PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA

DECRETO N. 1/CSDDI DEL 30/03/2018 DEL COMMISSARIO STRAORDINARIO DELEGATO PER GLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO DELLA REGIONE MARCHE

Committente: CONSORZIO DI BONIFICA DELLE MARCHE
Via L. Guidi, 30
61121 Pesaro (PU)
C.F. 92049990416 - P.IVA 02532390412

Progettisti	Prof. Ing. Armando Brath Dott. Geol. Federico Biagiotti
Soggetto Attuatore Presidente Consorzio di Bonifica delle Marche	Avv. Claudio Netti
R.U.P.	Geom. Marco Del Prete

COMUNE DI PESARO (PU)

REALIZZAZIONE CASSE DI ESPANSIONE SUL FIUME FOGLIA A DIFESA DEL CENTRO URBANO DI PESARO - 1° STRALCIO

CODICE ISPRA 11IR209/G1 - CODICE CONSORZIO D1.A1.P008
CUP B79H18000430002 - CIG ZEE32385DF5

ELABORATO

R.02

Oggetto dell'elaborato:

Relazione idrologica e idraulica

TIMBRO CONCESSIONE E/O AUTORIZZAZIONE

VISTO

PROTOCOLLO

REALIZZAZIONE CASSE DI ESPANSIONE SUL FIUME FOGLIA A DIFESA DEL CENTRO URBANO DI PESARO - 1° STRALCIO



RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA

Prof. Ing. Armando Brath
Ordinario di Costruzioni Idrauliche, Marittime e Idrologia
Università di Bologna

Dott. Geol. Federico Biagiotti

Settembre 2018

Prof. Ing. Armando Brath
Studio di Ingegneria Civile e Ambientale
Via Spataro, 1 - 40134 Bologna
Sede operativa:
Via Bellinzona, 4 - 40135 Bologna
Tel. 051 - 6153945

Dott. Geol. Federico Biagiotti
Studio associato Consulenza & Progetto
Via Montello, 4 - 61121 Pesaro
Tel. 0721 - 32068

Collaborazioni:
Dott. Ing. Luca Grimaldi
Dott. Geol. Donato Mengarelli

INDICE

1. PREMESSA 5
2. QUADRO DELLE CONOSCENZE PREGRESSE 7
3. DEFINIZIONE DELLA SOLLECITAZIONE IDROLOGICA DI PROGETTO 13
4. RICALIBRAZIONE DEL MODELLO IDRAULICO-MATEMATICO 15
5. VERIFICA E OTTIMIZZAZIONE DEL FUNZIONAMENTO IDRAULICO DELLE CASSE 20
6. CONCLUSIONI 39

1. PREMESSA

Il problema del miglioramento del livello di sicurezza idraulica del territorio in relazione al verificarsi di piene del fiume Foglia è da tempo oggetto di specifica attenzione da parte delle Amministrazioni competenti, in particolare modo in riferimento alla sicurezza idraulica della città di Pesaro. Numerose circostanze hanno infatti ormai chiaramente evidenziato la presenza di un elevato livello di rischio idraulico, come mostrato da un lato dai risultati degli studi di pianificazione di bacino condotti fino a questo momento e dall'altro, con ancora maggiore evidenza, dalla sequenza di eventi alluvionali che hanno recentemente interessato il corso d'acqua.

Il fiume Foglia è stato infatti interessato da diversi eventi alluvionali recenti che, pur in un quadro di sostanziale tenuta complessiva del sistema difensivo, hanno evidenziato diffuse situazioni di criticità idraulica; importanti piene si sono avute infatti negli anni 2005, 2011, 2013 e 2015. La ricorrenza con cui si sono manifestati questi eventi di piena e il fatto che, per quanto si può desumere dal quadro pur frammentario dell'informazione idrologica disponibile, essi non fossero caratterizzati intensità idrologica (ovvero pericolosità idraulica) particolarmente elevata, ha destato particolare preoccupazione, suscitando la consapevolezza che il verificarsi di un evento caratterizzato da tempo di ritorno più elevato, ma sempre nell'ordine di quelli che vengono comunemente considerati nella pianificazione di bacino, non potrebbe essere efficacemente fronteggiato dal sistema difensivo attuale e potrebbe quindi produrre conseguenze rilevanti sul territorio.

Stante l'acquisita consapevolezza delle problematiche di cui sopra, nell'Accordo di Programma tra il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM) e la Regione Marche sottoscritto il 25 novembre 2010 e sue integrazioni successive, è stato individuato fra gli interventi da finanziare la realizzazione di casse di espansione a difesa del centro urbano di Pesaro. Il Commissario Straordinario delegato per gli interventi di mitigazione del rischio idrogeologico della Regione Marche, con Decreto n. 1/CSDDI del 30/03/2018, ha individuato il Consorzio di Bonifica delle Marche quale soggetto attuatore per l'espletamento delle attività relative agli interventi di mitigazione del rischio idrogeologico di cui a detto accordo di programma.

Il presente Progetto di fattibilità tecnico-economica, affidato agli scriventi professionisti, rappresenta il primo passo progettuale per la realizzazione di detti interventi di laminazione delle piene.

2. QUADRO DELLE CONOSCENZE PREGRESSE

Il quadro conoscitivo sulla situazione di rischio idraulico del territorio attraversato dal fiume Foglia, disponibile all'epoca della redazione del presente progetto, si presenta piuttosto frammentario. Gli studi idrologico-idraulici e i progetti esistenti sono numerosi ma manca un quadro di insieme coerente e condiviso.

I progetti elaborati riguardano infatti interventi puntuali, in sé sicuramente significativi, ma previsti in assenza di un quadro progettuale di insieme che tenga nel debito conto lo stato complessivo del corso d'acqua e l'articolazione funzionale dei diversi interventi lungo l'asta. Per quanto riguarda invece gli studi idrologico-idraulici disponibili sul fiume Foglia, un'analisi, ancorché preliminare, dei numerosi esistenti fa emergere con chiarezza la necessità di una profonda revisione sia del quadro dell'idrologia di piena (determinazione delle portate di assegnato tempo di ritorno e delle relative onde di piena), che allo stato appare frammentario e per alcuni aspetti anche contraddittorio, sia di quello dell'idraulica di piena, che ha portato alla determinazione di profili di deflusso delle piene spesso basati su caratterizzazioni topografiche della geometria d'alveo incomplete o ormai datate e su schemi di calcolo idraulico migliorabili.

Prima di entrare nel dettaglio delle analisi idrologico-idrauliche effettuate, si vuole qui brevemente fornire qualche elemento di informazione, al fine di documentare quanto sopra affermato. Per esigenze di brevità, ci si riferisce al solo quadro delle portate di progetto, al fine di evidenziare la notevole difformità esistente tra le stime delle portate di assegnata frequenza probabile prodotte nei numerosi studi esistenti.

Si premette che l'informazione idrometrica storica sul fiume Foglia, disponibile al giorno d'oggi, è piuttosto carente; si dispone infatti di informazioni storiche continuative per la sola stazione di Montecchio, gestita dall'ex Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale. La sezione di Montecchio è posta a circa 20 km dalla foce a mare e sottende un bacino di 603 kmq; essa ha funzionato nel periodo 1937-1984 (con interruzioni in alcuni anni). Considerando anche i dati non ufficialmente pubblicati (essenzialmente quelli successivi al 1970), la serie storica è composta di 43 anni di osservazioni. L'evento storico di massimo rilievo documentato è quello del settembre 1955, quando la portata misurata a Montecchio raggiunse, al colmo di piena, il valore di 805 mc/s. Va menzionato però che la serie storica di Montecchio è in qualche modo influenzata dalla presenza dall'effetto di laminazione esercitato dalla diga di Mercatale, completata nell'anno 1961, che sottende un bacino imbrifero di circa 227 kmq.

In epoca abbastanza recente (inizio misure di portata: anno 2005), è stata installata una nuova stazione idrometrica in località Montelabbate, circa 2 km a valle di Montecchio, che sottende un bacino imbrifero di 613 kmq.

Si dispone, come detto, di diversi studi, nell'ambito dei quali risulta essere stata effettuata la stima della portata al colmo di piena di assegnato tempo di ritorno per la sezione di Montecchio e/o per altre sezioni di interesse lungo lo sviluppo del corso d'acqua.

Nel seguito si svolge qualche breve considerazione sull'utilizzabilità di detti risultati, limitandosi a quanto acquisibile dai tre studi che hanno, in qualche modo, maggiore carattere di ufficialità: quello condotto nell'ambito del Progetto Nazionale Valutazione delle Piene (VAPI) del CNR-GNDCI, quello condotto dalla Fondazione CIMA per conto del Commissario Delegato Maltempo Maggio 2014 ("La modellazione e definizione delle grandezze idrologiche utili alla progettazione per la messa in sicurezza strutturale e non strutturale del reticolo idrografico principale della Regione Marche"), espletato nel maggio 2017, e quello condotto dall'Università di Urbino per conto del Consorzio di Bonifica delle Marche ("Studio per la mitigazione del rischio idrogeologico nella Regione Marche - Indagine condotta sui bacini dei fiumi Conca, Tavollo, Foglia, Arzilla, Metauro e Cesano", 2018). Esaminando questi tre studi si constatano importanti differenze.

Dal Progetto VAPI, adottando la curva di crescita regionale individuata per la regione omogenea Romagna-Marche e considerando come stima della piena indice quella diretta ottenuta come media campionaria del periodo (268.5 mc/s, sempre come proposto dal Progetto VAPI, basata su 36 anni di dati; v. Franchini e Galeati, 1996), si ottengono le stime della portata al colmo Q(T) di assegnato tempo di ritorno T riportate nella Tabella 1.

Lo studio CIMA utilizza un approccio indiretto che prevede la generazione di eventi sintetici di precipitazione, basandosi sull'uso dei risultati della procedura di regionalizzazione delle piogge intense, condotta nell'ambito della medesima Convenzione di incarico, e sull'uso di un modello idrologico, calibrato e validato sul territorio regionale, per determinare la risposta dei bacini idrografici. Le stime della portata al colmo di assegnato tempo di ritorno non sono disponibili per la sezione di Montecchio ma per la sezione di foce ove il bacino idrografico è circa 100 kmq più ampio; i valori stimati sono riportati sempre nella Tabella 1.

Lo studio dell'Università di Urbino propone un approccio indiretto per la stima delle portate di assegnato tempo di ritorno in alcune sezioni del Foglia. L'approccio si basa sull'uso del metodo CN del Soil Conservation Service (SCS) per il calcolo della pioggia netta e sull'uso della forma di idrogramma unitario proposto dallo stesso SCS, per caratterizzare la trasformazione afflussi-deflussi.

Va detto che lo Studio dell'Università di Urbino calcola le portate al colmo, oltre che con il metodo CN-SCS, anche con altri due diversi percorsi di stima: uno basato sul metodo razionale, l'altro sulla procedura messa a punto dal CIMA. Tuttavia, in sede consuntiva, dei tre percorsi di stima, che peraltro producono risultati alquanto diversi fra loro, viene adottato quello basato sul metodo CN-SCS, con il quale vengono effettuate le stime di portata usate per le successive analisi idrauliche, condotte nel medesimo studio. In particolare, le stime della portata al colmo di assegnato tempo di ritorno sono disponibili per la sezione di foce; i valori stimati sono riportati ancora nella Tabella 1.

Tabella 1 – Confronto tra le stime delle portate al colmo di assegnato tempo di ritorno fornite dai tre studi esaminati.

Tempo di ritorno T [anni]	*Stime delle portate Q(T) [mc/s]*		
	Progetto VAPI Foglia a Montecchio	*Studio CIMA 2017 Foglia alla foce*	*Studio Univ. Urbino Foglia alla foce*
50	730	904	654
100	844	1079	783
200	958	1270	895

E' evidente la notevole difformità tra le stime effettuate dai diversi autori; confrontando la stima VAPI con quella del CIMA si riscontrano le differenze dell'ordine del 30%. Tali differenze solo in una parte molto modesta possono essere spiegate in base all'aumento di superficie del bacino idrografico; dell'entità dell'effetto dovuto all'incremento di superficie del bacino ci si può infatti rendere conto adottando il modello multiregressivo di stima della portata indice proposto nel progetto VAPI (basato sull'uso della superficie e dell'altezza media del bacino e sulla stima della media dei massimi annuali delle piogge areali di durata pari a 1 giorno; v. Franchini e Galeati, 1996). Applicando tale modello si trova che l'incremento atteso della portata indice del Foglia, passando da Montecchio alla foce, dovrebbe essere dell'ordine del 4%; pari incremento sarebbe da attendersi nei quantili delle portate al colmo, mentre, come si nota dalla Tabella 1, le differenze sono ben più elevate. Peraltro si segnala che lo studio dell'Università di Urbino offre valori che, nonostante l'aumento di superficie del bacino idrografico, risultano del 7-10% inferiori a quelli forniti dal Progetto VAPI.

Queste differenze hanno un notevole impatto sulla definizione del quadro del rischio idraulico.

Alla luce di quanto detto in precedenza, si raccomanda quindi lo sviluppo di un'attività di accurata revisione e aggiornamento delle conoscenze pregresse, finalizzata alla messa a punto di un quadro idrologico-idraulico di riferimento. Ciò sarà necessario per poter definire un prospetto coerente delle portate di piena e dei profili idraulici attesi lungo l'alveo cui fare riferimento. La disponibilità di tale quadro conoscitivo sarà fondamentale anche per poter individuare, su una base razionale, quali altri interventi, in aggiunta a quelli in progetto, siano necessari per la mitigazione del rischio idraulico della città di Pesaro e, più in generale, degli insediamenti antropici posti lungo il percorso dell'asta del fiume Foglia.

Stante la consapevolezza di questa situazione di incertezza, il Consorzio di Bonifica delle Marche ha correttamente ritenuto opportuno di fornire ai progettisti precise indicazioni sia per la compiuta definizione delle aree di laminazione da progettare e sia, in particolare, per l'individuazione della sollecitazione idrologica da prendere a riferimento per la progettazione dell'intervento.

In primo luogo, infatti, anche sulla base degli esiti di studi preliminari e di accurati sopralluoghi sul campo, il Consorzio ha definito che l'intervento di realizzazione delle casse di espansione sul fiume Foglia a difesa del centro urbano di Pesaro, debba consistere nell'"incrementare le capacità di ulteriore invaso delle quattro aree site a monte dell'autostrada già interessate da fenomeni di esondazione naturale al fine di contribuire alla laminazione delle piene".

