



Comune di Ravenna
Servizio Tutela Ambientale e Territorio - U.O. Geologico

**VALUTAZIONE DELLE CONSEGUENZE PRODOTTE SULLA SPIAGGIA E
SULLE LOCALITÀ BALNEARI LIMITROFE DALLA MASSIMA PIENA
DEL FIUME RENO MEDIANTE ANCHE LA VALUTAZIONE DEL
RISCHIO IDRAULICO NEI TRATTI OGGETTO DI STUDIO**

RELAZIONE



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

Giugno 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

Collaborazioni:
Dott. Luca Grimaldi

INDICE

1. PREMESSA	5
2. QUADRO DELLE CONOSCENZE PREGRESSE.....	7
3. SCENARI ADOTTATI NELLA MODELLAZIONE IDRAULICA.....	9
3.1. Premessa	9
3.2. Stima della sollecitazione idrologica	10
3.3. Stima della condizione al contorno di valle.....	14
3.4. Stima dei parametri di scabrezza	16
3.5. Aspetti inerenti lo schema di modellazione impiegato.....	19
4. RAPPRESENTAZIONE DELLA GEOMETRIA DEL CORSO D'ACQUA.....	21
5. RISULTATI DELLA MODELLAZIONE IDRAULICA.....	27
6. EFFETTI DELLE OPERE PRESENTI IN ALVEO NEL TRATTO TERMINALE DEL CORSO D'ACQUA.....	43

Elenco elaborati cartografici allegati

Tav. 1 - Planimetria generale. Scala 1 : 100.000

Tav. 2 - Planimetria di dettaglio. Scala 1 : 50.000

Tav. 3 - Profili del pelo libero per gli eventi di piena di tempo di ritorno T=25 e 100 anni.

Tav. 4 - Confronto tra i profili del pelo libero degli eventi di piena di tempo di ritorno T=25 e 100 anni, in assenza ed in presenza dei capanni da pesca.

1. PREMESSA

Il Comune di Ravenna ha recentemente ritenuto necessario acquisire conoscenze specifiche sugli effetti indotti dalle massime piene dei fiumi che interessano il territorio di propria competenza.

Ciò in quanto, per il Comune, rivestiva particolare interesse la valutazione degli effetti degli ostacoli presenti nelle golene fluviali, quali chiuse, briglie, prese, ponti, capanni da pesca ed altri, che potrebbero comunque in qualche modo comportare un aumento del livello dell'acqua all'interno della singola asta fluviale. Il Comune era anche interessato a sviluppare un'analisi che mettesse in evidenza eventuali tratti ove possa ritenersi più probabile il verificarsi di un sormonto arginale della portata in esame, in modo tale da definire comunque il livello massimo dell'acqua all'interno dell'alveo raggiungibile nella zona prossima alla foce del fiume, ma tenendo conto dell'effetto delle esondazioni a monte.

Stante la consapevolezza delle problematiche di cui sopra, il Servizio Tutela Ambiente e Territorio - U.O. Geologico del Comune di Ravenna ha ritenuto innanzitutto di sviluppare uno studio finalizzato alla "Valutazione delle conseguenze prodotte sulla spiaggia e sulle località balneari limitrofe, dalla massima piena dei fiumi Savio, Uniti, Lamone e torrente Bevano, mediante anche la valutazione del rischio Idraulico nei tratti oggetto di studio". Lo studio, redatto dallo scrivente, è stato completato e consegnato nel febbraio 2018.

Successivamente, il Comune di Ravenna ha ritenuto di svolgere analogha indagine anche sul corso del fiume Reno, conferendo un incarico professionale allo scrivente, avente finalità analoghe al precedente.

Il presente elaborato costituisce la relazione finale sulle attività svolte nell'ambito di tale studio. La relazione è corredata da alcuni elaborati cartografici allegati, che sono da considerarsi parte integrante della stessa.

Le attività relative al presente studio hanno avuto inizio a seguito della comunicazione dell'avvenuta efficacia della determina di affidamento, avvenuta in data 28 febbraio 2018. Esse hanno previsto la raccolta della cartografia, in parte fornita dal Comune di Ravenna in parte reperita presso i competenti uffici della Regione Emilia-Romagna.

Sono stati poi acquisiti i rilievi topografici resi disponibili dall'Agenzia Regionale per la Sicurezza Territoriale e la Protezione Civile dell'Emilia-Romagna, sede di Bologna, le stime delle onde di piena del corso d'acqua per assegnati valori dei tempi di ritorno nelle sezioni di interesse, derivanti dagli

studi a suo tempo condotti dall’Autorità di Bacino del fiume Reno, e le geometrie, in formato testo, delle sezioni trasversali rappresentate nei modelli matematici a suo tempo sviluppati per la simulazione della propagazione delle piene nel corso d’acqua di interesse, messe a disposizione dal Servizio Area Reno e Po di Volano (ex Servizio Tecnico di Bacino Reno) dell’Agenzia regionale per la sicurezza territoriale e la protezione civile della Regione Emilia-Romagna.

2. QUADRO DELLE CONOSCENZE PREGRESSE

Il quadro conoscitivo sulla situazione di rischio idraulico del territorio di interesse, disponibile all'epoca della redazione del presente studio, si compone degli studi svolti dall'Autorità di Bacino Interregionale del fiume Reno, istituita a seguito della L. 183/1989 "Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo", attraverso l'intesa tra le Regioni Emilia-Romagna e Toscana, approvata con Del. Consiglio Reg. Emilia-Romagna 3108 del 19 maggio 1990 e con Del. Consiglio Reg. Toscana 183 del 20 marzo 1990.

L'Autorità di Bacino Interregionale del fiume Reno è stata soppressa con DM 25/10/2016. Infatti, già con la legge 152/2006 il territorio di competenza dell'Autorità, era stato ricompreso all'interno del Distretto idrografico dell'Appennino Settentrionale. Con la legge 221 del 28/12/2015 (collegato ambientale alla Legge di Stabilità 2016), però, il territorio di competenza è stato poi inserito nel Distretto Padano, unitamente a quelli dell'Autorità di Bacino dei Fiumi Romagnoli e dell'Autorità di Bacino Marecchia-Conca.

Di fatto l'Autorità di Bacino del fiume Reno ha continuato a operare come "Unit of Management" (Unità di Gestione, ambito territoriale di riferimento) nell'ambito del Distretto dell'Appennino Centrale e poi del Distretto Padano, fino al 17 febbraio 2017. In tale giorno, è entrato in vigore il D.M. 25 ottobre 2016 (G.U n. 27 del 2 febbraio 2017), che sopprime le Autorità di bacino nazionali, interregionali e regionali e disciplina l'attribuzione e il trasferimento del personale e delle risorse strumentali e finanziarie alle Autorità di bacino distrettuali.

L'Autorità di Bacino del Reno ha svolto numerosi indagini, studi e attività conoscitive, emanando, a partire dal 1999, quattro piani stralcio che coprono tutto il territorio di competenza. Una prima finalizzazione di sintesi delle attività svolte si è avuta con la redazione del Progetto di Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico, adottato dal Comitato Istituzionale dell'Autorità con Delibera 2/1 dell'8 giugno 2001. L'iter di pianificazione è proseguito con le modifiche apportate a seguito delle osservazioni e dei pareri espressi sul Progetto di Piano. Per quanto riguarda l'asta principale del fiume Reno, qui di interesse, l'approdo finale è consistito nella redazione del Piano Stralcio Assetto Idrogeologico, che interessa il fiume Reno, il torrente Idice-Savena Vivo, il torrente Sillaro e il torrente Santerno e che è stato definitivamente adottato dal Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino con delibera 1/1 del 6 dicembre 2002. L'iter amministrativo del Piano si è concluso, per quanto riguarda il territorio di competenza della Regione Emilia-Romagna, con la deliberazione di approvazione della Giunta Regionale n. 567 del 07.04.2003 e con la pubblicazione

del Piano sul B.U. della Regione Emilia-Romagna il 14.05.2003, pubblicazione che ne ha sancito l'entrata in vigore.

Come è noto, nelle more dell'istituzione delle Autorità di Distretto, le Autorità di Bacino Nazionali hanno provveduto alla redazione dei Piani di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA), strumento di pianificazione relativo alla valutazione e gestione del rischio di alluvioni previsto dalla Direttiva Europea 2007/60/CE (c.d. Direttiva Alluvioni), recepita nell'ordinamento italiano con il D.Lgs. 49/2010. Per quanto riguarda il territorio di interesse, le attività espletate nell'ambito della redazione del PGRA attualmente vigente sono state quindi svolte all'interno del Distretto idrografico dell'Appennino Settentrionale.

Il 3 marzo 2016, il Comitato Istituzionale Integrato delle Autorità di Bacino nazionali, con Delibera n. 235, ha approvato i Piani di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA) realizzati dalle UoM del Distretto idrografico Appennino Settentrionale, tra cui Reno (UoM ITI021), Regionali Romagnoli (UoM ITR081), Marecchia-Conca (UoM ITI01319).

