

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Idraulica Marittima Ambientale e Geotecnica

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN  
COSTRUZIONI IDRAULICHE

**Progetto e verifica del funzionamento della cassa  
d'espansione di Caldogno (VI)**

*Relatore:*  
*Prof. Ing. Paolo Salandin*

*Laureando: Nicola Tennani*

ANNO ACCADEMICO 2013 / 2014



## Indice

Introduzione .....	5
1) Analisi idrologica e idraulica .....	7
1.1 Il sistema idrografico del Timonchio .....	7
1.2 Finalità dell'intervento .....	10
1.3 Studio idrologico .....	12
1.3.1 Analisi delle portate - metodo di Gumbel .....	13
1.3.2 Estrapolazione delle onde di piena .....	17
2) Dimensionamento della cassa d'espansione di Caldogno .....	19
2.1 Caratteristiche generali .....	20
2.2 Geometria delle casse .....	21
2.3 Opera di presa .....	24
2.3.1 Criteri e iter progettuale .....	25
2.3.2 Predimensionamento con il bilancio di energia .....	27
2.3.3 Verifica dei valori ottenuti nel predimensionamento con Hec-Ras .....	31
2.3.4 Dimensionamento della vasca di dissipazione a valle delle quinte .....	42
2.3.5 Dimensionamento della vasca di dissipazione all'imbocco della cassa ...	49
2.3.6 Dimensionamento paratoie a settore .....	54
2.3.7 Dimensionamento dei taglioni .....	64
2.4 Sistemazione alveo .....	67
2.4.1 Innalzamento delle arginature .....	67
2.4.2 Muri di sostegno .....	69
2.4.3 Rivestimento del fondo .....	71
2.4.4 Difesa di sponda .....	75
2.5 Dimensionamento dello sfioratore di troppo pieno della cassa di monte .....	77
2.5.1 Dimensionamento delle grandezze geometriche caratteristiche della vasca	78
2.5.2 Dimensionamento dei denti della vasca di dissipazione .....	80
2.6 Dimensionamento del degli scarichi di fondo .....	83
3) Programma per la valutazione dell'effetto di laminazione .....	85
3.1 Dati di input e risultati .....	86
3.2 Curve volumi e superficie .....	87
3.3 Nodo opera di presa .....	87
3.4 Calcoli .....	88
3.4.1 Cassa di monte .....	89
3.4.2 Cassa di valle .....	89

4)	Efficienza della cassa .....	91
4.1	Simulazioni .....	91
4.1.1	Portata con $Tr=100$ anni e volumi con $Tr=50$ anni .....	91
4.1.2	Evento del novembre 2010 .....	93
4.1.3	Portata con $Tr=200$ anni e volumi con $Tr=200$ anni .....	95
4.2	Efficienza .....	97
	Conclusioni .....	99
	Bibliografia .....	101
	Sommario delle figure .....	102
	Allegati .....	
	Planimetria generale .....	
	Planimetria .....	I
	Sezione AA, BB, CC .....	II
	Opera di presa .....	<b>Errore. Il segnalibro non è definito.</b>
	Pianta .....	III
	Sezione AA, DD .....	IV
	Sezione BB, CC .....	V
	Sezione EE, GG .....	VI
	Sezione FF, BB particolare .....	VII
	Restituzione al Timonchio della cassa di monte .....	
	Pianta .....	VIII
	Sezione AA, BB, CC .....	IX
	Opera di interconnessione tra le casse .....	
	Pianta .....	X
	Sezione AA, BB, CC .....	XI
	Sfioratore della cassa di valle .....	
	Pianta .....	XII
	Sezione AA, CC, EE .....	XIII
	Sezione BB, DD .....	XIV

## Introduzione

Il controllo delle piene e la difesa idraulica del territorio rappresentano una evidente necessità. La continua crescita dei danni causati dalle alluvioni, ad esempio quella che nel novembre del 2010 ha coinvolto 130 comuni veneti allagando 140 km<sup>2</sup> di terreno, mette in evidenza l'elevato grado di vulnerabilità del territorio italiano. Le casse d'espansione rientrano tra i sistemi di laminazione controllata che consentono di invasare temporaneamente volumi d'acqua anche rilevanti in rapporto al volume di piena per restituirli successivamente, ottenendo così un'attenuazione e un ritardo del valore del colmo.

L'obiettivo di questo lavoro è stato quello di sviluppare una possibile soluzione progettuale per la cassa in derivazione sul torrente Timonchio, uno dei corsi d'acqua che con le sue portate contribuisce in maniera rilevante alle piene del fiume Bacchiglione.

Le casse d'espansione sul Timonchio sono attualmente in costruzione a cura del Consorzio Stabile Idra Building, risultato vincitore dell'appalto bandito dalla Regione Veneto alla fine del 2012 e la consegna dei lavori è prevista per la fine del 2015.

L'esercizio progettuale qui riportato prende origine dal progetto definitivo redatto da BETA Studio e Technital nel 2012, e utilizzato come progetto a base di gara del già citato appalto.

Dal progetto Beta Studio e Technital sono state tratte tutte le informazioni utilizzate per la localizzazione delle casse, le loro dimensioni generali e l'analisi idrologica.

Si è partiti dall'indagine di carattere idrologico basata su 1000 anni di dati di precipitazione sintetiche che ha fornito informazioni su frequenza e intensità di eventi di piena, consentendo di estrapolare degli idrogrammi caratterizzati da portate al colmo e volumi con specifici tempi di ritorno con i quali dimensionare l'opera e verificarne il beneficio a valle.

Sulla base di questi dati, basandosi sulla geometria della cassa già decisa nel progetto a base di gara, si sono dimensionate l'opera di presa, quella di restituzione e quella intermedia fra le casse, con opportuno utilizzo delle relazioni dell'idraulica organizzate in codici autonomamente sviluppati, sia utilizzando programmi di calcolo noti quale Hec-Ras.

In questo modo sono stati scelti tutti i manufatti di regolazione delle portate e dimensioni delle luci che li caratterizzano, adottando soluzioni che rispondessero ai requisiti di sicurezza e flessibilità, cercando al contempo di contenere i costi.

È stato autonomamente sviluppato un codice di calcolo che consente di valutare l'effetto di laminazione dell'onda di piena, dando la possibilità di cogliere gli effetti indotti dalla variazione delle dimensioni dei diversi manufatti di presa e sfioro. Con l'intento di sfruttare al meglio i volumi invasabili a disposizione sono state stabilite le lunghezze da assegnare agli sfioratori di troppo pieno, sulla base delle quali sono state dimensionate le rispettive opere.

Lo stesso codice di calcolo è servito infine a quantificare l'effetto di riduzione del colmo di piena prendendo in considerazione sia eventi sintetici che reali, come quello del novembre 2010.

Un discreto numero di tavole grafiche danno una visione in generale dell'opera e descrivono in dettaglio i manufatti di imbocco, di collegamento fra cassa e cassa e di restituzione a fiume.

# 1) Analisi idrologica e idraulica

La cassa d'espansione è collocata all'interno del sistema idrografico del Timonchio-Bacchiglione e, unitamente ad altri interventi, costituisce una delle opere necessarie (richiamate nel dettaglio nel seguente paragrafo) a ridurre la portata transitante presso la città di Vicenza nel fiume Bacchiglione. Nello specifico, quest'opera è ubicata sulla sinistra idrografica del torrente Timonchio, presso il comune di Caldogno.

## 1.1 Il sistema idrografico del Timonchio

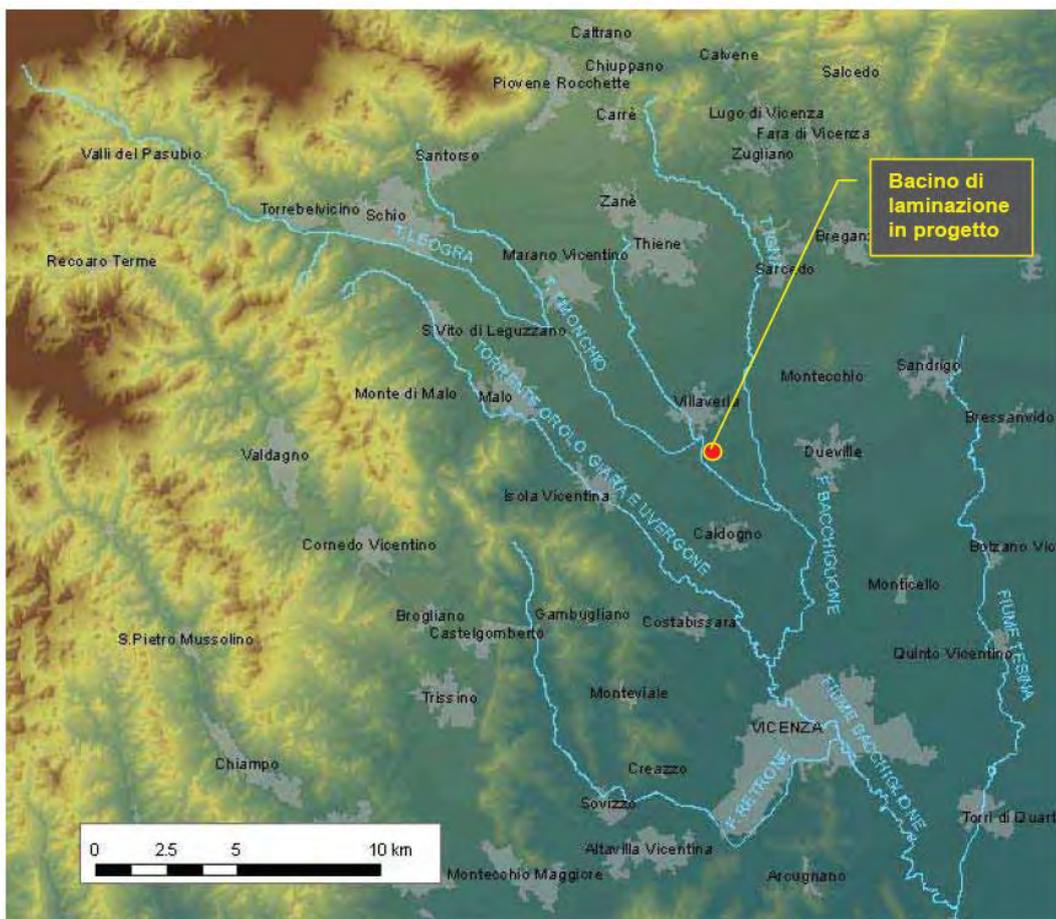


Figura 1: Inquadramento dell'area di indagine (Da: Beta Studio & Technital, 'Progetto definitivo del bacino di laminazione lungo il torrente Timonchio in comune di Caldogno (VI) - Relazione idrologica', 2012)

Il sistema idrografico del Timonchio, con riferimento alla zona in cui è posta la cassa d'espansione, presenta una morfologia tipicamente montana e un regime idrologico torrentizio, caratterizzato da una brusca risposta alle precipitazioni

meteoriche. Il bacino idrografico, in corrispondenza della sezione dell'opera in progetto ha una superficie di circa 200 km<sup>2</sup> e ad esso si fa riferimento con il nome di Leogra-Timonchio.

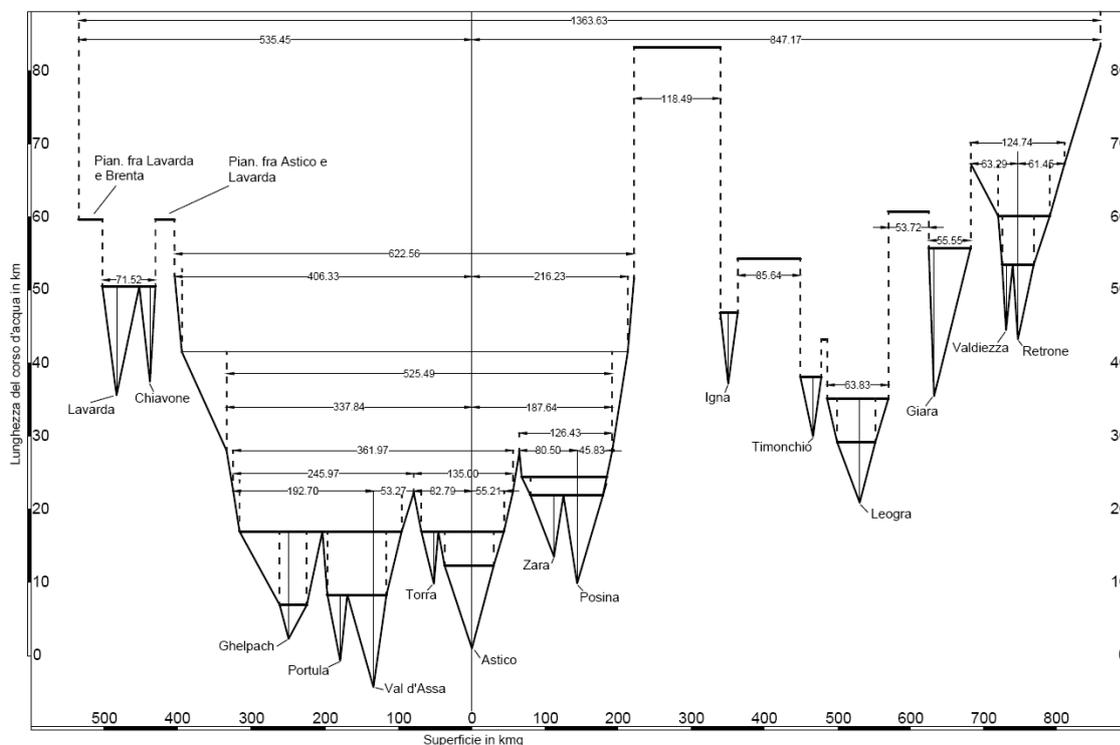


Figura 2: Bacino imbrifero del Bacchiglione - Diagramma di Stecher (Da: Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque di Venezia, 1941)

Il corso d'acqua ha origine presso Pian delle Fugazze; la linea dello spartiacque raggiunge la quota massima di 2235 m s.l.m. in prossimità del Monte Pasubio. Il regime pluviometrico che caratterizza questa zona è particolarmente intenso, sia in termini di precipitazioni medie che in termini di massima intensità.

All'uscita dal bacino montano il torrente Leogra riceve dalla sinistra idrografica il torrente Timonchio dal quale prende il nome nel suo proseguire verso valle, delimitando il confine amministrativo dei comuni di Malo e Marano Vicentino e, successivamente, quello dei comuni di Villaverla e Isola Vicentina.

La parte montana del bacino caratterizza in misura importante il suo comportamento idrologico. Si tratta di un'area caratterizzata prevalentemente da un substrato di rocce relativamente compatte e impermeabili (principalmente calcari, dolomie e rocce metaformiche) con presenza di coltri detritiche. L'elevata piovosità di questa zona geografica, dove si concentrano le precipitazioni di maggiore intensità che possono risultare 2÷3 volte superiori alle precipitazioni che si manifestano nella parte

pedemontana e pianeggiante dello stesso bacino, unitamente alla medio-bassa permeabilità dei versanti, produce fenomeni di piena particolarmente intensi.

I contributi che il torrente riceve nella sua parte pedemontana provengono da bacini secondari con caratteristiche morfologiche differenti, prevalentemente pianeggianti e con scarsa incidenza di versanti montani, che producono onde di piena meno improvvise. Inoltre, il carattere di pensilità dell'alveo del Timonchio fin dal tratto in comune di Caldogno rende difficoltoso l'ingresso dei contributi laterali nell'asta principale, che talvolta possono scaricare solamente durante la fase di esaurimento dell'onda proveniente dal Leogra.

Sempre in comune di Caldogno, ma a valle della cassa di espansione in progetto e in piena zona di risorgiva, il Timonchio riceve gli apporti del torrente Igna, che contribuisce con 36.5 km<sup>2</sup> di superficie drenata, e da qui è denominato "fiume Bacchiglione". In corrispondenza di questa zona si ha anche una modifica della morfologica causata sia da una riduzione della pendenza longitudinale, sia dai contributi di portata, provenienti dalle rogge di risorgive presenti nella zona, che alimentano costantemente il fiume non solo in caso di fenomeni meteorici. Da qui, fino a Vicenza, il corso d'acqua riceve altri importanti apporti aumentando progressivamente l'estensione del bacino idrografico che risulta pari a:

- 348 km<sup>2</sup> una volta ricevuto il contributo del torrente Giara-Orolo;
- 404 km<sup>2</sup> a Vicenza a ponte degli Angeli, in pieno centro di Vicenza, dopo aver ricevuto gli apporti provenienti dal torrente Astichello, localizzato in prossimità del centro urbano nei pressi di Villa Querini;
- 531 km<sup>2</sup> una volta ricevuto il contributo del fiume Retrone.

A valle di Vicenza il Bacchiglione prosegue con direzione Nord Ovest-Sud Est verso Padova presentando un alveo incassato. Giunto poco a valle della località Debbaviene il fiume viene alimentato in sinistra idrografica dalle acque dell'Astico il cui tronco inferiore viene denominato Tesina; entrato in provincia di Padova, il fiume riceve in località Trombacche il contributo del Ceresone o Tesina Padovano e, a Volta Brusegana, un apporto del Brenta per mezzo del canale Bretella di Limena.

A Volta Brusegana il Bacchiglione perde il suo nome per assumere quello di Tronco Comune col quale prosegue sino alla località Bassanello dove le acque promiscue del Brenta e del Bacchiglione si dividono in tre canalizzazioni. La prima di

queste, che prende il nome di Canale Battaglia, si dirige a Sud verso il canale di Monselice, alimentando diversi corsi d'acqua minori che si riuniscono poi nel canale Cagnola. La seconda, denominata Tronco Maestro, entra in Padova nella zona Bassanello. Il terzo ramo, conosciuto come Canale Scaricatore, è quello principale; giunto al nodo di Voltabarozzo si immette in parte nel Roncajette e in parte nel Canale S.Gregorio che prosegue fino alla confluenza nel canale Piovego, dirigendosi poi verso Strà dove, a monte dell'omonimo sostegno, incrocia il Brenta. Il Roncajette arriva fino a Bovolenta dove riceve il Cagnola, cambia nome in canale di Pontelongo e si ricongiunge al Brenta poco prima del suo sbocco a mare.

Attraverso questa intricata rete di canali multiconnessi, le portate del Bacchiglione pervengono al mare, in parte fluendo lungo il corso del Brenta ed in parte percorrendo il Roncajette prima e il canale di Pontelongo poi, che si immette nella foce comune di Brondolo all'altezza di Cà Bianca.

## **1.2 Finalità dell'intervento**

Con riferimento al *Piano delle azioni e degli interventi di mitigazione del rischio idraulico e geologico* redatto del Commissario Delegato nel marzo del 2011, al fine di ridurre le portate di piena del fiume Bacchiglione a valori stabiliti, si è deciso di realizzare una serie di bacini di laminazione per consentire la trattenuta temporanea dei volumi d'acqua che eccedono le capacità di deflusso individuate. Sulla base di rilievi topografici e facendo considerazioni di carattere idraulico e geometrico, è risultato che una portata di 300 m<sup>3</sup>/s che transita nel fiume Bacchiglione in corrispondenza della città di Vicenza comporta delle criticità nell'abitato stesso. Per conseguire lo scopo di non eccedere tale valore, facendo riferimento all'evento del 31 ottobre/2 novembre 2010, si è stimato che i volumi di piena da trattenere a monte del centro cittadino sono pari ad almeno 9 milioni di m<sup>3</sup>. Gli interventi che si è proposto di realizzare e i corrispondenti valori di invaso ottenibili sono, procedendo da nord a sud:

- cassa di espansione del Torrente Timonchio a nord del comune di Caldogeno in prossimità della località Capovilla per un volume invasabile stimato di circa 3,3 milioni di m<sup>3</sup>;

- bacino Dioma del Canale Dioma a ovest del comune di Vicenza in prossimità della località Biron per un volume invasabile stimato di circa 0,5 milioni di m<sup>3</sup>;
- bacino Torrente Onte del Torrente Onte a nord del comune di Sovizzo in prossimità della località Dalla Vecchia per un volume invasabile stimato di circa 0,5 milioni di m<sup>3</sup>;
- cassa di espansione del Torrente Timonchio del comune di Malo in prossimità della località Molina per un volume invasabile stimato di circa 2 milioni di m<sup>3</sup>;
- bacino di laminazione del Fiume Retrone a sud-ovest del comune di Creazzo in prossimità della località Via Spino per un volume invasabile stimato di circa 0,1 milioni di m<sup>3</sup>;
- cassa di espansione del Torrente Orolo in comune di Costabissara 1 milione di m<sup>3</sup>.

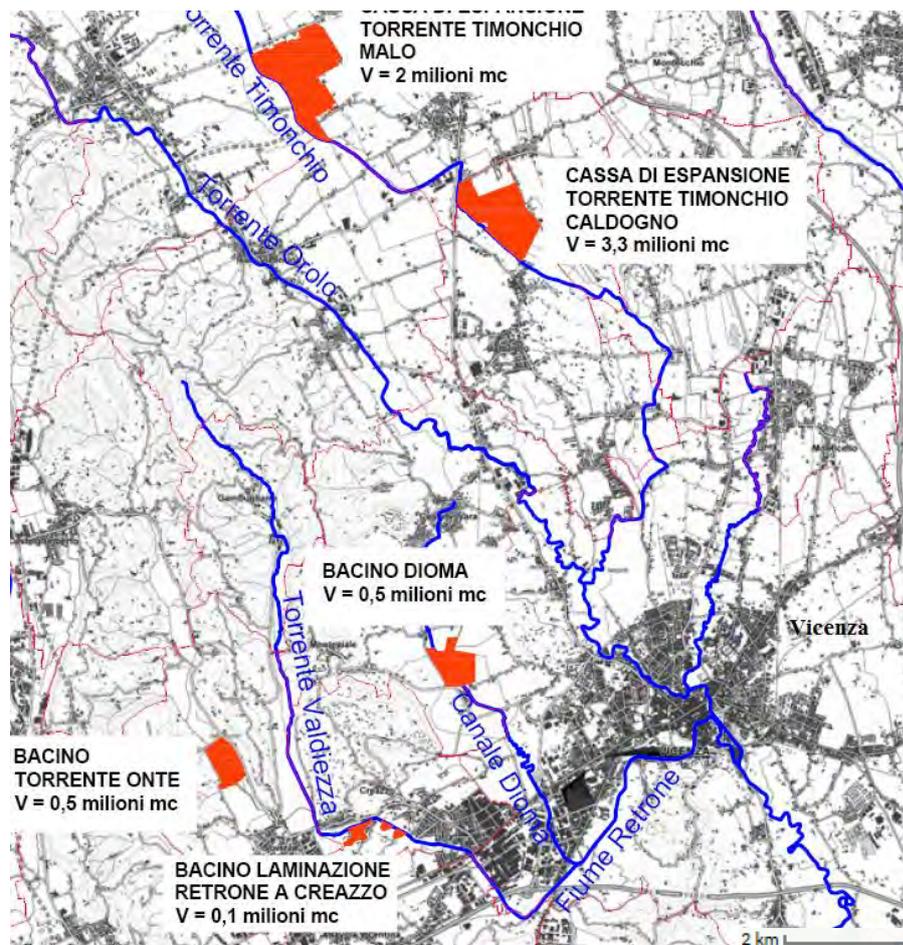


Figura 3: Planimetria generale delle casse d'espansione previste (Da: Provincia di Vicenza-Servizio Risorse Idriche, 'Planimetria generale casse di espansione e bacini di laminazione', 2012)

Sommando il volume invasabile da ciascun opera di laminazione che si è proposto di realizzare si osserva come tale valore sia inferiore ai 9 milioni di m<sup>3</sup> e quindi sarà necessario reperire ulteriori 1,6 milioni di m<sup>3</sup>.

### **1.3 Studio idrologico**

Con lo scopo di ricavare gli idrogrammi necessari al dimensionamento delle opere di laminazione, si è fatto riferimento allo studio idrologico effettuato da Beta Studio e Technital, nel quale si ricorresse al modello continuo afflussi-deflussi ICHYMOD, sviluppato dall'Università di Padova; tale modello determina le portate orarie in corrispondenza delle sezioni idrografiche considerate, simulando per questo scopo il comportamento delle varie componenti del ciclo idrologico quali l'evapotraspirazione potenziale, l'accumulo e lo scioglimento della neve, l'infiltrazione e la produzione di deflusso superficiale. Per tarare e validare il modello si è fatto riferimento ai dati storici termo-pluviometrici e di portata disponibili presso la banca dati dell'ARPAV (per la taratura si è fatto riferimento ai dati registrati nel periodo tra l'1/1/2006 e il 30/3/2011, per la validazione si sono invece utilizzati i dati rilevati tra l'1/1/2000 e il 31/12/2005).

Servendosi del modello tarato e validato, lo si è implementato sollecitando il sistema con le piogge sintetiche relative a un periodo di 1000 anni ottenute nello studio condotto dall'Università di Padova. Tali piogge sono state calcolate esclusivamente per i sottobacini montani, che sono quelli dove si produce la parte principale del deflusso nell'area di studio. Per i bacini o le porzioni di bacini non considerati dallo studio dell'Università di Padova, ma esaminati nell'ambito del presente progetto, è stato necessario ricostruire i valori di pioggia anche dei sottobacini di pianura e in tal senso si sono scalate le serie di pioggia disponibili per la zona montana tenendo conto dell'effetto orografico.

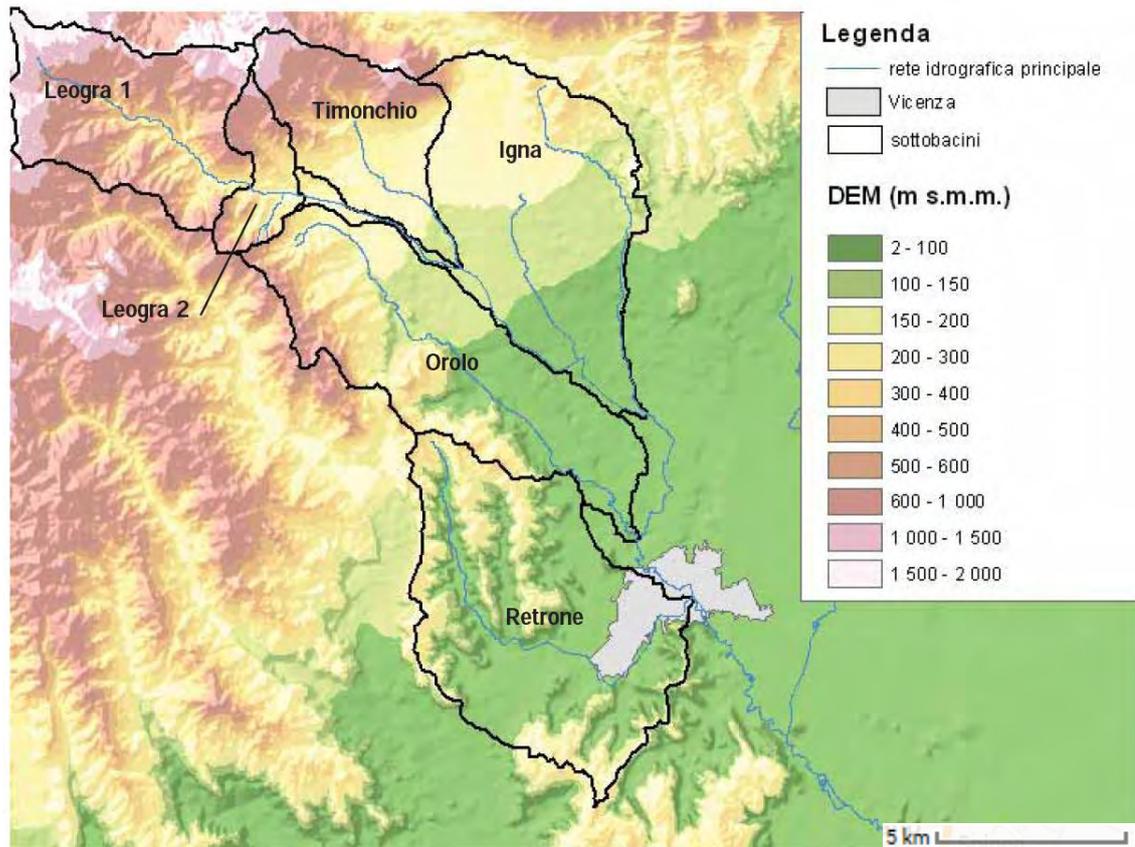


Figura 4: Sottobacini del Timonchio-Bacchiglione implementati nel modello afflussi-deflussi (Da: Beta Studio & Technital, 'Progetto definitivo del bacino di laminazione lungo il torrente Timonchio in comune di Caldogeno (VI) - Relazione idrologica', 2012)

### 1.3.1 Analisi delle portate - metodo di Gumbel

Avendo a disposizione le serie sintetiche di 1000 anni di portata, è stato possibile elaborarle per ottenere i valori ai quali si è fatto riferimento per il dimensionamento e la verifica degli interventi in progetto.

Per ottenere le massime portate annuali corrispondenti a un certo tempo di ritorno si è ricorsi al metodo di Gumbel, che rappresenta uno dei procedimenti di carattere statisti-probabilistico che consentono di allargare il campo delle previsioni oltre il periodo d'osservazione. Tali procedimenti si basano sul concetto di tempo di ritorno  $T_r$ , definito come il tempo medio in cui un valore di intensità assegnata viene uguagliato o superato almeno una volta. Viene di seguito presentata l'elaborazione statistica dei valori secondo Gumbel.

Alle portate massime, intese come eventi estremi che costituiscono una serie di elementi tra loro indipendenti, può applicarsi la seguente descrizione statistica, comune a molte serie idrologiche:

$$X(T_r) = \bar{X} + F \cdot S_X \quad (1)$$

Dove:

- $X(T_r)$  è il valore della portata caratterizzata da un periodo di ritorno  $T_r$ ;
- $\bar{X}$  è il valore medio degli eventi considerati;
- $F$  è il fattore di frequenza;
- $S_X$  è lo scarto quadratico medio della variabile in esame.

Facendo riferimento a una funzione doppio-esponenziale per descrivere la distribuzione di probabilità dei valori estremi, il fattore di frequenza  $F$  può essere descritto dall'espressione:

$$F = \frac{Y(T_r) - \bar{Y}_N}{S_N} \quad (2)$$

Dove:

- $Y(T_r)$  rappresenta la variabile ridotta;
- $\bar{Y}_N$  rappresenta la media della variabile ridotta;
- $S_N$  rappresenta lo scarto quadratico medio della variabile ridotta;
- $N$  rappresenta il numero di osservazioni.

Operando la sostituzione di  $F$  nell'equazione di  $X(T_r)$  si ottiene:

$$X(T_r) = \bar{X} - \frac{S_X}{S_N} \bar{Y}_N + \frac{S_X}{S_N} Y(T_r) \quad (3)$$

Il legame tra il periodo di ritorno  $T_r$  e la variabile ridotta è definito dalla relazione:

$$Y(T_r) = -\ln\left(-\ln\frac{T_r - 1}{T_r}\right) \quad (4)$$

Facendo ricorso alla carta probabilistica di Gumbel è possibile riportare e rappresentare l'insieme delle massime portate annuali disponibili in forma grafica e interpolare poi con una retta la distribuzione dei punti più rappresentativi; in tale carta

sull'asse delle ascisse vengono riportate le scale logaritmiche relative al tempo di ritorno (o in alternativa è riportata in scala lineare la variabile ridotta), mentre sull'asse delle ordinate vengono indicati i valori delle portate.

Avendo a disposizione i valori relativi a N portate annuali disponibili, è necessario innanzitutto ordinare tali portate in ordine decrescente e numerarle da 1 a N, e così si avrà che la portata caratterizzata dall'i-esima posizione avrà ascissa  $T_r$  definita da:

$$T_r = \frac{N + 1}{i} \quad (5)$$

Tale espressione deriva dalla definizione di periodo di ritorno, con l'aggiunta di una unità al numero totale degli anni di osservazione N al fine di evitare che l'evento più piccolo verificatosi sia caratterizzato da un valore unitario di  $T_r$ , che comporterebbe la perdita di significato della relazione che lega la variabile ridotta al tempo di ritorno.

Sostituendo la precedente espressione di  $T_r$  in quella della variabile ridotta, si ottiene la relazione:

$$Y(T_r) = -\ln\left(-\ln\frac{N + 1 - i}{N + 1}\right) \quad (6)$$

che consente di far corrispondere a ciascun evento di una serie di N dati una serie di N variabili ridotte  $Y_i$  dipendenti solo dal numero dei dati N della serie e dalla posizione occupata.

Il procedimento appena descritto è stato applicato alle massime porte annuali del torrente Timonchio, dell'Igna, dell'Orolo e del fiume Bacchiglione a Vicenza.