In secondo luogo, il disciplinare di incarico stabilisce che i modelli matematici da utilizzare nella presente fase progettuale siano quelli già in possesso del Consorzio. Questi ultimi sono stati quindi messi a disposizione degli scriventi, stabilendo che eventuali revisioni o aggiornamenti sostanziali di tali modelli dovrebbero essere concordati tra il Consorzio e gli scriventi professionisti e valutati separatamente. In aderenza a ciò, il Consorzio ha messo prontamente fornito agli scriventi i modelli matematici in proprio possesso, che sono quelli elaborati nell'ambito dello studio svolto dall'Università di Urbino e che contengono anche gli idrogrammi di progetto cui fare riferimento. Questa impostazione è stata condivisa con le altre Amministrazioni interessate in varie occasioni, fra cui la Conferenza preliminare per la verifica degli indirizzi del Progetto di fattibilità, tenutasi ad Ancona il 12 giugno 2018, nella quale è stato condiviso di "procedere sulla base dello studio effettuato proprio dal Consorzio in collaborazione con l'Università di Urbino e un ulteriore studio realizzato per le aree esondabili dalla diga Marcatale a Pesaro".

La stessa Conferenza ha comunque evidenziato la necessità di implementare, quanto prima, uno studio generale di sistematizzazione, aggiornamento e revisione delle conoscenze del quadro idrologico-idraulico del fiume Foglia e, più nell'immediato e comunque prima dello sviluppo delle fasi

di progettazione definitiva ed esecutiva, l'effettuazione di un'indagine idraulica e geotecnica atta a verificare la natura e lo stato delle arginature del Foglia, in particolare modo nel tratto che interessa l'abitato di Pesaro.

3. DEFINIZIONE DELLA SOLLECITAZIONE IDROLOGICA DI PROGETTO

In coerenza con quanto indicato in precedenza, la sollecitazione idrologica di riferimento adottata nel presente progetto è stata desunta dagli idrogrammi proposti dallo studio dell'Università di Urbino. In particolare, si è fatto riferimento all'onda di piena ricostruita alla sezione di foce per lo scenario 200-ennale. Questa era stata ottenuta considerando la propagazione in alveo delle onde di piena idrologiche, stimate, per i vari sottobacini, utilizzando il modello CN-SCS per la caratterizzazione dell'assorbimento del terreno e l'idrogramma unitario SCS per la rappresentazione della trasformazione afflussi-deflussi.

L'idrogramma di piena 200-ennale così ottenuto è riportato nella Figura 1.

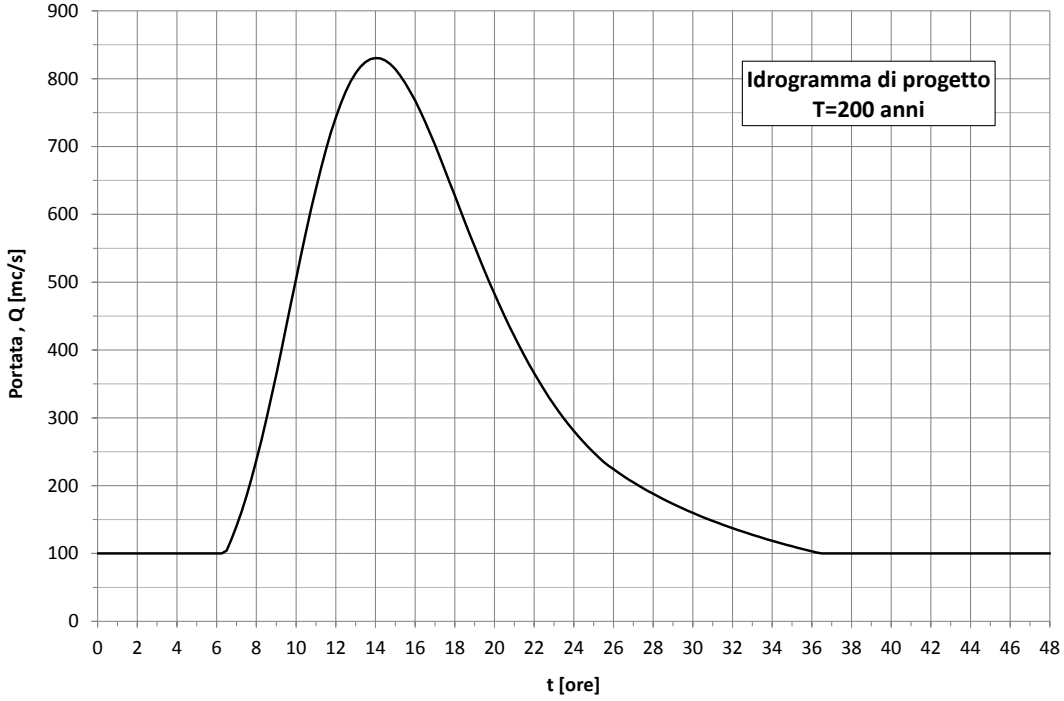


Figura 1 – Onda di piena 200-ennale utilizzata per la progettazione delle casse di espansione.

Il colmo dell'onda di piena risulta pari a 830.5 mc/s; si può osservare che tale valore di colmo risulta inferiore al valore della stima di portata idrologica di pari tempo di ritorno, riportata nella Tabella 1. Questa circostanza, non inattesa, è dovuta al fatto che l'onda riportata in Figura 1 è ottenuta propagando in alveo le onde idrologiche prodotte, nello scenario 200-ennale, dai vari sottobacini in cui l'intero bacino idrografico del Foglia è stato considerato diviso; essa risente pertanto dell'effetto di laminazione che le piene manifestano durante la loro propagazione, con conseguente attenuazione del colmo di piena.

4. RICALIBRAZIONE DEL MODELLO IDRAULICO-MATEMATICO

Come già indicato in precedenza, secondo quanto stabilito dal Disciplinare di incarico, nella redazione del presente progetto per lo svolgimento delle simulazioni idrauliche è stato impiegato il modello matematico di moto vario messo a disposizione dal Consorzio di Bonifica.

Il modello, realizzato con il codice HEC-RAS, rappresenta il tratto di alveo che si estende indicativamente dalla chiusa di Ginestreto fino alla foce (lunghezza complessiva di circa 16 km). La geometria del fiume Foglia è descritta per mezzo sia di rilievi Lidar a maglia 1m x 1m (dalla sezione di monte fino al ponte della Ferrovia) sia di rilievi topografici tradizionali (dal ponte dell'autostrada fino alla foce). La geometria delle opere di attraversamento è stata desunta invece dal "Rilievo topografico di dettaglio dei corsi d'acqua appartenenti ai bacini idrografici regionali delle Marche" (2001, Regione Marche). Si segnala la mancanza nel modello del ponte posto immediatamente a valle dell'A14, per il quale non si dispone del rilievo. Si segnala inoltre, l'opportunità di supportare le verifiche idrauliche che saranno eseguite nelle successive fasi progettuali (progettazione definitiva ed esecutiva) con una rappresentazione della geometria condotta con l'ausilio di un rilievo topografico a terra aggiornato, in quanto quelli impiegati in questa sede risultano piuttosto datati.

Anche se il modello idraulico-matematico messo a disposizione dal Consorzio non è stato modificato nella sua geometria, in aderenza agli indirizzi impartiti, si è ritenuto comunque opportuno effettuare una ricalibrazione del modello stesso. Quest'ultima è stata condotta sulla base delle risultanze dell'evento di piena del 6-7 febbraio 2015; si tratta di un importante evento di piena, che risulta successivo all'epoca in cui fu effettuata la precedente calibrazione del modello, che era stata basata sull'evento del 10-13 novembre 2013, peraltro di minore intensità. Nella Figura 2 si riporta l'idrogramma dei livelli idrometrici nella sezione di Pesaro ponte della Ferrovia per l'evento di piena in questione, desunto dalle informazioni messe a disposizione dai Servizi competenti della Regione Marche; come origine dei tempi sono state assunte le ore 00:00 del 6 febbraio 2015. L'altezza idrometrica al colmo di piena, che si sarebbe verificato alle ore 18:00 del 6 febbraio 2015, risulta pari a 3.69 m.

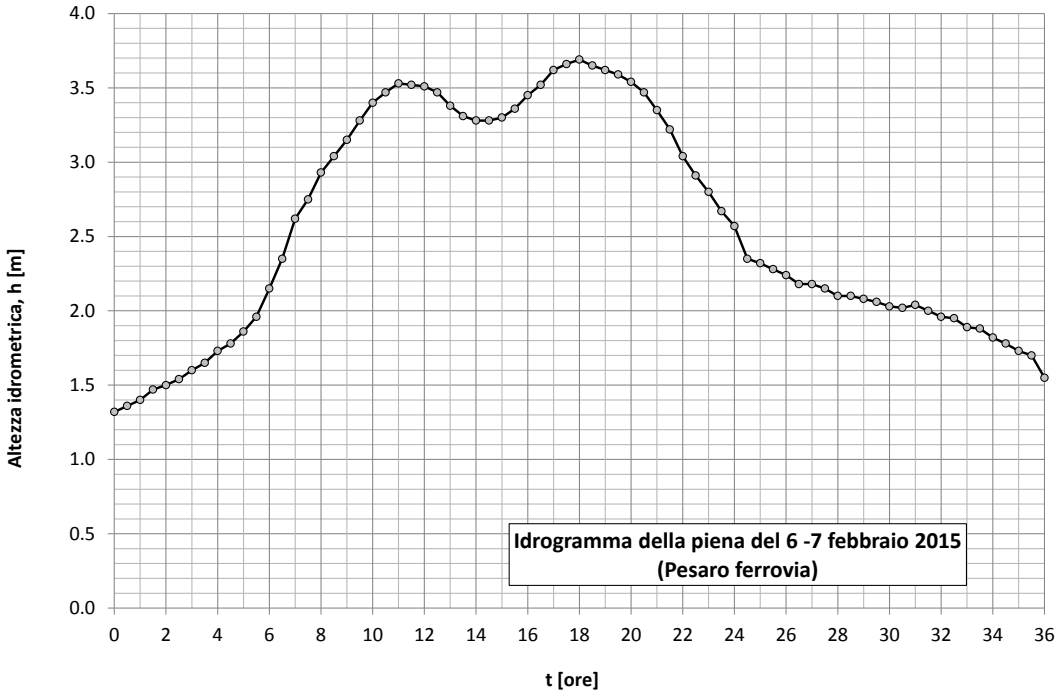


Figura 2 – Idrogramma dei livelli della piena del 6-7 febbraio 2015 (origine asse dei tempi: ore 0:00 del 6 febbraio 2015).

Nel "Rapporto di evento 4-9 febbraio 2015" del Centro Funzionale Regionale della Regione Marche si legge che "alla stazione di Pesaro Ferrovia si è registrato un livello di oltre 3,5 m con una portata al colmo di piena stimata superiore a 650 mc/s".

Fra le scale di deflusso disponibili, la più vicina nel tempo all'evento in questione è quella rilevata nell'anno 2012 (che peraltro, fra quelle pubblicate, è anche la più recente oggi disponibile), che è riportata nella Figura 3. Nella medesima figura è riportato il punto rappresentativo della coppia di valori altezza di colmo misurata-portata di piena al colmo ricostruita; quest'ultima, utilizzando la scala delle portate indicata, risulterebbe pari a 657 mc/s.

Dato che il valore di portata colmo ottenuto è in ottimo accordo con quello indicato nel citato "Rapporto di evento 4-9 febbraio 2015", l'utilizzo della scala delle portate rappresentata in Figura 2 è stato ritenuto plausibile. Utilizzando la stessa è stato quindi ricostruito l'idrogramma di portata dell'evento di piena del febbraio 2015, che viene riportato nella Figura 4, il cui valore di picco, come già indicato, è pari a 657 mc/s.

Il modello è stato ricalibrato con l'ausilio delle risultanze della documentazione fotografica relativa al ponte della ferrovia e al ponte di via Ponchielli (posto monte della ferrovia e noto anche come ponte Giolitti), riportata rispettivamente nella Figura 5 e nella Figura 6.

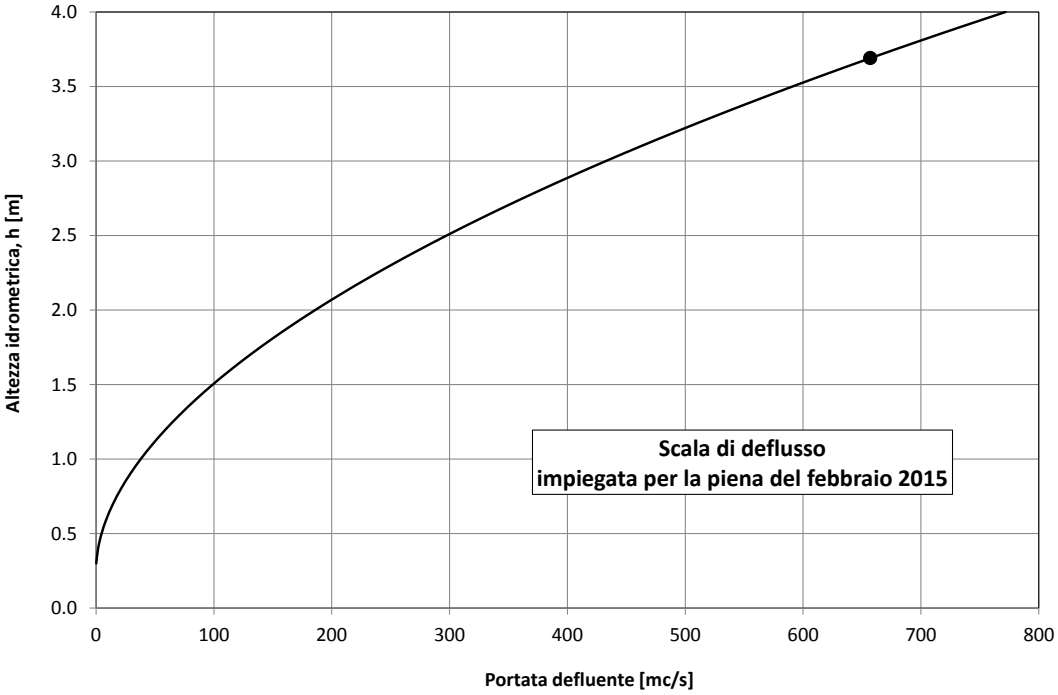


Figura 3 - Scala di deflusso impiegata per la ricostruzione dell'idrogramma di portata della piena del febbraio 2015 (linea) e punto rappresentativo dell'altezza idrometrica misurata al colmo di piena e della relativa stima di portata.

