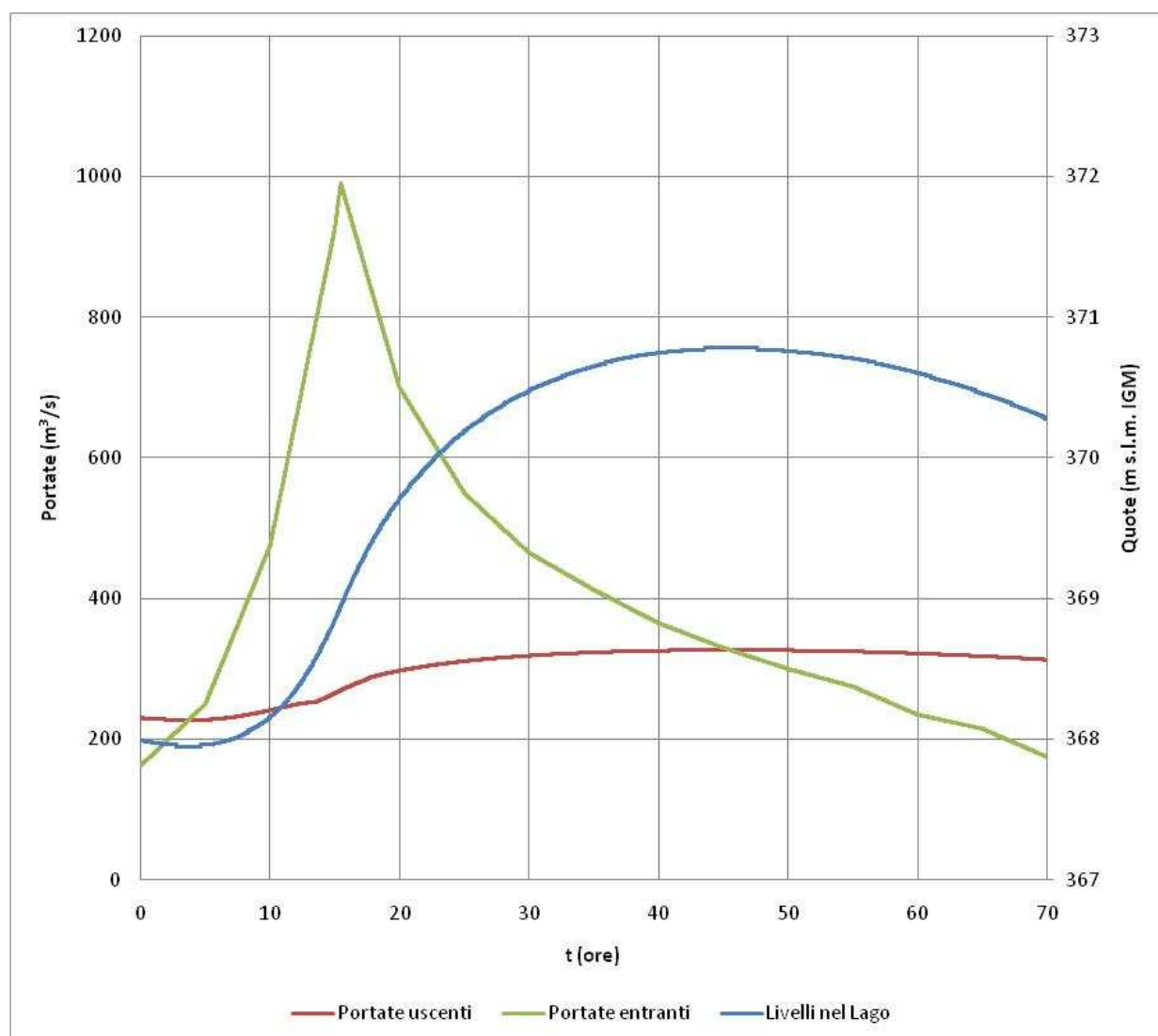
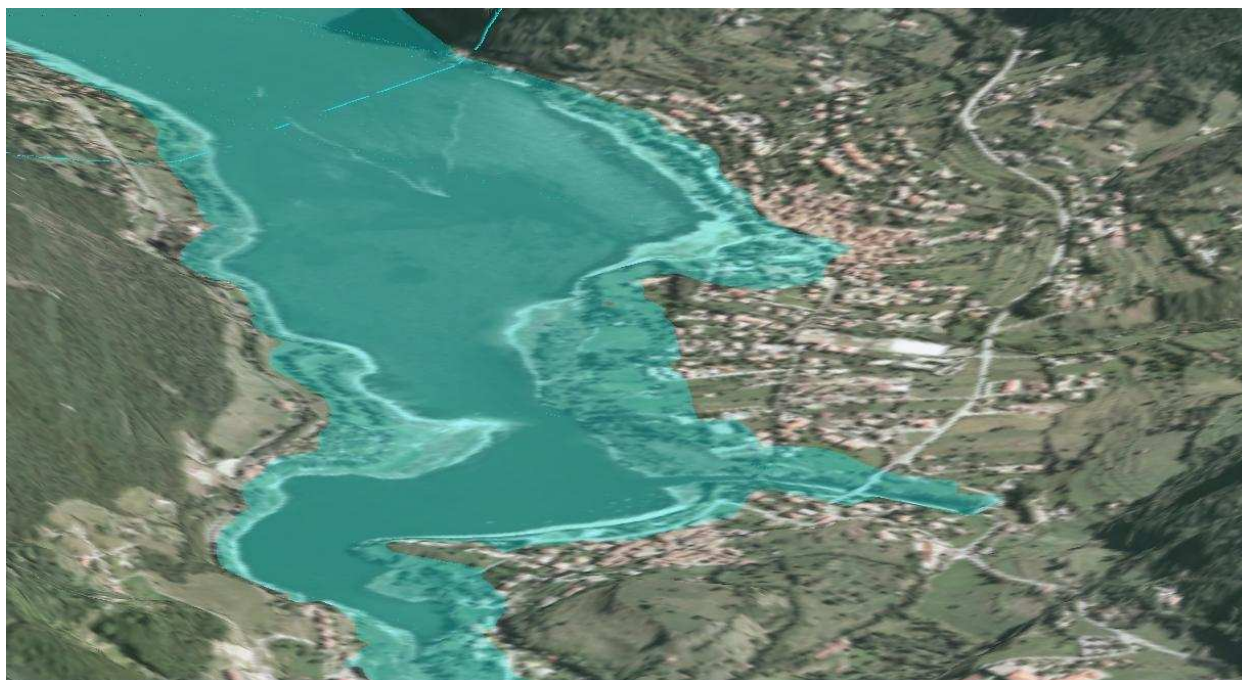
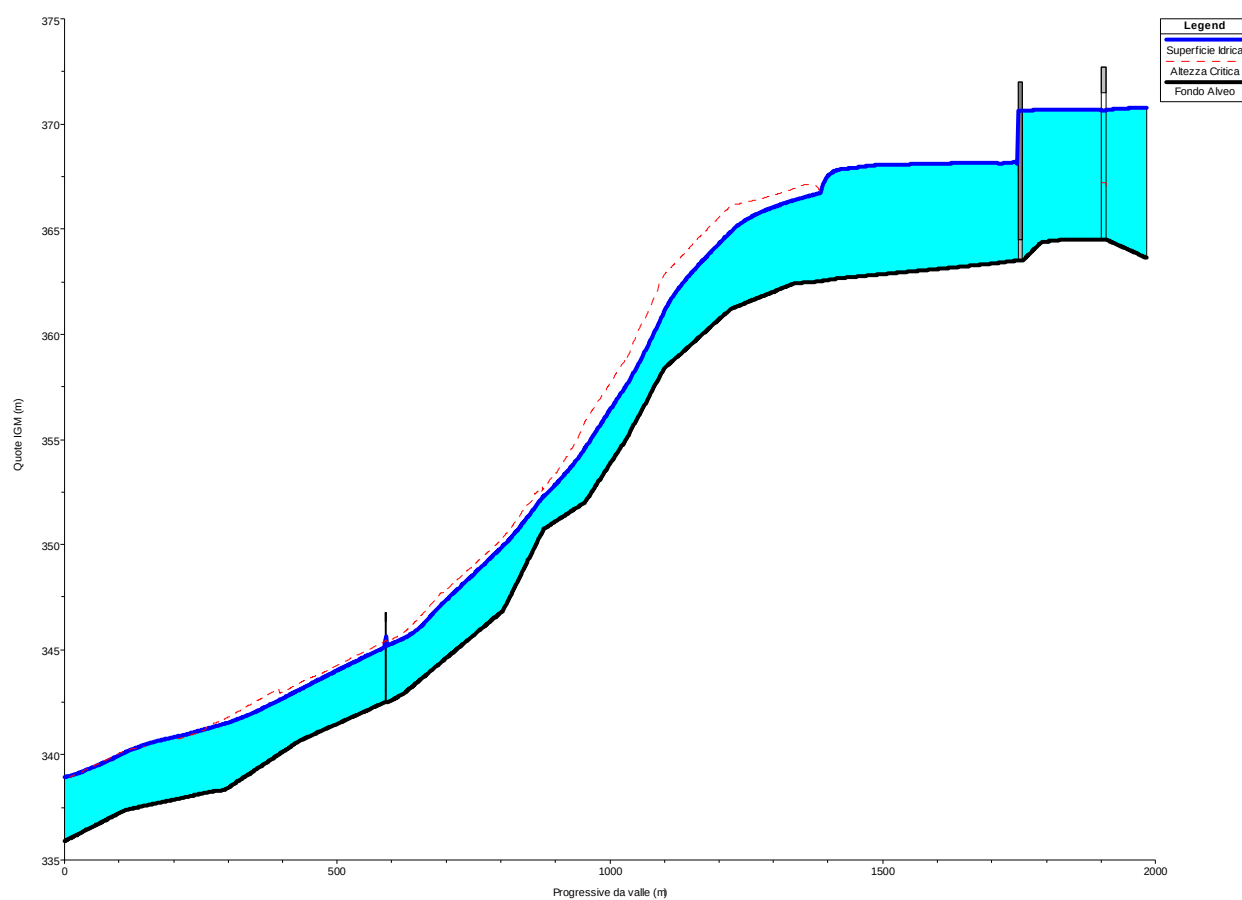


Fig. 2.7: Idrogrammi in ingresso e in uscita e conseguenti livelli idrici nel Lago d'Idro (Tr= 500 anni).





**Fig. 2.8: Lago a quota massima 370,78 m s.l.m. IGM per evento di piena  $Tr= 500$  anni.**



**Fig. 2.9: Profilo idrico corrispondente al transito della massima portata nell'alveo del Chiese ( $Tr= 500$  anni).**



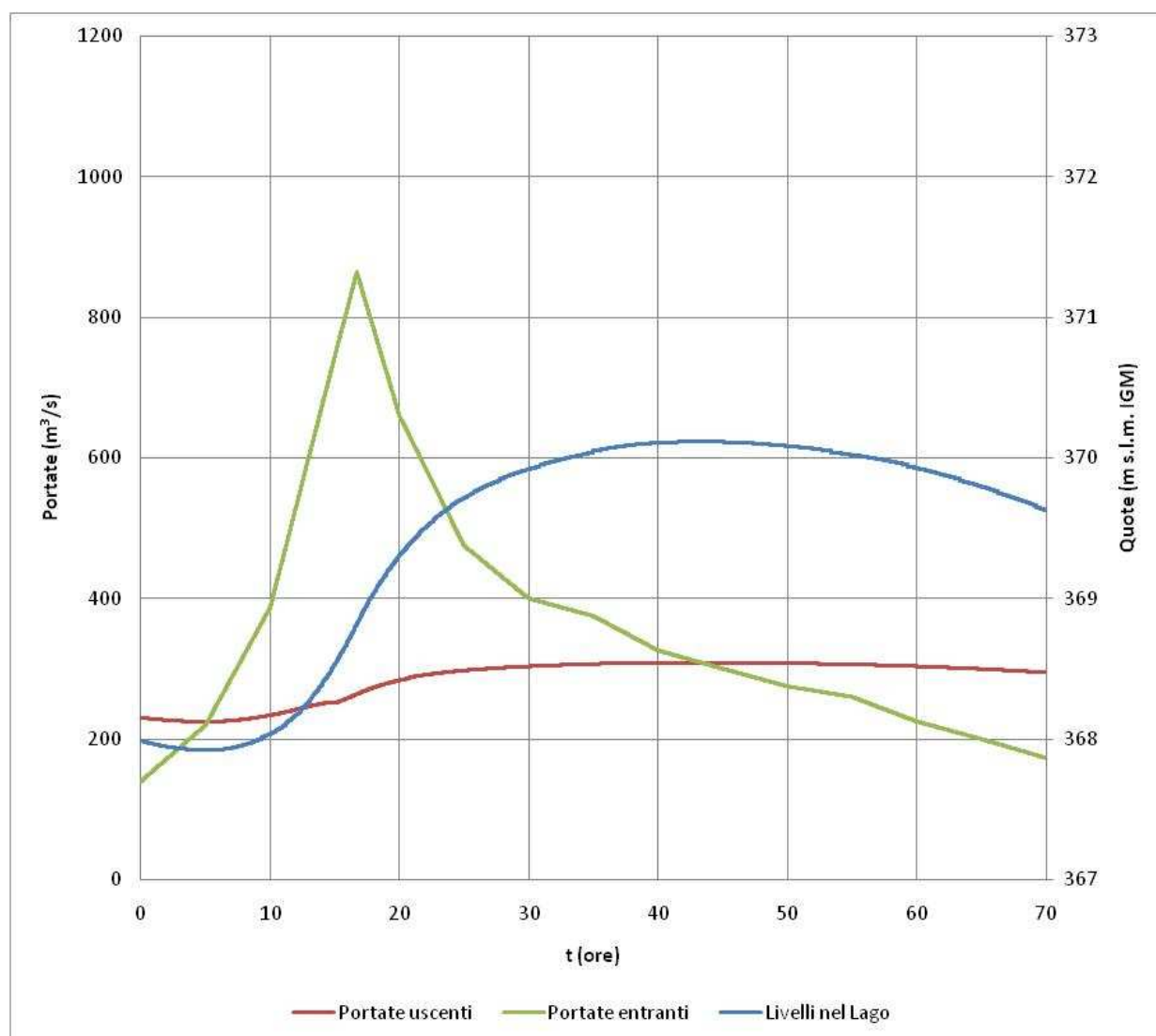
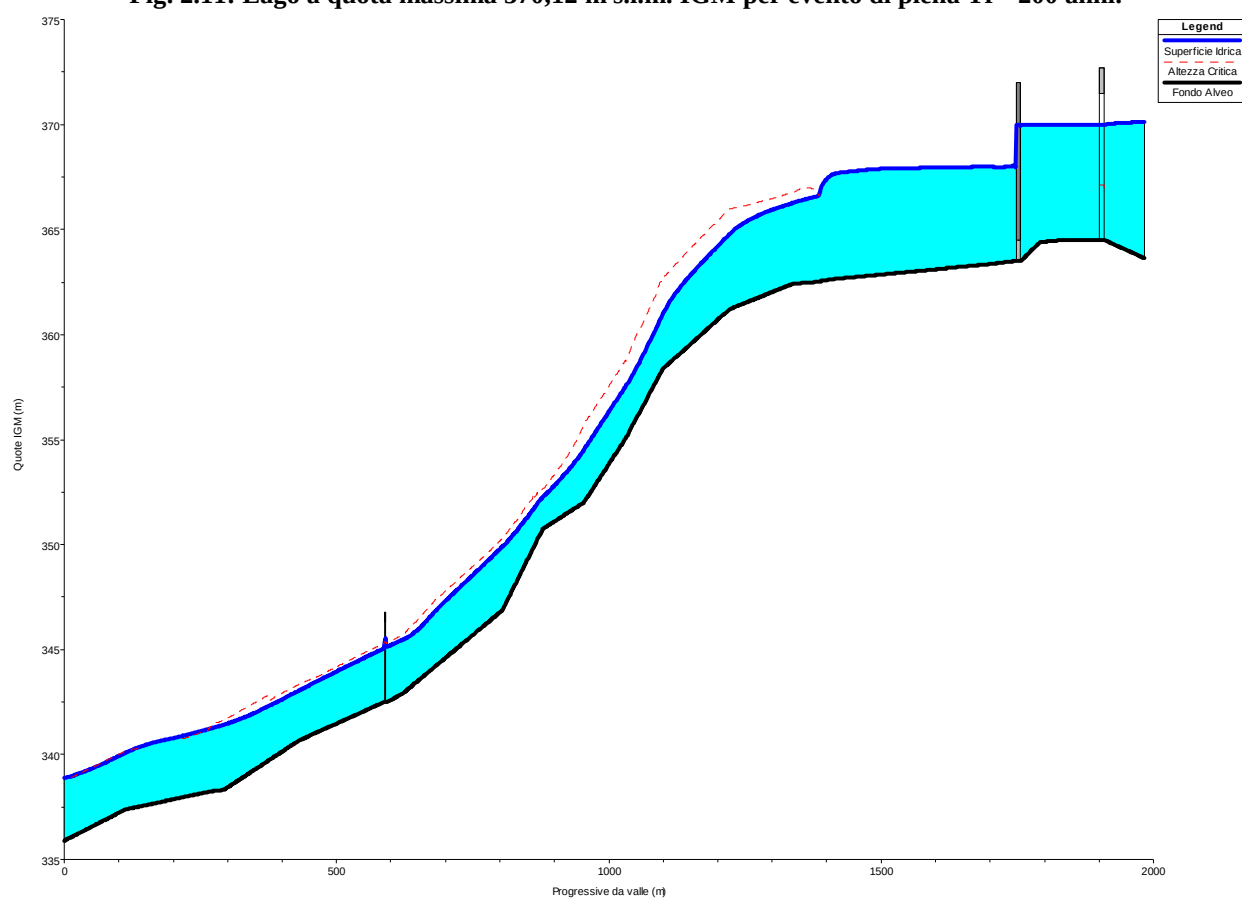