Ad esempio, considerando le portate del Bacchiglione, si è proceduto ricavando la retta interpolatrice al fine di trovare un'espressione che legasse le portate massime annue alla variabile ridotta:

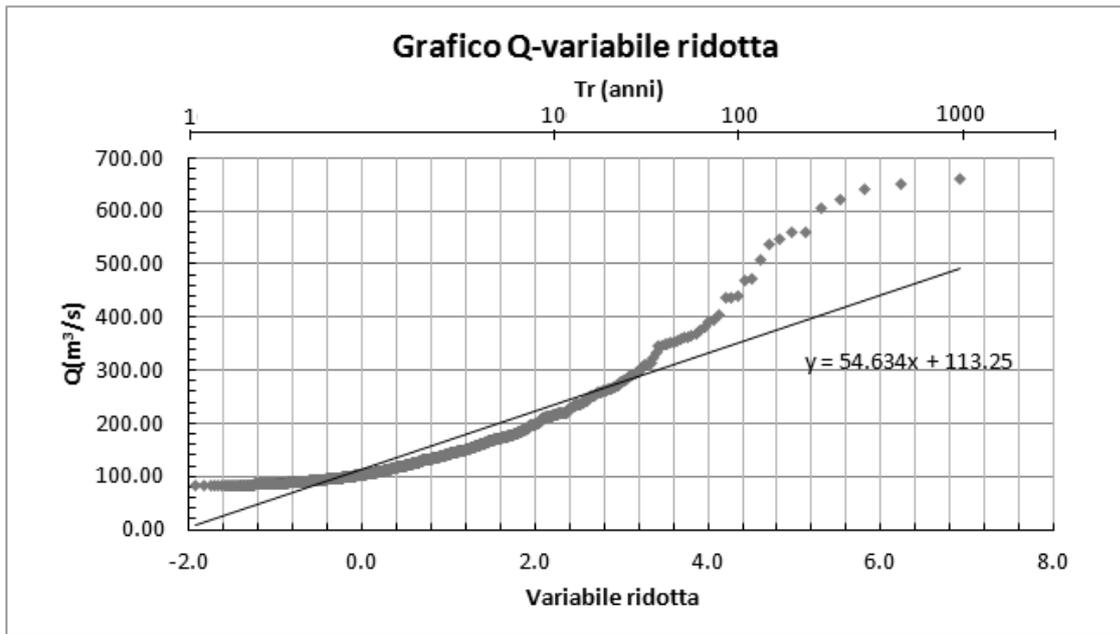


Figura 5: Grafico Q-variabile ridotta

Si è quindi ricavata l'equazione:

$$Y = 54.634x + 113.25$$

Dove:

- Y dipende dalla variabile ridotta;
- X è legato alla portata massima annua.

Si sono potute così ricostruire i valori delle massime portate annue attese in funzione del tempo di ritorno:

Tabella 1: Portate attese nel Bacchiglione in funzione del tempo di ritorno

Tr [anni]	$Q_{\max}$ [m <sup>3</sup> /s]
5	224.5
10	309.4
20	390.9
50	496.4
100	575.5
200	654.2

Ripetendo questa operazione con gli altri 3 corsi d'acqua si è ottenuto:

Tabella 2: Portate attese nel Timonchio, Igna e Orolo in funzione del tempo di ritorno

Tr [anni]	Qmax [m <sup>3</sup> /s]		
	Timonchio	Igna	Orolo
5	103.9	30.8	29.9
10	143.6	40.9	40.2
20	188.9	51.9	56
50	264.2	70.6	78
100	370.2	85.8	97.6
200	405.4	106.3	121.3

### 1.3.2 Estrapolazione delle onde di piena

Avendo a disposizione i valori delle portate orarie dei 1000 anni di eventi sintetici è stato possibile estrapolare alcune onde di piena caratterizzate da specifici periodi di ritorno sia con riferimento alla portata al colmo che per il volume dell'evento:

- 1) Q: Tr=100 anni; V: Tr=50 anni

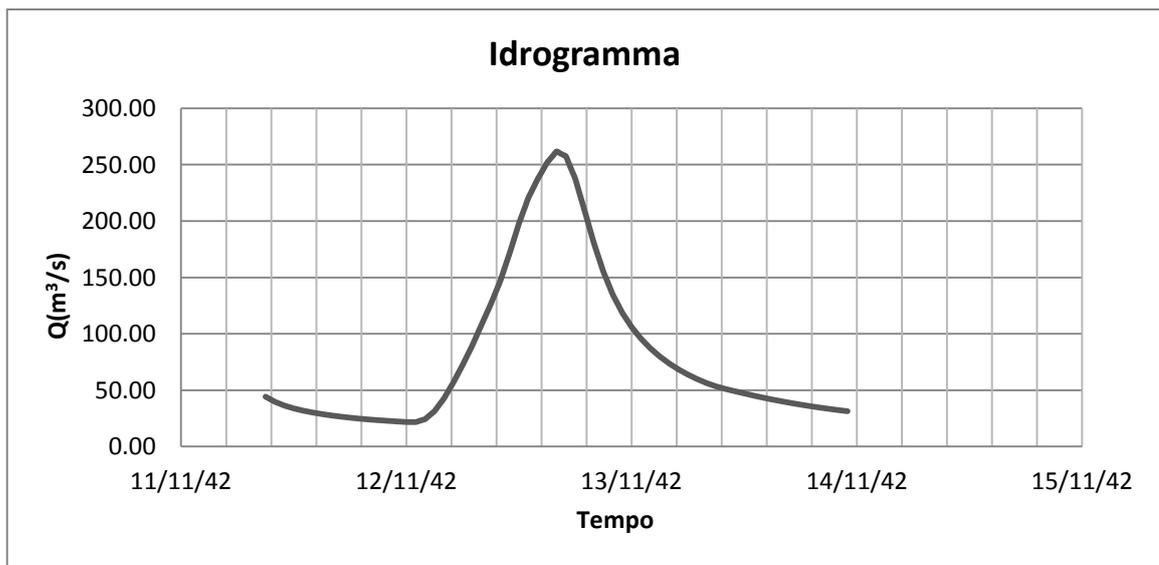


Figura 6: Idrogramma Q con Tr=100 anni, V con Tr=50 anni

- 2) Q: Tr=50 anni; V: Tr=200 anni

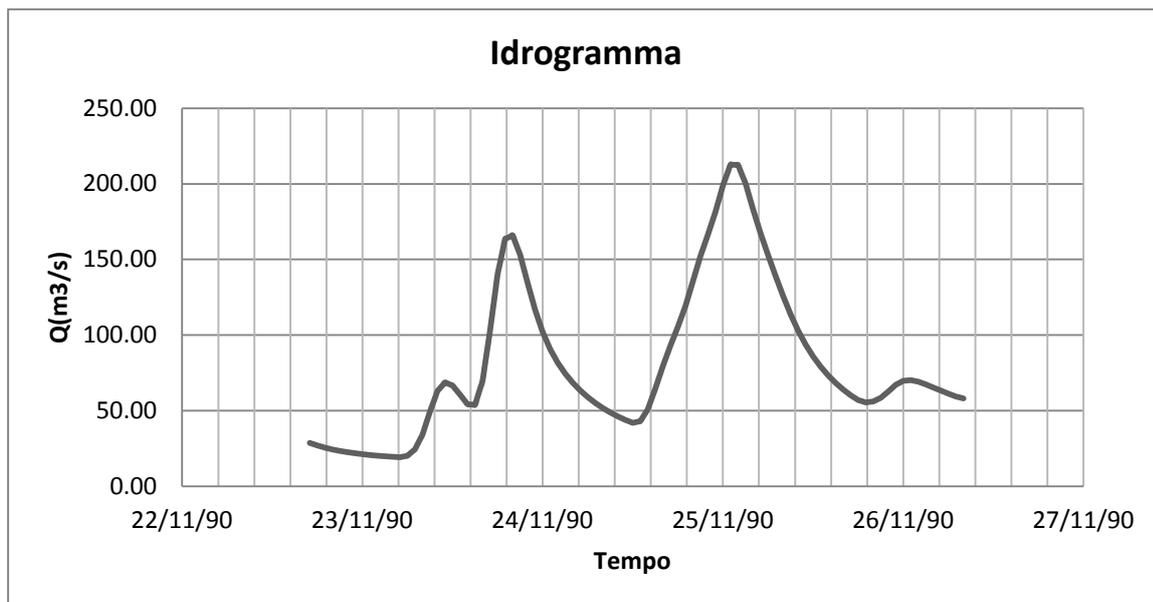


Figura 7: Idrogramma  $Q$  con  $Tr=50$  anni,  $V$  con  $Tr=200$  anni

3)  $Q$ :  $Tr=200$  anni;  $V$ :  $Tr=200$  anni

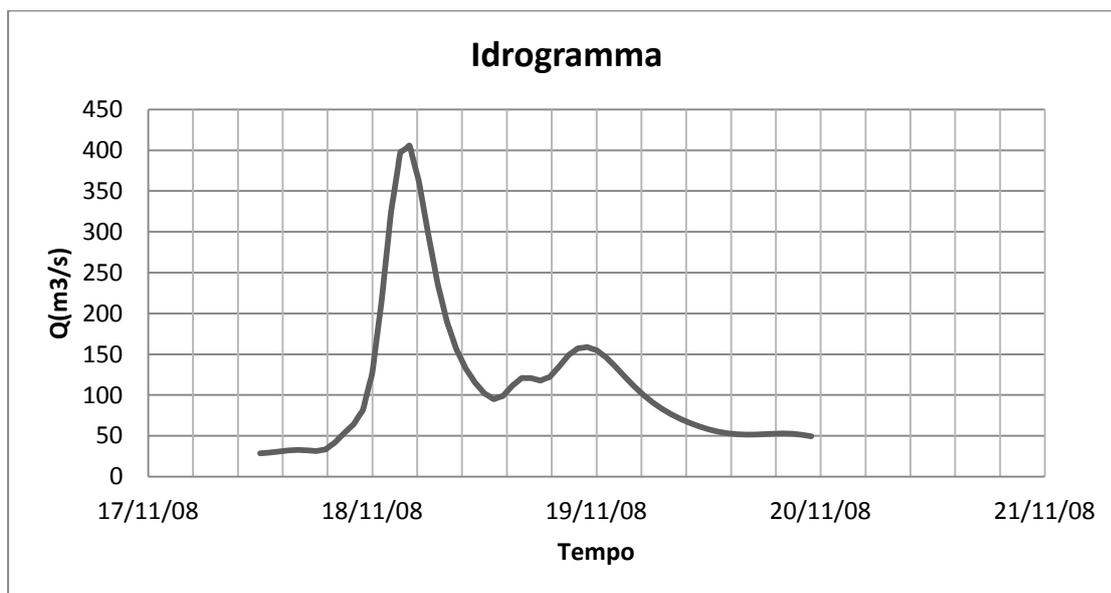


Figura 8: Idrogramma  $Q$  con  $Tr=200$  anni,  $V$  con  $Tr=200$  anni

I precedenti idrogrammi, unitamente a quelli reali registrati durante gli eventi catastrofici del novembre dell'anno 2000 e dell'ottobre del 2010, verranno utilizzati in seguito, sia per valutare la corretta dimensione da assegnare alle varie opere, che per analizzare l'efficienza delle casse nella laminazione delle onde di piena.

## 2) Dimensionamento della cassa d'espansione di Caldogno

La cassa d'espansione in derivazione, che verrà di seguito dimensionata, si trova presso il comune di Caldogno sulla sinistra idrografica del torrente Timonchio; l'opera di imbocco è posta a circa 700 m dall'abitato di Villaverla.



Figura 9: Ubicazione dell'opera (Da: Google, Dati cartografici, 2014)

Per il dimensionamento dell'opera si è fatto riferimento ai valori di portata e volume derivanti dall'analisi idrologica. Le scelte progettuali sono state fatte ponendosi l'obiettivo di massima flessibilità, affidabilità, sicurezza e efficienza delle opere e della cassa.

## 2.1 Caratteristiche generali

Come detto in precedenza, la cassa d'espansione è costituita da un bacino in derivazione e il volume d'invaso è suddiviso in due casse disposte in serie. Sono previsti quindi i seguenti manufatti:

- un'opera di presa che consenta di convogliare la portata liquida del torrente Timonchio all'interno della cassa;
- un restringimento costituito da due quinte poste in alveo che consenta di sostenere i livelli in corrispondenza dell'opera di presa;
- un manufatto di interconnessione tra le due casse costituito da uno scarico di troppo pieno e da uno scarico di fondo;
- un manufatto di interconnessione tra la cassa di monte e il torrente Timonchio costituito da uno scarico di fondo;
- un'opera di restituzione posta a valle della seconda cassa costituita da uno scarico di troppo pieno e da uno scarico di fondo.

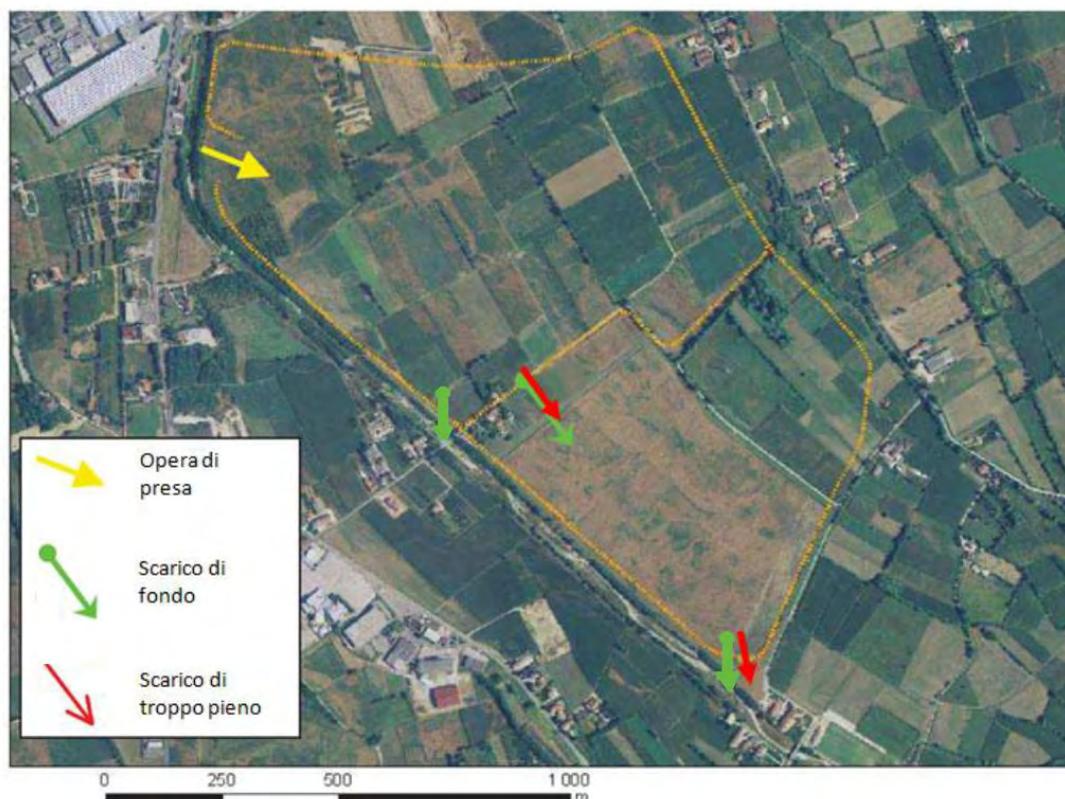


Figura 10: Manufatti idraulici per la regolazione e la gestione della cassa di espansione (Da: Beta Studio & Technital, 'Progetto definitivo del bacino di laminazione lungo il torrente Timonchio in comune di Caldogeno (VI) - Relazione idrologica', 2012)

## 2.2 Geometria delle casse

L'area destinata ad ospitare l'invaso temporaneo per la laminazione delle piene del torrente Timonchio ha un'estensione complessiva di circa 115 ettari e, alla massima regolazione, è capace di invasare un volume d'acqua pari a 3,8 milioni di m<sup>3</sup>, divisi in 2,3 milioni di m<sup>3</sup> (2,8 milioni di m<sup>3</sup> al massimo invaso) per la cassa di monte e 1,5 milioni di m<sup>3</sup> per quella di valle (1,8 milioni di m<sup>3</sup> al massimo invaso). Tali valori sono stati definiti in fase preliminare.

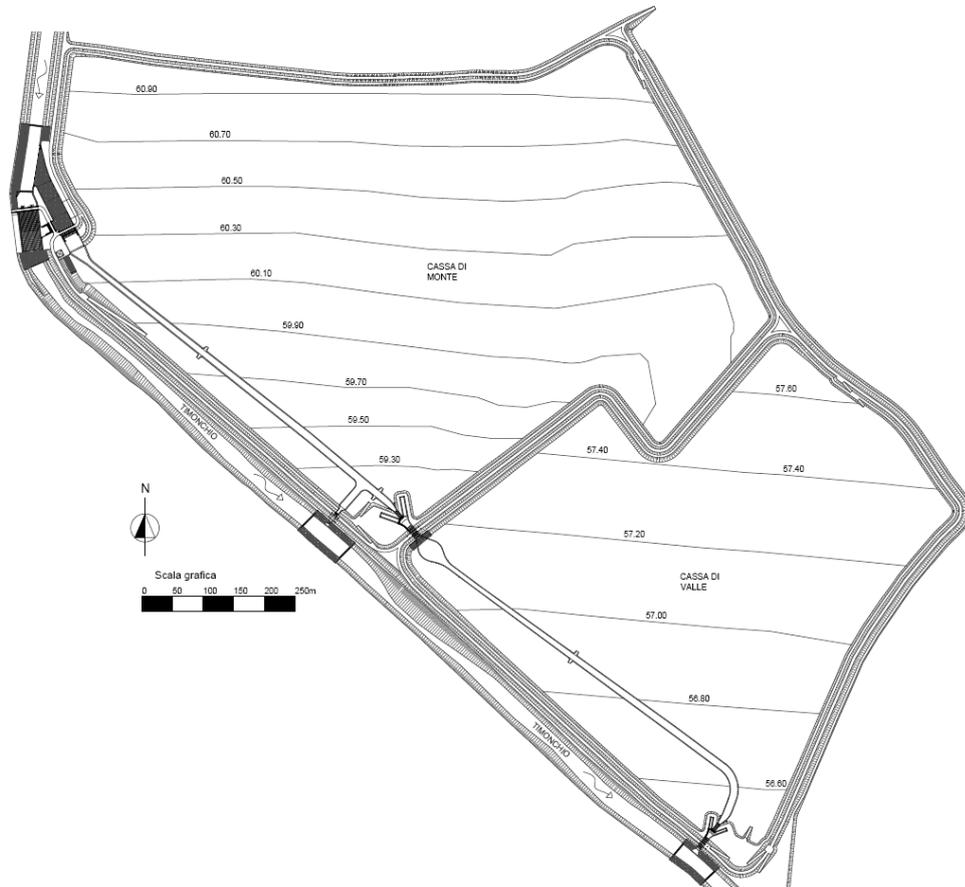


Figura 11: Planimetria generale della cassa di Caldogno

La suddivisione dell'opera di laminazione in due casse disposte in serie consente di ottimizzare la superficie, permettendo di invasare, a parità di altezze massime degli argini, maggiori volumi di acqua rispetto al caso un'unica cassa.

Le curve dei volumi di invaso che caratterizzano le due casse sono:

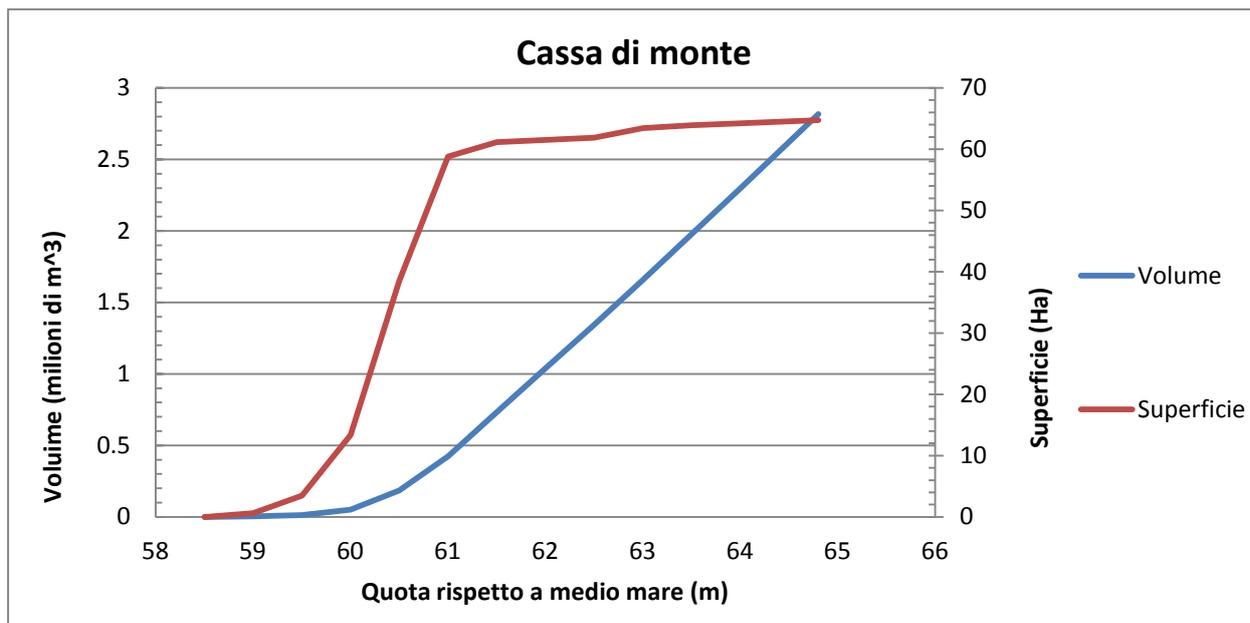


Figura 12: Curva dei volumi di invaso relativa alla cassa di monte (Da: Beta Studio & Technital, 'Progetto definitivo del bacino di laminazione lungo il torrente Timonchio in comune di Caldogno (VI) - Relazione idrologica', 2012)

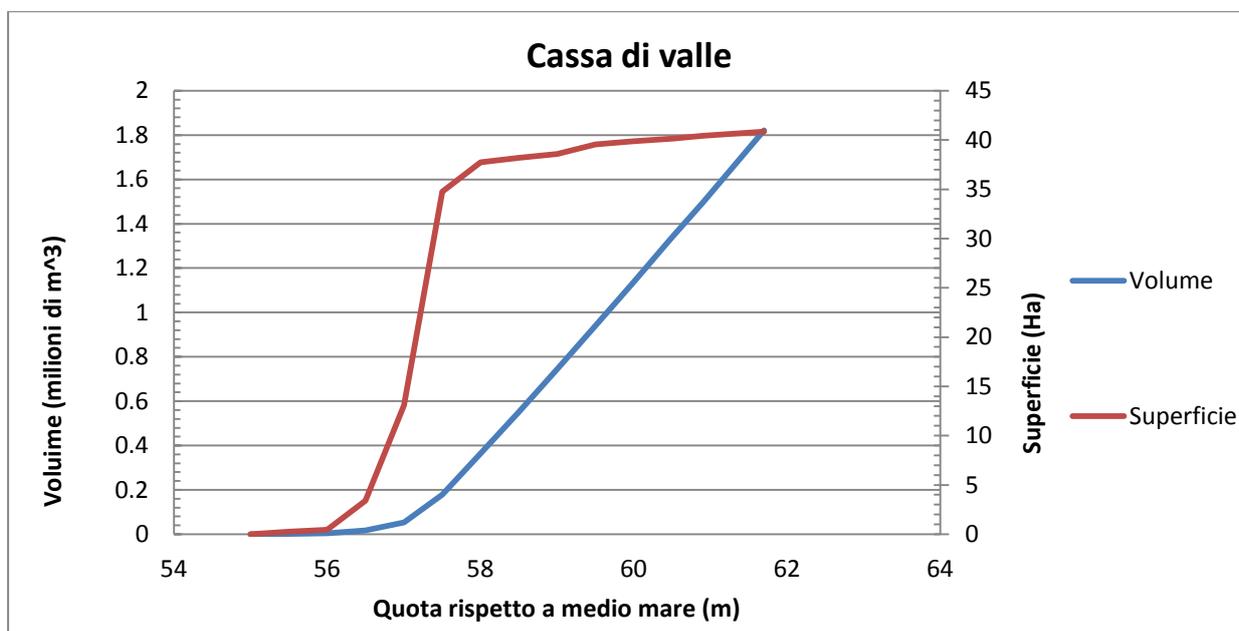


Figura 13: Curva dei volumi di invaso relativa alla cassa di valle (Da: Beta Studio & Technital, 'Progetto definitivo del bacino di laminazione lungo il torrente Timonchio in comune di Caldogno (VI) - Relazione idrologica', 2012)

Per poter raggiungere le quote di progetto decise in fase preliminare è stata prevista una notevole movimentazione di volumi di terreno. Osservando la sezione trasversale AA delle due casse (allegato II) appare chiaro come, in conseguenza degli sbancamenti, le quote della maggior parte della superficie di entrambe le casse risultino

inferiori a quella della linea di talweg del torrente Timonchio, determinando un elevato rischio di impaludamento di entrambi i bacini. Per scongiurare questo problema è sufficiente riportare le quote del terreno ad un'appropriatezza altezza, coincidente con quella del pelo libero del torrente nel caso di portata semipermanente, incrementato di un'altezza di 20 cm. Tale provvedimento va però a modificare le curve dei volumi di invaso e, di conseguenza, il massimo volume di ritenuta:

- cassa di monte: innalzando la quota del fondo cassa fino ad un'altezza minima di +80cm sulla quota di talweg si perde un volume di 669950 m<sup>3</sup>, corrispondente ad una diminuzione del 30% sul volume di massima regolazione e del 24% sul volume di massimo invaso;
- cassa di valle: innalzando la quota del fondo cassa fino ad un'altezza minima di +80cm sulla quota di talweg si perde un volume di 289460 m<sup>3</sup>, corrispondente ad una diminuzione del 20% sul volume di massima regolazione e del 16% sul volume di massimo invaso.

## 2.3 Opera di presa

La scelta di realizzare una cassa in derivazione, anziché una di valle, comporta l'adozione di un'opera di sostegno dei livelli nel corso d'acqua con un'appropriata opera di imbocco. La collocazione e il dimensionamento dei manufatti condizionano notevolmente le modalità di gestione dell'operazione di invaso e di controllo.

L'opera di presa che si è deciso di realizzare è schematizzabile nel seguente modo:

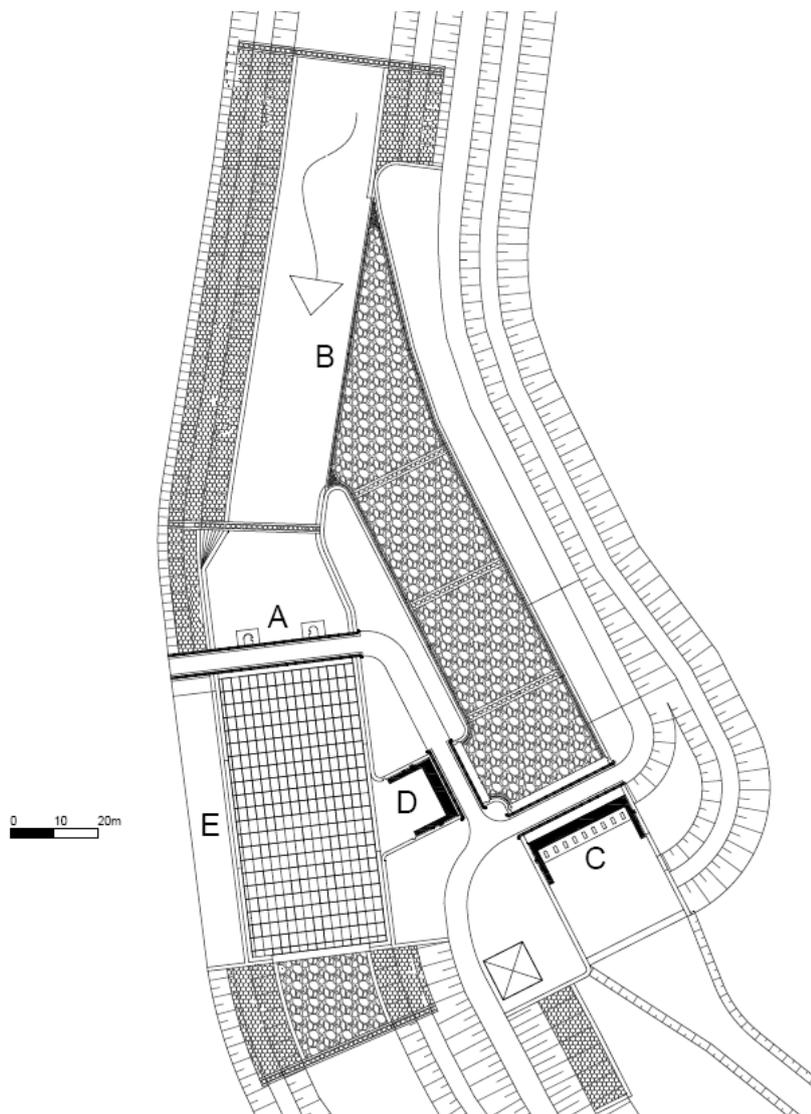


Figura 14: Pianta dell'opera di presa

Dove:

- a) quinte;
- b) imbocco dell'opera di presa;
- c) connessione con la cassa di monte regolata da una paratoia a settore;
- d) restituzione al Timonchio regolata da una paratoia a settore;
- e) vasca di dissipazione.

L'opera di presa in questione è data da un insieme di manufatti. Il sostegno del livello di monte avviene grazie a due quinte che si elevano dal fondo dell'alveo realizzando quindi un restringimento; l'imbocco del canale di derivazione è posto sulla sinistra idrografica e risulta sopraelevato rispetto alla quota di talweg del fiume: tale scelta progettuale è stata fatta sia per limitare l'ingresso dei sedimenti all'interno del canale stesso, sia per far sì che l'opera non venga interessata dalle portate di magra. La decisione di ubicare la soglia di imbocco in quel lato del fiume è legata al fatto che solo da quella parte è stato possibile reperire gli ettari di terreno in cui non fossero presenti centri abitati necessari ad ospitare la cassa d'espansione. Per consentire la massima flessibilità della costruzione si è stabilito di porre un canale di restituzione in grado di consentire un bypass del restringimento dell'alveo. Sia la restituzione che la connessione alla cassa sono regolate da due organi mobili costituiti da due paratoie a settore in grado di operare anche in presenza di trasporto solido; le larghezze delle paratoie coincidono con quelle dei rispettivi canali (di derivazione e di restituzione) aventi sezione rettangolare. A valle delle quinte è presente una vasca di dissipazione, realizzata con lo scopo di impedire l'erosione delle sponde e del fondo.

### **2.3.1 Criteri e iter progettuale**

Le ragioni per cui si è optato per questa soluzione progettuale sono essenzialmente tre:

- **Massima sicurezza:** per essere in linea con tale principio si è innanzitutto deciso, al fine di sostenere il livello in corrispondenza dell'opera di presa, di restringere con un manufatto fisso costituito da due quinte la sezione del corso d'acqua anziché inserire una traversa sfiorante sporgente dal fondo, cosa che avrebbe comportato l'arresto del materiale solido che si associa ai deflussi di piena.

Inoltre, il sistema a quinte, al contrario ad esempio di una paratoia che spicca da una soglia posta sul fondo, garantisce in ogni condizione il funzionamento univoco dell'opera senza interventi del personale. Sempre per garantire la massima sicurezza si è stabilito di utilizzare delle paratoie a settore trascinabili che consentano di limitare i tiranti in alveo anche in caso di mancato funzionamento di queste ultime.

- **Massima flessibilità:** il soddisfacimento di questa esigenza è garantito dallo schema stesso dell'opera di presa in quanto, avendo predisposto la possibilità di bypassare le quinte, si ha la possibilità di regolare il livello di monte a seconda delle esigenze specifiche; gli organi mobili consentono di tenere inoltre quanto più costante la massima portata tollerabile a valle.
- **Minor costo:** quest'ultima finalità, come spesso accade, si contrappone alle precedenti; il dimensionamento dell'opera di imbocco, di restituzione, delle quinte delle paratoie è stato fatto cercando sia di contenere le dimensioni di queste ultime (in quanto costituiscono una delle parti più costose dell'opera di presa) sia per limitare il sovralzato del tirante nel torrente Timonchio rispetto allo stato di fatto, consentendo di non dover incrementare eccessivamente la quota delle arginature a monte del restringimento.
- **Maggior facilità di manovra e manutenzione:** la scelta delle paratoie a settore è in linea anche con questi due presupposti poiché tali strutture sono caratterizzate da assenza di vani che possono essere ostruiti dai sedimenti nelle murature laterali, ridotto coefficiente di attrito al perno di appoggio, oltre a richiedere un limitato sforzo di sollevamento; per consentire la manutenzione e il collaudo dell'opera sono state previste delle gargamature sia in corrispondenza delle quinte che nelle sezioni immediatamente a monte e a valle di entrambe le paratoie.

Tenendo presenti tali criteri, dopo aver deciso lo schema semplificato, si è partiti per prima cosa da un predimensionamento facendo riferimento al solo bilancio di energia generalizzato; una volta stabilita la configurazione che soddisfacesse nel miglior modo possibile le esigenze progettuali, si sono verificate con maggior precisione, servendosi di un modello matematico idraulico di tipo monodimensionale, le performance dell'opera. Con lo scopo di accertarsi che le scelte fatte consentissero un

utilizzo ottimale della cassa, con un foglio di calcolo elettronico si è simulato l'effetto di laminazione che la cassa d'espansione aveva su delle onde di piena.

### 2.3.2 Predimensionamento con il bilancio di energia

Il primo passo per arrivare ad un corretto dimensionamento dell'opera di presa è consistito in un predimensionamento applicando un bilancio di energia e servendosi di una trattazione monodimensionale. L'ipotesi che sta alla base dei seguenti calcoli è che il fenomeno della sottrazione di portata da un canale prismatico non determini dissipazioni di energia. Il fatto di trattare il problema come monodimensionale risulta effettivamente corretto in quanto, come si verificherà in seguito, si ha a che fare con una corrente che si mantiene lenta in ogni situazione: essendo comandata a moto vario sia da monte che da valle, quest'ultima è infatti in grado di adattarsi alla deviazione planimetrica.

