



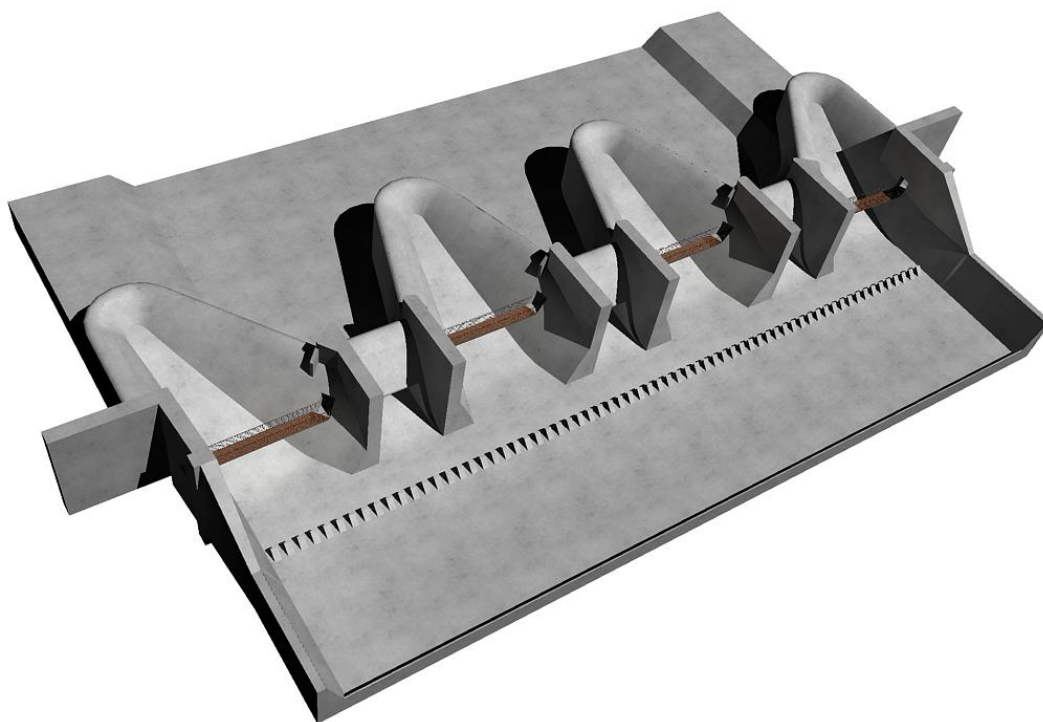
**AIPO**  
Agenzia Interregionale per il fiume Po

Agenzia Interregionale per il fiume Po



**DICATeA** - Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente,  
del Territorio ed Architettura - Università degli Studi di Parma

## **Aggiornamento delle analisi idrologiche e revisione del progetto preliminare della cassa di espansione sul torrente Baganza**



Gruppo di lavoro:

Prof. Paolo Mignosa, Ing. Marco D'Oria, Ing. Renato Vacondio, Ing. Andrea Zanini,  
(DICATeA)

Dott. Fabrizio Giuffredi, Ing. Massimo Valente, Dot.ssa Annamaria Belardi (AIPO)

Parma, dicembre 2012



## Sommario

<b>1. INTRODUZIONE .....</b>	<b>1</b>
<b>2. AGGIORNAMENTO DELLE ANALISI IDROLOGICHE .....</b>	<b>2</b>
2.1. Introduzione .....	2
2.2. Idrogrammi sintetici per la sezione di Ponte Nuovo sul t. Baganza .....	2
2.3. Aggiornamento dei dati 2003-2011 .....	7
2.4. Considerazioni conclusive .....	9
<b>3. DESCRIZIONE SINTETICA DEL PROGETTO PRELIMINARE (2004)     DELLA CASSA DI ESPANSIONE SUL T. BAGANZA .....</b>	<b>10</b>
<b>4. REVISIONE DELL'ANALISI IDRAULICA DEL SISTEMA PARMA -     BAGANZA .....</b>	<b>15</b>
4.1. Portata compatibile nel tratto del torrente Baganza da Sala Baganza alla confluenza, nel torrente Parma dalla cassa di Marano alla confluenza e nel tratto cittadino del torrente Parma dopo la confluenza. ....	16
4.2. Portata compatibile nel tratto a valle della città di Parma, fino a Colorno. ....	17
4.3. Portata compatibile nel tratto finale del torrente Parma, tra Colorno e la confluenza in Po, con particolare riferimento al nodo critico dell'attraversamento di Colorno .....	18
4.4. Valutazione del volume da assegnare alla cassa di espansione sul torrente Baganza..	21
<b>5. REVISIONE DEL PROGETTO PRELIMINARE DELLA CASSA DI     ESPANSIONE.....</b>	<b>25</b>
5.1. Individuazione delle principali caratteristiche della cassa di espansione .....	26
5.2. Curva dei volumi e delle aree .....	33
5.3. Caratteristiche del manufatto di regolazione .....	35
5.4. Scale delle portate del manufatto di regolazione .....	36
<b>6. SIMULAZIONI STATICHE DEL FUNZIONAMENTO DELLA CASSA     DI ESPANSIONE .....</b>	<b>38</b>
6.1. Simulazione del funzionamento della cassa con paratoie completamente aperte e con paratoie manovrate in modo da garantire, ove possibile, una portata in uscita non superiore a $300 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	39
6.2. Manovre per garantire una portata effluente pari a $300 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	47
6.3. Effetto di laminazione ed efficienza della cassa nelle due ipotesi di funzionamento....	49
<b>7. SIMULAZIONI BIDIMENSIONALI DEL FUNZIONAMENTO DELLA     CASSA DI ESPANSIONE .....</b>	<b>51</b>
7.1. Costruzione della mesh del modello bidimensionale.....	51
7.2. Simulazioni effettuate. ....	54
7.3. Risultati della simulazione n.3 .....	55
<b>8. CONCLUSIONI.....</b>	<b>63</b>
<b>9. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>65</b>

## **1. INTRODUZIONE**

L'Agenzia Interregionale per il Po (AIPo) ha stipulato con il Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio ed Architettura (DICATeA) dell'Università degli Studi di Parma una convenzione “di ricerca per lo sviluppo di una serie di attività propedeutiche alla realizzazione della cassa di espansione del torrente Baganza”.

Più in particolare, nella convenzione, di durata complessivamente biennale, devono essere affrontate le tematiche seguenti:

- 1. Revisione dello studio dell'Università di Parma sulla “messa in sicurezza del territorio parmense...”, e revisione del progetto preliminare della cassa sul torrente Baganza;**
2. Modellazione 2D del tratto di torrente Parma da Colorno (PR) alla confluenza in Po e possibili scenari di sistemazione;
3. Modellazione 2D del tratto di torrente Parma da Parma a Colorno (PR) con possibili interventi volti a migliorare l'effetto di laminazione;
4. Studio geologico, geotecnico e idrogeologico dell'acquifero interagente con la cassa di laminazione del t. Baganza;
5. Studio della risposta sismica locale e definizione dell'azione sismica di progetto per l'area interessata dalla cassa di espansione del torrente Baganza;
6. Modello di gestione ottimizzata degli invasi sui torrenti Parma e Baganza;
7. Integrazione della strada provinciale pedemontana con il manufatto principale.

La presente relazione espone le metodologie ed i risultati delle analisi svolte, relativamente al punto 1) evidenziato precedentemente.

## 2. AGGIORNAMENTO DELLE ANALISI IDROLOGICHE

### 2.1. Introduzione

Preliminarmente all'aggiornamento delle analisi idrologiche sono stati acquisiti i risultati dello studio svolto dal DICATeA dell'Università degli studi di Parma nel 2003 per conto del Servizio Provinciale Difesa del Suolo Risorse Idriche e Forestali della Regione Emilia-Romagna: “*Studio della messa in sicurezza del territorio parmense, con particolare riferimento alla realizzazione della cassa di espansione sul Torrente Baganza*”, [1], [2].

Nello studio citato erano stati definiti gli idrogrammi sintetici in corrispondenza di diverse sezioni di interesse del sistema Parma – Baganza. In particolare, essendo disponibili le registrazioni delle onde di piena nel periodo 1975 – 2002 per la stazione di misura di Ponte Nuovo sul t. Baganza, si era proceduto all'elaborazione statistica diretta degli idrogrammi di piena storici, determinati, a loro volta, dalla conversione delle altezze idriche registrate in idrogrammi di portata. Tale operazione necessita però della scala di deflusso valida per il periodo di interesse. Per il t. Baganza alla sezione di Ponte Nuovo non esisteva all'epoca nessuna scala di deflusso pubblicata e dedotta da misure dirette di portata; pertanto essa fu ricavata attraverso simulazioni effettuate mediante modellazione matematica. Per maggiori dettagli si rimanda al lavoro citato [1].

Nei paragrafi seguenti vengono riportati le procedure adottate ed i risultati ottenuti nello studio citato (par. 2.2) e gli aggiornamenti effettuati nel presente studio (par.2.3).

### 2.2. Idrogrammi sintetici per la sezione di Ponte Nuovo sul t. Baganza

Per ricavare l'informazione necessaria all'individuazione di un idrogramma di progetto di assegnato tempo di ritorno, a partire dall'analisi delle onde di piena storiche, è possibile procedere in differenti modi. La procedura più conveniente si basa sull'elaborazione statistica delle massime portate medie  $\bar{Q}_D$  di assegnata durata  $D$ .

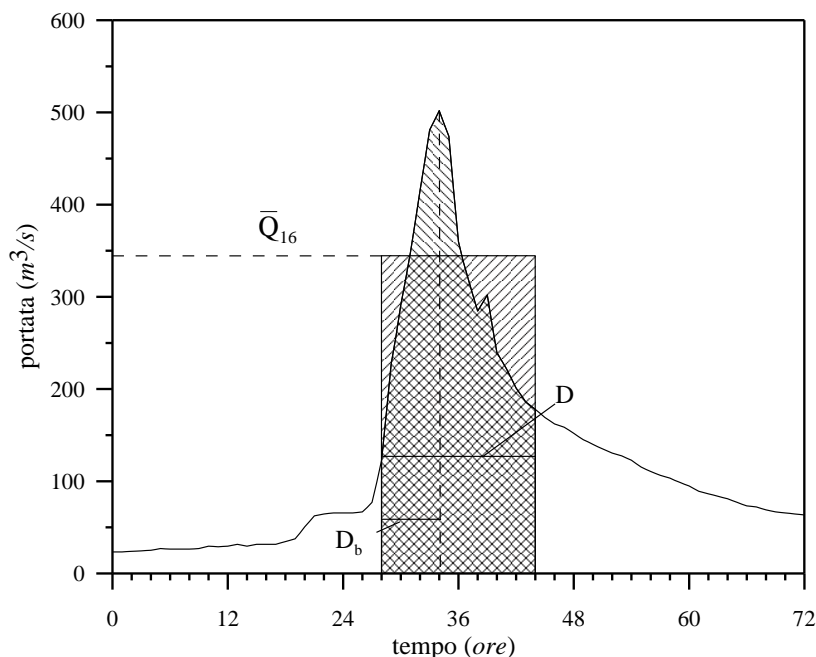
$$\bar{Q}_D = \max \left( \frac{1}{D} \int_{t-D}^t Q(\tau) d\tau \right)$$

dove il massimo è calcolato rispetto a tutte le possibili finestre temporali  $(t-D, t)$ , di ampiezza  $D$ , contenute nel generico idrogramma di piena storico. Per ciascun idrogramma di piena registrato viene calcolato il valore massimo assunto dalla portata media per  $n$  durate prefissate. Si ottengono così  $n$  serie di portate composte ciascuna da un numero di dati pari al numero di eventi.

La scelta delle durate  $D$  deve essere fatta in base ad un'analisi preliminare della durata della porzione più significativa degli idrogrammi di piena storici. Le onde di piena del Baganza a Ponte Nuovo presentano una durata degli eventi che, nella maggior parte dei casi, non supera 1 o 2 giorni. Sono comunque presenti, tra i dati utilizzati per l'elaborazione, onde di durata più lunga.

Nelle elaborazioni successive sono state giudicate significative, per il calcolo del valore massimo assunto dalla portata media, le durate pari a 0, 3, 12, 24, 36, 48 e 72 ore.

In Figura 2-1 è rappresentata, a scopo esemplificativo, la metodologia adottata per estrarre la portata media di assegnata durata da un evento generico, per il particolare caso  $D=16$  ore.



**Figura 2-1– Esempio di estrazione della portata media in assegnate durate e della posizione del picco  $r$ .**

Le aree tratteggiate (di cui quella a tratteggio incrociato è comune) sono ovviamente uguali, per definizione di media. La massima portata media è indicata sull'asse delle ordinate con  $\bar{Q}_{16}$ . Per ciascuna durata viene anche calcolata la posizione  $r$  assunta dal picco ( $0 \leq r \leq 1$ ), definita come rapporto tra la frazione della finestra temporale che precede il picco ( $D_b$ ) e l'intera durata considerata ( $D$ ). Questo parametro, come si vedrà, è di fondamentale importanza nella determinazione della forma dell'onda sintetica.

Per ogni evento e per ciascuna durata sono quindi state estratte due informazioni: la massima portata media e la posizione del picco  $r$ . Complessivamente sono stati estratti ( $n_{eventi} \cdot n_{durate}$ ) valori di portata e lo stesso numero di posizioni del picco  $r$ .

Lo scopo delle elaborazioni statistiche è la determinazione della legge  $\bar{Q}_D = \bar{Q}_D(T)$ , che esprime l'equazione della cosiddetta curva di riduzione dei colmi di piena di assegnato tempo di ritorno, dalla quale possono poi essere ricavati gli idrogrammi sintetici per assegnati tempi di ritorno di interesse.

Tale curva – analoga alla curva *IDF* (Intensità-Durata-Frequenza) per le precipitazioni – rappresenta la relazione che lega la portata media  $\bar{Q}_D$  alla corrispondente durata  $D$ , fissato il generico valore del tempo di ritorno  $T$ .

Per determinare la curva di riduzione dei colmi di piena nel presente lavoro si è adottata la procedura indiretta proposta dal NERC (1975) [3], ponendo in relazione i quantili  $\bar{Q}_D(T)$  con quelli della portata al colmo  $Q_0(T)$  per mezzo del rapporto di riduzione  $\varepsilon_D(T)$ :

$$\varepsilon_D(T) = \frac{\bar{Q}_D(T)}{Q_0(T)} \quad (1)$$

Numerosi studi, a partire proprio da quello condotto dal NERC nel 1975, hanno evidenziato che i rapporti di riduzione dedotti sulla base dell'analisi statistica delle osservazioni idrometriche risultano praticamente indipendenti dal tempo di ritorno  $T$ . In effetti l'ipotesi di base, comune a tutte le formulazioni presentate in letteratura per il rapporto di riduzione, è che esso possa essere considerato indipendente dal tempo di ritorno, cosa che si verifica se (trascurando l'influenza dei momenti di ordine superiore al secondo) il coefficiente di variazione  $CV(\bar{Q}_D)$  e la funzione di distribuzione di  $\bar{Q}_D$  si mantengono costanti al variare della durata  $D$ ; sotto queste ipotesi, che sono verificate

con approssimazione accettabile nella gran parte dei casi,  $\varepsilon_D$  si riduce al rapporto tra le medie di  $\bar{Q}_D$  e  $Q_0$ :

$$\varepsilon_D = \frac{\mu(\bar{Q}_D)}{\mu(Q_0)} \quad (2)$$

Tra i diversi approcci proposti in letteratura per l'identificazione della forma della legge di riduzione (2) è stato adottato quello proposto da Bacchi et al. (1992) [4] **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** secondo cui il rapporto di riduzione assume l'espressione seguente:

$$\varepsilon_D = \sqrt{\frac{\theta}{2D} \left[ 2 + e^{\frac{4D}{\theta}} - \frac{3\theta}{4D} \left( 1 - e^{\frac{4D}{\theta}} \right) \right]}$$

in cui il parametro temporale  $\theta$  viene dedotto attraverso una interpolazione ai minimi quadrati. Una volta ricavato l'andamento di  $\varepsilon_D$ , l'equazione della curva di riduzione dei colmi di piena risulta essere:

$$\bar{Q}_D(T) = Q_0(T) \varepsilon_D$$

e richiede, quindi, la determinazione della distribuzione di probabilità delle portate al colmo  $Q_0(T)$ .

Per l'elaborazione statistica dei campioni delle portate al colmo  $Q_0$  sono stati considerati inizialmente tre diversi modelli probabilistici, tra i più usati nelle valutazioni idrologiche di questo tipo: la distribuzione di Gumbel, la distribuzione GEV e la distribuzione Lognormale. Si è poi adottata la distribuzione GEV:

$$P(Q_0) = \exp \left\{ - \left[ 1 - \frac{k(Q_0 - \xi)}{\alpha} \right]^{\frac{1}{k}} \right\}$$

poiché si è verificata una buona e sostanziale corrispondenza fra le curve teoriche ed i valori osservati, anche mediante test di adattamento (test di Hosking).

La Tabella 2-1 riporta le stime delle portate al colmo per assegnato tempo di ritorno così ottenute.

Per ricostruire la forma dell'onda è necessario anche ricavare, dagli idrogrammi di piena storici, l'informazione sulla posizione  $r$  che la portata al colmo assume all'interno della finestra temporale che contiene il valore massimo delle portate medie di assegnata durata.



Tabella 2-1: Portate al colmo per assegnato tempo di ritorno stimate mediante la distribuzione GEV, dati 1975-2002

<b>T (anni)</b>	<b>Portata (m<sup>3</sup>/s)</b>
5	227
10	306
20	397
50	542
<b>100</b>	<b>676</b>
200	835
500	1093
1000	1332
3000	1808

Per come è stato definito, il valore di  $r$  può variare tra 0 e 1; in particolare assume il valore 0 se il picco cade all'inizio della finestra temporale considerata, mentre assume valore 1 se il picco cade alla fine della finestra stessa. Si hanno così a disposizione tante serie temporali di posizione del picco quante sono le durate analizzate; ai fini della ricostruzione dell'idrogramma di piena è stato calcolato il valore medio di ogni serie. Per ottenere una forma il più possibile regolare dell'onda sintetica i punti  $(D, r)$ , ottenuti con la procedura sopra descritta, sono stati interpolati con la funzione del tipo

$$r_D(D) = a + \frac{b}{c + (D)^d}$$

dove i valori delle quattro costanti  $a, b, c, d$ , sono stati determinati con una procedura di interpolazione ai minimi quadrati.

La costruzione dell'idrogramma sintetico si effettua quindi imponendo che la massima portata media in ciascuna durata coincida con quella prevista dalla curva di riduzione dei colmi di piena; la forma dell'idrogramma è determinata dal coefficiente esprimente la posizione del picco  $r$ .

L'idrogramma sintetico è dunque definito dalle condizioni:

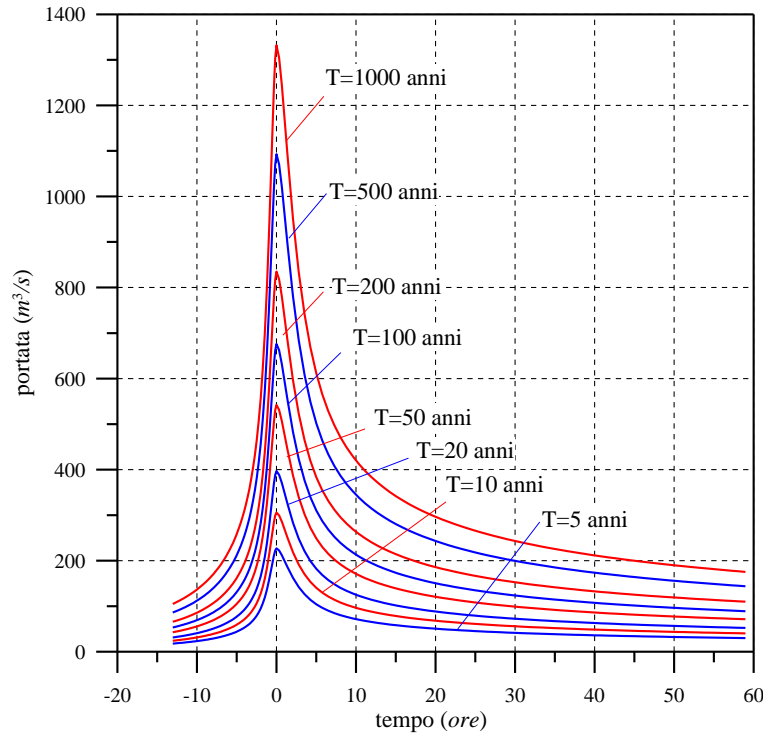
$$\int_{-r_D D}^0 Q(\tau; T) d\tau = r_D \bar{Q}_D(T) D; \quad \int_0^{(1-r_D)D} Q(\tau; T) d\tau = (1 - r_D) \bar{Q}_D(T) D \quad (3)$$

Le espressioni dei due rami dell'idrogramma  $Q(t; T)$  prima e dopo il colmo si ottengono differenziando le (3) rispetto alla durata  $D$ :

$$Q(t; T) = \frac{\frac{d}{dD} (r_D \bar{Q}_D(T) D)|_{D=D(t)}}{\frac{d}{dD} (r_D D)|_{D=D(t)}}, \quad t = -r_D D \left( -r_{D_f} D_f \leq t \leq 0 \right)$$

$$Q(t; T) = \frac{\frac{d}{dD} ((1 - r_D) \bar{Q}_D(T) D)|_{D=D(t)}}{\frac{d}{dD} ((1 - r_D) D)|_{D=D(t)}}, \quad t = (1 - r_D) D \left( 0 \leq t \leq (1 - r_{D_f}) D_f \right)$$

Nella Figura 2-2 sono rappresentati gli idrogrammi sintetici ottenuti con la procedura precedentemente descritta per il t. Baganza a Ponte Nuovo.



**Figura 2-2– Onde di piena sintetiche per il t. Baganza a Ponte Nuovo (periodo 1975-2002)**

### 2.3. Aggiornamento dei dati 2003-2011

Le portate al colmo presenti nello studio del 2003 sono state aggiornate con i dati raccolti nel periodo 2003-2011 nella stazione di Ponte Nuovo. Sfortunatamente questi dati non sono stati validati e pubblicati in modo ufficiale, ma sono reperibili sul sito

Dexter dell'ARPA Emilia-Romagna. I dati scaricabili sono i livelli registrati dall'idrometro di Ponte Nuovo. I livelli sono stati poi convertiti in portate sulla base della scala di deflusso ottenuta mediante il modello matematico. La Tabella 2-1 riporta i valori dei massimi livelli osservati e delle relative portate.

*Tabella 2-2: massimi livelli osservati e relative portate stimate nel periodo 2003-2011*

<b>Anno</b>	<b>Livello massimo (m)</b>	<b>Portata massima (m<sup>3</sup>/s)</b>
2003	1.98	53
2004	3.62	332
2005	3.09	220
2006	1.85	40
2007	1.93	48
2008	2.33	95
2009	2.96	195
2010	2.24	83
2011	1.69	26

Le stime delle portate al colmo per assegnato tempo di ritorno sulla base della distribuzione GEV (Tabella 2-3) sono state aggiornate integrando i dati del periodo 1975-2002 con quelli del periodo 2003-2011 riportati in Tabella 2-2.

*Tabella 2-3: Portate al colmo per assegnato tempo di ritorno stimate mediante la distribuzione GEV, dati 1975-2011*

<b>T (anni)</b>	<b>Portata (m<sup>3</sup>/s)</b>
5	219
10	295
20	380
50	510
<b>100</b>	<b>625</b>
200	758
500	965
1000	1149
3000	1501

## 2.4. Considerazioni conclusive

La Tabella 2-4 riporta una sintesi dei risultati precedenti e di quelli ottenuti mediante l'aggiornamento della serie storica con i dati del periodo 2003-2011.

L'estensione della serie ha portato ad una generale riduzione dei colmi di piena, più marcata al crescere del tempo di ritorno. In particolare per l'evento di 100 anni di tempo di ritorno la portata al colmo passa da 676 a 625 m<sup>3</sup>/s, con una riduzione di 51 m<sup>3</sup>/s pari al 7.5%.

Questa riduzione comporterebbe una diminuzione complessiva del volume dell'onda di piena sintetica e, conseguentemente, del volume da invasare nella cassa sul torrente Baganza (da  $4.2 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup> a  $3.8/3.9 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>) secondo una laminazione ottimale.

Visto che i dati del periodo 2003-2011 non sono stati validati e visto che le stime sui colmi di piena si riducono, si è ritenuto di mantenere nel prosieguo del presente studio gli idrogrammi sintetici riportati in Figura 2-2, ottenuti in [1].