Fig. 2.10: Idrogrammi in ingresso e in uscita e conseguenti livelli idrici nel Lago d'Idro ( $Tr=200$  anni).



**Fig. 2.11: Lago a quota massima 370,12 m s.l.m. IGM per evento di piena  $Tr=200$  anni.**



**Fig. 2.12: Profilo idrico corrispondente al transito della massima portata nell'alveo del Chiese ( $Tr=200$  anni).**

| $T_r$<br>(anni)                                                                                                                                                   | $Q_{max,e}$<br>(m <sup>3</sup> /s) | $Q_{max,u}$<br>(m <sup>3</sup> /s) | $H_{max}$<br>(m s.l.m. IGM) | Aree<br>allagate*<br>(km <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|
| 200                                                                                                                                                               | 864                                | 308,80                             | 370,12                      | 1,38                                    |
| 500                                                                                                                                                               | 990                                | 326,71                             | 370,78                      | 1,72                                    |
| 1000                                                                                                                                                              | 1086                               | 339,75                             | 371,29                      | 1,99                                    |
| *= le aree allagate sono calcolate come differenza tra la superficie del lago alla quota di massima piena e la superficie del lago alla quota 364,70 m s.l.m. IGM |                                    |                                    |                             |                                         |

**Tabella 2.1: Risultati riassuntivi delle simulazioni.**

#### 2.2.1.6 La traversa e il moto rigurgitato

Nei passi seguenti si tratta con maggior dettaglio del moto rigurgitato attraverso la paratoia definendo le basi teoriche a supporto della procedura progettuale utilizzata per la definizione dell'opera.

L'equazione generale che regola l'efflusso liquido sotto battente attraverso un qualsiasi orifizio è la seguente:

$$Q = CD * G0 * GW * \sqrt{2 * g * HU};$$

ove:

- $CD$ = coefficiente di efflusso,
- $G0$ = apertura della paratoia,
- $GW$ = larghezza della luce libera,
- $HU$ = termine di carico idraulico = tirante idrico di monte.

In tale equazione quindi il coefficiente  $CD$  determina le condizioni di funzionamento idraulico del generico sistema, evidentemente il coefficiente d'efflusso per sua natura dipende da molteplici fattori (sia geometrici che idraulici) con un intervallo di variabilità e una sensibilità dei diversi rapporti funzionali in relazione alle condizioni del moto che si verificano; in particolare proprio condizioni di moto rigurgitato si caratterizzano per un'ampia variabilità del coefficiente d'efflusso rispetto a variazioni anche piccole degli altri fattori coinvolti.

Nel caso dell'efflusso rigurgitato da paratoie radiali si registra anche una maggiore complessità geometrica del sistema rispetto al caso di efflusso da paratoie piane poiché la vena liquida non subisce un brusco distacco dal lembo inferiore della paratoia per effetto della curvatura, ovvero il

moto d'efflusso si discosta tanto più dal caso di paratoie piane al diminuire dell'apertura e del raggio di curvatura, in definitiva nel caso delle paratoie radiali il coefficiente d'efflusso varia in dipendenza dei tiranti idrici di monte e di valle, dell'apertura ma anche dal raggio di curvatura e dall'altezza della cerniera di rotazione.

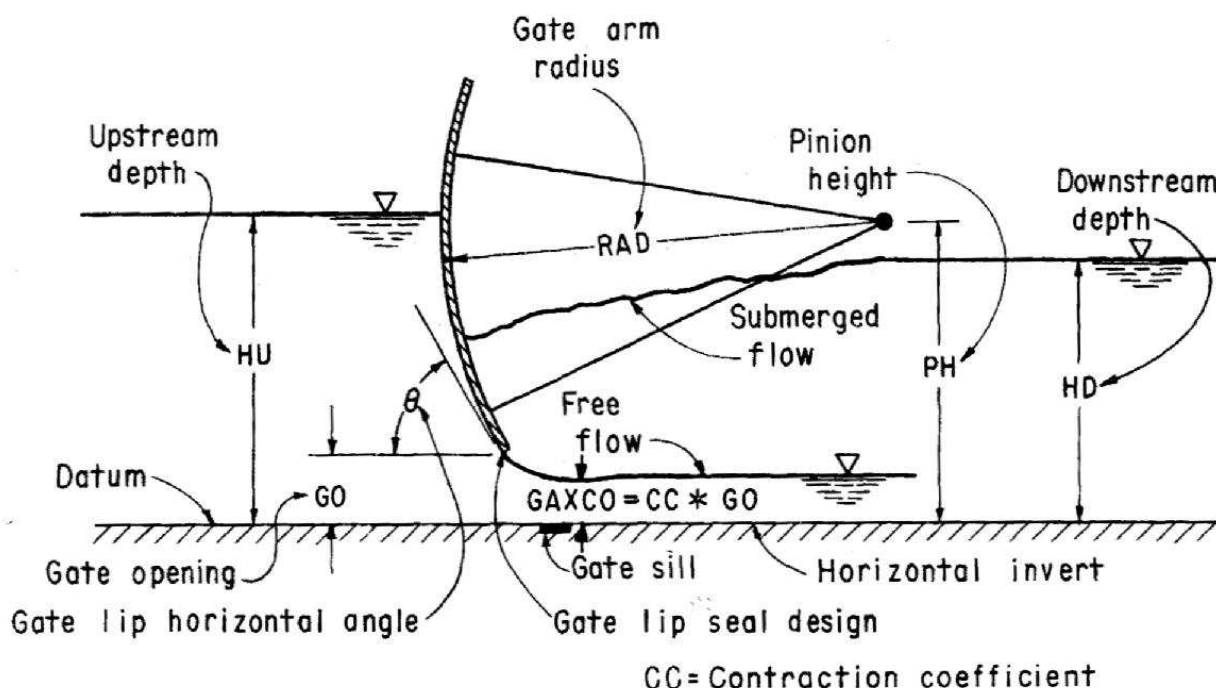


Fig. 2.13: Schema del moto rigurgitato e indicazione delle variabili coinvolte.

Nel caso specifico della traversa in progetto per l'analisi delle condizioni di moto che si verificano e quindi la conseguente taratura del coefficiente di efflusso da adottare ci si baserà sulla dettagliata trattazione eseguita dall'Ing. C.P. Buyalski che ha consentito la definizione di uno specifico algoritmo di calcolo (su cui si basa il software RADGAT) per la risoluzione delle condizioni di moto attraverso le paratoie radiali anche in caso di efflusso rigurgitato, in effetti l'algoritmo fondamentale si basa sulla risoluzione delle equazioni di bilancio energetico tra le sezioni di monte e valle della paratoia.

L'applicazione del programma RADGAT al caso in studio è finalizzata alla determinazione dell'effettiva capacità idraulica della traversa e quindi determinazione delle diverse condizioni di funzionamento per le quali la traversa è in grado di smaltire le massime portate di progetto, a tale scopo sono state valutate diverse condizioni di dislivello idrico tra monte (HU) e valle (HD) traversa per l'apertura paratoie di 3,20 m. I risultati ottenuti sono quindi diagrammati nelle Carte di Metzlers specifiche per la paratoia in esame e per l'apertura prescelta ove sono riassunte le possibili condizioni di funzionamento.

L'andamento della serie di dati ottenuta conduce alla conclusione che, sebbene le condizioni di funzionamento nell'ambito del campo di utilizzo della traversa in progetto siano molto variabili, si può comunque assumere un coefficiente di efflusso medio pari a **0,4** costante per tutta la simulazione così da meglio simulare i momenti di efflusso delle portate maggiori nelle condizioni di apertura pari a 3,2 m e che del resto sono le situazioni più critiche.

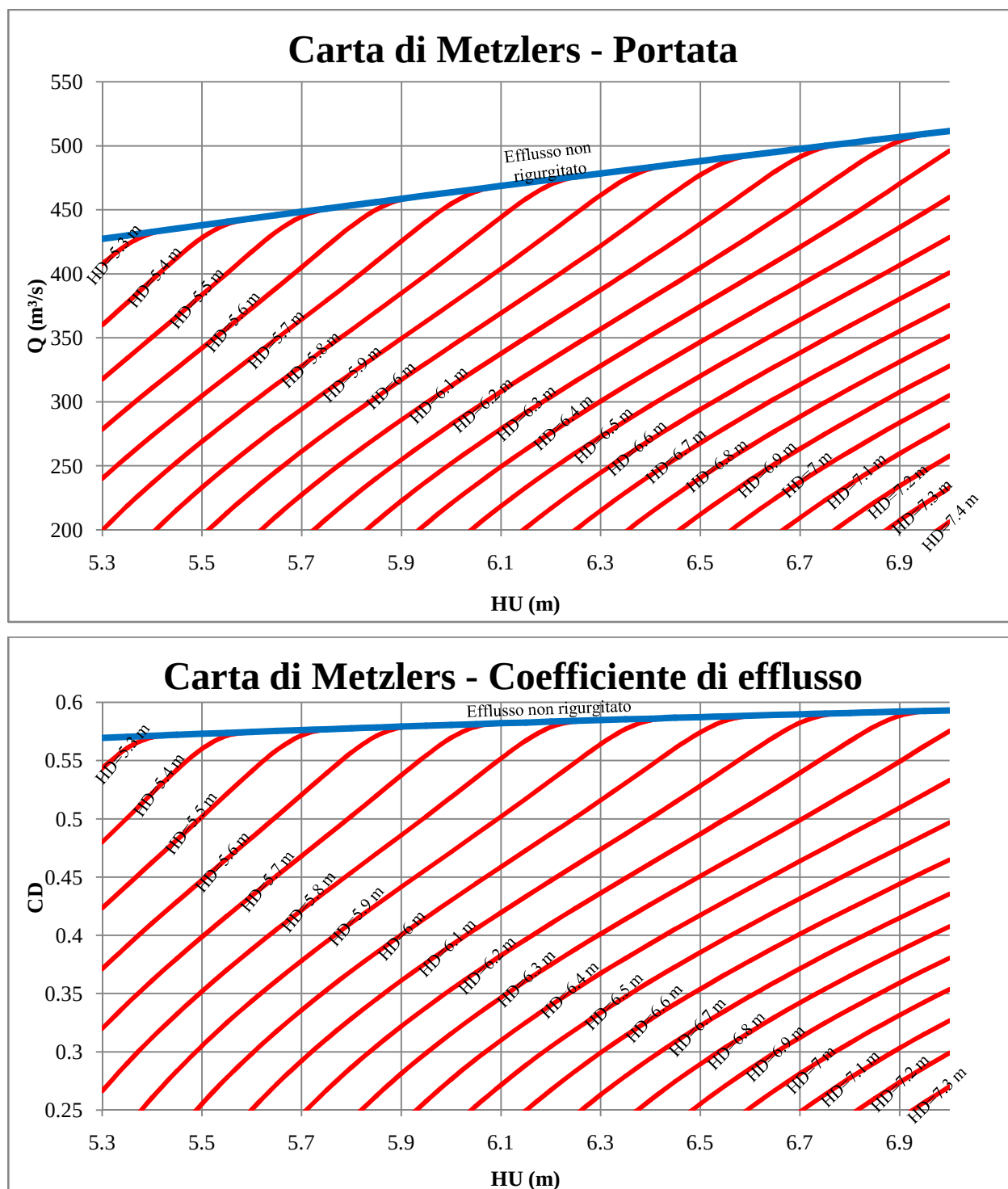


Fig. 2.14 a-b: Carte di Metzlers per le paratoie radiali in progetto.