Per ottenere i risultati in maniera semplice e immediata si è utilizzato un foglio di calcolo elettronico. Lo schema semplificato al quale si è fatto riferimento è il seguente:

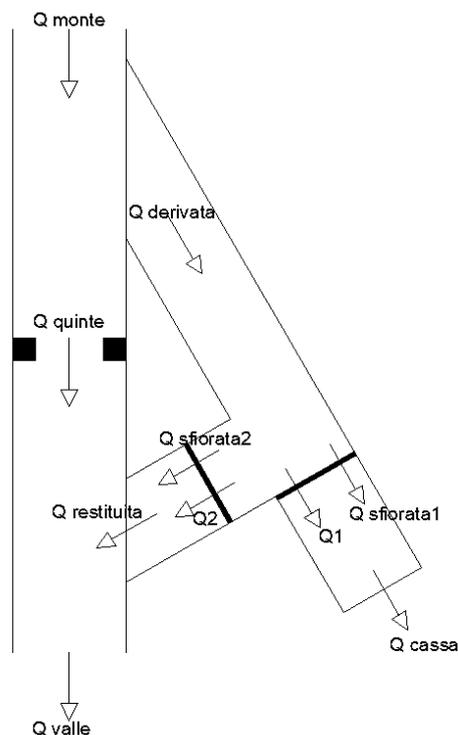


Figura 15: Schema di calcolo per il predimensionamento con il bilancio di energia

Sulla base dei valori geometrici che potevano essere fatti variare, il foglio di calcolo restituiva il valore di  $Q_{quinte}$ ,  $Q_1$ ,  $Q_{sfiorata1}$ ,  $Q_2$ ,  $Q_{sfiorata2}$ ,  $Q_{valle}$ ,  $Q_{cassa}$  e  $Q_{monte}$  per ogni valore del tirante che si verificava nell'alveo in corrispondenza dell'opera di presa e per ognuna delle 4 configurazioni di apertura o chiusura delle paratoie, ovvero:

- Caso a: paratoia 1 chiusa, paratoia 2 chiusa;
- Caso b: paratoia 1 chiusa, paratoia 2 aperta;
- Caso c: paratoia 1 aperta, paratoia 2 chiusa;
- Caso d: paratoia 1 aperta, paratoia 2 aperta.

Le formule utilizzate sono le seguenti:

$$Q_{quinte} = C_{q1} B_{quinte} \sqrt{2g} h^{3/2} \quad (7)$$

$$Q_{pataoia1} = \begin{cases} C_{q1} B_{paratoia1} \sqrt{2g(h - petto)} & \text{se } h > petto \\ Q_{pataoia1} = 0 & \text{se } h \leq petto \end{cases} \quad (8)$$

$$Q_{sfiorata1} = \begin{cases} C_{q2} B_{paratoia1} \sqrt{2g}(h - petto - h_{paratoia1})^{3/2} & \text{se } h > petto + h_{paratoia1} \\ Q_{sfiorata1} = 0 & \text{se } h \leq petto + h_{paratoia1} \end{cases} \quad (9)$$

$$Q_{pataoia2} = \begin{cases} C_{q1} B_{paratoia2} \sqrt{2g(h - petto)} & \text{se } h > petto \\ Q_{pataoia2} = 0 & \text{se } h \leq petto \end{cases} \quad (10)$$

$$Q_{sfiorata2} = \begin{cases} C_{q2} B_{paratoia2} \sqrt{2g}(h - petto - h_{paratoia2})^{3/2} & \text{se } h > petto + h_{paratoia2} \\ Q_{sfiorata2} = 0 & \text{se } h \leq petto + h_{paratoia2} \end{cases} \quad (11)$$

Dove si è assunto:

- $C_{q1} = 0.385$  (valore che caratterizza lo stramazzo in parete grossa);
- $C_{q2} = 0.48$  (valore che caratterizza lo stramazzo in parete sottile);

- $h$  = tirante nell'alveo in corrispondenza dell'opera di presa;
- $petto$  = sopraelevazione della quota del fondo del canale di derivazione rispetto alla quota di talweg del torrente Timonchio in corrispondenza dell'imbocco dell'opera di presa;
- $h_{paratoia1}$  = altezza rispetto al fondo del canale di derivazione della paratoia che separa quest'ultimo dalla cassa di monte;
- $h_{paratoia1}$  = altezza rispetto al fondo del canale di derivazione della paratoia che separa quest'ultimo dal canale di restituzione.

Definite queste espressioni, valide per ognuno dei 4 casi principali, si sono scritte le equazioni che precisavano i valori di  $Q_{valle}$ ,  $Q_{cassa}$  e  $Q_{monte}$  per ogni specifica situazione:

Tabella 3: Combinazioni considerate

Caso	Descrizione	$Q_{valle}$	$Q_{cassa}$	$Q_{monte}$
A	paratoia 1 chiusa paratoia 2 chiusa	$Q_{quinte} + Q_{sfiorata2}$	$Q_{sfiorata1}$	$Q_{valle} + Q_{cassa}$
B	paratoia 1 chiusa paratoia 2 aperta	$Q_{quinte} + Q_{paratoia2}$	$Q_{sfiorata1}$	$Q_{valle} + Q_{cassa}$
C	paratoia 1 aperta paratoia 2 chiusa	$Q_{quinte} + Q_{sfiorata2}$	$Q_{paratoia1}$	$Q_{valle} + Q_{cassa}$
D	paratoia 1 aperta paratoia 2 aperta	$Q_{quinte} + Q_{paratoia2}$	$Q_{paratoia1}$	$Q_{valle} + Q_{cassa}$

Dopo aver impostato in questo modo il foglio di calcolo, è stato possibile valutare gli effetti della variazione delle altezze e delle larghezze delle paratoie, della sporgenza delle quinte dalle sponde e della sopraelevazione della quota del fondo del canale di derivazione; procedendo per tentativi si è ritenuta accettabile la seguente configurazione, in quanto rispondeva a tutti i criteri di progettazione:

- Larghezza quinte = 13 m;
- Petto = 1,4 m;
- Larghezza paratoia1 = 25 m;
- Altezza paratoia1 = 3,3 m;
- Larghezza paratoia2 = 15 m;
- Altezza paratoia2 = 3,3 m.

Avendo a disposizione tutti i valori numerici è stato possibile ricostruire un diagramma che legasse il valore della portata di monte al tirante idrico verificantesi in corrispondenza dell'imbocco dell'opera di presa:

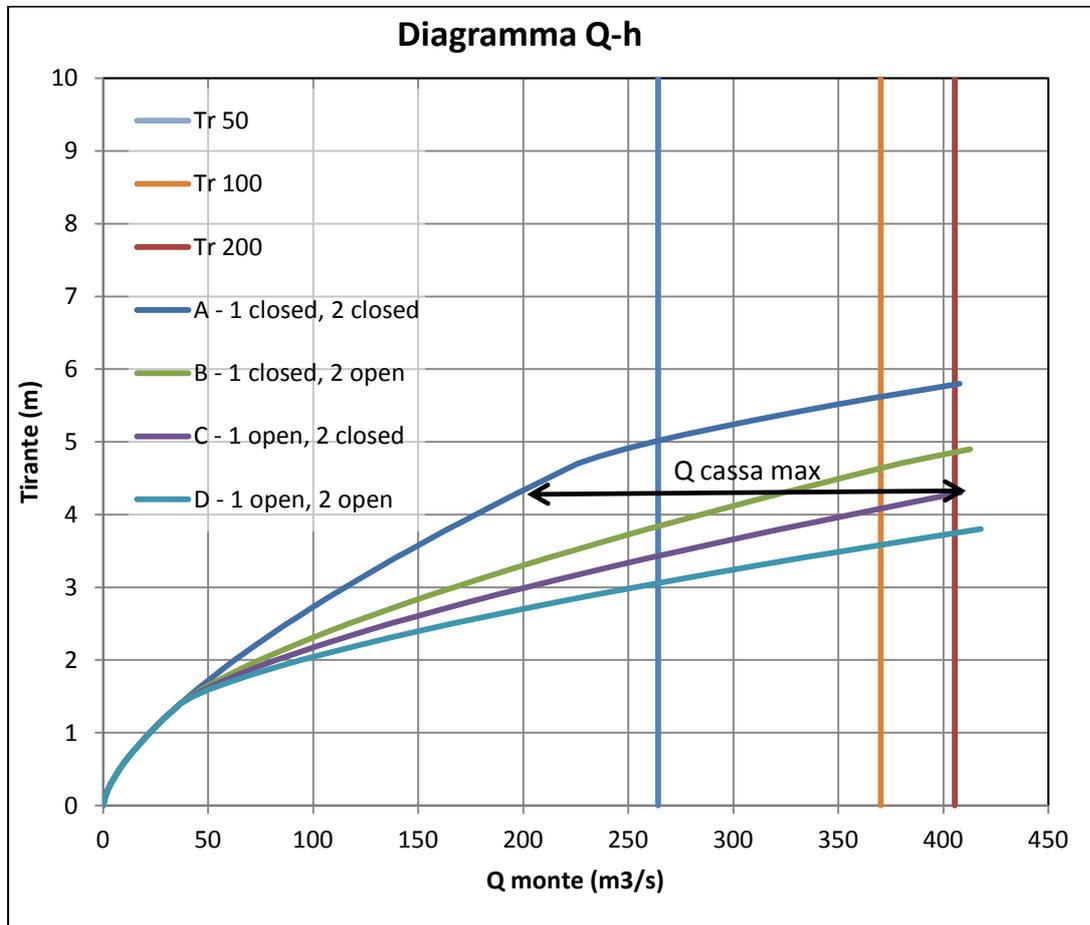


Figura 16: Diagramma Q-Tirante relativo all'opera di presa

Questo grafico risultata particolarmente utile sia per stimare i massimi valori dei tiranti che si possono verificare (essenziali per valutare l'altezza da assegnare alle quote massime delle arginature), sia per ottenere in maniera immediata la portata che può essere derivata in cassa: fissata una quota del tirante, la massima portata che può essere laminata è data dalla differenza tra la curva viola e quella blu, ovvero deriva dal confronto tra il caso in cui entrambe le paratoie a settore sono serrate con quello in cui è chiusa solo quella che impedisce la restituzione al torrente Timonchio.

L'aver riportato nel diagramma anche i valori delle portate che caratterizzano le portate con tempi di ritorno pari a 50, 100 e 200 anni, consente di concludere che questa configurazione risulta effettivamente funzionale agli scopi prefissati: a fronte di un

tirante massimo di 5,8 m la struttura, nel caso di portata in ingresso nel sistema caratterizzata da un tempo di ritorno bicentenario, riesce a convogliare in cassa circa 210 m<sup>3</sup>/s a cui corrisponde una portata di valle di circa 195 m<sup>3</sup>/s.

### 2.3.3 Verifica dei valori ottenuti nel predimensionamento con Hec-Ras

Il software Hec-Ras, sviluppato dall'Hydrologic Engineering Center dell'US Corps of Engineers, è un codice di calcolo con interfaccia grafica che consente la trattazione di problemi unidimensionali sia di moto permanente che vario per i quali è in grado di determinare i profili di correnti in regime di corrente lenta, rapida e mista con sezioni di qualsiasi forma ed in presenza di manufatti idraulici quali pile di ponti, botti a sifone, traverse con luci a sfioro libero o battente.

#### 2.3.3.1 Calcolo dei profili

Il procedimento con il quale il modello integra i profili si articola in una serie di passaggi che verranno ora presentati. Con riferimento a due generiche sezioni di un alveo caratterizzato dalla presenza di golene, lo schema di calcolo diventa:

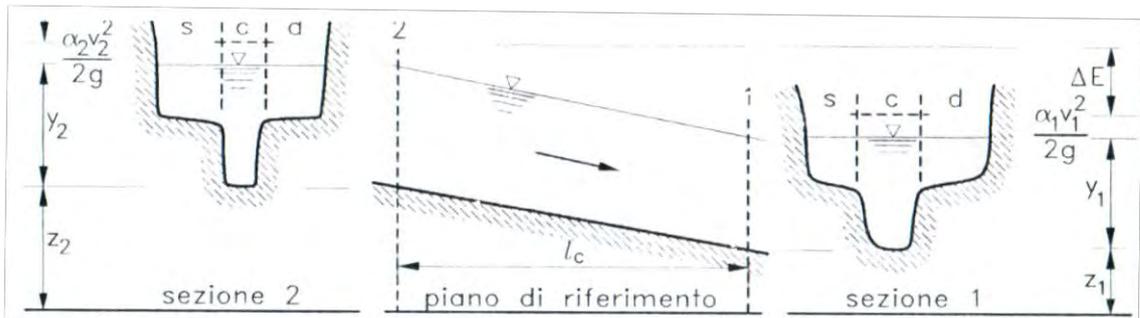


Figura 17: Schema di riferimento (Da: Da Deppo L., Datei C. e Salandin P., 'Sistemazione dei corsi d'acqua', Edizioni Progetto, Padova, 2012)

Le 2 equazioni che governano il moto sono:

$$\begin{cases} y_1 + z_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = y_2 + z_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} - \Delta E \\ \Delta E = \Delta x \bar{j} + k \left| \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} - \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} \right| \end{cases} \quad (12)$$

Dove:

- $\Delta E$  rappresenta la perdita di energia tra le sezioni 1 e 2;
- $\Delta x$  definisce la distanza tra le 2 sezioni;
- $K$  è un coefficiente che misura le perdite d'energia localizzate per allargamento o restringimento di sezione; assume un valore compreso tra 0.1 e 0.2 nel caso di corrente rapida, mentre per moti subcritici i valori consigliati sono quelli riportati nella successiva tabella:

Tabella 4: Valori assunti dal coefficiente  $K$

	Restringimento	Allargamento
Graduale	0.1	0.3
Sezioni di ponti	0.3	0.5
Brusco	0.6	0.8

- $\alpha$  è il coefficiente correttivo di Coriolis che tiene conto della non uniforme distribuzione delle velocità lungo la verticale.

A causa della presenza delle golene, la distanza fra le due sezioni può essere diversa percorrendo le varie parti, motivo per cui  $\Delta x$  è ottenuta pesando le 3 distanze  $l_{\text{sinistra}}$ ,  $l_{\text{centro}}$ ,  $l_{\text{destra}}$ :

$$\Delta x = \frac{l_s \bar{Q}_s + l_c \bar{Q}_c + l_d \bar{Q}_d}{\bar{Q}_s + \bar{Q}_c + \bar{Q}_d} \quad (13)$$

dove con  $\bar{Q}_i$  si intendono i valori medi delle portate nel tratto considerato.

Poiché la capacità di portata è definita dall'espressione:

$$C = \frac{Q}{\sqrt{J}} \quad (14)$$

facendo riferimento alla formula di Gauckler-Strickler e accettando sia la semplificazione che ci si possa ricondurre al caso di moto uniforme in regime di parete scabra, sia che il valore di  $k_s$  venga concettualizzato e che non rappresenti più quindi la sola resistenza a moto uniforme,  $C$  diventa:

$$C = K_s A R_H^{2/3} \quad (15)$$

Indicando con  $C_{\text{tot}}$  la capacità totale, pari alla somma delle capacità delle 3 parti, il coefficiente correttivo di Coriolis è definito da:

$$\alpha = \frac{\left(\frac{C_s^3}{A_s^2} + \frac{C_c^3}{A_c^2} + \frac{C_d^3}{A_d^2}\right) A_{tot}^2}{C_{tot}^3} \quad (16)$$

Noti i dati di input (portata totale e quote nelle 2 sezioni) il procedimento che consente di integrare il profilo è il seguente:

- 1) si assume un valore di primo tentativo di  $y'^2$ ;
- 2) si calcola la capacità totale di portata  $C_t$  e il carico cinetico  $E'^2$  tramite l'equazione:

$$E'_{n+1} = y'_{n+1} + z_{n+1} + \frac{Q^2}{2gA'^2_{n+1}} \quad (17)$$

- 3) si calcola  $\Delta E$  utilizzando la seconda delle equazioni che governano il moto;
- 4) si inserisce il valore di  $\Delta E$  trovato nella seconda equazione che governa il moto e tramite l'espressione  $\delta E = E'_{n+1} - E_{n+1}$  si calcola la quantità  $\delta E$  che consente di giudicare il grado di approssimazione ottenuto;
- 5) se  $\delta E$  non è sufficientemente piccolo, si calcola la correzione  $\Delta y$  da apportare al valore ipotizzato  $y'^2$  tramite:

$$\Delta y = - \frac{E'_{n+1} - \left[ E_n + \frac{1}{2} (J_n + J_{n+1}) \Delta x \right]}{1 - \frac{Q^2 b_{n+1}}{g A_{n+1}^3}} \quad (18)$$

### 2.3.3.2 Opzioni per la caratterizzazione dei profili

Al fine di simulare con un modello monodimensionale certe caratteristiche del moto che sono tipicamente bidimensionali, Hec-Ras prevede la possibilità di inserire delle opzioni fra i dati delle sezioni che rendono i risultati più aderenti alle realtà; ad esempio, nel caso di brusco allargamento di sezione (come immediatamente a valle delle quinte), lateralmente si formano delle zone vorticosose che non contribuiscono al moto della corrente. Nella sezione, quindi, solo una parte dell'area è attiva, mentre la residua è occupata da acqua stagnante che non deve essere considerata per la valutazione della velocità media nella sezione.

Tra le varie opzioni per delimitare l'area attiva, quella che è stata utilizzata per ricostruire il moto nei pressi delle quinte è l'*ineffective flow areas*: questa consiste nel fissare uno o due punti di coordinate (x, WaterSurface) nella sezione, uno a sinistra e

uno a destra in modo che l'area liquida oltre questi due punti sia non attiva se la quota del pelo libero WS è minore del valore fissato.

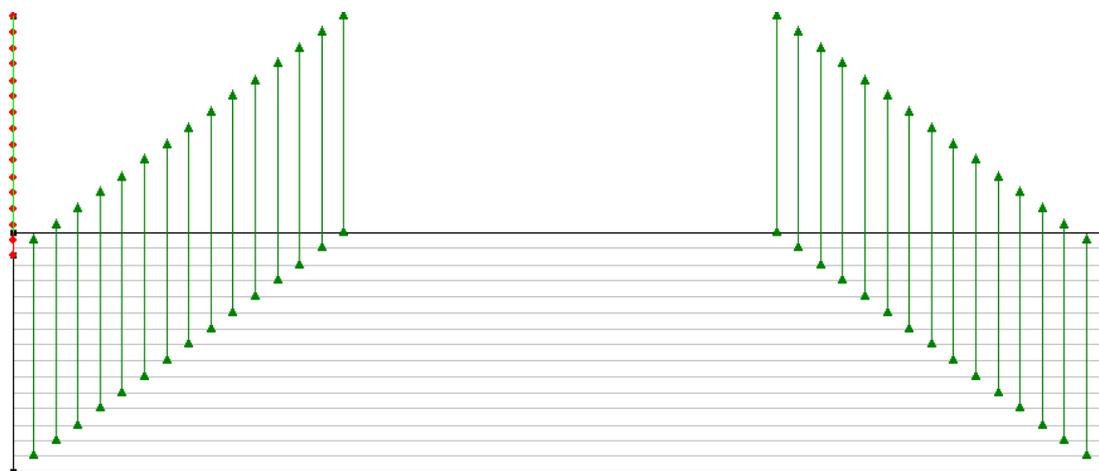


Figura 18: Esempio di applicazione delle ineffective flow areas nel tratto a valle delle quinte

Inoltre è possibile includere automaticamente delle sezioni interpolate fra le estreme di un tratto, in modo da ridurre il passo spaziale  $\Delta x$ . L'algoritmo di interpolazione traccia le corde che uniscono i punti più significativi delle sezioni estreme del tratto e quindi ne costruisce di nuove basandosi su di esse.

Le corde principale sono le cinque (3 nel caso non siano presenti golene) che uniscono i punti estremi delle due sezioni, i punti che delimitano l'alveo principale e i punti di minor quota; le corde secondarie sono generate automaticamente dal programma unendo i punti esistenti della sezione di monte e di quella di valle con punti interpolati (in modo proporzionale alla distanza fra le corde principali) sulla sezione opposta:

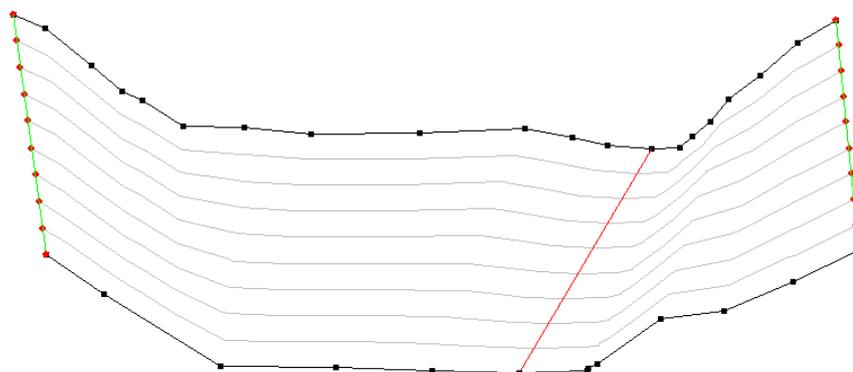


Figura 19: Esempio di interpolazione tra 2 sezioni consecutive

Anche i valori dei coefficienti di Strickler sono interpolati in modo simile, facendo riferimento alle corde principali. Le aree non attive vengono interpolate solo se previste in entrambe le sezioni che delimitano il tratto.

### 2.3.3.3 Calcoli idraulici in corrispondenza dell'attraversamento di un ponte

Il calcolo del profilo nel tratto di passaggio di un ponte viene effettuato dal software dividendo il tratto in corrispondenza del ponte in tre zone:

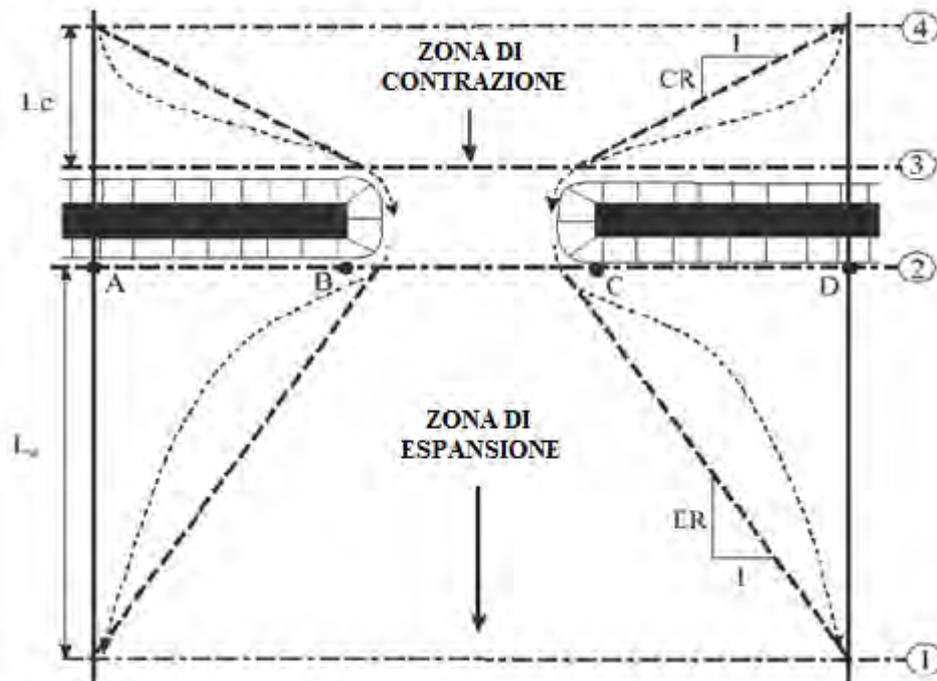


Figura 20: Tratto di contrazione e di espansione rispettivamente a monte e a valle di un restringimento di sezione

Hec-Ras considera il tratto compreso fra la sezione 1 a valle, in cui si è esaurita l'espansione della corrente uscente dal restringimento, e la sezione 4 a monte, dove inizia la contrazione. I tratti 1-2 e 3-4 sono risolti col bilancio energetico usuale, dovendo avere però l'accortezza di usare l'opzione *ineffective flow area* per delimitare l'area attiva e escludendo la parti laterali che non contribuiscono al moto della corrente.

Il tratto 2-3 può venir risolto con 4 metodi diversi, validi in generale per correnti di classe A e B: bilancio energetico, teorema della quantità di moto, metodo di Yarnell, metodo WSPRO.

In particolare, facendo riferimento al metodo scelto per trattare l'attraversamento delle quinte, il teorema di conservazione della quantità di moto prende in esame il volume di controllo compreso tra le sezioni 2 e 3; il principio si esprime quindi come:

$$SF_3 = SF_2 + F_{f_{3-2}} - W_{x_{3-2}} + R_D \quad (19)$$

dove:

- $R_D$  rappresenta la reazione della pila alla spinta idrodinamica  $F_D$  esercitata dalla corrente;
- $SF$  rappresenta la spinta totale;
- $F$  rappresenta la forza d'attrito;
- $W$  rappresenta la componente del peso proiettata nel direzione del moto

La spinta idrodinamica è esprimibile nella forma:

$$F_D = c_D \left( forma, R_e, F_r, \frac{e_s}{D} \right) A \rho \frac{U^2}{2} \quad (20)$$

Nonostante in generale il coefficiente di resistenza idrodinamica  $c_D$  si funzione di tutti e 4 i parametri, nel caso di correnti fluviali viene a dipendere in modo rilevante dalla sola forma della pila e, nel caso di forma squadrata assume il valore 2.

#### 2.3.3.4 Applicazione al caso in esame

Avendo a diposizione le rilevazioni di alcune sezioni significative del torrente Timonchio, una volta scaricata la carta tecnica regionale in scala 1:5000 dal sito della regione Veneto, è stato possibile ricostruire in Hec-Ras l'andamento plano-altimetrico dell'alveo.

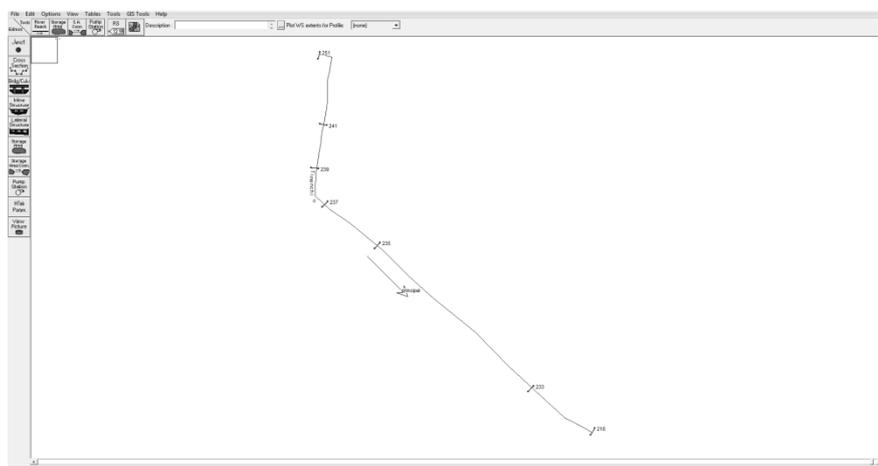


Figura 21: Rappresentazione schematica del tratto di torrente in esame

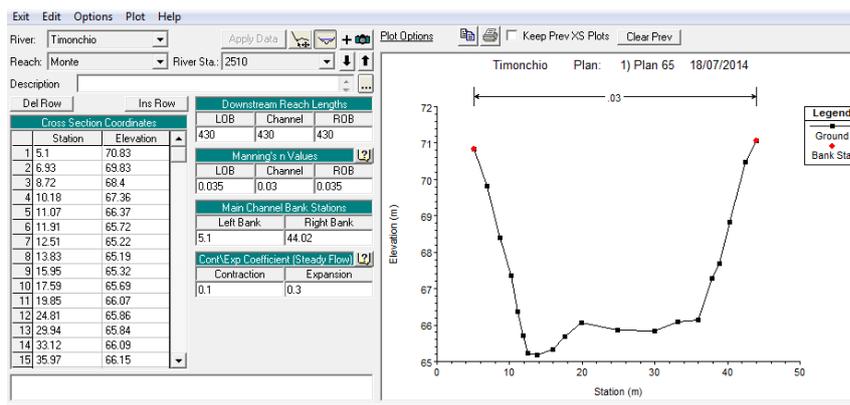


Figura 22: Esempio di sezione

Dopo aver inserito questi dati si è proceduto con l'inserimento delle strutture relative all'opera di presa. Si fa di seguito riferimento alla configurazione ottimale trattata in precedenza, ricavata utilizzando il foglio di calcolo elettronico.

Il restringimento necessario al sostenimento dei livelli è stato rappresentato inserendo un elemento ponte, in cui le quinte corrispondevano alle spalle.

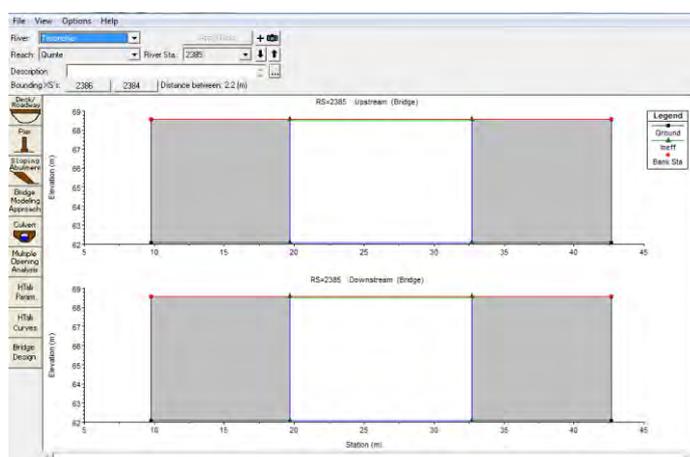


Figura 23: Schematizzazione delle quinte

Tra i 4 possibili metodi utilizzabili per trattare il moto attraverso il restringimento, si è deciso di applicare il principio di conservazione della quantità di moto, ponendo il coefficiente di resistenza idrodinamica  $C_d$  pari a 2.

Per quanto riguarda l'esclusione delle aree che non contribuiscono al moto, si è fatta l'ipotesi fondamentale che la corrente si apra seguendo un rapporto 1:3; sulla base di questa assunzione si è quindi ottenuto che la lunghezza necessaria affinché la corrente

potesse espandersi fino a raggiungere le sponde della vasca di dissipazione fosse pari a 29.85 m.

Per collegare il canale di derivazione e quello di restituzione al torrente Timonchio è stato utilizzato l'elemento *junction*, il quale consente di schematizzare sia le derivazioni che le confluenze. Dal punto di vista computazionale, si è imposto di applicare il bilancio energetico nel caso della derivazione, mentre per la confluenza si è impiegato il teorema della quantità di moto per la difficoltà nella valutazione delle perdite di energia per l'immissione.

Per poter rappresentare le paratoie a settore sono state inserite due *inline structure* caratterizzate da una *radial gate* avente dimensione coincidente con quella della rispettiva paratoia.

Unendo tutti gli elementi si è ottenuta la schematizzazione seguente dell'opera di presa:

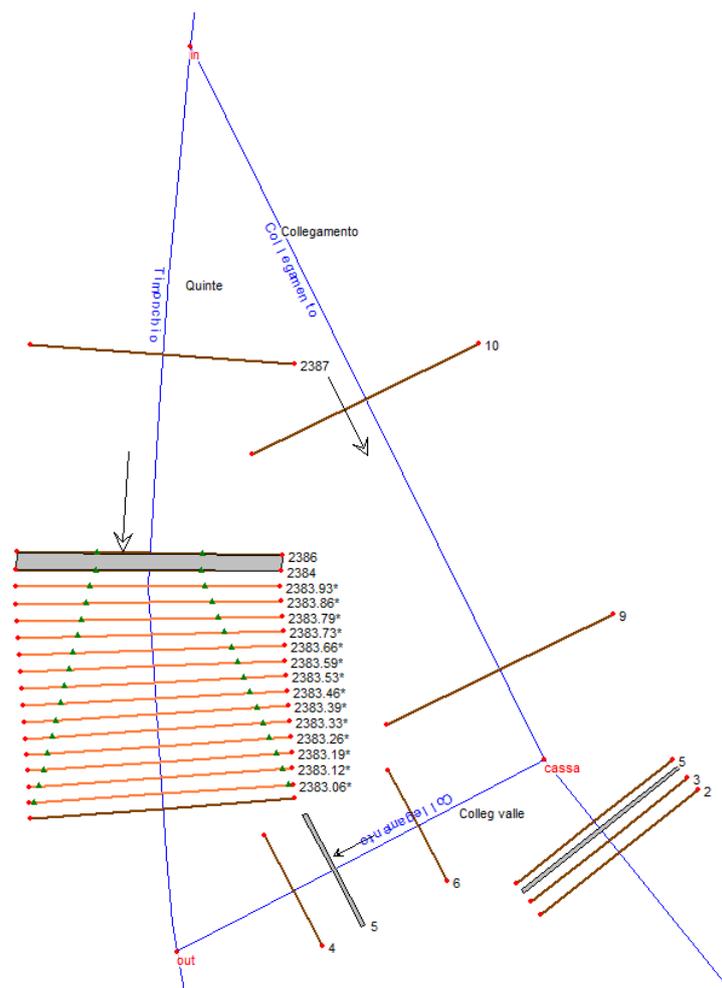


Figura 24: Schematizzazione dell'opera di presa con Hec-Ras

Una volta caratterizzato il dominio è stato quindi possibile effettuare l'analisi a moto permanente con una serie di valori di portate, prendendo in esame le diverse configurazioni aperto/chiuso delle paratoie.

Essendo disponibile anche un'interfaccia grafica per la visualizzazione dei profili risultanti, è stato anche possibile individuare l'ascissa alla quale si determinava il risalto idraulico, valore fondamentale per stabilire la necessità o meno di inserire dei denti dissipatori all'interno della vasca posta a valle delle quinte.