*Tabella 2-4: Confronto tra le portate al colmo*

<b>T (anni)</b>	<b>Portate al colmo (m<sup>3</sup>/s)</b>		<b>Differenza a-b (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Differenza a-b (%)</b>
	<b>a) 1975-2002</b>	<b>b) 1975-2011</b>		
5	227	219	-8	-3.5
10	306	295	-11	-3.6
20	397	380	-17	-4.3
50	542	510	-32	-5.9
<b>100</b>	<b>676</b>	<b>625</b>	<b>-51</b>	<b>-7.5</b>
200	835	758	-77	-9.2
500	1093	965	-128	-11.7
1000	1332	1149	-183	-13.7
3000	1808	1501	-307	-17.0

### 3. DESCRIZIONE SINTETICA DEL PROGETTO PRELIMINARE (2004) DELLA CASSA DI ESPANSIONE SUL T. BAGANZA

Il Servizio Tecnico bacini Taro-Parma della Regione Emilia-Romagna ha redatto, nel Settembre 2004, il progetto preliminare della “Cassa di espansione sul T. Baganza nei comuni di Parma Collecchio e Sala Baganza”[5]. Di seguito sono richiamati i principali elementi caratteristici di tale progetto.

L’obiettivo principale perseguito in tale progetto preliminare era la difesa idraulica della città di Parma. Pertanto il dimensionamento dell’invaso era stato definito, considerando un tempo di ritorno pari a 200 anni, con l’obiettivo di limitare la portata massima in uscita dalla cassa ad un valore pari a  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Dalle analisi degli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica e delle caratteristiche morfologiche del t. Baganza, era emerso che la posizione migliore per la realizzazione di una cassa di espansione fosse quella compresa fra il comune di Sala Baganza (in sinistra idraulica) e l’abitato di San Ruffino (in destra), dove le pendenze del fondo si riducono, rispetto al tratto di monte, permettendo di invasare volumi significativi senza dover ricorrere a tiranti idrici troppo elevati. Più precisamente la localizzazione ottimale era principalmente in destra idraulica, subito a valle della zona industriale di Sala Baganza, in modo da interessare una porzione di territorio attualmente già soggetta ad attività estrattive. Il limite fisico della larghezza da assegnare alla cassa di espansione è costituito dalle due strade che corrono parallele al torrente: ‘strada Montanara’ in sponda destra e ‘strada Comunale Farnese’ in sponda sinistra.

Nel già citato progetto preliminare la cassa di laminazione, rappresentata in Figura 3-1, è suddivisa in tre invasi: il primo è situato “*in linea*” al torrente ed è sbarrato a valle dal manufatto limitatore della cassa, chiamato manufatto A, di cui è riportata una sezione trasversale in Figura 3-2. Detto manufatto ha la funzione di limitare le portate in uscita secondo una opportuna legge di efflusso ed è costituito da una soglia tracimabile al di sotto della quale sono realizzate 4 luci di fondo a sezione trapezia con larghezza al

fondo di 7 m, in sommità 3 m e altezza di 3 m. Così come riportato in Figura 3-2, la quota di fondo delle luci del manufatto è di 134.89 m s.l.m. e la quota del ciglio sfiorante è a 144.10 m s.l.m.

L'invaso 2 è situato "*fuori linea*" in sponda destra, in fregio all'invaso 1, è collegato all'invaso 1 mediante una soglia libera denominata manufatto B. Quando la portata in ingresso nell'invaso 1 è superiore a quella in uscita attraverso le luci di fondo si crea un rigurgito a monte del manufatto A; se il livello idrico raggiunge la quota della soglia del manufatto B (142.70 m s.l.m.) ha inizio il riempimento dell'invaso 2. Quest'ultimo è a sua volta collegato all'invaso 3 (invaso "*fuori linea*" di valle) mediante una ulteriore soglia denominata manufatto C: quando il livello idrico dell'invaso 2 raggiunge quota 143.15 m s.l.m. inizia lo sfioro delle acque verso l'invaso 3 con conseguente riempimento anche del terzo settore. Il manufatto D permette lo svuotamento completo dell'invaso 3 successivamente al passaggio della piena. Il manufatto E ha la funzione di sfioratore di sicurezza per l'invaso 3.

La pendenza da assegnare ai paramenti delle arginature è assunto pari a 1:2; l'altezza massima del paramento è di 5 m, oltre i quali esso è interrotto da una banca orizzontale della larghezza di 3.75 m, che risulta presente anche sulla sommità dell'argine. Le quote di sommità delle arginature sono pari a 147.00 m s.l.m. per gli invasi 1 e 2 e pari a 140.00 m s.l.m. per l'invaso 3.

La Figura 3-3 e la Tabella 3-1 sintetizzano i principali risultati delle capacità di laminazione della cassa, riportando per ogni tempo di ritorno le seguenti grandezze:

1. portata massima in ingresso alla cassa  $Q_e$ ;
2. portata massima in uscita dalla cassa di espansione  $Q_u$ ;
3. rapporto di laminazione  $\eta=Q_u/Q_e$ ;
4. portata massima scambiata tra l'invaso 1 (in linea) e l'invaso 2 (fuori linea di monte)  $Q_{1-2}$ ;
5. portata massima scambiata tra l'invaso 2 (fuori linea di monte) e l'invaso 3 (fuori linea di valle)  $Q_{2-3}$ ;
6. quota idrica massima nell'invaso 1  $z_1$ ;
7. quota idrica massima nell'invaso 2  $z_2$ ;
8. quota idrica massima nell'invaso 3  $z_3$ ;

- 9. volume massimo dell'invaso 1  $W_1$ ;
- 10. volume massimo dell'invaso 2  $W_2$ ;
- 11. volume massimo dell'invaso 3  $W_3$ ;

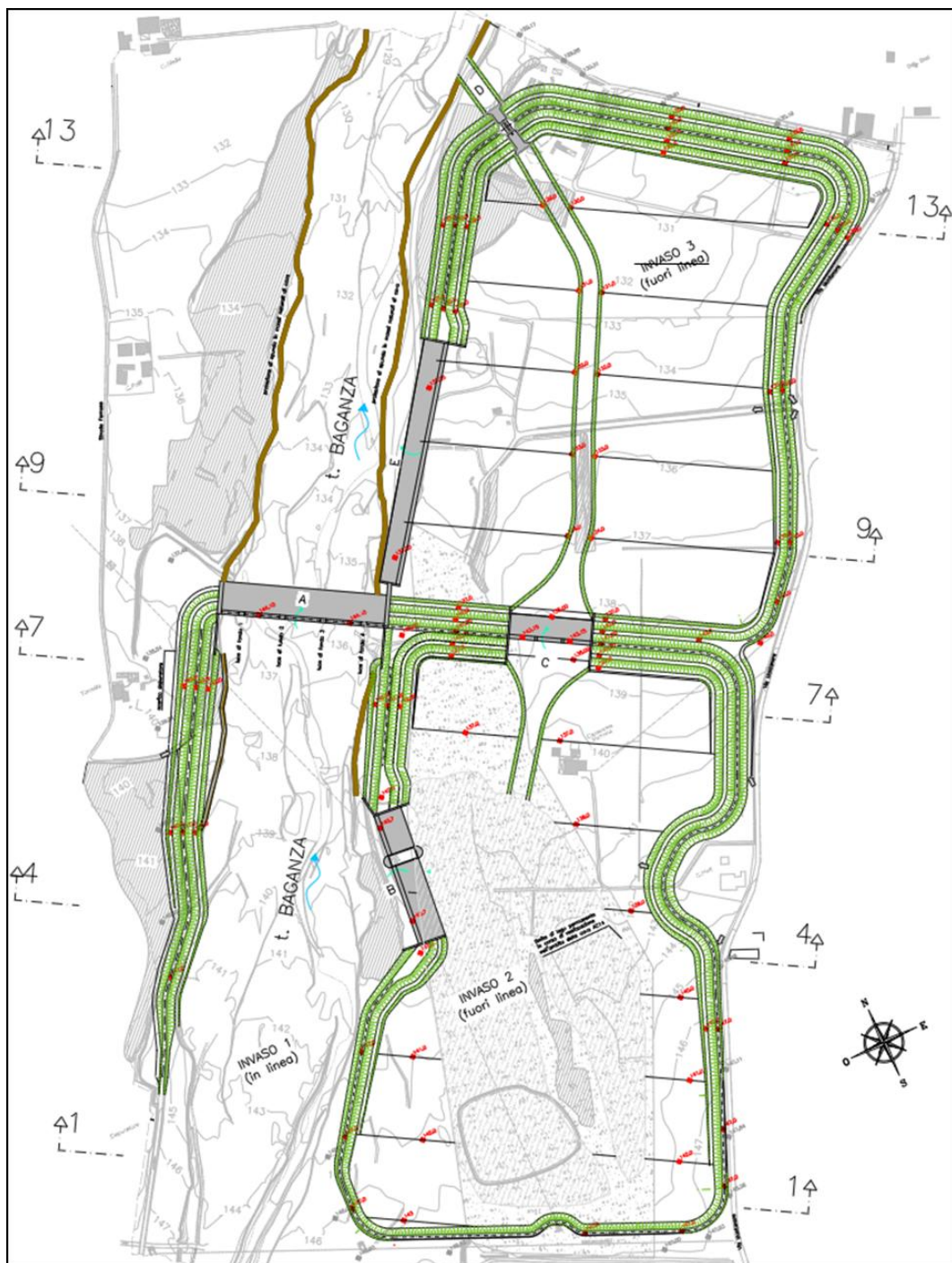
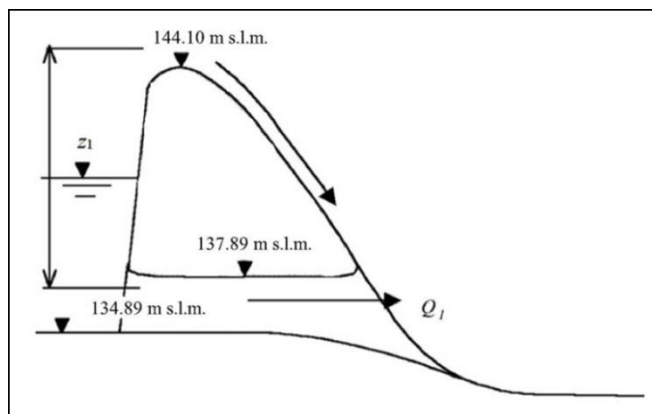
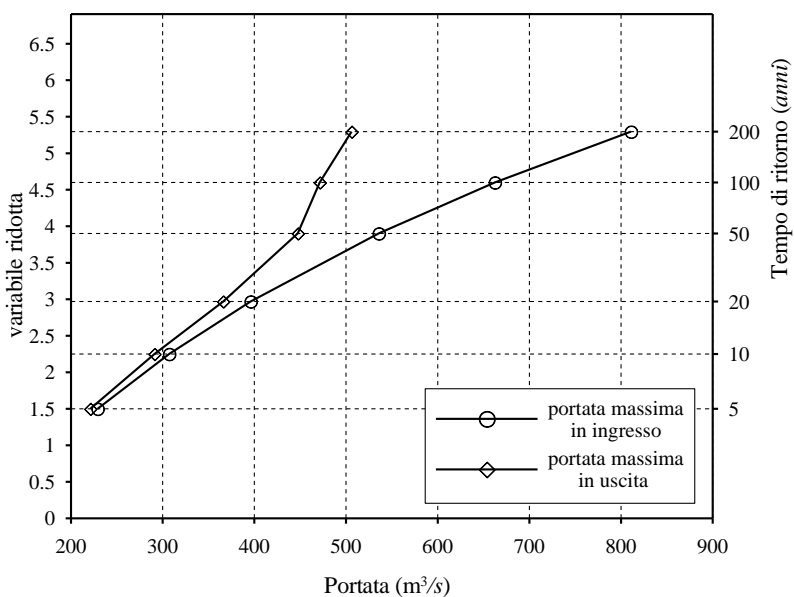


Figura 3-1 – Progetto preliminare (2004) della cassa di espansione sul t. Baganza (da [5]).



**Figura 3-2 – Sezione trasversale schematica del manufatto regolatore in alveo (manufatto A) (da [5]).**

La massima efficienza della cassa, (corrispondente al minimo rapporto di laminazione  $\eta$ ), si ottiene per l'evento di piena duecentennale mentre l'efficienza minima si manifesta per bassi tempi di ritorno (5-20 anni) per i quali la cassa in linea si invasa (invaso 1) solo in parte mentre quelle fuori linea non si invasano affatto (invasi 2 e 3). Il volume complessivo invasato nella cassa per l'evento con tempo di ritorno duecentennale (evento di progetto) è pari a  $3.4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ .



**Figura 3-3 – Andamento, in funzione del tempo di ritorno, delle portate massime in ingresso ed in uscita dalla cassa di espansione (da [5]).**



*Tabella 3-1: Valori massimi delle grandezze caratteristiche della cassa di espansione sul torrente Baganza (Portate, livelli idrici e volumi (da [5]).*

Valori massimi	Tempo di ritorno (anni)					
	5	10	20	50	100	200
$Q_e (m^3/s)$	229	307	396	536	662	811
$Q_u (m^3/s)$	221	291	366	447	471	506
$\eta=Q_{u\ max}/ Q_{e\ max}$	0.97	0.95	0.92	0.84	0.71	0.62
$Q_{1-2} (m^3/s)$	0	0	0	64	178	307
$Q_{2-3} (m^3/s)$	0	0	0	0	0	194
$z_1 (m\ s.l.m.)$	139.21	140.37	141.68	143.21	143.67	144.11
$z_2 (m\ s.l.m.)$	136.00	136.00	136.00	139.35	143.27	144.09
$z_3 (m\ s.l.m.)$	135.00	135.00	135.00	135.00	135.00	137.22
$W_1 (10^6\ m^3)$	0.162	0.265	0.432	0.687	0.773	0.859
$W_2 (10^6\ m^3)$	0.000	0.000	0.000	0.242	1.063	1.300
$W_3 (10^6\ m^3)$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.247
$W_{tot} (10^6\ m^3)$	0.162	0.265	0.432	0.929	1.836	3.406

#### 4. REVISIONE DELL'ANALISI IDRAULICA DEL SISTEMA PARMA - BAGANZA

Il sistema idraulico Parma – Baganza stato oggetto di numerosi studi ([2],[6],[7],[8]), allo scopo di determinare le portate compatibili nei vari tratti dei due torrenti e gli interventi per migliorare le situazioni più critiche. I vari tratti considerati, visibili in Figura 4-1, sono i seguenti:

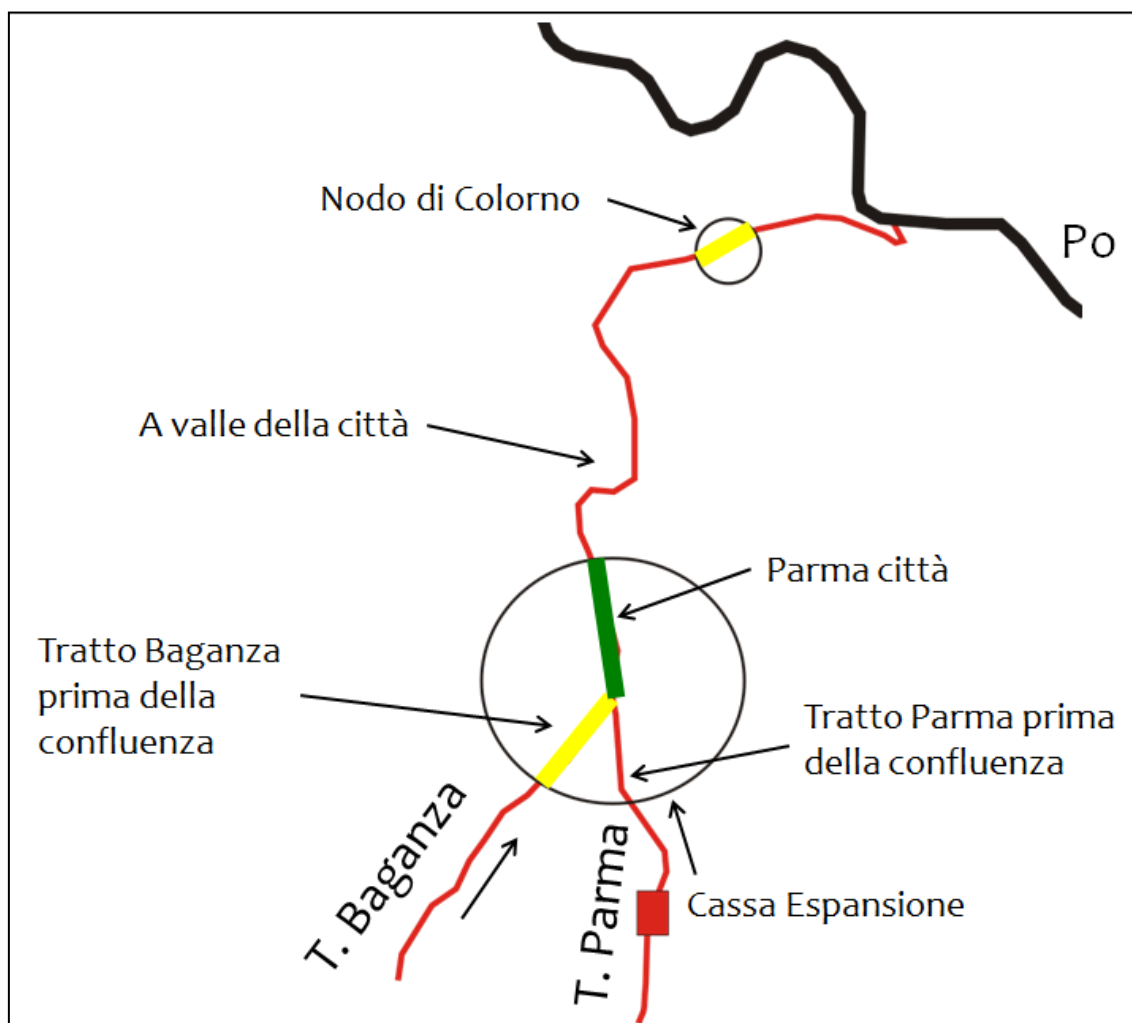


Figura 4-1 – Tratti considerati nel sistema Parma-Baganza.

1. tratto del torrente Parma compreso tra la cassa di espansione di Marano e la città di Parma, fino alla confluenza con il t. Baganza;
2. tratto del torrente Baganza compreso tra il ponte di Sala Baganza e la confluenza con il torrente Parma;
3. tratto del torrente Parma all'interno della città di Parma, dopo la confluenza tra i due torrenti e fino al ponte della ferrovia;
4. tratto del torrente Parma a valle della città, fino a Colorno;
5. tratto finale del torrente Parma, tra Colorno e la confluenza in Po.

##### **4.1. Portata compatibile nel tratto del torrente Baganza da Sala Baganza alla confluenza, nel torrente Parma dalla cassa di Marano alla confluenza e nel tratto cittadino del torrente Parma dopo la confluenza.**

Nello studio [2] è stato analizzato il comportamento idraulico dei torrenti Parma e Baganza, valutando il livello di rischio attuale nella città di Parma e più in generale lungo il tratto vallivo dei due torrenti. I risultati principali sono i seguenti:

1. nel tratto del torrente Parma compreso tra la cassa di espansione di Marano e la confluenza con il t. Baganza, permane sempre un franco di almeno 1 metro con riferimento al transito di un'onda di piena sintetica di tempo di ritorno  $T = 200$  anni. Questo tratto non presenta quindi particolari criticità;
2. nel tratto del torrente Baganza compreso tra il ponte di Sala Baganza e la confluenza nel t. Parma, la portata compatibile è compresa tra i 420 e i 500 m<sup>3</sup>/s; a questi valori corrispondono, in base alle elaborazioni riportate al par.2.4, tempi di ritorno dell'ordine di 30-40 anni. La realizzazione della cassa di espansione sul torrente Baganza consentirebbe di elevare il livello di sicurezza in questo tratto fino a tempi di ritorno  $T=200$  anni;
3. per il tratto dell'attraversamento cittadino del torrente Parma, dopo la confluenza tra i due torrenti, la portata compatibile è di circa 1000 m<sup>3</sup>/s. Prima della realizzazione

della cassa di espansione di Marano, a tale valore corrispondeva un tempo di ritorno dell'ordine di 100 anni [1]. Dopo la realizzazione della suddetta cassa il tempo di ritorno è di difficile valutazione, dipendendo dalla combinazione delle portate (non regolate) provenienti dal Baganza e da quelle (regolate) in uscita dalla cassa di Marano. In ogni caso il tempo di ritorno associabile a tale valore è sicuramente aumentato ed è stimabile in almeno 200 anni.

#### **4.2. Portata compatibile nel tratto a valle della città di Parma, fino a Colorno.**

Nell'ambito di questa stessa convenzione è stato effettuato uno studio approfondito per valutare la portata compatibile del torrente Parma nel tratto tra la città di Parma e Colorno e da Colorno alla confluenza in Po ("Modellazione 2D del tratto di torrente Parma: da Colorno alla confluenza in Po, con possibili scenari di sistemazione; da Parma a Colorno, con possibili interventi volti a migliorare l'effetto di laminazione" [6]).

Da tale studio è emerso, in sintesi, che tra Parma e Colorno la portata compatibile varia tra i  $650 \text{ m}^3/\text{s}$  e i  $600 \text{ m}^3/\text{s}$ , procedendo da monte verso valle.

Nel medesimo studio si è anche valutata la fattibilità di bacinizzare alcune delle golene più ampie ubicate a valle della città di Parma, in modo da laminare l'onda di piena di progetto e permettere di ridurre il volume della cassa d'espansione sul torrente Baganza. Le analisi effettuate hanno però dimostrato la sostanziale infattibilità dell'intervento semplicemente chiudendo le golene, a causa del contributo fondamentale che esse forniscono nello smaltimento delle portate di piena; occorrerebbe effettuare scavi molto rilevanti nelle medesime golene abbassandone sensibilmente la quota (di alcuni metri), ma questo intervento risulterebbe economicamente meno vantaggioso rispetto ad un aumento del volume della cassa di espansione sul torrente Baganza e per questa ragione non è stato più preso in considerazione.

### 4.3. Portata compatibile nel tratto finale del torrente Parma, tra Colorno e la confluenza in Po, con particolare riferimento al nodo critico dell'attraversamento di Colorno

Nel già citato studio [6] si è proceduto alla valutazione della portata compatibile del torrente Parma a Colorno e all'individuazione di possibili interventi risolutivi delle criticità attualmente presenti nella zona.

La valutazione della portata compatibile con il nodo di Colorno, dove la sezione più critica è quella del ponte di piazza Garibaldi, ha comportato un accurato e approfondito studio idraulico; infatti tale portata risente anche dei livelli del fiume Po, a causa della breve distanza dalla confluenza (8 km) e delle basse pendenze.

In Figura 8 è riportato il grafico, ottenuto in tale studio, che riporta la variazione del franco a Colorno in funzione del livello del Po e della portata transitante nel t. Parma.