In base al quadro descritto, e in base alle indicazioni ricevute dal Servizio Area Reno e Po di Volano (ex Servizio Tecnico di Bacino Reno) dell'Agenzia regionale per la sicurezza territoriale e la protezione civile della Regione Emilia-Romagna, il quadro delle conoscenze pregresse che risultano di interesse per il presente studio si compone essenzialmente dei seguenti documenti, che sono stati messi a disposizione dello scrivente dallo stesso Servizio Area Reno e Po di Volano:

- Autorità di Bacino del Reno, "Studio idraulico del fiume Reno a valle del Ponte del Gallo" (a cura dell'ing. Giuseppe Menna), giugno 1999.
- Autorità di Bacino del Reno, "Studio idraulico del fiume Reno dalla chiusa di Casalecchio a ponte del Gallo e dei torrenti Samoggia da Bazzano allo sfocio in Reno e Lavino da ponte Rivabella allo sfocio in Samoggia. Verifica delle condizioni di deflusso in piena e proposte di intervento" (a cura del DISTART, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna, febbraio 1997).
- Autorità di Bacino del Reno, "Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico II. Rischio Idraulico e Assetto Rete Idrografica II.1 Bacino del fiume Reno. Relazione", dicembre 2002.

3. SCENARI ADOTTATI NELLA MODELLAZIONE IDRAULICA

3.1. Premessa

Il presente incarico prevede la modellazione matematica della propagazione delle onde di piena del fiume Reno a partire dalla via Adriatica (SS16, località Argenta) al mare. Per fornire una visione di insieme del bacino del fiume Reno, si ritiene utile riportare la Figura 1, tratta dagli studi prodotti dall’Autorità di Bacino del fiume Reno; in tale figura è agevolmente possibile identificare il tracciato complessivo del corso d’acqua, la posizione dell’abitato di Argenta e, di conseguenza, il tratto di specifico interesse per il presente studio.

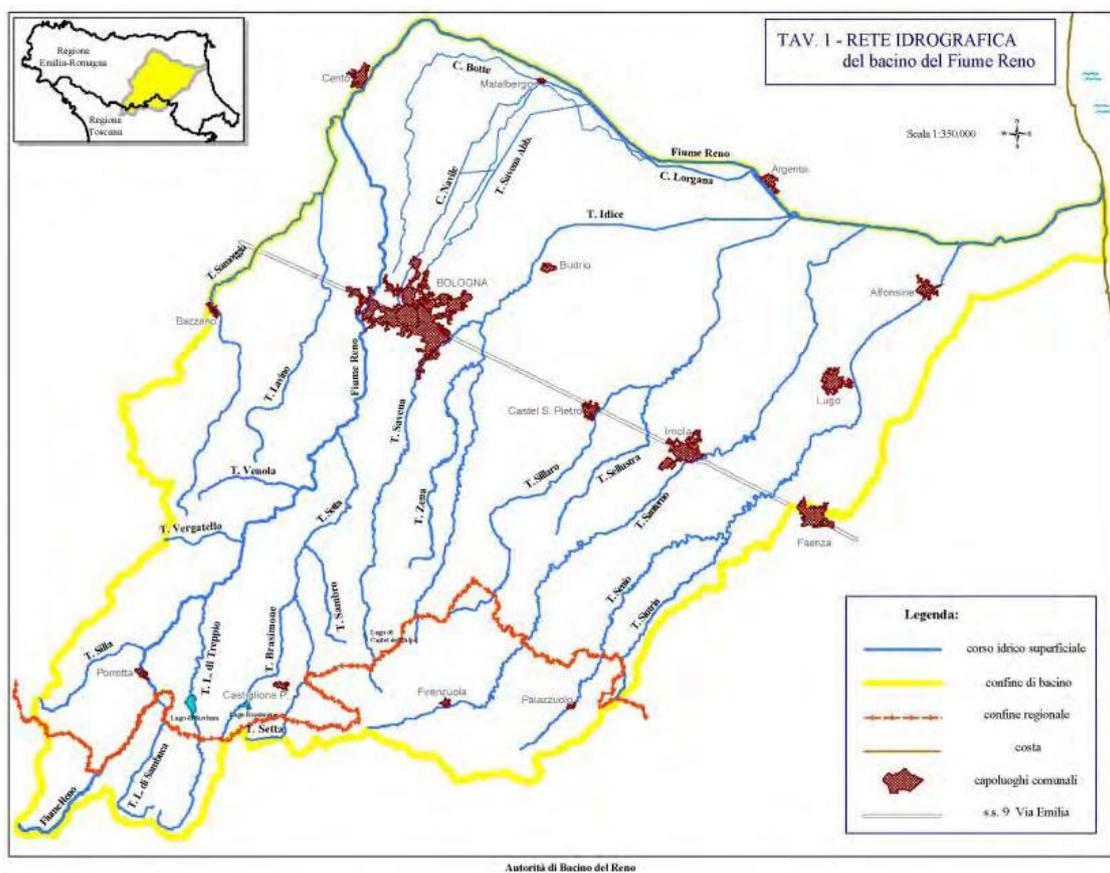


Figura 1 – Bacino del fiume Reno e reticolo idrografico principale (fonte: Autorità di Bacino del Reno).

Per la modellazione matematica relativa ad un assegnato valore del tempo di ritorno, risulta necessario disporre della stima dell’onda di piena di pari tempo di ritorno nella sezione di inizio del tratto di interesse, che costituisce la sollecitazione idrologica in input al modello matematico

utilizzato per la simulazione della propagazione delle piene del corso d'acqua, ovvero la condizione al contorno da apporre all'estremità di monte del modello stesso.

3.2. Stima della sollecitazione idrologica

Per la definizione della sollecitazione idrologica in ingresso, coerentemente con quanto stabilito nel capitolato dell'incarico, si è fatto riferimento alle stime delle onde di piena adottate nell'esistente pianificazione di bacino. Tale impostazione, oltre che essere coerente con le specifiche del disciplinare di incarico, si può ritenere ragionevole, in quanto rende possibile un confronto omogeneo tra i risultati del presente studio e quelli della pianificazione di bacino (PAI, PGRA).

Di conseguenza, per caratterizzare le onde di piena del fiume Reno in corrispondenza dell'attraversamento della SS16, si è fatto riferimento alle stime delle onde desumibili dagli studi condotti in passato dall'Autorità di Bacino del fiume Reno. La fonte documentale nella quale è possibile rinvenire le informazioni di maggiore utilità è il citato "Studio idraulico del fiume Reno a valle del Ponte del Gallo" (Autorità di Bacino del Reno, a cura dell'ing. Giuseppe Menna, giugno 1999). In detto studio sono contenute le stime degli idrogrammi delle portate di piena relativi ai tempi di ritorno 25-ennale e 100-ennale in corrispondenza del ponte del Gallo (circa 31 km a monte di Argenta); queste stime, come di seguito discusso, sono state utilizzate per caratterizzare la sollecitazione in ingresso al modello impiegato nel presente studio. Detti idrogrammi costituiscono peraltro una delle risultanze del citato "Studio idraulico del fiume Reno dalla chiusa di Casalecchio a ponte del Gallo", realizzato dal DISTART dell'Università di Bologna nell'anno 1997, sempre per conto dell'Autorità di Bacino del fiume Reno; gli idrogrammi di portata al ponte del Gallo costituiscono infatti uno dei prodotti della modellazione matematica implementata in quest'ultimo studio, anche se non sono direttamente desumibili dalla relazione finale di tale studio, messa a disposizione dello scrivente; pertanto essi sono stati desunti dallo studio dell'Ing. Menna.

Le stime delle onde di piena di progetto disponibili sono, come detto, relative ai tempi di ritorno $T=25$ e $T=100$ anni; si dispone delle onde riferite ai due seguenti scenari, entrambi simulati nello studio del DISTART (v. Figura 2):

- funzionamento a pieno regime del Cavo Napoleonico (v., in Figura 2, Opera Reno, posta alla progressiva 42.454 km); portata massima defluibile nel cavo in condizioni di piena pari a $Q_{\text{cavo}}=500$ mc/s), in contemporaneità con le casse di espansione previste nello stesso studio

DISTART, ubicate nelle località Trebbo di Reno e Bagnetto per il fiume Reno e nella frazione Le Budrie per il torrente Samoggia;

- funzionamento a pieno regime del Cavo Napoleonico (portata massima defluibile nel cavo in condizioni di piena pari a $Q_{cavo}=500$ mc/s), escludendo le casse di espansione previste nello stesso studio DISTART.