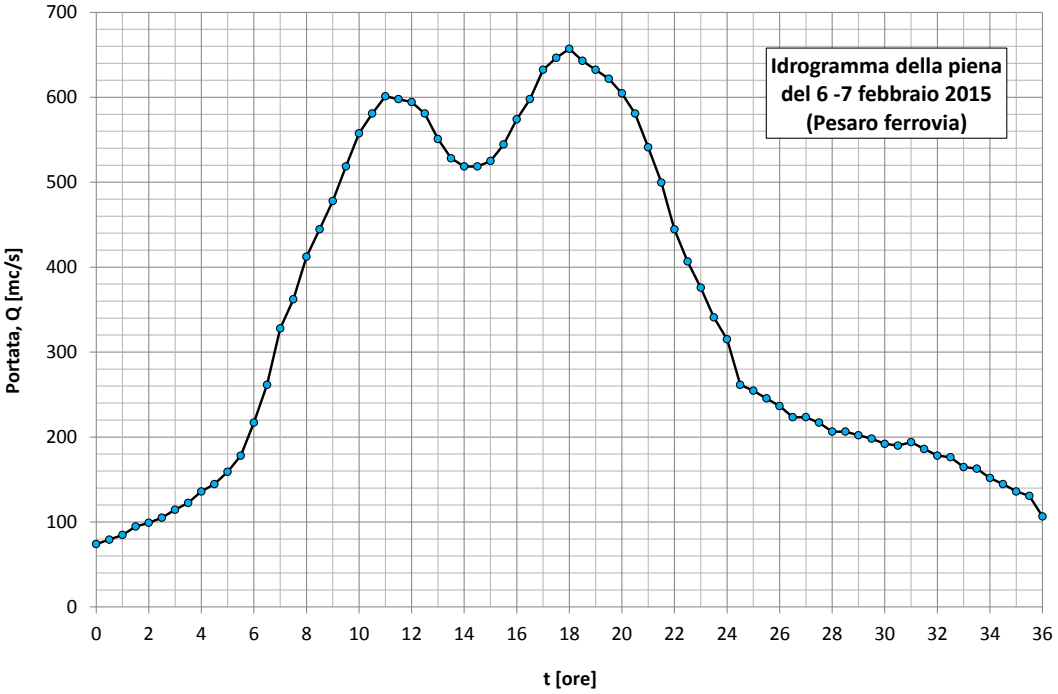


Figura 4 - Idrogramma delle portate della piena del 6-7 febbraio 2015 (origine asse dei tempi: ore 0:00 del 6 febbraio 2015).



Figura 5 - Transito dell'onda di piena del 6 febbraio 2015 in corrispondenza del ponte di via Ponchielli (detto anche ponte Giolitti) a Pesaro.



Figura 6- Transito dell'onda di piena del 6 febbraio 2015 in corrispondenza del ponte della ferrovia a Pesaro.

Non è stato possibile conoscere l'ora esatta in cui sono scattate le fotografie. Tuttavia, considerata la stagione e la notevole luce presente, si può presumere che esse siano state scattate nelle ore centrali del giorno, quindi prima del transito del colmo (avvenuto, come detto, alle ore 18:00). Di conseguenza, il valore di portata considerato per la calibrazione del modello matematico è stato assunto inferiore a quello di colmo; considerato l'andamento dell'idrogramma di portata riportato in Figura 4, si è ritenuto ragionevole assumere un valore di portata pari a 560 m^3/s transitante al momento della ripresa fotografica. Dalla geometria delle sezioni trasversali dei ponti si è risaliti quindi a valutare la quota assoluta del pelo libero in corrispondenza dei ponti stessi, al momento della ripresa fotografica. Si è quindi variato il coefficiente di scabrezza dell'alveo nel modello in maniera tale da ottenere nelle simulazioni, in corrispondenza del transito della portata di 560 m^3/s, quote del pelo libero simulato in corrispondenza dei due ponti di via Ponchielli (c.d. ponte Giolitti) e FFSS più prossime possibili a quelle stimate in base alla documentazione fotografica. La calibrazione del modello ha fornito i migliori risultati per un coefficiente di scabrezza di Manning n = 0.040 $m^{-1/3} \cdot s$, equivalente ad un indice di scabrezza di Gauckler-Strickler $K_s = 25\ m^{1/3} \cdot s^{-1}$.

Nella Figura 7, relativa alla sezione del fiume Foglia posta in corrispondenza del ponte ferroviario di Pesaro, viene illustrato il confronto tra il livello del pelo libero desunto dalla fotografia disponibile e quello simulato dal modello idraulico-matematico per il medesimo istante temporale. Si nota come la differenza tra il primo (5.10 m s.l.m.m.) e il secondo (5.02 m s.l.m.m.) sia molto modesta, a conferma del buon esito della calibrazione.

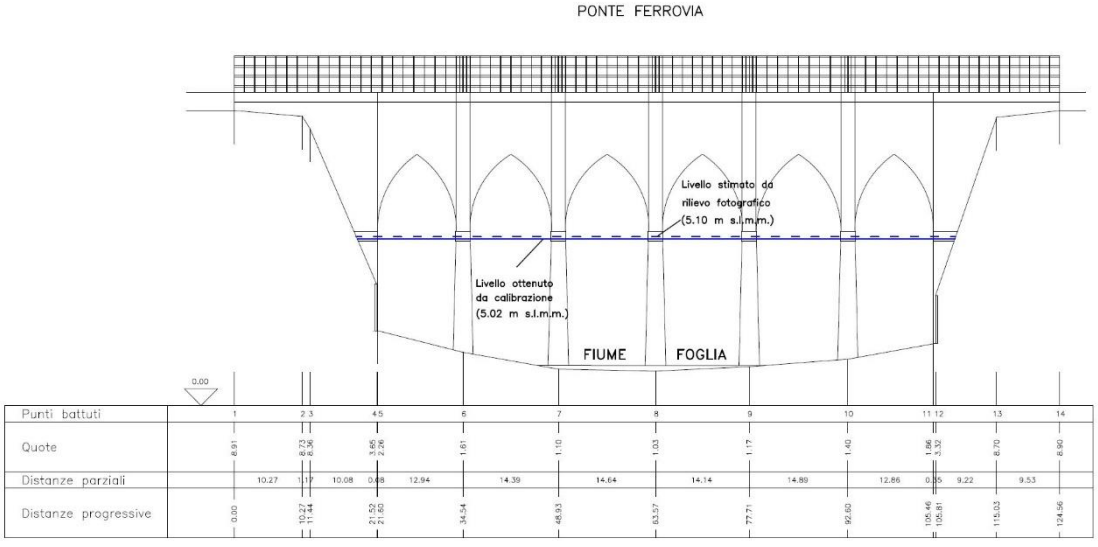


Figura 7 - Confronto nella sezione del fiume Foglia al ponte ferroviario di Pesaro tra il livello del pelo libero desunto dalla fotografia disponibile e quello simulato dal modello idraulico-matematico per il medesimo istante temporale.

5. VERIFICA E OTTIMIZZAZIONE DEL FUNZIONAMENTO IDRAULICO DELLE CASSE

Il modello fornito dal Consorzio di Bonifica, dopo essere stato ricalibrato, è stato modificato nella sua geometria, aggiungendo la schematizzazione delle quattro aree di laminazione opportunamente attrezzate. Queste ultime sono state rappresentate nel modello attraverso le curve dei volumi invasati in funzione dell'altezza idrica presente al loro interno e aggiungendo i collegamenti tra l'alveo e ciascuna cassa; questi ultimi sono ottenuti con delle soglie fisse, ciascuna posta a quota costante. Sono state poi effettuate numerose simulazioni, variando per tentativi la geometria delle soglie di sfioro delle varie casse (lunghezza e quota della soglia per ciascuna cassa) in maniera da massimizzare l'effetto di laminazione complessivo. Dopo alcune prove preliminari, per tutte le casse si è ipotizzato di uniformare la lunghezza delle soglie di alimentazione; quest'ultima è stata posta pari a 80 m per tutte e quattro le aree. L'ottimizzazione è quindi stata condotta variando soltanto il posizionamento altimetrico di ciascuna delle quattro soglie.

Ai fini della seguente illustrazione delle elaborazioni svolte, si ritiene utile riportare nella Figura 8, una planimetria di insieme del sistema costituito dalle quattro aree di laminazione attrezzate, rimandando agli elaborati cartografici allegati (in particolare alla planimetria di progetto, contenuta nella Tav.02) per una rappresentazione più dettagliata delle loro caratteristiche.

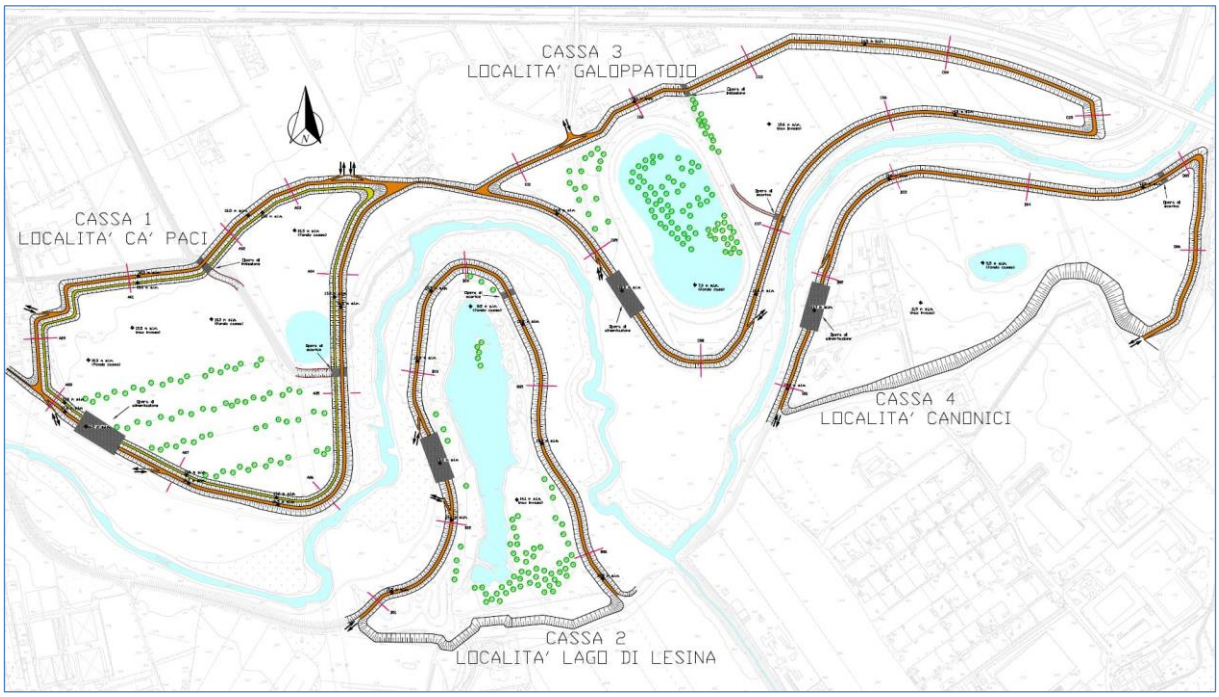


Figura 8 - Planimetria del sistema delle quattro aree di laminazione.

Per ciascuna cassa si riportano, nei grafici che seguono, la curva altezza-volumi di invaso e i risultati ottenuti dalle varie simulazioni. Si sono considerati due diversi scenari: uno che prevede il mantenimento delle quote di fondo esistenti in ciascuna cassa, l'altro che prevede uno scavo nella Cassa 1 e il mantenimento dell'assetto attuale per le rimanenti.

Le curve dei volumi in funzione dell'altezza sono state ricavate intersecando il Modello Digitale del Terreno (DTM), ottenuto dal Lidar, con superfici orizzontali poste a diversa altezza e misurando con strumenti GIS i volumi soggiacenti a tali superfici e delimitati dai contorni arginali. Nel caso di fondo della Cassa 1 in scavo, la superficie topografica del DTM è stata modificata per tenere conto della nuova geometria del fondo della cassa stessa.

Per quanto riguarda la prima cassa (Cassa 1), posta in località Ca' Paci, la curva dei volumi in funzione delle quote idriche assolute presenti nella cassa, considerata senza modifiche del fondo, è riportata nella Figura 9 (in colorazione azzurra); il fondo attuale presenta una quota minima di circa 10.30 m s.l.m.m. ma i volumi invasati sono irrilevanti fino al raggiungimento di una quota pari a circa 11 m s.l.m.m. La Figura 9 riporta anche, in colorazione rossa, la curva dei volumi in funzione della quota idrica nella configurazione con fondo ribassato; in questo caso, considerando che, dalle evidenze cartografiche e di campagna, la quota media della falda è stimabile in circa 9.8 m s.l.m.m., la quota del fondo ribassato è stata fissata a 10.30 m s.l.m.m.. Si evidenzia che, nel caso di cassa con fondo ribassato, l'altezza dell'argine diviene rilevante per cui è stata prevista una banca intermedia a quota 13.00 m s.l.m.m., di larghezza 3.50 m, mentre la pendenza delle scarpate è stata mantenuta pari a 2:1, come per la scarpata dell'argine in assenza di banca (v. le sezioni di progetto riportate nella Tav.04, elaborato cartografico allegato).

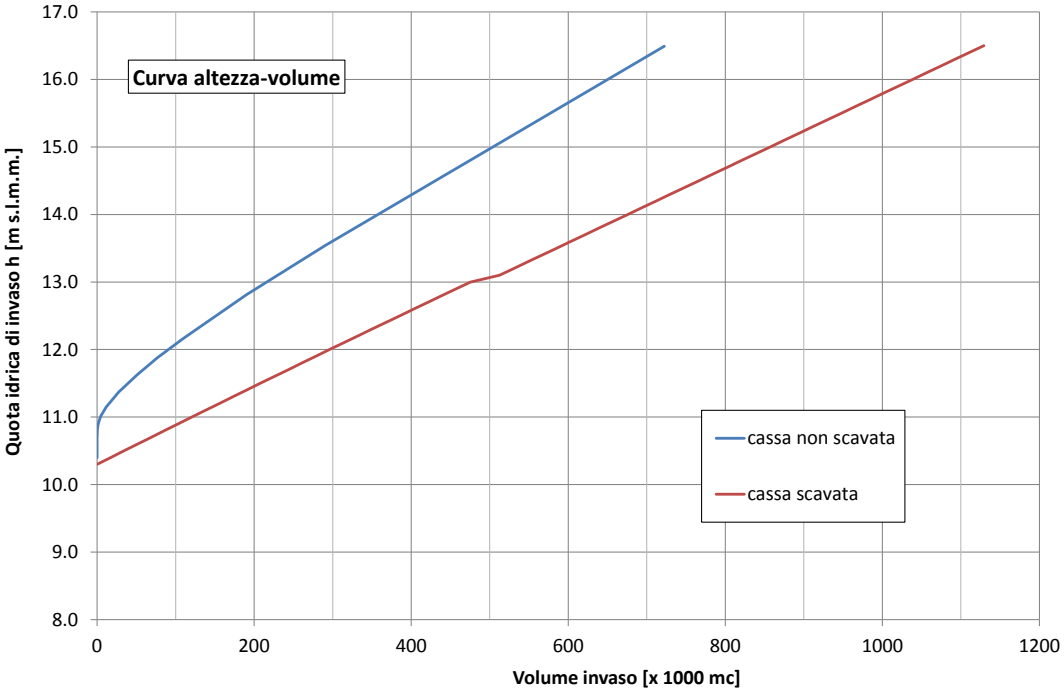


Figura 9 - Curva dei volumi di invaso in funzione della quota del pelo libero nella Cassa 1, nel caso di assenza e di presenza di rimodellamento del fondo della cassa.