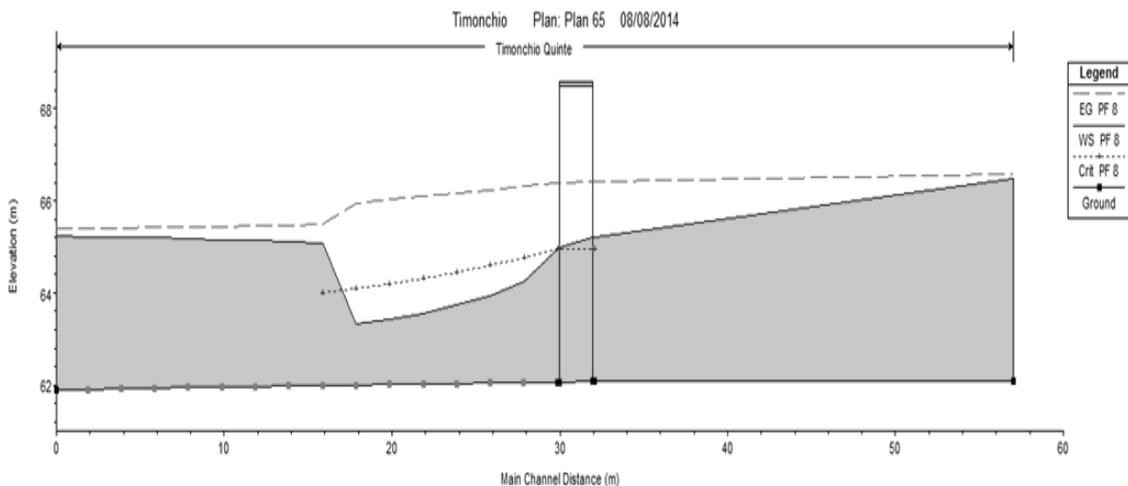


Figura 25: Esempio di visualizzazione del profilo risultante (corrisponde in particolare al caso C con  $Q_{monte}=405.4 \text{ m}^3/\text{S}$ )

È inoltre stato registrato se e quando si verificava un fenomeno di rigurgito in corrispondenza del canale di restituzione.

Tabella 5: Valori ottenuti con Hec-Ras, relativi al nodo di presa

caso	$Y_{monte}$	$Q_{monte}$	$Q_{valle}$	$Q_{quinte}$	$Q_{cassa}$	$Q_{restituita}$	Risalto ?	Risalto completo?	Rigurgito?
A	1.77	50	50	50	0	0	si	no(6)	no
	2.77	100	100	100	0	0	si	no(10)	si
	3.62	150	150	150	0	0	si	no(12)	si
	4.31	200	200	200	0	0	si	no(13)	si
	4.95	264.2	249.1	240.18	15.04	8.98	si	no(13)	si
	5.16	300	272.3	255.78	27.63	16.59	si	no(11)	si
	5.52	370.2	316.0	283.62	54.12	32.46	si	no(10)	si
	5.68	405.4	337.9	297.26	67.46	40.68	si	no(6)	si

caso B	Y <sub>monte</sub>	Q <sub>monte</sub>	Q <sub>valle</sub>	Q <sub>quinte</sub>	Q <sub>cassa</sub>	Q <sub>restituata</sub>	Risalto ?	Risalto completo?	Rigurgito?
	1.66	50	50	45.15	0	4.85	si	no (10m)	no
	2.32	100	100	72.92	0	27.08	no	no	si
	2.88	150	150	100.33	0	49.67	no	no	si
	3.42	200	200	130.21	0	69.79	no	no	si
	3.97	264.2	264.2	164.99	0	99.21	no	no	si
	4.19	300	300	179.91	0	120.09	no	no	si
	4.78	370.2	365.8	222.52	4.32	143.36	no	no	si
	5	405.4	392.5	239.87	12.85	152.68	no	no	si

caso C	Y <sub>monte</sub>	Q <sub>monte</sub>	Q <sub>valle</sub>	Q <sub>quinte</sub>	Q <sub>cassa</sub>	Q <sub>restituata</sub>	Risalto ?	Risalto completo?	Rigurgito?
	1.67	50	45.37	45.37	4.63	0	si	no (10 m)	no
	2.25	100	72.21	72.21	27.79	0	si	no (10 m)	no
	2.7	150	96.32	96.32	53.68	0	si	no (10 m)	no
	3.09	200	118.2	118.2	81.8	0	si	no (12 m)	no
	3.54	264.2	144.3	144.38	119.8	0	si	no (12 m)	no
	3.78	300	159.0	159.03	140.9	0	si	no (12 m)	no
	4.2	370.2	187.1	187.12	183.0	0	si	no (12 m)	no
	4.4	405.4	201.4	201.45	203.9	0	si	no (12 m)	no

caso D	Y <sub>monte</sub>	Q <sub>monte</sub>	Q <sub>valle</sub>	Q <sub>quinte</sub>	Q <sub>cassa</sub>	Q <sub>restituata</sub>	Risalto ?	Risalto completo?	Rigurgito?
	1.56	50	46.86	44.97	3.14	1.89	si	no (10m)	no
	2.13	100	80.55	70.83	19.45	9.71	si	no (<2m)	si
	2.47	150	109.9	93.35	40.02	16.62	si	no (2m)	si
	2.76	200	147.3	114.98	52.7	32.32	si	no (4m)	si
	3.10	264.2	174.7	141.1	89.5	33.59	si	no (4m)	si
	3.33	300	195.1	155.5	104.8	39.6	si	no (4m)	si
	3.65	370.2	237.3	183	133.1	54.03	si	no (4m)	si
	3.858	405.4	258.7	196.37	145.6	62.41	si	no (4m)	si

Ricavati tutti questi valori è stato innanzitutto possibile fare un confronto con i risultati che erano stati ricavati dal primo predimensionamento:

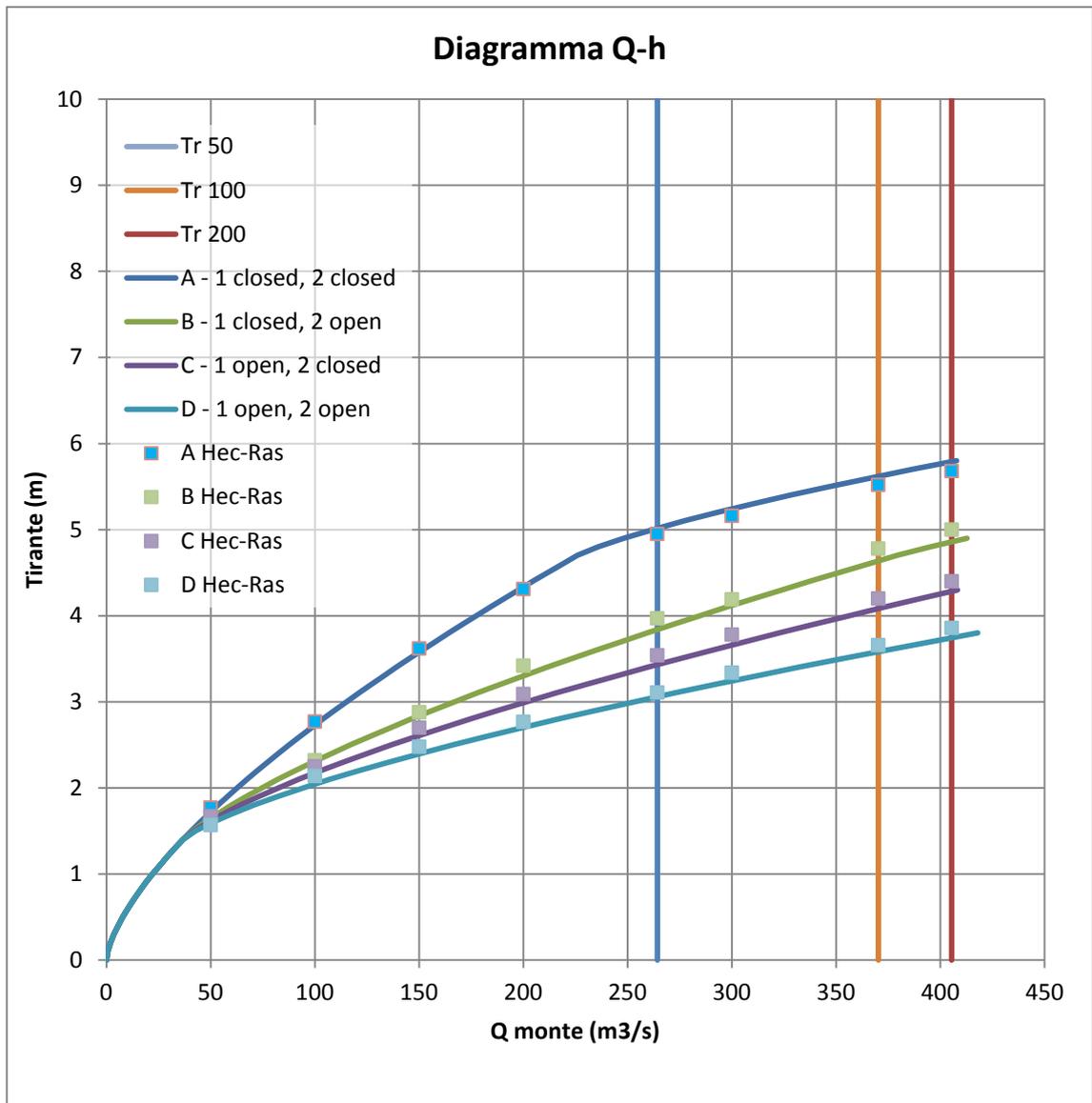


Figura 26: Diagramma Q-Tirante relativo all'opera di presa, confronto con i valori ottenuti con Hec-Ras

Dal precedente grafico appare chiaro come i valori trovati nella primissima fase di analisi risultino coincidere in prima approssimazione con quelli determinati con il software Hec Ras. Calcolando lo scostamento massimo percentuale per ciascuno dei 4 casi si è ottenuto:

- Caso A:  $\Delta h=2.06\%$ ;
- Caso B:  $\Delta h=3.31\%$
- Caso C:  $\Delta h=3.76\%$
- Caso D:  $\Delta h=4.33\%$

### 2.3.4 Dimensionamento della vasca di dissipazione a valle delle quinte

A valle delle quinte è stata prevista una vasca di dissipazione a sezione rettangolare. Il principio di azione che caratterizza questa tipologia di opere è quello di agevolare il formarsi di una corrente lenta a valle, limitando al massimo l'estensione della parte di corrente caratterizzata da alte velocità e forte turbolenza, che deve essere confinata entro l'opera stessa. La dissipazione avviene mediante il risalto idraulico e la sua posizione si determina considerando che la spinta idrodinamica della corrente (pari alla somma della spinta idrostatica e del flusso di quantità di moto) a monte deve essere equilibrata da una spinta idrodinamica della corrente di valle uguale e contraria.

Il raccordo tra l'alveo e la sezione terminale della vasca è stato realizzato inserendo un restringimento che si protendesse verso il centro del torrente fino al punto in cui si esaurivano le sponde.

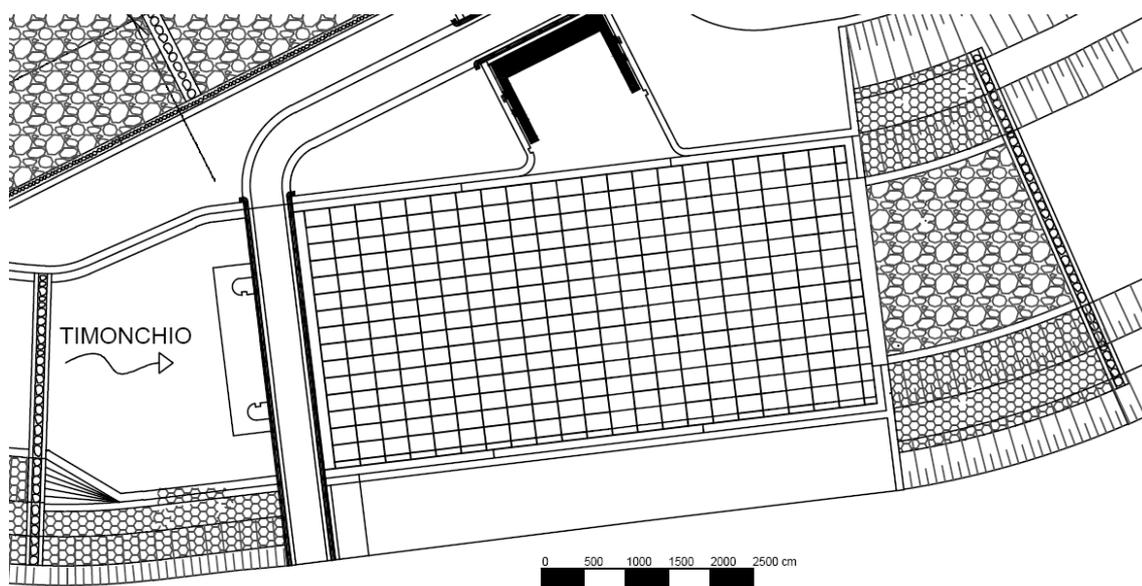


Figura 27: Pianta della vasca di dissipazione

#### 2.3.4.1 Calcolo delle lunghezze del risalto idraulico

Per poter valutare correttamente le dimensioni da assegnare ai vari elementi che vanno a costituire questo manufatto, è necessario per prima cosa ricavare la distanza dalle quinte per la quale si ha la formazione del risalto idraulico. Servendosi del

software Hec-Ras e dello schema presentato nel precedente capitolo si è simulata la situazione per la quale veniva determinarsi la maggior spinta idrodinamica nella sezione di monte del volume di controllo considerato, ovvero quella per cui entrambe le paratoie erano abbassate; si sono registrati i valori della portata di monte, di quella che defluiva attraverso le quinte, di quella che veniva restituita all'alveo e i tiranti che si verificavano nella sezione di chiusura della vasca. Sulla base di questi dati, applicando il principio di conservazione della quantità di moto, è stato possibile ottenere una stima della distanza dalla sezione immediatamente a valle delle quinte in corrispondenza della quale si posizionava il risalto.

Il teorema della quantità di moto è stato applicato al seguente volume di controllo:

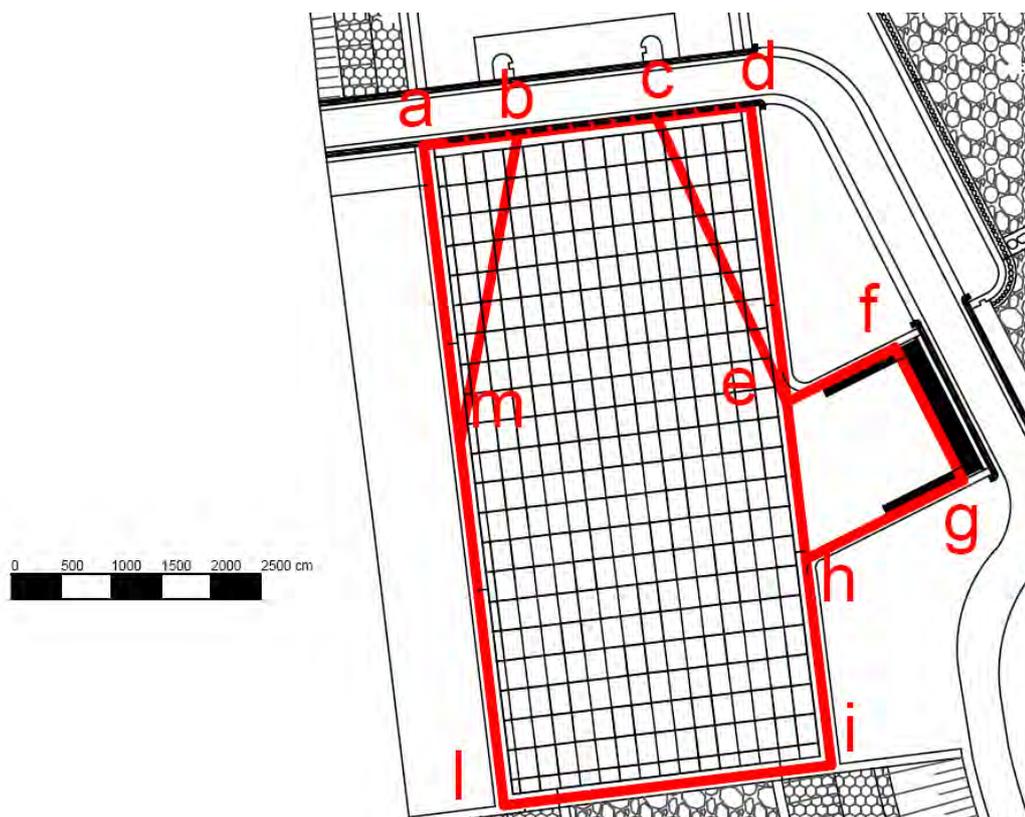


Figura 28: Pianta della cassa con volume di controllo evidenziato in rosso

Nell'applicazione del principio, sono state fatte una serie di semplificazioni:

- Fondo a debole pendenza (distribuzione idrostatica delle pressioni lungo la verticale);

- Distribuzione uniforme delle velocità lungo la verticale;
- Moto permanente;
- Contributo trascurabile della forza peso nella direzione del moto;
- Contributo trascurabile dell'attrito al fondo;
- Contributo trascurabile delle forze agenti lungo i tratti e-f e g-h;
- Tratto f-g caratterizzato solo da portata entrante e non da spinta idrostatica a causa del fenomeno del rigurgito.

Poste queste semplificazioni, sulla base dei dati ricavati con Hec-Ras, si è proceduto innanzitutto analizzando il caso in cui la spinta di monte fosse tale da consentire l'espansione completa della corrente una volta superato il restringimento realizzato dalle quinte. Per prima cosa, avendo già dimensionato in maniera opportuna le quinte, si è posto che il passaggio attraverso il restringimento fosse caratterizzato dalle condizioni critiche e quindi si è calcolato il minimo dell'energia specifica della corrente rispetto al fondo:

$$H_{cr} = \frac{3}{2} \sqrt[3]{\frac{Q_{quinte}^2}{gB^2}} \quad (21)$$

con B=larghezza quinte.

Ipotizzando che non ci fossero perdite di energia in uscita dal restringimento, applicando la conservazione dell'energia e esplicitando il tirante corrispondente al ramo della rapida si è ottenuto l'espressione da iterare:

$$y_{rapida} = \sqrt[2]{\frac{Q_{quinte}^2}{2gb^2(H_{cr} - y)}} \quad (22)$$

con b=larghezza vasca.

Disponendo quindi di tutti i dati di input necessari (compreso il tirante nella sezione i-l) si sono ricavate le spinte di monte e di valle:

$$M_{valle} = \frac{1}{2} by_{valle}^2 + \frac{Q_{valle}^2}{gby_{valle}} \quad (23)$$

$$M_{monte} = \frac{1}{2} By_{rapida}^2 + \frac{Q_{quinte}^2}{gBy_{rapida}} + \frac{Q_{restituita}^2 \cos \alpha}{gb_{restituz}y_{sbocco}} \quad (24)$$

dove  $y_{sbocco} = y_{valle} - \text{petto}$ .

Effettuando le prove con diversi valori di portate si è notato che in nessuna situazione la spinta di monte risultava maggiore di quella di valle, implicando quindi che il tratto caratterizzato dalla corrente rapida fosse sempre confinato all'interno della lunghezza di espansione calcolata come:

$$L_{espansione} = \frac{3}{2}(b - B) = 29.85 \text{ m} \quad (25)$$

in cui si è supposto che l'apertura procedesse con pendenza 1:3.

Poiché la lunghezza minima della vasca (determinata come somma della lunghezza di espansione e della larghezza dello sbocco del canale di restituzione) risultava maggiore della distanza dalle quinte per la quale si aveva il fenomeno del risalto idraulico, si è concluso che non fosse necessario inserire dei denti sul fondo che andassero a coadiuvare la spinta di valle.

Verificato quindi che non venisse mai raggiunto il tirante  $y_{rapida}$  si è effettuata un'analisi con lo scopo di valutare la distanza dalle quinte (di valore sicuramente inferiore rispetto a  $L_{espansione}$  poiché solo spostandosi più vicino alle quinte la spinta specifica di monte avrebbe potuto eguagliare quella di valle) per la quale si aveva la formazione del risalto.

Per ottenere i risultati in maniera agevole si è utilizzato un foglio di calcolo elettronico impostato nella seguente maniera:

- Si sono inseriti i valori di  $Q_{monte}$ ,  $Q_{valle}$ ,  $Q_{quinte}$ ,  $y_{valle}$ ,  $B_{quinte}$ ,  $b_{vasca}$ ;
- Sono stati calcolati  $L_{espansione}$ ,  $y_{rapida}$ ,  $M_{rapida}$ ,  $Q_{restituita}$  e  $y_{sbocco}$  con le formule scritte in precedenza;
- Si è impostato un procedimento iterativo in cui l'ascissa  $x$  (con origine del sistema di riferimento posto in corrispondenza del bordo di valle delle quinte) rappresentava l'incognita:

$$b(x) = B_{quinte} + \frac{(b_{vasca} - B_{quinte})}{L_{espansione}} x \quad (26)$$

$$y_{rapida}(x) = \sqrt[2]{\frac{Q_{quinte}^2}{2gb^2(H_{cr} - y)}} \quad (27)$$

$$M_{monte}(x) = \frac{1}{2} b(x) y_{rapida}^2(x) + \frac{Q_{quinte}^2}{gb(x) y_{rapida}(x)} \quad (28)$$

$$M_{pareti\ inclinate}(x) = \frac{1}{6} \frac{(L_{apertura} - x)^2}{3} (y_{rapida}^2(x) + y_{valle}^2 + y_{valle}y_{rapida}(x))$$

d) Si è utilizzato il componente “risolvente” del programma excel per ottenere il valore di x tale che:

$$\Delta M = M_{monte}(x) + M_{pareti\ inclinate}(x) - M_{valle} \cong 0 \quad (30)$$

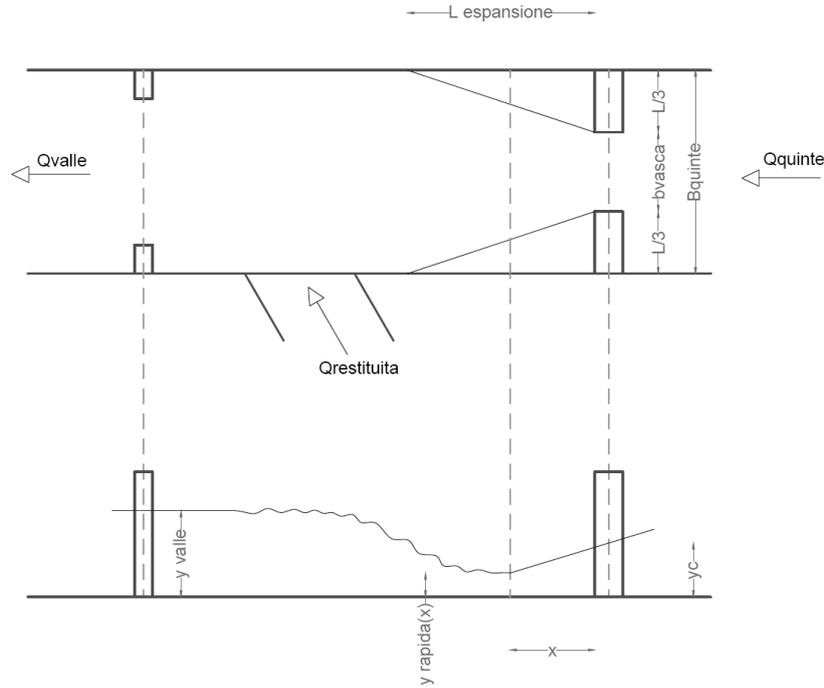


Figura 29: Schema di riferimento del calcolo della distanza dove si ha la formazione del risalto

All'espressione della spinta generata dalle pareti inclinate, rappresentate in questo caso non da elementi solidi ma dal fluido contenuto all'interno delle zone di ricircolo a tergo delle quinte, si è giunti considerando che per un tratto infinitesimo di lunghezza  $dx$  si ha:

$$dM_{pareti} = 2 \frac{1}{2} y^2 tg\beta dx \quad (31)$$

dove  $\beta$  è l'angolo formato dalle pareti con l'asse del corso d'acqua; a questa formula si è giunti considerando la sola spinta idrostatica, nell'ipotesi che la variazione della superficie libera tra la sezione di monte e quella di valle del volume di controllo fosse lineare:

$$y = y_{rapida}(x) + \left( y_{valle} - y_{rapida}(x) \right) \frac{x}{L} \quad (32)$$

Essendo inoltre:

$$tg\beta = \frac{2(L_{apertura} - x)}{3} \frac{1}{L} \quad (33)$$

$$dx = L \frac{dy}{y_{valle} - y_{rapida}(x)} \quad (34)$$

sostituendo e integrando  $dM_{pareti}$  sul tratto di lunghezza L si ottiene quanto scritto in precedenza.

Considerando sette diversi valori di portata di monte, si sono ottenuti i seguenti risultati:

Tabella 6: Posizione del risalto al variare della portata di monte

Q <sub>monte</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>quinte</sub> (m <sup>3</sup> /s)	y <sub>valle</sub> (m)	y <sub>rapida</sub> (x) (m)	x (m)
100	100	2.19	1.04	5.86
150	150	2.75	1.09	10.28
200	200	3.29	1.24	11.89
264.2	249.4	3.75	1.36	13.24
300	279.76	4.03	1.445	13.71
370.2	290.83	4.29	1.995	8
405.4	301.56	4.45	2.26	5.29

Per quanto riguarda la distanza dalla parete in corrispondenza della quale la corrente passa da rapida a lenta, si ha avuto innanzitutto la conferma del non superamento del valore  $L_{espansione}$ ; si è riscontrato inoltre un ulteriore effetto dell'inserimento di paratoie a settore sormontabili (oltre a quello dell'abbassamento delle quote delle sommità delle arginature), ovvero una riduzione della spinta di monte rispetto alla situazione di paratoie non tracimabili:

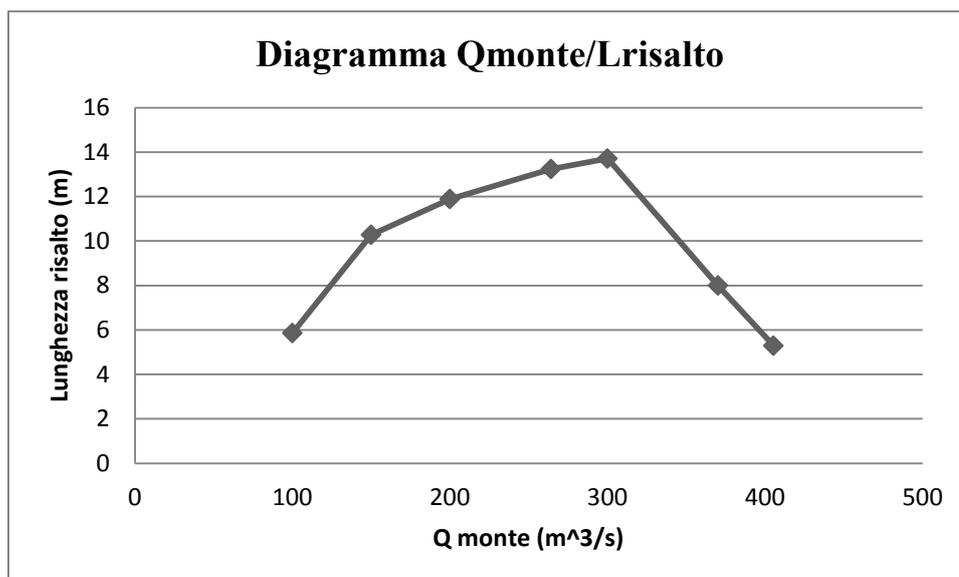


Figura 30: Diagramma che lega la distanza dalla parete per cui si forma il risalto alla portata di monte

Ottenuti questi valori si è potuto confrontare quanto ottenuto dal procedimento precedentemente descritto con le lunghezze estrapolate dai risultati ricavati con Hec-Ras:

Tabella 7: Confronto tra i valori di distanza ottenuti con Hec-Ras e con il codice di calcolo sviluppato autonomamente

Q <sub>monte</sub> (m <sup>3</sup> /s)	L <sub>Hec-ras</sub> (m)	L <sub>excel</sub> (m)	Δ%
100	6	5.86	2.33%
150	10	10.28	-2.80%
200	12	11.89	0.92%
264.2	13	13.24	-1.85%
300	13	13.71	-5.46%
370.2	11	8	27.27%
405.4	10	5.29	47.10%

Si osserva come per valori della portata di monte inferiori ai 300 m<sup>3</sup>/s le differenze si mantengano contenute, non superando il 2.8%; per portate crescenti, il software Hec-Ras ha fornito misure maggiori, che nel caso di portata con tempo di ritorno bicentenario si discostano del 50%: questa divergenza di valori si spiega considerando le ipotesi che sono state fatte all'inizio riguardo la spinta fornita dall'acqua restituita al Timonchio, in quanto solo per portate basse il contributo di tale componente è solo idrostatico.

Concludendo, lo studio effettuato ha consentito di ricavare la distanza massima dalla parete per la quale si ha il passaggio da corrente rapida a lenta, stimata in 14m. La lunghezza minima della vasca è stata calcolata sommando a questa quantità quella derivante dalla valutazione della lunghezza del risalto, ottenibile moltiplicando la coniugata della rapida per un fattore 6; per avere un margine di sicurezza e avere la garanzia che il fenomeno del risalto venga limitato all'interno della vasca si è fatto riferimento a un fattore 8. Si è quindi ottenuto:

$$L_{vasca\ minima} = 14 + 8y_2 = 44.40\ m \quad (35)$$

Il restringimento, necessario per consentire il raccordo con l'alveo a valle, posto in uscita dal manufatto di dissipazione non ha determinato il passaggio da corrente lenta a rapida in nessuna delle situazioni sperimentate.

### **2.3.5 Dimensionamento della vasca di dissipazione all'imbocco della cassa**

Dopo aver superato la sezione in cui è posta la paratoia a settore, la portata, per giungere il fondo della cassa, deve percorrere uno scivolo che la porta da una quota di 63.4 m s.l.m. a 59 m s.l.m.; affrontando questa discesa, la corrente converte l'energia potenziale in energia cinetica al punto tale da rendere necessario l'inserimento di un manufatto di dissipazione. A questo scopo si è deciso di inserire un dissipatore a denti U.S.B.R., tipologia di opera che richiede un limitato trasporto solido da parte della corrente (condizione soddisfatta sia grazie allo schema di derivazione, sia per la presenza del gradino di 1,4 m che distanzia il letto del fiume dall'imbocco dell'opera di presa), in quanto un eccessivo deposito darebbe luogo al riempimento della vasca con il risultato che il risalto non sarebbe più contenuto all'interno del manufatto stesso.

La scelta tra i vari tipi di dissipatori U.S.B.R. può essere fatta una volta determinato il numero di Froude della corrente in arrivo e una volta accertata l'assenza di roll waves, che producono delle instabilità sui livelli del pelo libero. Per la seguente trattazione si è fatto riferimento alla portata defluente verso l'opera di invaso in caso di paratoia del canale di restituzione completamente chiusa e paratoia posta all'imbocco della cassa completamente sollevata: per una portata con tempo di ritorno bicentenario nel torrente Timonchio di 405.4 m<sup>3</sup>/s, nella cassa vengono immessi circa 210 m<sup>3</sup>/s.

Per calcolare il numero di Froude della corrente al piede dello scivolo si è applicato un bilancio di energia tra le sezione a monte dello scivolo, caratterizzata dal tirante critico, e quella a valle:

$$H_c + h = y_1 + \frac{v_1^2}{2g} \quad (36)$$

dove:

- $H_c = \frac{3}{2} \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gB^2}}$
- $h = \text{dislivello} = 4,4\text{m}$

Risolviendo la precedente relazione rispetto a  $y_1$  si è ricavato un tirante alla base dello scivolo di 0,74 m e un corrispondente  $F_r=4,2$ , che quindi porta a scegliere il dissipatore tipo IV.

Per quanto riguarda il fenomeno delle roll-waves, è essenziale valutarne o meno la possibile presenza durante il funzionamento dell'opera. La formazione spontanea dei treni d'onda si verifica nei canali a pendenza molto forte e si presenta sotto forma di intumescenze che si succedono a intervallo pressoché regolare. Le conseguenze di questo fenomeno non si manifestano tanto lungo il tratto dello scivolo, quanto al primo tronco di canale a debole pendenza che, in questo caso, viene a coincidere con la vasca di dissipazione. Può avvenire che il dissipatore, pur funzionando regolarmente alla massima portata, si riveli, per le piccole portate, insufficiente a spegnere l'energia sovrabbondante della corrente pulsante di monte, consentendo la propagazione del moto ondosio nella corrente lenta di valle.

Dal punto di vista numerico si è osservato che questo fenomeno richiede 2 condizioni affinché si verifichi:

- numero di Vedernikov  $>1$ , ovvero:

$$V_e = (n - 1)F_r > 1 \quad (37)$$

con  $n$ =esponente della scala delle portate=1,5;

- scivolo sufficientemente lungo.