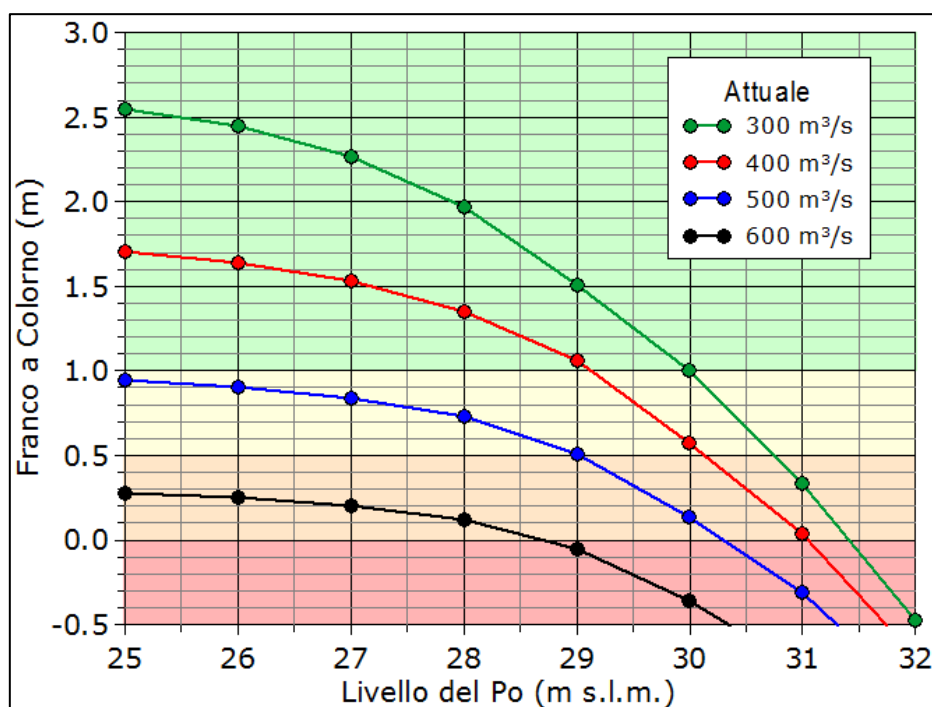
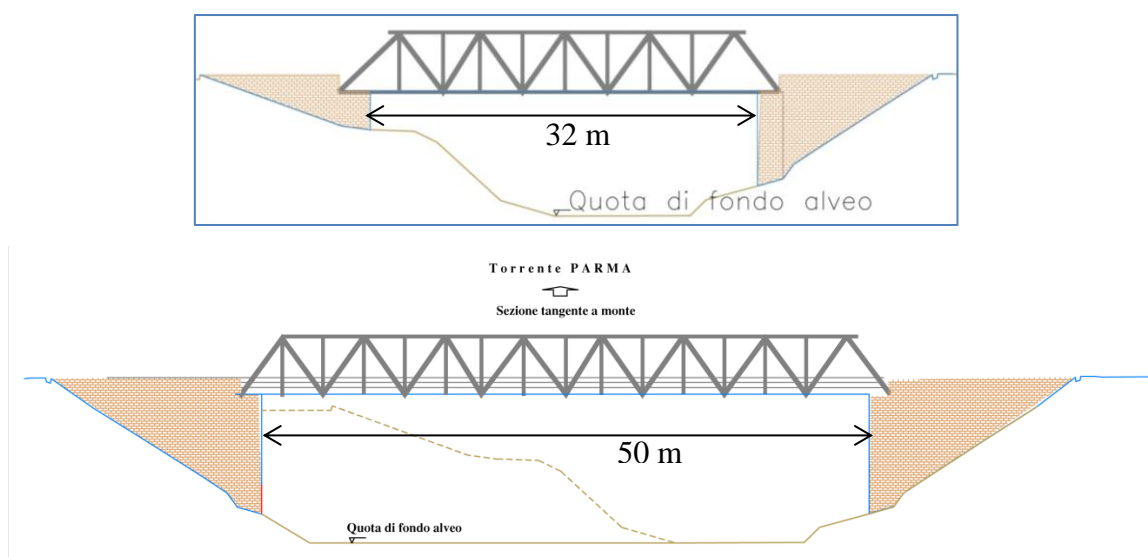


Figura 4-2 – Franchi e portate compatibili a Colorno (da [6])

Dall'analisi del grafico, che riporta la situazione attuale, si può osservare che per portate superiori ai 500 m³/s non è garantito il franco di 1 m, per nessun dei livelli del Po presi

in esame. Nel caso di portata pari a  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  il franco non supera mai i 30 cm e per livelli del fiume Po superiori a 28.5 m s.l.m. si verifica l’esondazione del t. Parma a Colorno.

Un possibile intervento volto ad incrementare la portata compatibile a Colorno, vagliato nello studio [5], consiste nel rifacimento del ponte della ferrovia Parma – Brescia, con un aumento della luce di circa 18 m (Figura 4-3) e in interventi di riprofilatura dell’alveo sia a monte che a valle della ferrovia (Figura 4-4) con un volume di scavo complessivo di circa  $71400 \text{ m}^3$ .



**Figura 4-3 –Stato di fatto (in alto) e ipotesi di intervento sul ponte della ferrovia Parma – Brescia (in basso) (da [6]).**

Questo intervento consente di modificare lo scenario riportato in Figura 4-2 e portare allo situazione rappresentata in Figura 4-5.

Si nota un miglioramento del franco arginale, con la portata di  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  che ora risulta compatibile per la maggior parte dei livelli del fiume Po, anche se con franchi molto ridotti.

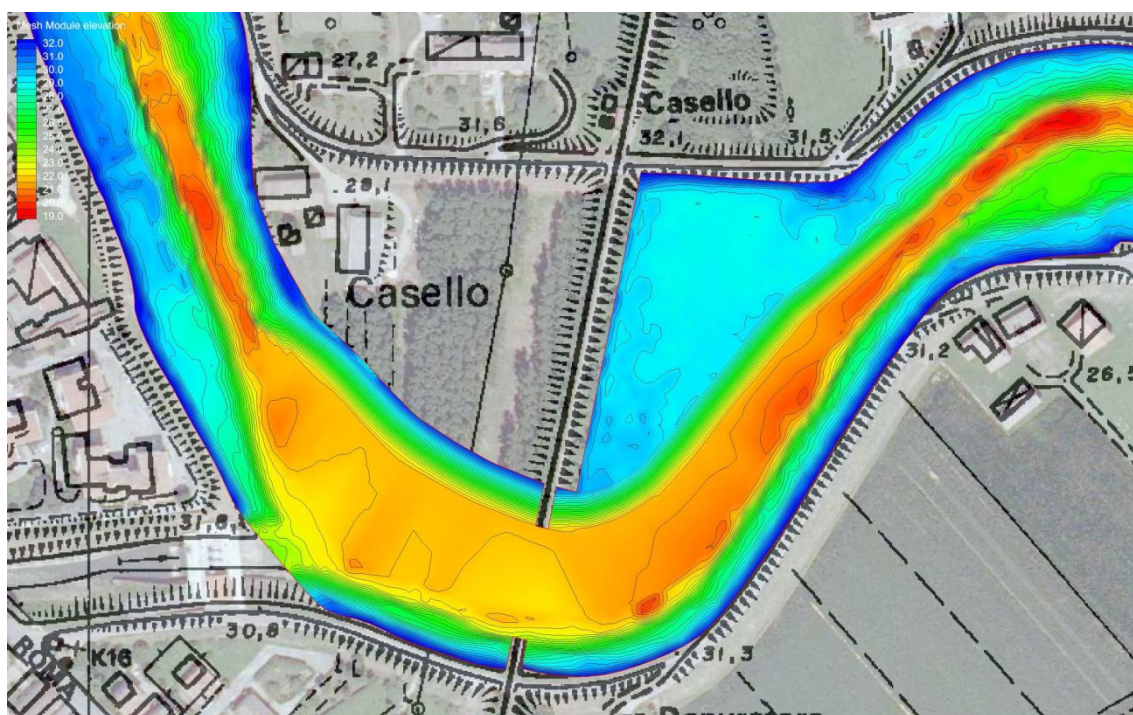


Figura 4-4 – Batimetria conseguente agli interventi di progetto (da [6])

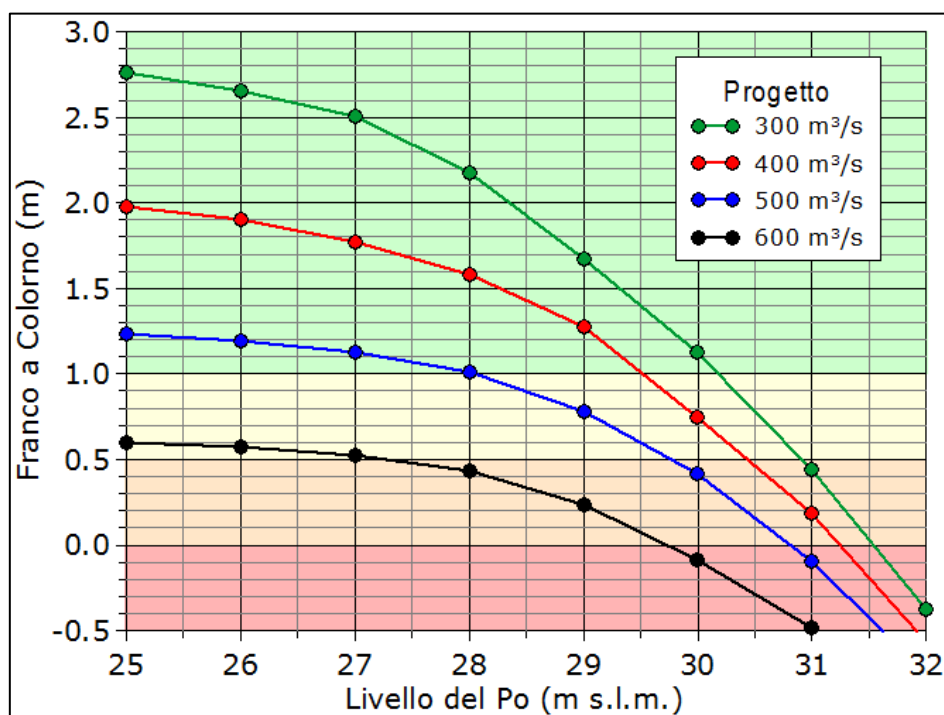


Figura 4-5 – Franco a Colorno nella configurazione di progetto (da [6]).

#### **4.4. Valutazione del volume da assegnare alla cassa di espansione sul torrente Baganza**

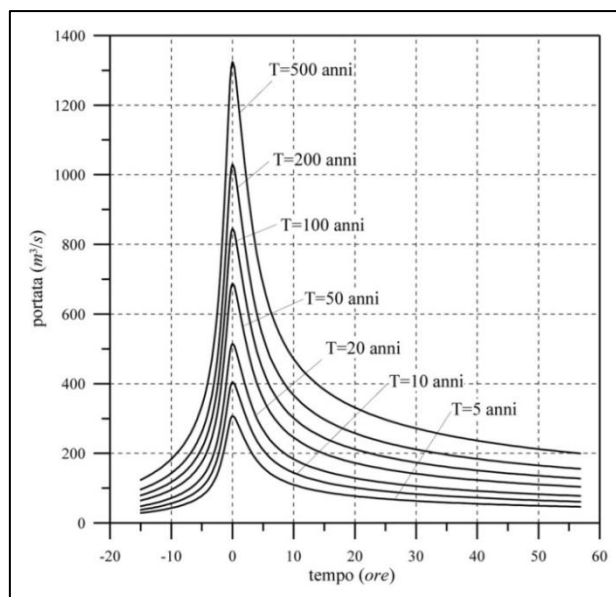
Dalle indagini riportate nel paragrafo precedente emerge che la portata complessivamente compatibile con l'alveo del torrente Parma, a valle della confluenza con il torrente Baganza, è stimabile in  $600 \text{ m}^3/\text{s}$ , a causa del nodo critico di Colorno e solo nell'ipotesi che si dia attuazione agli interventi in progetto in corrispondenza del ponte ferroviario di Colorno.

Tale condizione implica, quindi, la necessità di regolare la portata defluente nel torrente Parma, imponendo di non superare il valore di  $600 \text{ m}^3/\text{s}$ .

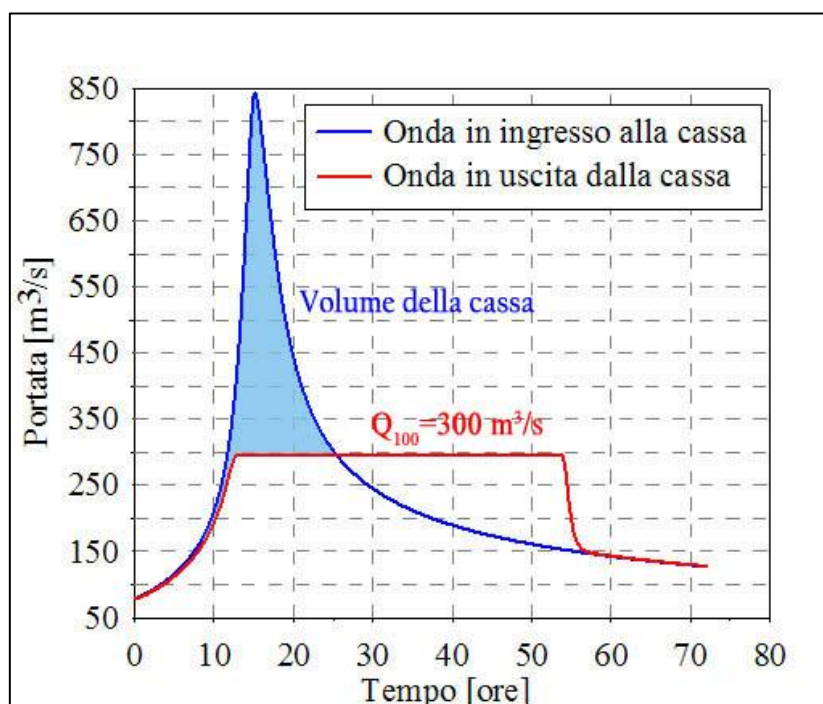
Dalla cassa di espansione di Marano è possibile, con opportuni interventi di regolazione delle paratoie, scaricare una portata non superiore a  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  in corrispondenza dell'evento di tempo di ritorno  $T=100$  anni. Laminando infatti l'idrogramma sintetico a monte della confluenza, ricavato in [1] e riportato, assieme ad altri, in Figura 4-6, si ottiene il grafico di Figura 4-7, a patto che vi sia la disponibilità di un volume invaso di  $10.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ , tenendo conto anche dell'inevitabile immagazzinamento preventivo della cassa. Le ultime stime, ottenute in base al rilievo Lidar effettuato nel 2008, forniscono, in corrispondenza della quota del ciglio sfiorante, un volume invasabile di  $10.1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ , quindi poco inferiore al necessario. Poiché dal 2008 ad oggi è in atto una campagna di scavo all'interno della cassa, è ragionevole ritenere che si sia già raggiunto il volume di invaso necessario. Un ulteriore rilievo aggiornato potrebbe confermare definitivamente questa ipotesi.

Di conseguenza, anche la cassa di espansione sul torrente Baganza dovrebbe essere in grado di laminare l'evento di piena centenario, limitando la portata in uscita a non più di  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ . Il volume dell'idrogramma di piena sintetico con  $T=100$  anni al di sopra di detta portata, riportato in azzurro nella Figura 4-7, risulta pari a  $4.2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ . Se ad esso si aggiunge un ragionevole incremento del 10%, necessario per tener conto del funzionamento non ideale della cassa, nonostante un (ipotizzato) sistema di paratoie regolabili, si giunge ad una stima di volume da assegnare alla cassa pari a  $4.7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ .

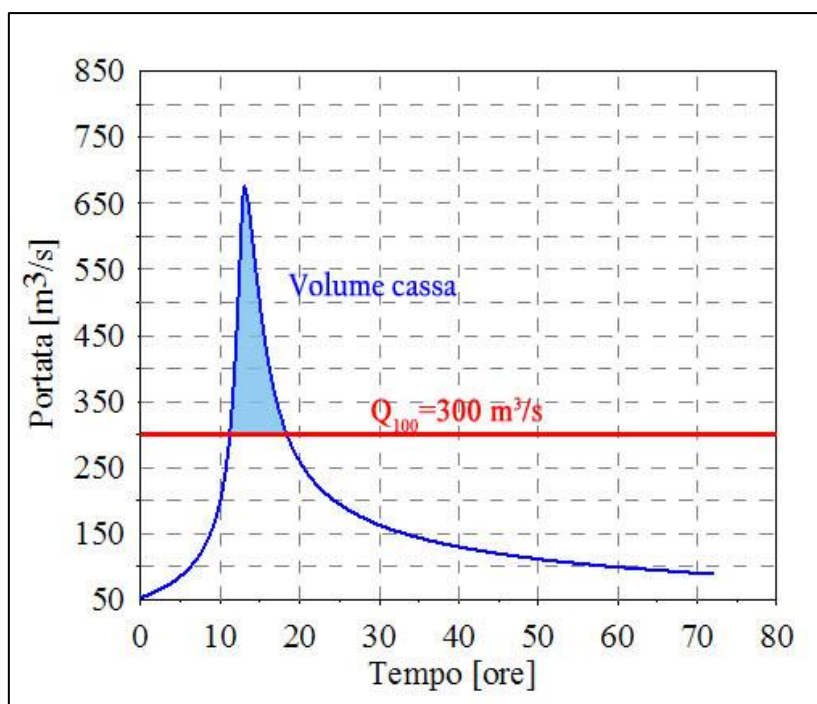




**Figura 4-6 – Idrogrammi sintetici ottenuti dalla stima regionale per la sezione di Ponte Dattaro (t. Parma a monte confluenza con il t. Baganza) (da [1]).**



**Figura 4-7 – Laminazione dell'onda di piena centenaria nella cassa sul T. Parma.**



**Figura 4-8 – Onda di piena centenaria relativa al dimensionamento della cassa sul T. Baganza.**

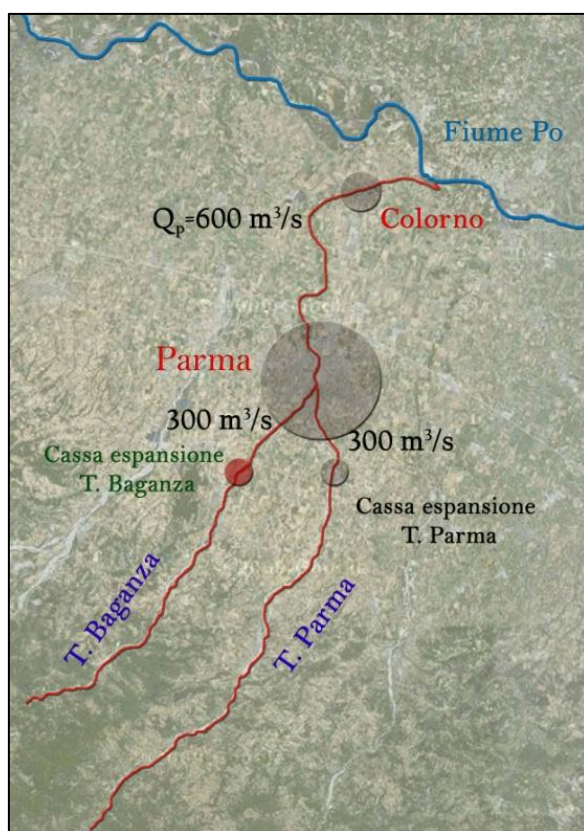
È importante sottolineare che, nonostante si sia preso a riferimento per la determinazione del volume da assegnare alla cassa sul torrente Baganza l'evento di piena sintetico con tempo di ritorno  $T=100$  anni, la sicurezza idraulica del sistema Parma-Baganza, una volta effettuati tutti gli interventi proposti, è garantita anche per eventi più rari, per i seguenti motivi:

1. gli aggiornamenti delle analisi idrologiche del Baganza a Ponte Nuovo, ottenuti estendendo la serie storica agli ultimi anni, hanno portato ad abbassare di circa 8-10 % le valutazioni delle portate al colmo, rispetto a quelle stimate nel precedente studio [1]. Di queste riduzioni non si è tenuto conto nelle analisi successive. Pertanto il volume della cassa risulta moderatamente sovrastimato per laminare l'evento centenario o, viceversa, sufficiente a laminare un evento di tempo di ritorno lievemente superiore a quello centenario;
2. nel tratto a valle della cassa sul torrente Baganza, fino alla confluenza con il torrente Parma, la portata compatibile è ben superiore ai  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  imposti in uscita dalla cassa; tale valore è stato infatti definito non solo per mettere in sicurezza il tratto di

Baganza medesimo ma soprattutto per mettere in sicurezza, congiuntamente con gli altri interventi proposti, l'intera asta del torrente Parma, compreso il nodo critico di Colorno;

3. l'evento simultaneo, corrispondente a piene di tempo di ritorno centenario sia sul torrente Parma che sul torrente Baganza, pur considerando l'elevata correlazione tra i due eventi e l'allungamento dei colmi operato dalle casse, presenta un tempo di ritorno superiore a quello dei due eventi disgiunti;
4. l'evento simultaneo, corrispondente ad elevati livelli nel Po e ad elevate portate nel t. Parma, che può mettere in crisi la città di Colorno, presenta un tempo di ritorno superiore a quello dei due eventi disgiunti.

Le portate massime che si intendono garantire nel sistema Parma – Baganza di valle, alla luce degli interventi previsti e delle considerazioni ora svolte, è riassunto in Figura 4-9.



**Figura 4-9 – Tratti del sistema Parma – Baganza con indicate le portate massime di progetto alla luce degli interventi previsti per  $T = 100$  anni.**

## **5. REVISIONE DEL PROGETTO PRELIMINARE DELLA CASSA DI ESPANSIONE**

Alla luce delle analisi idrologiche ed idrauliche riportate nei Capitoli 2 e 4, sono stati modificati gli obiettivi di laminazione da raggiungere sul t. Baganza, al fine di incrementare il livello di sicurezza idraulica non solo della città di Parma ma anche in corrispondenza dell'abitato di Colorno.

Per raggiungere tali obiettivi la cassa di espansione oggetto della presente analisi è stata dimensionata per laminare un'onda di piena con un tempo di ritorno di 100 anni, garantendo una portata massima in uscita non superiore a  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ciò provoca un incremento del volume di laminazione rispetto al progetto preliminare del 2004 riportato in [5]. Al fine di ridurre i costi di costruzione, si è inoltre optato per una cassa di laminazione con un unico invaso “in linea”: tale configurazione infatti consente di realizzare un unico manufatto, dotato di paratoie mobili, che consentono di mantenere la portata in uscita dall'invaso pressoché costante, indipendentemente dal livello idrico nell'invaso. Tale soluzione progettuale consente di aumentare significativamente l'efficienza di laminazione dell'opera, riducendo così il volume complessivo da invasare per raggiungere i prefissati obiettivi di laminazione.

La localizzazione dell'area invasabile è sostanzialmente la medesima del progetto originario, con uno spostamento verso valle di circa 500 m del manufatto di regolazione. Nella nuova configurazione non è più previsto l'invaso 3 (fuori linea), per cui per occupare sostanzialmente la medesima zona, è necessario spostare a valle il manufatto.

Le quote di progetto della cassa sono state ricavate attraverso calcoli preliminari, successivamente verificati mediante simulazioni effettuate tramite modelli numerici statici e bidimensionali. Sulla base del volume complessivo necessario per la laminazione, è stata definita la geometria dell'invaso che consente di ricavare tale volume, rispettando i vincoli territoriali e cercando altresì di limitare l'altezza delle arginature e del manufatto di regolazione rispetto al piano campagna.

Per ottenere questi obiettivi parte del volume è stato ottenuto mediante scavo, riducendo la pendenza dell'alveo all'interno della cassa allo 0.2% e prevedendo un abbassamento significativo sia del piano dell'alveo sia del fondo della cassa rispetto alla condizione attuale. Il collegamento fra l'invaso di laminazione e l'alveo del torrente a monte è ottenuto mediante la realizzazione di una serie di briglie.

Di seguito si descrive il modello tridimensionale della batimetria di progetto della cassa di espansione. Per maggiori dettagli si rimanda a [9] e [10].

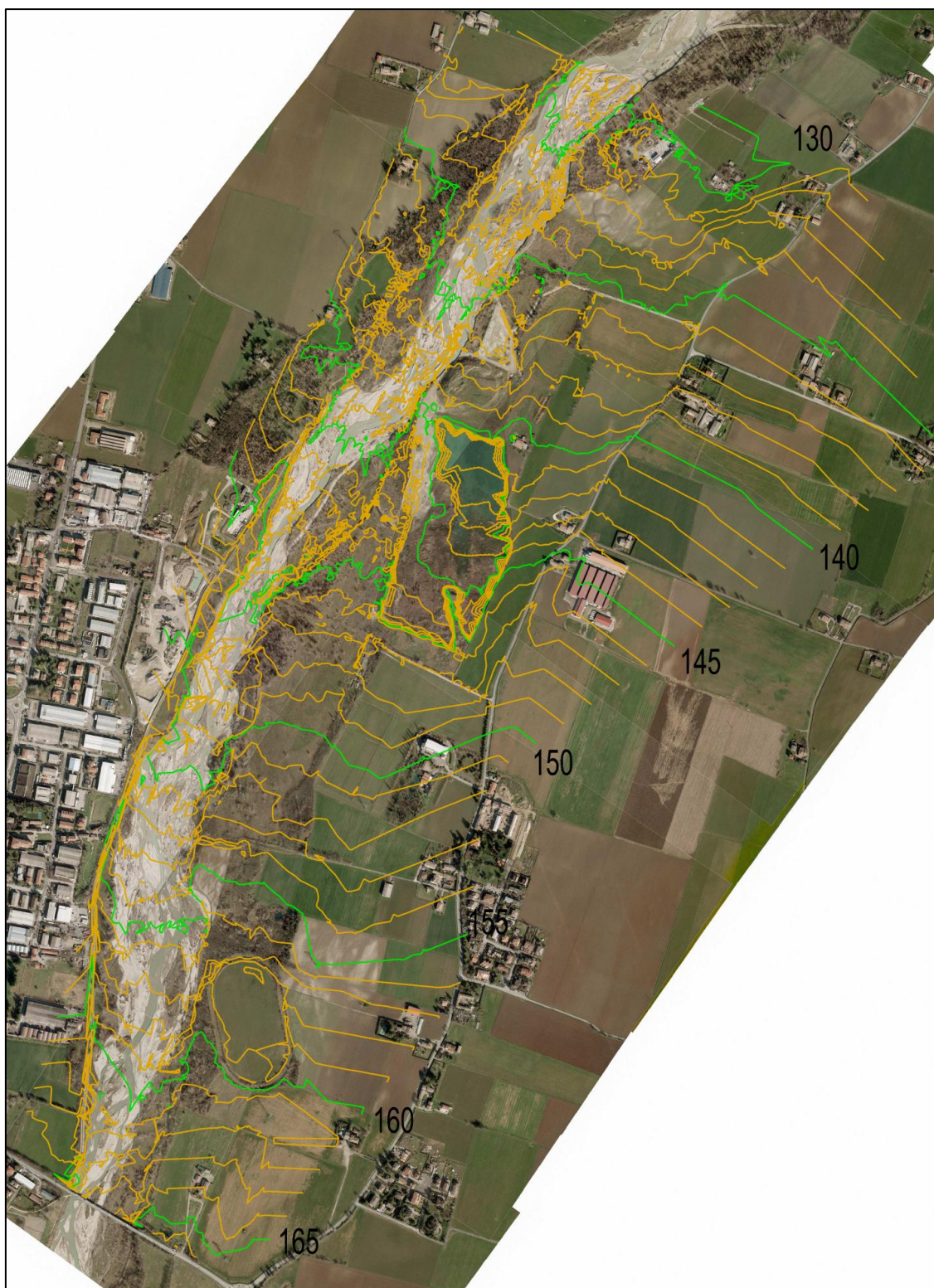
### **5.1. Individuazione delle principali caratteristiche della cassa di espansione**

Per la costruzione del modello del terreno nella zona in cui verrà ubicata la cassa sono stati utilizzati i punti rappresentanti il piano campagna della zona di interesse, rilevati nel novembre 2003 dal Servizio Tecnico dei Bacini Taro e Parma a cura della società Alfaprogetti di Parma.