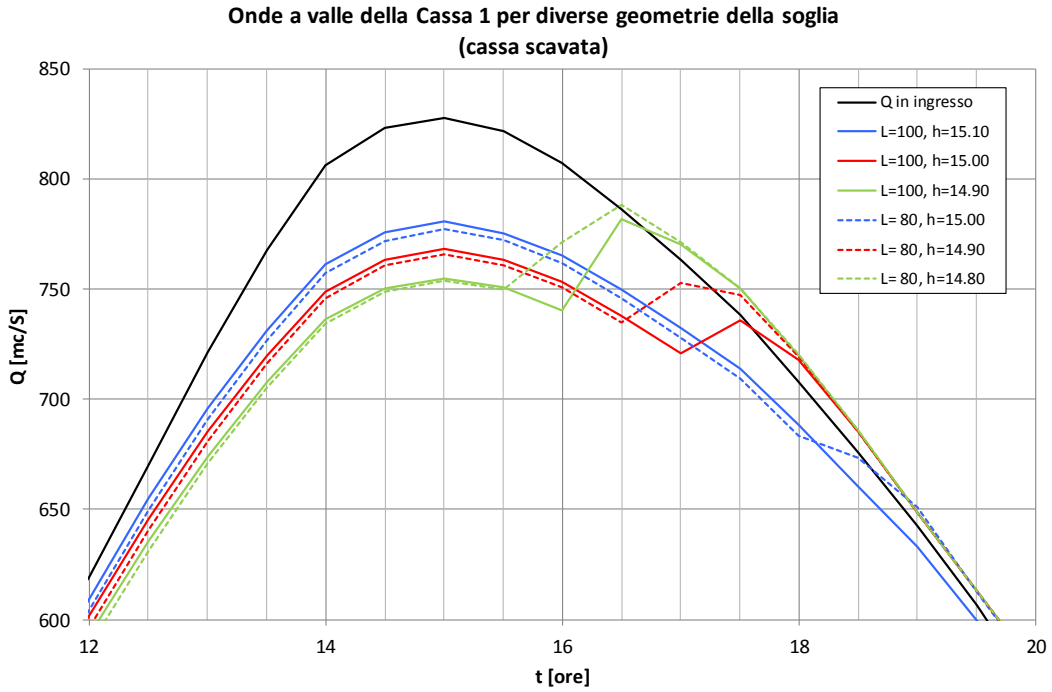


Figura 10 - Onda di piena a monte e onde di piena a valle della Cassa 1 per diverse geometrie della soglia di sfioro, nella configurazione in presenza di scavo del fondo.

Nella Figura 10 sono riportate l'onda di piena 200-ennale immediatamente a monte della Cassa 1 (ottenuta assumendo all'estremità di monte del modello l'onda fornita dallo Studio dell'Università di Urbino, v. Figura 1) e le onde che si ottengono nella sezione immediatamente a valle della Cassa 1 per diverse configurazioni della soglia di sfioro. La figura si riferisce al caso di rimodellamento del fondo della cassa. Nella Figura 10, come nelle analoghe figure seguenti relative alle altre casse, è rappresentata soltanto la fase di colmo dei vari idrogrammi, al fine di avere una migliore leggibilità delle differenze fra i vari idrogrammi.

Come in precedenza indicato, sono state considerate diverse ipotesi per la lunghezza e per la quota della soglia di sfioro. Nella Figura 10 sono riportati i principali risultati ottenuti, che si riferiscono a due lunghezze della soglia di sfioro, pari a 100 m e 80 m. Dopo tali prove preliminari, la lunghezza della soglia di sfioro è stata fissata in 80 metri. Si nota come il migliore risultato si ottenga per una lunghezza di 80 m ed una quota della soglia pari a 14.90 m s.l.m.m., che comporta una portata al colmo a valle pari a 766 mc /s. Nella Figura 11 è riportato l'andamento delle quote idriche assolute in Cassa 1 in funzione del tempo, per le varie configurazioni della soglia. Si nota come, nella configurazione ottimale, la quota di massimo invaso risulti pari a 15.50 m s.l.m.m.

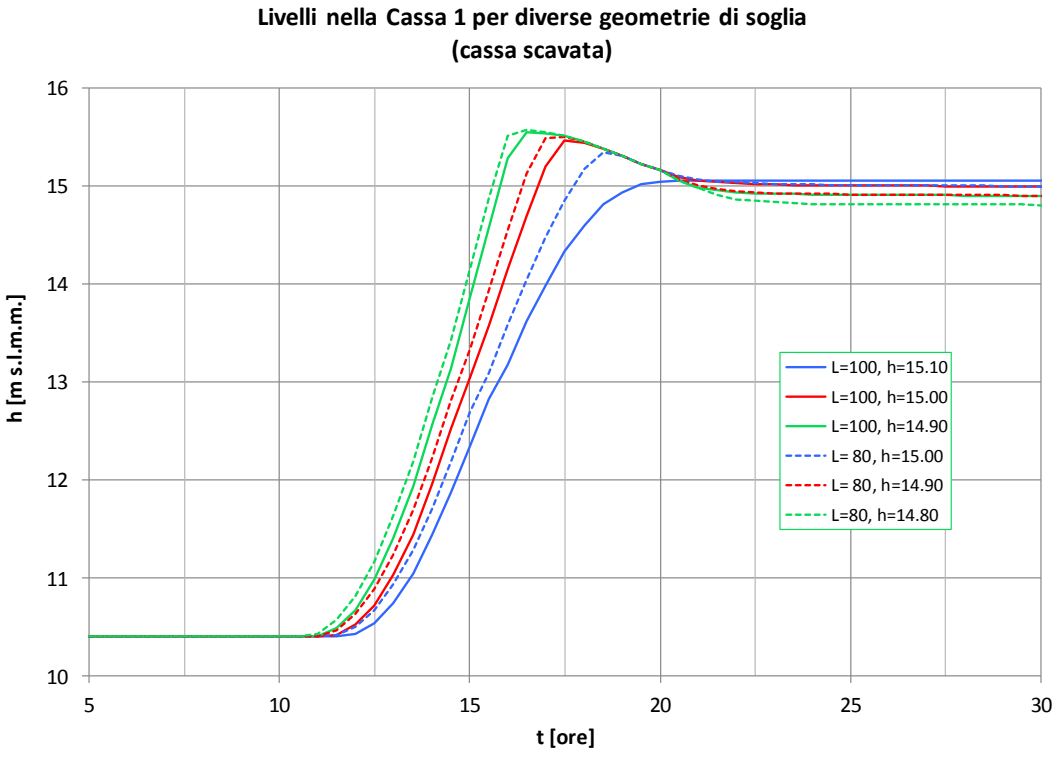


Figura 11 - Quote assolute del pelo libero nella Cassa 1 per diverse geometrie della soglia di sfioro, nella configurazione in presenza di scavo del fondo.

Dato che la quota arginale di tale cassa è fissata pari a 16.50 m s.l.m.m., si ottiene un franco minimo pari a 1 m, che appare adeguato.

Si segnala al riguardo che, viste le incertezze sulla definizione della sollecitazione idrologica più volte evidenziate in precedenza, la verifica della cassa e in generale quella dell'insieme delle casse in progetto, andrà ripetuta sulla base dei nuovi input idrologici, derivanti dall'auspicata revisione del quadro idrologico-idraulico di riferimento, una volta che questa sarà stata espletata. Nell'occasione andrà verificato anche che il funzionamento del sistema di casse, per tempi di ritorno superiori a quello duecentennale, rimanga accettabile, senza determinare sormonti dei rilevati arginali che delimitano le casse stesse. Quest'ultima verifica non ha potuto essere eseguita in questa sede, in quanto, nello Studio di riferimento, messo a disposizione degli scriventi, non erano contenute le necessarie valutazioni dell'onda di piena per tempi di ritorno superiori a 200 anni.

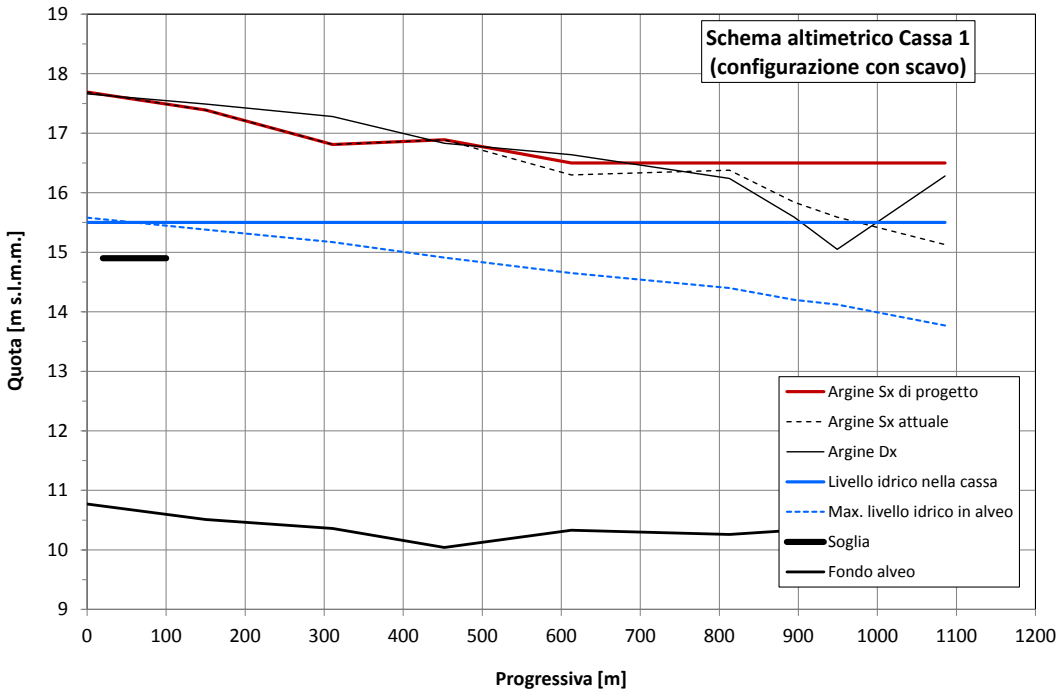


Figura 12 – Schema altimetrico della Cassa 1 (configurazione con scavo del fondo).

Nella Figura 12 è riportato uno schema altimetrico della Cassa 1 (nella configurazione con scavo); muovendosi lungo l'asse del corso d'acqua, dall'estremità di monte della cassa a quella di valle, sono riportati i profili del fondo dell'alveo, dell'argine destro del corso d'acqua e di quello sinistro (che confina con la cassa), il profilo del massimo livello del pelo libero in alveo, quello del massimo livello in cassa, la soglia di sfioro, e il profilo dell'argine sinistro di progetto. Quest'ultimo è

stato mantenuto pari a quello dell'argine sinistro attuale, quando quest'ultimo aveva quota maggiore di 16.50 m s.l.m.m.; laddove invece la sagoma attuale soggiaceva a tale quota, l'argine esistente è stato rialzato portandone il coronamento a quota 16.50 m s.l.m.m.

E' stato quindi esaminato il funzionamento della Cassa 1 nella configurazione in cui non è previsto lo scavo del fondo, che viene documentato nella Figura 13 e nella Figura 14. La Figura 13 riporta l'onda di piena 200-ennale immediatamente a monte della cassa (sempre ottenuta assumendo all'estremità di monte del modello l'onda fornita dallo Studio dell'Università di Urbino, v. Figura 1) e le onde che si ottengono nella sezione immediatamente a valle della cassa stessa per diverse configurazioni della soglia di sfioro (lunghezza L=100 m e L=80 m; varie quote della soglia di sfioro). La configurazione che determina il migliore funzionamento, ovvero che porta alla minimizzazione della portata al colmo dell'onda a valle della cassa, è quella che prevede una lunghezza della soglia di 100 m ed una quota pari a 15.10 m s.l.m.m.; si ottiene in tal caso una portata al colmo a valle pari a 781 mc/s. Risultati abbastanza simili si ottengono però con una lunghezza della soglia pari a 80 m ed una quota della stessa pari a 15.10 m s.l.m.m.; si ottiene in tal caso una portata al colmo a valle pari a 787 mc/s. Quest'ultima è la configurazione prescelta, nel caso di Cassa 1 non scavata.