Per quanto riguarda il secondo punto, risulta agevole fare riferimento al parametro adimensionale:

$$g \frac{Li}{U^2}$$

Noti questi due numeri, si può utilizzare il diagramma di Montuori per accertare o meno la presenza delle roll-waves:

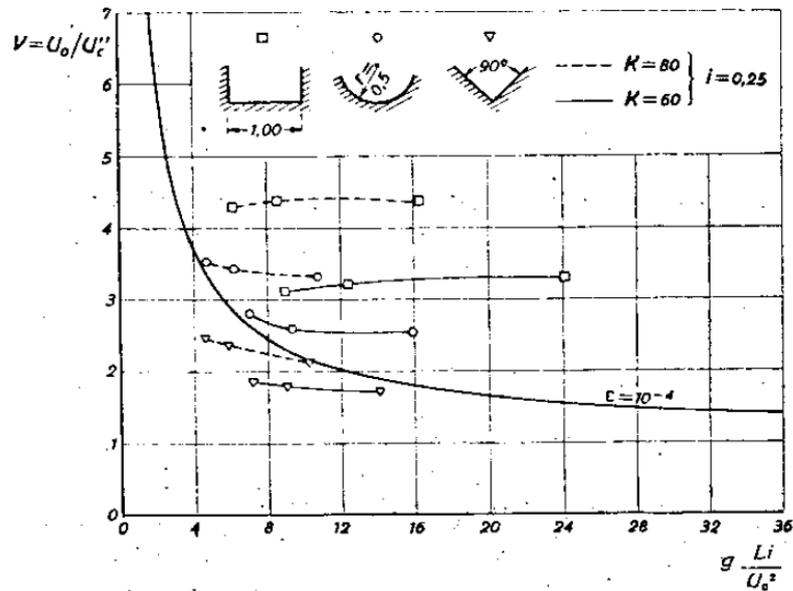


Figura 31: Diagramma di Montuori (Da: United States, Army, Corps of Engineers, 'Hydraulic design criteria', 1955)

Considerando nello specifico la situazione in esame, come detto in precedenza è necessario ricavare innanzitutto il valore del numero di Vedernikov per le possibili portate:

Tabella 8: Valori risultanti del parametro  $gLi/U^2$  al variare della portata entrante nella cassa)

$Q_{\text{cassa}}$ (m <sup>3</sup> /s)	Fr	U (m/s)	Ve	$gLi/U^2$
10	15,11	9,64	7,555	0,6566067
50	7,36	10,21	3,68	0,5853396
100	5,55	10,65	2,775	0,5379726
150	4,75	11	2,375	0,5042826
200	4,28	11,28	2,14	0,4795581
210	4,2	11,34	2,1	0,4744968

Entrando nel diagramma di Montuori con i valori tabulati si osserva come in nessun caso si manifesti questo fenomeno.

Il dimensionamento del dissipatore viene fatto facendo riferimento al tirante della corrente rapida sullo scivolo:

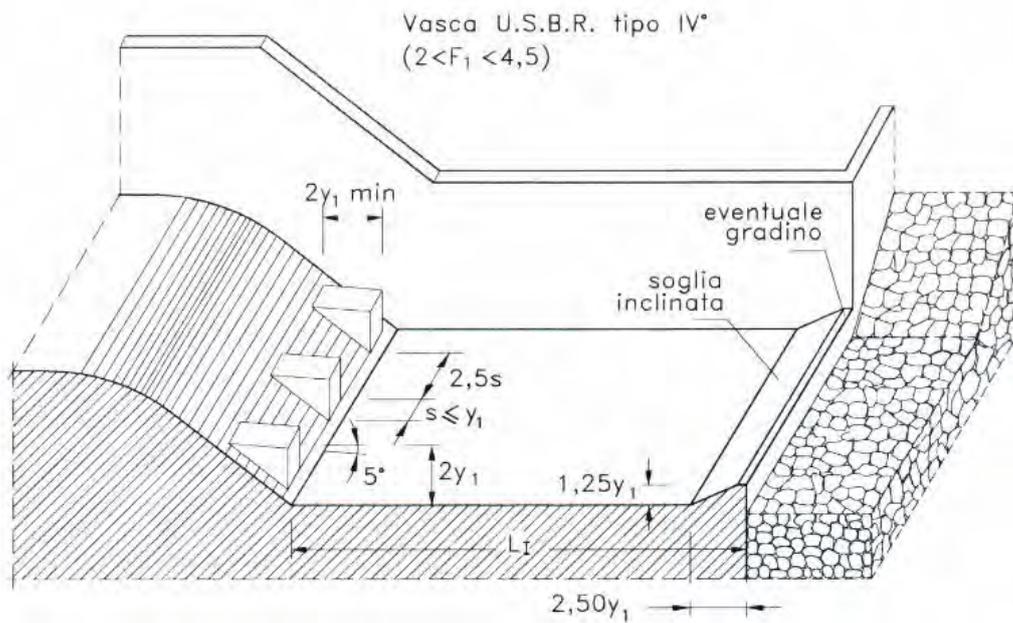


Figura 32: Vasca U.S.B.R. tipo IV (Da: Da Deppo L., Datei C. e Salandin P., 'Sistemazione dei corsi d'acqua', Edizioni Progetto, Padova, 2012)

Questa tipologia di opera è utilizzabile per numeri di Froude relativamente modesti ( $<4,5$ ) e basa il suo funzionamento sui denti: la loro funzione è quella di frangere la corrente in arrivo, sollevandone una parte dal fondo per farla ricadere, con apprezzabile vantaggio più a valle. La soglia inclinata posta al termine solleva la corrente in uscita, con il beneficio di proteggere dallo scalzamento per scavo la sezione terminale della vasca.

Essendo  $y_1=0,74$  m, le dimensioni caratteristiche degli elementi della vasca assumono dimensione:

- Larghezza e altezza dei gradini: 1,5 m;
- Interdistanza tra i gradini: 1,75 m;
- Spessore dei gradini: 0,7 m;
- Altezza soglia inclinata: 1 m;
- Larghezza soglia inclinata: 1,85 m.

Sperimentalmente sono stati ricavati anche i diagrammi che legano il  $F_{r1}$  al tirante minimo necessario a valle della vasca e alla lunghezza del risalto:

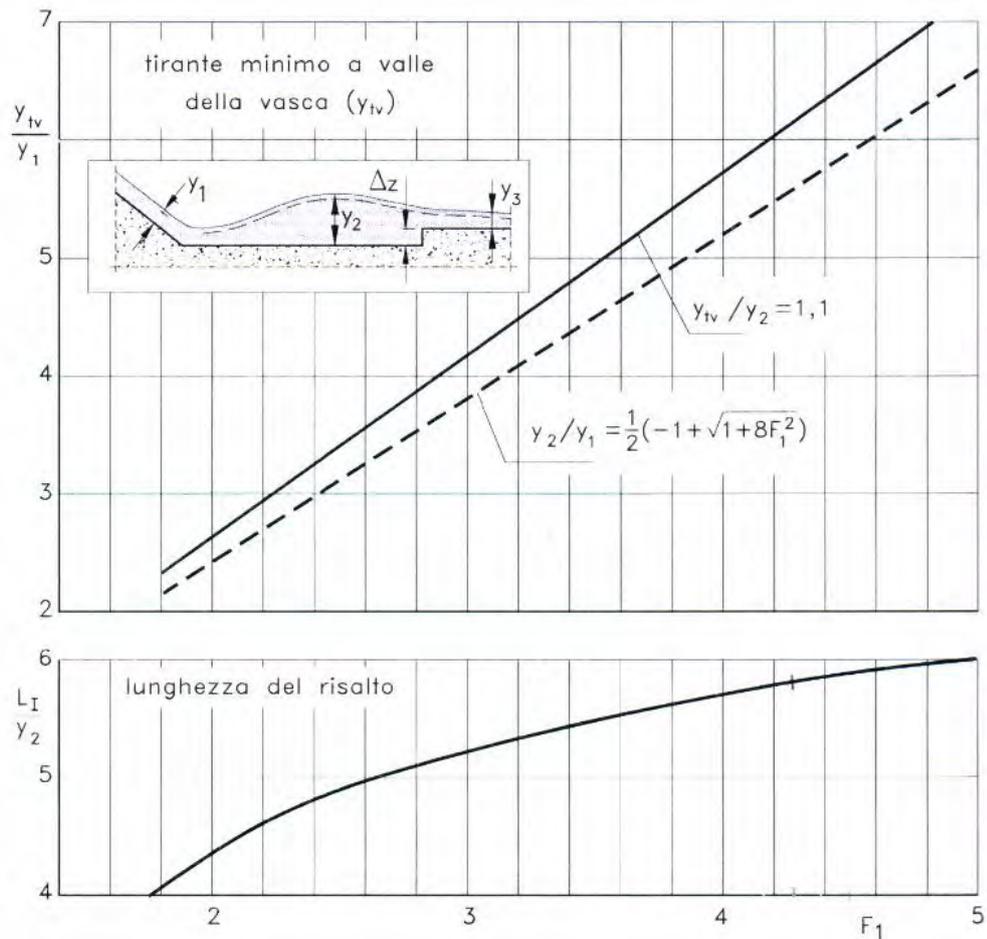


Figura 33: Caratteristiche della vasca U.S.B.R. tipo IV (Da: Da Deppo L., Datei C. e Salandin P., 'Sistemazione dei corsi d'acqua', Edizioni Progetto, Padova, 2012)

Per una portata defluente nella cassa di  $210 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $Fr_1=4,2$  si ottiene una lunghezza del risalto (e una conseguente lunghezza della vasca) di circa 5,8 volte il tirante  $y_2$ , ovvero 24 m; il tirante di valle necessario alla formazione del risalto risulta pari 4,4 m, che corrisponde a una quota del pelo libero che viene raggiunta quando la cassa di monte è piena al 60%.

### 2.3.6 Dimensionamento paratoie a settore

Gli organi mobili che consentono di gestire i livelli nel torrente e le portate che defluiscono in cassa sono rappresentati, come preannunciato, da due paratoie a settore. Fondamentalmente la struttura di questo tipo di opere è composta da un paramento cilindrico impermeabile in lamiera opportunamente irrigidito da travi orizzontali, collegato a due bracci laterali di spinta. Poiché in questo caso le luci sono di notevoli dimensioni, mentre l'altezza di ritenuta è abbastanza modesta, al fine di garantire una buona rigidezza e contenere al contempo il peso, si è preferito utilizzare una struttura a cassoni sia per il paramento che per i bracci.

Le caratteristiche geometriche delle due paratoie che verranno in seguito dimensionate sono:

- Paratoia 1: larghezza 25 m, altezza 3,3 m;
- Paratoia 2: larghezza 15 m, altezza 3,3 m.

Avendo deciso di rendere sormontabili le paratoie, si è deciso di innalzare la quota del paramento (fino a un livello tale da non essere mai raggiunto dall'acqua) in corrispondenza dei punti di collegamento tra i bracci e il cassone frontale di ritenuta al fine di ridurne al minimo i rischi di danneggiamento, determinando così un restringimento della luce sfiorante.

Il tirante che è stato utilizzato per il calcolo strutturale è stato estrapolato dai risultati ottenuti utilizzando il software Hec-Ras nel caso di  $Q_{\text{monte}}=405,4 \text{ m}^3/\text{s}$  (valore ricavato considerando un tempo di ritorno  $T_r=200$  anni) e imponendo che entrambi i settori fossero completamente abbassati, ovvero  $h=4,30 \text{ m}$  (corrispondente a una quota del pelo libero di 67.70 m s.l.m.).

Per la realizzazione dei settori si è deciso di utilizzare un acciaio s355 caratterizzato da:

- a)  $f_{\text{adm}}=240 \text{ MPa}$
- b)  $f_{\text{yk}}=355 \text{ MPa}$
- c)  $f_{\text{yd}}=308,7 \text{ MPa}$

Viene di seguito descritto nel dettaglio il solo dimensionamento della paratoia che copre la luce maggiore (in quanto il procedimento utilizzato per la più piccola è analogo), servendosi del metodo delle tensioni ammissibili, verificandone poi la

correttezza con il metodo probabilistico agli stati limite (viene riportata la sola verifica di deformazione allo stato limite di esercizio poiché, per brevità, viene omessa quella SLU).

### 2.3.6.1 Dimensionamento con il metodo delle tensioni ammissibili

La verifica, in accordo al metodo di calcolo delle tensioni ammissibili, deve essere condotta garantendo che in ogni sezione di tutti gli elementi che realizzano la struttura, sia soddisfatta l'uguaglianza:

$$f \leq f_{adm} \quad (38)$$

in cui  $f$  rappresenta lo sforzo nella generica sezione e  $f_{adm}$  è il valore della tensione ammissibile, dipendente dal tipo di materiale dell'elemento oggetto di verifica.

#### 2.3.6.1.1 Piastra esterna

La sezione verticale che caratterizza il cassone, costituito dalla piastra frontale e dai relativi irrigidimenti, è schematizzabile come:

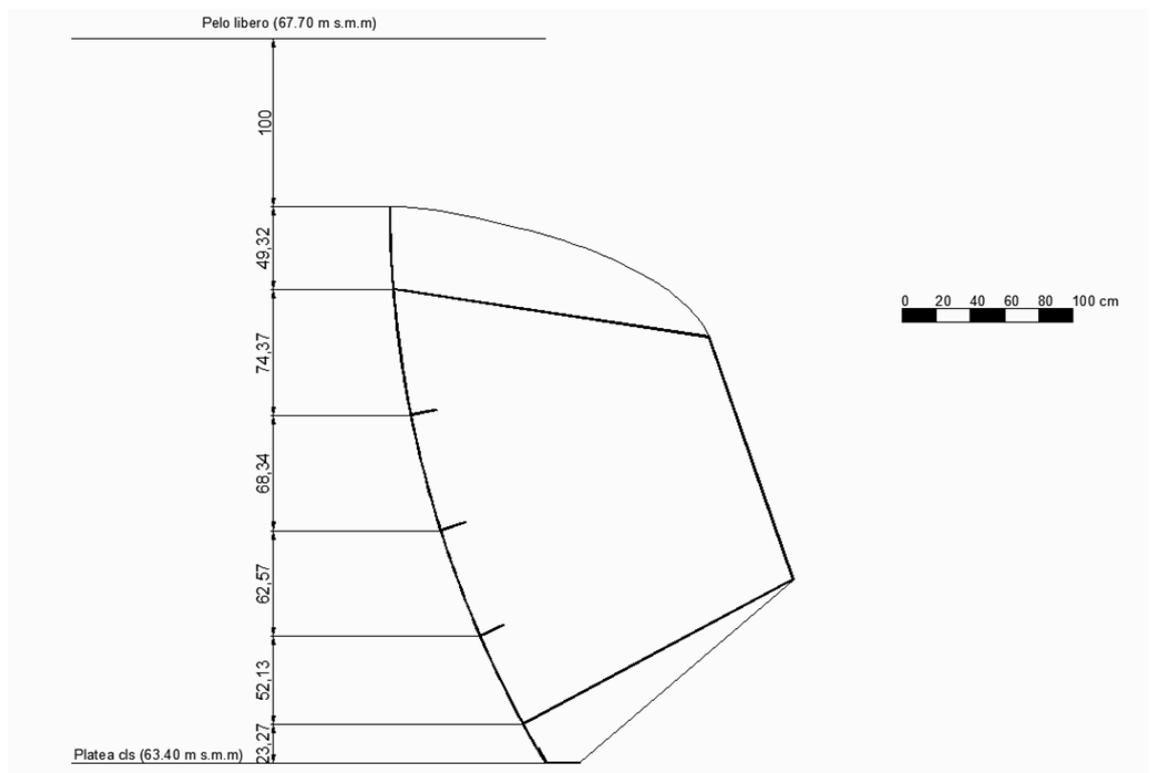


Figura 34: Sezione del cassone frontale

Per ricavare i valori delle sollecitazioni agenti si è fatto riferimento a uno schema statico in cui ciascuna piastra di irrigidimento costituiva un appoggio:

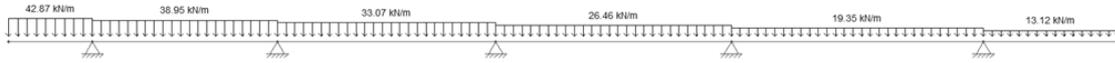


Figura 35: Schema statico e relativi carichi agenti

Applicando tali carichi distribuiti, si è ricavato il seguente diagramma del momento:

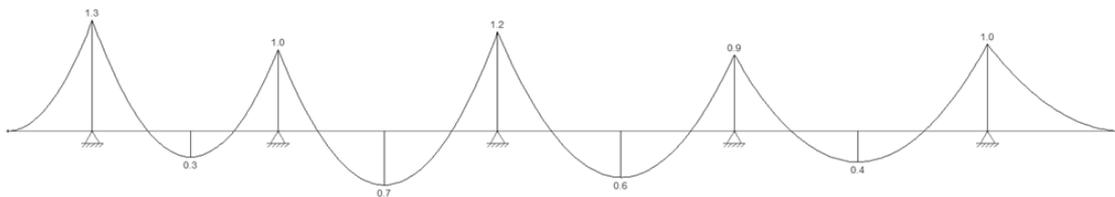


Figura 36: Diagramma del momento (valori in kNm)

Dal precedente grafico è possibile innanzitutto notare come la distribuzione degli irrigidimenti sia corretta, in quanto i momenti che caratterizzano ciascun appoggio siano piuttosto simili. Si è quindi estrapolato il valore massimo del momento con cui andare a dimensionare le piastre, ovvero:

$$M_{max} = 1,30 \text{ kNm}$$

Assumendo uno spessore del mantello esterno di 0,8 cm, il modulo di resistenza a flessione diventa:

$$W = \frac{bH^2}{6} = 10,70 \text{ cm}^3$$

e quindi:

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W} = 121,50 \text{ MPa} < 240 \text{ MPa}$$

### 2.3.6.1.2 Irrigidimenti orizzontali

Per valutare le corrette misure da assegnare agli irrigidimenti verticali, costituiti da due piastre saldate in modo da formare una sezione a T, è necessario fare riferimento

allo schema statico utilizzato per dimensionare la piastra frontale. Esaminando i carichi agenti si è ottenuto che l'elemento più sollecitato era quello posto nel secondo nodo a partire dal basso:

$$P_2 = 21,75 \text{ kN/m}$$

Nota questa grandezza, si è cercato di disporre gli elementi irrigidenti con sviluppo prevalentemente verticale in maniera tale che i momenti risultanti differissero di poco tra loro:

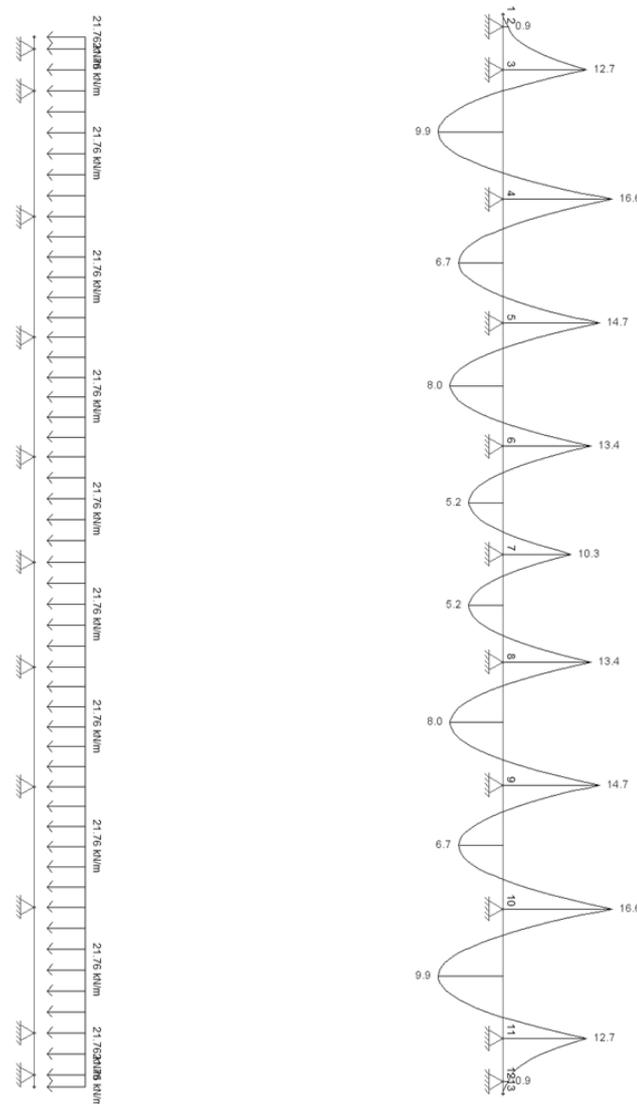


Figura 37: Schema statico e diagramma del momento

Il momento massimo agente è quello che si registra nel quarto e nel decimo nodo:

$$M_{max} = 16,6 \text{ kNm}$$

Gli elementi sottoposti a flessione hanno una sezione del tipo:

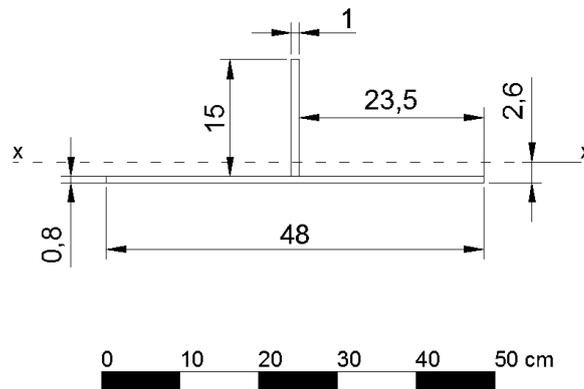


Figura 38: Sezione di un elemento di irrigidimento orizzontale

Il momento d'inerzia riferito all'asse x e i moduli di resistenza inferiore e superiore diventano:

$$J_x = \frac{1 \cdot 15^3}{12} + 15 \cdot 1 \cdot 5.7^2 + 48 \cdot 0.8 \cdot 2.2^2 = 954 \text{ cm}^4$$

$$W_{inf} = \frac{954}{2.6} = 366,92 \text{ cm}^3$$

$$W_{sup} = \frac{954}{13.2} = 72,27 \text{ cm}^3$$

e quindi le relative tensioni:

$$\sigma_{inf} = 45,2 \text{ MPa} \leq 240 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sup} = 229 \text{ MPa} \leq 240 \text{ MPa}$$

### 2.3.6.1.3 Cassone

L'elevata rigidità e resistenza ai carichi agenti da parte della paratoia è legata all'elevato momento d'inerzia, calcolato come:

Tabella 9: Area, eccentricità, braccio e momento d'inerzia relativo a ciascun elemento

Codifica	Sigla	A (cm <sup>2</sup> )	e (cm) (da AA)	Ae (cm <sup>3</sup> )	a (cm)	J <sub>x</sub> (cm <sup>4</sup> )
1	3370,8	269,6	185	49876	69	1283·10 <sup>3</sup>
2	150,10	15	174	2610	58	50·10 <sup>3</sup>
3	150,10	15	180	2700	64	61·10 <sup>3</sup>
4	150,10	15	174	2610	58	50·10 <sup>3</sup>
5	1800,8	144	80	11520	36	575·10 <sup>3</sup>
6	1860,8	148,8	93	13838	23	507·10 <sup>3</sup>
7	1520,8	121,6	0.4	48	116	1636·10 <sup>3</sup>

dove i numeri della codifica nella tabella si riferiscono alla seguente sezione:

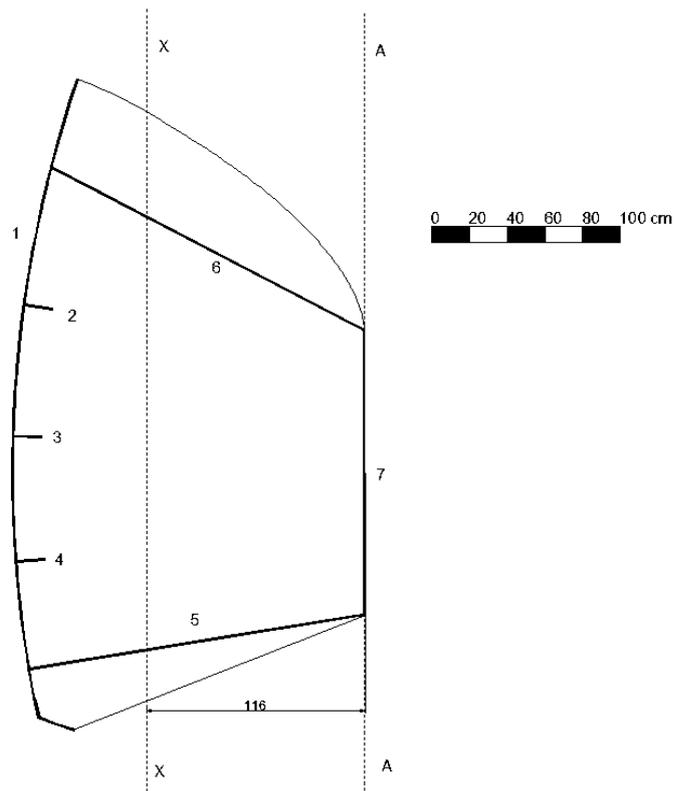


Figura 39: Sezione del cassone frontale della paratoia

Sommando ciascun contributo, il momento d'inerzia diventa:

$$J_x = 4162 \cdot 10^3 \text{ cm}^4$$

e i moduli di resistenza che caratterizzano gli estremi sinistro e destro:

$$W_{sx} = \frac{4162 \cdot 10^3}{69} = 60,31 \cdot 10^3 \text{ cm}^3$$

$$W_{dx} = \frac{4162 \cdot 10^3}{116} = 35,87 \cdot 10^3 \text{ cm}^3$$

Per valutare quale sia la sollecitazione agente sul cassone, è possibile considerare 2 schemi statici:

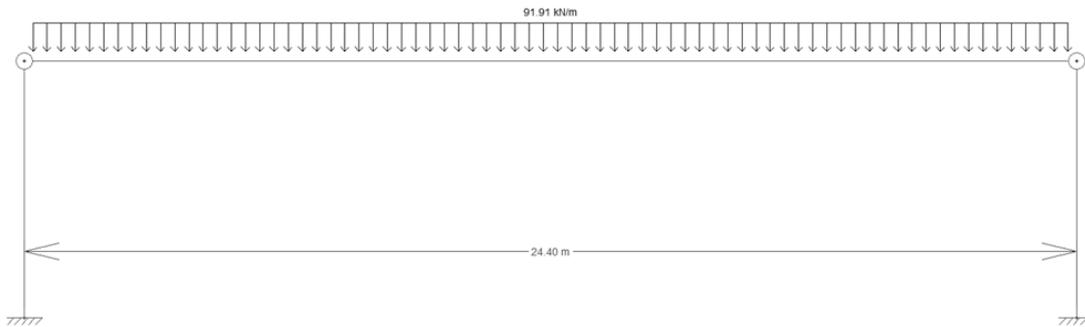


Figura 40: Schema statico con doppio incastro

oppure:

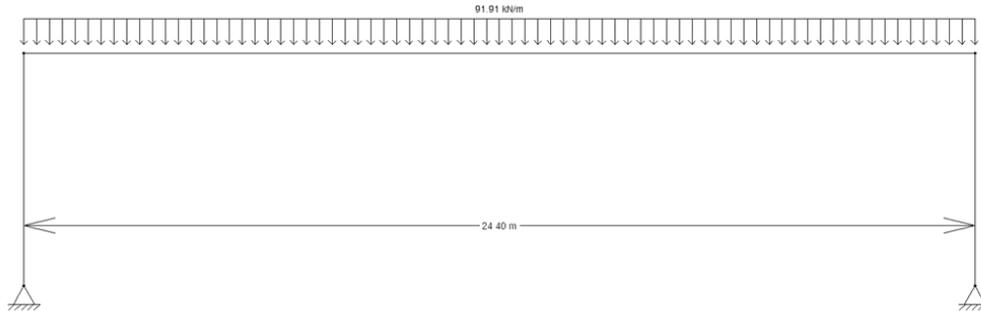


Figura 41: Schema statico con doppio appoggio

La configurazione che comporta una maggiore tensione a seguito dell'applicazione dei carichi, è quella che nasce nel primo schema statico:

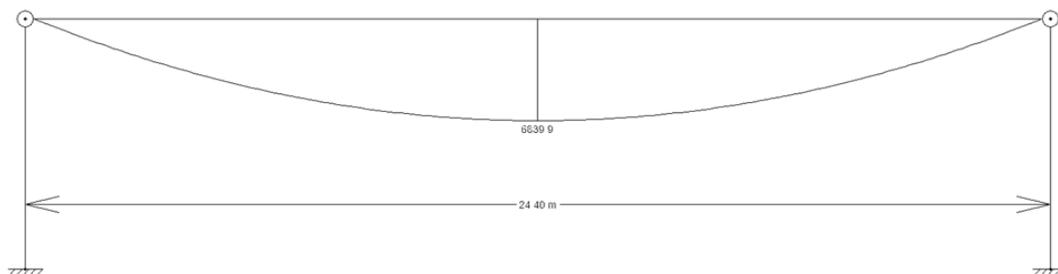


Figura 42: Diagramma del momento risultante

Dal precedente diagramma del momento si ottiene un valore di  $M_{\max}$  pari a 6839,9 kNm e quindi una tensione sul lato interno del cassone di:

$$\sigma_{\max} = 189 \text{ MPa} < 240 \text{ MPa}$$

soddisfando quindi i requisiti di resistenza.

#### 2.3.6.1.4 Bracci

Il trasferimento dei carichi dalla struttura frontale ai perni e quindi alla muratura è consentito grazie a due bracci costituiti anch'essi da una struttura a cassone a sezione rettangolare. Lo spessore delle piastre in acciaio che sono state utilizzate è di 1,2 cm:

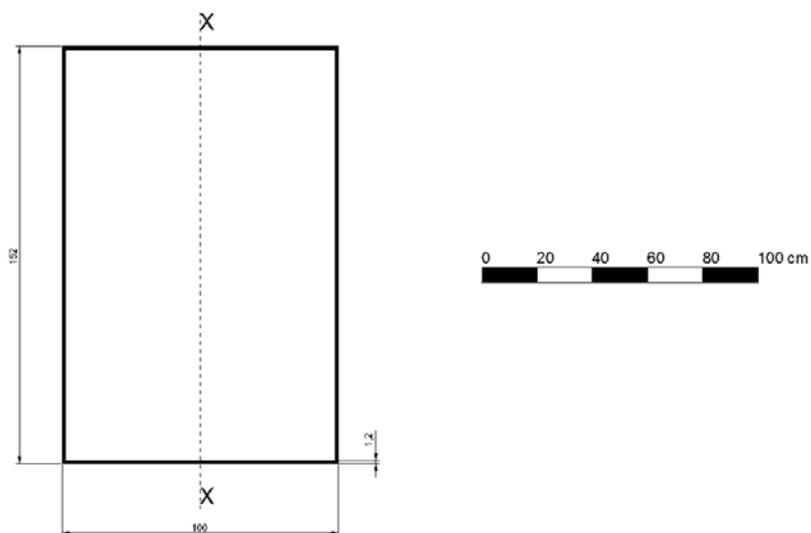


Figura 43: Sezione del braccio della paratoia

Considerando lo schema statico rappresentato in figura 34, il momento e lo sforzo normale che caratterizzano la sezione più sollecitata sono quantificabili in:

$$M_{max} = 3900 \text{ kNm}$$

$$N_{max} = 1148 \text{ kN}$$

Poiché:

$$J_x = 2 \frac{1.2 \cdot 100^3}{12} + 2 \cdot 152 \cdot 1.2 \cdot 50^2 = 1112 \cdot 10^3 \text{ cm}^4$$

$$W_x = \frac{1112 \cdot 10^3}{50} = 22,2 \cdot 10^3 \text{ cm}^3$$

La massima tensione diventa:

$$\sigma_{max} = \frac{M}{W} + \frac{N}{A} = 177.29 \text{ MPa} < 240 \text{ MPa}$$

### 2.3.6.1.5 Perna e ancoraggi

Gli elementi che consentono il movimento della paratoia e che scaricano le sollecitazioni agenti sui bracci ai muri di sostegno sono i 2 perni, costituiti ciascuno da un cilindro in acciaio e cuscinetti in bronzo.

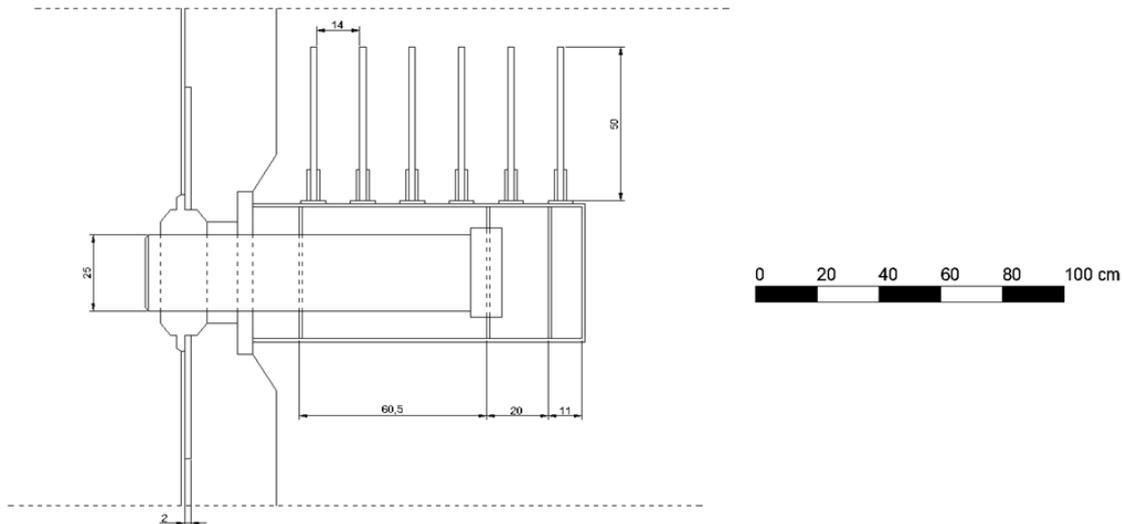


Figura 44: Sezione di un perno della paratoia a settore

Per valutare il corretto diametro da assegnare al perno si è fatto riferimento allo schema statico rappresentato in figura 35, ottenendo uno sforzo normale di 1148 kN. Poiché la retta di azione di tale forza si discosta dalla parete di 18 cm, nasce un momento di 206,64 kNm; essendo:

$$W = 0.1 \cdot 25^3 = 1562.5 \text{ cm}^3$$

la tensione risulta:

$$\sigma = \frac{206 \cdot 10^3}{1562.5} = 131 \text{ MPa} < 240 \text{ MPa}$$

L'effettivo trasferimento dei carichi alle murature avviene con l'ausilio di barre in acciaio che, vincolate all'alloggiamento del perno tramite piastre, grazie al fenomeno dell'aderenza permettono il passaggio dello sforzo al calcestruzzo.