La Figura 5-1 riporta la visualizzazione a curve di livello, con equidistanza di un metro, del piano campagna attuale, sovrapposto alle fotografie aeree.

Sulla base dei vincoli presenti e della capacità richiesta alla cassa di espansione è stata decisa la localizzazione del manufatto e l'estensione planimetrica della cassa. Inizialmente è stata riportata la linea che rappresenta la generatrice di argini e scarpate, riferita alla sommità degli argini assunta alla quota 145.5 m s.l.m.. Il tracciato planimetrico dell'arginatura presenta alcuni vincoli dovuti, in sponda destra, alla presenza di strada Montanara e di una abitazione e a monte per la presenza dell'attraversamento di un metanodotto; l'argine è stato interrotto in corrispondenza dell'intersezione con l'alveo sistemato del torrente Baganza, dove verrà inserito il manufatto regolatore. Analogamente, nella zona di monte la scarpata è stata interrotta in corrispondenza della zona dove saranno ubicate le briglie.





**Figura 5-1 – Curve di livello a equidistanza 1 metro descriventi l'andamento altimetrico del terreno nella situazione attuale, sovrapposte alle fotografie aeree.**

La definizione dello sviluppo trasversale del manufatto regolatore dipende dal funzionamento idraulico dello scaricatore di superficie, il quale ha l'obiettivo di allontanare le portate di piena eccezionali, in modo che il livello nell'invaso non superi mai la quota di massima ritenuta, la quale si trova al disotto del coronamento degli argini di una quantità pari al franco di sicurezza. Per tale motivo, in prima analisi, si è partiti a definire lo sviluppo dello scaricatore di superficie.

Al vincolo imposto dal regolamento dighe, circa la portata millenaria da smaltire completamente con gli scaricatori di superficie pari a  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ , si è aggiunto quello imposto dal carico limite sullo stramazzo, che è stato definito pari a 2 m.

La lunghezza complessiva  $L_P$  dello stramazzo può essere pertanto ottenuta dalla seguente espressione:

$$L_P = \frac{Q_P}{\mu h_d \sqrt{2gh_d}}$$

in cui:

- $\mu$ : coefficiente di efflusso, assunto pari a 0.48;
- $h_d$ : carico di progetto sullo stramazzo pari a 2 m;
- $Q_P$ : portata millenaria pari a  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ .

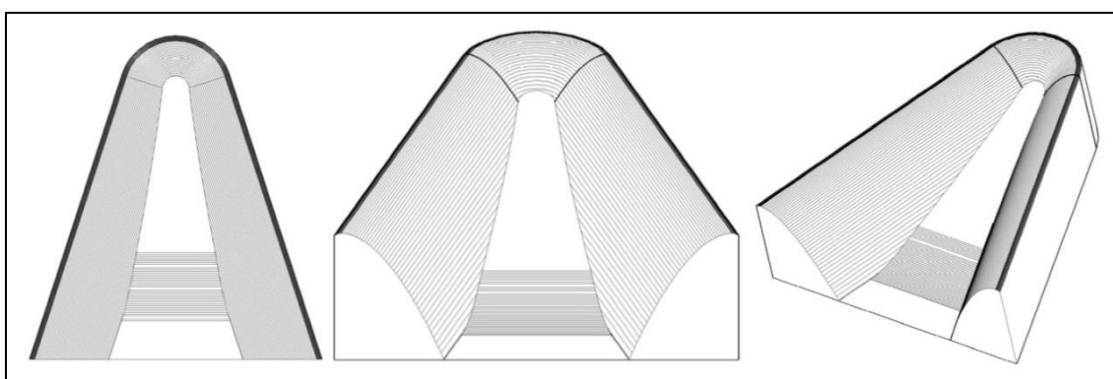
Sostituendo i valori sopra riportati si ottiene una lunghezza dello stramazzo  $L_P = 249.4$  m. Il risultato evidenzia una forte differenza tra la lunghezza del ciglio sfiorante e la larghezza dell'alveo inciso di monte, dell'ordine di 100-120 m. In fase di progetto preliminare si è ritenuto che una diga rettilinea di circa 250 m di lunghezza potesse risultare eccessivamente costosa, comportando necessariamente anche la realizzazione di un impalcato da ponte soprastante ed una vasca di dissipazione al piede pressoché delle stesse dimensioni.

Si è quindi optato per una soluzione alternativa, ponendo come vincoli uno sviluppo trasversale del manufatto entro i 150 m e, al contempo, il mantenimento di un carico sullo stramazzo pari a 2 m.

L'idea progettuale sviluppata per massimizzare lo sviluppo della soglia di sfioro ha preso spunto dalla configurazione del manufatto, già esistente, realizzato sulla cassa d'espansione del Torrente Parma. In particolare, si è riscontrato plausibile l'adozione dei cosiddetti "*becchi d'anatra*", i quali attraverso un'opportuna conformazione

geometrica, riescono a garantire uno sviluppo del ciglio sfiorante dello stramazzo superficiale consono con quello di progetto, contenendo l'ingombro della struttura portante del manufatto entro i limiti prefissati.

Tali dispositivi presentano una sagoma del tipo di quella riportata nella Figura 5-2, con una sezione trasversale sagomata secondo un profilo Creager–Scimemi nella parte rettilinea e tenendo conto dell'interferenza della vena convergente nella parte apicale, basandosi sugli studi relativi agli scaricatori a calice.



**Figura 5-2 – Configurazione di uno scaricatore di superficie “a becco d’anatra” (da [9]).**

L'adozione di tale forma ha permesso quindi di impostare una configurazione di progetto dello sbarramento tale per cui la lunghezza effettiva risulta pari a 129 m, senza tener conto dei muri d'ala atti all'immorsamento della diga nel rilevato arginale e, al contempo, garantendo una lunghezza di sfioro effettivo pari a 247.42 m, prossima a quella di progetto. Come si può notare dalla Figura 5-3 e dal *rendering* 3D riportato nella Figura 5-4, la configurazione di progetto del manufatto è costituita da quattro becchi d'anatra, in cui i due centrali ad asse rettilineo e quelli laterali inclinati. Tali becchi sono intercalati da tre tratti di sfioro rettilinei in corrispondenza delle luci di fondo, di larghezza pari a 10 m ciascuno.

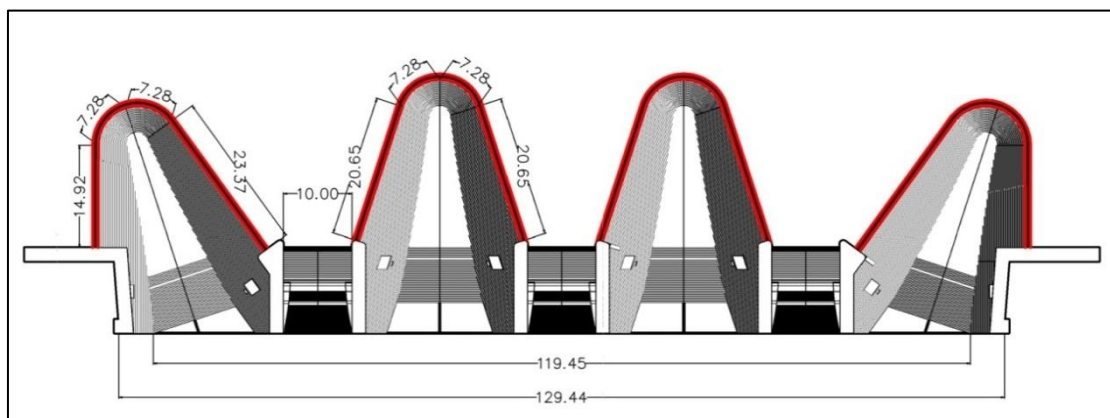
In definitiva gli elementi caratteristici dell'invaso della cassa di espansione (Figura 5-5 e Figura 5-6) sono i seguenti:

- l'alveo sistemato del torrente Baganza ha una quota di monte di 133.5 m s.l.m. e una di valle, al piede dello sbarramento, di 131 m s.l.m., con una pendenza media dello 0.2%;

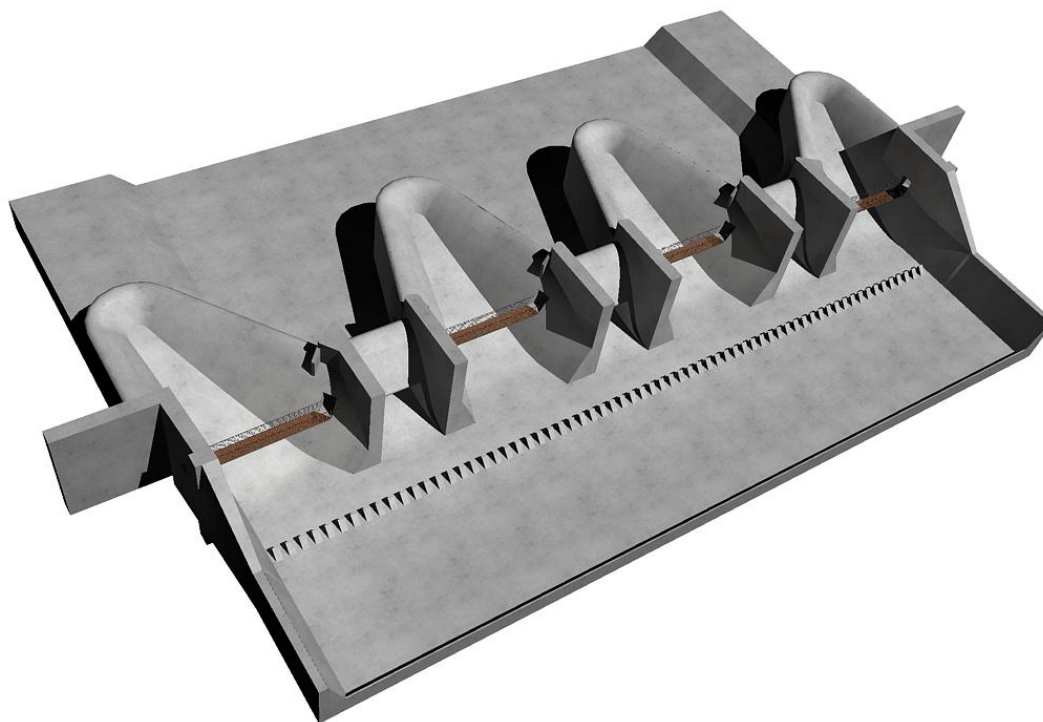


## 5 – Revisione del progetto preliminare della cassa di espansione

- il fondo della cassa presenta una quota di monte di 135 m s.l.m. e una quota di valle di 134 m s.l.m.;
- gli arginelli che separano l'alveo dalle zone di espansione hanno una quota di monte di 136.5 m s.l.m. e una di valle di 135 m s.l.m.. Sugli stessi, in prossimità del manufatto, sono presenti due finestrate, che portano la quota dell'arginello da 135 a 134 m s.l.m. per una larghezza di 4 m;



**Figura 5-3 – Configurazione di progetto del manufatto regolatore (da [9]).**



**Figura 5-4 – Rendering 3D del progetto del manufatto regolatore e della vasca di dissipazione (da [9]).**

- gli argini perimetrali hanno il coronamento a quota 145.5 m s.l.m. Essi si elevano rispetto al piano campagna a valle, posto a quota 131.5 m s.l.m., di circa 14 m; l'elevazione si riduce progressivamente verso monte, fino ad azzerarsi ove il piano campagna medesimo raggiunge la quota di 145.5 m s.l.m. (Figura 5-6). Procedendo ulteriormente verso monte la cassa non è più arginata ed il volume a disposizione si ottiene solo mediante scavo.

L'alveo del torrente Baganza all'interno dell'invaso avrà una pendenza costante del 2 per mille, contro una pendenza naturale attuale del 1.5%, partendo dalla quota di monte di 133.5 m e arrivando a valle, dopo aver percorso 1200 m, al piede dello sbarramento, alla quota di 131 m; con una larghezza costante di 100 m. Entrambe le sponde dell'alveo hanno una pendenza di 2:1 e terminano sulla sommità dell'arginello, in modo da assicurare un contenimento di almeno 3 m a monte, che si incrementa a 4 m a valle, in corrispondenza del manufatto. Ciò per garantire sia il contenimento in alveo della portata di 300 m<sup>3</sup>/s, nonostante l'effetto di rigurgito operato dal manufatto, che per garantire il riempimento della cassa da valle che è uno dei requisiti fondamentali per evitare eccessive velocità in fase di riempimento e garantire un buon funzionamento della cassa. La funzione degli arginelli è appunto quella di garantire che per portate modeste del torrente la cassa non venga invasata; solo quando la portata supera i 300 m<sup>3</sup>/s la cassa inizia ad invasare acqua, in modo da non sprecare anticipatamente parte del volume disponibile.

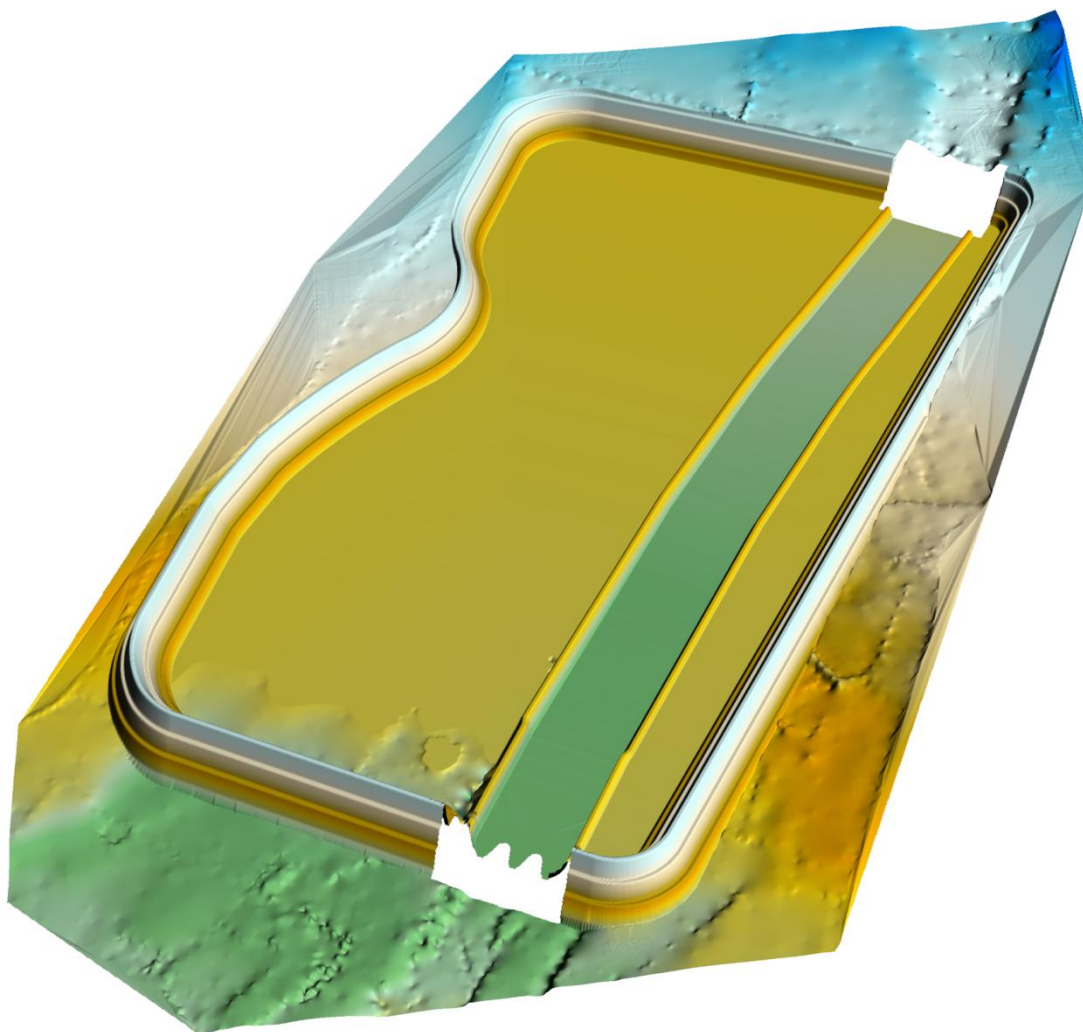
Le arginature perimetrali della cassa hanno una pendenza di 2:1 intervallata ogni 4 m di dislivello da banche della larghezza di 4.5 m, aventi lo scopo sia di interrompere il ruscellamento che di permettere di muoversi agevolmente sugli argini per ispezioni e manutenzioni. Il coronamento dell'argine, posto a quota di 145.5 m s.l.m., è largo anch'esso 4.5 m per consentire il transito di mezzi di servizio. Gli argini terminano nella parte esterna dell'opera sul piano campagna, mentre all'interno alla quota di progetto, che è inferiore al piano campagna stesso. Le arginature presentano una lunghezza lineare di 2196 m che sommate alla parte di scarpate tutte in scavo, della parte di monte, genera una lunghezza complessiva di 3254 m.

L'opera comporta lo scavo di 3.212 milioni di m<sup>3</sup> di materiale e un volume di riporto per la realizzazione delle arginature pari a 545000 m<sup>3</sup>.



Figura 5-5 – Configurazione e principali quote di progetto della cassa di espansione.





**Figura 5-6 – Modello tridimensionale della cassa di espansione ottenuta con il modello Surfer 9.0 © ([12]).**

## **5.2. Curva dei volumi e delle aree**

I volumi e le aree calcolati in corrispondenza di diversi valori di quota sono riportati in Tabella 5-1 ed in Figura 5-7. Tali valori sono stati ottenuti dall'intersezione fra il modello digitale della cassa e un piano orizzontale posto alle diverse quote.

La curva delle aree presenta un vistoso cambiamento di andamento tra la quota 134.0 e 135.0 m s.l.m., dovuto al fatto che a quelle quote inizia e si completa l'allagamento delle due zone di espansione, con conseguente veloce incremento dell'area occupata dall'acqua. Il volume invasabile alla quota della soglia di tracimazione, 141.0 m s.l.m., è pari a quello di progetto.

Tabella 5-1: Aree e volumi invasabili nella cassa di espansione, al variare del livello.

Quota (m s.l.m.)	Area (ha)	Volume (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Quota (m s.l.m.)	Area (ha)	Volume (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
131.0	0	0	138.5	69.51	2.935
131.5	2.24	0.007	139.0	69.86	3.283
132.0	4.78	0.024	139.5	70.21	3.633
132.5	7.31	0.054	140.0	70.56	3.985
133.0	10.07	0.097	140.5	70.90	4.339
133.5	14.09	0.158	<b>141.0</b>	<b>71.25</b>	<b>4.694</b>
134.0	17.14	0.236	141.5	72.26	5.052
134.5	31.48	0.344	142.0	73.38	5.418
135.0	63.80	0.592	142.5	73.72	5.786
135.5	64.91	0.914	143.0	74.06	6.155
136.0	65.88	1.241	143.5	74.40	6.526
136.5	66.66	1.573	144.0	74.73	6.899
137.0	67.02	1.907	144.5	75.06	7.274
137.5	68.16	2.243	145.0	75.38	7.650
138.0	69.16	2.588	145.5	76.08	8.028

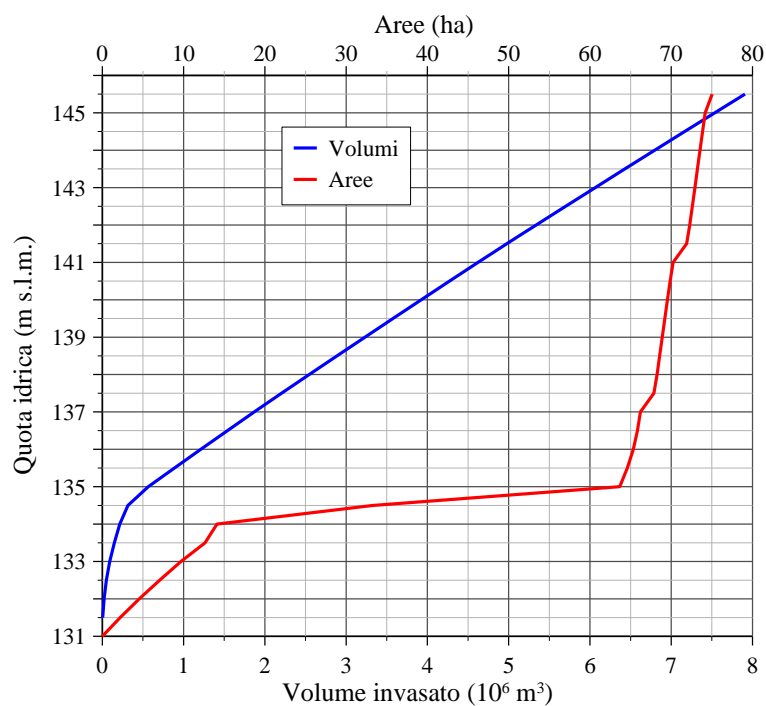


Figura 5-7 – Curve delle aree e dei volumi.

### 5.3. Caratteristiche del manufatto di regolazione

Il manufatto di regolazione (Figura 5-3) si sviluppa per una larghezza di circa 130 m, presenta tre luci di fondo rettangolari situate alla medesima quota dell'alveo di monte (131 m s.l.m.), ciascuna delle quali larga 8 m e alta 3 m, e uno sfioratore composto da tre tratti rettilinei in corrispondenza delle bocche e quattro tratti curvilinei con la configurazione a “becco d'anatra”.

Le luci di fondo soddisfano una doppia esigenza; la prima è quella di consentire quotidianamente l'allontanamento a pelo libero delle portate di magra e la seconda è quella di ostacolare le onde di piena in arrivo funzionando sotto battente in modo tale da limitare la portata e consentire così l'invaso della cassa. L'accesso alle luci è presidiato sul paramento di monte da paratoie mobili, necessarie durante le prove d'invaso e utilizzabili anche in occasione delle piene del torrente per regolare il riempimento e lo svuotamento del bacino nella maniera più efficiente possibile. Qualora il livello idrico all'interno dell'invaso superasse il ciglio sfiorante, posto alla quota di 141 m s.l.m., la portata tracima dai becchi d'anatra e dei tratti rettilinei di sfioro posti sopra le bocche.

Nel seguito vengono riassunte le misure degli elementi principali del manufatto limitatore (per maggiori dettagli si rimanda a [9]):

- larghezza del corpo trasversale al torrente 130 m;
- tre luci di fondo dotate di paratoie mobili, di altezza 3 m e larghezza 8 m;
- ciglio sfiorante composto da tre tratti rettilinei (30 m) e quattro scaricatori a “becco d'anatra” (217.42 m) per uno sviluppo complessivo di sfioro di 247.42 m;
- quota dell'alveo inciso a monte del manufatto: 131 m s.l.m.;
- quota della vasca di dissipazione a valle del manufatto: 129 m s.l.m.;
- quota massima di regolazione (quota ciglio sfiorante): 141 m s.l.m.;
- quota massima d'invaso: 143 m s.l.m.;
- quota di coronamento arginale: 145.5 m s.l.m.;
- franco arginale: 2.5 m.