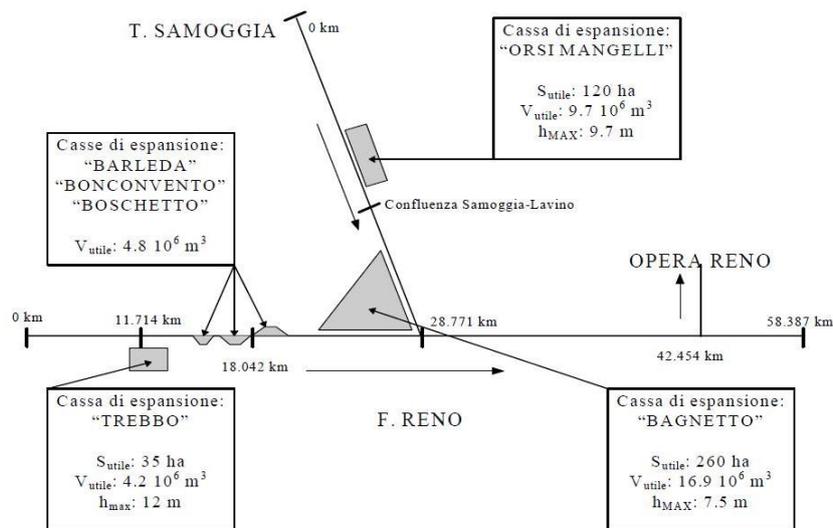


Figura 2 – Schema degli invasi di laminazione previsti nel sistema Reno-Samoggia

Dato che le casse di espansione sono tuttora in fase di realizzazione, questo secondo scenario rappresenta quello più aderente alla situazione attuale e pertanto si è fatto riferimento ad esso per la stima delle onde di piena al ponte del Gallo (progr. 58.387 km in Figura 2).

Le stime delle onde di piena sono, come detto, disponibili per la sezione del ponte del Gallo, che è ubicata circa 31 km a monte dell'intersezione del tracciato del fiume con la SS16 (in località Argenta); quest'ultima, in base alle specifiche dell'incarico, doveva costituire la sezione iniziale del tratto oggetto del presente studio. In ragione della disponibilità dell'informazione sulle onde, il tratto oggetto di studio è stato prolungato verso monte, ponendo la sezione iniziale della modellazione proprio in corrispondenza del ponte del Gallo. Di conseguenza il tratto rappresentato nel modello matematico impiegato in questa sede si estende dal ponte del Gallo alla foce a mare.

In merito agli idrogrammi disponibili al ponte del Gallo, va poi osservato che, come già indicato, essi sono relativi ai tempi di ritorno 25-ennale e 100-ennale, mentre nel disciplinare relativo

al presente incarico era prevista la modellazione delle onde relative a tempo di ritorno $T=100$, 150 e 200 anni. In accordo con il Committente, vista la disponibilità dei dati esistenti e messi disposizione dal Servizio Area Reno e Po di Volano, ed anche sulla base di quanto emerso negli incontri avuti con lo stesso Servizio, si è ritenuto ragionevole di focalizzare il presente studio sulla modellazione della propagazione delle onde aventi $T=25$ anni e $T=100$ anni di tempo di ritorno. Tale scelta corrisponde a fare riferimento agli stessi tempi di ritorno considerati negli studi a supporto della pianificazione di bacino; essa appare ragionevole e opportuna non solo e non tanto per ragioni di disponibilità di dati ma anche per avere la possibilità di istituire confronti significativi tra i risultati ottenuti nel presente studio e quelli della pianificazione di bacino.

Nella Figura 3 sono riportate le stime delle onde di piena di tempo di ritorno $T=25$ e $T=100$ anni del fiume Reno al ponte del Gallo desunte dallo studio citato, attraverso apposita digitalizzazione delle figure contenute all'interno dell'elaborato descrittivo dello studio stesso. Si ricorda che, nel presente studio, sono state considerate le onde relative al caso di funzionamento del solo Cavo Napoleonico, in assenza quindi di casse di espansione. La portata al colmo dell'onda 25-ennale è pari a 405 mc/s; quella dell'onda 100-ennale a 670 mc/s.

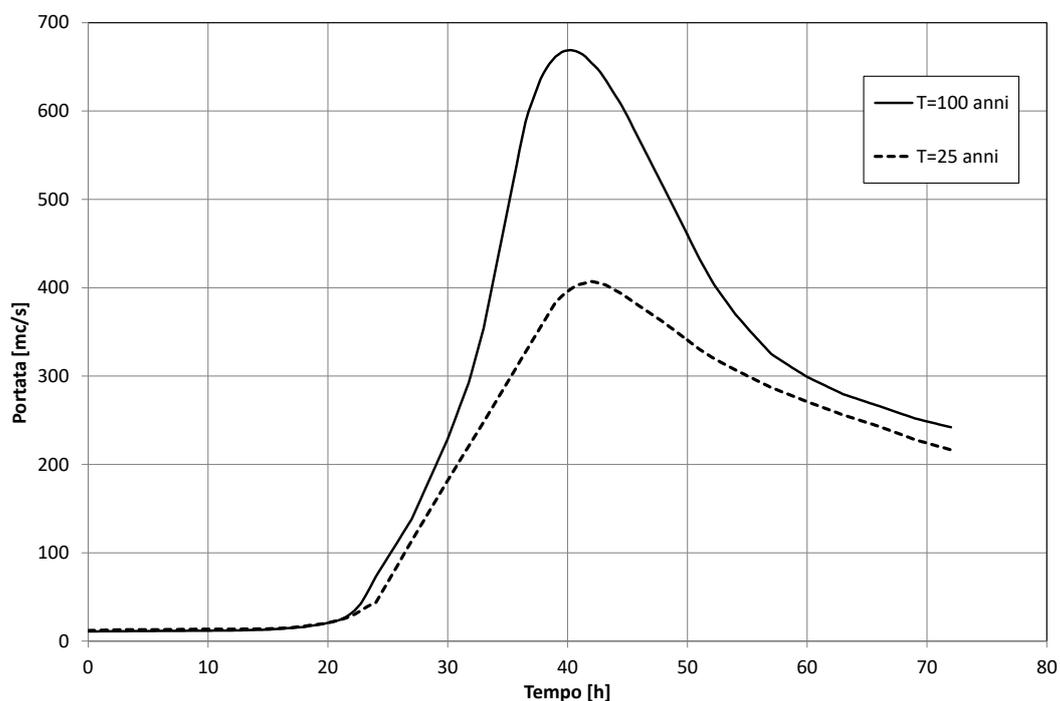


Figura 3 – Idrogrammi di piena del fiume Reno al ponte del Gallo per $T=25$ e $T=100$ anni, desunti dagli studi dell'Autorità di Bacino del fiume Reno.

Si nota come dette onde siano prive di una parte significativa del ramo di esaurimento; sebbene la circostanza possa essere considerata influente ai fini del calcolo dei massimi profili del

pelo libero di piena, si è ritenuto comunque opportuno ricostruire la parte del ramo di esaurimento di ciascun idrogramma, mancante nello studio originario.

Tale ricostruzione è stata effettuata partendo dalla constatazione della nota circostanza che, nel ramo di esaurimento della piena di un corso d'acqua, la portata al tempo t , $Q(t)$, è solitamente ben regolarizzabile, a partire da un certo istante di tempo t_o , attraverso una legge matematica di decadimento esponenziale, avente equazione:

$$Q(t) = Q_o \cdot e^{-(t-t_o)/k} \quad (1)$$

essendo:

$$Q_o = Q(t_o) \quad (2)$$

Si è constatato, previa trasformazione logaritmica delle onde di piena, che tale comportamento è ben verificato dagli idrogrammi in questione; sono stati quindi stimati i parametri Q_o e k della (1) e quindi, attraverso questa equazione, sono state ottenute, per estrapolazione, le parti mancanti dei rami di esaurimento degli idrogrammi, che sono rappresentate nella Figura 4.

Gli idrogrammi riportati in Figura 4 costituiscono la sollecitazione idrologica applicata all'estremità di monte del modello matematico, costruito per la simulazione della propagazione dell'onda di piena nel tratto terminale del fiume Reno.