Lo sforzo normale calcolato in precedenza comporta l'utilizzo di un'area di acciaio di 48 cm<sup>2</sup>; optando per delle barre  $\phi 20$  (aventi ciascuna una sezione con area di 3,14 cm<sup>2</sup>), ne risultano necessarie 18. Per quanto riguarda il loro posizionamento, si è deciso di disporle su 3 file da 6 orientate in senso radiale (1 fila disposta parallelamente al terreno e le altre due inclinate di  $\pm 30^\circ$ ).

La lunghezza di ancoraggio è stata ricavata utilizzando la formula:

$$L = \frac{\phi f_{yd}}{4 f_{bd}} = 20\phi \quad (39)$$

Si è così deciso di imporre una lunghezza di 50 cm.

#### 2.3.6.1.6 Contrappesi

La struttura che contraddistingue le paratoie a settore suggerisce l'inserimento di contrappesi sul prolungamento dei bracci (oltre al punto in cui sono alloggiati i perni) per facilitarne la manovra e ridurre al minimo lo sforzo che deve essere esercitato dai pistoncini oleodinamici. Il dimensionamento di tali elementi può essere facilmente fatto dopo aver calcolato il peso dei vari elementi della paratoia:

$$P = 172,12 \text{ kN}$$

con eccentricità 491 cm rispetto al centro del perno.

Imponendo una distanza tra il baricentro del contrappeso e il punto di equilibrio di 293 cm risulta necessario che ognuno dei due elementi eserciti una forza di 144 kN.

#### 2.3.6.2 Verifica SLE di deformazione

I carichi allo stato limite di esercizio provocano sollecitazioni elastiche sull'elemento e pertanto il massimo abbassamento può essere valutato mediante i

metodi tradizionali della Scienza delle Costruzioni, basati sull'ipotesi di materiale con legame costitutivo elastico-lineare. Imponendo un limite di abbassamento di  $L/250$ , il massimo abbassamento totale si può calcolare con l'espressione:

$$\delta_{max} = \frac{5}{384} \cdot \frac{qL^4}{EJ} = 12,36 \text{ mm} < \frac{L}{250} = 100 \text{ mm}$$

Pertanto la verifica risulta soddisfatta.

### 2.3.7 Dimensionamento dei taglioni

A causa della presenza delle paratoie a settore, alcune opere idrauliche posizionate presso l'opera di presa possono risultare sollecitate da un dislivello idrico tra monte e valle e quindi possono essere esposte a fenomeni di instabilità dovute alla filtrazione che si instaura nel terreno entro il quale sono fondate. In particolare, affinché l'opera soddisfi le verifiche a galleggiamento, scorrimento (in questo caso non necessaria visto che gran parte della spinta instabilizzante dell'acqua è scaricata sulle paratoie a quindi sui muri di sostegno) e sifonamento è necessario inserire un taglione per dissipare il carico generatosi tra monte a valle. Ad esempio, considerando la platea posta in corrispondenza della paratoia a settore larga 25 m si ha la seguente situazione:

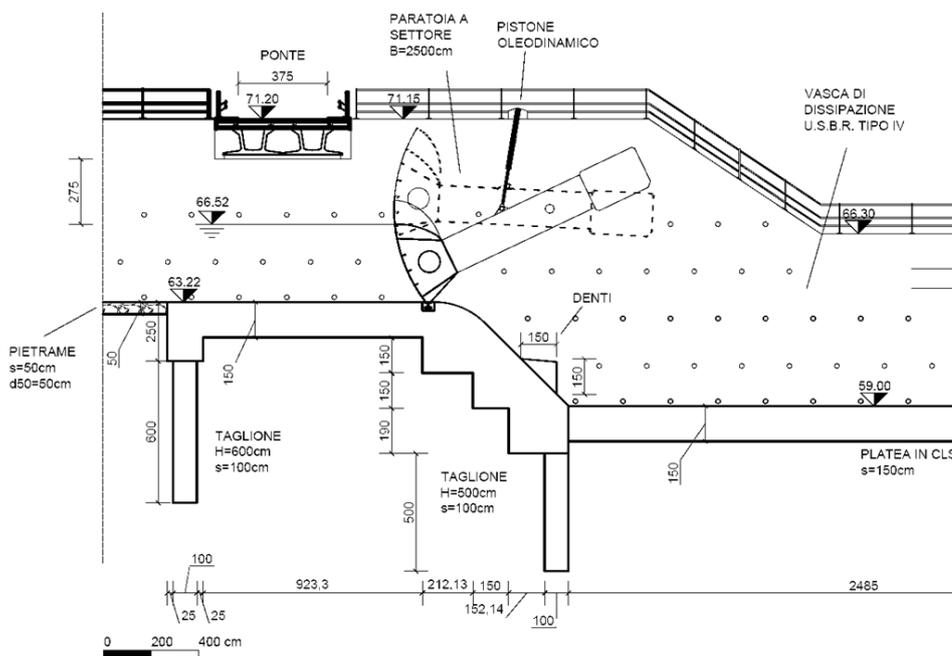


Figura 45: Sezione longitudinale dell'opera di imbocco della cassa di monte

Per valutare la corretta profondità da assegnare ai taglioni si è fatto riferimento alla situazione in cui la quota idrica di monte era pari al livello di sfioro della paratoia e cassa di monte completamente vuota. Il carico  $h$  con cui effettuare le verifiche era pari a 7,52 m. Si procede ora con le singole verifiche; il procedimento applicato in questo caso è stato applicato anche in tutti gli altri dimensionamenti dei taglioni.

### 2.3.7.1 Sifonamento

Il problema del sifonamento è da intendersi sia con l'accezione di *piping* che di *heaving*. Nel primo caso si ha un'erosione del terreno posto al di sotto della struttura causata dalla formazione di piccoli canali sotterranei che, ingrandendosi, possono portare al collasso della struttura. La seconda modalità ha luogo nel terreno quando le forze di filtrazione agenti in direzione opposta alle forze di massa raggiungono valori elevati, in grado di annullare la tensione verticale efficace.

Per quanto riguarda il *piping* si è seguito il criterio di Bligh Lane, secondo il quale la resistenza al moto è molto minore lungo il contatto tra la superficie orizzontale del manufatto e il terreno che lungo gli altri contatti tra le strutture verticali (o con inclinazione maggiore di 45°):

$$F = \frac{\frac{L_o}{3} + L_v}{h} \geq F^* \quad (40)$$

dove  $h$ =dislivello tra monte e valle;  $L_v$  e  $L_o$  rappresentano la sommatoria dei percorsi verticali e orizzontali;  $F^*$  è il fattore di sicurezza, dipendente dalla natura del terreno.

Poiché dai carotaggi e dalle successive analisi di laboratorio è risultato che il terreno era composto da ghiaia grossa-fine frammista a sabbia limosa, si è scelto  $F^*=4,5$ . Inserendo i valori delle lunghezze e del fattore di sicurezza all'interno dell'espressione di Lane si è ottenuto:

$$F = \frac{\frac{16,8}{3} + 10,3 + 2L_{taglioni}}{7,52} \geq 4,5$$

e quindi un'altezza totale dei taglioni di 9,12 m; cautelativamente si assunto un valore di 11 m, suddiviso in 6 m per l'elemento di monte e 5 m per quello di valle.

La verifica al sollevamento è stata impostata secondo il criterio di Terzaghi, per il quale:

$$F = \frac{i_c}{i_e} = i_c \frac{s_0}{\bar{h}} \geq 4 \div 5 \quad (41)$$

con:

- $s_0$  = profondità del taglione;
- $\bar{h}$  = valore medio della sottopressione;
- $i_c$  = pendenza critica;
- $i_e = \frac{\bar{h}}{s_0}$  = pendenza in uscita;

La precedente espressione deriva dall'aver considerato che possa essere interessata dal sifonamento una porzione di terreno larga  $s_0/2$  e profonda al massimo  $s_0$ .

Nel caso in esame, la sottopressione  $\bar{h}$  sollecitante il prisma di terreno è stata calcolata in via semplificativa, anziché costruire il reticolato di flusso, considerando la lunghezza di percorso effettuato dall'acqua per giungere fino alla base del taglione in relazione alla lunghezza totale e attribuendo, secondo il criterio di Lane, maggior efficacia ai tratti verticali nella dissipazione del dislivello tra monte e valle.

Essendo in questo caso  $L_{tot}=37,9$  m,  $L_{rimanente}=6,9$  m e  $s_0=5$  m è risultato:

$$\bar{h} = \frac{6,9}{37,9} h = 1,4 m$$

e quindi:

$$F = 4,9$$

soddisfando la verifica.

### 2.3.7.2 Galleggiamento

La verifica al galleggiamento della platea in calcestruzzo è stata fatta valutando che il rapporto tra forze stabilizzanti, date dal peso proprio della struttura e dell'acqua al di sopra di essa, e le sottopressioni fosse maggiore di 1,2.

Essendo:

$$F = \frac{G_{cls} + G_w}{SP} = \frac{949000}{484300} = 1,95 > 1,2 \quad (42)$$

il manufatto è risultato stabile.

## **2.4 Sistemazione alveo**

L'inserimento di un manufatto per il sostegno dei livelli lungo il corso del torrente Timonchio (caratterizzato dalla corrente lenta a moto uniforme) comporta una variazione dei livelli raggiunti dal pelo libero sia a monte che a valle rispetto alla sezione in cui è posta l'opera:

- a monte si registrerà un incremento del tirante rispetto alla situazione indisturbata anche a notevole distanza dalle quinte;
- a valle, essendo in corrente lenta (comandata da valle a moto permanente), si avrà solo una variazione localizzata all'uscita della vasca di dissipazione in confronto al caso di alveo privo di opere.

Sulla base delle osservazioni fatte, sono quindi necessari degli interventi di sistemazione dell'alveo, che si traducono in un innalzamento delle quote arginali a monte dell'opera di presa e in un inserimento di opere spondali e sul fondo in uscita dalla vasca di dissipazione per prevenire fenomeni di erosione a causa delle correnti di ritorno.

### **2.4.1 Innalzamento delle arginature**

La valutazione circa l'aumento di quota delle arginature è stata fatta eseguendo un'analisi a moto permanente con Hec Ras con riferimento alla portata con tempo di ritorno pari a 200 anni e registrando le altezze dei tiranti nelle sezioni con geometria nota sia nel caso di alveo con i manufatti inseriti che in quello con la configurazione originale. Dal confronto tra le due situazioni si è ricavato l'incremento delle quote raggiunte dall'acqua e, imponendo un franco di 1 m, si è valutato di quanto e fino a dove estendere l'intervento:

Tabella 10: Innalzamento del livello liquido nelle varie sezione per una portata con  $Tr=200$  anni

Sezione	Distanza da quinte	Quota talweg	Si opere	No opere	Incremento quota pelo libero	Sommità argine	Franco rimanente
			Quota pelo libero	Quota pelo libero			
	m	m s.l.m.	m s.l.m.	m s.l.m.	m	m s.l.m.	m
2510	774,6	65,19	69,19	69	0,19	70,83	1,64
2410	344,6	63,39	67,82	67,21	0,61	68,57	0,75
2391	204,6	63	67,76	66,33	1,43	69,49	1,73
2390	102,6	62,57	67,67	65,8	1,87	66,74	-0,93
2387	25	62,08	67,74	65,34	2,4	68,57	0,83
2386	1	62,08	66,07	66,59	-0,52		
2385	0						

Dalla precedente tabella si può trovare una conferma a quanto detto in precedenza, dato che si riscontra effettivamente un incremento del livello del pelo libero, che raggiunge i 2,4 m nel tratto che precede l'opera di presa. Dalla differenza tra la quota massima raggiunta dall'acqua e la sommità dell'argine si deduce che la richiesta di garantire un franco di 1 m non viene rispettata, e ciò comporta la necessità di innalzare le arginature, operazione che va fatta con la massima cura: il rialzo va fatto evitando di addossare semplicemente le terre all'argine esistente, ma rimuovendo per prima cosa la copertura erbosa esistente e adottando una buona distribuzione di ammorsamenti per rendere solidale la nuova parte con la vecchia.

Sulla base di questi dati è stato deciso per prima cosa di estendere l'intervento di innalzamento della corona arginale fino a una distanza di circa 360 m a monte delle quinte.

Per quanto riguarda la modalità di realizzazione del rilevato, il terreno (costituito da terra limosa e argillosa con contenuto di sabbia compreso tra il 15% e il 50%) va posto in opera per strati di 30-40 cm di spessore a deve essere adeguatamente compattato; i fianchi delle arginature devono essere poi ricoperti con zolle erbose per poterle proteggere dall'erosione ad opera della corrente.

Lo schema al quale si è fatto riferimento per la sistemazione dell'alveo è quello dell'argine semplice in froldo, imponendo una larghezza di 4 m per la banca e una scarpa media di 3:2 verso fiume.

## 2.4.2 Muri di sostegno

La difesa di sponda con i muri è stata impiegata in quest'opera sia in corrispondenza della vasca di dissipazione a valle delle quinte, sia nei canali di presa e restituzione (vedi planimetria). In particolare, si è deciso di utilizzare dei muri a gravità a mensola, nei quali le forze destabilizzanti vengono contrastate del peso proprio dell'opera e del terreno che grava sulla fondazione.

Per ridurre, e possibilmente eliminare, la spinta esercitata dall'acqua si è realizzato un sistema di drenaggio costituito da dei fori di drenaggio aventi diametro 20 cm e interasse 3 m disposti a quinconce su tutta l'altezza del muro.

La valutazione circa il corretto dimensionamento di un muro di sostegno richiede 4 verifiche:

- 1) Verifica al ribaltamento;
- 2) Verifica allo slittamento;
- 3) Verifica di capacità portante;
- 4) Verifica di stabilità globale.

Viene di seguito riportato lo schema generale con il quale sono state eseguita le prime due verifiche:

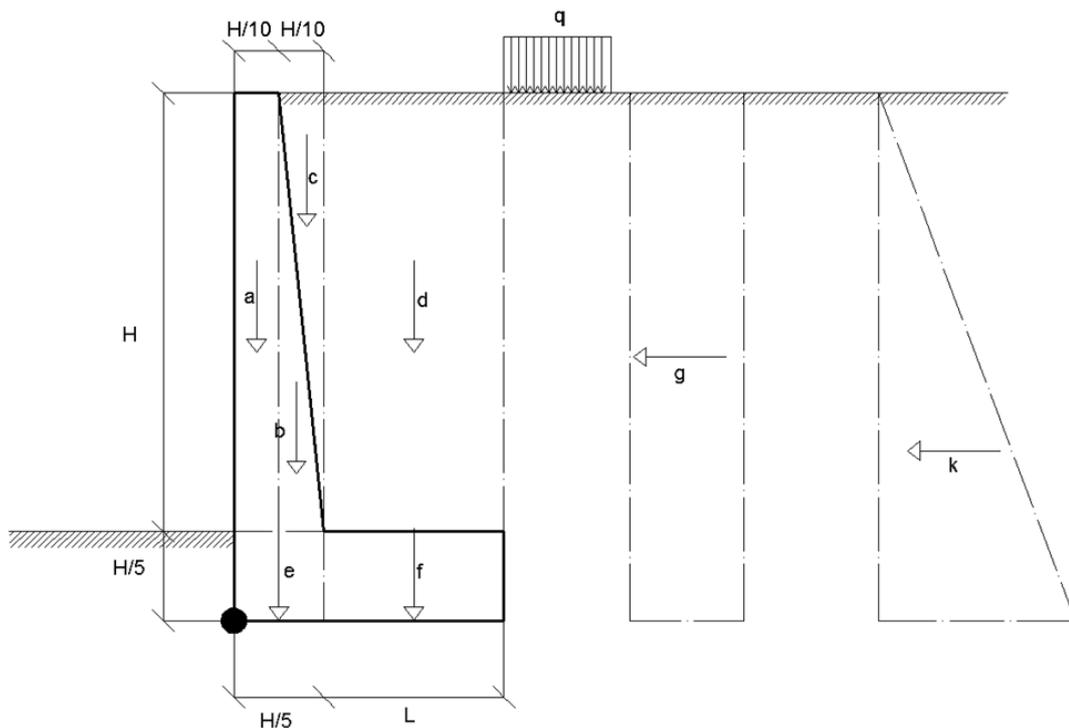


Figura 46: Schema di dimensionamento di un muro di sostegno

Definendo:

- $\gamma_{sat}$  come il peso specifico del terreno saturo;
- $q$ =sovraccarico dovuto agli automezzi che si muovono in prossimità dell'opera;
- $K_a = tg^2(45 - \frac{\phi}{2})$ ;

Le forze sono descritte dalle seguenti relazioni:

$$a = H \frac{H}{10} \gamma_{cls} \quad (43)$$

$$b = \frac{1}{2} H \frac{H}{10} \gamma_{cls} \quad (44)$$

$$c = \frac{1}{2} H \frac{H}{10} \gamma_{sat} \quad (45)$$

$$d = HL\gamma_{sat} \quad (46)$$

$$e = \frac{H}{5} \frac{H}{5} \gamma_{cls} \quad (47)$$

$$f = \frac{H}{5} L \gamma_{cls} \quad (48)$$

$$g = q \left( H + \frac{H}{5} \right) K_a \quad (49)$$

$$k = \frac{1}{2} \left( H + \frac{H}{5} \right)^2 K_a \gamma_{sat} \quad (50)$$

La verifica al ribaltamento richiede che:

$$FS = \frac{\text{momento forze stabilizzanti}}{\text{momento forze ribaltanti}} \geq 1,5 \quad (52)$$

mentre quella allo scorrimento:

$$FS = \frac{\text{forze resistenti}}{\text{forze spingenti}} \geq 1,3 \quad (53)$$

Ad esempio, nel caso del muro di sostegno collocato nel canale che collega il Timonchio alla cassa d'espansione si ha:

- $H=5,90$  m
- $\gamma_{sat}=20$  kN/m<sup>3</sup>
- $K_a=0,26$
- $q=20$  kN/m<sup>2</sup>

Noti questi valori si ottiene  $L=1,79\text{m}$ .

### 2.4.3 Rivestimento del fondo

L'inserimento di manufatti all'interno dell'alveo comporta una variazione dell'andamento delle velocità rispetto alla situazione originale. In particolare, la collocazione di strettoie comporta un incremento di velocità del fluido e quindi una maggior attitudine alla mobilitazione di materiale solido e quindi di escavazione del fondo. Per limitare questo fenomeno è dunque necessario proteggere in maniera adeguata il fondo e le scarpate degli argini nelle zone coinvolte.

#### 2.4.3.1 Fondo della vasca di dissipazione a valle delle quinte

Ogni qualvolta la corrente non possiede energia specifica della corrente rispetto al fondo per transitare attraverso il restringimento determinato dalle quinte, si verifica il passaggio in corrente veloce (ad eccezione del caso in cui il risalto viene rigurgitato). Una buona parte di energia viene dissipata dal risalto, fenomeno fisico al quale è associata la produzione di energia turbolenta e quindi di elevate pulsazioni di velocità e pressioni tali da rendere necessario un adeguato rivestimento del fondo. Per questa opera si è deciso di utilizzare delle piastre in calcestruzzo di dimensioni  $2 \times 3\text{m}$  separate tra loro da giunti di dilatazione.

La valutazione dello spessore  $s$  da assegnare alle lastre è stata fatta servendosi della seguente formula:

$$s = \Omega \left( \frac{l_x}{y}, \frac{l_x}{\lambda_x}, \frac{l_y}{\lambda_y} \right) \cdot (c_p^+ + c_p^-) \cdot \frac{v^2}{2g} \frac{\gamma_w}{\gamma_{cls} - \gamma_w} \quad (54)$$

Dove:

- $\Omega$  è il coefficiente adimensionale legato alla distribuzione spaziale istantanea delle pulsazioni di pressione;
- $l_x$  e  $l_y$  sono le dimensioni della piastra lungo la direzione del moto e trasversalmente;
- $\lambda_x$  e  $\lambda_y$  rappresentano le scale integrali spaziali delle pulsazioni di pressione al fondo lungo la direzione del moto e trasversalmente;

- $c_p^+$  e  $c_p^-$  sono i coefficienti di pressione positivo e negativo.

I coefficienti di pressione correlano le fluttuazioni di pressione massime e minime rispetto alla pressione media con il carico cinetico della corrente incidente la vasca di dissipazione:

$$\frac{\Delta p_{max}^+}{\gamma_w} = c_p^+ \frac{v^2}{2g} \quad (55)$$

$$\frac{\Delta p_{max}^-}{\gamma_w} = c_p^- \frac{v^2}{2g} \quad (56)$$

Una stima di tali coefficiente viene fornita in base al tipo di risalto (scivolo non inclinato e strato limite non completamente sviluppato, scivolo non inclinato e strato limite completamente sviluppato, etc) e al valore del numero di Froude.

Il coefficiente  $\Omega$  può essere anch'esso stimato sperimentalmente attraverso considerazioni di carattere geometrico, essendo dipendente dalla forma e dalle dimensioni delle piastre, oltre che dal numero di Froude.

Nello specifico, considerando la situazione più gravosa (che come si è visto nel paragrafo 2.3.4.1, non coincide con quella per un tempo di ritorno di 200 anni) i dati a partire dai quali dimensionare lo spessore delle piastre sono:

- a)  $v^2=5,88$  m/s;
- b)  $y_1=1,45$  m;
- c)  $Fr=9,19$ ;
- d)  $l_x=2$  m;
- e)  $l_y=3$  m;

(19)

Sulla base di questi valori,  $c_p^+$  viene posto pari a 0,9 e  $\Omega$  viene ricavato dal seguente diagramma:

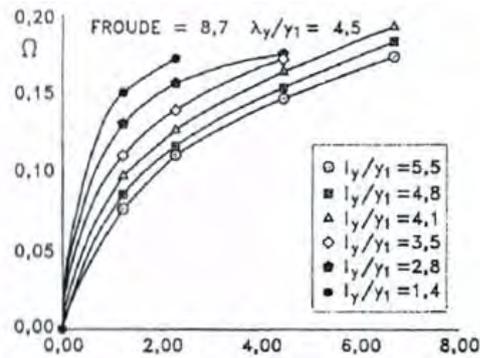


Figura 47: Coefficiente di riduzione  $\Omega$ , per un fissato numero di Froude e diverso rapporto  $l_y/\gamma_1$  (Da: Da Deppo L. e Salandin P., 'Opere di scarico e presa per dighe, traverse e canali', Edizioni Progetto, Padova, 2012)

Si ricava quindi  $\Omega=0,16$  (nota: si è scelta la curva con numero di Froude più vicino a quello del caso in esame).

Inserendo tutti i valori all'interno dell'espressione di  $s$  risulta:

$$s = 0,16 \cdot 1,8 \cdot \frac{5,8^2}{2g} \cdot \frac{9,8}{25 - 9,8} = 0,32 \text{ m}$$

Si è deciso quindi di assumere uno spessore maggiorato del 20%, ovvero  $s=0,40 \text{ m}$ .

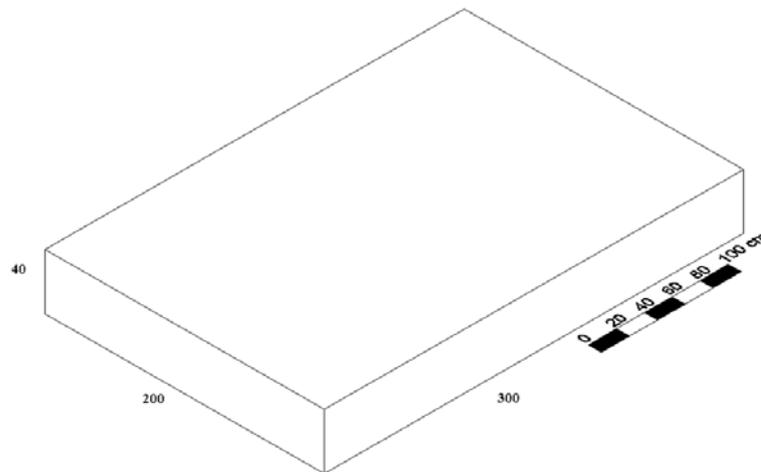


Figura 48: Rappresentazione 3D di una delle piastre utilizzate per il rivestimento del fondo della vasca di dissipazione

### 2.4.3.2 Fondo del canale di derivazione

Ponendosi nella situazione in cui solo la paratoia larga 25 m è completamente alzata, caso per il quale si registra la massima portata e la massima velocità nel canale

che collega il torrente Timonchio alle cassa d'espansione di monte, con il software Hec-Ras si è ricavato il valore della massima velocità transitante in questa zona:

$$v_{max} = 3,22 \text{ m/s}$$

Per contrastare l'erosione del fondo si è reso necessario un intervento di protezione del fondo, questa volta rivestendolo con dei massi di adeguata pezzatura.

Il corretto diametro da assegnare agli elementi lapidei è stato ottenuto applicando la formula FHWA:

$$\frac{d_{50}}{v_{cr}^2/2g} = 0,7 \frac{K^2}{(\gamma_s - \gamma_w)/\gamma_w} \quad (57)$$

dove:

- $v_{cr}$  rappresenta la velocità che dà luogo al moto di una particella di dimensione  $d_{50}$ ;
- $K$  è un coefficiente che tiene conto delle possibili disuniformità del campo di moto;

Ponendo  $K=1,4$ , si ottiene un diametro  $d_{50}$  pari a 0,44 m (cautelativamente lo si assume pari a 0,5 m).

### 2.4.3.3 Altre zone

Procedendo in maniera analoga al caso precedentemente descritto, si è calcolato anche il valore del diametro per le altre zone esposte all'erosione:

*Tabella 11: Diametri scelti relativi alla protezione al fondo nelle diverse zone*

Zona	Velocità (m/s)	Tirante (m)	Diametro (m)
Uscita vasca dissipazione su Timonchio	3.9	4.01	0.65
Ingresso quinte	5.64	3.99	1.3
Uscita vasca U.S.B.R.	2.07	4.04	0.2

#### 2.4.4 Difesa di sponda

Nelle sezioni dell'alveo immediatamente a monte e a valle della vasca di dissipazione, a causa dei restringimenti, si ha che l'andamento planimetrico delle velocità è tutt'altro che monodimensionale poiché si ha la nascita di zone di ricircolo. Per prevenire il danneggiamento delle sponde in queste zone si è optato per un rivestimento a scogliera. Il diametro  $d_{50}$  con il quale è stata realizzata la scogliera è stato ottenuto applicando l'espressione FHWA:

$$\frac{d_{50}}{v_{cr}^2/2g} = 0,675 \left[ \frac{F_s/K}{(\gamma_s - \gamma_w)/\gamma_w} \right]^{3/2} F \quad (58)$$

Dove:

- $F_s$  è il fattore di stabilità;
- $K$  è il coefficiente di Lane, definito dall'equazione:

$$K = \cos\alpha \sqrt{1 - \frac{tg^2\alpha}{tg^2\varphi}} \quad (59)$$

- $\alpha$  e  $\varphi$  rappresentano l'inclinazione della sponda e l'angolo d'attrito del materiale di protezione;
- $F$  è il numero di Froude della corrente.

Scegliendo un materiale spigoloso, l'angolo di attrito  $\varphi$  assume valore circa costante al variare del diametro; avendo posto una scarpa di 3:2, il coefficiente di Lane è risultato pari a 0,55.

Una stima del fattore di stabilità è stata fatta confrontando le condizioni di esercizio del caso in esame con la taratura effettuata dall'USGS (*United States Geological Survey*) su 30 rilievi effettuati in situ: nel caso di correnti gradualmente varie con moderata azione ondosa e/o del trasporto di detriti galleggianti  $F_s=1,3\div 1,6$ .

Esplicitati tutti questi valori, si è potuto quindi definire il  $d_{50}$  del materiale lapideo a seconda della velocità della corrente:

Tabella 12: Diametro della scogliera scelto a seconda delle zone

Zona	Velocità (m/s)	Fr	Diametro (m)
Tratto compreso tra imbocco presa e quinte	2.48	0.38	0.15
Uscita vasca dissipazione	2.7	0.5	0.18

Particolare attenzione è da porre alla modalità di realizzazione della scogliera. Innanzitutto, prima di disporre i massi, devono essere rimossi arbusti e strato organico e il terreno deve essere reso uniforme. Prima di posizionare il materiale lapideo bisogna posizionare il geotessuto per garantire il drenaggio e per evitar lo sprofondamento del pietrame. Finita la fase preliminare, si procede con la posa in opera della scogliera, operazione che deve procedere a partire dal piede per poi proseguire lungo la sponda.

La protezione per contrastare lo scalzamento al piede è stata realizzata con un cordolo in calcestruzzo armato di sezione rettangolare con base di 100 cm e altezza 250 cm. Allo stesso modo, per proteggere le sezioni iniziale e terminale del rivestimento, assicurando la stabilità dei massi contro possibili rimozioni, e per limitare la propagazione di fenomeni erosivi localizzati si è realizzata una soglia con massi annegati nel getto fondata di 300 cm al di sotto della linea di talweg.

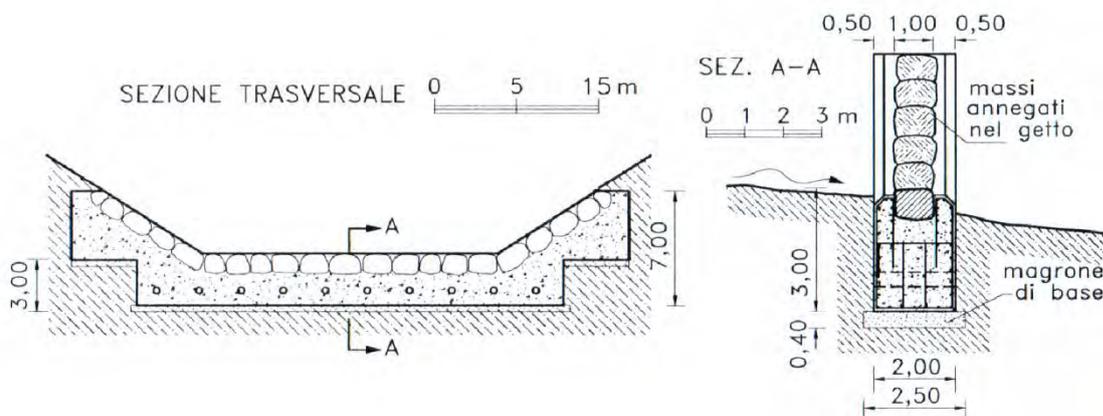


Figura 49: Soglia di stabilizzazione in calcestruzzo rivestita con massi annegati nel getto (Da: Da Deppo L., Datei C. e Salandin P., 'Sistemazione dei corsi d'acqua', Edizioni Progetto, Padova, 2012)

Lo spessore  $s$  del rivestimento è stato posto pari 0,35 m, valore risultante dalla somma dello spessore minimo più quello addizionale legato al trasporto di materiali galleggianti da parte della corrente.

## 2.5 Dimensionamento dello sfioratore di troppo pieno della cassa di monte

Nell'argine di separazione tra la cassa di monte e quella di valle si è deciso di porre uno sfioratore di troppo pieno con la funzione di trasferire i volumi invasati, una volta raggiunto il livello di massima regolazione, dal bacino di monte a quello di valle. Viene di seguito riportato il dimensionamento e la descrizione della sola cassa di monte, in quanto per quella di valle si è utilizzato il medesimo procedimento di calcolo.

Al fine di allontanare la vena sfiorante dalle arginature e per contenere al minimo la dimensione del manufatto si è optato per due vasche collettrici di portata con soglia sagomata secondo il profilo Creager-Scimemi a pianta e sezione rettangolare confluenti in un unico canale di scarico:

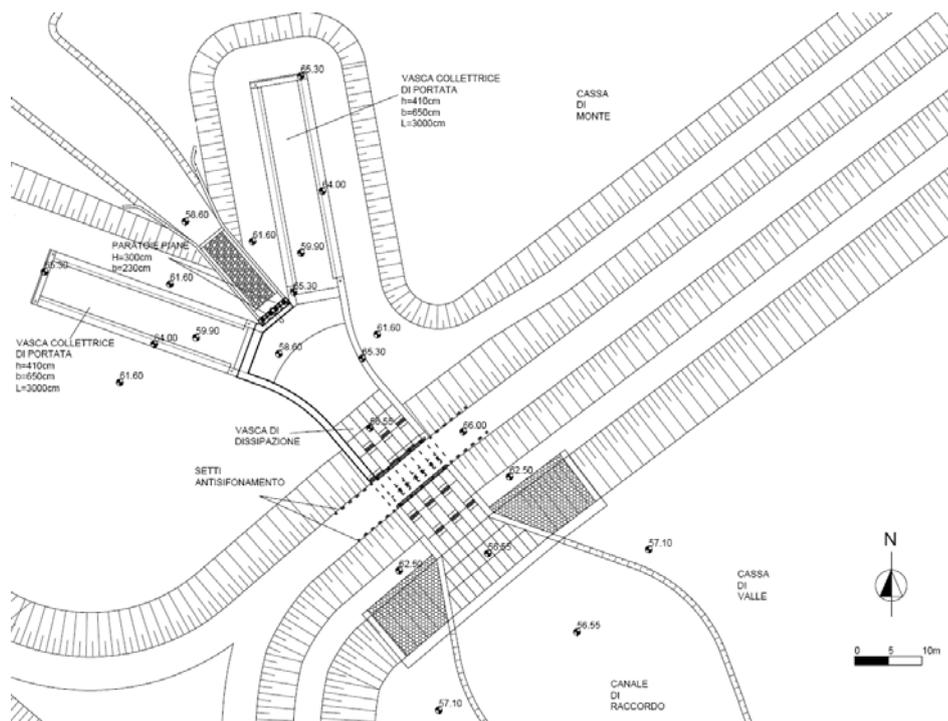


Figura 50: Pianta dello sfioratore di troppo pieno della cassa di monte

Per valutare la portata con cui dimensionare tale opera e la conseguente lunghezza di sfioro necessaria si è utilizzato un foglio di calcolo elettronico, la cui impostazione verrà esplicitata al capitolo 3. Dopo aver stabilito il carico sulla soglia, pari a 0,7 m, si sono effettuate alcune prove osservando come variava l'effetto di laminazione operato dalle casse su delle onde di piena al variare della lunghezza dello

sfiore; è così risultata ottimale un'estensione della soglia di 120 m da ripartire lungo i 2 profili sfioranti delle due vasche e una corrispondente portata totale di 150 m<sup>3</sup>/s (75 m<sup>3</sup>/s per ciascuna vasca).