### **2.2.2 La Galleria di by-pass**

La verifica idraulica della galleria di by-pass è finalizzata a definire la condizione di funzionamento dell'opera, con riferimento ad eventi di piena eccezionali, e conseguentemente l'effetto indotto sul lago, con particolare attenzione ai livelli.

Dal punto di vista idraulico, la galleria può essere assimilata ad uno scarico di fondo, essendo il suo funzionamento sottobattente per le escursioni dei livelli lago stabiliti nella relativa gestione e regolazione delle acque.

Per la galleria è previsto, un primo tratto di imbocco con funzionamento in pressione, per uno sviluppo di circa 42 m, seguito da una camera paratoie e da un successivo troncone di galleria con funzionamento a pelo libero; quest'ultimo tratto si estende per una lunghezza di 1,2 km sino allo sbocco nell'opera di dissipazione e suo successivo canale di restituzione in alveo del fiume Chiese.

Il funzionamento a pelo libero della galleria è auspicabile per poter garantire l'ispezionabilità della stessa in caso di manutenzione ed ottimizzarne i costi di rivestimento.

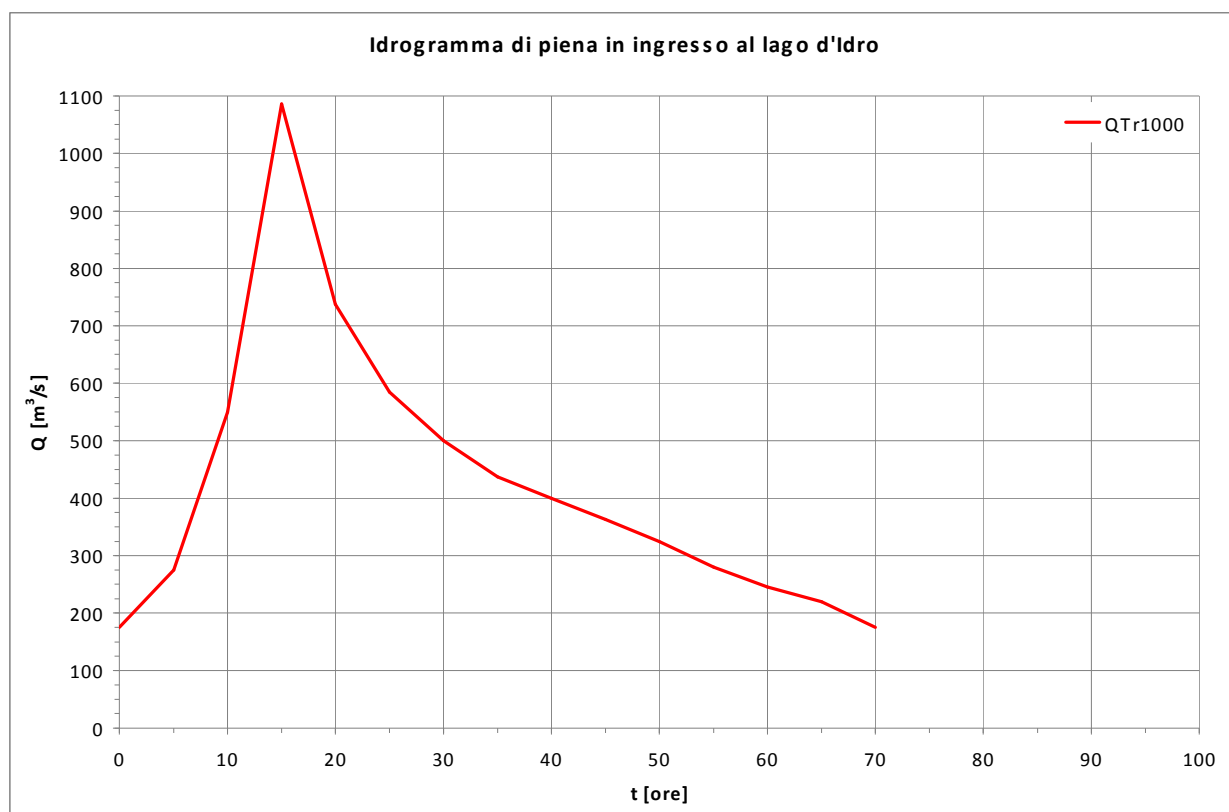
Nella camera paratoie sono disposte in serie due file da 2 paratoie piane a scorrimento di dimensioni 4.5x4.5 m, di cui le prime hanno funzione di intercettazione mentre le seconde vengono impiegate per l'esercizio.

L'evento di piena di "progetto" assunto come riferimento per le verifiche idrauliche è quello con tempo di ritorno di 1000 anni (Figura 2.15).

Lo scenario indagato si riferisce a condizioni di emergenza aggravate dalla presenza di una frana in sinistra idrografica del Chiese, si è quindi ipotizzata la concomitanza di un evento franoso e di una piena con frequenza di accadimento millenaria.

Questa situazione porterebbe all'ostruzione dell'alveo del fiume Chiese e di conseguenza all'impossibilità di smaltire parte della portata di piena dalla traversa. La piena affluente al lago, considerando anche la galleria di derivazione dell'ENEL fuori servizio, deve poter essere gestita dall'entrata in funzione della sola galleria di by-pass.

A tal fine, la galleria è stata progettata per poter evacuare una portata massima dell'ordine di 300 m<sup>3</sup>/s similmente a quella massima che transita dalla traversa per il medesimo evento considerato.



**Fig. 2.15: Idrogramma di piena millenaria in ingresso al lago d'Idro.**

#### 2.2.2.1 Modello di calcolo

La verifica idraulica della galleria è stata effettuata con il software HEC-RAS 3.1.3. in regime di moto vario.

##### *Parametri geometrici*

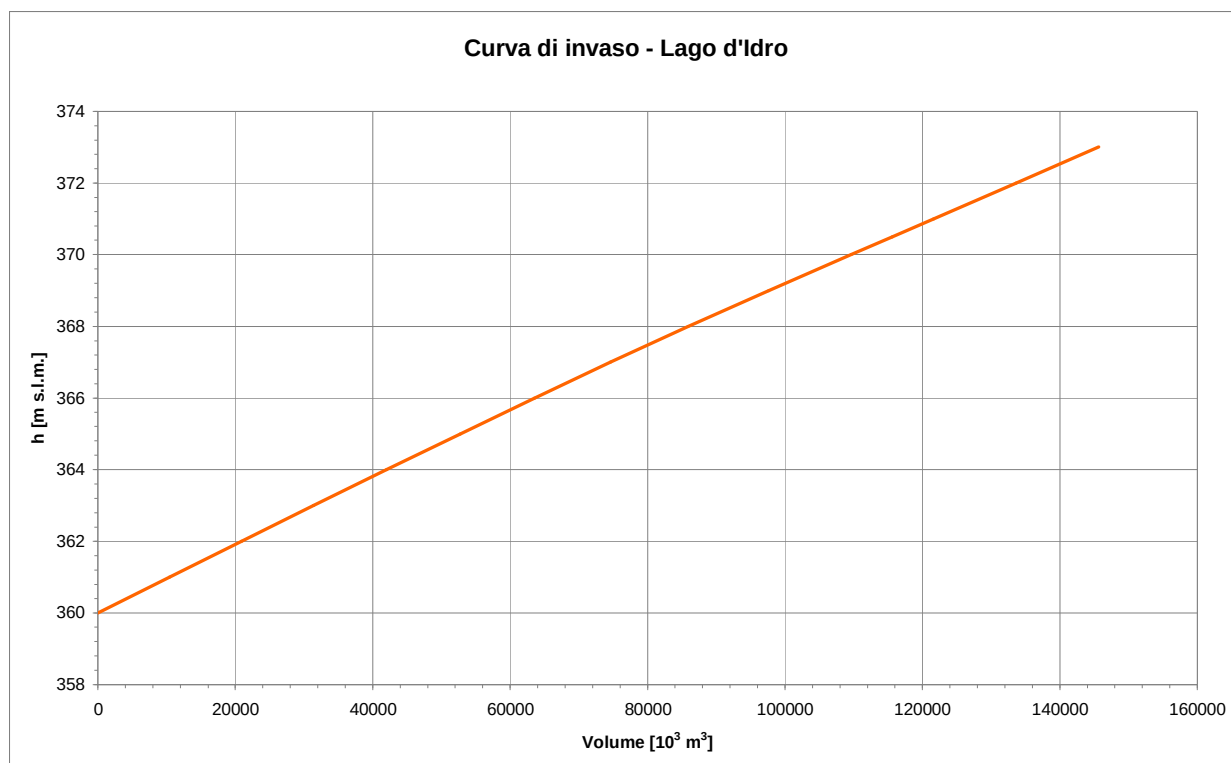
La Figura 2.17 presenta lo schema planimetrico di calcolo in cui è indicato il tracciato della galleria sino alla sua immissione in vasca di dissipazione; per i dettagli geometrici del tracciato e delle sezioni trasversali si rimanda alle Tavole allegate.

La scabrezza delle varie sezioni di galleria è stata posta pari  $70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ , valore proprio dei conglomerati bituminosi.

##### *Condizioni al contorno e iniziali*

- Quale condizione iniziale si è imposto un livello lago pari alla quota di massima regolazione (368 m s.l.m.);
- Quale condizione di monte è stato imposto un idrogramma in ingresso al lago riferito alla piena millenaria (Figura 2.10);

- Quale condizione di valle si è ipotizzata, nell'ultima sezione di calcolo, l'altezza di moto uniforme;
- Il lago d'Idro è rappresentato nel modello di calcolo dalla relazione che lega i suoi livelli ai volumi di invaso (Figura 2.16), in modo tale da tener conto della sua capacità di laminazione.



**Fig. 2.16: Curva di invaso del Lago d'Idro.**



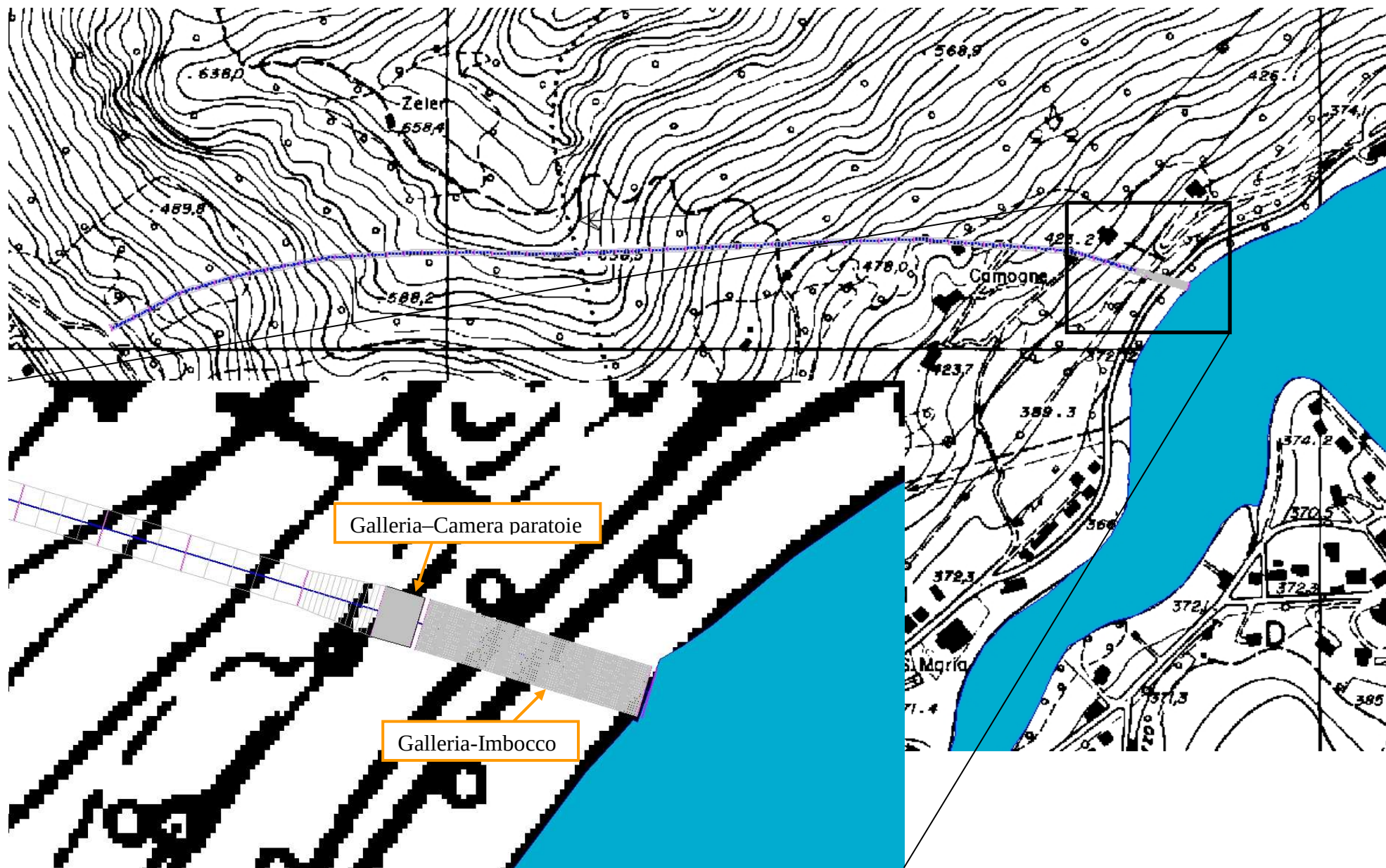


Fig. 2.17: Schema planimetrico del modello di calcolo della galleria (con particolare della zona di imbocco).

### 2.2.2.2 Coefficiente d'efflusso per le paratoie piane

La portata defluente dalle paratoie è definibile con l'equazione seguente:

$$Q = C_q \cdot a \cdot B \cdot \sqrt{2gh_0}$$

dove:

$C_q$  = coefficiente di efflusso;

$a$  = apertura della paratoia;

$B$  = larghezza paratoia;

$h_0$  = carico idraulico a monte della paratoia.

Il coefficiente di efflusso dipende sia dal grado di apertura delle paratoia sia dal carico idraulico che si instaura a monte del manufatto (Fig. ).