#### **5.4. Scale delle portate del manufatto di regolazione**

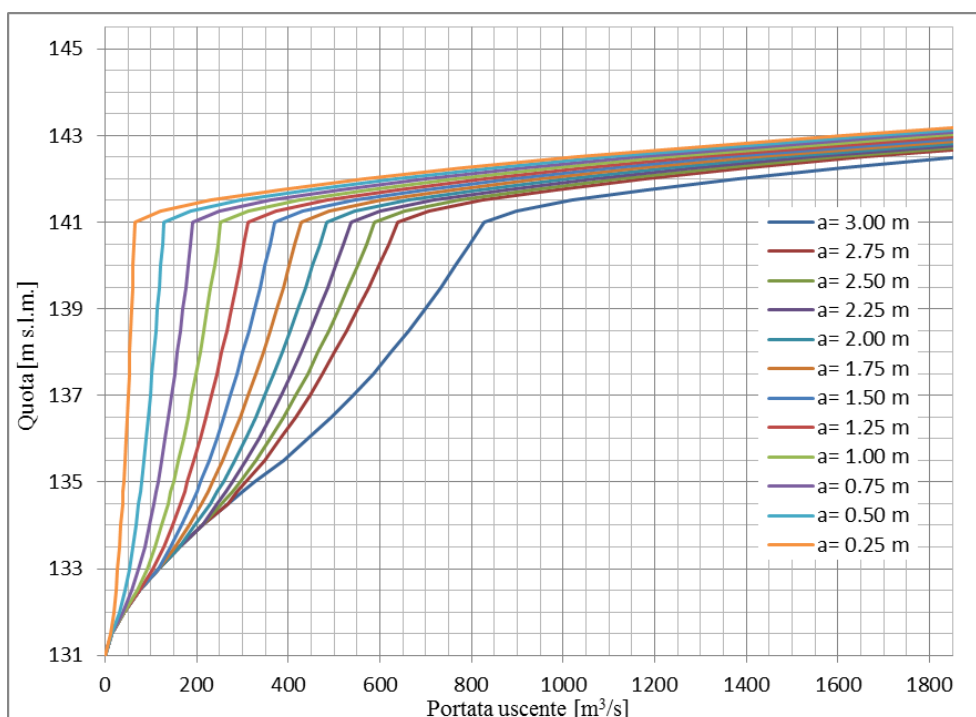
L'efflusso dal manufatto di regolazione avviene seguendo differenti campi di funzionamento, in funzione del livello idrico a monte dello stesso.

1. Funzionamento a pelo libero. Si realizza un efflusso di questo tipo fino a tiranti idrici all'interno dell'invaso inferiori a 1.4-1.5 volte l'altezza libera della luce. In queste condizioni la vena fluida riesce a imboccare la luce mantenendosi a pelo libero, grazie all'abbassamento locale dovuto all'acquisto di altezza cinetica.
2. Funzionamento sotto battente. All'aumentare del tirante idrico, per valori compresi tra 1.4-1.5 volte l'altezza libera delle luci e la quota del ciglio sfiorante, si realizza un efflusso dagli organi di scarico sotto battente, condizione nella quale la corrente risente fortemente delle dimensioni della luce libera e nella quale si può iniziare a ipotizzare di manovrare le paratoie.
3. Funzionamento sotto battente e a stramazzo. Al superamento della quota del ciglio sfiorante entra in funzione anche lo scaricatore di superficie e la portata effluente in condizioni di sfioro si somma a quella che già sta effluendo sotto battente attraverso le paratoie.

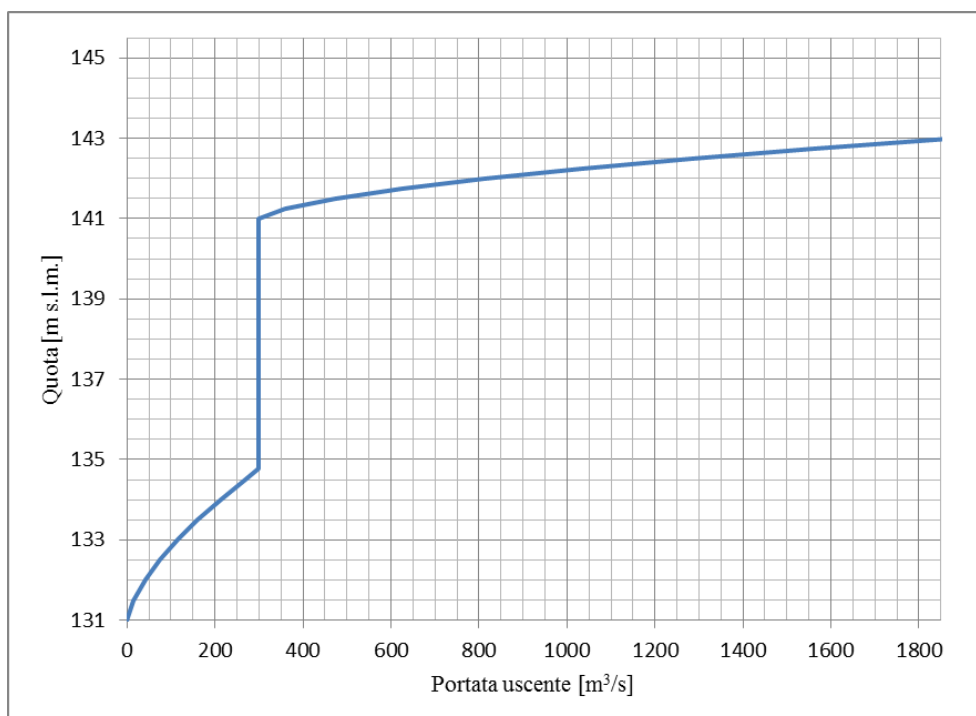
Partendo dai tre funzionamenti precedentemente descritti è possibile determinare, con una certa approssimazione dovuta alle incertezze legate ai vari coefficienti di efflusso, le scale delle portate del manufatto regolatore (per maggiori dettagli si rimanda a [9]).

In Figura 5-8 sono riportate le scale delle portate del manufatto regolatore, in funzione del grado di apertura delle paratoie. Ogni curva si riferisce a luci di fondo con apertura costante delle paratoie, la più esterna corrisponde a luci completamente sollevate.

Una possibile regolazione in condizioni di piena prevede la movimentazione delle paratoie in modo da ottimizzare l'utilizzo del volume di invaso e limitare nel contempo la portata uscente. Fissato in  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  il massimo valore di portata che si vuole allontanare nell'alveo a valle, si può prevedere di manovrare le paratoie garantendo, in fase di funzionamento a battente, un efflusso costante e pari al valore desiderato, come mostrato in Figura 5-9.



**Figura 5-8 – Scala di deflusso del manufatto regolatore nell'ipotesi di paratoie con diversi gradi di apertura.**



**Figura 5-9 – Scala di deflusso del manufatto regolatore nell'ipotesi di mantenere, attraverso la regolazione delle paratoie, una portata uscente pari a  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  nella fase di funzionamento sotto battente.**



## 6. *SIMULAZIONI STATICHE DEL FUNZIONAMENTO DELLA CASSA DI ESPANSIONE*

I fenomeni di invaso e svaso in una cassa di espansione, specie se in linea come nel caso in esame, sono di solito assimilati ad un processo di laminazione “statico”, nel quale cioè l’invaso sia in grado di contenere la portata in arrivo, di annullarne la velocità e di permettere variazioni del pelo libero come semplici traslazioni verticali di uno specchio liquido, assunto istante per istante orizzontale.

Questo modo di schematizzare il problema di solito porta a risultati più che soddisfacenti, ma non è in grado, soprattutto nelle prime fasi di riempimento e nelle ultime fasi di svuotamento, di descrivere il campo di velocità che si viene a creare all’interno della cassa. Per indagare su questo aspetto è necessario applicare modelli più complessi e onerosi dal punto di vista del calcolo, come ad esempio quelli che risolvono le equazioni alle acque basse in un dominio bidimensionale.

Nel presente capitolo il problema viene affrontato con un approccio di tipo statico, mentre nel successivo capitolo, limitatamente all’evento di piena di progetto, si utilizzerà un modello 2D alle acque basse.

Nel caso di un approccio di tipo “statico” il funzionamento complessivo della cassa può essere descritto dall’equazione di continuità espressa in forma differenziale:

$$\frac{dW(t)}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{out}(t) \quad (6.1)$$

dove  $W(t)$  rappresenta il volume invasato al tempo  $t$ ,  $Q_{in}$  e  $Q_{out}$  rispettivamente la portata in ingresso ed in uscita al tempo  $t$ .

Esprimendo il rapporto  $\frac{dW}{dt}$  in funzione della quota  $z$  e dell’area dello specchio liquido  $S(z)$ :

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dz} \frac{dz}{dt} = S(z) \frac{dz}{dt} \quad (6.2)$$

e sostituendo nell’equazione 2.1 si ottiene:

$$\frac{dz(t)}{dt} = \frac{Q_{in}(t) - Q_{out}(t)}{S(z)} \quad (6.3)$$

Nella (6.3) compaiono le tre funzioni incognite  $Q_{out}(t)$ ,  $z(t)$  ed  $S(z)$ , mentre  $Q_{in}(t)$  si presuppone nota e pari ad una delle onde di piena sintetiche in ingresso alla cassa (Figura 2-2). Ai fini della risoluzione è quindi necessario associare alla (6.3) altre due equazioni.

La prima relazione si ricava dalla legge di efflusso del manufatto regolatore (Figura 5-8 o Figura 5-9), per la quale risulta

$$Q_{out}(t) = f(z) \quad (6.4)$$

mentre la seconda, dedotta da considerazioni puramente geometriche dell'invaso (Figura 5-7) correla l'area dello specchio liquido alla quota:

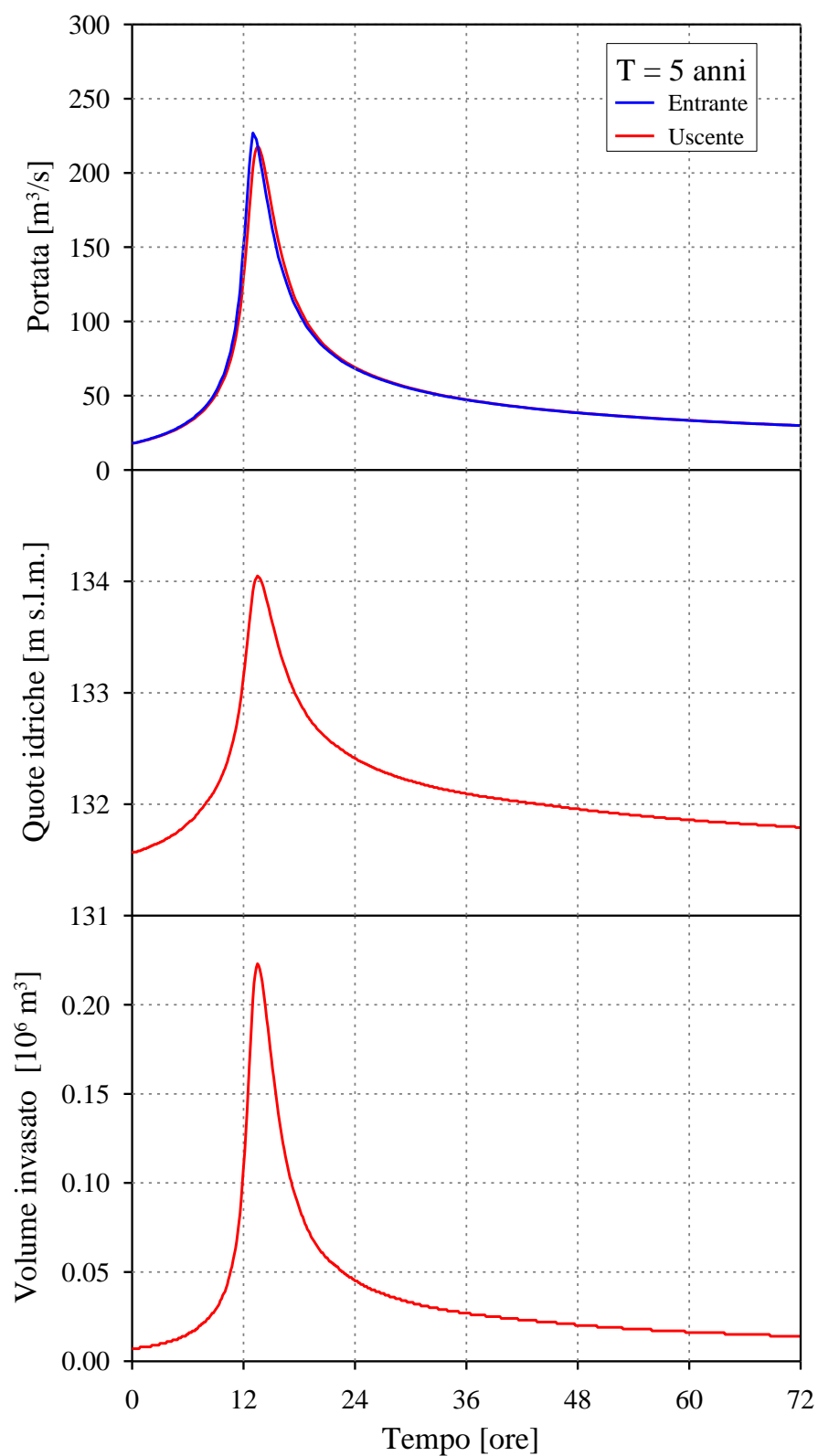
$$S = g(z) \quad (6.5)$$

Per risolvere il sistema di tre equazioni (6.3)÷(6.5) si è utilizzato un apposito programma di calcolo, scritto in linguaggio FORTRAN, che utilizza il metodo di Runge-Kutta alle differenze finite al 4° ordine, fornendo come risultati i valori di  $Q_{in}$ ,  $Q_{out}$ ,  $z$  e  $W$ , in funzione del tempo  $t$ . Per maggiori dettagli si rimanda a [11].

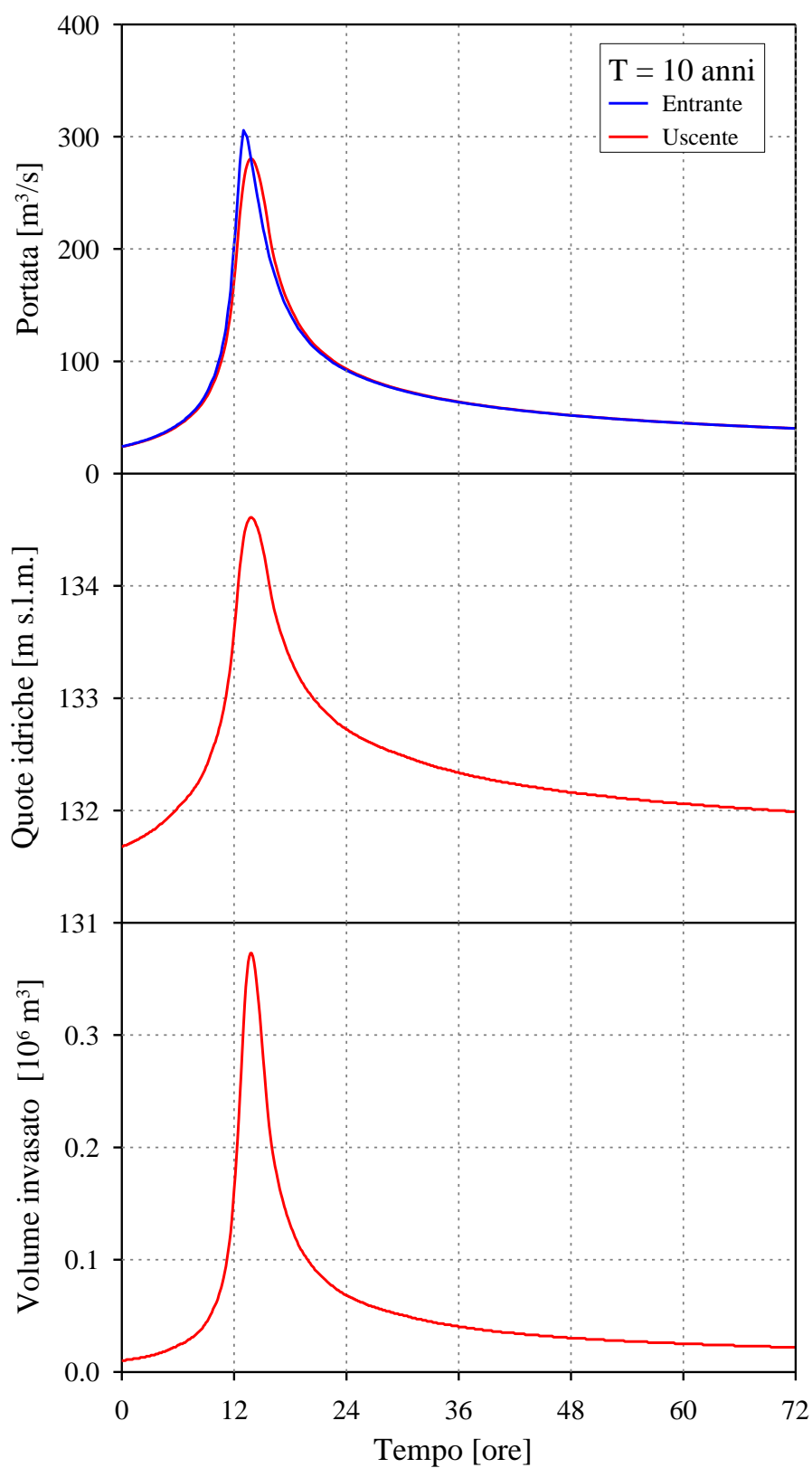
### **6.1. Simulazione del funzionamento della cassa con paratoie completamente aperte e con paratoie manovrate in modo da garantire, ove possibile, una portata in uscita non superiore a 300 m<sup>3</sup>/s.**

La simulazione statica del comportamento della cassa di espansione prevede l'utilizzo del programma descritto nel paragrafo precedente. Nel caso di paratoie completamente aperte la relazione (6.4) corrisponde alla scala di deflusso riportata in Figura 5-8 relativamente all'apertura totale delle paratoie ( $a=3.00$  m). Nel caso di paratoie manovrate la relazione (6.4) corrisponde al grafico riportato in Figura 5-9.

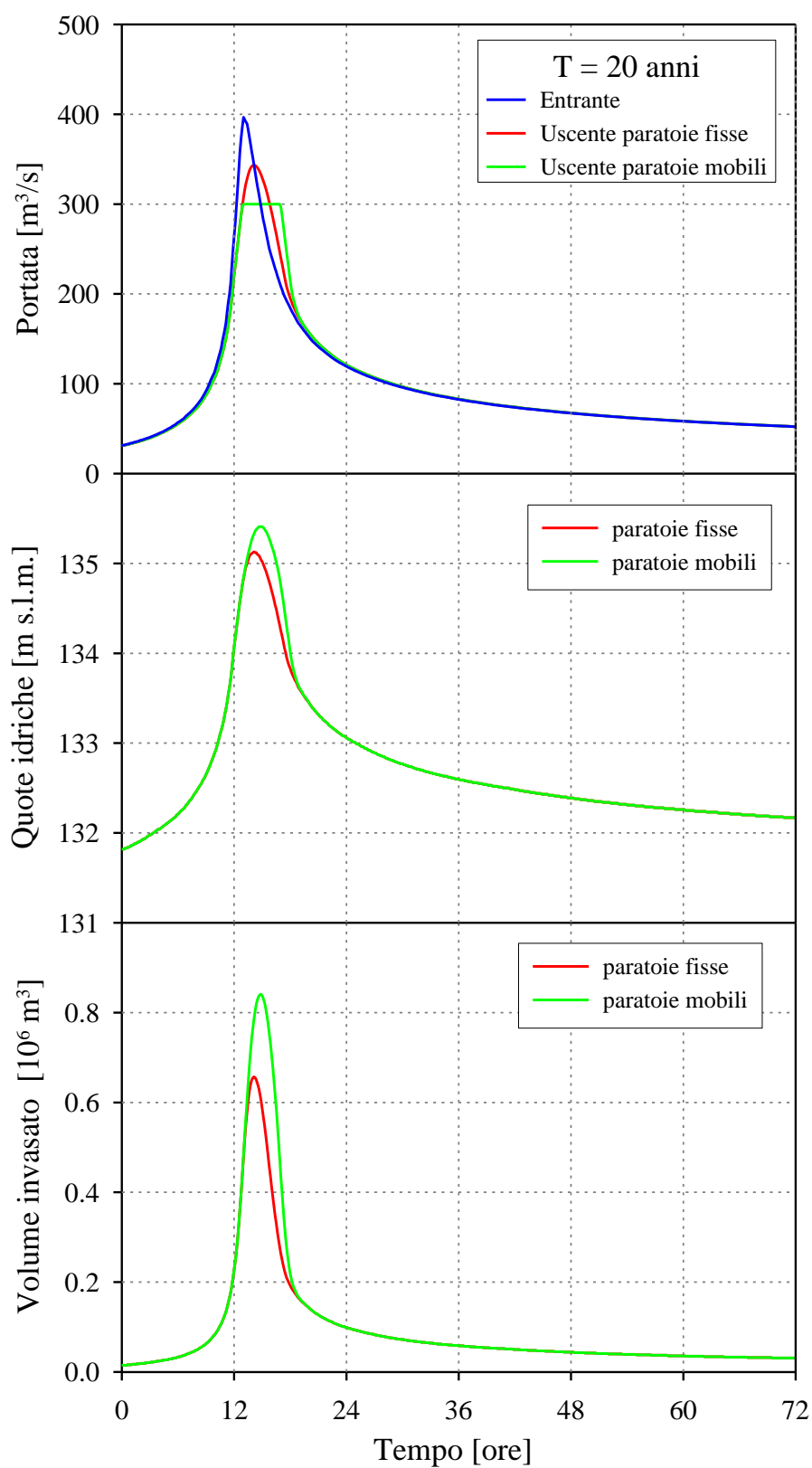
Nelle Figure 6-1÷6-7 sono riportati i grafici degli andamenti delle portate, in ingresso e in uscita, dei livelli idrici e dei volumi invasati in funzione del tempo, sia nell'ipotesi di paratoie fisse che mobili.



**Figura 6-1 – Andamenti delle portate, dei livelli idrici e dei volumi invasati per un evento con tempo di ritorno di 5 anni.**



**Figura 6-2 – Andamenti delle portate, dei livelli idrici e dei volumi invasati per un evento con tempo di ritorno di 10 anni.**



**Figura 6-3 – Andamenti delle portate, dei livelli idrici e dei volumi invasati per un evento con tempo di ritorno di 20 anni.**

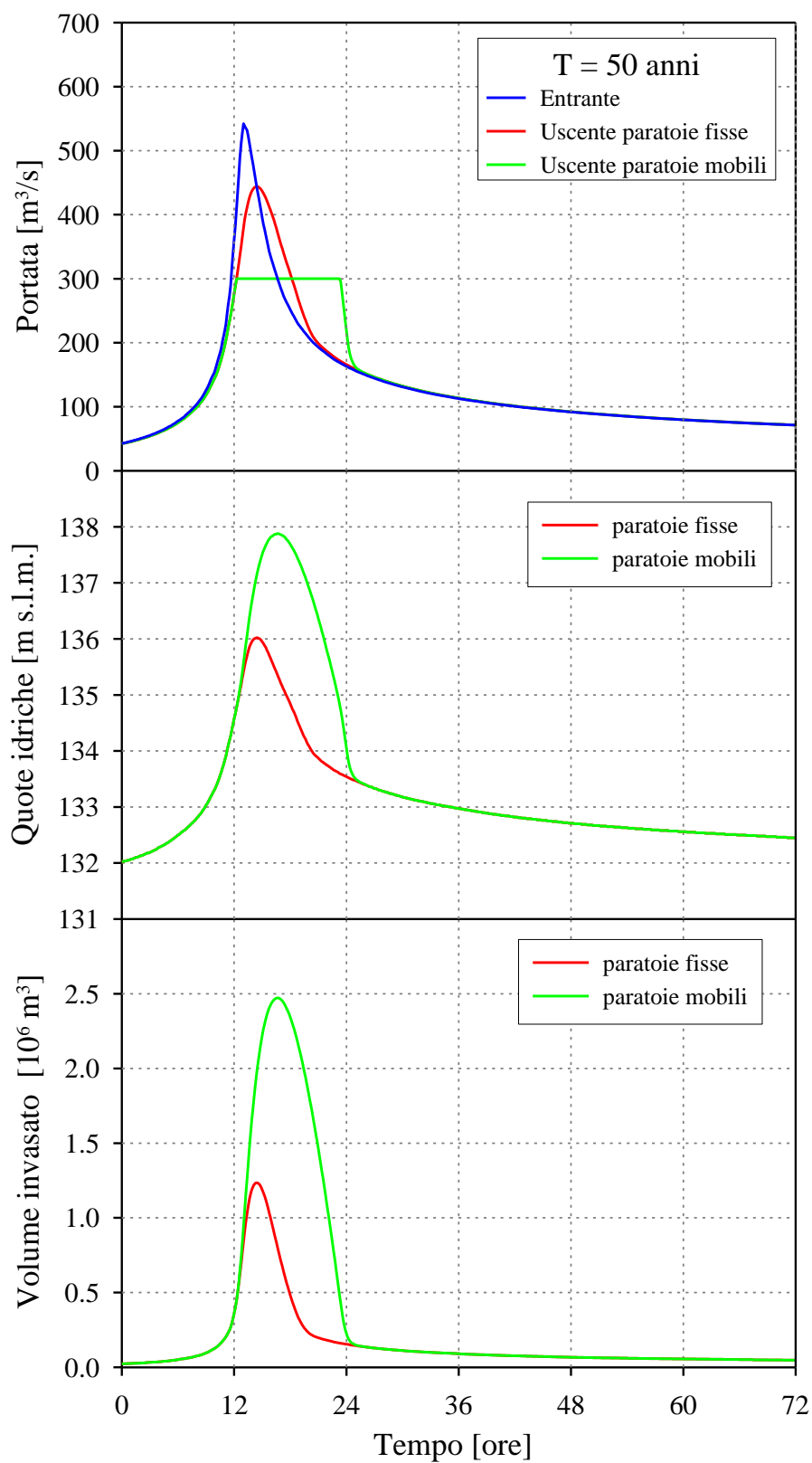


Figura 6-4 – Andamenti delle portate, dei livelli idrici e dei volumi invasi per un evento con tempo di ritorno di 50 anni.