### 2.5.1 Dimensionamento delle grandezze geometriche caratteristiche della vasca

La valutazione circa le quote dei livelli liquidi che si determinano all'interno della vasca può essere fatta riconducendosi al caso di una corrente a portata linearmente variabile. Ipotizzando che alla fine della vasca la corrente defluisca con l'altezza critica  $y_c$ , l'altezza del tirante nella sezione iniziale viene calcolata facendo riferimento al principio di conservazione della quantità di moto; ponendosi nel caso di pendenza del fondo trascurabile si ottiene:

$$\frac{1}{2}y_{monte}^2 = \frac{1}{2}y_c^2 + \frac{q^2}{gy_c} \quad (60)$$

ma essendo:

$$q^2 = gy_c^3 \quad (61)$$

risulta:

$$y_{monte} = \sqrt{3}y_c \quad (62)$$

Poiché si è ricavata una lunghezza di 30 m per ciascuna vasca, si è scelta una larghezza di adottare una larghezza pari a circa 1/6 del precedente valore, ovvero B=6,5 m.

Sulla base di queste misure si è calcolato il tirante critico con:

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gB^2}} = 2,38 \text{ m} \quad (63)$$

e una conseguente altezza di monte di 4,12 m.

Si è così scelto di assegnare cautelativamente una distanza tra la quota di fondo vasca e sommità del bordo sfiorante di 4,12 m, avendo a disposizione altri 0,45 m (2/3h) per non incorrere nel fenomeno del rigurgito.

Prima di procedere alla valutazione degli spessori da assegnare alle pareti e al fondo del manufatto è necessario verificare che la corrente sia in grado di defluire effettivamente in condizioni critiche alla fine della vasca; questo controllo può essere

fatto controllando che la massima quota raggiunta dall'acqua nella cassa di valle non superi quella del fondo della vasca collettrice maggiorato di  $y_c$ : poiché la quota che caratterizza il livello di massimo invaso di valle è uguale a 61,70 m s.l.m. e quella del fondo vasca è di 59,90 m s.l.m., si ha che la differenza è pari a  $1,8 \text{ m} < y_c$  e quindi non si ha rigurgito da valle.

La corretta dimensione degli spessori di fondo e parete viene fatta verificando che le misure scelte siano in grado di soddisfare la verifica a galleggiamento, ovvero che il rapporto tra il peso proprio della struttura e le sottopressioni che si determinano a causa della spinta di Archimede sia maggiore o tutt'al più uguale a 1,2.

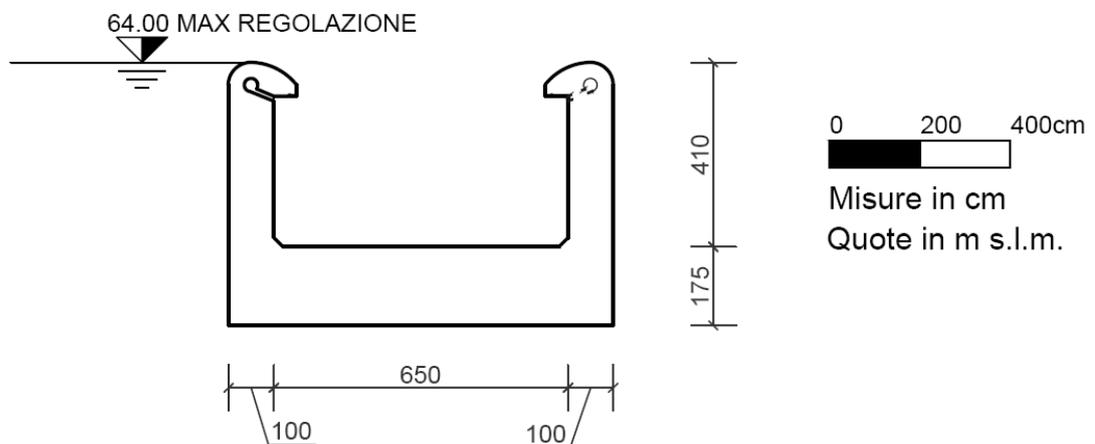


Figura 51: Sezione trasversale di una vasca collettrice di portata

Scegliendo una dimensione di 1 m per le pareti laterali e 1,5 m per il fondo risulta:

$$SP = (1,75 + 4,1)(1 + 1 + 6,5)\gamma_w = 487,30 \text{ kN/m}$$

$$G = (1,75(1 + 1 + 6,5) + 2 \cdot 4,1)\gamma_{cls} = 588,41 \text{ kN/m}$$

e quindi:

$$F = \frac{G}{SP} = 1,21 > 1,2$$

soddisfando quindi la verifica a galleggiamento.

## 2.5.2 Dimensionamento dei denti della vasca di dissipazione

Giunta nella sezione terminale della vasca, la corrente, prima di arrivare alla quota del fondo della cassa di valle, deve affrontare due scivoli, il primo alto 1,3 m e il secondo 2,05 m; percorrendo questo dislivello la corrente acquista energia cinetica che deve essere dissipata prima di arrivare al bacino di valle. In questo senso si è deciso di porre dei denti dimensionati in maniera tale da fornire la spinta necessaria a equilibrare quella della corrente alla base del secondo scivolo. Il calcolo viene svolto nel caso più gravoso, ovvero quello di portata massima sfiorata nelle vasche collettrici e livello del pelo libero nella cassa di valle minore rispetto alla quota del fondo della vasca di dissipazione.

Il primo passo consiste nel ricavare, applicando dei bilanci di energia, il tirante e la conseguente velocità che assume la corrente una volta percorso il dislivello.

Assegnando il pedice 2 ai valori propri della sezione posta immediatamente alla base dello scivolo si ha:

$$\begin{cases} \frac{3}{2}y_c = H_c = H_2 + a \\ a = 1,3m \end{cases} \quad (64)$$

Poiché la corrente sarà sicura veloce, il tirante  $y_2$  è ottenibile mediante l'applicazione iterativa dell'espressione:

$$y_2 = \sqrt{\frac{Q^2}{2gB_{vasca}^2(H_c + a - y)}} = 1,4 \text{ m} \quad (65)$$

e una velocità di 8,24 m/s.

La corrente giunge così nel tratto in cui le due vasche si incontrano; supponendo che il tirante e la velocità (e quindi anche l'energia specifica della corrente rispetto al fondo) si mantengano costanti fino alla sezione 3 di larghezza  $2B_{vasca}=13$  m, caratterizzando con il pedice 4 la sezione alla base del secondo scivolo (avente larghezza  $B_4=9$  m, coincidente con quelle della vasca di dissipazione posta immediatamente a valle), risulta:

$$y_4 = \sqrt{\frac{Q^2}{2gB_4^2(H_3 + a_2 - y)}} = 1,638 \text{ m} \quad (66)$$

espressione risolta iterativamente. Di conseguenza,  $v_4=10,17$  m/s e  $Fr_4=2,538$ .

La corrispondente altezza coniugata risulta:

$$y_{coniug_4} = \frac{y_4}{2} \left( -1 + \sqrt{1 + 8Fr_4^2} \right) = 5,13 \text{ m} \quad (67)$$

Decidendo di posizionare i denti a una distanza di 5 m dalla base dello scivolo e supponendo che il tirante varii linearmente tra la sezione 4 e quella che caratterizza la fine del risalto (supponendo che quest'ultimo abbia lunghezza uguale a 6 volte l'altezza della coniugata della rapida), si ricava un'altezza del tirante in prossimità della prima fila di denti pari a 2,22 m e una velocità di 7,5 m/s.

L'area totale, da suddividere in base al numero di denti, è stata ottenuta applicando un bilancio di spinte tra la sezione alla base del secondo scivolo e quella posta alla fine del risalto:

$$M_{monte} = B_4 \frac{y_4^2}{2} + \frac{Q^2}{gB_4 y_4} \quad (68)$$

$$M_{valle} = B_4 \frac{y_{coniug_4}^2}{2} + \frac{Q^2}{gB_4 y_{coniug_4}} \quad (69)$$

$$F = C_d A_{tot} \frac{v_{denti}^2}{2g} = \Delta M \quad (70)$$

Per soddisfare l'ultima relazione, l'area totale dei denti necessaria è stata quantificata in 46,21 m<sup>2</sup>. Disponendo 15 denti, aventi larghezza 1,5m e altezza 2,1m, a quinconce su 5 file da 3 si è potuta equilibrare la spinta di monte.

Determinata la superficie frontale di ciascun dente, il passo successivo è consistito nella valutazione delle altre dimensioni che ne caratterizzavano la geometria, con lo scopo di assicurare la stabilità al ribaltamento. Facendo riferimento alla prima fila più sollecitata, la forza ribaltante agente è stata calcolata considerando ancora una volta la spinta idrodinamica:

$$F = C_d A_{denti} \frac{v_{denti}^2}{2g} = 168,75 \text{ kN} \quad (71)$$

Si sono così assunte le dimensioni:

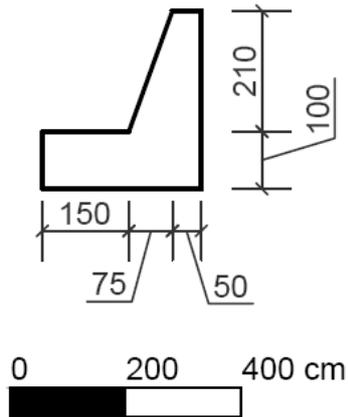


Figura 52: Sezione tipo di un dente di dissipazione

Verificando la stabilità al ribaltamento, le forze prese in esame sono:

- Spinta idrodinamica (ribaltante) con braccio 2,05 m;
- Spinta attiva (ribaltante) con braccio 0,33 m;
- Peso proprio dell'elemento (stabilizzante);
- Spinta passiva (stabilizzante) con braccio 0,33 m.

Utilizzando la configurazione geometrica rappresentata in figura, la verifica è stata soddisfatta.

Il rivestimento del fondo della vasca in tutti i punti in cui non fossero ubicati i denti è stato realizzato con lastre di calcestruzzo di spessore 50 cm, calcolate alla stessa maniera di quelle ricoprenti la vasca di dissipazione posta a valle delle quinte.

## 2.6 Dimensionamento del degli scarichi di fondo

Per quanto riguarda le opere di restituzione al Timonchio delle acque invasate, sono stati previsti due scarichi di fondo, uno per ciascuna cassa, costituiti da degli scatolari presidiati da paratoie piane. Le luci sono da aprire quanto prima possibile per rendere disponibili i volumi d'invaso per il controllo di una eventuale seconda onda di piena che dovesse verificarsi.

Si è deciso di inserire anche uno scarico di fondo tra una cassa e l'altra per consentire l'immissione di portate nella cassa di valle senza dover necessariamente raggiungere il livello di massima regolazione in quella di monte. Quest'opera, allo stesso modo di quella che interconnette la cassa di valle al Timonchio, è stata realizzata praticando due aperture regolate da paratoie nel manufatto di sfioro di troppo pieno.

Il dimensionamento di queste opere è stato fatto ponendosi degli obiettivi sul tempo di svuotamento e sulla massima portata defluente nel Timonchio. In seguito all'analisi sulle onde di piena si è ritenuto opportuno scegliere le dimensioni delle aperture in modo da svuotare quasi totalmente la cassa entro 24 ore. Sulla base delle curve di volume e superficie è stato costruito un foglio di calcolo elettronico che, effettuando i calcoli a intervalli di 15 min, valutasse volume invasato rimanente e tirante in corrispondenza degli scarichi. Viene ora presentato il dimensionamento del solo scarico di fondo tra cassa di monte e Timonchio in quanto il procedimento applicato per gli altri due manufatti è il medesimo.

Partendo dalla condizione di cassa riempita fino al livello di massima regolazione, i parametri caratterizzanti il volume invasato e la portata uscente sono stati calcolati applicando il seguente procedimento. Innanzitutto, indicando il tempo trascorso (in secondi) come:

$$t_i = t_{i-1} + 900 \quad (72)$$

la quota del livello liquido è stata ricavata, discretizzando l'equazione dei serbatoi, con:

$$quota_i = quota_{i-1} - (t_i - t_{i-1}) \frac{Q_{out_{i-1}}}{S_{i-1}} \quad (73)$$

Il valore di  $S_{t-1}$  è stato ottenuto dopo aver ricavato l'equazione interpolante la curva delle superfici; nota  $quota_i$ , considerando questa volta la curva dei volumi si è valutato a ogni istante il volume invasato rimanente. Infine, la portata uscente è stata definita da:

$$\begin{cases} Q_{out_i} = C_{q1} \cdot n \cdot h_{bocca} \cdot b_{bocca} \sqrt{2g(quota_i - quota_{min})} & \text{se } quota_i - quota_{min} > H^* \\ Q_{out_i} = C_{q2} \cdot n \cdot b_{bocca} \cdot (quota_i - quota_{min})^{3/2} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

dove: n=numero di bocche; h e b corrispondono a altezza e larghezza di una singola luce;  $C_{q1}=0,6$ ;  $C_{q2}=0,385$ ;  $H^*=1,25h_{bocca}$ .

La relazione precedente è stata ricavata dopo aver riscontrato, considerando pendenza del fondo e lunghezza dello scatolare oltre alle caratteristiche geometriche dell'imbocco, di rientrare nel caso di tombino idraulicamente corto.

Optando per 2 luci aventi ciascuna altezza e larghezza di 2 m, si è ricavato che dopo 12 ore la cassa di monte era svuotata all'80%:

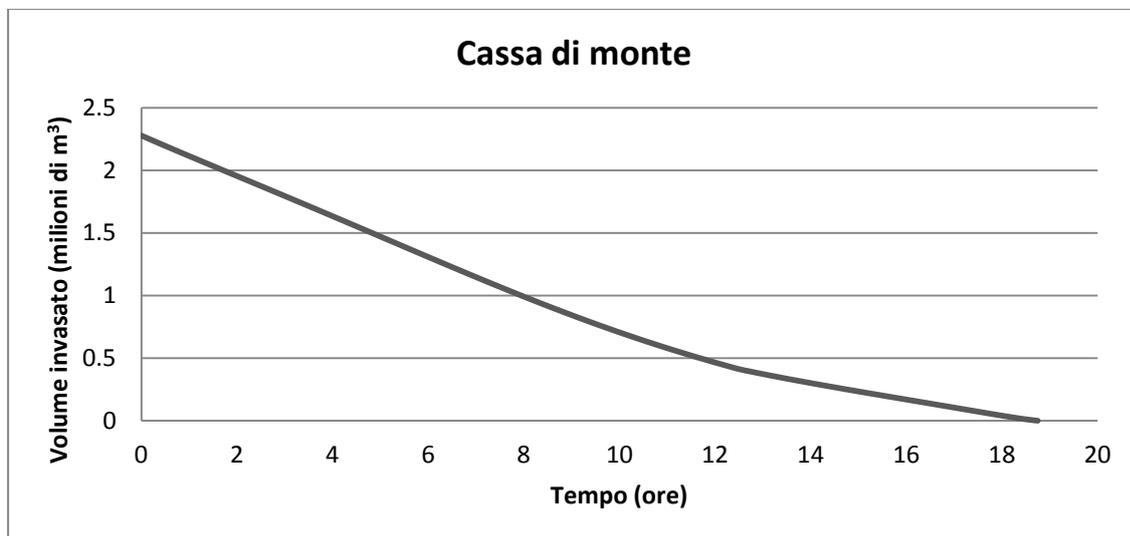


Figura 53: Diagramma Tempo-Volume invasato relativo alla cassa di monte

### 3) Programma per la valutazione dell'effetto di laminazione

Al fine di valutare l'effetto di laminazione generato dall'inserimento della cassa d'espansione è stato creato un foglio Excel strutturato in maniera tale da restituire, una volta inseriti i dati di input, i valori delle portate in uscita dal sistema. Lo schema semplificato a cui è stato fatto riferimento è il seguente:



Figura 54: Schema di riferimento del codice di calcolo

Il file excel è stato suddiviso in 4 fogli:

- 1) *Dati di input+risultati*: in questo foglio vengono inseriti i dati di input necessari a definire le condizioni al contorno e le caratteristiche geometriche delle opere;

viene inoltre rappresentato un diagramma che mette a confronto l'idrogramma in ingresso e quello in uscita;

- 2) *Curve volumi e sup*: in questo sono state inserite le curve che legano i valori delle superfici e dei volumi invasati in relazione alla quota rispetto al medio mare;
- 3) *Nodo opera presa*: vengono qui inseriti i dati geometrici relativi all'opera di presa; vengono inoltre calcolate le portate che passano attraverso le varie opere basandosi su considerazioni di tipo energetico;
- 4) *Calcoli*: utilizzando i dati inseriti e ricavati dai fogli precedenti, si ricavano i valori delle portate di valle necessari per costruire l'idrogramma in uscita.

Viene di seguito fornita una descrizione dettagliata di ciascun foglio di calcolo.

### **3.1 Dati di input e risultati**

In questo primo foglio devono essere inseriti:

- l'idrogramma in ingresso caratterizzato da un intervallo temporale di 15 minuti tra le rilevazioni dei valori delle portate;
- l'intervallo di calcolo espresso in secondi;
- la quota di sfioro rispetto al medio mare, la lunghezza e il coefficiente di portata  $C_q$  dello sfioratore di troppo pieno della cassa di monte;
- la quota di sfioro rispetto al medio mare, la lunghezza e il coefficiente di portata  $C_q$  dello sfioratore di troppo pieno della cassa di valle;
- L'istante di inizio apertura dell'opera di presa;
- La massima apertura della paratoia (da indicare con una precisione del decimo di metro).

Per effettuare i calcoli in maniera più semplice, ad ogni valore temporale espresso in giorni/mesi/anni ore:minuti è stato assegnato un codice numerico; in maniera semplificata, si è supposto che l'apertura della paratoia proceda con velocità costante pari a 0.1 m ogni 15 min fino al raggiungimento del valore di apertura massima.

Al fine di avere un riscontro visivo immediato dell'effetto che comporta una variazione delle precedenti caratteristiche geometriche, come anticipato in precedenza, in questo foglio viene rappresentato anche il grafico in cui vengono messi a confronto l'idrogramma in ingresso e quello in uscita.

### **3.2 Curve volumi e superficie**

In questo secondo foglio compaiono le curve dei volumi e delle superfici di ciascuna cassa. A partire dai valori discreti, sono state ricavate le curve interpolatrici per consentire di ottenere i volumi e le superfici per qualsiasi quota; per questo scopo si è optato per una curva polinomiale di sesto grado. In particolare, per la curva delle superfici, si sono utilizzate due curve interpolatrici raccordate nel punto di massima concavità negativa (vedi grafico). Questo passaggio è stato eseguito sia per la cassa di monte che per quella di valle.

### **3.3 Nodo opera di presa**

Nel terzo foglio, basandosi su considerazioni energetiche, sono stati ricavati i valori delle portate transitanti attraverso le varie opere del nodo.

Preliminarmente devono essere inseriti i valori geometrici caratteristici delle opere, ovvero:

- Larghezza e coefficiente di portata relativo alle quinte;
- Elevazione dell'opera di presa rispetto al fondo dell'alveo (petto);
- Larghezza , altezza e massima apertura della paratoia posta all'ingresso della cassa (paratoia 1);
- Larghezza e altezza della paratoia posta nel tratto di restituzione al canale (paratoia 2);

Le portate relative a ciascun valore del tirante H che si verifica nel canale in corrispondenza dell'imbocco dell'opera di presa sono state ricavate nella seguente maniera:

$$1) Q_{quinte} = C_q B_{quinte} \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (74)$$

$$2) Q_{pataoia1} = C_1 C_2 G_0 B_{paratoia1} \sqrt{2g(H - petto)} \quad \text{se } H > \text{petto}, \quad \text{altrimenti} \\ Q_{pataoia1} = 0 \quad (75)$$

$$3) Q_{sfiorata1} = C_q B_{paratoia1} \sqrt{2g(H - petto - h_{paratoia1} - G_0)^{3/2}} \quad \text{se} \\ H > \text{petto} + h_{paratoia1} + G_0 \quad \text{altrimenti } Q_{sfiorata1} = 0 \quad (76)$$

$$4) Q_{pataoia2} = C_q B_{paratoia2} \sqrt{2g(H - petto)^{3/2}} \quad \text{se } H > \text{petto}, \quad \text{altrimenti} \\ Q_{pataoia2} = 0 \quad (77)$$

$$5) Q_{sfiorata2} = C_q B_{paratoia2} \sqrt{2g(H - petto - h_{paratoia2})^{3/2}} \quad \text{se} \\ H > \text{petto} + h_{paratoia2}, \quad \text{altrimenti } Q_{sfiorata2} = 0 \quad (78)$$

dove:  $G_0$  rappresenta l'apertura della paratoia,  $C_1$  e  $C_2$  dipendono dalla geometria della paratoia a settore.

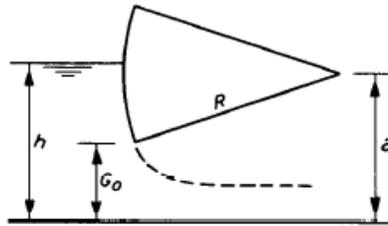


Figura 55: Schema di riferimento della paratoia

Si avrà quindi che:

$$Q_{cassa} = Q_{paratoia1} + Q_{sfiorata1} \quad (79)$$

$$Q_{monte} = Q_{quinte} + Q_{cassa}$$

Servendosi di queste espressioni, una volta ipotizzati dei valori del tirante riferiti al nodo in cui la portata di monte si divideva tra quinte e opera di presa, si è potuto ricavare una relazione tra tirante e portata da monte servendosi di curva interpolatrice di sesto grado (il che consentiva di ottenere il valore del tirante per qualsiasi valore della portata di monte); si è applicato questo procedimento per i vari gradi di apertura della paratoia, ricavando l'equazione riferita ad ogni specifica situazione.

### 3.4 Calcoli

In quest'ultimo foglio di calcolo vengono effettuati tutti i calcoli al fine di ricavare la portata di valle. Viene innanzitutto ricopiato l'idrogramma in ingresso dal

primo foglio; per prima cosa, confrontando l'istante i-esimo con quello dell'inizio della manovra di apertura, viene ricavato il grado di apertura della paratoia 1.

Nota il valore dell'apertura, il programma calcola il valore del tirante del nodo utilizzando l'equazione di sesto grado ricavata per quella specifica situazione nel precedente foglio di calcolo ("nodo opera di presa"). Ricavato questo valore, servendosi delle espressioni scritte in precedenza (dove h ora è dato dal tirante al nodo), viene calcolato per ciascun istante il valore di  $Q_{\text{quinte}}$ ,  $Q_{\text{paratoia1}}$ ,  $Q_{\text{sfiorata1}}$ ,  $Q_{\text{paratoia2}}$ ,  $Q_{\text{sfiorata2}}$ .

### 3.4.1 Cassa di monte

Servendosi della relazione  $S(h)$  tra la superficie e la quota rispetto al medio mare del pelo libero nella cassa ricavata nel foglio 2 ("curve volumi e sup") e del valore della portata entrante, è stato possibile ottenere la quota del pelo libero che veniva a verificarsi a ciascun istante, oltre al relativo valore del volume invasato e della portata uscente; le varie grandezze sono state ricavate nella seguente maniera:

$$\bullet \quad h_{t+\Delta t} = h_t + \Delta t \frac{(Q_{\text{entrante}_t} - Q_{\text{uscente}_t})}{S(h_t)} \quad (80)$$

$$\bullet \quad Q_{\text{entrante}} = Q_{\text{paratoia1}} + Q_{\text{sfiorata1}} \quad (81)$$

$$\bullet \quad \text{Volume}_{t+\Delta t} = \text{Volume}_t + (h_{t+\Delta t} - h_t) * S(h_t) \quad (82)$$

$$\bullet \quad Q_{\text{uscente}_t} = C_q B_{\text{sfioro monte}} \sqrt{2g} (h_t - \text{quota sfioro}_{\text{cassa monte}})^{3/2} \quad \text{se} \quad (83)$$

$$h_t > \text{quota sfioro}_{\text{cassa monte}}, \text{ altrimenti } Q_{\text{uscente}_t} = 0$$

### 3.4.2 Cassa di valle

Per la cassa di valle, si è proceduto in maniera analoga alla precedente sia per quanto riguarda la procedura per ricavare la superficie liquida, sia per ricavare la quota del pelo libero rispetto al medio mare per ciascun istante; a differenza della cassa di monte:

$$\circ \quad Q_{\text{entrante}} = Q_{\text{uscente}_{\text{sfioro monte}}} \quad (84)$$

$$\circ \quad Q_{\text{uscente}_t} = C_q B_{\text{sfioro valle}} \sqrt{2g} (h_t - \text{quota sfioro}_{\text{cassa valle}})^{3/2} \quad \text{se } h_t > \text{quota} \quad (85)$$

$$\text{sfioro}_{\text{cassa valle}}, \text{ altrimenti } Q_{\text{uscente}_t} = 0$$

Disponendo del valore della portata uscente dallo sfioratore di troppo pieno della cassa di valle è stato quindi possibile ricavare il valore della portata che defluiva a valle del sistema, calcolata come:

$$Q_{valle} = Q_{uscente\_sfioro\_valle} + Q_{quinte} + Q_2 + Q_{sfiorata2} \quad (86)$$

Graficando  $Q_{valle}$  e i rispettivi istanti temporali si è ottenuto l'idrogramma in uscita che è poi stato riportato nel primo foglio di calcolo.

## 4) Efficienza della cassa

### 4.1 Simulazioni

Terminati tutti i dimensionamenti dei singoli manufatti è stato possibile valutare l'effetto di laminazione operato dalla cassa di Caldogno su alcune onde di piena. Vengono di seguito presentati gli effetti su 3 onde di piena, 2 derivanti dall'analisi sui 1000 anni di eventi sintetici, e 1 riferita a un evento reale. A questo scopo si è utilizzato il programma descritto al capitolo precedente. Per ciascun'onda verranno esplicitati i valori ottimizzati dei parametri che potevano essere fatti variare (istante di apertura e massima apertura della paratoia) e gli idrogrammi risultanti.

#### 4.1.1 Portata con $Tr=100$ anni e volumi con $Tr=50$ anni

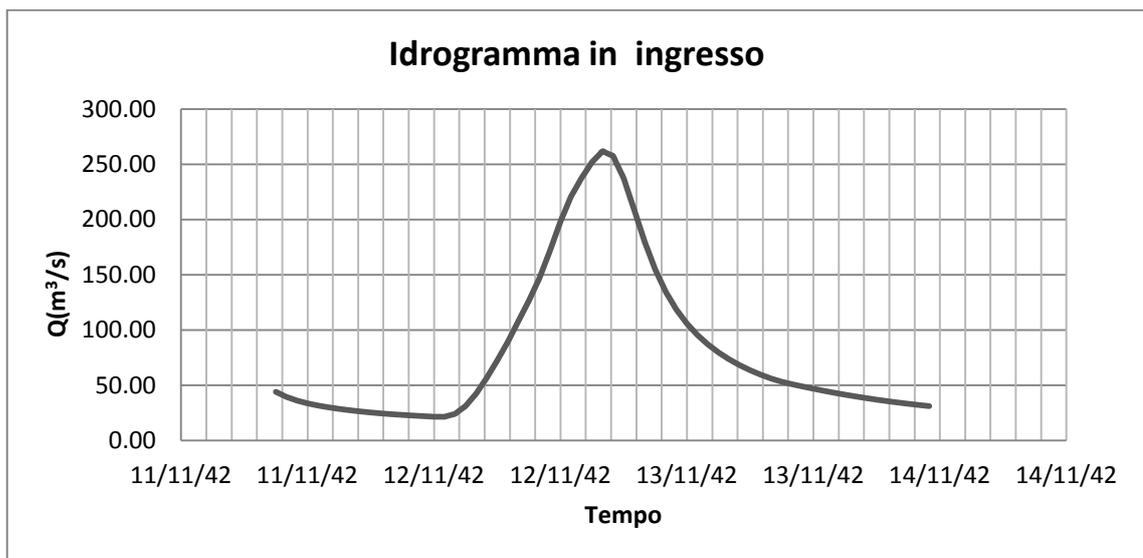


Figura 56: Idrogramma in ingresso,  $Q$  con  $Tr=100$  anni,  $V$  con  $Tr=50$  anni

Quest'onda di piena discende dall'analisi degli eventi sintetici. In questo primo esempio, la portata al colmo è pari a  $261,83 m^3/s$ . Aprendo la paratoia di 1,2 m dall'istante 12/11/42 7:45, momento nel quale la portata nel torrente era di  $103,26 m^3/s$ , si è riusciti a portare la portata di picco a  $144 m^3/s$  (-45%).