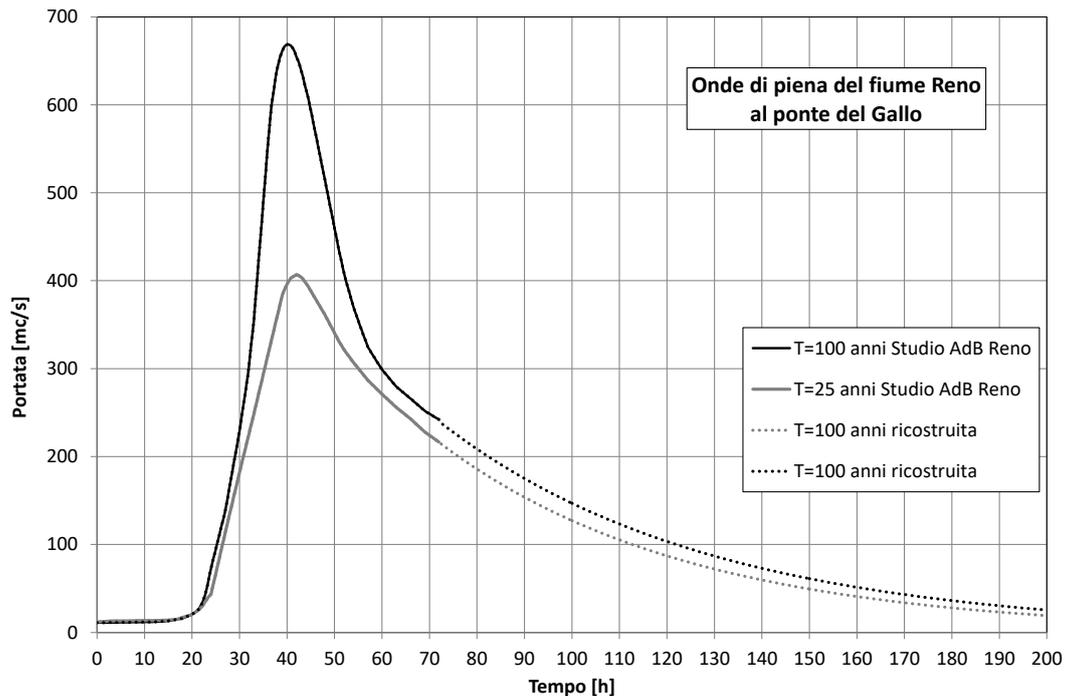


Figura 4 - Idrogrammi di piena del fiume Reno al ponte del Gallo per $T=25$ e $T=100$ anni, desunti dagli studi dell'Autorità di Bacino del fiume Reno, completati con la ricostruzione della parte mancante del ramo di esaurimento della piena.

3.3. Stima della condizione al contorno di valle

Per quanto riguarda la scelta della condizione al contorno, da imporre alla sezione posta all'estremità di valle del tratto modellato del corso d'acqua di interesse, tenuto conto che tale sezione coincide con lo sbocco a mare, si è assunto un valore costante di livello pari al massimo livello del mare registrato durante l'evento del 5-6 febbraio 2015 al mareografo di Ravenna Porto Corsini, pari a 1.21 m s.l.m.m. Nella Figura 5 si riporta l'andamento del livello del mare durante la mareggiata citata. Per tale strumento, che fa parte della Rete Mareografica Nazionale (RMN) gestita da ISPRA, si dispone di una serie storica praticamente ininterrotta dal 1998 ad oggi, con dati ogni 10 minuti; il dato di livello del mare di 1.21 m s.l.m.m., registrato alle ore 23:40 del 5 febbraio, è assunto come condizione di sbocco a mare nelle simulazioni, è il più alto mai osservato dalla stazione mareografica. Il precedente valore massimo registrato dalla stazione era stato di 1,16 m s.l.m.m., registrato il 31 ottobre 2012.

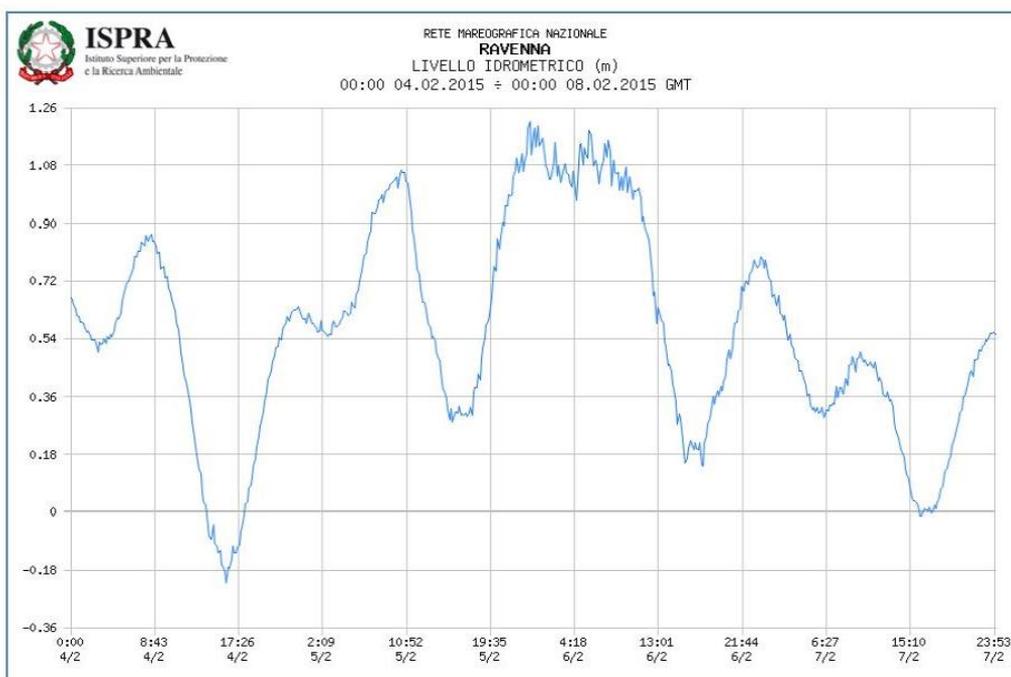


Figura 5 – Livello del mare registrato dal mareografo di Ravenna Porto Corsini durante la mareggiata del febbraio 2015.

Si rileva che la condizione al contorno impiegata nel presente studio è differente da quella utilizzata nello “Studio idraulico del fiume Reno a valle del Ponte del Gallo” del giugno 1999. Dalla relazione dello studio citato, si ricava che, in quella sede, è stata utilizzata “una scala di deflusso nella sezione di chiusura di Volta Scirocco Monte (sez. n.236), in via analitica, risolvendo l’equazione di moto uniforme delle correnti a pelo libero”. Al riguardo (v. anche Tavola 3), si segnala incidentalmente che la menzionata sezione di Volta Scirocco monte è di fatto presumibilmente la 224, che si trova immediatamente a monte della traversa, e non la 236, come indicato nella relazione dello studio citato, sebbene tale sezione non sia quella terminale del tratto indagato nello studio stesso (che parrebbe invece coincidere con la 236 del presente studio); tale circostanza parrebbe confermata anche dalla coincidenza della quota di fondo (-5.88 m s.l.m.m.), riportata nella relazione citata, e di quella desumibile per la sezione 224 dal profilo, riportato nell’allegata Tavola 3.

Si rileva poi che l’adozione di una condizione di deflusso a moto uniforme in corrispondenza della sezione citata non appare appropriata a descrivere le reali condizioni di deflusso. La differente scelta della condizione al contorno di valle ha comportato, nel tratto a cavallo della traversa, significative differenze tra i profili di pelo libero ottenuti in questa sede e quelli ottenuti nel citato studio dell’Autorità di Bacino, come di seguito meglio precisato.

3.4. Stima dei parametri di scabrezza

Per la caratterizzazione delle resistenze al moto, si è utilizzata in questa sede la legge di resistenza di Gauckler-Strickler:

$$V = c \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2} \quad (3)$$

essendo c ($m^{1/3}/s$) il parametro di scabrezza secondo Gauckler-Strickler, V (m/s) la velocità media della corrente nella sezione trasversale, J (-) la cadente idraulica (perdita di energia meccanica della corrente per unità di peso di fluido e unità di percorso) e R (m) il raggio idraulico della sezione, definito come:

$$R = \frac{A}{P} \quad (4)$$

in cui A rappresenta l'area della sezione liquida e P il perimetro bagnato.

Per la scelta dei valori del parametro di scabrezza c da assegnare ai vari tratti del corso d'acqua, in questa sede si è ritenuto di adottare i medesimi valori a suo tempo assunti nello studio dell'Autorità di Bacino del Reno più volte citato; tali valori erano stati desunti in base a una taratura relativa all'evento di piena del settembre 1994 (portata al colmo del fiume Reno al ponte del Gallo pari a 250 mc/s), utilizzando le misure dei livelli semiorari registrati agli idrometri di Gandazzolo, Beccara Nuova e Volta Scirocco Monte (v. Figura 6). La disponibilità delle misure di altri teleidrometri posti sugli affluenti aveva permesso di ricostruirne i contributi degli stessi alla piena del fiume Reno.

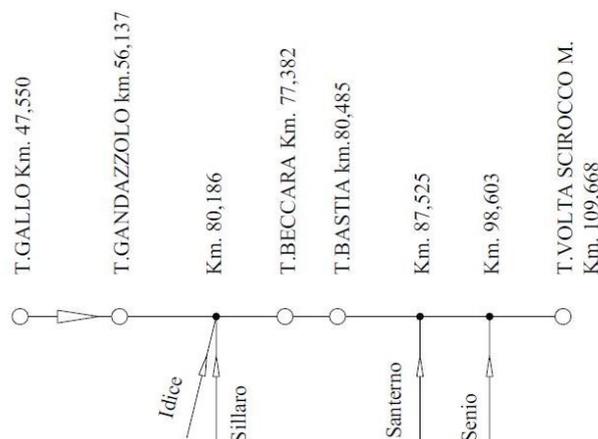


Figura 6 – Posizione dei teleidrometri utilizzati per la taratura del modello idraulico, condotta nello studio dell'Autorità di Bacino del Reno.