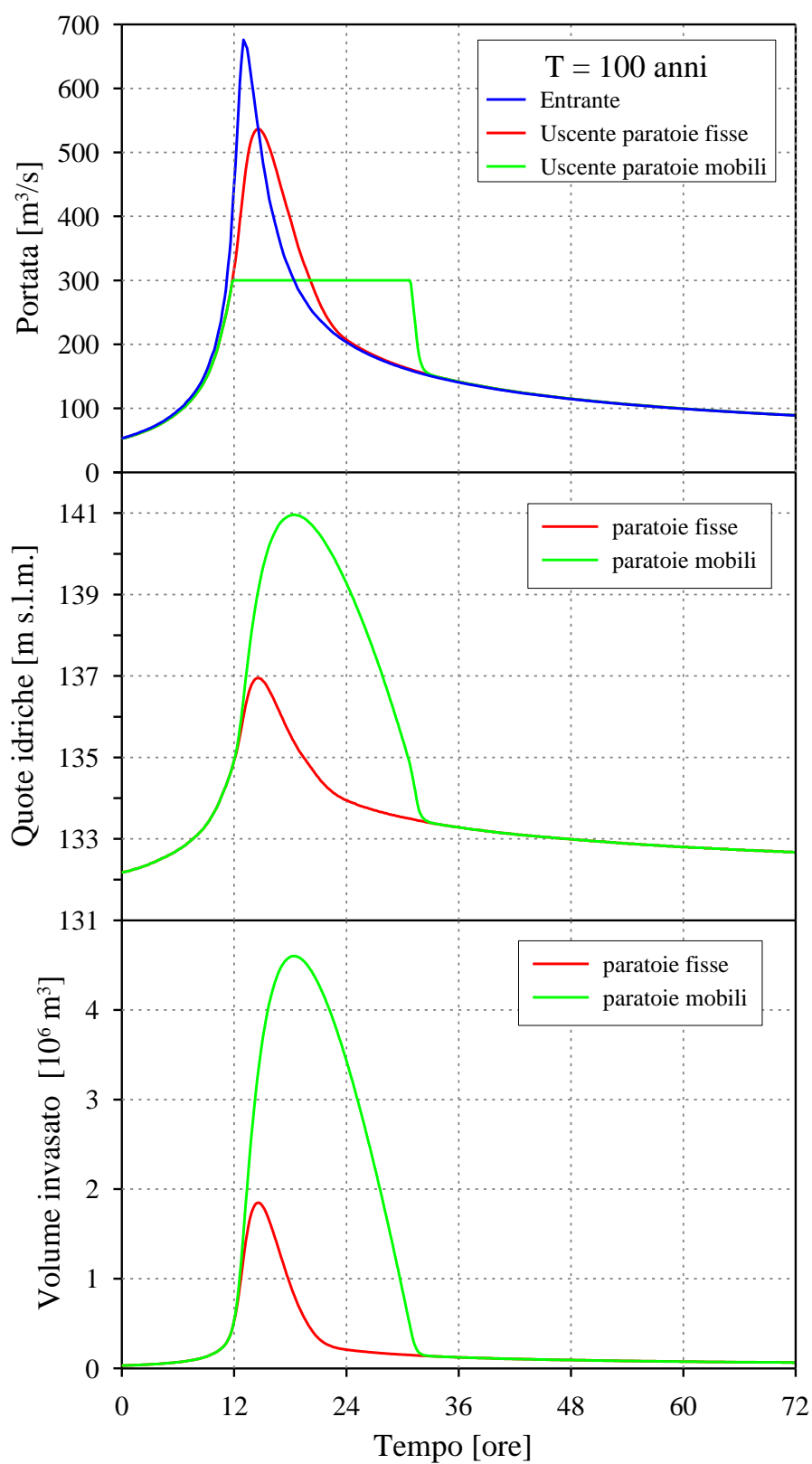


Figura 6-5 – Andamenti delle portate, dei livelli idrici e dei volumi invasati per un evento con tempo di ritorno di 100 anni.

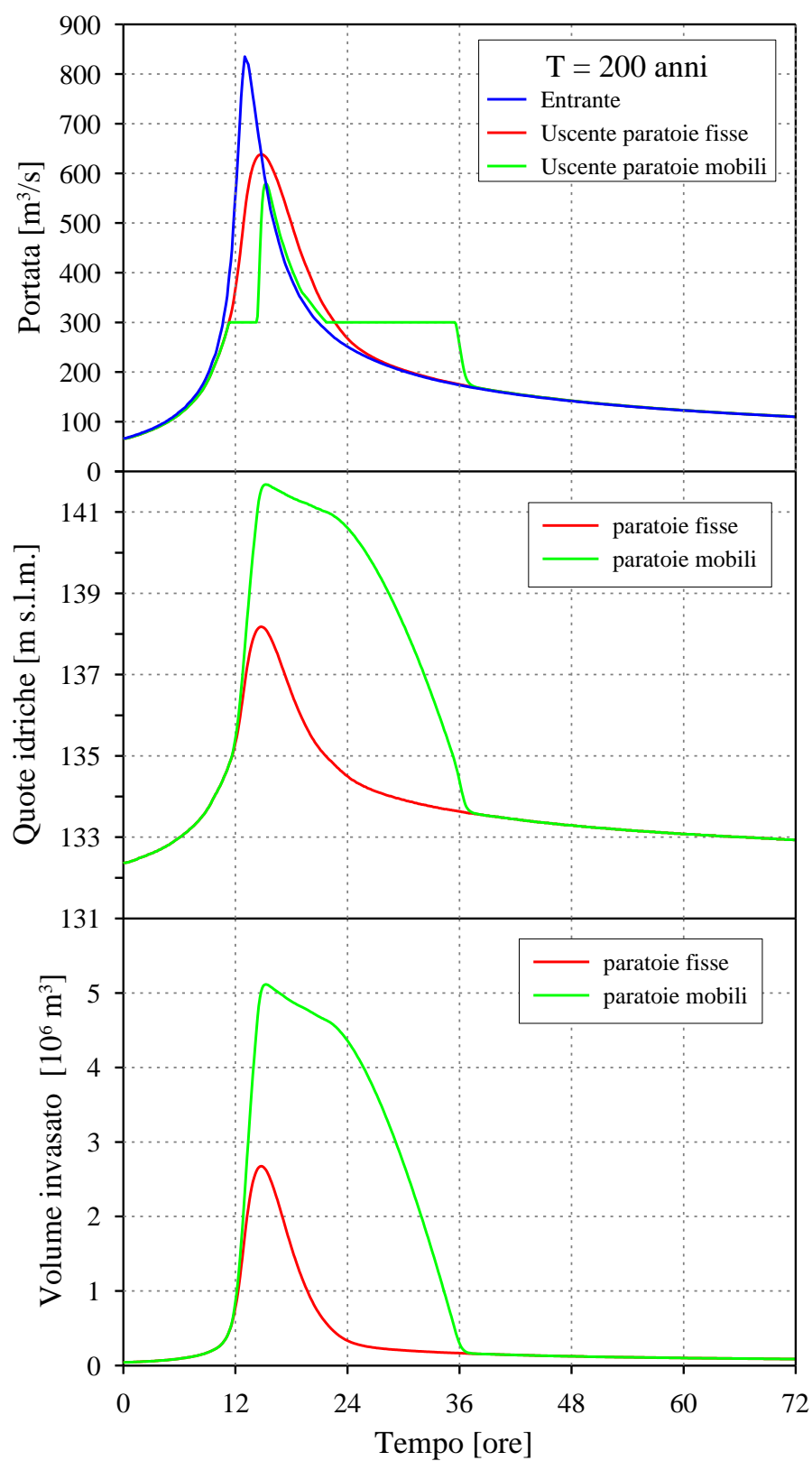


Figura 6-6 – Andamenti delle portate, dei livelli idrici e dei volumi invasi per un evento con tempo di ritorno di 200 anni.



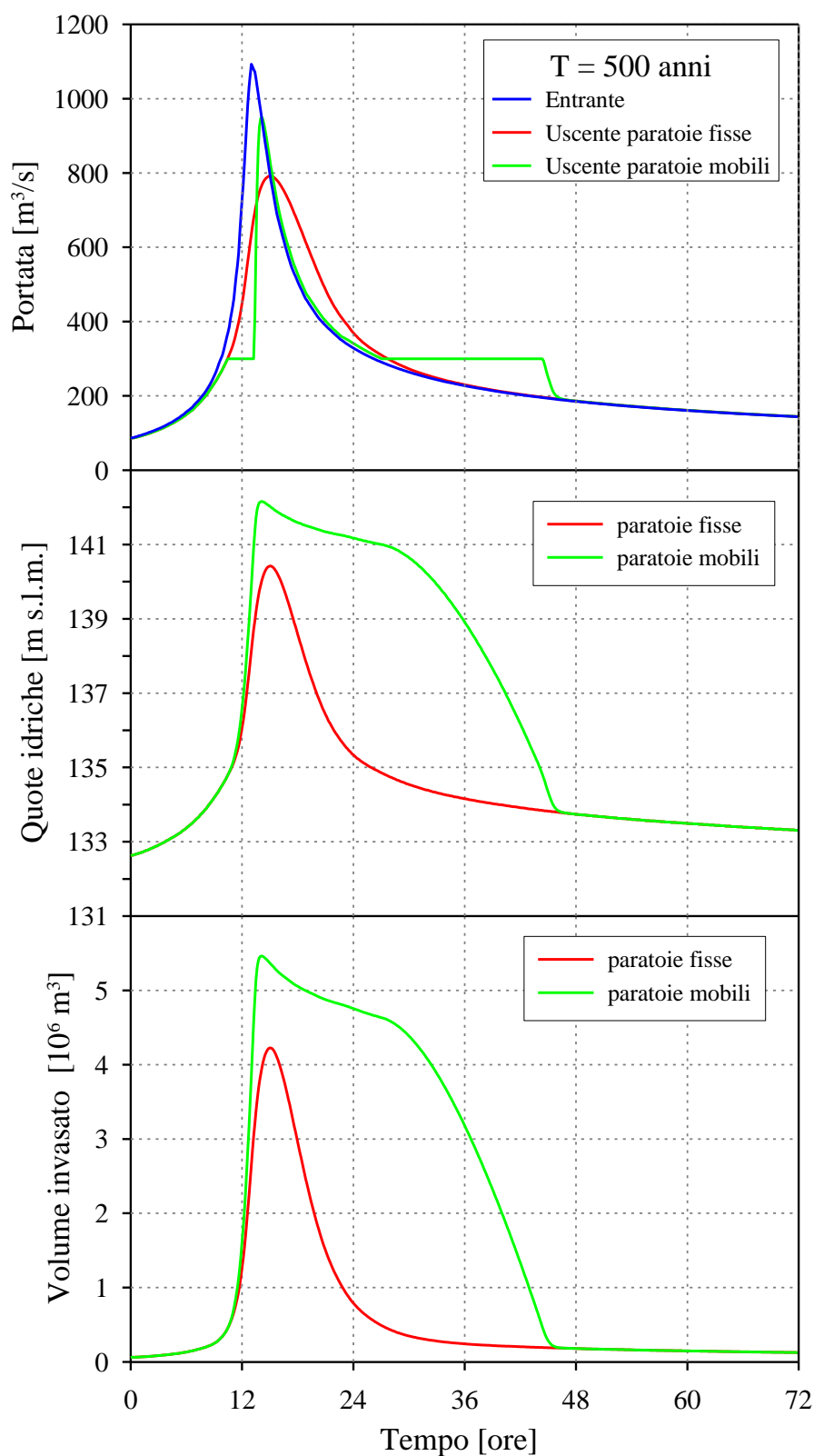


Figura 6-7 – Andamenti delle portate, dei livelli idrici e dei volumi invasati per un evento con tempo di ritorno di 500 anni.

Dall'osservazione dei grafici si nota come, con paratoie completamente aperte, l'effetto di laminazione della cassa è molto modesto e non si giunge mai, neppure per  $T=500$  anni, ad invasare completamente la cassa e all'entrata in funzione dello sfioratore di superficie (Figura 6-7); i livelli idrici raggiungono infatti il valore massimo di 140.42 m s.l.m. per l'evento di piena cinquecentennale. Già però per l'evento sintetico ventennale la portata massima in uscita supera il valore di progetto di  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ciò è imbutabile al "voluto" sovradimensionamento delle luci di fondo, avente lo scopo di allontanare la portata di  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  senza provocare apprezzabili riempimenti della cassa, che ne ridurrebbero l'efficienza. Risulta quindi indispensabile manovrare le paratoie in condizioni di piena o, in un'alternativa sicuramente meno efficiente, ridurre la luce libera di efflusso delle bocche chiudendo parzialmente le paratoie.

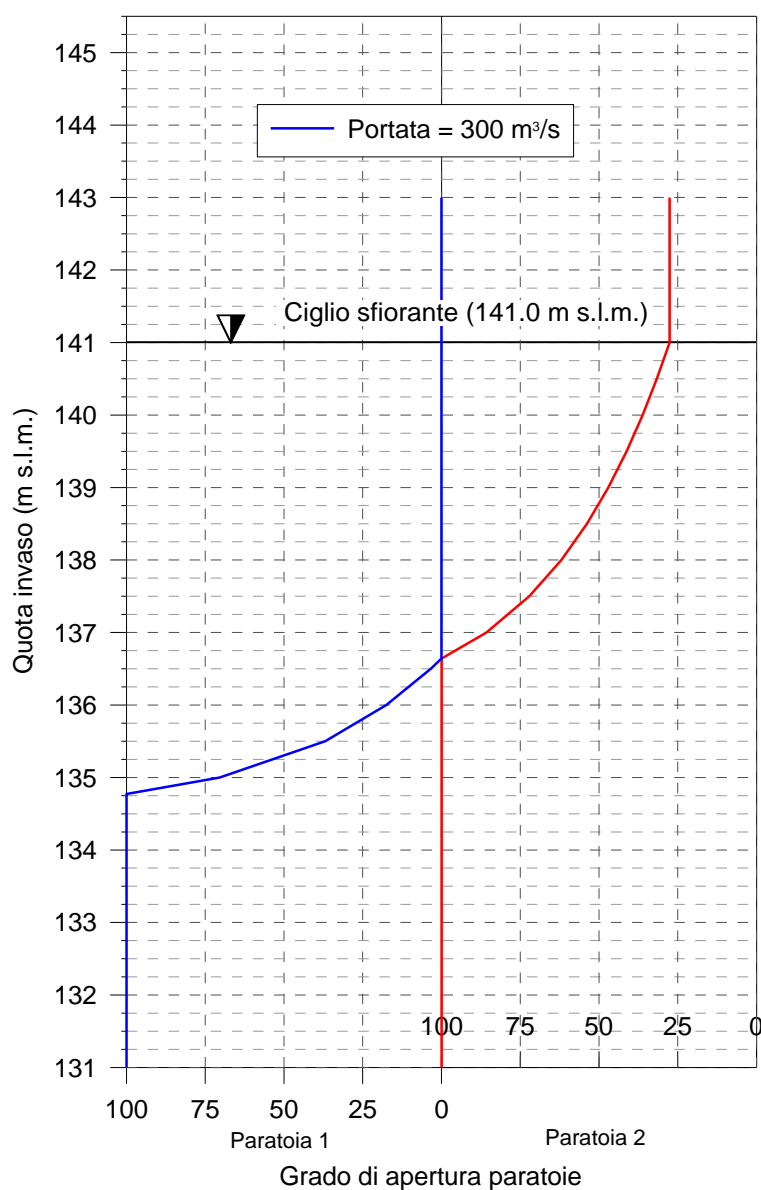
Manovrando, invece, le paratoie in modo da garantire, ove possibile, una portata in uscita non superiore a  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  la cassa si invasa completamente per un evento centenario; lo sfioratore superficiale entra in funzione sia per l'evento di 200 anni di tempo di ritorno che per quello di 500 anni, ma anche in quest'ultimo caso il franco arginale è sempre garantito perché si raggiunge al massimo la quota di 142.16 m s.l.m. (1.16 m al di sopra del ciglio sfiorante).

### **6.2. Manovre per garantire una portata effluente pari a $300 \text{ m}^3/\text{s}$**

Per mantenere in uscita dalla cassa una portata costante, nonostante le variazioni di livello nell'invaso, è necessario manovrare le paratoie in condizioni di piena. Si può ipotizzare di procedere secondo le seguenti modalità: all'inizio dell'evento di piena e fino al raggiungimento del valore di portata stabilito in  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  (per preservare anche la sicurezza idraulica dell'attraversamento di Colorno) le tre paratoie vengono lasciate completamente sollevate. Ciò evita di invasare inutilmente la cassa e di preservarne il volume utile. In una fase successiva si procede alla parzializzazione delle paratoie, una per volta, per mantenere invariata la portata in uscita nonostante l'incremento di livello nell'invaso. Superato il valore di colmo dell'onda di piena in ingresso, cioè in fase calante, si può ipotizzare di mantenere il grado di apertura raggiunto o di sollevare nuovamente tutte le paratoie, se si necessita di uno svuotamento rapido della cassa per

timori di nuovi eventi critici, senza però provocare una portata uscente superiore al limite imposto.

La Figura 6-8 riporta le modalità con cui è possibile parzializzare l'apertura delle luci di fondo agendo sulle paratoie; per rispettare il limite di  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  è sufficiente movimentare, una dopo l'altra, soltanto due paratoie, mentre la terza si mantiene sempre completamente sollevata durante l'intero evento di piena. Per maggiori dettagli si rimanda a [11].



**Figura 6-8 – Grado di apertura delle paratoie in funzione del livello idrico crescente all'interno dell'invaso.**

### 6.3. Effetto di laminazione ed efficienza della cassa nelle due ipotesi di funzionamento

Dai risultati delle elaborazioni precedenti è possibile calcolare il rapporto di laminazione

$$\eta(T) = \frac{Q_{out\ max}(T)}{Q_{in\ max}(T)}$$

in funzione del tempo di ritorno  $T$ .

Si può poi calcolare anche l'efficienza della cassa come:

$$e(T) = 1 - \eta(T)$$

Analizzando il grafico  $T-e$  (Figura 6-9), si nota un'esatta sovrapposizione dell'efficienza per gli eventi di tempo di ritorno di 5 e 10 anni nel caso di paratoie fisse e mobili: la portata massima in uscita è infatti inferiore a  $300\ m^3/s$  e pertanto le paratoie non vengono movimentate. Agendo sulle paratoie e per l'evento di 100 anni, per il quale è stata progettata la cassa, l'efficienza raggiunge il 55%, per poi ridiscendere e assestarsi, per l'evento di 500 anni al 13%, valore inferiore a quello raggiunto senza la movimentazione delle paratoie (27.5%).

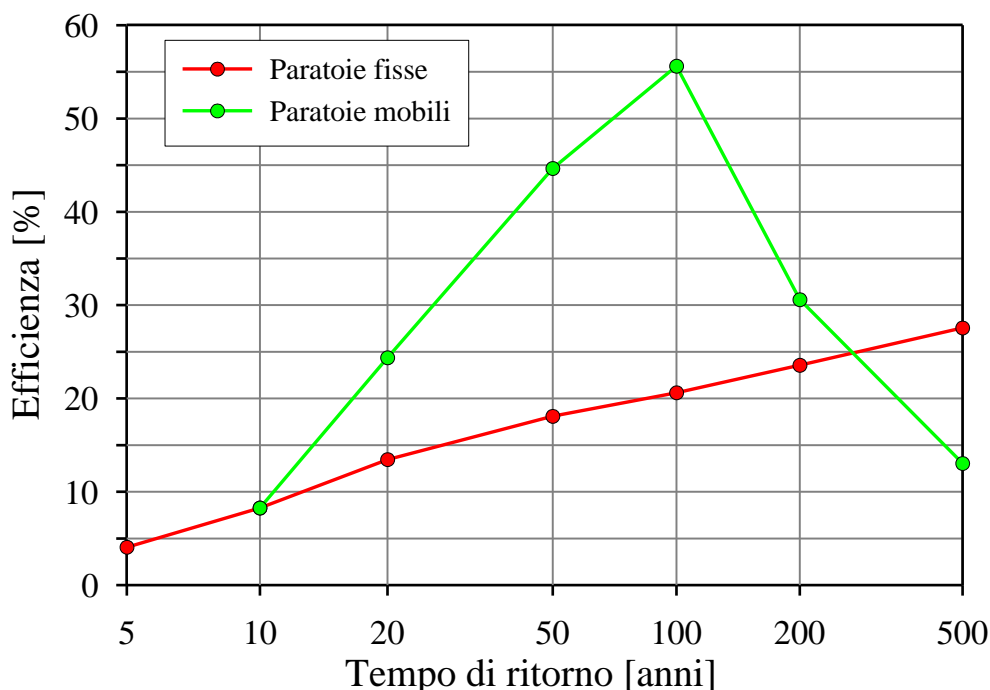


Figura 6-9 – Efficienza della cassa di espansione.

Analogamente, nel diagramma  $T-Q_{max}$  (Figura 6-10), si osserva come il colmo dell'onda di piena di 100 anni di tempo di ritorno venga abbattuto agendo sulle paratoie da un valore di 676 m<sup>3</sup>/s in ingresso a 300 m<sup>3</sup>/s in uscita.

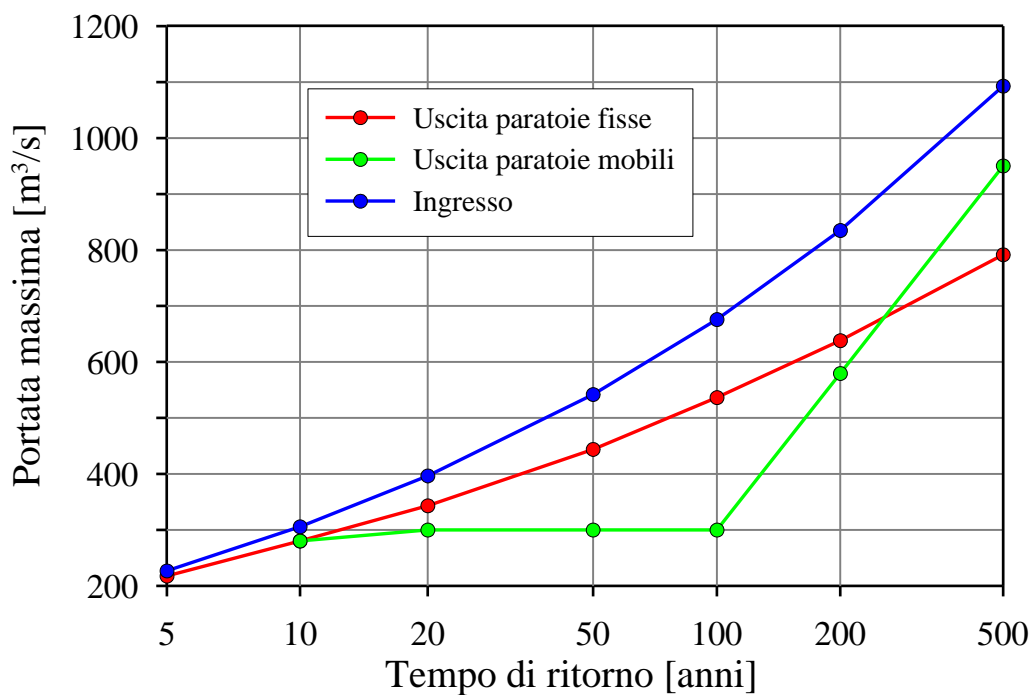


Figura 6-10 – Andamenti delle portate al colmo in ingresso e in uscita.