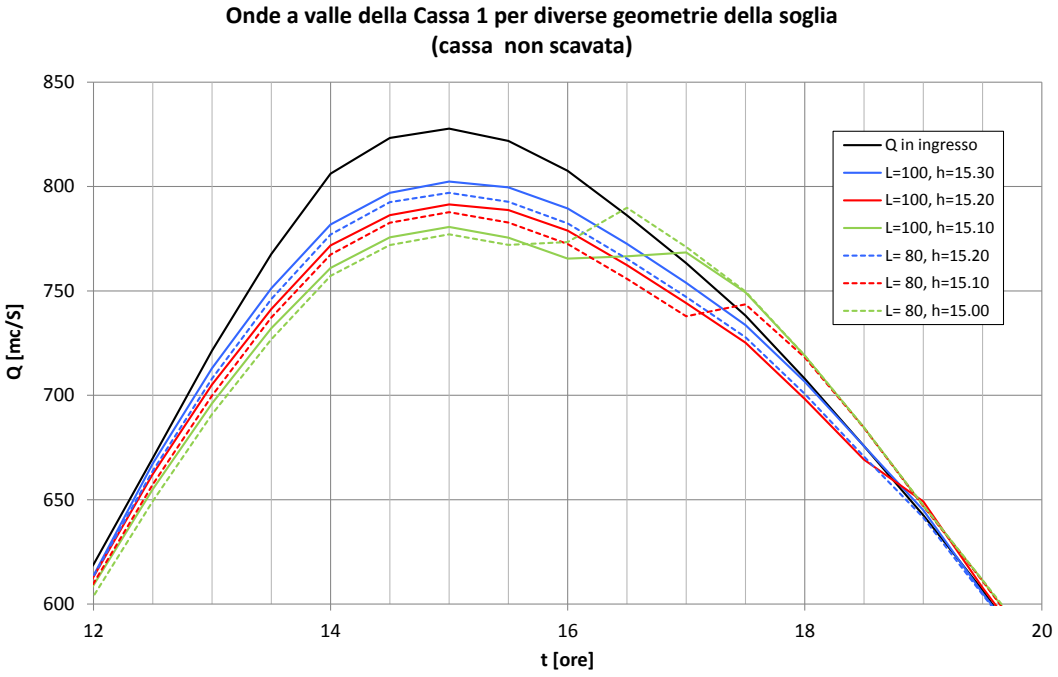


Figura 13- Onda di piena a monte e onde di piena a valle della Cassa 1 per diverse geometrie della soglia di sfioro, nella configurazione in assenza di scavo del fondo.

La Figura 14 mostra l'andamento nel tempo delle quote idriche assolute nella cassa per le varie configurazioni della soglia. Si nota come, nella configurazione prescelta (L = 80 m; h = 15.10 m s.l.m.m.), la quota di massimo invaso risulti pari a 15.48 m s.l.m.m.

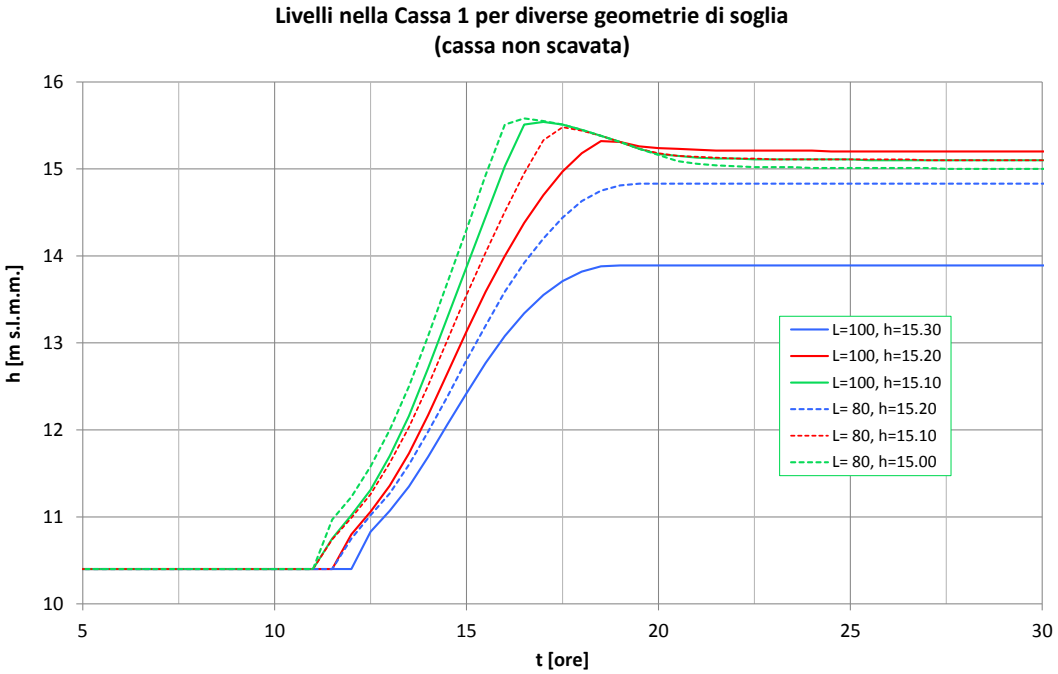


Figura 14 - Quote assolute del pelo libero nella Cassa 1 per diverse geometrie della soglia di sfioro, nella configurazione in assenza di scavo del fondo.

Dato che la quota arginale di tale cassa è fissata pari a 16.50 m s.l.m.m., si ottiene un franco minimo in cassa pari a poco più di un metro. Si ribadisce ancora che la verifica delle casse in progetto andrà ripetuta a valle dall'auspicata revisione del quadro di riferimento idrologico-idraulico, anche esaminando, nell'occasione, il funzionamento delle casse per scenari relativi a tempi di ritorno superiori a quello duecentennale.

Passando all'esame del funzionamento idraulico delle casse successive (2, 3 e 4), va preliminarmente osservato che i risultati dell'ottimizzazione della loro configurazione dipendono dalla scelta operata a monte di rimodellare, ribassandolo, il fondo della Cassa 1 o meno. L'ottimizzazione della configurazione delle casse a valle della Cassa 1 è stata dapprima effettuata nell'ipotesi di scavo del fondo della Cassa 1; la lunghezza delle soglie di sfioro è sempre stata fissata in 80 metri e di conseguenza l'ottimizzazione delle prestazioni delle casse è stata perseguita variando la sola quota della soglia di sfioro.

Si è quindi passati a ottimizzare le quote delle soglie delle casse dalla 2 alla 4 facendo riferimento ad uno scenario per il quale la quota del fondo della Cassa 1 non viene modificata (Cassa 1 non scavata). I risultati dell'ottimizzazione hanno mostrato che le quote ottimali delle soglie delle casse dalla 2 alla 4 differiscono solo di pochi centimetri da quelle ottenute nel caso di Cassa 1 con fondo ribassato (Cassa 1 scavata); pertanto, viste anche le incertezze sulla sollecitazione idrologica adottata, le quote delle soglie delle casse dalla 2 alla 4 sono state assunte, nel caso di Cassa 1 non scavata, uguali a quelle ottenute, dall'ottimizzazione funzionale, per il caso di Cassa 1 scavata.

Venendo all'esame della Cassa 2, posta in località Lago di Lesina (ex-Cava), la Figura 15 riporta la curva dei volumi di invaso in funzione delle quote idriche assolute presenti nella cassa, considerata, come detto, senza modifiche del fondo.

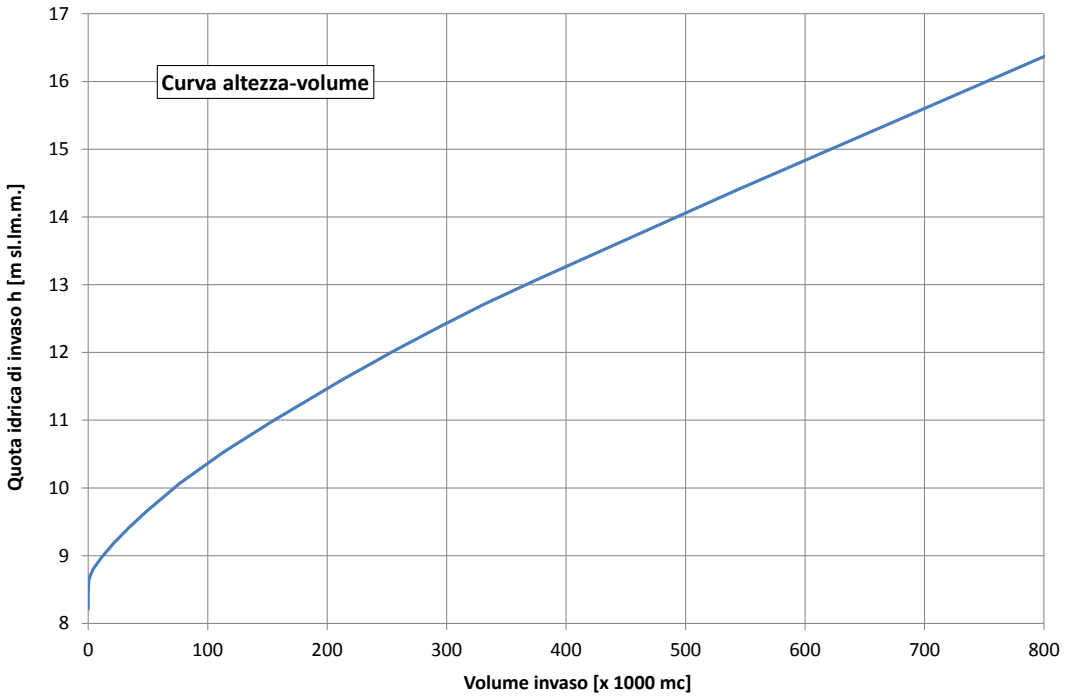


Figura 15 - Curva dei volumi di invaso in funzione della quota del pelo libero nella Cassa 2.

Nella Figura 16 sono riportate l'onda di piena 200-ennale, immediatamente a monte della Cassa 2 (che di fatto coincide con l'onda a valle della Cassa 1), e le onde che si ottengono nella sezione immediatamente a valle della stessa Cassa 2 per diverse configurazioni della soglia di alimentazione della cassa. Come in precedenza, è rappresentata soltanto la fase di colmo dei vari idrogrammi, al fine di avere una migliore leggibilità delle differenze fra i vari casi. Per l'ottimizzazione della geometria della soglia di alimentazione è stata considerata, in tutti i casi, una lunghezza pari a 80 m, ottimizzando il posizionamento altimetrico della soglia stessa, ovvero ricercando quale sia la

quota che produce il minimo colmo a valle. Si nota come il migliore risultato si ottenga quando la soglia è posizionata a quota 13.80 m s.l.m.m.; con tale configurazione si ha una portata al colmo a valle pari a 736 mc /s.

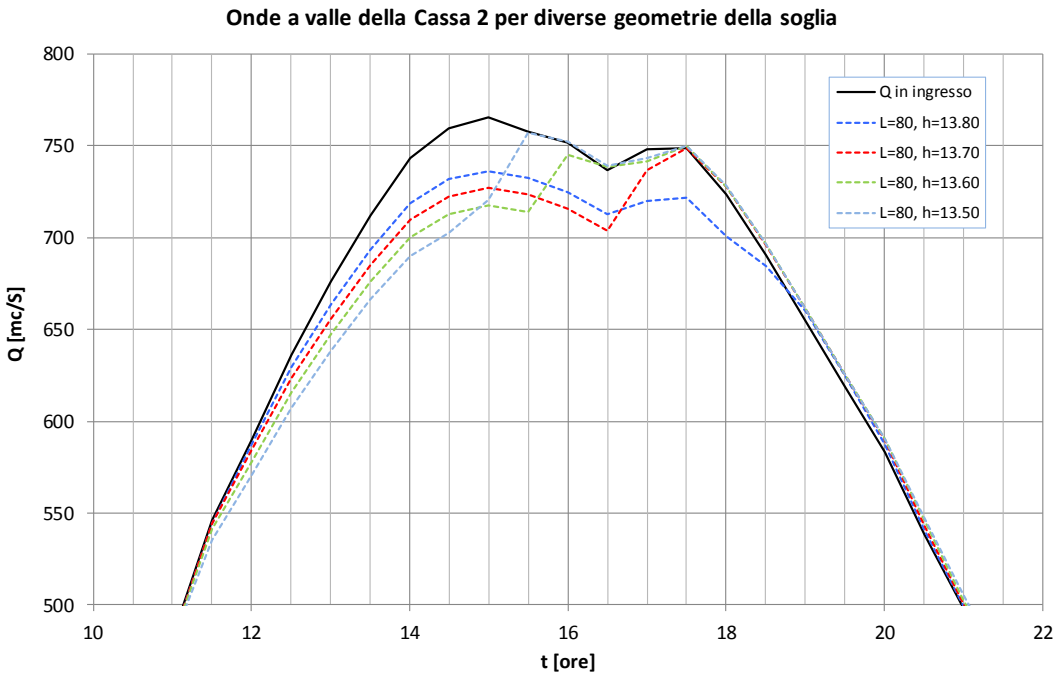


Figura 16 - Onda di piena a monte e onde di piena a valle della Cassa 2, per diverse geometrie della soglia di sfioro.

Nella Figura 17 è riportato l'andamento delle quote idriche assolute in Cassa 2 in funzione del tempo, per le varie configurazioni della soglia. Nella configurazione ottimale, la quota di massimo invaso risulta pari a 14.07 m s.l.m.m. Dato che la quota arginale di tale cassa è fissata pari a 15.50 m s.l.m.m., si ottiene un franco minimo di circa 140 cm.

Nella Figura 18 è riportato uno schema altimetrico della Cassa 2; lo schema riporta i profili altimetrici, ottenuti muovendosi lungo l'asse del corso d'acqua dall'estremità di monte della cassa a quella di valle, del fondo dell'alveo, dell'argine sinistro del corso d'acqua, di quello destro attuale (confinante con la cassa), del massimo livello del pelo libero in alveo, del massimo livello in cassa, della soglia di sfioro e dell'argine destro di progetto. Quest'ultimo è stato mantenuto pari a quello dell'argine destro attuale del corso d'acqua, nelle sezioni in cui quest'ultimo aveva quota sommitale maggiore di 15.50 m s.l.m.m., mentre è stato rialzato a tale quota quando aveva quota sommitale più bassa.

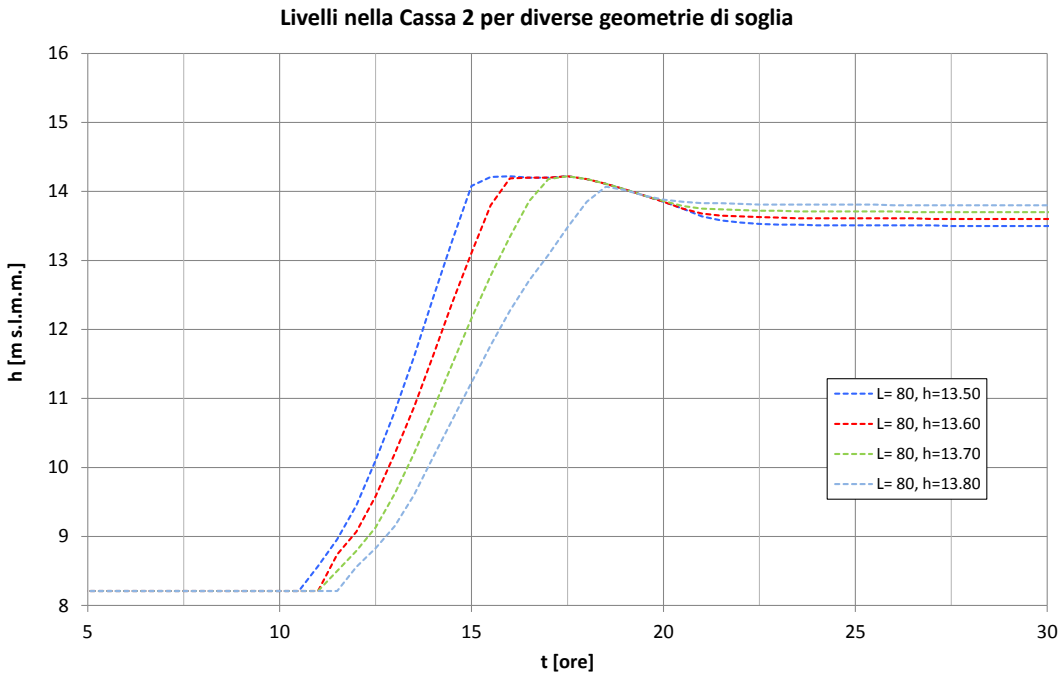


Figura 17 - Quote assolute del pelo libero nella Cassa 2, per diverse geometrie della soglia di sfioro.