Lo studio dell'Autorità di bacino faceva però uso, per il calcolo del coefficiente di resistenza di Chezy, dell'espressione di Gauckler-Strickler, ma utilizzando in luogo del raggio idraulico R , assai più comunemente usato, il cosiddetto raggio resistente R_* , definito come:

$$\sqrt{R_*} = \frac{1}{A} \cdot \int_0^B y^{3/2} \cdot db \quad (5)$$

in cui y è la profondità locale della corrente nel tratto di sezione trasversale di larghezza elementare db e B la larghezza totale della sezione al pelo libero.

Applicando la formulazione del raggio resistente invece del raggio idraulico, l'equazione di Gauckler-Stricker si modifica nella:

$$V = c_* \cdot R_*^{2/3} \cdot J^{1/2} \quad (6)$$

Dalla taratura, utilizzando la formulazione del raggio resistente ovvero quella del raggio idraulico, si ottengono ovviamente coefficienti di scabrezza c_* differenti dai coefficienti c .

Utilizzando i valori dei coefficienti di scabrezza c_* , ricavati attraverso la taratura nello studio citato per i vari tronchi, i corrispondenti valori di c possono essere ottenuti attraverso l'equazione empirica:

$$c = c_* \cdot k \quad (7)$$

La (7), noto k , consente di trasformare i valori di c_* , riportati nello studio citato e desunti dalla taratura condotta in quella sede sulle osservazioni dell'evento di piena del 1994, in quelli di c , necessari per l'applicazione del modello matematico impiegato nel presente studio, basato sull'uso del raggio idraulico (anziché del raggio resistente).

Il valore ottimale di k , da inserire nella (7), è stato ricavato per tentativi; si è adottato infatti quel valore di k che consente il migliore adattamento tra i profili 25-ennali e 100-ennali calcolati con il modello qui impiegato, basato sull'uso del raggio idraulico, e i profili di pari tempo di ritorno

riportati nello studio citato, basati sull'impiego del raggio resistente. Il tratto su cui è stato ottimizzato l'adattamento tra i profili è quello a monte del ponte della SP15, in quanto il tratto posto a valle è significativamente influenzato, in misura via via più marcata man mano che ci si avvicina alla foce, della differente scelta nella condizione al contorno di valle.

Applicando la procedura descritta, si sono così ottenuti i valori del coefficiente di scabrezza c secondo Gauckler-Strickler riportati in Tabella 1.

Tabella 1 – Valori dei coefficienti di resistenza di Gauckler-Strickler impiegati nei diversi tratti d'alveo

Tratto	Sezione iniziale	Sezione finale	Lunghezza tronco [m]	c [$m^{1/3} \cdot s^{-1}$]
Gallo- Gandazzolo	102	116	6741	11.11
Gandazzolo-Beccara	116	158	21132	14.11
Beccara-Bastia	158	164	3147	11.67
Bastia-Volta Scirocco	164	Foce	34743	13.89

A conferma del buon esito della procedura di calibrazione dei valori di c (taratura), si sono confrontati i profili dei massimi livelli delle piene 25-ennale e 100-ennale, calcolati con il modello matematico implementato nel presente studio, con quelli di pari tempo di ritorno riportati nello studio dell'Autorità di Bacino del fiume Reno più volte citato; dal confronto è stato possibile verificare una buona concordanza fra i profili.

Fa eccezione, come atteso, il tratto terminale del tronco in studio, in prossimità della foce; ivi, come già anticipato, si rileva una significativa differenza nei risultati, riconducibile alla diversa schematizzazione adottata per la condizione al contorno di valle. In corrispondenza della traversa di Volta Scirocco, i profili ottenuti nel presente studio sono infatti risultati più bassi, rispetto a quelli ritraibili dallo studio citato, di circa 1 m per $T=100$ anni e di circa 60 cm per $T=25$ anni; le differenze nei livelli dei due profili vanno attenuandosi proseguendo verso monte in direzione del ponte della SP15, risultando trascurabili già circa 7 km a monte della traversa per $T=25$ anni e circa 10 km a monte della stessa per $T=100$ anni.

Si ritiene utile ricordare qui le perplessità già espresse sulla scelta della condizione al contorno di valle adottata nello studio citato; in proposito, può essere ulteriormente segnalato che, esaminando i profili riportati nella relazione dello studio citato, si riscontrano valori della quota

liquida nella sezione terminale del tratto investigato (ovvero nella sezione di sbocco a mare) pari a poco più di 2 m s.l.m.m. per T=25 anni (v. profilo riportato nell'Allegato 11 della relazione citata) e a circa 3 m s.l.m.m. per T=100 anni (v. profilo riportato nell'Allegato 13 della relazione citata, estrapolato alla sezione terminale); i valori indicati, che rappresentano valutazioni poco realistiche dei livelli del mare, ovviamente influenzano anche i livelli che si verificano nella porzione terminale del tratto di corso d'acqua oggetto di indagine.

3.5. Aspetti inerenti lo schema di modellazione impiegato

Come in precedenza indicato, il presente incarico prevedeva che dovesse essere espletata la valutazione dei "massimi livelli di piena che, in funzione delle sezioni idrauliche, possano interessare il Comune di Ravenna, tenendo conto delle esondazioni a monte" e inoltre l'identificazione, "nel caso possa verificarsi insufficienza idraulica, dei tratti fluviali in Comune di Ravenna interessati da esondazione per sormonto arginale". Ciò che veniva richiesto di indagare corrisponde a quello che viene normalmente indicato come uno scenario "ad esondazioni non impedito"; in pratica si tratta di operare con un modello di propagazione monodimensionale, considerando che, al raggiungimento in una certa sezione della sommità arginale, l'acqua possa fuoriuscire dall'alveo riversandosi a campagna. La fuoriuscita di volumi idrici dall'alveo verso campagna può essere modellata schematizzando la presenza di uno sfioratore laterale a larga soglia, disposto con continuità lungo il rilevato arginale, a quota coincidente con la sommità di quest'ultimo. A seconda di come viene modellato il comportamento dell'esondazione a campagna, si possono avere "modelli ad esondazioni libere", "modelli quasi-bidimensionali" o modelli "bidimensionali". Tralasciando la descrizione di questi ultimi, nel seguito si evidenziano le differenze esistenti tra i rimanenti modelli e i campi di applicazione più appropriati.

Nell'approccio "quasi-bidimensionale", le aree a campagna limitrofe al corso d'acqua vengono schematizzate come celle idrauliche laterali, connesse all'alveo del corso d'acqua ed eventualmente anche interconnesse fra loro. La delimitazione delle celle idrauliche viene fatta in funzione della morfologia dell'area e della presenza di ostacoli naturali rilevanti, come rilevati stradali e ferroviari, corsi d'acqua o canali particolarmente significativi. In pratica, l'area a campagna viene trattata come se fosse costituita da una serie di casse di espansione, connesse al corso d'acqua e, in alcuni casi, anche fra di loro. Per ciascuna cella idraulica, in funzione della morfologia del territorio, viene ricavata la curva dei volumi invasati in funzione dell'altezza d'acqua. Attraverso un modello di questo

tipo è possibile pervenire a definire l'andamento del livello nel tempo in ciascuna cella idraulica e quindi, in particolare, il massimo valore del tirante idrico in ciascun punto della cella.

Nel caso di un "modello ad esondazioni libere", cambia la schematizzazione del comportamento idraulico dell'area a campagna: infatti, l'estensione dell'area esondabile a campagna viene considerata così ampia che il battente che si forma fuori alveo può di fatto essere assunto trascurabile e comunque non di entità tale da permettere all'acqua di rientrare in alveo durante la piena e nemmeno tale da rigurgitare la corrente uscente dall'alveo stesso. In pratica, il modello ad esondazioni libere si attaglia bene alle situazioni in cui le aree esondabili a campagna siano molto ampie, mentre, qualora ciò non avvenga, è opportuno ricorrere a schemi quasi-bidimensionali, che comunque richiedono una descrizione accurata della geometria del terreno al fuori dell'alveo, o in alternativa proseguire con un'impostazione puramente monodimensionale ma ricercando un confine all'esondazione lato campagna e estendendo la sezione fluviale fino a quest'ultimo, eventualmente considerando l'area laterale come area di invaso ("ineffective flow area").

Incidentalmente, va osservato che sia lo schema ad esondazioni libere che quello quasi-bidimensionale, prima illustrati, adottano di fatto implicitamente l'ipotesi di argini inerodibili in caso di tracimazione; questa ipotesi è di fatto poco realistica, anche se viene comunemente accettata. Nella realtà, infatti, in caso di sormonto, gli argini sono destinati, con elevata probabilità, ad essere erosi, con conseguente formazione di brecce e rotte arginali, che modificano la geometria del sistema e quindi alterano profondamente la distribuzione dei volumi di esondazione a campagna, rispetto all'ipotesi di argini inerodibili.