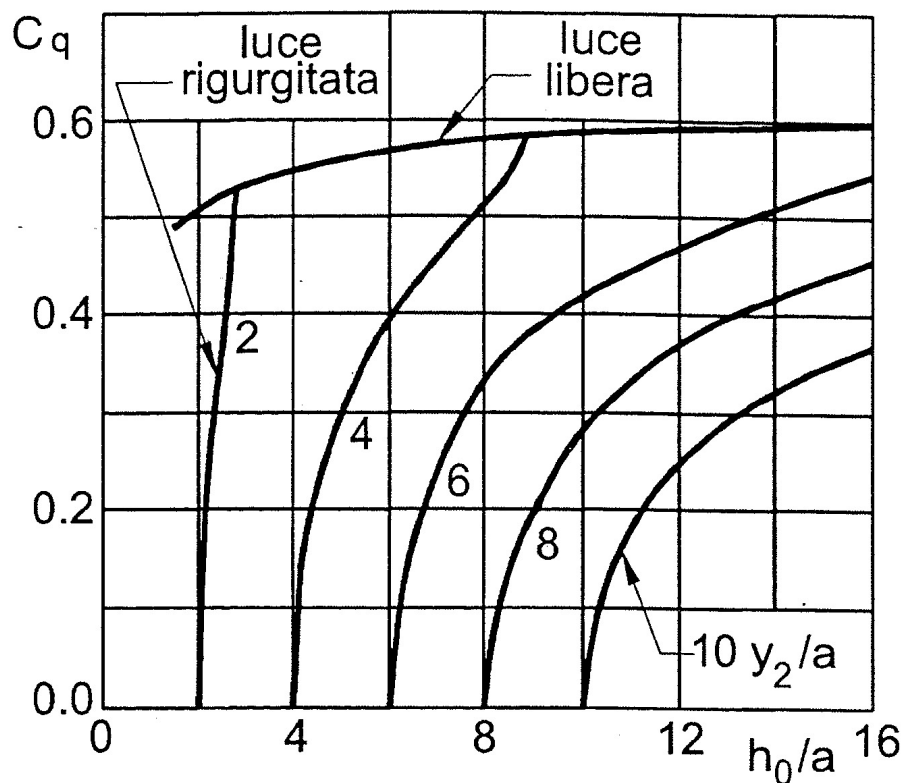
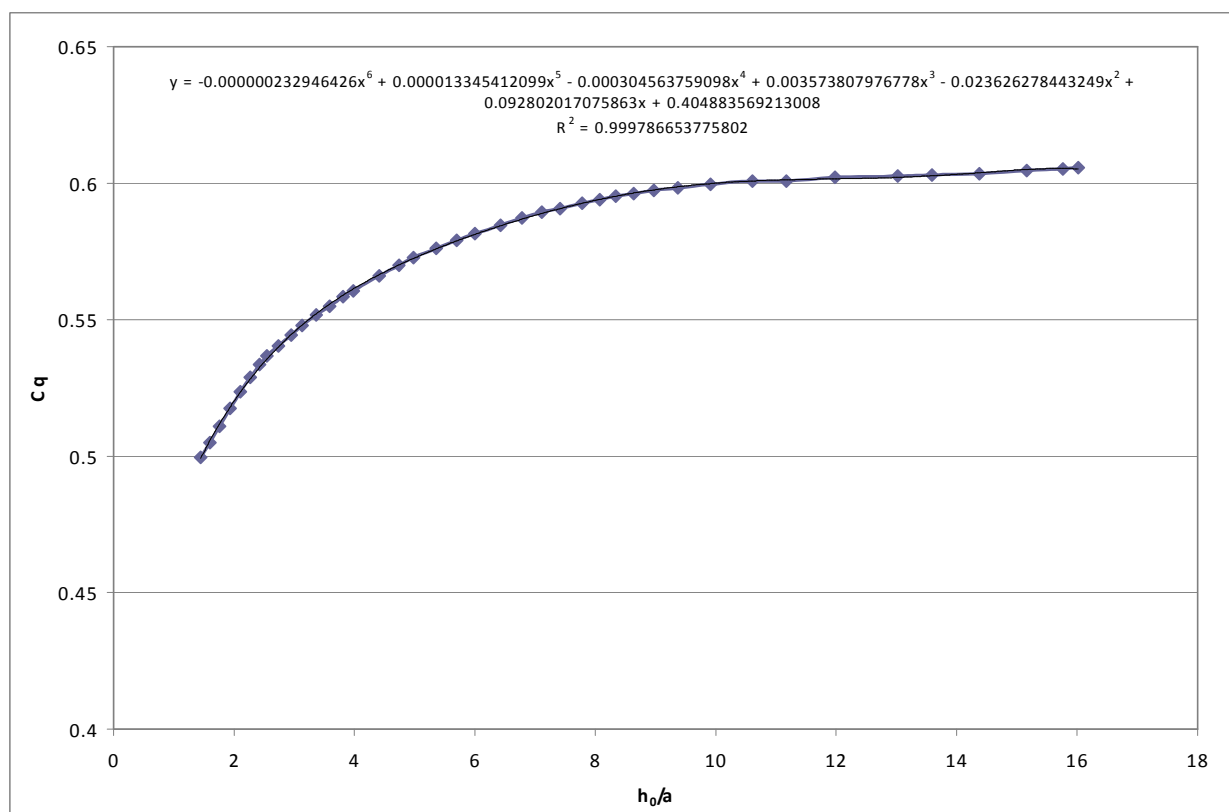


Fig. 2.18

Delle curve di Fig. 2.18 si è considerato quella valida per il funzionamento a efflusso libero sotto la paratoia; per il campo di funzionamento delle paratoie, sia in termini di grado di apertura sia in termini di livelli che si instaurano a monte, si è adottato un valore medio di  $C_q$  pari a 0,51.



**Fig. 2.19: Coefficienti di efflusso per paratoie piane: efflusso libero.**

### 2.2.2.3 Dimensionamento del canale aeroforo

Si è dimensionato il canale aeroforo, posizionato in corrispondenza della sezione di uscita dalla camera paratoie, considerando la formula sperimentale:

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

dove:

$\beta$  = rapporto tra la portata d'aria e quella dell'acqua in funzione del numero di Froude  $Fr$  di quest'ultima. Il numero di Froude, calcolato in corrispondenza della sezione contratta a valle dello sbocco dalle paratoie, è pari a 2,4.

Conseguentemente il valore di  $\beta$  è 0,0427, mentre la portata d'aria richiesta è  $Q_{aria} = \beta Q_{acqua} = 12,8 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Il diametro della canna aerofora di sezione circolare, ipotizzando una velocità dell'aria di 50 m/s, è pari a:

$$D_{aeroforo} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{aria}}{\pi \cdot V_{aria}}} = 0.6 \text{ m}$$

#### 2.2.2.4 Analisi dei risultati

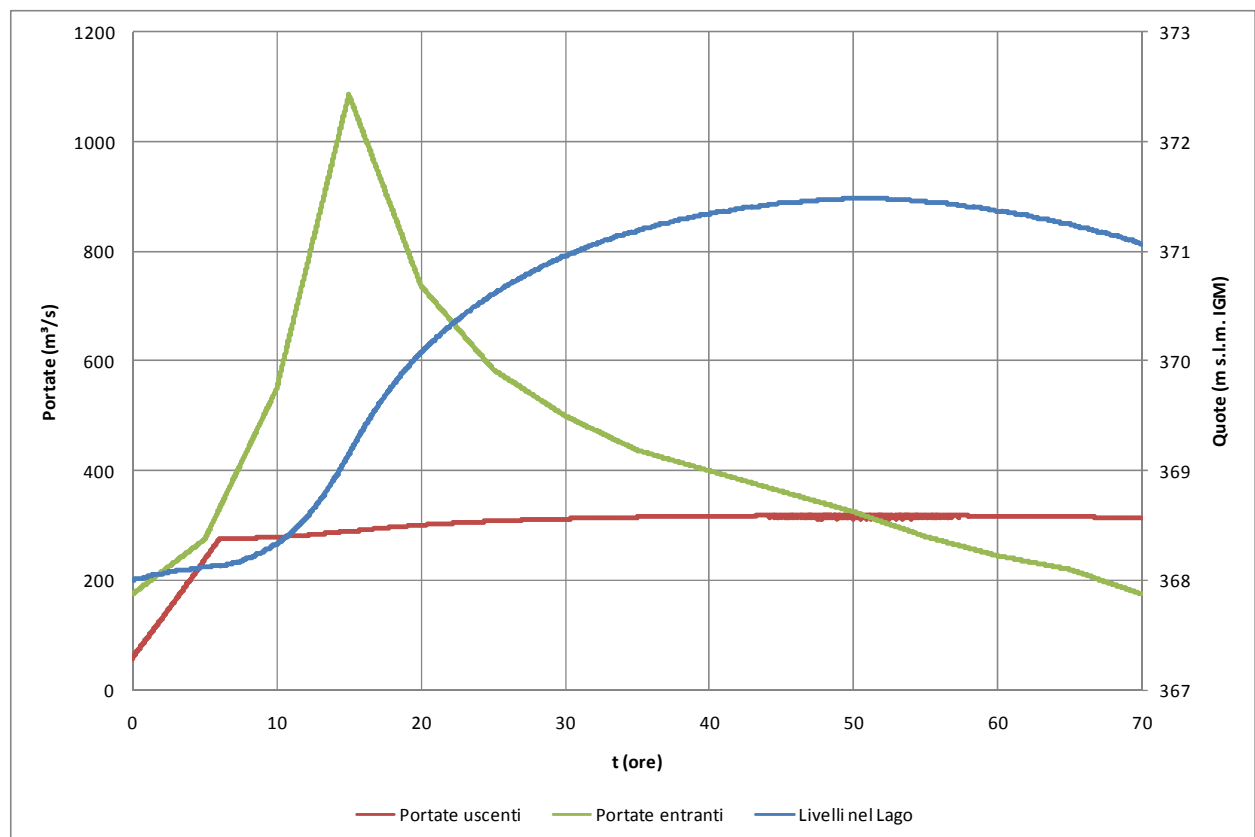
Analizzando i risultati derivanti dalla simulazione, si sono definiti gli effetti della piena millenaria sul sistema lago d'Idro-galleria.

La Fig. 2.20 presenta l'andamento delle portate entranti e uscenti dal lago d'Idro e i conseguenti livelli.

La galleria è in grado di smaltire portate di una certa entità (dell'ordine dei  $100\div 200 \text{ m}^3/\text{s}$ ), già a partire dagli istanti iniziali della fase di crescita della piena.

Il fatto di poter smaltire portate rilevanti, anche per battenti ridotti, permette di contenere il sopralzo del livello lago ad un valore dell'ordine dei 3,5 m.

Il livello massimo del lago raggiunto è pari 371,48 m s.l.m., per una portata massima evacuata dalla galleria dell'ordine di  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Fig. 2.20: Lago d'Idro: Andamento delle portate e dei livelli (piena  $Tr=1000$  anni).**

I dati di funzionamento della galleria sono riportati in modo dettagliato in tabella 2.2 dove, in funzione della progressiva, sono indicati i valori massimi, registrati nel transitorio, per alcune delle principali grandezze idrauliche.

La Figura 2.22 mostra uno schema del profilo longitudinale della galleria con l'involuppo dei livelli massimi raggiungibili durante lo smaltimento delle portate in condizioni di piena.

Nella galleria, all'uscita dalla camera paratoie, si instaura una corrente che si mantiene sempre veloce per tutta il suo sviluppo. Il tirante idraulico massima è dell'ordine dei 5,6 m con un franco rispetto alla sommità della volta di 80 cm.

Per quanto riguarda le velocità, in Fig. 2.21 si riporta l'involuppo dei valori massimi raggiungibili in galleria lungo il suo sviluppo longitudinale.

L'entità delle velocità, dell'ordine dei 9,5 m/s, hanno reso necessario l'inserimento, a valle dello sbocco della galleria, di un'opera di dissipazione prima del recapito in alveo del Chiese (tale opera viene descritta nel §2.2.3).