Sono risultati i seguenti diagrammi

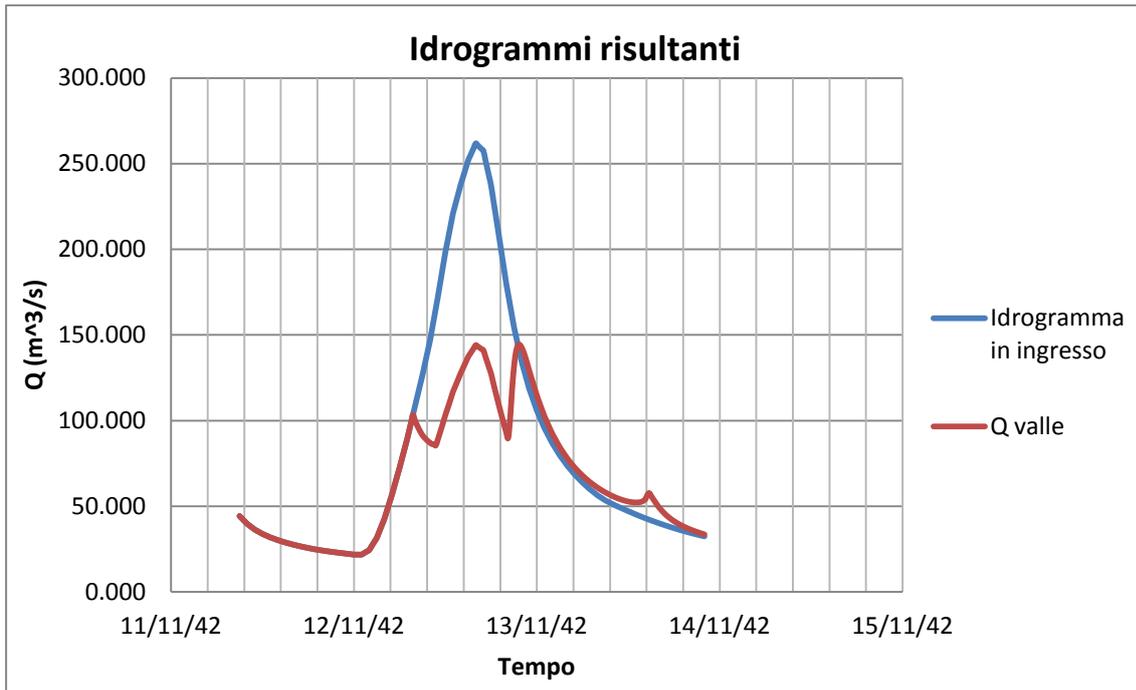


Figura 57: Confronto tra idrogramma proprio della sezione immediatamente precedente all'opera di presa e quello relativo alla sezione immediatamente a valle della cassa d'espansione a seguito di un utilizzo ottimale della cassa (con riferimento all'evento con  $Tr_Q=100$  anni e  $Tr_V=50$  anni)

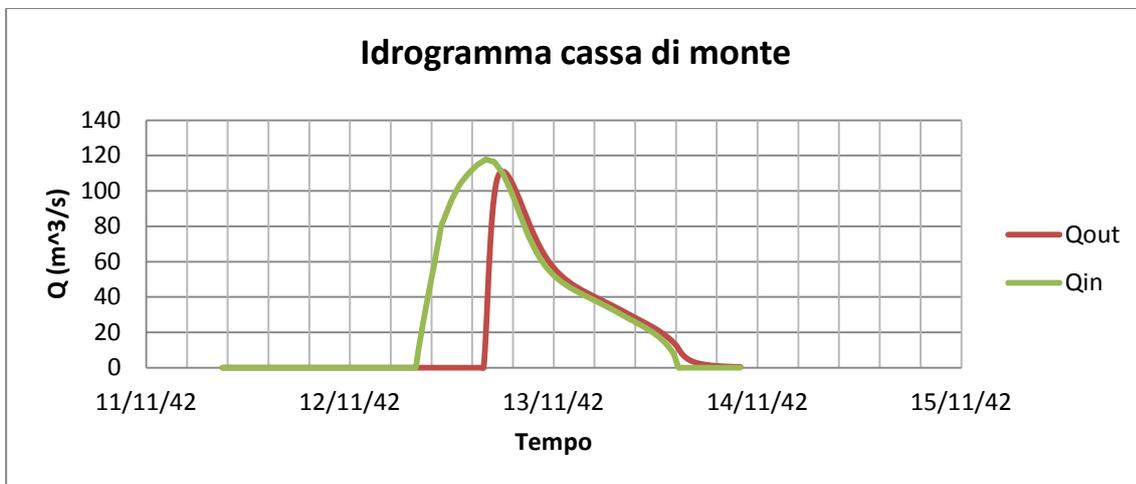


Figura 58: Confronto tra idrogramma in ingresso e in uscita dalla cassa di monte (con riferimento all'evento con  $Tr_Q=100$  anni e  $Tr_V=50$  anni)

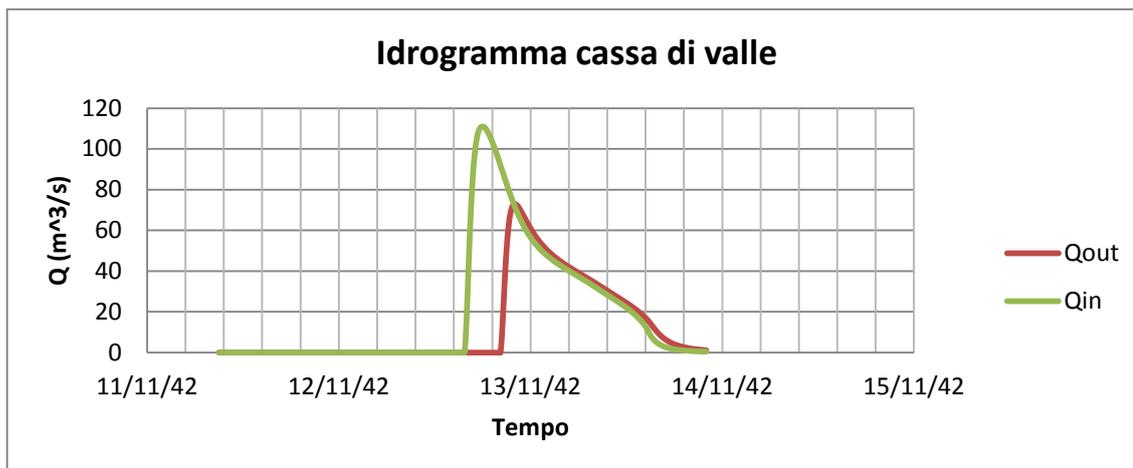


Figura 59: Confronto tra idrogramma in ingresso e in uscita dalla cassa di valle (con riferimento all'evento con  $TrQ=100$  anni e  $TrV=50$  anni)

#### 4.1.2 Evento del novembre 2010

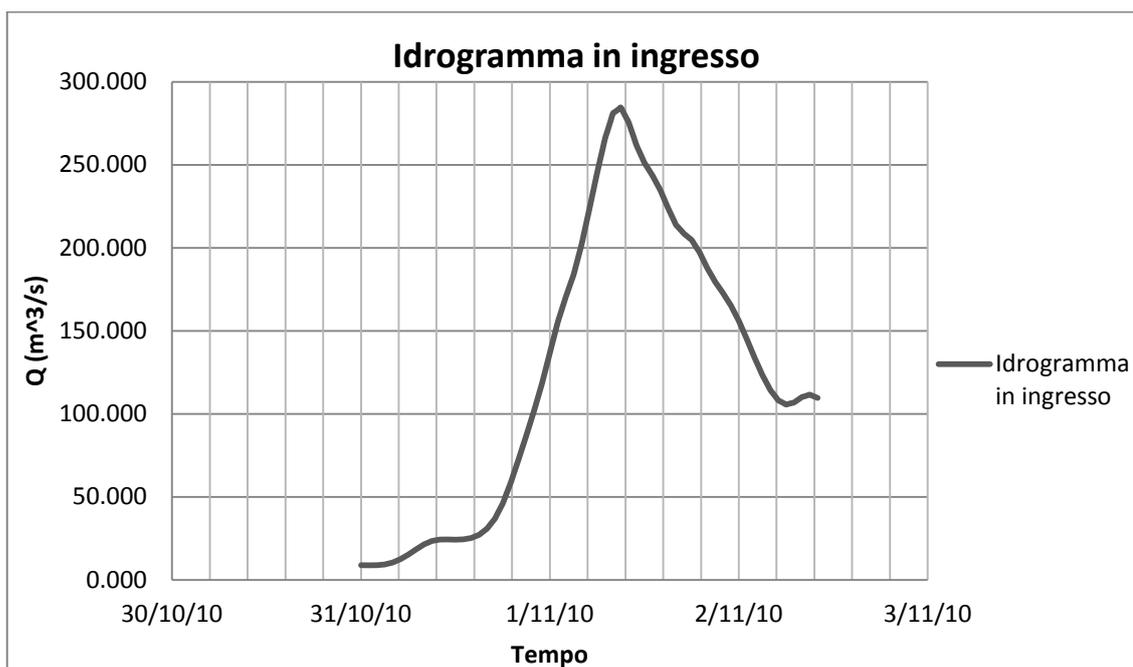


Figura 60: Idrogramma in ingresso relativo all'evento del novembre 2010

Avendo a disposizione i valori delle portate registrati durante l'evento dei primi giorni del novembre 2010 a causa del quale si è verificata l'esondazione del Bacchiglione, è stato possibile ricostruirne l'idrogramma e valutare come sarebbe cambiato se fosse stato presente il bacino di laminazione di Caldogeno, oggetto di questa progettazione.

La portata al colmo è pari a  $284,53 \text{ m}^3/\text{s}$ , valore registrato l'1/11/2010 alle ore 9:00. Aprendo la paratoia alle 3:30 fino a un'altezza di 0,9 m si è ottenuta una riduzione della portata fino a  $196,05 \text{ m}^3/\text{s}$  (-31%).

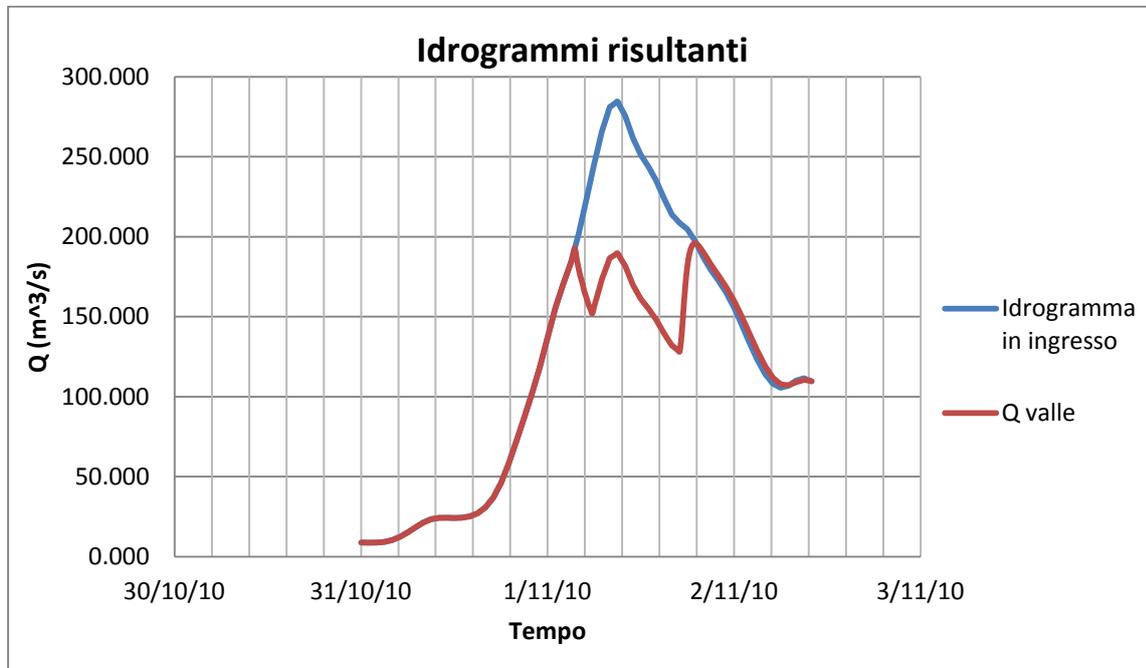


Figura 61: Confronto tra idrogramma proprio della sezione immediatamente precedente all'opera di presa e quello relativo alla sezione immediatamente a valle della cassa d'espansione a seguito di un utilizzo ottimale della cassa (con riferimento all'evento del novembre 2010)

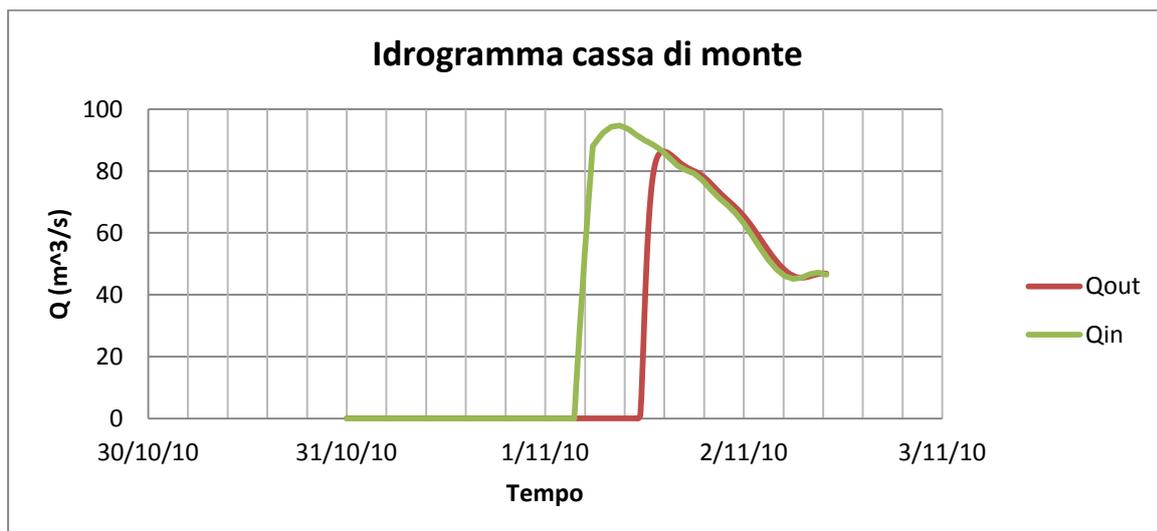


Figura 62: Confronto tra idrogramma in ingresso e in uscita dalla cassa di monte (con riferimento all'evento del novembre 2010)

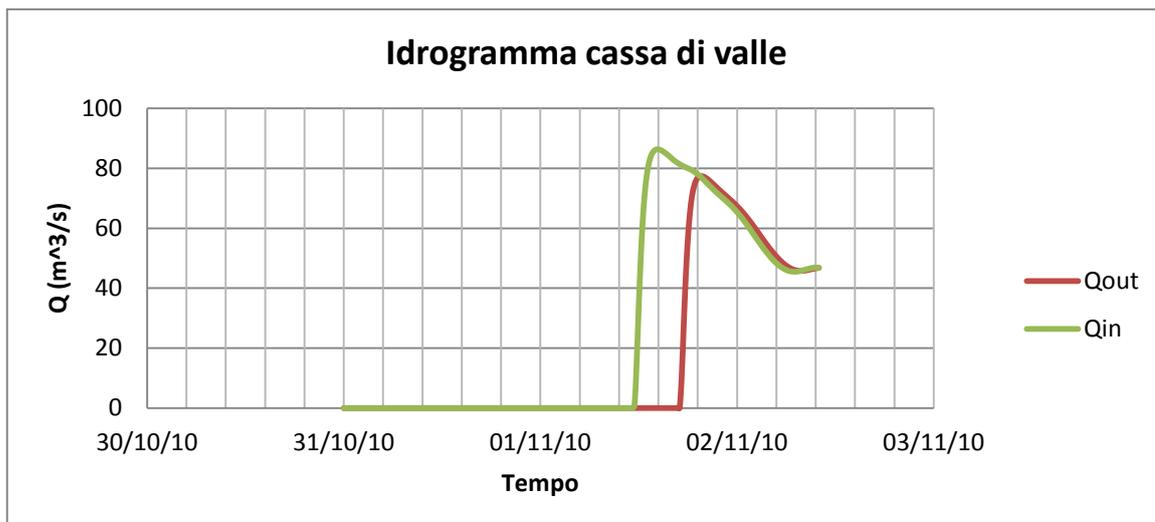


Figura 63: Confronto tra idrogramma in ingresso e in uscita dalla cassa di valle (con riferimento all'evento del novembre 2010)

#### 4.1.3 Portata con $Tr=200$ anni e volumi con $Tr=200$ anni

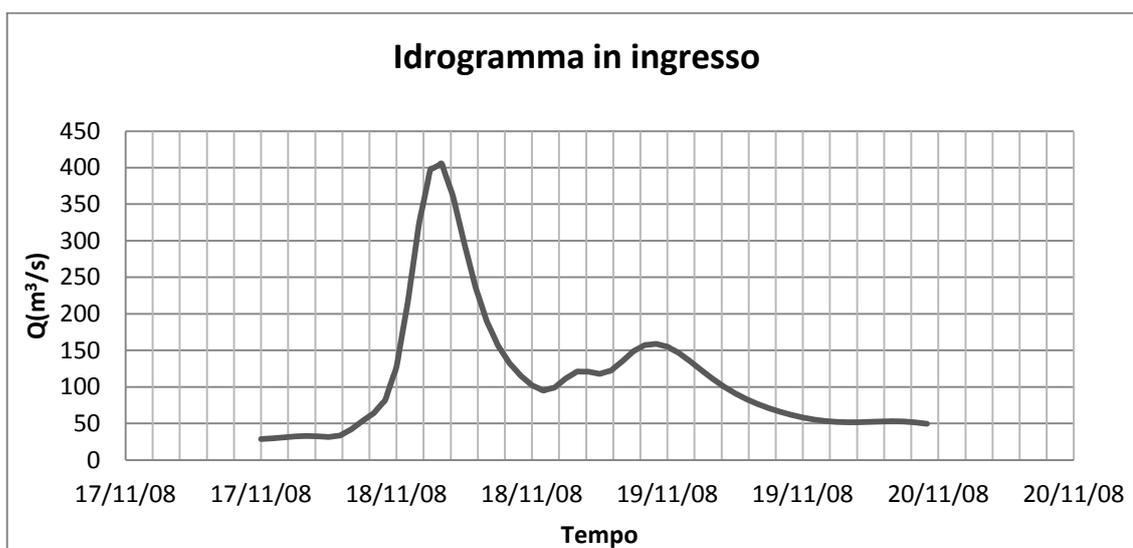


Figura 64: Idrogramma in ingresso,  $Q$  con  $Tr=200$  anni,  $V$  con  $Tr=200$  anni

Quest'onda di piena discende dall'analisi degli eventi sintetici. Avendo deciso di aprire le paratoie quando nel Timonchio transitavano  $115,95 \text{ m}^3/\text{s}$  (17/11/08 23:45) generando una luce sottobattente di 1,4 m, il picco di piena è passato da  $405,42 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $244,55 \text{ m}^3/\text{s}$ , corrispondente a una diminuzione del 40%.

Gli idrogrammi risultanti sono:

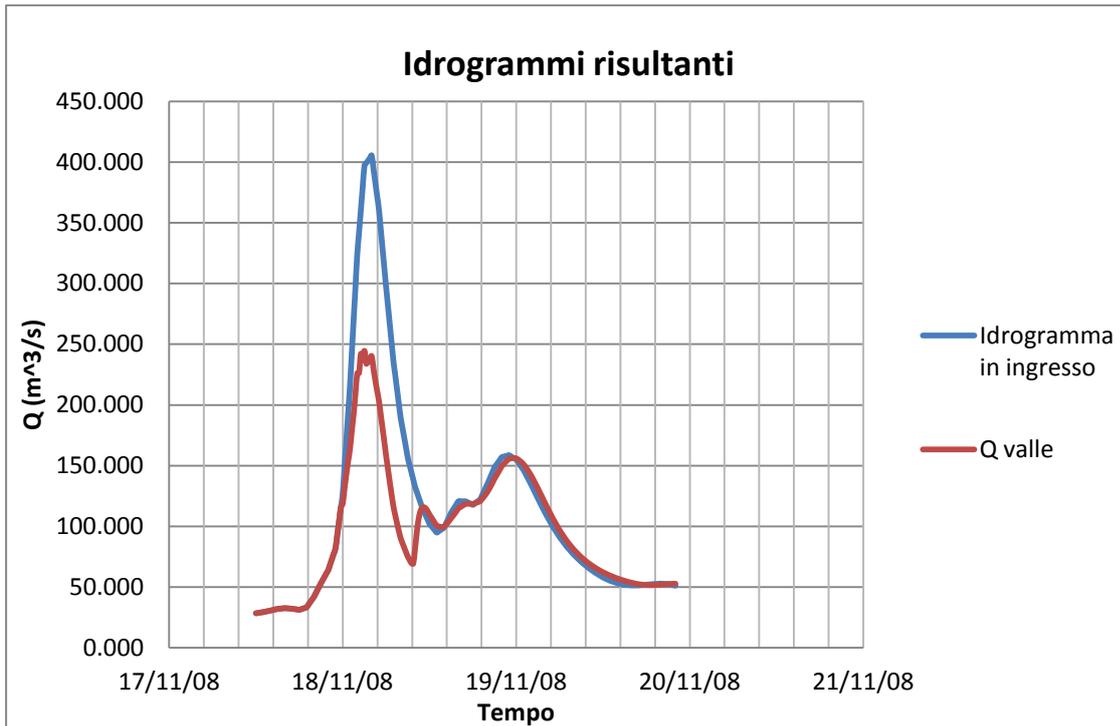


Figura 65: Confronto tra idrogramma proprio della sezione immediatamente precedente all'opera di presa e quello relativo alla sezione immediatamente a valle della cassa d'espansione a seguito di un utilizzo ottimale della cassa (con riferimento all'evento con  $Tr_Q=200$  anni e  $Tr_V=200$  anni)

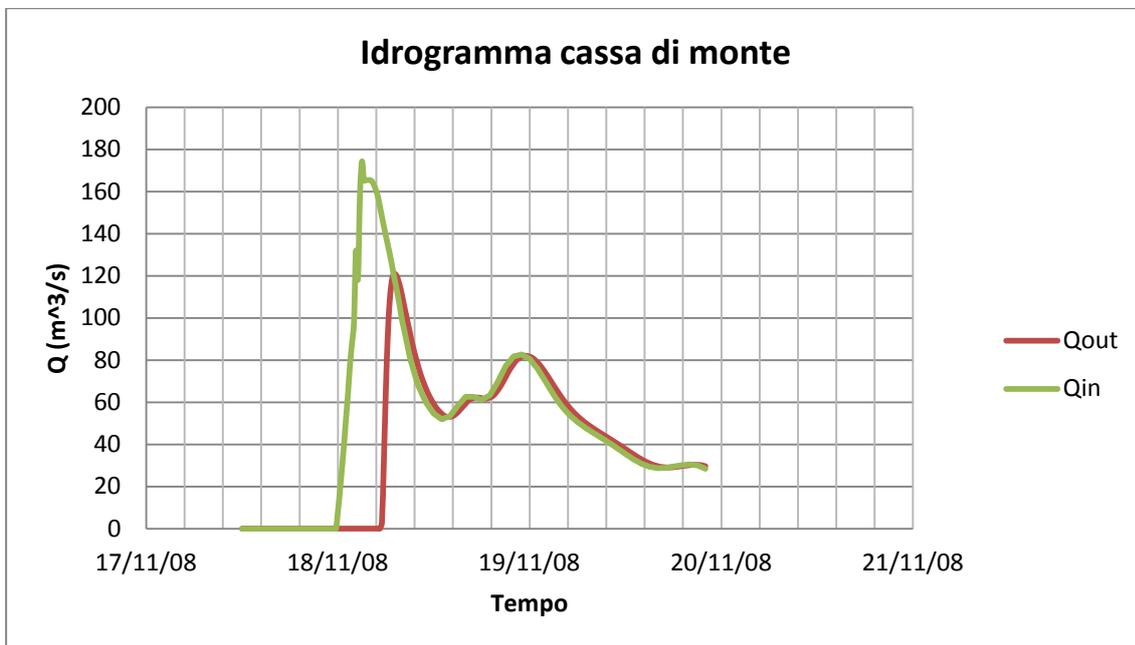


Figura 66: Confronto tra idrogramma in ingresso e in uscita dalla cassa di monte (con riferimento all'evento con  $Tr_Q=200$  anni e  $Tr_V=200$  anni)

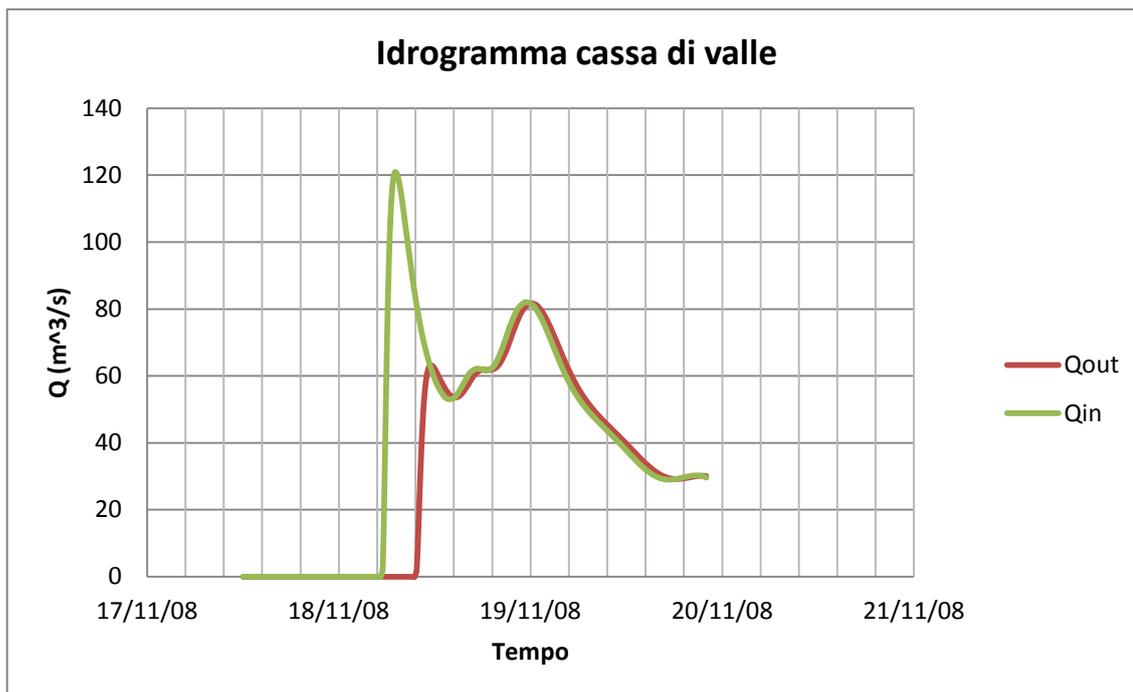


Figura 67: Confronto tra idrogramma in ingresso e in uscita dalla cassa di valle (con riferimento all'evento con  $Tr_Q=200$  anni e  $Tr_V=200$  anni)

## 4.2 Efficienza

Sulla base delle simulazioni condotte, oltre a quelle mostrate al precedente paragrafo, è stato possibile valutare gli effetti dell'opera in termini di aumento della sicurezza idraulica. Con riferimento al tratto del torrente Timonchio a Caldogno che in occasione dell'evento del novembre 2010 è stato interessato da rotte arginali, considerando una portata limite pari a  $190 \text{ m}^3/\text{s}$ , si è potuto verificare che il tempo di ritorno dell'evento critico aumenta dagli attuali 20 anni a 71 anni: pertanto la frequenza degli eventi pericolosi si riduce del 72%, dato che si passa da 50 eventi che superano la portata limite in 1000 anni a 14 eventi.



## Conclusioni

Il lavoro di progettazione ha permesso di giungere a un dimensionamento che rispondesse al meglio alle finalità per le quali si è ritenuta necessaria la realizzazione di questo invaso temporaneo.

Iniziando dall'opera di presa, dopo averne deciso lo schema, si è fatto prima un predimensionamento basato su bilanci di energia, e poi si sono poi affinati i calcoli utilizzando il software Hec-Ras. Ricavati i valori di tiranti e velocità nelle varie sezioni, si sono scelte di conseguenza le opere di sostegno e di protezione del fondo tali da non mettere a rischio la sicurezza strutturale di manufatti e arginature.

Alla stessa maniera, una volta stabilito che tipi di opere utilizzare per realizzare gli sfioratori di troppo pieno e gli scarichi di fondo, si sono calcolate le rispettive grandezze geometriche caratteristiche cercando di ottimizzare i volumi disponibili. Le dimensioni di ciascun elemento sono state determinate assicurando che venissero soddisfatte tutte le principali verifiche di stabilità.

Durante la fase di progettazione sono anche emerse alcune problematiche. Ad esempio, si è riscontrato come, in fase preliminare, siano state prese decisioni di discutibile correttezza, come quella di assumere le quote di gran parte del fondo di entrambe le casse al di sotto della linea di talweg del torrente Timonchio. Dai calcoli è emerso che il riportare i livelli del terreno a una quota tale da scongiurare il rischio di impaludamento comporterebbe una notevole perdita di volume di massimo invaso (-30% per la cassa di monte e -20% per quella di valle).

Dalla valutazione degli effetti di laminazione svolti dalla cassa d'espansione su alcune onde di piena è emerso come effettivamente si riduca in maniera consistente il valore al colmo: si è stimata infatti una riduzione della frequenza degli eventi pericolosi del 72%; in particolare, se tale invaso fosse stato già presente nel novembre del 2010 si sarebbe ridotto in maniera rilevante il contributo dato dal Timonchio alla piena del fiume Bacchiglione. Va però sottolineato come sia essenziale la realizzazione delle altre opere di invaso previste al fine di conseguire l'obiettivo prefissato dall'intero sistema di opere, ovvero ridurre drasticamente il rischio di esondazione di tale fiume.



## Bibliografia

- Ballio G. e Bernuzzi C., *Progettare costruzioni in acciaio*, Hoepli, Milano, 2010.
- Beta Studio & Technital, *Progetto definitivo del bacino di laminazione lungo il torrente Timonchio in comune di Caldogeno (VI) - Relazione idrologica*, 2012.
- Defina A., *Profili di moto permanente*, Dispense del corso di Complementi di Idraulica, Dipartimento IMAGE, Padova, 2010.
- Da Deppo L. e Datei C., *Fognature*, Libreria internazionale Cortina, Padova, 1997.
- Da Deppo L. e Salandin P., *Opere di scarico e presa per dighe, traverse e canali*, Edizioni Progetto, Padova, 2012.
- Da Deppo L., Datei C. e Salandin P., *Sistemazione dei corsi d'acqua*, Edizioni Progetto, Padova, 2012.
- Ghetti A., *Idraulica*, Padova, Edizioni libreria Cortina, Padova, 1980.
- Marani M., *Processi e modelli dell'idrometeorologia*, Dispense del corso di Idrologia, Dipartimento IMAGE, Padova, 2013.
- US Army Corps of Engineers, *Hydraulic design criteria*, United States, 1955.
- US Army Corps of Engineers, *Hec-Ras-Hydraulic Reference Manual*, United States, 2010.

## Sommario delle figure

Fig. 1:	Inquadramento dell'area di indagine	7
Fig. 2:	Bacino imbrifero del Bacchiglione	8
Fig. 3:	Planimetria generale delle casse d'espansione previste	11
Fig. 4:	Sottobacini del Timonchi-Bacchiglione implementati nel modello afflussi-deflussi	13
Fig. 5:	Grafico Q-Variabile ridotta	16
Fig. 6:	Idrogramma Q con $Tr=100$ anni, V con $Tr=50$ anni	17
Fig. 7:	Idrogramma Q con $Tr=50$ anni, V con $Tr=200$ anni	18
Fig. 8:	Idrogramma Q con $Tr=200$ anni, V con $Tr=200$ anni	18
Fig. 9:	Ubicazione dell'opera	19
Fig. 10:	Manufatti idraulici per la regolazione e la gestione della cassa di espansione	20
Fig. 11:	Planimetria generale della cassa di Caldogno	21
Fig. 12:	Curva dei volumi di invaso relativa alla cassa di monte	22
Fig. 13:	Curva dei volumi di invaso relativa alla cassa di valle	22
Fig. 14:	Pianta dell'opera di presa	24
Fig. 15:	Schema di calcolo per il predimensionamento con il bilancio di energia	27
Fig. 16:	Diagramma Q-Tirante relativo all'opera di presa	30
Fig. 17:	Schema di riferimento	31
Fig. 18:	Esempio di applicazione delle ineffective flow areas nel tratto a valle delle quinte	34
Fig. 19:	Esempio di interpolazione tra due sezioni	34
Fig. 20:	Tratto di contrazione e di espansione rispettivamente a monte e a valle di un restringimento di sezione	35
Fig. 21:	Rappresentazione schematica del tratto di torrente in esame	36
Fig. 22:	Esempio di sezione	37
Fig. 23:	Schematizzazione delle quinte	37
Fig. 24:	Schematizzazione dell'opera di presa con Hec-Ras	38
Fig. 25:	Esempio di visualizzazione del profilo risultante	39
Fig. 26:	Diagramma Q-Tirante relativo all'opera di presa, confronto con i valori ottenuti con Hec-Ras	41
Fig. 27:	Pianta della vasca di dissipazione	42
Fig. 28:	Pianta della cassa con volume di controllo evidenziato in rosso	43
Fig. 29:	Schema di riferimento del calcolo della distanza dove si ha la formazione del risalto	46
Fig. 30:	Diagramma che lega la distanza dalla parete per cui si forma il risalto alla portata di monte	48
Fig. 31:	Diagramma di Montuori	51
Fig. 32:	Vasca U.S.B.R. tipo IV	52
Fig. 33:	Caratteristiche della vasca U.S.B.R. tipo IV	53
Fig. 34:	Sezione del cassone frontale	55
Fig. 35:	Schema statico e relativi carichi agenti	56
Fig. 36:	Diagramma del momento (valori in kNm)	56
Fig. 37:	Schema statico e diagramma del momento	57
Fig. 38:	Sezione di un elemento di irrigidimento orizzontale	58
Fig. 39:	Sezione del cassone frontale della paratoia	59
Fig. 40:	Schema statico con doppio incastro	60
Fig. 41:	Schema statico con doppio appoggio	60
Fig. 42:	Diagramma del momento risultante	61
Fig. 43:	Sezione del braccio della paratoia	61
Fig. 44:	Sezione di un perno della paratoia a settore	62

Fig. 45:	Sezione longitudinale dell'opera di imbocco della cassa di monte	64
Fig. 46:	Schema di dimensionamento di un muro di sostegno	69
Fig. 47:	Coefficiente di riduzione $\Omega$ , per un fissato numero di Froude e diverso rapporto $l_y/y_1$	73
Fig. 48:	Rappresentazione 3D di una delle piastre utilizzate per il rivestimento del fondo della vasca di dissipazione	73
Fig. 49:	Soglia di stabilizzazione in calcestruzzo rivestita con massi annegati nel getto	76
Fig. 50:	Pianta dello sfioratore di troppo pieno della cassa di monte	77
Fig. 51:	Sezione trasversale di una vasca collettrice di portata	79
Fig. 52:	Sezione tipo di un dente di dissipazione	82
Fig. 53:	Diagramma Tempo-Volume invasato relativo alla cassa di monte	84
Fig. 54:	Schema di riferimento del codice di calcolo	85
Fig. 55:	Schema di riferimento della paratoia	88
Fig. 56:	Idrogramma in ingresso, Q con $Tr=100$ anni, V con $Tr=50$ anni	91
Fig. 57	Confronto tra idrogramma proprio della sezione immediatamente precedente all'opera di presa e quello relativo alla sezione immediatamente a valle della cassa d'espansione a seguito di un utilizzo ottimale della cassa (con riferimento all'evento con $Tr_Q=100$ anni e $Tr_V=50$ anni)	92
Fig. 58	Confronto tra idrogramma ingresso e in uscita dalla cassa di monte (con riferimento all'evento con $Tr_Q=100$ anni e $Tr_V=50$ anni)	92
Fig. 59	Confronto tra idrogramma ingresso e in uscita dalla cassa di valle (con riferimento all'evento con $Tr_Q=100$ anni e $Tr_V=50$ anni)	93
Fig. 60	Idrogramma in ingresso relativo all'evento del novembre 2010	93
Fig. 61	Confronto tra idrogramma proprio della sezione immediatamente precedente all'opera di presa e quello relativo alla sezione immediatamente a valle della cassa d'espansione a seguito di un utilizzo ottimale della cassa (con riferimento all'evento del novembre 2010)	94
Fig. 62	Confronto tra idrogramma ingresso e in uscita dalla cassa di monte (con riferimento all'evento del novembre 2010)	94
Fig. 63	Confronto tra idrogramma ingresso e in uscita dalla cassa di valle (con riferimento all'evento del novembre 2010)	95
Fig. 64	Idrogramma in ingresso, Q con $Tr=200$ anni, V con $Tr=200$ anni	95
Fig. 65	Confronto tra idrogramma proprio della sezione immediatamente precedente all'opera di presa e quello relativo alla sezione immediatamente a valle della cassa d'espansione a seguito di un utilizzo ottimale della cassa (con riferimento all'evento con $Tr_Q=200$ anni e $Tr_V=200$ anni)	96
Fig. 66	Confronto tra idrogramma ingresso e in uscita dalla cassa di monte (con riferimento all'evento con $Tr_Q=100$ anni e $Tr_V=200$ anni)	96
Fig. 67	Confronto tra idrogramma ingresso e in uscita dalla cassa di valle (con riferimento all'evento con $Tr_Q=100$ anni e $Tr_V=200$ anni)	97