## **7. SIMULAZIONI BIDIMENSIONALI DEL FUNZIONAMENTO DELLA CASSA DI ESPANSIONE**

Come già anticipato al Capitolo 6 un approccio di tipo statico alla simulazione del funzionamento di una cassa di espansione non è in grado, soprattutto nelle prime fasi di riempimento e nelle ultime fasi di svuotamento, di descrivere il campo di velocità che si viene a creare all'interno della cassa.

Nel presente capitolo il funzionamento della cassa è stato affrontato mediante un modello 2D alle acque basse.

Un modello siffatto richiede la suddivisione del dominio di calcolo in elementi, mediante la costruzione di una opportuna griglia, e la risoluzione delle equazioni bidimensionali alle acque basse mediante un opportuno codice numerico.

Nel presente lavoro la mesh è stata generata con l'utilizzo del programma SMS (Surface-water Modeling System, [13]), mentre i calcoli sono stati effettuati con il codice Basement dell'ETH di Zurigo [14].

Le simulazioni sono state effettuate solo per l'evento di piena di progetto, a causa dell'elevato onere computazionale richiesto per la simulazione.

L'interesse principale si è concentrato sull'osservazione del campo di velocità nelle prime fasi di riempimento e nelle ultime di svuotamento. Quando la cassa risulta molto invasata, infatti, le velocità si riducono a valori molto bassi e l'ipotesi statica, con cui sono state effettuate le simulazioni nel Capitolo 5, diviene del tutto lecita.

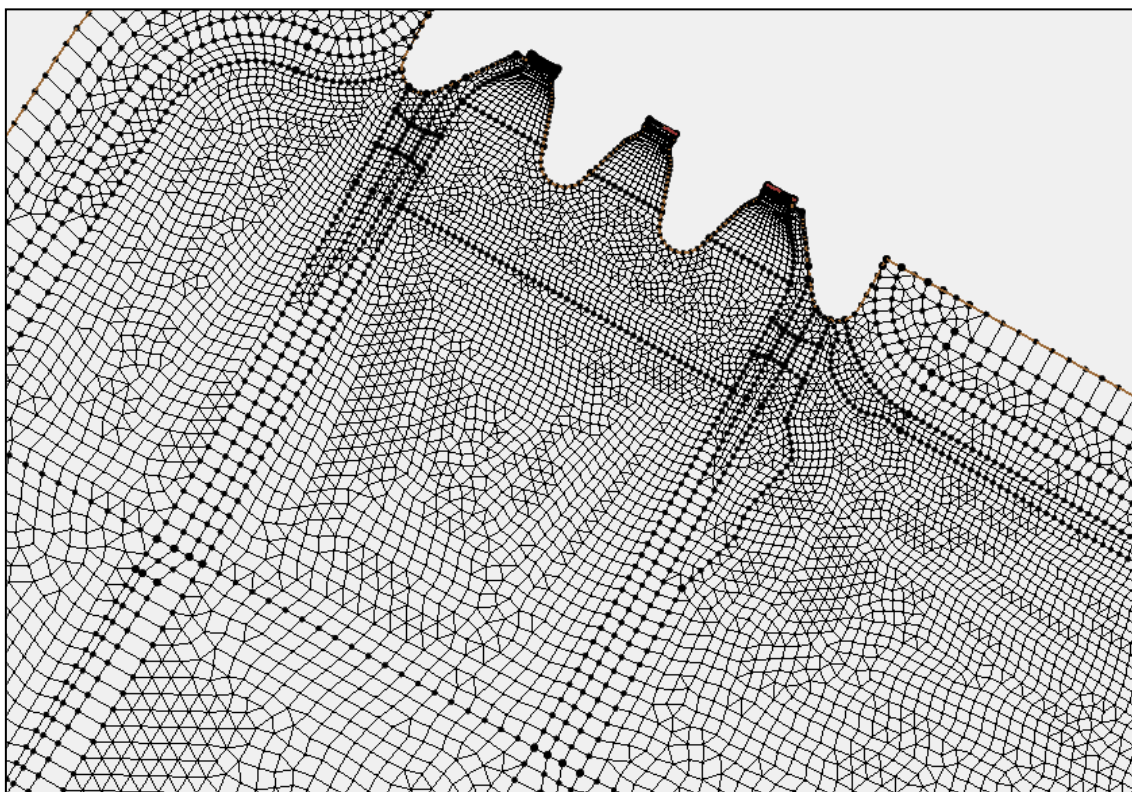
### **7.1. Costruzione della mesh del modello bidimensionale**

La costruzione della griglia di calcolo (mesh) consiste nel discretizzare il dominio in una serie di elementi al fine di poter integrare numericamente, mediante il metodo dei volumi finiti utilizzato dal modello BASEMENT [14], le equazioni alle acque basse in un dominio 2D.

Le dimensioni della mesh sono state ottenute ricercando un compromesso fra una buona accuratezza dei risultati ed un tempo di calcolo ragionevole. Per maggiori dettagli si rimanda a [10].

La mesh è di tipo non strutturato, formata da elementi di forma sia triangolare che quadrilatera, tale da consentire di utilizzare elementi di dimensioni differenti in diverse zone del dominio. Nelle zone più critiche, cioè in prossimità delle bocche e in generale nella zona di valle della cassa di espansione, sono stati utilizzati elementi di dimensioni più piccole, mentre nelle zone golenali e nella parte di monte dell'alveo sono stati utilizzati elementi di dimensione maggiore. La dimensione minima e massima degli elementi utilizzati è pari rispettivamente a 0.65 e 5 m.

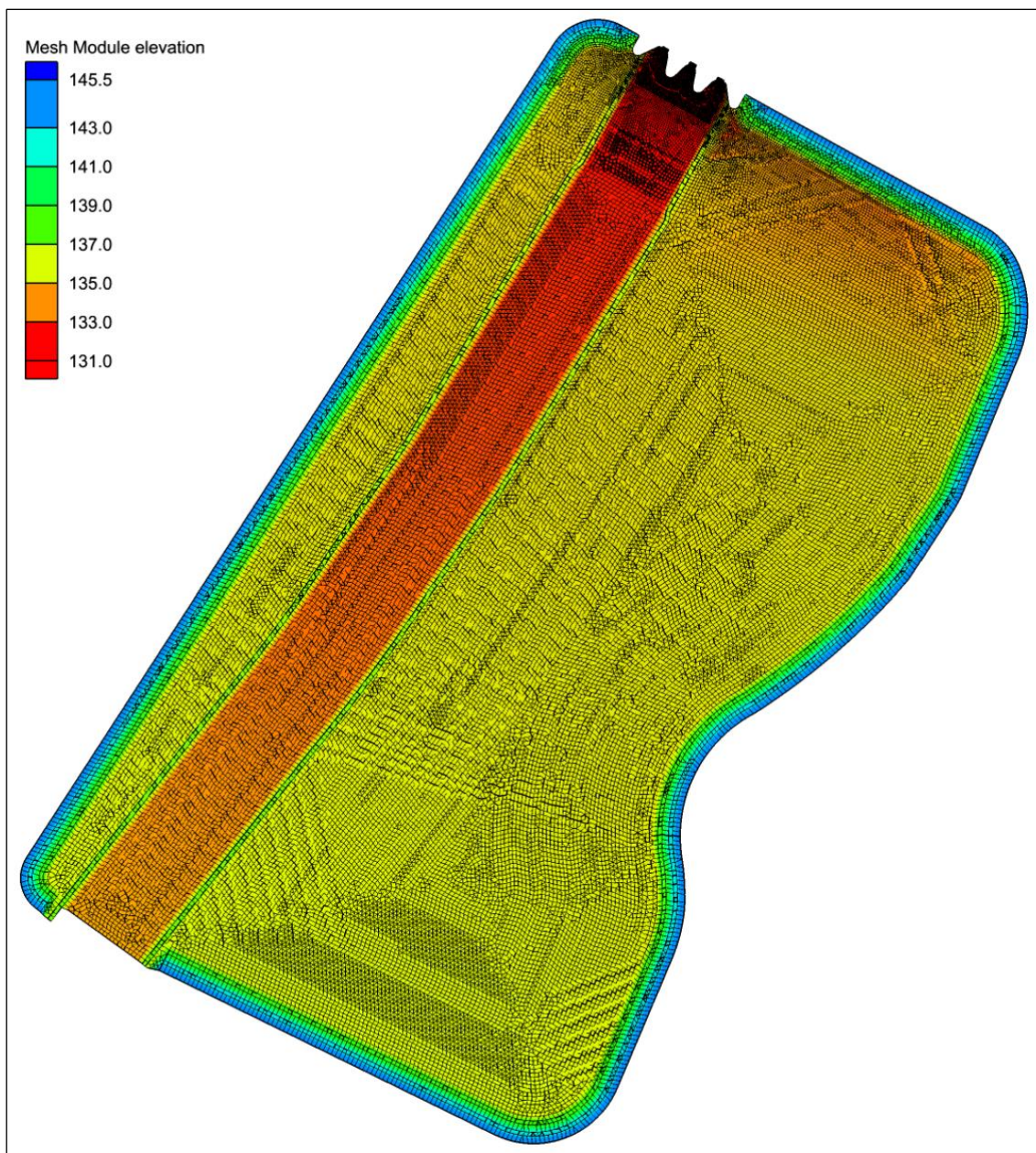
La Figura 7-1 riporta la porzione della griglia di calcolo in prossimità delle bocche. È possibile notare il tentativo di progettare la mesh in modo da orientare gli elementi già nella direzione di quelle che potrebbero essere le linee di flusso della corrente. A tal fine è stata impiegata una mesh di tipo “patch” cioè composta solo da elementi quadrilateri, mentre il tipo “paving”, composto da elementi quadrilateri e triangolari, come è visibile nella parte inferiore di Figura 7-1, è stato riservato a tutta la rimanente porzione della cassa, per la quale non è prevedibile a priori l'andamento del campo di moto, soprattutto nelle fasi iniziali dell'allagamento.



**Figura 7-1 – Mesh di calcolo nella zona di valle dell'invaso.**



In Figura 7-2 è riportata la mesh di calcolo quotata dell'intera cassa, compresi i paramenti interni delle arginature.



**Figura 7-2 – Mesh di calcolo complessiva.**



## 7.2. Simulazioni effettuate.

Allo scopo di raggiungere l'obiettivo preposto, ossia di laminare l'onda di piena con  $T = 100$  anni garantendo una portata massima in uscita di  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ , sono state condotte diverse simulazioni volte a migliorare alcuni aspetti negativi che di volta in volta si presentavano.

Le simulazioni più significative effettuate sono state le seguenti:

1. portata in uscita dal manufatto regolatore con luci totalmente aperte per valori inferiori a  $290 \text{ m}^3/\text{s}$ ; oltre questo valore, mediante opportuna regolazione delle paratoie, la portata uscente cresceva linearmente con il livello idrico nell'invaso fino a raggiungere il valore di  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  alla quota di sfioro (141 m s.l.m.);
2. come nel caso 1), ma con predisposizione di un arginello continuo lungo l'alveo di magra, volto a contenere entro l'alveo le portate inferiori a quella di inizio regolazione, per non invasare precocemente (ed inutilmente) la cassa;
3. come nel caso 2), ma con una finestratura negli arginelli in prossimità del manufatto, della lunghezza di 4 m, che permetta lo svuotamento completo della cassa, ma allo stesso tempo sia abbastanza contenuta da impedire il precoce riempimento della cassa nella fase iniziale dell'allagamento

Per tutte le simulazioni si è adottata, come condizione iniziale, quella di cassa completamente vuota.

Come condizione al contorno di monte si è adottata l'onda di piena sintetica con  $T=100$  anni, mentre la condizione di valle corrisponde sostanzialmente alla scala riportata in Figura 5-9, con l'unica differenza consistente nel fatto che la portata non si mantiene esattamente costante a  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  nella fase di regolazione delle paratoie ma, per ragioni di calcolo, varia da 290 a  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Nel paragrafo seguente sono riportati i principali risultati ottenuti per la simulazione n.3, visto che le prime due si possono considerare propedeutiche a quest'ultima. Per maggiori dettagli si rimanda a [10].

### 7.3. Risultati della simulazione n.3

La Figura 7-3 riporta l'andamento delle quote idriche in un punto in vicinanza del manufatto, confrontata con quella ottenuta con le simulazioni statiche. Si osserva che le due simulazioni portano a risultati sostanzialmente coincidenti quando la cassa è molto invasata, mentre per livelli idrici modesti le differenze sono apprezzabili. La quota idrica massima ottenuta mediante la modellazione 2D (140.98 m s.l.m.) raggiunge praticamente quella corrispondente al ciglio sfiorante (141.00 m s.l.m.) senza che esso entri in funzione. Si conferma pertanto il corretto dimensionamento del volume assegnato alla cassa per un evento di piena sintetico con tempo di ritorno  $T=100$  anni.

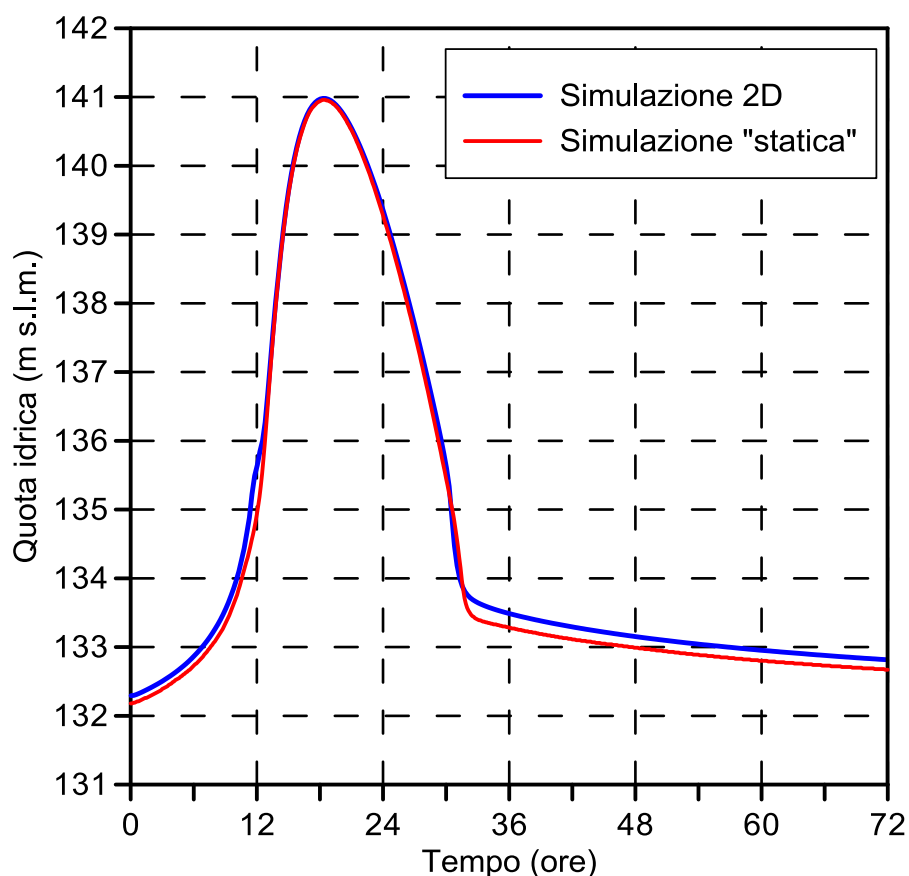


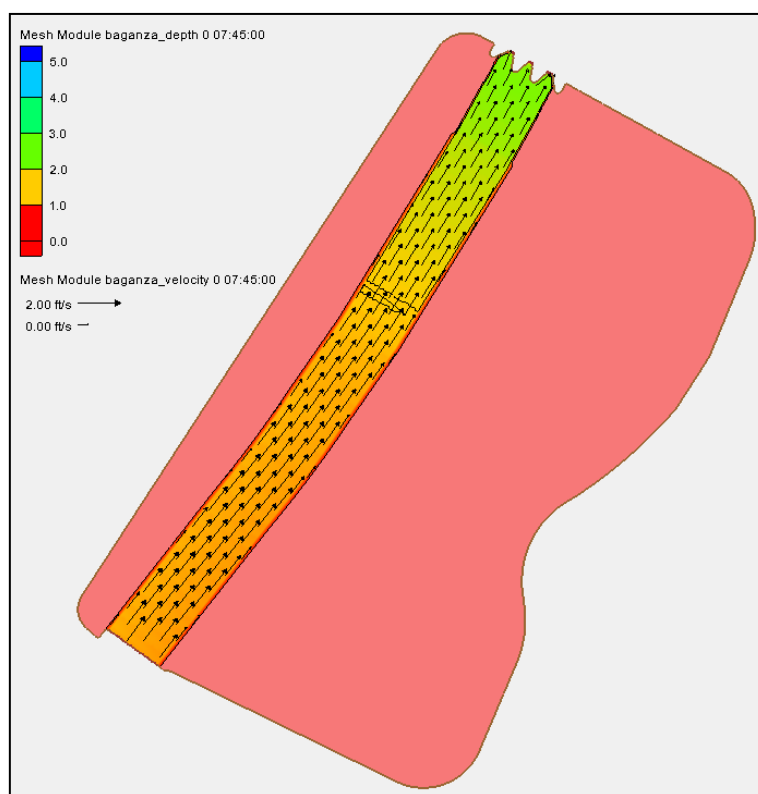
Figura 7-3 – Andamento nel tempo della quota idrica nelle vicinanze del manufatto.

La Figura 7-4 riporta le profondità idriche ed il campo di velocità all'istante  $t=7h45'$ . La portata entrante è pari a  $94 \text{ m}^3/\text{s}$  e si può notare che, nonostante l'effetto di rigurgito operato dal manufatto la corrente è ancora tutta contenuta nell'alveo di magra.

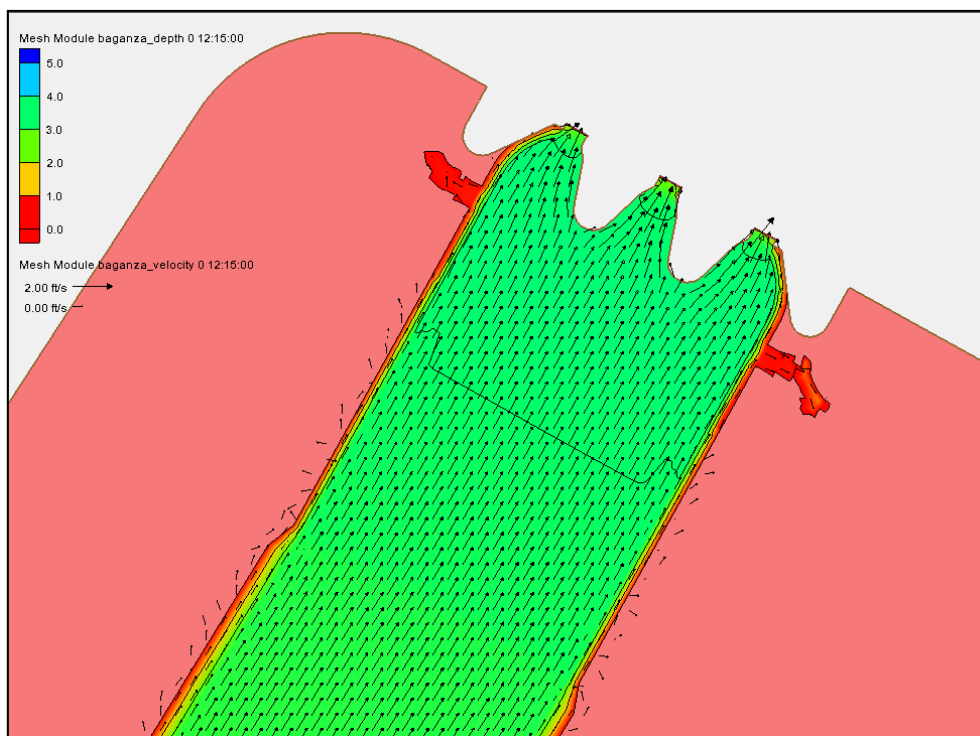
La Figura 7-5 riporta un dettaglio delle profondità idriche e del campo di velocità in vicinanza del manufatto all'istante  $t=12h15'$  in cui l'acqua inizia ad allagare la cassa dalle finestre dell'arginello. La portata entrante in questo istante è pari a  $218 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Al tempo  $t=13h15'$  (Figura 7-6) la portata entrante comincia a superare i  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  e la cassa inizia a laminare utilmente l'onda di piena, riempiendosi gradualmente da valle.

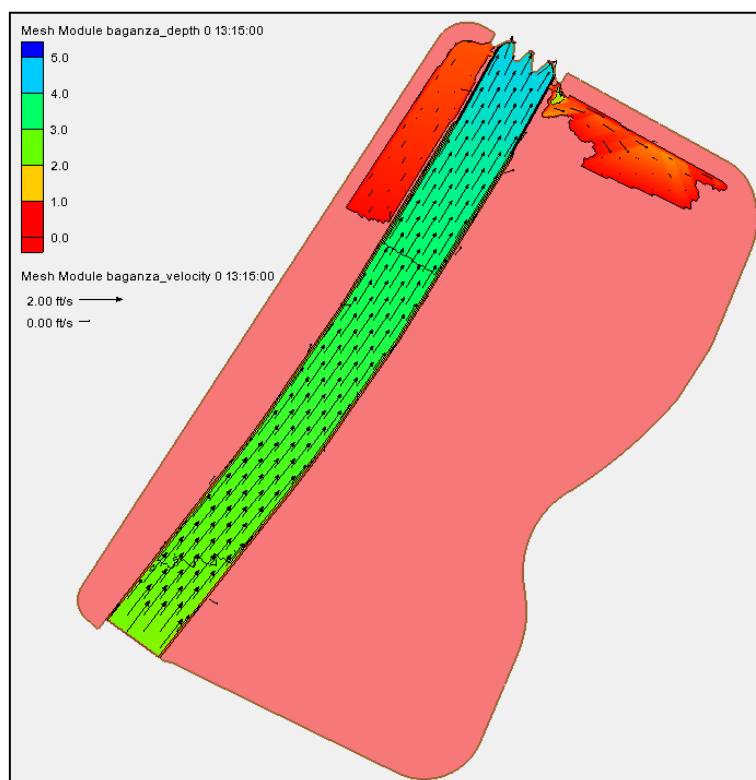
In Figura 7-7 è riportata la mappa delle quote idriche e delle velocità nella cassa al tempo  $t=15h00'$ , corrispondente all'ingresso della massima portata pari a  $676 \text{ m}^3/\text{s}$ . L'allagamento è ormai quasi statico; sono presenti, ancora, velocità dell'ordine di  $2 \text{ m/s}$  solo nella zona dell'alveo prossima alla condizione alle briglie di monte, che si riducono fino a risultare quasi nulle nella zona invasata in destra idraulica.