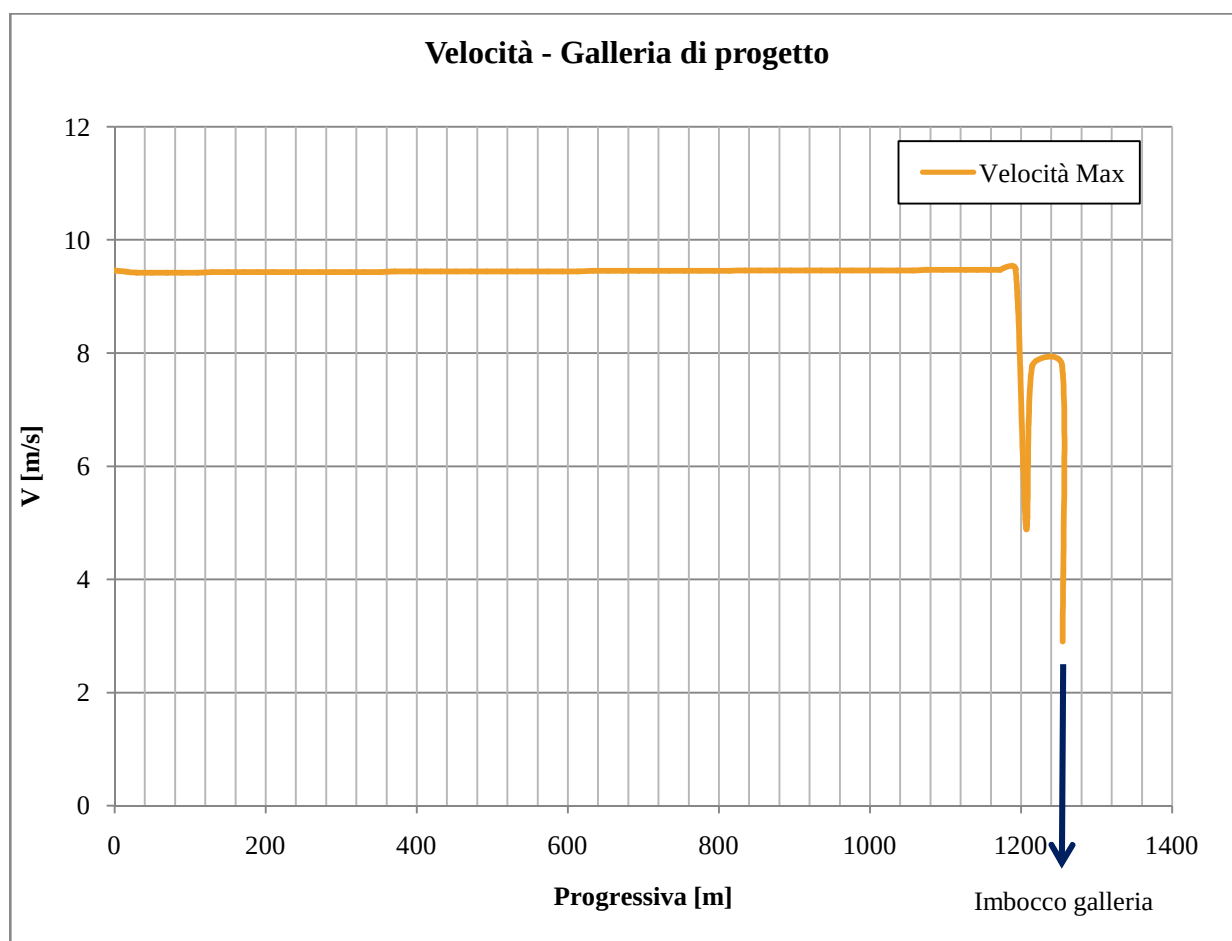
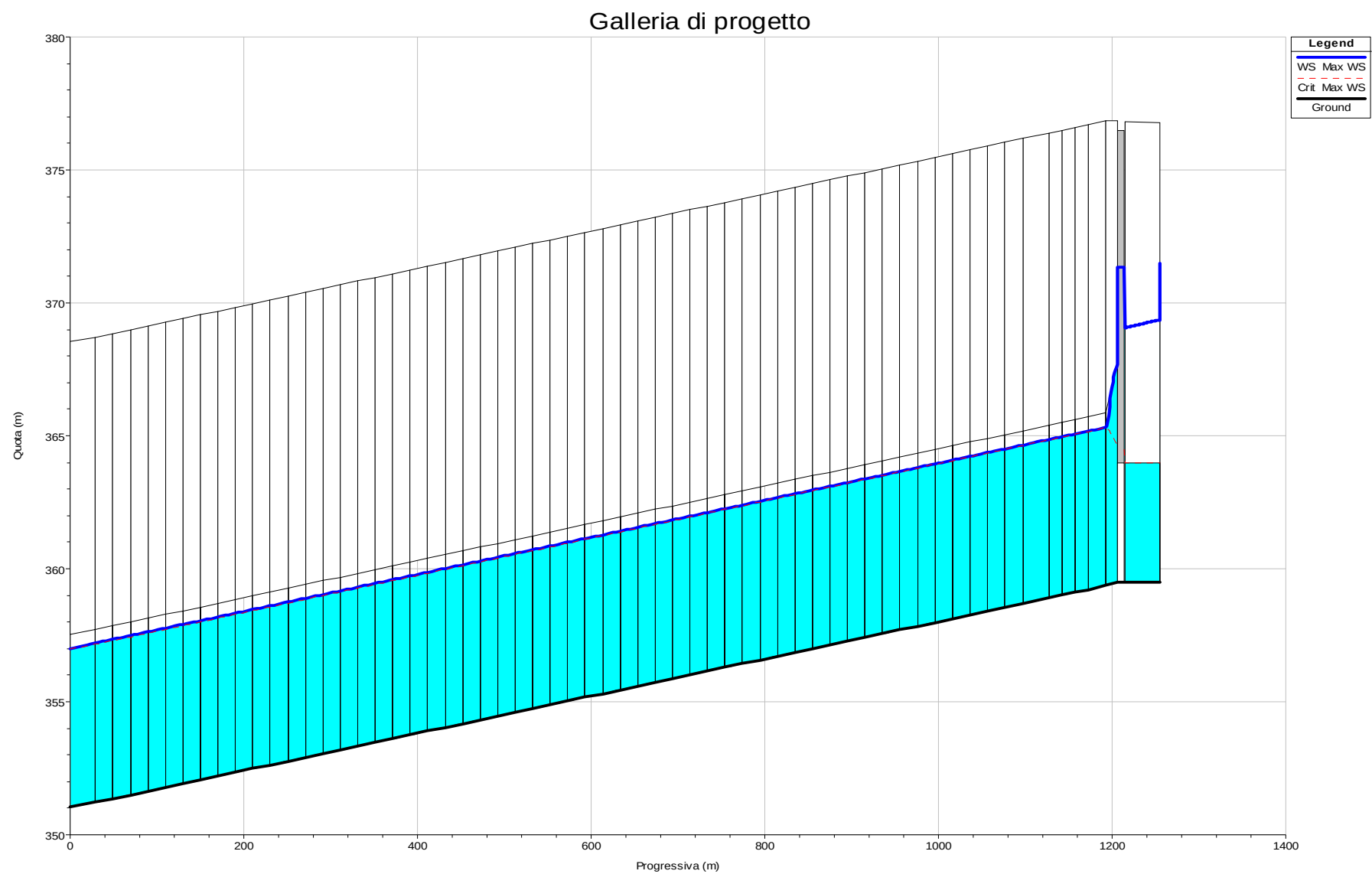


Fig. 2.21: Galleria di progetto: Andamento delle velocità massime.

|                             | Progressiva<br>[m] | Thalweg<br>[m s.l.m.] | Livello idrico<br>[m s.l.m.] | Energia<br>[m s.l.m.] | Velocità<br>[m/s] | Area bagnata<br>[m <sup>2</sup> ] | Larghezza<br>pelo libero<br>[m] | N° Froude |
|-----------------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------|
| <b>Imbocco<br/>galleria</b> | 1254.58            | 359.51                | 369.36                       | 372.45                | 7.78              | 40.41                             | 9                               | 0.79      |
|                             | 1214.78            | 359.51                | 369.07                       | 372.14                | 7.77              | 40.23                             | 9                               | 0.8       |
|                             | 1213.78            | 359.5                 | 371.2                        | 371.66                | 2.99              | 105.34                            | 9                               | 0.28      |
|                             | 1206.78            | 359.5                 | 367.79                       | 369.01                | 4.9               | 63.8                              | 9                               | 0.55      |
|                             | 1193.08            | 359.37                | 365.32                       | 369.9                 | 9.48              | 33.65                             | 3.62                            | 1.29      |
|                             | 1172.03            | 359.22                | 365.18                       | 369.75                | 9.47              | 33.67                             | 3.61                            | 1.28      |
|                             | 1157.08            | 359.12                | 365.07                       | 369.64                | 9.47              | 33.67                             | 3.61                            | 1.28      |
|                             | 1142.02            | 359.01                | 364.97                       | 369.53                | 9.47              | 33.67                             | 3.61                            | 1.28      |
|                             | 1126.96            | 358.91                | 364.86                       | 369.43                | 9.47              | 33.67                             | 3.61                            | 1.28      |
|                             | 1096.95            | 358.7                 | 364.65                       | 369.22                | 9.47              | 33.67                             | 3.61                            | 1.28      |
|                             | 1076.41            | 358.55                | 364.51                       | 369.07                | 9.47              | 33.67                             | 3.61                            | 1.28      |
|                             | 1056.27            | 358.41                | 364.37                       | 368.93                | 9.46              | 33.69                             | 3.6                             | 1.28      |
|                             | 1036.13            | 358.27                | 364.23                       | 368.79                | 9.46              | 33.69                             | 3.6                             | 1.28      |
|                             | 1015.99            | 358.13                | 364.09                       | 368.65                | 9.46              | 33.69                             | 3.59                            | 1.28      |
|                             | 998.85             | 357.98                | 363.95                       | 368.51                | 9.46              | 33.69                             | 3.59                            | 1.28      |
|                             | 975.71             | 357.84                | 363.81                       | 368.36                | 9.46              | 33.69                             | 3.59                            | 1.28      |
|                             | 955.57             | 357.7                 | 363.66                       | 368.22                | 9.46              | 33.69                             | 3.59                            | 1.28      |
|                             | 935.43             | 357.56                | 363.52                       | 368.08                | 9.46              | 33.69                             | 3.59                            | 1.28      |
|                             | 915.29             | 357.42                | 363.38                       | 367.94                | 9.46              | 33.7                              | 3.59                            | 1.28      |
|                             | 895.15             | 357.28                | 363.24                       | 367.8                 | 9.46              | 33.7                              | 3.59                            | 1.28      |
|                             | 875.01             | 357.14                | 363.1                        | 367.66                | 9.46              | 33.7                              | 3.59                            | 1.28      |
|                             | 854.87             | 357                   | 362.96                       | 367.52                | 9.46              | 33.7                              | 3.59                            | 1.28      |
|                             | 834.73             | 356.86                | 362.82                       | 367.38                | 9.46              | 33.7                              | 3.58                            | 1.28      |
|                             | 814.59             | 356.72                | 362.68                       | 367.23                | 9.45              | 33.71                             | 3.58                            | 1.28      |
|                             | 794.45             | 356.57                | 362.54                       | 367.09                | 9.45              | 33.71                             | 3.58                            | 1.28      |
|                             | 774.31             | 356.43                | 362.4                        | 366.95                | 9.45              | 33.71                             | 3.58                            | 1.28      |
|                             | 754.17             | 356.29                | 362.26                       | 366.81                | 9.45              | 33.71                             | 3.58                            | 1.28      |
|                             | 734.03             | 356.15                | 362.12                       | 366.67                | 9.45              | 33.71                             | 3.57                            | 1.28      |
|                             | 713.89             | 356.01                | 361.98                       | 366.53                | 9.45              | 33.71                             | 3.57                            | 1.28      |
|                             | 693.75             | 355.87                | 361.84                       | 366.39                | 9.45              | 33.72                             | 3.57                            | 1.28      |
|                             | 673.61             | 355.73                | 361.7                        | 366.25                | 9.45              | 33.72                             | 3.57                            | 1.28      |
|                             | 653.47             | 355.59                | 361.56                       | 366.11                | 9.45              | 33.72                             | 3.57                            | 1.28      |
|                             | 633.33             | 355.45                | 361.42                       | 365.96                | 9.45              | 33.72                             | 3.57                            | 1.28      |
|                             | 613.19             | 355.31                | 361.28                       | 365.82                | 9.44              | 33.73                             | 3.56                            | 1.28      |
|                             | 593.05             | 355.16                | 361.14                       | 365.68                | 9.44              | 33.73                             | 3.56                            | 1.28      |
|                             | 572.91             | 355.02                | 361                          | 365.53                | 9.44              | 33.73                             | 3.56                            | 1.28      |
|                             | 552.77             | 354.88                | 360.86                       | 365.39                | 9.44              | 33.74                             | 3.56                            | 1.28      |
|                             | 532.63             | 354.74                | 360.72                       | 365.26                | 9.44              | 33.74                             | 3.55                            | 1.28      |
|                             | 512.49             | 354.6                 | 360.58                       | 365.12                | 9.44              | 33.74                             | 3.55                            | 1.28      |

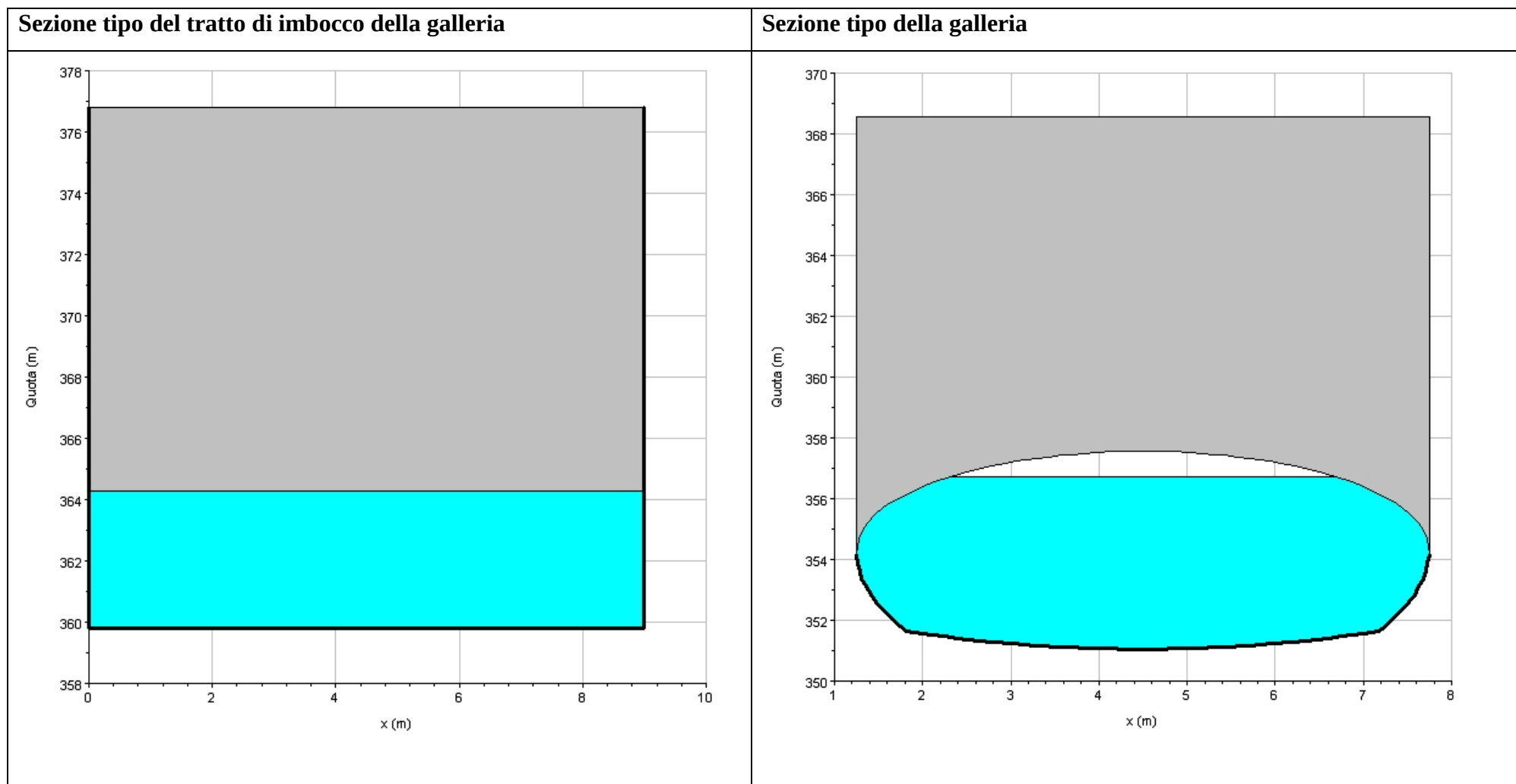
|                            | Progressiva<br>[m] | Thalweg<br>[m s.l.m.] | Livello idrico<br>[m s.l.m.] | Energia<br>[m s.l.m.] | Velocità<br>[m/s] | Area bagnata<br>[m <sup>2</sup> ] | Larghezza<br>pelo libero<br>[m] | N° Froude |
|----------------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------|
|                            | 492.35             | 354.46                | 360.43                       | 364.98                | 9.44              | 33.74                             | 3.55                            | 1.28      |
|                            | 472.21             | 354.32                | 360.29                       | 364.83                | 9.44              | 33.74                             | 3.55                            | 1.28      |
|                            | 452.07             | 354.18                | 360.15                       | 364.69                | 9.44              | 33.74                             | 3.55                            | 1.28      |
|                            | 431.93             | 354.04                | 360.01                       | 364.55                | 9.44              | 33.75                             | 3.55                            | 1.28      |
|                            | 411.79             | 353.9                 | 359.87                       | 364.41                | 9.44              | 33.75                             | 3.55                            | 1.28      |
|                            | 391.65             | 353.75                | 359.73                       | 364.27                | 9.44              | 33.75                             | 3.54                            | 1.28      |
|                            | 371.51             | 353.61                | 359.59                       | 364.13                | 9.44              | 33.76                             | 3.54                            | 1.28      |
|                            | 351.37             | 353.47                | 359.45                       | 363.99                | 9.43              | 33.76                             | 3.53                            | 1.28      |
|                            | 331.23             | 353.33                | 359.31                       | 363.85                | 9.43              | 33.76                             | 3.53                            | 1.28      |
|                            | 311.09             | 353.19                | 359.17                       | 363.71                | 9.43              | 33.76                             | 3.53                            | 1.28      |
|                            | 290.95             | 353.05                | 359.03                       | 363.56                | 9.43              | 33.77                             | 3.53                            | 1.28      |
|                            | 270.81             | 352.91                | 358.89                       | 363.42                | 9.43              | 33.77                             | 3.53                            | 1.28      |
|                            | 250.67             | 352.77                | 358.75                       | 363.28                | 9.43              | 33.77                             | 3.53                            | 1.28      |
|                            | 250.53             | 352.63                | 358.61                       | 363.14                | 9.43              | 33.77                             | 3.53                            | 1.28      |
|                            | 210.39             | 352.49                | 358.47                       | 363                   | 9.43              | 33.77                             | 3.53                            | 1.28      |
|                            | 190.25             | 352.34                | 358.33                       | 362.86                | 9.43              | 33.77                             | 3.53                            | 1.28      |
|                            | 170.11             | 352.2                 | 358.19                       | 362.72                | 9.43              | 33.77                             | 3.52                            | 1.28      |
|                            | 149.97             | 352.06                | 358.05                       | 362.58                | 9.43              | 33.78                             | 3.52                            | 1.28      |
|                            | 129.83             | 351.92                | 357.91                       | 362.44                | 9.43              | 33.79                             | 3.52                            | 1.27      |
|                            | 109.69             | 351.78                | 357.77                       | 362.29                | 9.42              | 33.79                             | 3.51                            | 1.27      |
|                            | 89.55              | 351.64                | 357.63                       | 362.15                | 9.42              | 33.8                              | 3.5                             | 1.27      |
|                            | 69.41              | 351.5                 | 357.49                       | 362.01                | 9.42              | 33.81                             | 3.5                             | 1.27      |
|                            | 49.27              | 351.36                | 357.35                       | 361.87                | 9.42              | 33.81                             | 3.49                            | 1.27      |
|                            | 29.13              | 351.22                | 357.21                       | 361.73                | 9.42              | 33.81                             | 3.49                            | 1.27      |
| <b>Sbocco<br/>galleria</b> | 0                  | 351.05                | 357                          | 361.56                | 9.46              | 33.64                             | 3.63                            | 0.99      |