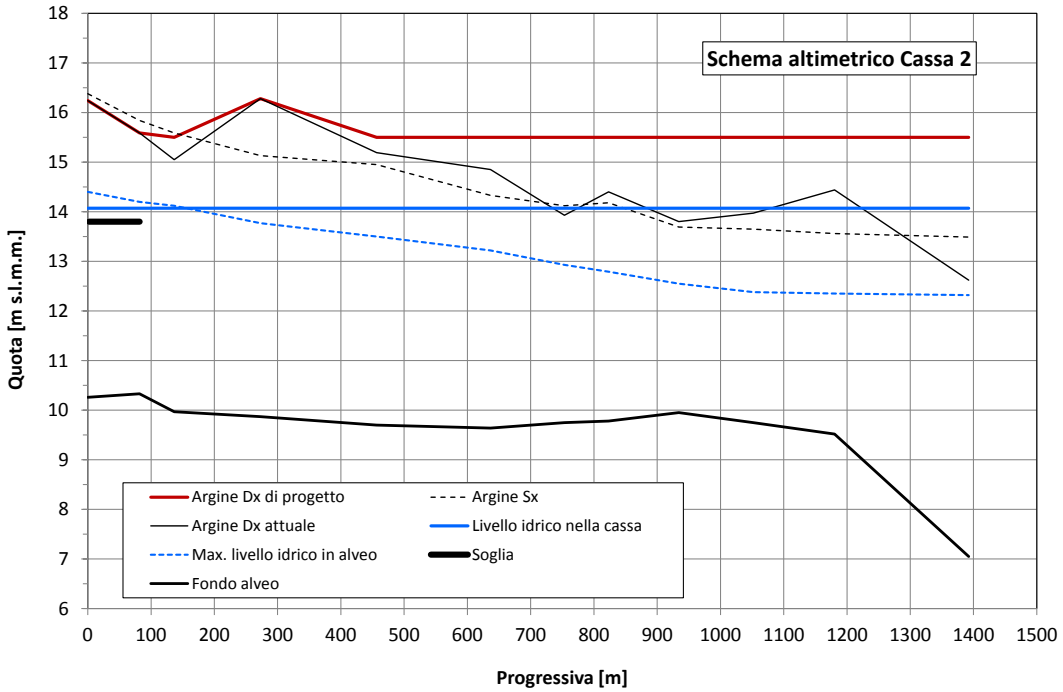


Figura 18 - Schema altimetrico della Cassa 2.

Per quanto riguarda la Cassa 3, posta in località Galoppatoio, nella Figura 19 è mostrata la curva dei volumi di invaso in funzione delle quote idriche assolute in cassa; anche per tale cassa non sono previste modifiche del fondo naturale.

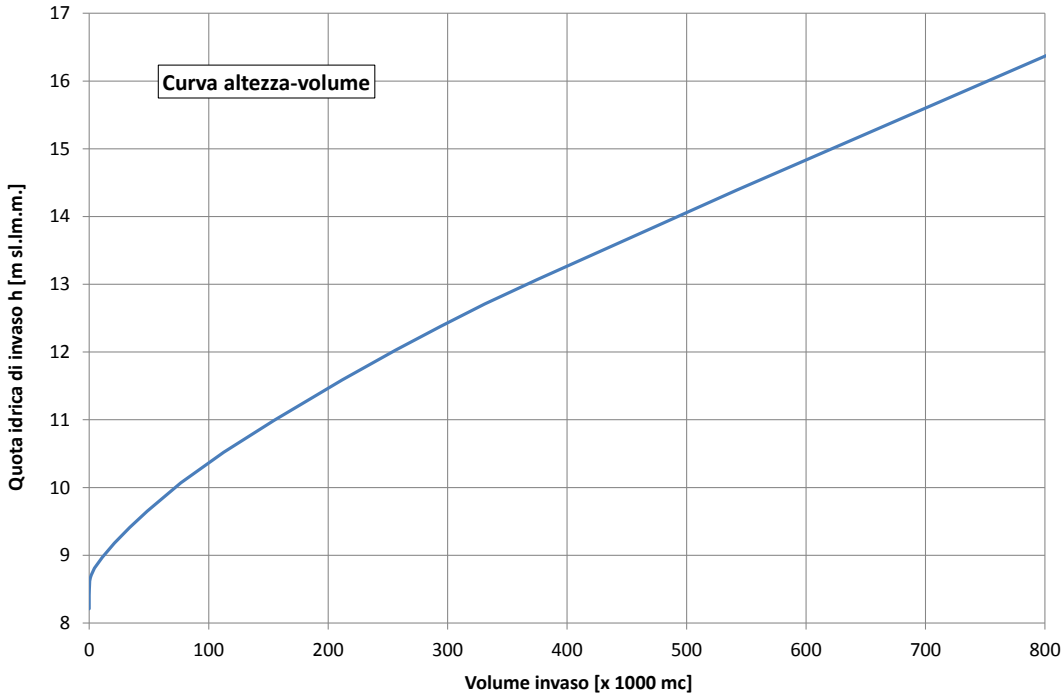


Figura 19 - Curva dei volumi di invaso in funzione della quota del pelo libero nella Cassa 3.

Nella Figura 20 sono riportate l'onda di piena 200-ennale, immediatamente a monte della Cassa 3 (di fatto coincidente con l'onda a valle della Cassa 2), e le onde che si ottengono nella sezione immediatamente a valle della stessa Cassa 3, per diverse configurazioni della soglia di alimentazione della cassa. Anche in tal caso, come per la cassa precedente, la ricerca della configurazione ottimale della geometria della soglia di alimentazione è stata effettuata considerando, in tutti i casi, una lunghezza pari a 80 m e ricercando la quota che produce il minimo colmo a valle. Come si può notare dalla Figura 20 la quota ottimale della soglia è pari a 12.30 m s.l.m.m.; con tale configurazione si ha una portata al colmo a valle pari a 698 mc /s, con una riduzione rispetto al colmo dell'onda a monte pari a circa 38 mc/s.

Nella Figura 21 è riportato l'andamento delle quote idriche assolute in Cassa 3 in funzione del tempo, per varie configurazioni della soglia. Nella configurazione ottimale (che, come detto, corrisponde a h = 12.30 m s.l.m.m.), la quota di massimo invaso risulta pari a 12.60 m s.l.m.m. Dato che la quota arginale della cassa in esame è stata fissata pari a 14.00 m s.l.m.m., si ottiene un franco minimo di 140 cm.

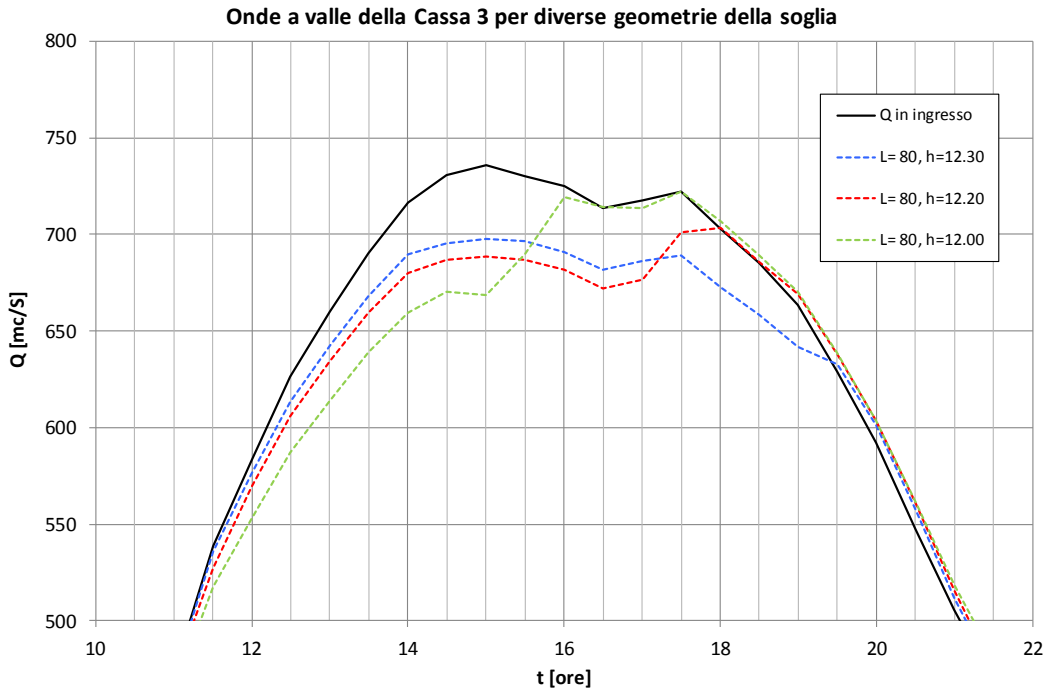


Figura 20 - Onda di piena a monte e onde di piena a valle della Cassa 3, per diverse geometrie della soglia di sfioro.

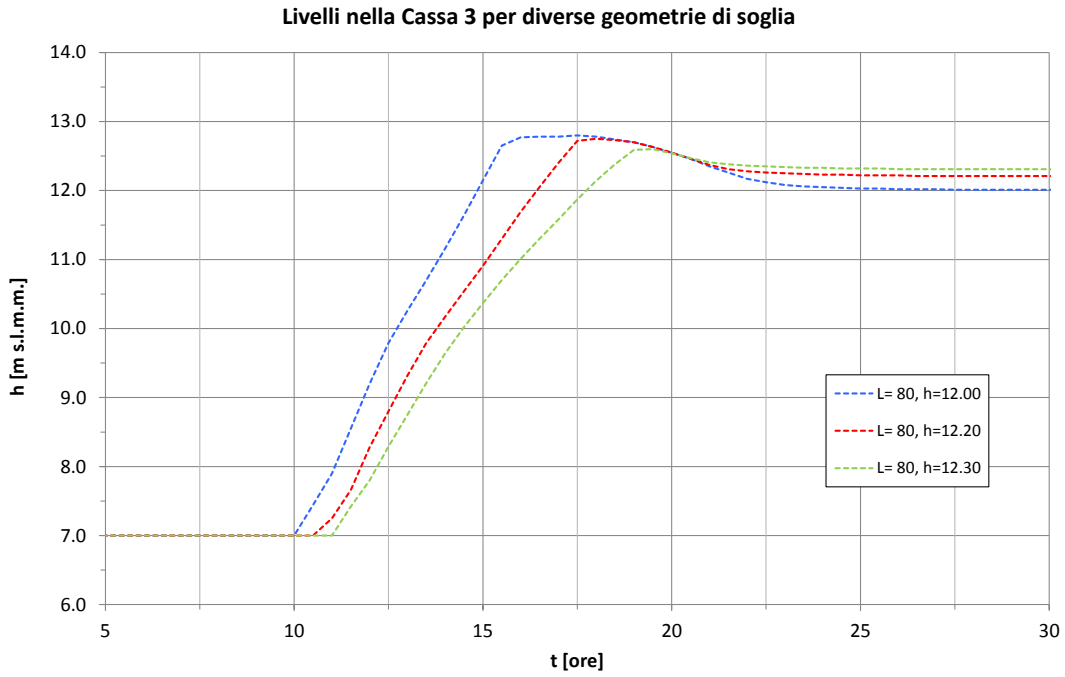


Figura 21 - Quote assolute del pelo libero nella Cassa 3, per diverse geometrie della soglia di sfioro.

La Figura 22 riporta uno schema altimetrico della Cassa 3, in cui sono illustrati i profili altimetrici, ottenuti muovendosi lungo l'asse del corso d'acqua dall'estremità di monte della cassa a quella di valle, del fondo dell'alveo, dell'argine destro del corso d'acqua, di quello sinistro attuale (confinante con la cassa), del massimo livello del pelo libero in alveo, del massimo livello in cassa, della soglia di sfioro e dell'argine sinistro di progetto, posto a quota 14.00 m s.l.m.m.

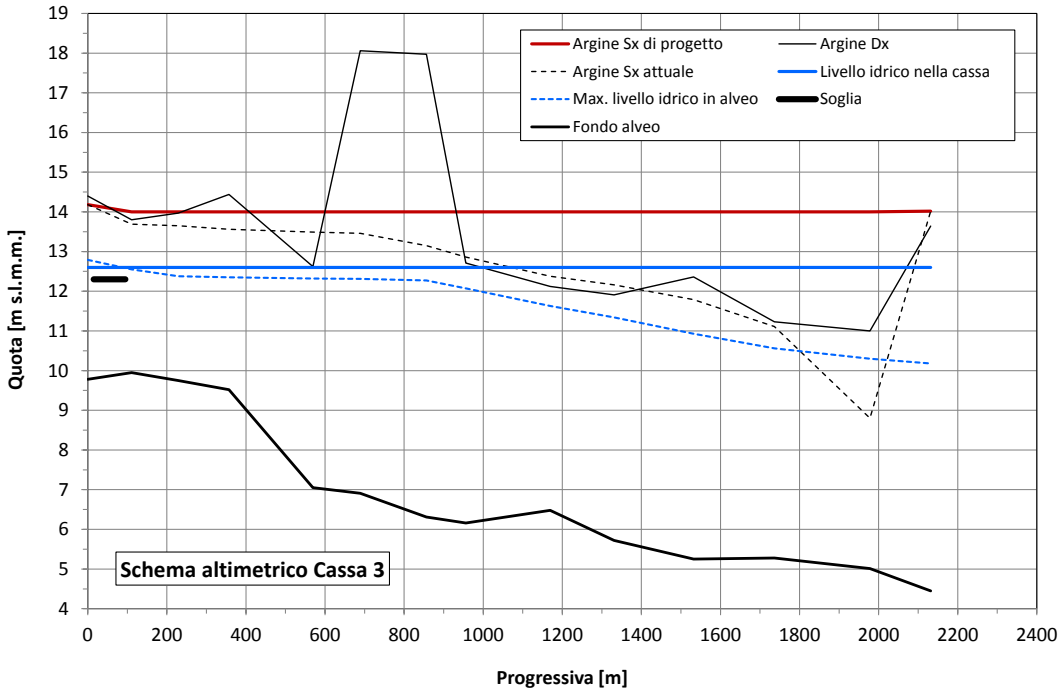


Figura 22 - Schema altimetrico della Cassa 3.