Nel caso in esame, il problema della scelta della rappresentazione del comportamento del territorio a campagna secondo uno scenario ad "esondazioni non impedito" di fatto non sussiste. Infatti, come si vedrà, negli scenari considerati (idrogrammi al ponte del Gallo relativi a piene aventi $T=25$ e $T=100$ anni, con funzionamento del Cavo Napoleonico secondo le specifiche indicate), i livelli di piena risultano sempre inferiori a quelli delle sommità arginali e pertanto non si verificano esondazioni a campagna.

Con queste avvertenze, è possibile passare alla discussione dei risultati ottenuti, riportata nei capitoli seguenti.

4. RAPPRESENTAZIONE DELLA GEOMETRIA DEL CORSO D'ACQUA

La geometria del corso d'acqua all'interno del modello matematico è stata rappresentata avvalendosi del rilievo topografico messo a disposizione dal Servizio Area Reno e Po di Volano (ex Servizio Tecnico di Bacino Reno) dell'Agenzia regionale per la sicurezza territoriale e la protezione civile della Regione Emilia-Romagna. Si tratta di un rilievo realizzato nell'anno 1997, su commissione dell'Autorità di Bacino del fiume Reno, che coincide con quello già utilizzato nel più volte citato "Studio idraulico del fiume Reno a valle del Ponte del Gallo" del giugno 1999.

Il materiale messo a disposizione dello scrivente è costituito dal rilievo di 71 sezioni trasversali, posizionate in punti significativi del tracciato compreso tra il ponte del Gallo e la foce; la posizione di tali sezioni è indicata nella planimetria riportata nell'allegata Tavola 1. Il rilievo del 1999 è stato integrato con alcune informazioni sulla geometria della traversa di Volta Scirocco, utili a meglio descrivere la quota di fondo dell'opera, su cui scorre la corrente a paratoie completamente sollevate, che sono state messe a disposizione dal Consorzio di Bonifica di Secondo Grado per il Canale Emiliano Romagnolo.

Le sezioni del rilievo topografico, ubicate nel tratto di più diretto interesse (dalla località Argenta al mare), sono quelle aventi identificativo compreso da 164 a 236, mentre le sezioni dalla 102 alla 162 si trovano nel tratto più a monte, dal ponte del Gallo alla località Argenta. Le sezioni che, nella numerazione, recano la lettera "a" corrispondono alla presenza di attraversamenti o comunque di manufatti trasversali al corso d'acqua.

Si evidenzia che non si dispone di informazioni più recenti sulla topografia del corso d'acqua rispetto a quelle del rilievo citato; in proposito si segnala che, trattandosi di un rilievo ormai datato, andrebbe presa in esame l'opportunità di un aggiornamento della topografia esistente.

Per verificare l'attendibilità del rilievo topografico disponibile è stato fatto un confronto con il modello digitale del terreno (DEM) a risoluzione spaziale 1 m x 1 m derivante dal rilievo LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging), eseguito negli anni 2008 e 2009.

Nella Figura 7 è riportata una rappresentazione in falsi colori dell'altimetria del terreno desumibile dal DEM, nella quale è riportata l'indicazione della posizione delle sezioni trasversali del corso d'acqua, rese disponibili dal rilievo tradizionale.



Figura 7 - Rappresentazione del tratto di fiume Reno di interesse su DTM ad alta risoluzione (1m \times 1m) ottenuto da Lidar; è indicata la posizione delle sezioni trasversali del corso d'acqua.



Figura 11 - Confronto tra il profilo del terreno lungo la sezione trasversale 192 fornito dal rilievo tradizionale e quello ottenuto dal DEM con strumenti GIS.

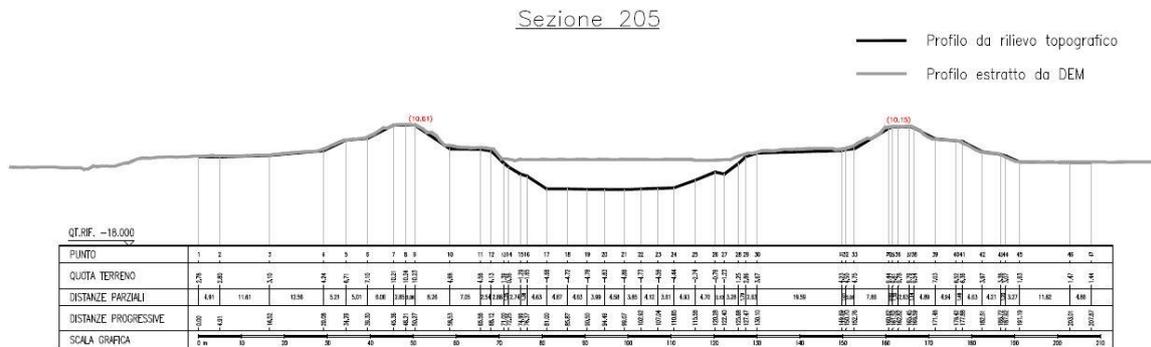


Figura 12 - Confronto tra il profilo del terreno lungo la sezione trasversale 205 fornito dal rilievo tradizionale e quello ottenuto dal DEM con strumenti GIS.

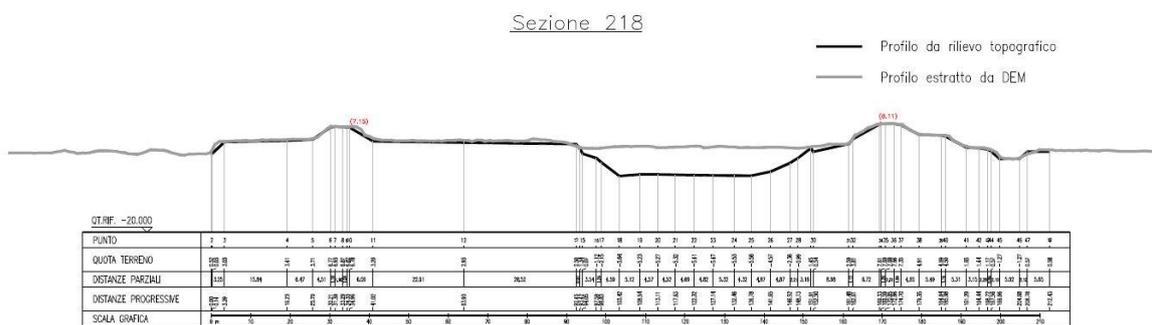


Figura 13 - Confronto tra il profilo del terreno lungo la sezione trasversale 218 fornito dal rilievo tradizionale e quello ottenuto dal DEM con strumenti GIS.

5. RISULTATI DELLA MODELLAZIONE IDRAULICA

La modellazione idraulica, come in precedenza indicato, ha considerato la simulazione della propagazione delle piene nel tratto di fiume Reno compreso tra il ponte del Gallo e lo sbocco a mare. Tale tratto è ben più ampio di quello di diretto interesse per il presente incarico che, in base al disciplinare, si dovrebbe estendere dalla località Argenta al mare. Si è scelto infatti, come già indicato, di prolungare il tratto di corso d'acqua oggetto di modellazione verso monte, fino al ponte del Gallo, in quanto in tale sezione si disponeva degli idrogrammi sintetici di riferimento desumibili dagli studi condotti dall'Autorità di Bacino del fiume Reno.

La sollecitazione in ingresso al ponte del Gallo è costituita dagli idrogrammi sintetici, 25-ennale e 100-ennale, riportati in Figura 4; per quanto riguarda gli affluenti, si è considerato nullo il loro contributo nello scenario di transito della piena di assegnato tempo di ritorno lungo l'asta principale, in coerenza con l'impostazione adottata nello studio dell'Autorità di Bacino del fiume Reno, più volte menzionato. Per quanto riguarda la traversa di Volta Scirocco, nelle simulazioni, le paratoie sono state considerate completamente sollevate, in coerenza con le modalità di gestione dell'opera effettivamente messe in pratica in occasione del verificarsi di piene di una qualche importanza.

La Tavola 3, elaborato cartografico allegato alla presente relazione, riporta i profili del pelo libero relativi alle piene aventi tempo di ritorno $T=25$ e $T=100$ anni lungo il corso d'acqua, relativamente al tratto tra la località Argenta e il mare. Sono rappresentati i massimi livelli raggiunti durante le piene. Si precisa che le simulazioni di cui si riferisce nel presente capitolo non tengono conto della presenza dei capanni da pesca nel tratto terminale; nel capitolo seguente sarà svolto uno specifico approfondimento per analizzare il loro effetto.

Dalla Tavola 3 si può osservare che i massimi livelli sia della piena 25-ennale che di quella 100-ennale sono sempre ampiamente contenuti all'interno della cintura arginale; infatti, le massime quote raggiunte dal pelo libero risultano sempre inferiori a quelle delle sommità arginali destra e sinistra. Tale comportamento discende dall'importante sottrazione di portata e di volume di piena che, in coerenza con le ipotesi adottate negli studi dell'Autorità di Bacino del Reno, può essere ottenuta attraverso l'esercizio del Cavo Napoleonico. Riguardo a quest'ultimo, corre l'obbligo di segnalare, avendo visionato gli studi esistenti, che, a giudizio di chi scrive, sarebbe opportuno svolgere opportune verifiche sulle odierne, effettive capacità di laminazione di tale importante opera idraulica, fondamentale per la mitigazione del rischio dell'asta a valle, approfondendo e

attualizzando le conoscenze disponibili. Ovviamente tale percorso di studio esula completamente dalle finalità del presente incarico.