**Tabella 2.2: Risultati del modello idraulico per la galleria di by-pass.**



**Fig. 2.22: Profilo longitudinale: livelli massimi in galleria.**





**Fig. 2.23: Livelli massimi in galleria.**

### ***2.2.3 L'Opera di dissipazione e il canale di restituzione***

Le portate smaltite dalla galleria di by-pass vengono scaricate tramite canale nell'alveo del fiume Chiese; per mitigare l'impatto ambientale si è previsto di realizzare l'opera totalmente interrata. Il canale, che si sviluppa per un tratto di circa 90 m con una pendenza del 2 ‰, è uno scatolare di forma rettangolare con luce interna di 15 x4 m.

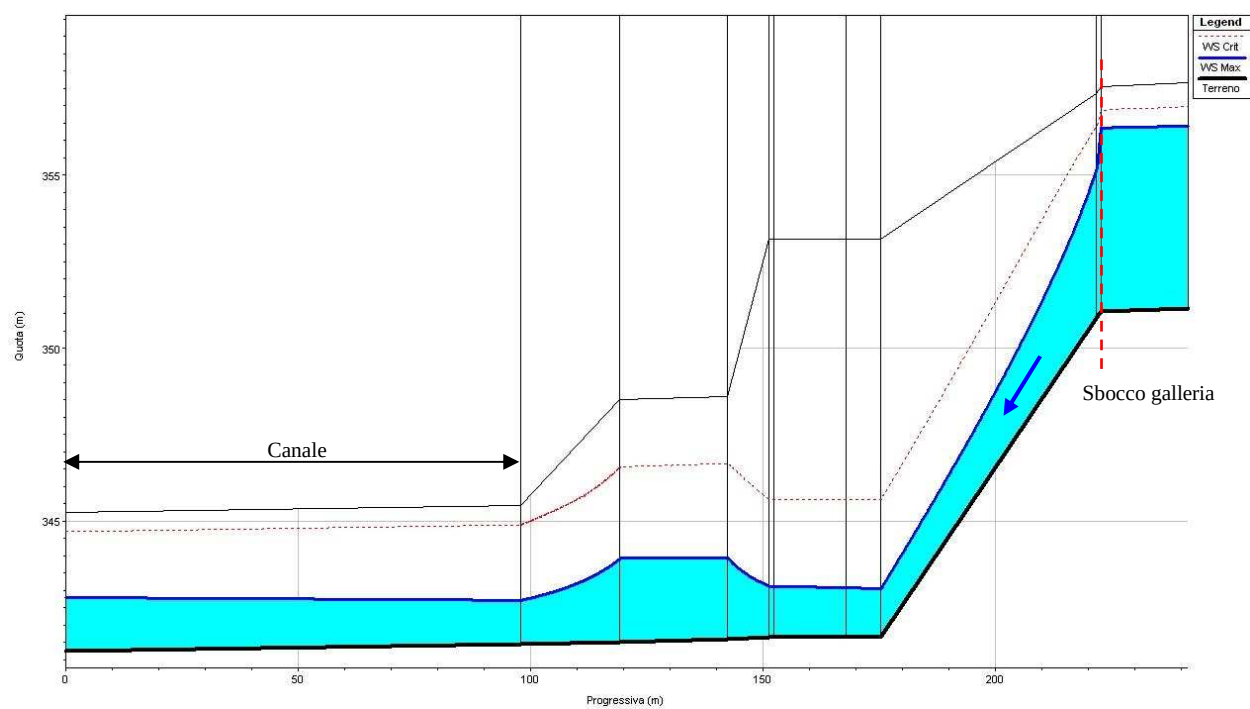
Tra il fondo scorrevole della galleria e del canale di restituzione vi è un dislivello di 11 m, il collegamento tra i due manufatti è dato da una rampa di raccordo con pendenza del 20 ‰. Tale tratto, visti gli alti valori di velocità che si instaurano, è rivestito sul fondo e su parte dei lati con un blindaggio che ne evita l'erosione.

#### **2.2.3.5 Assenza dell'opera di dissipazione**

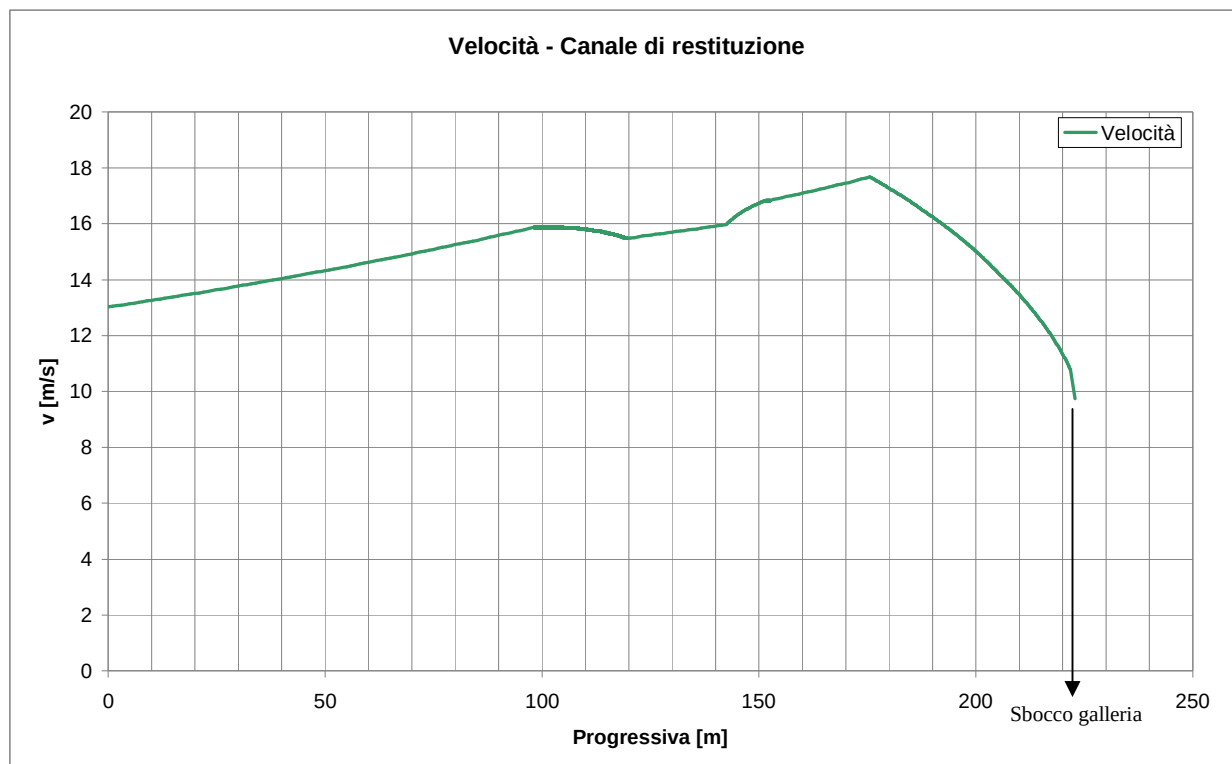
Con un modello di moto permanente, ricostruito in HEC-RAS, si è indagato quali condizioni idrauliche si presenterebbero nel canale, nel caso in cui la galleria smaltisca la portata di 300 m<sup>3</sup>/s, in assenza di qualunque dispositivo di dissipazione.

In Fig. 2.24 è riportato il profilo longitudinale del canale con i livelli idrici che si realizzerebbero per la portata di progetto sopra menzionata nel caso di assenza di opere di dissipazione; si nota come la corrente mantenendosi sempre al di sotto dell'altezza critica sia sempre veloce.

La Fig. 2.25 evidenzia come nel canale si instaurano valori di velocità superiori a quelli massimi ammissibili per i materiali costruttivi.



**Fig. 2.24: Profilo longitudinale: canale di restituzione senza vasca di dissipazione.**



**Fig. 2.25: Canale di restituzione: andamento delle velocità massime.**

La situazione riportata in Fig. 2.24 è quindi da evitarsi in quanto comporterebbe la protezione, con appropriati rivestimenti, del fondo e delle sponde del canale contro l'erosione per un'estensione notevole. Questa soluzione, non solo sarebbe anti-economica, ma produrrebbe effetti erosivi inaccettabili anche nell'alveo del fiume Chiese, a causa delle elevate velocità, dell'ordine dei 13 m/s, che si instaurerebbero nella sezione finale del canale.

Allo scopo di ridurre le velocità si induce un rallentamento della corrente in arrivo al canale con la formazione di un risalto idraulico.

Il risalto è associato al passaggio da una corrente rapida ad una lenta; la brusca riduzione della velocità dà luogo ad un fenomeno localizzato di forte turbolenza e significativa dissipazione energetica.

Il risalto può essere confinato in una posizione precisa, creando una vasca di smorzamento o dissipatore, il cui dimensionamento è precisato nel §2.2.3.6.

#### 2.2.3.6 Dimensionamento della vasca di dissipazione

A valle dello sbocco della galleria è prevista quindi la realizzazione di una vasca di dissipazione finalizzata a ridurre le velocità della corrente idrica, in modo tale da ricondurla ai valori che si realizzano naturalmente nel corso d'acqua recettore.

Tale dissipatore è ottenuto abbassando la platea della vasca al di sotto del fondo del canale di valle e restringendo la sezione terminale della stessa con due quinte che, generando una strozzatura, favoriscono la formazione di uno stato di corrente lenta in grado di produrre l'altezza coniugata del risalto.

Per la vasca di dissipazione si è adottato il modello USBR tipo III (Fig. 2.26); le dimensioni riportate in figura derivano direttamente dalle prove fatte su modello.

Per il dimensionamento della vasca si è considerata la procedura di seguito riportata:

- Ipotizzando che non siano presenti dissipazioni di energia lungo lo scivolo, si è determinata l'altezza  $D_1$  dell'acqua nella sezione iniziale della vasca mediante l'equazione:

$$H_0 = D_1 + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot (B \cdot D_1)^2}$$

Dove:

$H_0$  = dislivello tra il livello idrico in uscita dalla galleria e il fondo della vasca = 16,2 m;

$Q$  = portata di progetto = 300 m<sup>3</sup>/s;

$B$  = larghezza della vasca = 12 m.