Venendo infine alla Cassa 4, posta in località Canonici, la Figura 23 riporta la curva dei volumi di invaso in funzione delle quote idriche assolute in cassa; anche per tale cassa non sono previste modifiche del fondo naturale.

Sempre in relazione alla Cassa 4, la Figura 24 mostra l'onda di piena 200-ennale nella sezione immediatamente a monte del manufatto di alimentazione della cassa (di fatto coincidente con l'onda a valle della Cassa 3) e le onde che si ottengono nella sezione immediatamente a valle della Cassa 4, per diverse configurazioni della soglia di alimentazione della cassa. Anche nel caso della Cassa 4, la ricerca della configurazione ottimale della geometria della soglia di alimentazione è stata effettuata considerando, in tutti i casi, una lunghezza pari a 80 m e ricercando la quota di posizionamento della soglia cui corrisponde, in base alle simulazioni idrauliche condotte con il modello matematico, il minimo colmo a valle. La Figura 24 mostra come la quota ottimale della soglia è pari a 11.70 m

s.l.m.m.; con tale configurazione si ha una portata al colmo a valle pari a 677 mc /s, con una riduzione rispetto al colmo dell'onda a monte pari a circa 21 mc/s.

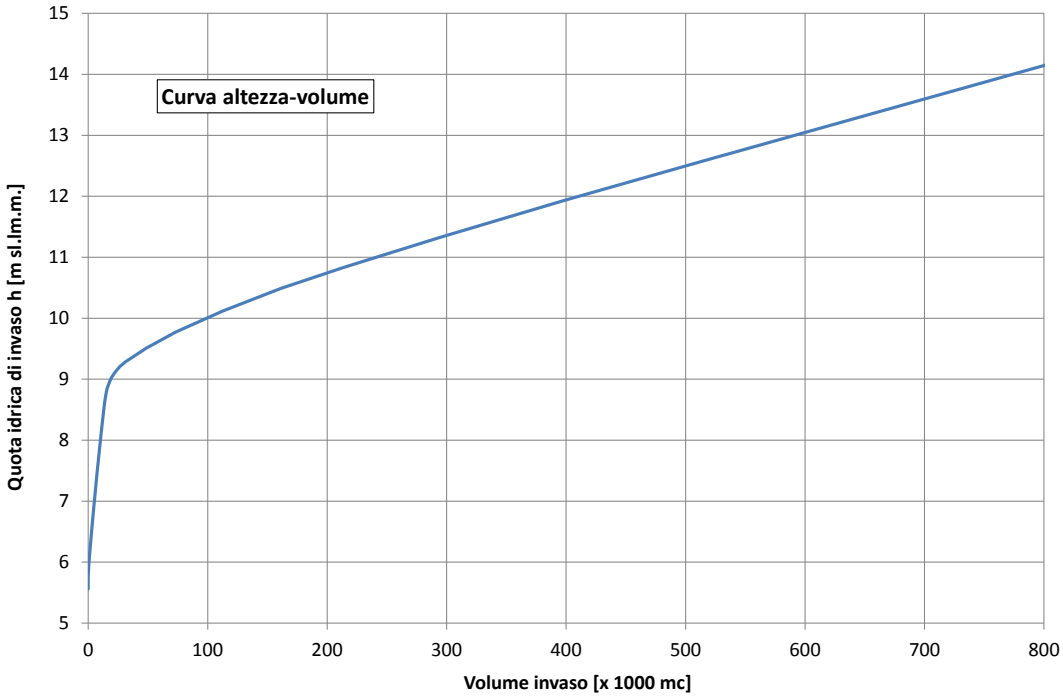


Figura 23 - Curva dei volumi di invaso in funzione della quota del pelo libero nella Cassa 4.

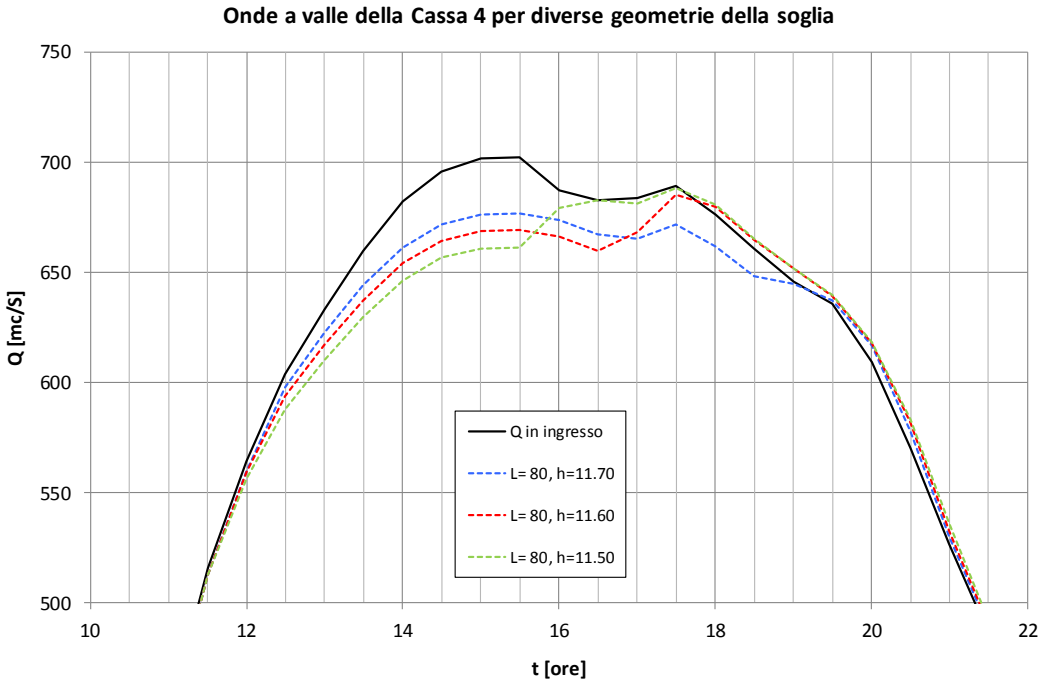


Figura 24 - Onda di piena a monte e onde di piena a valle della Cassa 4, per diverse geometrie della soglia di sfioro.

Nella Figura 25 è riportato l'andamento delle quote idriche assolute in Cassa 4 in funzione del tempo, per le varie configurazioni della soglia. Nella configurazione ottimale del posizionamento altimetrico della soglia (h = 11.70 m s.l.m.m.), la quota di massimo invaso risulta pari a 11.92 m s.l.m.m. Dato che la quota arginale di tale cassa è stata fissata pari a 13.00 m s.l.m.m., si ottiene un franco minimo di poco superiore al metro.

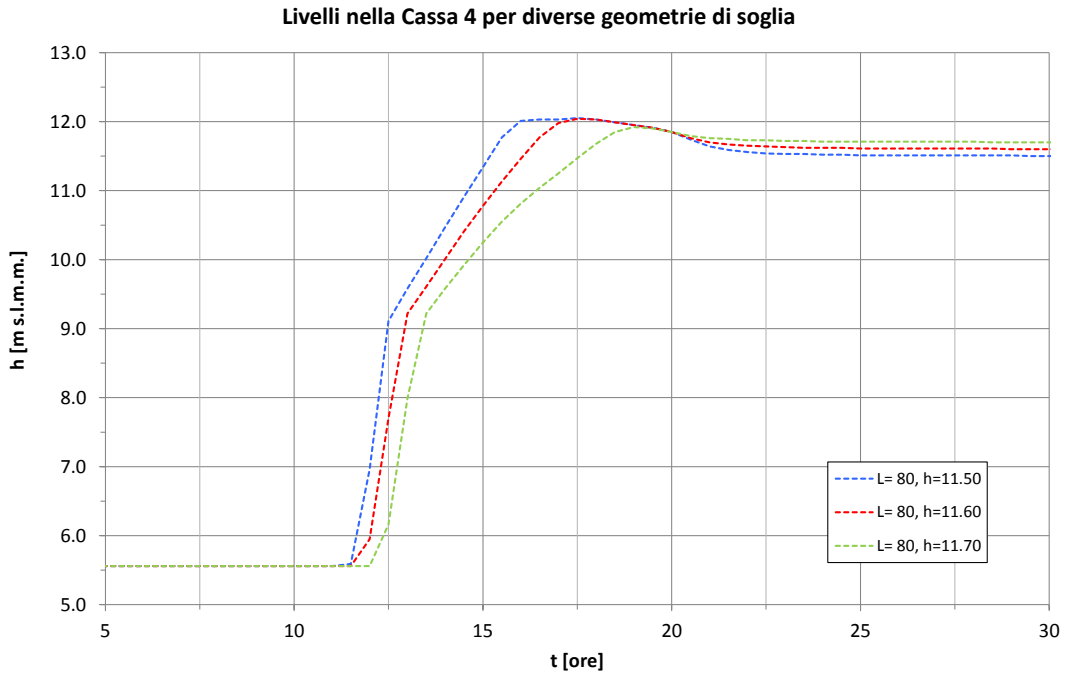


Figura 25 - Quote assolute del pelo libero nella Cassa 4 per diverse geometrie della soglia di sfioro.

Infine, la Figura 26 riporta uno schema altimetrico della Cassa 4, nel quale sono rappresentati i profili altimetrici, ottenuti muovendosi lungo l'asse del corso d'acqua dall'estremità di monte della cassa a quella di valle, del fondo dell'alveo, dell'argine destro attuale del corso d'acqua (confinante con la cassa), di quello sinistro, del massimo livello del pelo libero in alveo, del massimo livello in cassa, della soglia di sfioro e dell'argine destro di progetto, posto a quota minima di 13.00 m s.l.m.m.

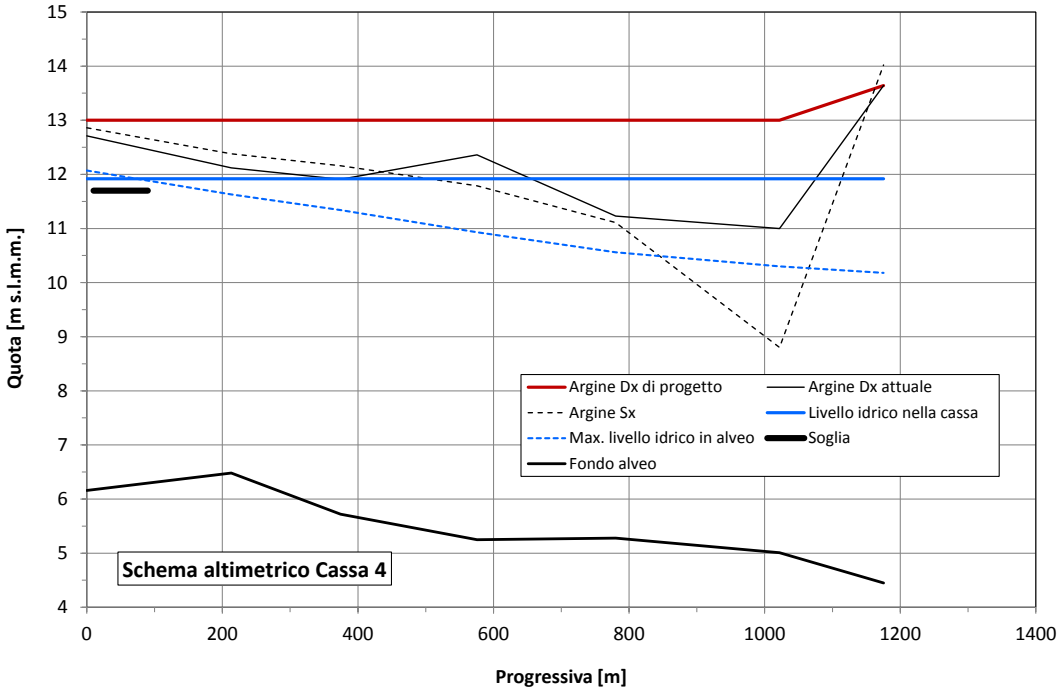


Figura 26 - Schema altimetrico della Cassa 4.

Tutto quanto sopra riportato si riferisce, come in precedenza indicato, al caso in cui nella Cassa 1 sia previsto il rimodellamento del fondo, con ribassamento dello stesso fino ad ottenere una quota media di 10.30 m s.l.m.m. (configurazione denominata, per brevità, Cassa 1 scavata). Relativamente a tale caso, la Tabella 2 riepiloga le caratteristiche geometriche ottimali delle soglie di alimentazione delle varie casse e i principali indicatori di funzionamento delle casse stesse (quota massima del pelo libero in cassa e portata massima al colmo a valle di ciascuna cassa).

Tabella 2 - Riepilogo delle caratteristiche geometriche e funzionali principali delle casse (caso di Cassa 1 con fondo ribassato).

Cassa	*Caratteristiche soglia*		h_{max} *[m s.l.m.m.]*	$Q_{max,v}$ *[mc/s]*
	Lunghezza [m]	*Quota [m s.l.m.m.]*		
Cassa 1	80	14.90	15.50	766
Cassa 2	80	13.80	14.07	736
Cassa 3	80	12.30	12.60	698
Cassa 4	80	11.70	11.92	677

Si ricorda che la portata al colmo dell'onda di riferimento a monte del sistema di casse ammonta a circa 830 mc/s. Si nota come il sistema di casse consenta di abbattere tale colmo di circa 150 mc/s, corrispondenti ad una laminazione del 18.4 % circa.