Un analogo comportamento si è riscontrato anche nel tratto compreso tra il ponte del Gallo e la località Argenta, anche se, in tale tratto, il pelo libero presenta franchi inferiori rispetto alle sommità arginali, soprattutto nella prima parte, subito a valle del ponte del Gallo. Pertanto, nel caso in esame, lo schema di modellazione cui si è fatto riferimento, che è del tipo a esondazioni impedito, è pienamente adatto a fornire risultati realistici in termini di simulazione dei massimi livelli di piena.

Per quanto riguarda l'entità del franco, per la portata 25-ennale, si ha un primo tratto esteso circa 5 km a valle della SS 16 in cui il franco è generalmente compreso tra 4 e 5 m, un secondo tratto con franchi sempre superiori a 5 m fino circa all'ingresso nel territorio del Comune di Ravenna, circa 4 km a valle del ponte della SP 15; dopodiché, sempre procedendo verso valle, il franco tende progressivamente a ridursi man a mano che ci si avvicina al mare, pur mantenendosi sempre significativo. Un analogo andamento del franco, ovviamente con valori più ridotti, si ha anche per la portata 100-ennale; si segnala in tal caso un modesto sormonto nella sezione nella sezione 232a (ponte via Romea SS309), prossima alla foce.

Nella Figura 16 vengono riportati gli andamenti delle onde di piena relative a tempo di ritorno $T=25$ anni in alcune sezioni del fiume Reno. In particolare, viene riportata l'onda al ponte del Gallo, che costituisce la sollecitazione in ingresso al modello, e le onde in alcune sezioni del tratto di specifico interesse per il presente incarico, che si estende dalla SS16 al mare. Si nota la laminazione subita dall'onda di piena nel tratto compreso tra il ponte del Gallo, ove il colmo di piena ammonta a 405 mc/s, e la sez.164a, all'attraversamento della SS16, ove il colmo di piena raggiunge il valore di 357 mc/s, con una riduzione del 13% circa. Nella Figura 16 sono anche riportate le onde nella sezione 196a, posta in corrispondenza dell'attraversamento della SP15, nella sezione 205, in cui si ha l'ingresso del fiume nel territorio del Comune di Ravenna, ove il colmo risulta pari a 331 mc/s, e nella sezione 226, in corrispondenza della traversa di Volta Scirocco, ove il colmo assume il valore di 328 mc/s. L'ubicazione delle sezioni può essere desunta dalla planimetria riportata nell'allegata Tavola 2.

Nella Figura 17 si riportano invece, sempre per l'onda 25-ennale, gli idrogrammi di livello nelle medesime sezioni. Infine, per avere una visione sinottica dell'andamento del fenomeno della laminazione delle onde di piena 25-ennali lungo il corso d'acqua, nella Figura 18 si riporta l'andamento dei rapporti di laminazione dei colmi nel tratto compreso fra il ponte del Gallo e la foce; si tratta del rapporto tra il colmo dell'onda di piena di tempo di ritorno 25-ennale nella generica sezione e quello dell'onda di pari tempo di ritorno al ponte del Gallo.

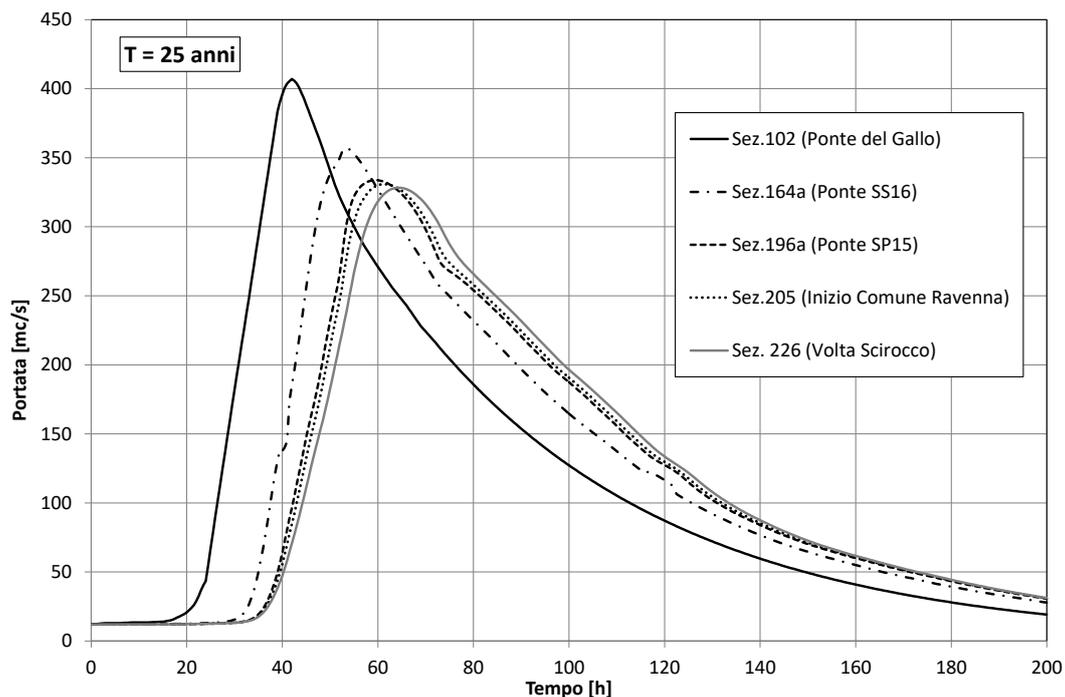


Figura 16 - Onde di piena 25-ennali del fiume Reno in varie sezioni nel tratto tra il ponte del Gallo e lo sbocco a mare.

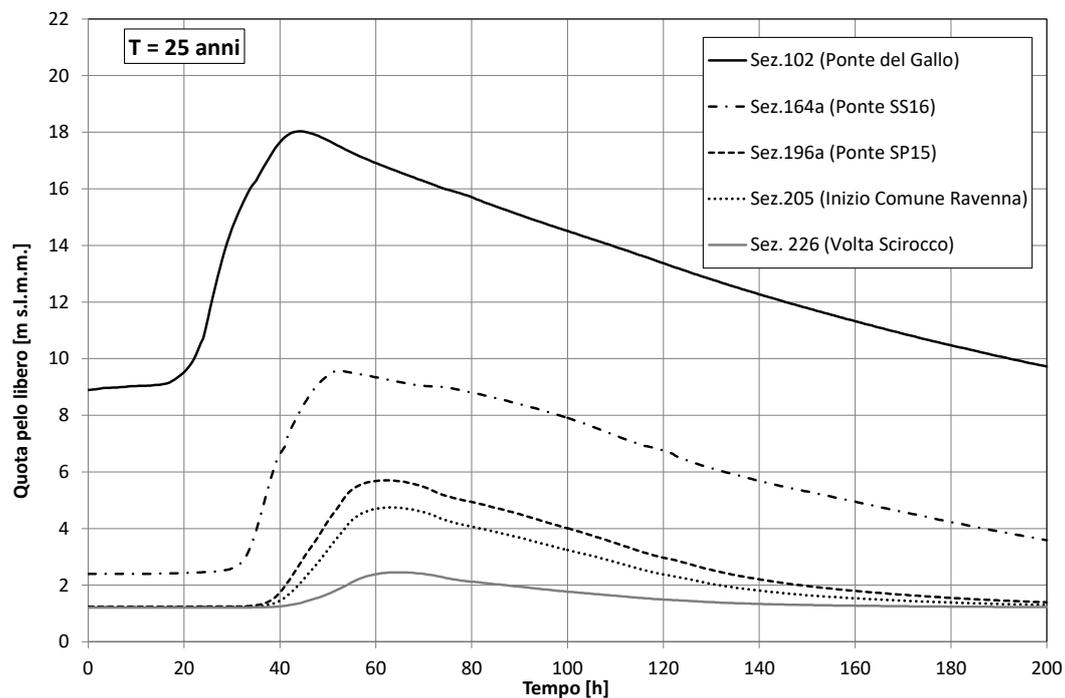


Figura 17 - Idrogrammi dei livelli di piena 25-ennali del fiume Reno in varie sezioni nel tratto tra il ponte del Gallo e lo sbocco a mare.