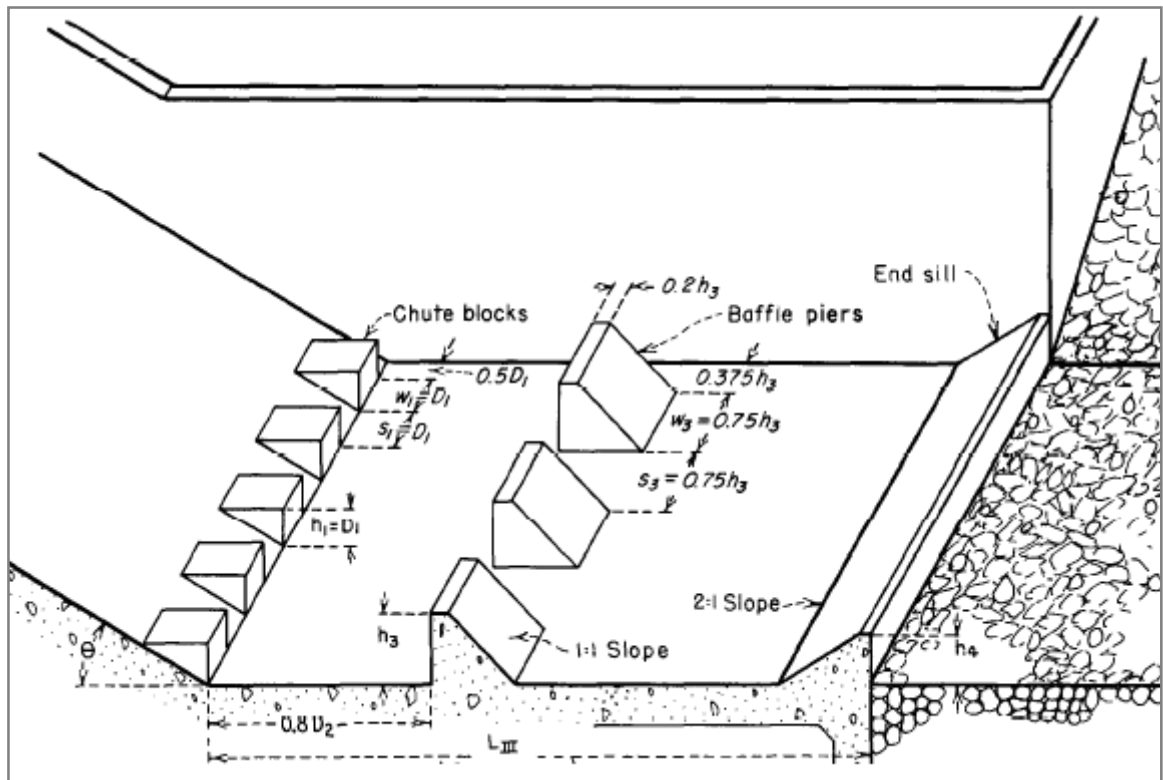


Fig. 2.26: Schema della vasca tipo USBR III.

Dai calcoli si ottiene  $D_1 = 1.28$  m.

- Il numero di Froude associato alla corrente nella sezione iniziale della vasca è:

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g \cdot D_1}} = 5,4$$

dove:

$V_1 = 19,2$  m/s e  $D_1 = 1,28$  m.

- L'altezza che l'acqua deve avere nella sezione di valle (altezza coniugata di  $D_1$ ), in modo tale che il risalto si verifichi nella vasca, è stata dedotta dalla formula seguente:

$$\frac{D_2}{D_1} = 0.5 \cdot (\sqrt{1 + 8Fr_1} - 1)$$

dove:  $D_1 = 1,28$  m e  $Fr_1 = 5,4$ .

Pertanto  $D_2 = 9,16$  m.

L'energia che corrisponde a tale livello è  $E_2 = 9,53$  m

- La lunghezza della vasca, funzione del numero di Froude  $Fr_1$ , è stata definita secondo le indicazioni del grafico di Fig. 2.27:  $L = 23$  m.

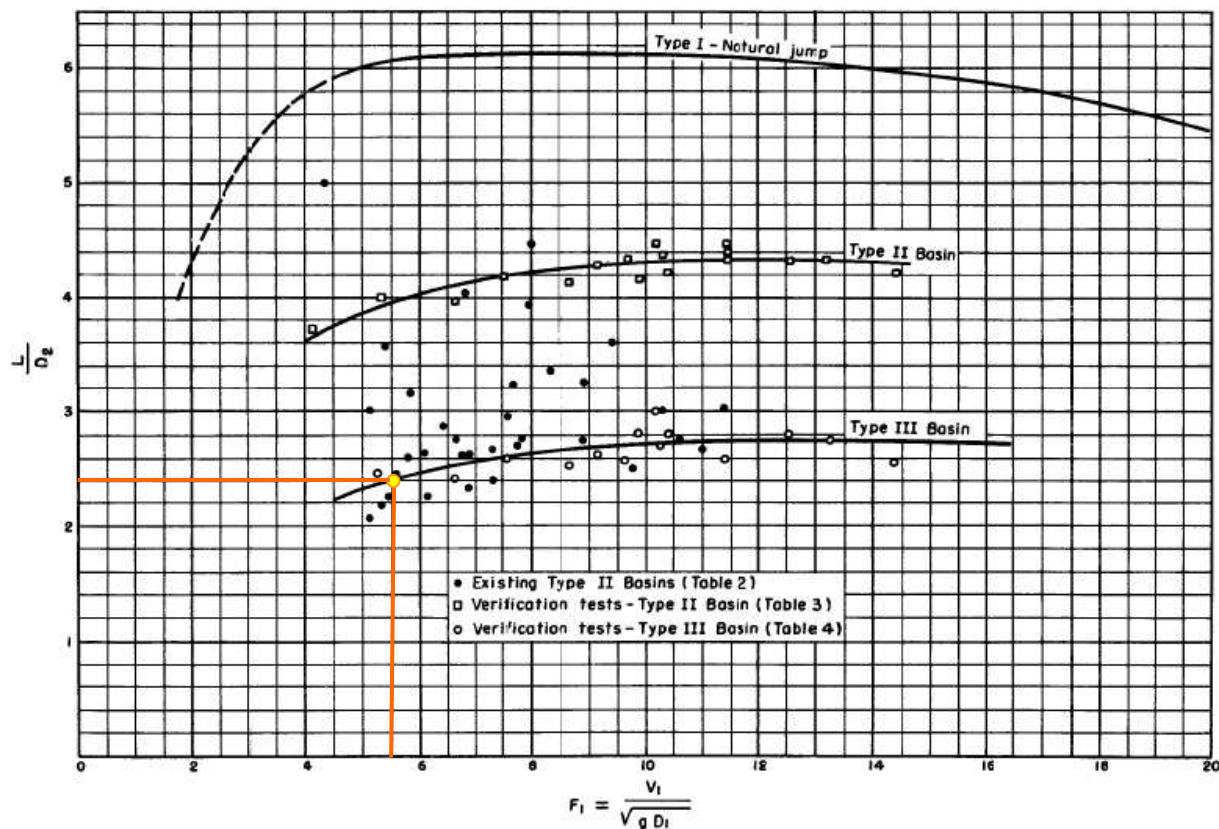


Fig. 2.27

- Chute blocks: 5 blocchi posizionati nella sezione iniziale della vasca con altezza pari al valore di 1,28 m; larghi 1,2 m e con spaziatura pari a 1,2 m.
- Baffle Piers: 4 blocchi disposti a 7,33 m dall'inizio della vasca, le cui dimensioni dipendono dal parametro  $h_3$  ottenuto dal grafico sperimentale di Fig. 2.28. I blocchi hanno un'altezza di 1,95 m, una larghezza di 1,5 m e sono spaziati di 1,5 m.
- L'altezza del gradino di sconnessione tra la vasca e il canale di valle, è dato dalla differenza tra l'energia che coniugata  $E_2$  e il valore di energia della corrente lenta che si verifica subito a valle della vasca, quest'ultimo valore è stato calcolato mediante modello di moto permanente descritto nel seguito ed è pari a 8,2 m. L'altezza del gradino adottata è pari a 1,5 m in luogo dei 1,33 m calcolati.

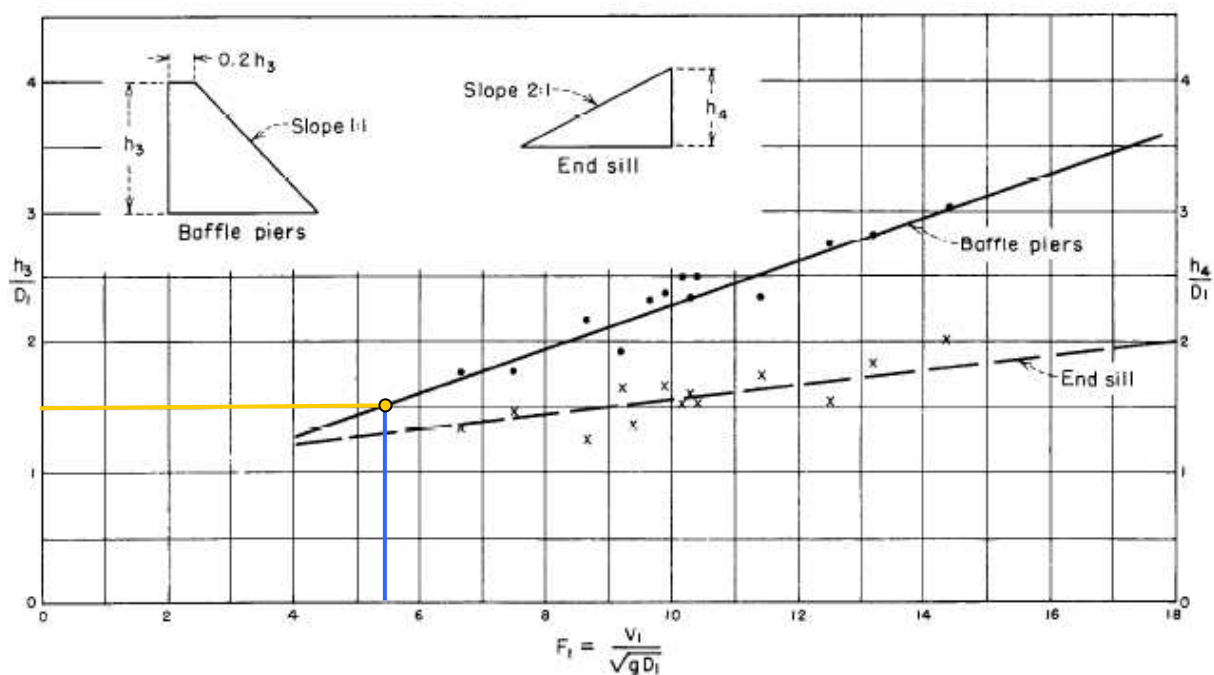


Fig. 2.28

#### 2.2.3.7 Il modello di moto permanente

Allo scopo di determinare l'altezza di corrente lenta necessaria a completare il dimensionamento e per la verifica dello stesso è stato implementato un modello numerico monodimensionale.

Il modello è stato costruito utilizzando il codice di calcolo HEC-RAS; nella Fig. 2.29 si riporta lo schema planimetrico di calcolo.

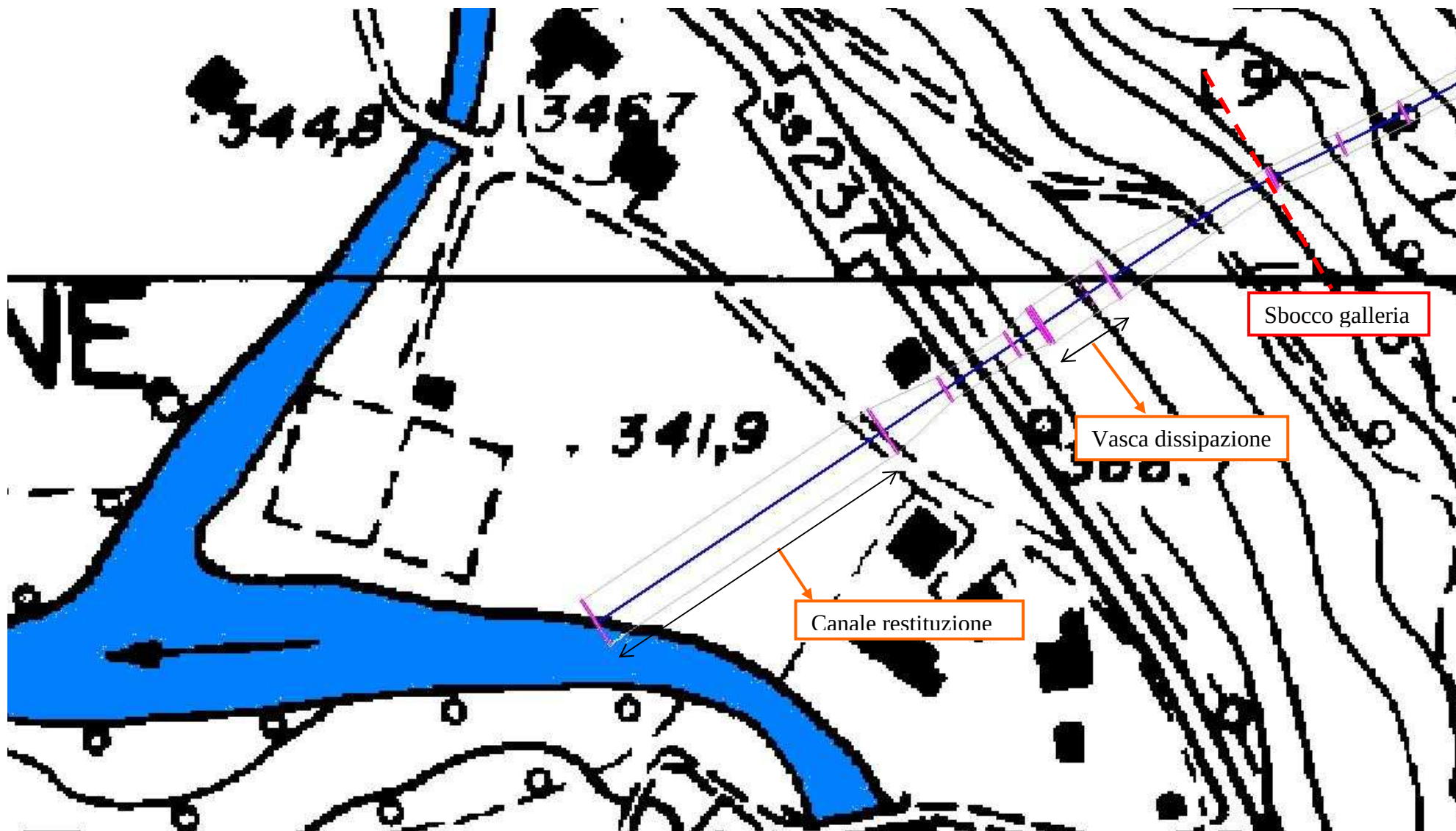


Fig. 2.29: Schema planimetrico del modello di calcolo dell'opera di dissipazione.