A completamento dell'informazione riportata in Tabella 2, che si riferisce ai soli colmi di piena, nella Figura 27 si riporta il confronto tra l'idrogramma dell'onda di piena a monte del sistema di casse e gli idrogrammi delle onde a valle di ciascuna cassa, sempre relativamente al caso di prima cassa scavata. Dalla Figura 27 si può anche osservare che l'idrogramma di portata a valle del sistema di casse presenta un andamento abbastanza prossimo a quello che corrisponderebbe a un taglio orizzontale dell'onda in arrivo da monte, caratteristico del funzionamento di un sistema di invaso ideale che opera una laminazione ottimale. Ciò sta a indicare che si è conseguita una buona utilizzazione dei volumi di invaso disponibili.

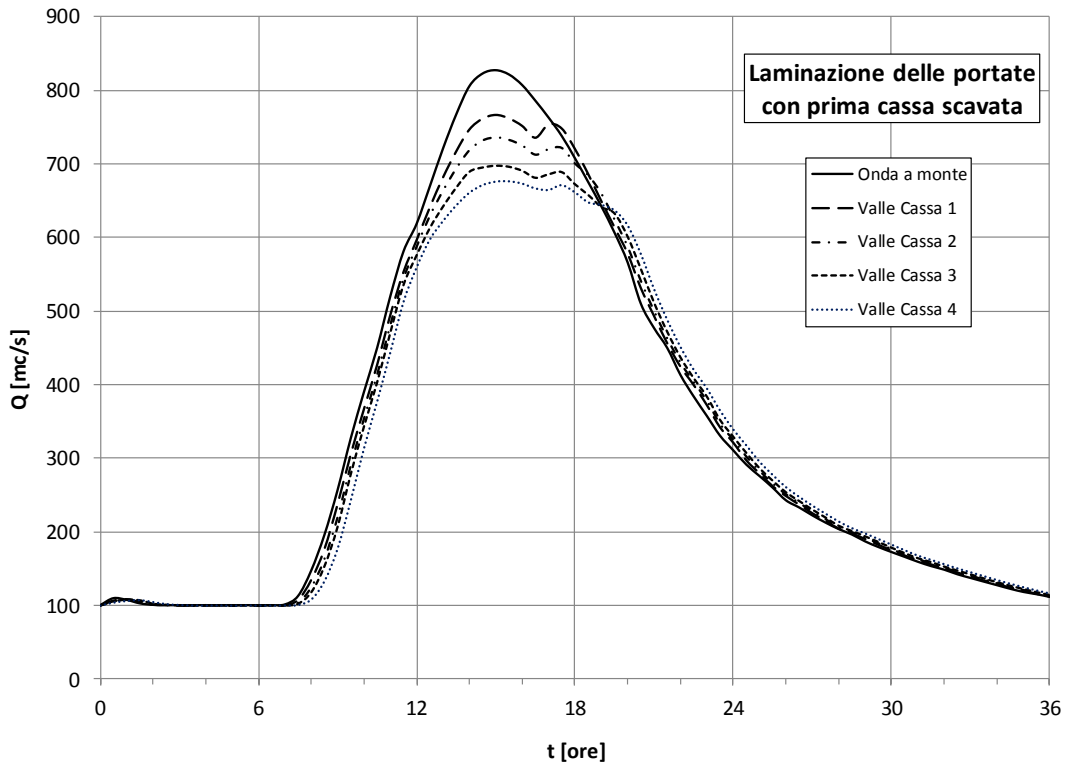


Figura 27 - Confronto tra l'onda di piena a monte del sistema di casse e le onde a valle di ciascuna cassa, nella configurazione con Cassa 1 scavata.

Come già in precedenza indicato, il funzionamento del sistema di casse è stato analizzato e ottimizzato anche in relazione al caso in cui il fondo della Cassa 1 non venga rimodellato, con il ribassamento di cui si è detto, ma venga invece lasciato nell'assetto naturale. I principali risultati ottenuti sono riassunti nella Tabella 3, che riporta le caratteristiche geometriche ottimali delle soglie

di alimentazione delle varie casse e i principali indicatori di funzionamento delle stesse (quota massima del pelo libero in cassa e portata massima al colmo a valle di ciascuna cassa).

Anche relativamente alla configurazione che prevede assenza di rimodellamento del fondo della Cassa 1, sono state eseguite una serie di simulazioni volte ad ottimizzare la geometria delle soglie di sfioro (lunghezza e quota). Come già indicato, e come si può desumere dal confronto Tabella 2 e la Tabella 3, le analisi effettuate hanno mostrato che, a parte la soglia della prima cassa, che cambia apprezzabilmente, le configurazioni ottimali delle soglie delle rimanenti casse differiscono in maniera molto ridotta da quelle ottenute per il caso di Cassa 1 scavata. Pertanto, per tali casse, si sono alla fine mantenuti gli stessi elementi geometrici.

Tabella 3 - Riepilogo delle caratteristiche geometriche e funzionali principali delle casse (caso di Cassa 1 con fondo naturale).

Cassa	*Caratteristiche soglia*		h_{max} *[m s.l.m.m.]*	$Q_{max,v}$ *[mc/s]*
	Lunghezza [m]	*Quota [m s.l.m.m.]*		
Cassa 1	80	15.10	15.48	787
Cassa 2	80	13.80	14.14	753
Cassa 3	80	12.30	12.68	714
Cassa 4	80	11.70	12.00	687

Si nota come, in tal caso, il sistema di casse consenta di abbattere tale colmo di circa 140 mc/s, quindi di circa 10 mc/s in meno rispetto al caso precedentemente illustrato.

Infine, sempre relativamente al caso di prima cassa non scavata, nella Figura 28 viene illustrato il confronto tra l'idrogramma dell'onda di piena a monte del sistema di casse e gli idrogrammi delle onde a valle di ciascuna cassa.

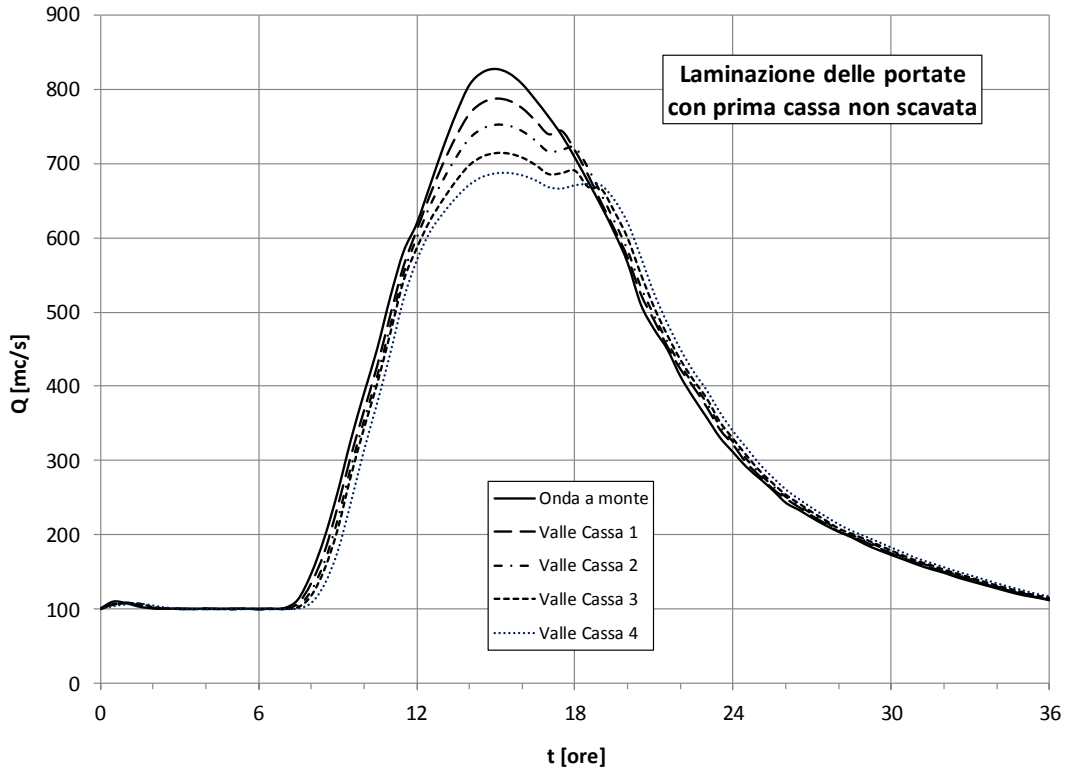


Figura 28 - Confronto tra l'onda di piena a monte del sistema di casse e le onde a valle di ciascuna cassa, nella configurazione con Cassa 1 non scavata.

6. CONCLUSIONI

Nella presente relazione è stato condotto uno studio idrologico-idraulico, volto ad ottimizzare il funzionamento idraulico delle quattro casse di espansione in progetto. Lo studio ha permesso di determinare le dimensioni da assegnare alle opere di alimentazione delle soglie stesse, al fine di massimizzare l'effetto di laminazione delle casse, mitigando l'attuale livello di rischio idraulico per il centro urbano di Pesaro.

L'analisi svolta ha mostrato l'efficacia del sistema di laminazione in progetto che, nella configurazione ottimizzata prescelta, consente di abbattere il colmo dell'onda di piena 200-ennale, assunta a riferimento per il progetto, da circa 830 mc/s a circa 677 mc/s, con una riduzione di circa 150 mc/s, corrispondente a un rapporto di laminazione del 18.4%.

Il risultato ottenuto va considerato ottimale, in considerazione dell'entità dei volumi di laminazione disponibili sul territorio, che appaiono modesti se paragonati ai volumi caratteristici delle piene del fiume Foglia. A dimostrazione di ciò, si può citare il fatto che, come visto in precedenza, l'idrogramma di portata a valle del sistema di casse presenta un andamento abbastanza prossimo a quello che corrisponderebbe a un taglio orizzontale dell'onda in arrivo da monte, caratteristico del funzionamento di un sistema di invaso ideale, in grado di operare una laminazione ottimale dell'onda in arrivo. In definitiva, si può affermare che la soluzione di progetto consegue una buona utilizzazione dei volumi di invaso disponibili del territorio.

Va rilevato però che il funzionamento del sistema di casse è stato verificato in base ad una ben precisa onda di piena di riferimento. Infatti, secondo gli indirizzi ricevuti dagli scriventi, la sollecitazione idrologica è stata in questa sede assunta pari all'idrogramma 200-ennale, stimato in alcuni studi recentemente sviluppati dall'Università di Urbino per conto del Consorzio di Bonifica, e sono stati adottati i modelli matematici messi a punto in tali studi e messi a disposizione degli scriventi. Peraltro, tali indirizzi sono stati condivisi anche con le altre Amministrazioni interessate, in varie occasioni, fra cui, in particolare, la Conferenza preliminare per la verifica degli indirizzi del Progetto di fattibilità, tenutasi ad Ancona il 12 giugno 2018.

Si ritiene quindi doveroso segnalare che appare necessario che, nelle successive attività di studio e in quelle di progettazione definitiva ed esecutiva del sistema delle quattro casse, il sistema di laminazione sia verificato in riferimento a un ampio spettro di sollecitazioni idrologiche. Alla luce di quanto diffusamente evidenziato nella presente relazione, si raccomanda quindi lo sviluppo di un'attività di accurata revisione e aggiornamento delle conoscenze pregresse, finalizzata alla messa a punto di un solido quadro idrologico-idraulico di riferimento. Ciò sarà necessario per poter definire

un prospetto coerente delle portate di piena di assegnato tempo di ritorno e dei profili idraulici attesi lungo l'alveo, cui fare riferimento.

La verifica dell'insieme delle casse in progetto andrà ripetuta sulla base dei nuovi input idrologici nelle successive fasi progettuali, definitiva ed esecutiva. Nell'occasione andrà verificato anche che il funzionamento del sistema di casse, per tempi di ritorno superiori a quello duecentennale, rimanga accettabile, senza determinare sormonti dei rilevati arginali che delimitano le casse stesse, e, eventualmente, prevedere opportune modifiche della configurazione di progetto (soglie e quote arginali) e, se necessario, opere idrauliche integrative. Quest'ultima attività non avrebbe potuto comunque essere condotta in questa sede, in quanto, nello studio cui si è stabilito di fare riferimento, mancano le necessarie stime della sollecitazione idrologica, ad esempio dell'onda 500-ennale. In questa ottica, nelle successive fasi progettuali, sulla base del nuovo quadro idrologico, potrà quindi essere meglio valutata l'opportunità di apportare alcune modifiche alle caratteristiche dimensionali delle opere previste in questa fase o anche di inserire manufatti aggiuntivi rispetto a quelli previsti a questo stadio progettuale, ad esempio opere trasversali a sostegno dei livelli per favorire il riempimento delle casse o scarichi di superficie distinti da quelli di alimentazione, non previsti al presente stadio progettuale in quanto non necessari in riferimento alla sollecitazione idrologica di progetto, qui presa a rifermento. Ciò al fine di ottimizzare il funzionamento delle aree di laminazione, anche in relazione al verificarsi di onde di piena caratterizzate da tempi di ritorno, o da forme, significativamente differenti da quelli dell'onda qui presa a riferimento per il progetto.

La disponibilità di tale quadro conoscitivo di riferimento sarà quindi fondamentale per le fasi progettuali successive e anche per poter individuare, su una base razionale, quali altri interventi, in aggiunta a quelli in progetto, siano necessari per la mitigazione del rischio idraulico della città di Pesaro e, più in generale, degli insediamenti antropici posti lungo il percorso dell'asta del fiume Foglia.

La stessa Conferenza preliminare per la verifica degli indirizzi del Progetto di fattibilità del 12 giugno 2018 ha evidenziato la necessità di implementare, quanto prima, uno studio generale di sistematizzazione, aggiornamento e revisione delle conoscenze del quadro idrologico-idraulico del fiume Foglia e, più nell'immediato, prima dello sviluppo delle successive fasi di progettazione definitiva ed esecutiva, l'effettuazione di un'indagine idraulica specifica atta a verificare la natura e lo stato delle arginature del Foglia, nel tratto a valle delle casse e che interessa l'abitato di Pesaro.

In definitiva, si può quindi concludere che le verifiche idrologico-idrauliche effettuate nell'ambito del presente progetto di fattibilità tecnico-economica e illustrate nel presente elaborato,

pur nella consapevolezza della necessità di approfondimenti di studio successivi di cui si è diffusamente detto, hanno fin d'ora chiaramente evidenziato l'efficacia delle opere di laminazione in progetto da parte del Consorzio di Bonifica delle Marche, ai fini della mitigazione dell'attuale livello di rischio idraulico che interessa la città di Pesaro.

Pesaro, settembre 2018

Prof. Ing. Armando Brath
Ordinario di Costruzioni Idrauliche, Marittime e Idrologia
Università di Bologna

Dott. Geol. Federico Biagiotti