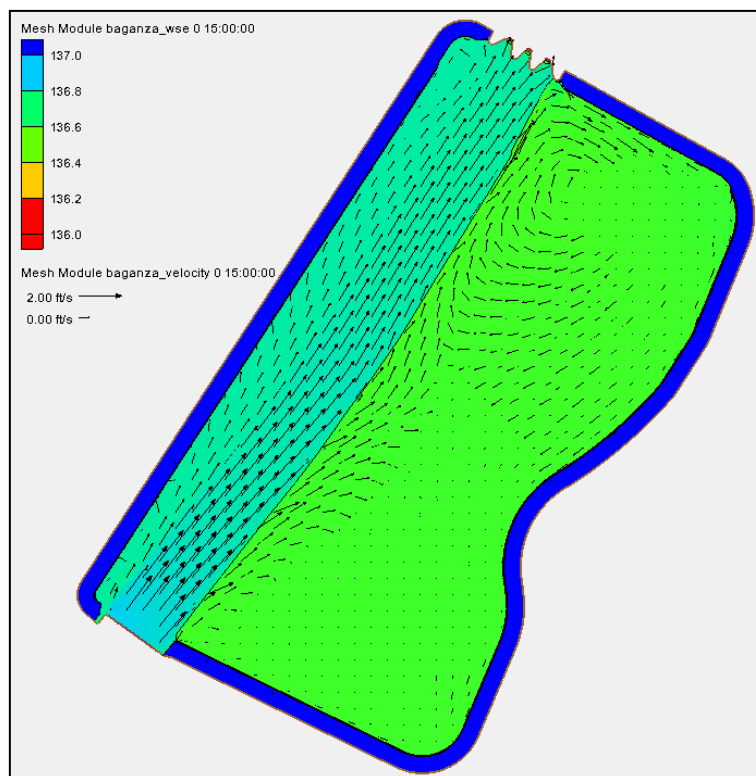
**Figura 7-4 – Profondità idriche e campo di velocità al tempo  $t=7h15'$ .**



**Figura 7-5 – Profondità idriche e campo di velocità in prossimità del manufatto al tempo  $t=12h15'$ .**



**Figura 7-6 – Profondità idriche e campo di velocità al tempo  $t=13h15'$ .**

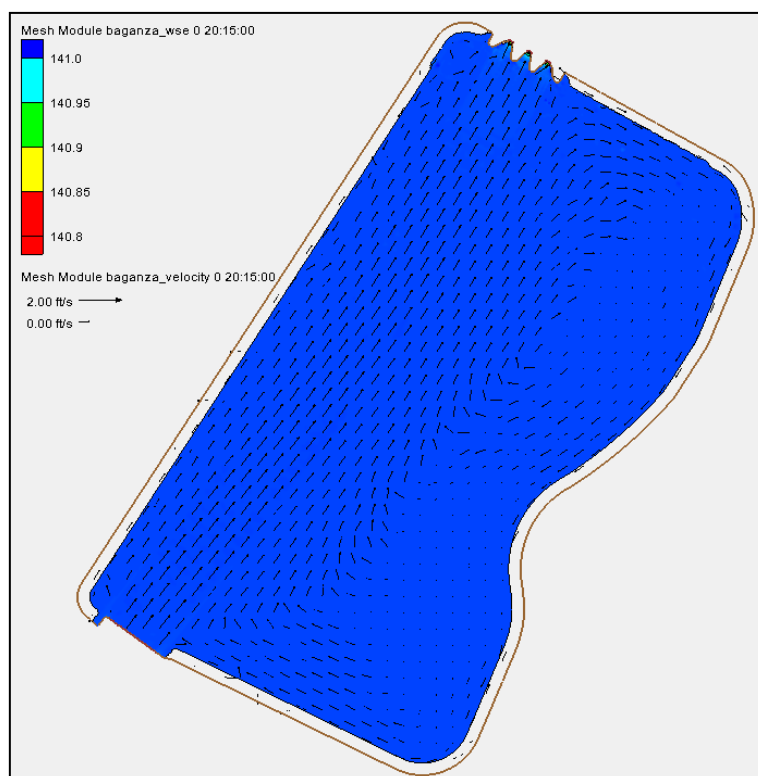


**Figura 7-7 – Quote idriche e campo di velocità al tempo  $t=15h00'$ , corrispondente alla massima portata in ingresso.**

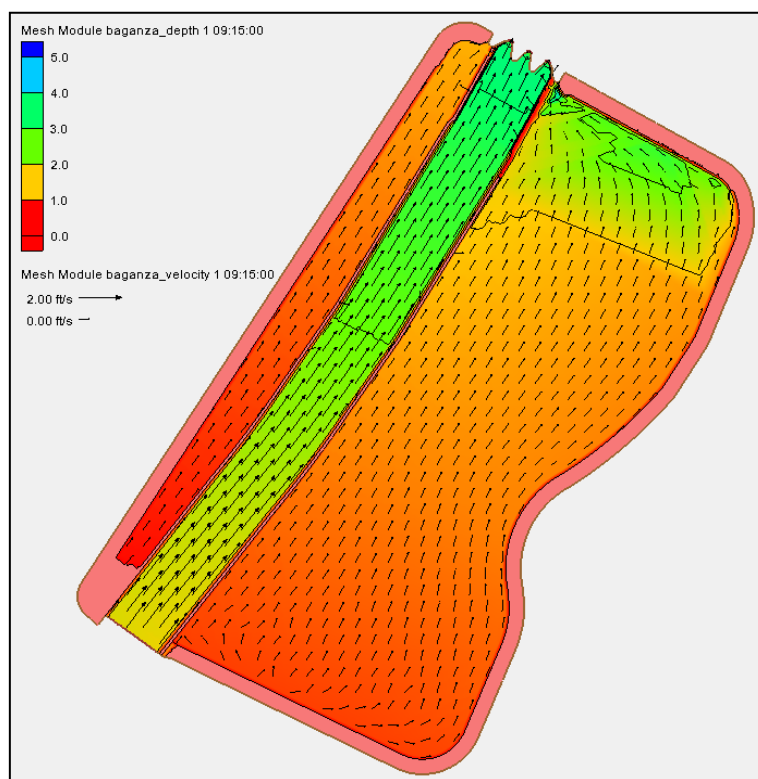
In Figura 7-8 è riportata la mappa delle quote idriche e delle velocità nella cassa al tempo  $t=20h15'$ , corrispondente alla massima quota idrica (140.98 m s.l.m.) e alla massima portata uscente ( $300 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Si può notare come la cassa sia completamente allagata ed abbia assunto le sembianze di un vero e proprio bacino statico, con velocità ovunque minori di  $0.4 \text{ m/s}$ .

La Figura 7-9 si riferisce alla fase di svuotamento della cassa, al tempo  $t=43h15'$  dall'inizio dell'evento, con una portata entrante pari a  $127 \text{ m}^3/\text{s}$ . Si osserva che la parte di monte della zona in sinistra idraulica è ormai asciutta.

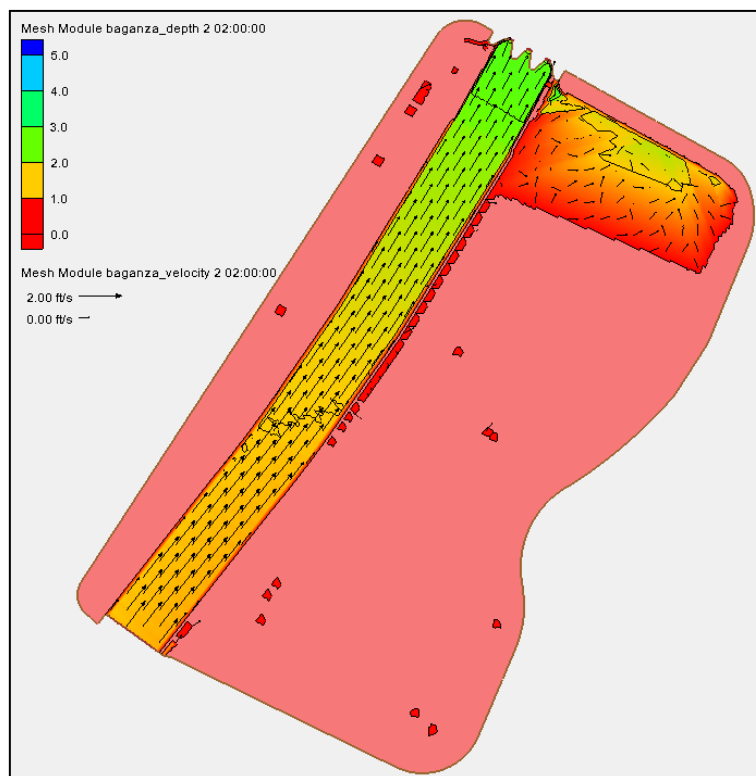
In Figura 7-10 si riportano infine le profondità idriche ed il campo di velocità all'istante  $t=50h00'$ , in cui si può considerare concluso lo svuotamento della cassa. Nella parte di valle della zona in destra idraulica è ancora presente un modesto volume idrico in quanto le quote del terreno sono ivi leggermente più depresse della soglia sfiorante della finestratura. Questi volumi, peraltro modesti, non possono che svuotarsi lentamente per infiltrazione.



**Figura 7-8 – Quote idriche e campo di velocità al tempo  $t=20h15'$ , corrispondente al massimo livello di invaso.**



**Figura 7-9 – Profondità idriche e campo di velocità al tempo  $t=43h15'$ , durante la fase di svuotamento della cassa.**



**Figura 7-10 – Quote idriche e campo di velocità al tempo  $t=50h00'$ , durante la fase finale di svuotamento della cassa.**

È stata infine eseguita un'analisi delle velocità della corrente nelle zone critiche, cioè sugli arginelli e al piede degli argini maestri.

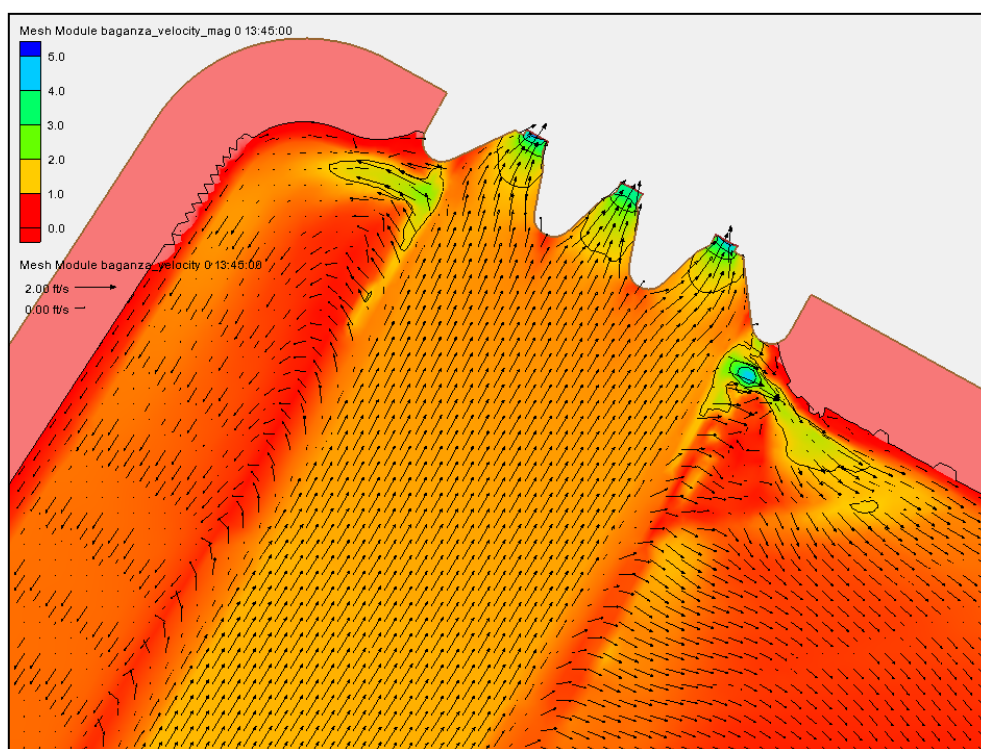
Le velocità più elevate della corrente si registrano in prossimità degli arginelli nella zona di valle, dove ha inizio il riempimento della cassa. Durante l'inizio del riempimento ( $t=3h45'$ ) si raggiungono i 4 m/s a valle della finestratura di destra (Figura 7-11). Tali valori sono i massimi registrati, se si escludono quelli in corrispondenza delle bocche. Essi si mantengono però solo per pochi minuti, fintantoché i livelli raggiunti nella zona destra non provocano un rigurgito in corrispondenza della finestratura, che limita la portata uscente e le corrispondenti velocità. Nella finestratura di sinistra si raggiungono valori massimi di poco superiori ai 2 m/s; infatti la zona sinistra, essendo molto più piccola, si riempie quasi subito, rigurgitando la finestratura e riducendo le velocità.

Col proseguire del riempimento ed il sormonto dell'arginello di destra le velocità della corrente raggiungono valori dell'ordine di 3 m/s, al tempo  $t=14h15'$ , fino ad una distanza di 80 m dal manufatto (Figura 7-12).

È consigliabile pertanto prevedere un idoneo rivestimento con massi ciclopici dell'argine destro, almeno negli ultimi 100 metri a ridosso del manufatto.

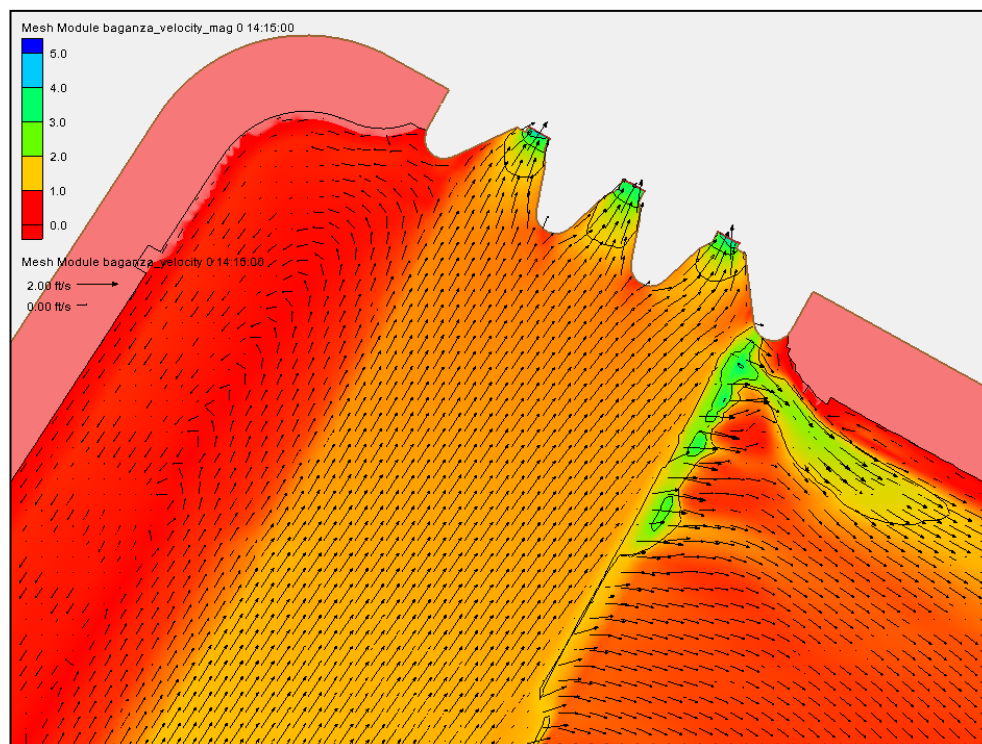
Le velocità al piede degli argini maestri sono basse, mantenendosi sempre al di sotto di 1 m/s, come si può osservare nelle Figure Figura 7-11 e Figura 7-12 precedenti.

Durante la fase di svuotamento, nelle zone critiche analizzate sopra, si registrano valori di velocità della corrente più contenuti. Le velocità massime si registrano ancora in corrispondenza della finestratura di destra, con valori dell'ordine di 2.5 m/s (Figura 7-13), al tempo di 32h45', nella fase finale di svuotamento della cassa.

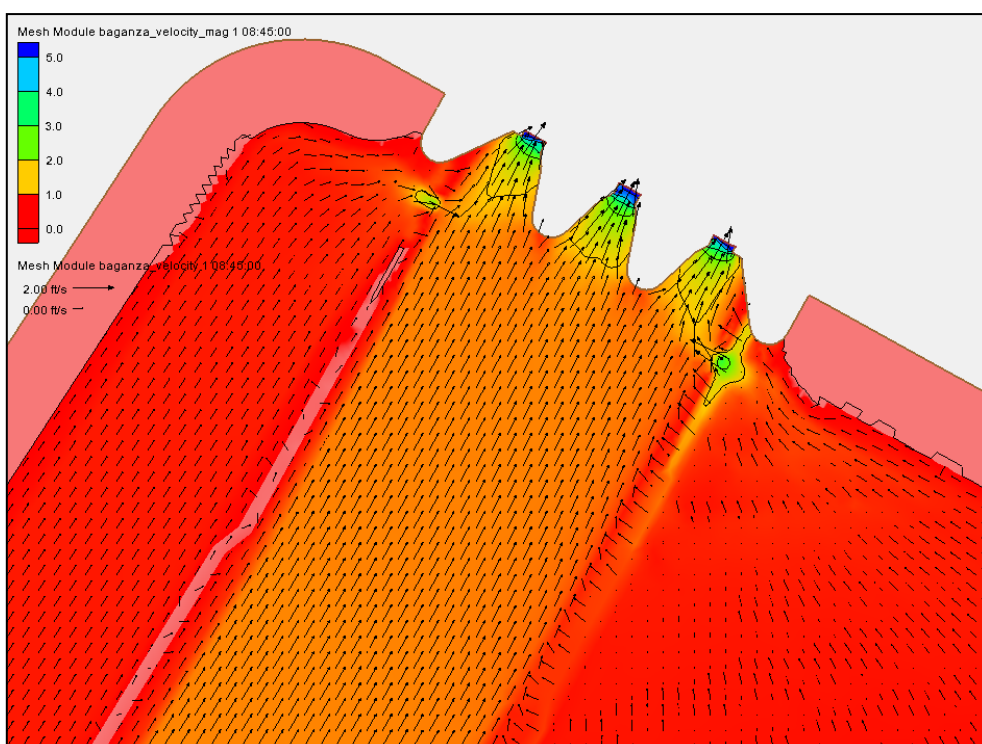


**Figura 7-11 – Particolare della mappa del modulo delle velocità e campo di moto in corrispondenza della finestratura sull'arginello in destra idraulica al tempo  $t=13h45'$ , durante la fase di riempimento della cassa.**





**Figura 7-12 – Particolare della mappa del modulo delle velocità e campo di moto in corrispondenza della finestrazione sull'arginello in destra idraulica al tempo  $t=14h45'$ , durante la fase di riempimento della cassa.**



**Figura 7-13 – Particolare della mappa del modulo delle velocità e campo di moto in corrispondenza della finestrazione sull'arginello in destra idraulica al tempo  $t=32h45'$ , durante la fase di svuotamento della cassa.**

## 8. CONCLUSIONI

Nel seguito si riassumono i principali risultati ottenuti nel presente studio.

Nel Capitolo 2 si è proceduto all'aggiornamento dell'analisi idrologica delle portate al colmo del torrente Baganza a Ponte Nuovo effettuata dagli scriventi nello studio [1] del 2003. L'integrazione della serie storica ha portato ad una riduzione delle portate al colmo di assegnato tempo di ritorno, rispetto a quelle ottenute nello studio citato. In particolare la portata al colmo dell'evento centenario si riduce da 676 a 625 m<sup>3</sup>/s, ovvero di circa il 7.5 %. Nel prosieguo del presente studio si è però ritenuto, a favore di sicurezza, di mantenere i valori precedenti.

Nel Capitolo 3 si sono riportate le principali caratteristiche del progetto preliminare effettuato nel 2004 dal Servizio Tecnico Bacini Taro-Parma della Regione Emilia-Romagna. La cassa progettata nello studio citato (Figura 3-1) era sostanzialmente diversa da quella proposta nel presente studio, anche a causa dei diversi obiettivi di partenza: messa in sicurezza dell'asta del torrente Baganza e dell'attraversamento della città di Parma, nel primo studio; messa in sicurezza anche dell'asta del torrente Parma a valle della città medesima e del nodo critico di Colorno, nello presente studio.

Nel Capitolo 4 è stata effettuata la revisione dell'analisi idraulica del sistema Parma-Baganza. In sintesi si è verificato che è possibile, mediante un intervento di allargamento della luce del ponte della ferrovia Parma-Brescia e di ricalibratura dell'alveo del torrente Parma a Colorno (Figura 4-3 e Figura 4-4), consentire a Colorno il transito della portata di 600 m<sup>3</sup>/s, anche per livelli di Po piuttosto elevati (Figura 4-5). Pertanto l'obiettivo della realizzazione della cassa di espansione sul torrente Baganza, assieme alla già esistente cassa sul torrente Parma, è di limitare la portata, per l'evento di progetto ed a valle della confluenza, al valore citato. L'analisi del funzionamento dell'esistente cassa sul torrente Parma ha dimostrato che è possibile limitare, per l'evento di progetto e con opportune manovre sulle paratoie, la portata uscente dal manufatto regolatore a 300 m<sup>3</sup>/s (Figura 4-7). La medesima portata dovrà essere allora esitata anche dalla cassa sul torrente Baganza. Un'analisi preliminare ha portato a valutare il volume di quest'ultima in 4.7·10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (Figura 4-8).

Nel Capitolo 5 è stata individuata la collocazione sul territorio della cassa di espansione, individuate le principali caratteristiche dimensionali delle arginature e del manufatto di

regolazione. In sintesi gli elementi caratteristici dell'invaso della cassa di espansione sono i seguenti (Figura 5-5):

- il volume utile della cassa è, come anticipato, pari a  $4.7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ , dei quali  $3.2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  ottenuti mediante scavo e  $1.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  in elevazione;
- l'imbocco della cassa avviene mediante tre briglie, che complessivamente generano un dislivello di 12 m;
- l'alveo sistemato del torrente Baganza ha una quota di monte, al piede dell'ultima briglia, di 133.5 m s.l.m. e una di valle, al piede dello sbarramento, di 131 m s.l.m., con una pendenza media del 0.2 % e larghezza di 100 m;
- il fondo della cassa presenta una quota di monte di 135 m s.l.m. e una quota di valle di 134 m s.l.m.;
- il manufatto di regolazione (Figura 5-3 e Figura 5-4) presenta il coronamento a quota 141 m s.l.m. ed uno sviluppo trasversale all'alveo di circa 129 m. Fissato un carico di progetto pari a 2 m, ne consegue una lunghezza del ciglio sfiorante di circa 250 m, ottenuta mediante l'adozione di un profilo sagomato secondo quattro becchi d'anatra. Il manufatto presenta tre luci di fondo, di dimensioni  $8 \times 3 \text{ (L} \times \text{H)}$  presidiate da paratoie piane regolabili in condizioni di piena;
- gli argini perimetrali hanno il coronamento di 145.5 m s.l.m. Essi si elevano rispetto al piano campagna a valle, posto a quota 131.5 m s.l.m., di circa 14 m; l'elevazione si riduce progressivamente verso monte, fino ad azzerarsi ove il piano campagna medesimo raggiunge la quota di 145.5 m s.l.m. Procedendo ulteriormente verso monte la cassa non è più arginata ed il volume a disposizione si ottiene solo mediante scavo. Le arginature presentano una lunghezza lineare complessiva di circa 2200 m e, per la loro realizzazione, è richiesto un volume di materiale di circa  $545 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ .

Nel Capitolo 6 sono state effettuate una serie di simulazioni statiche della cassa al fine di individuarne l'efficienza, al variare del tempo di ritorno (Figura 6-9) e fornire indicazioni sulla manovra delle paratoie (Figura 6-8) atta a consentire il mantenimento di una portata in uscita costante, pari al valore di progetto ( $300 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Nel Capitolo 7 è stata effettuata, infine, una simulazione del funzionamento della cassa mediante modello bidimensionale, al fine di valutare il campo di velocità nelle fasi iniziali di riempimento e finali di svuotamento. L'analisi ha permesso di individuare alcuni utili accorgimenti volti a migliorare il funzionamento della cassa.

## 9. BIBLIOGRAFIA

- [1] DICATeA-RER Servizio Provinciale Difesa del Suolo Risorse Idriche e Forestali (2003) “Studio della messa in sicurezza del territorio parmense, con particolare riferimento alla realizzazione della cassa di espansione sul Torrente Baganza- Relazione Idrologica”.
- [2] DICATeA-RER Servizio Provinciale Difesa del Suolo Risorse Idriche e Forestali (2003) “Studio della messa in sicurezza del territorio parmense, con particolare riferimento alla realizzazione della cassa di espansione sul Torrente Baganza- Relazione Idraulica”.
- [3] NERC (National Environmental Research Council) (1975), Flood Studies Report, v.1, London.
- [4] Bacchi B., Brath A., Kottegoda N.T. (1992). Analysis of the Relationships Between Flood Peaks and Flood Volumes Based on Crossing Properties of River Flow Processes, Water Resources Research, 28(10), p. 2773-2782.
- [5] Studio Maione Ingegneri associati- RER Servizio Tecnico bacini Taro-Parma (2004) “Cassa di laminazione sul T. Baganza nei comuni di Collecchio, Parma e Sala Baganza”.
- [6] DICATeA-AIPo (2012) “Modellazione 2D del tratto del torrente Parma: da Colorno alla confluenza in Po, con possibili scenari di sistemazione; da Parma a Colorno, con possibili interventi volti a migliorare l’effetto di laminazione”.
- [7] Caravita L. (2011): “Modellazione matematica bidimensionale del torrente Parma tra la città e Colorno”, tesi di laurea magistrale, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Parma.
- [8] Ferri R. (2011) “Valutazione della portata compatibile del torrente Parma a Colorno: situazione attuale e possibili interventi di ricalibratura dell’alveo”, tesi di laurea magistrale, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Parma.

- [9] Alberini A. (2011) “Dimensionamento e simulazioni numeriche del manufatto di regolazione della cassa di espansione sul torrente Baganza”, tesi di laurea magistrale, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Parma.
- [10] Forni A. (2011) “Dimensionamento e simulazioni numeriche 2D della cassa di espansione sul torrente Baganza”, tesi di laurea magistrale, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Parma.
- [11] Ferrari A. (2011) “Cassa di espansione sul torrente Baganza: valutazione dell’efficienza in assenza e in presenza di manovre sulle paratoie”, tesi di laurea, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Parma.
- [12] Surfer Version 9.1.352 – Apr 8 2009, Surface Mapping System, Copyright © 1993-2009, Golden Software, Inc.
- [13] SMS 11.0.00, Surface-Water Modeling System, Copyright 2011, Aquaveo LLC, All Rights Reserved.
- [14] ETH Zurich, VAW “BASEMENT, Basic Simulation Environment For Computation Of Environmental Flow And Natural Hazard Simulations”, Copyright © 2006-2011, Faeh R., Mueller R., Rousselot P., Veprék R., Vetsch D., Volz C., Vonwiller L., Farshi D.