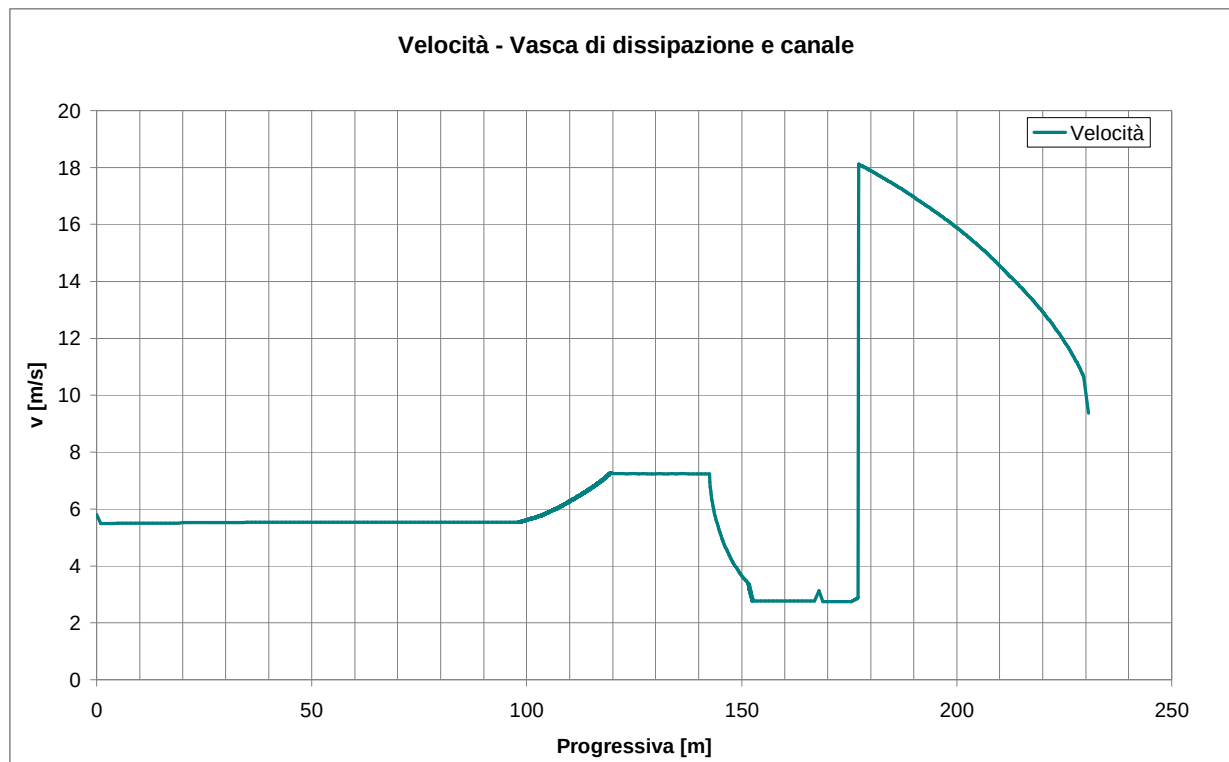


In Fig. 2.30 è riportato il profilo longitudinale del canale con i livelli idrici che si realizzano per la portata di progetto di  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ ; si nota come la corrente in uscita dalla galleria passa da un regime di veloce ad uno di lenta a mezzo del risalto che si instaura nella vasca di dissipazione.

I livelli idrici che si verificano in vasca sono tali da dare un franco dell'ordine dei 2,5 m rispetto alla volta e una luce libera di 0,4 m nel canale di restituzione in alveo.

I dati di funzionamento della galleria sono riportati in modo dettagliato in Tabella 2.3 dove, in funzione della progressiva, sono indicati i valori massimi per alcune delle principali grandezze idrauliche.

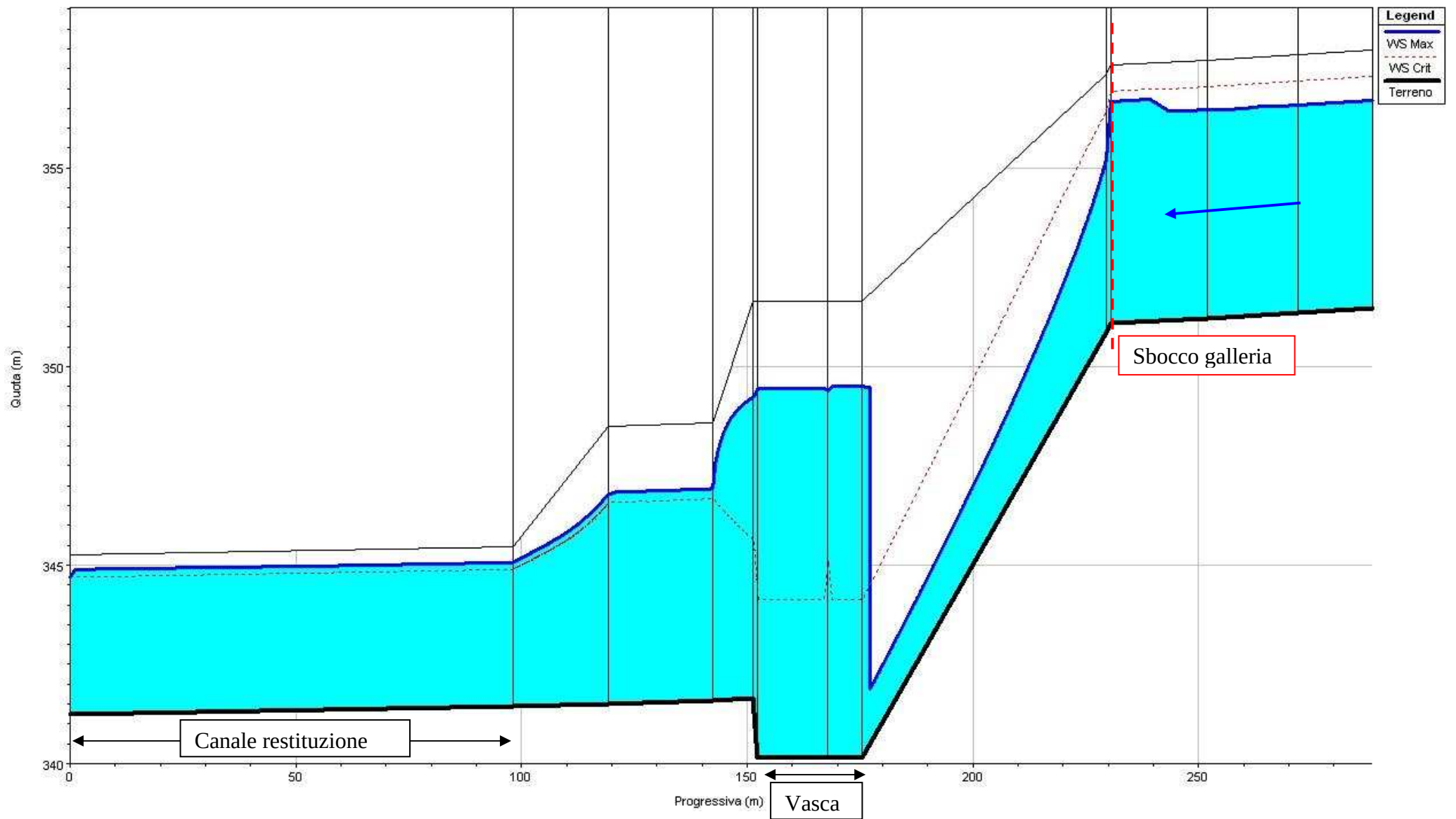
La Figura 2.30 evidenzia come nel canale si instaurano valori di velocità compatibili sia con i materiali costruttivi sia con i valori di corrente nel fiume Chiese; confrontandoli con quelli calcolati in assenza di bacino di smorzamento si nota il deciso decremento nel canale, confermando l'efficienza del dissipatore.



**Fig. 2.30: Opera di dissipazione: andamento delle velocità massime.**

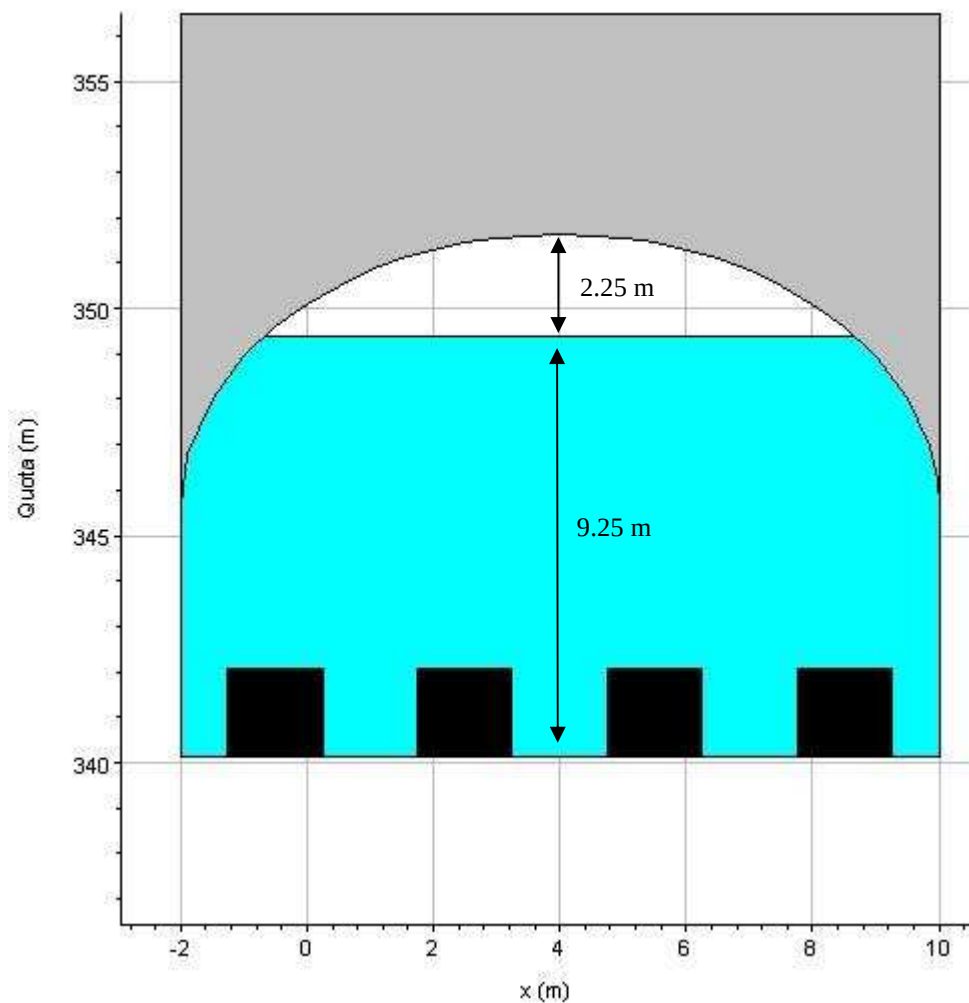
|                                        | Progressiva<br>[m] | Thalweg<br>[m s.l.m.] | Livello<br>idrico<br>[m s.l.m.] | Quota<br>energia<br>[m s.l.m.] | Velocità<br>[m/s] | Area<br>bagnata<br>[m <sup>2</sup> ] | Larghezza<br>pelo libero<br>[m] | N°<br>Froude |
|----------------------------------------|--------------------|-----------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------------------|---------------------------------|--------------|
| <b>Sbocco<br/>galleria</b>             | 230.45             | 351.11                | 356.67                          | 361.14                         | 9.37              | 32.03                                | 4.59                            | 1.32         |
|                                        | 229.45             | 350.87                | 355.24                          | 361.00                         | 10.64             | 28.21                                | 6.08                            | 1.62         |
|                                        | 175.35             | 340.13                | 349.50                          | 349.89                         | 2.76              | 108.82                               | 9.16                            | 0.29         |
|                                        | 167.83             | 340.13                | 349.38                          | 349.87                         | 3.13              | 95.98                                | 9.35                            | 0.35         |
|                                        | 152.33             | 340.13                | 349.45                          | 349.84                         | 2.77              | 108.34                               | 9.24                            | 0.29         |
|                                        | 151.33             | 341.63                | 349.23                          | 349.82                         | 3.40              | 88.30                                | 9.57                            | 0.39         |
|                                        | 142.33             | 341.59                | 346.92                          | 349.59                         | 7.24              | 41.41                                | 6.45                            | 1.00         |
|                                        | 119.29             | 341.50                | 346.80                          | 349.50                         | 7.28              | 41.22                                | 6.49                            | 1.01         |
|                                        | 98.00              | 341.45                | 345.06                          | 346.62                         | 5.54              | 54.17                                | 15.00                           | 0.93         |
| <b>Sbocco nel<br/>fiume<br/>Chiese</b> | 0.00               | 341.25                | 344.69                          | 346.42                         | 5.81              | 51.60                                | 15.00                           | 0.92         |

**Tabella 2.3: Risultati del modello idraulico per l'opera di dissipazione.**



**Fig. 2.31: Profilo longitudinale opera di dissipazione: andamento dei livelli massimi.**

### Sezione tipo vasca di dissipazione



### Sezione tipo canale di restituzione

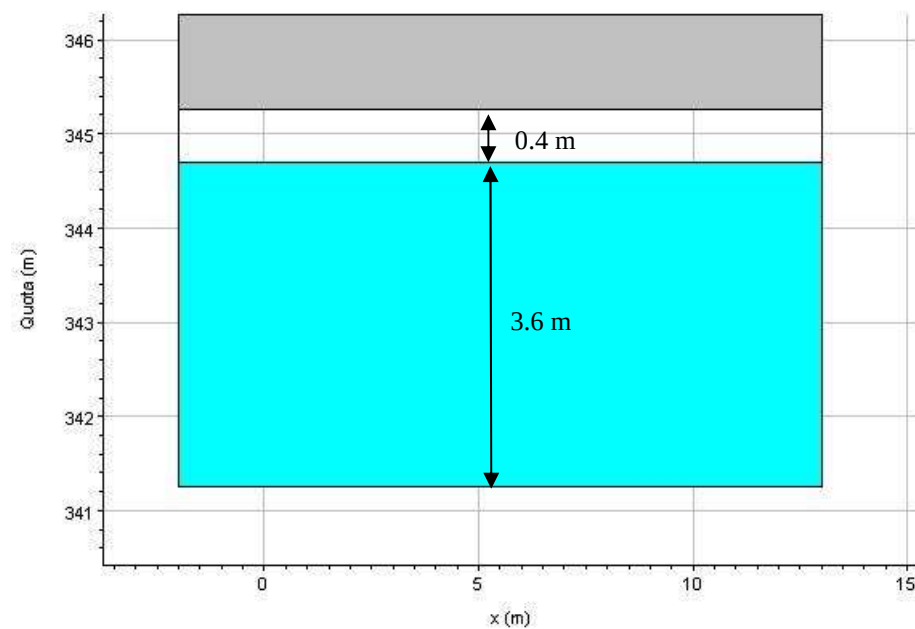


Fig. 2.32: Livelli massimi nel dissipatore e nel canale.