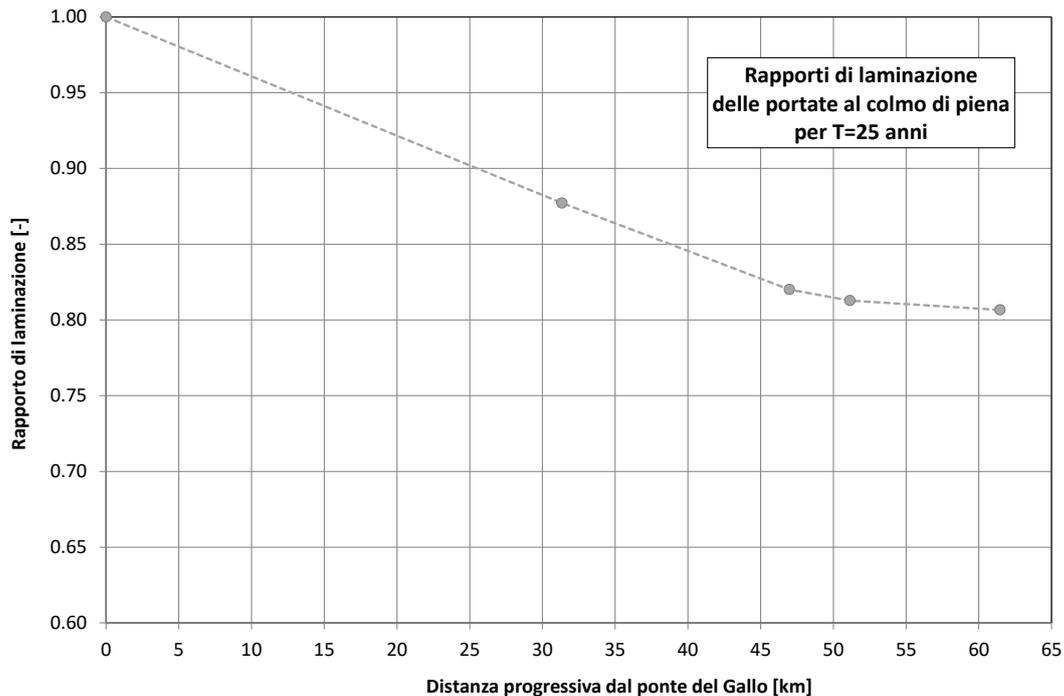


Figura 18 - Rapporto di laminazione dei colmi delle onde di piena 25-ennali nel tratto tra il ponte del Gallo e la foce.

Nella Figura 19 vengono riportati gli andamenti delle onde di piena per T=100 anni. Viene in primo luogo riportata l'onda 100-ennale al ponte del Gallo, che costituisce la sollecitazione in ingresso al modello, il cui colmo è pari a 670 mc/s. Sono poi riportate le onde in alcune sezioni del tratto di specifico interesse per il presente incarico, che si sviluppa dalla località Argenta al mare, in particolare all'attraversamento della SS16 (Sez. 164a) e della SP15 (Sez. 196a), all'ingresso del fiume nel territorio del Comune di Ravenna (Sez. 205) e nella Sez. 226, in corrispondenza della traversa di Volta Scirocco. Per la posizione delle sezioni si rimanda alla Tavola 2, allegata alla presente relazione. Si nota che il colmo dell'onda 100-ennale, che è pari a 670 mc/s in corrispondenza del ponte del Gallo, si riduce a 573 mc/s alla Sez. 164a (SS16), con una laminazione del 15% circa, a 507 mc/s alla Sez.196a (attraversamento SP15), a 500 mc/s alla Sez.205 (ingresso del fiume Reno nel Comune di Ravenna) e a 492 mc/s nella Sez.226 (traversa di Volta Scirocco).

Nella Figura 20 si riportano invece, sempre per l'onda 100-ennale, gli idrogrammi di livello nelle medesime sezioni.

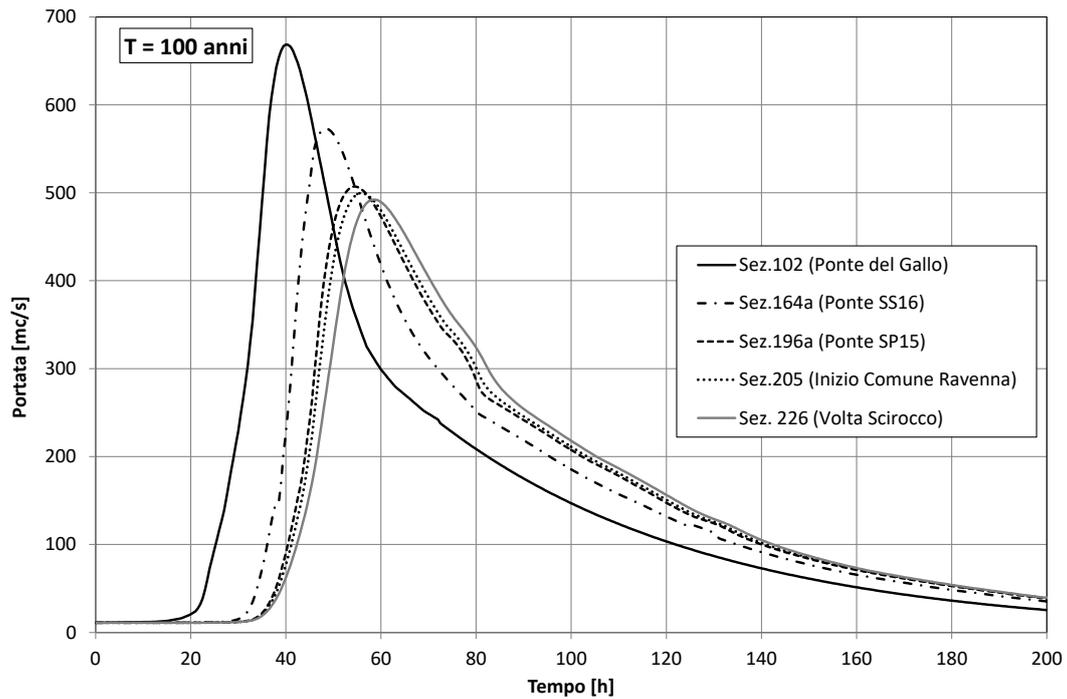


Figura 19 - Onde di piena 100-ennali del fiume Reno in varie sezioni nel tratto tra il ponte del Gallo e lo sbocco a mare.

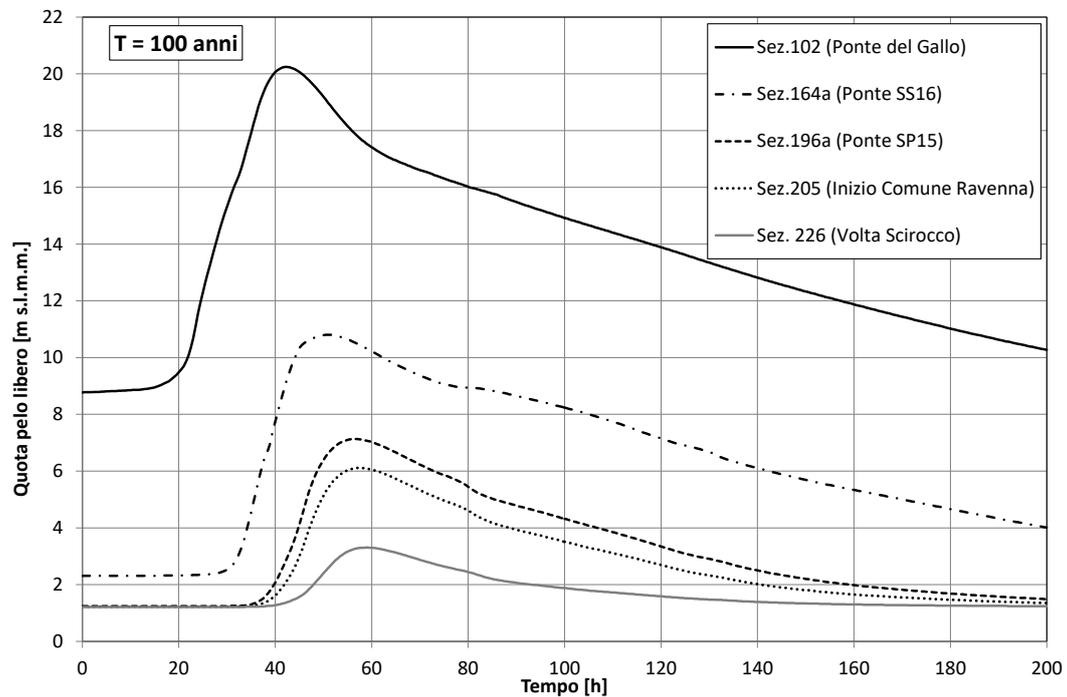


Figura 20 - Idrogrammi dei livelli di piena 100-ennali del fiume Reno in varie sezioni nel tratto tra il ponte del Gallo e lo sbocco a mare.

Per avere una visione sinottica dell'andamento del fenomeno della laminazione delle onde di piena 100-ennali lungo il corso d'acqua, nella Figura 21 si riporta l'andamento dei rapporti di

laminazione dei colmi di piena delle onde 100-ennali nel tratto compreso fra il ponte del Gallo e la foce; si tratta del rapporto tra il colmo dell'onda di piena 100-ennale nella generica sezione e quello dell'onda di pari tempo di ritorno al ponte del Gallo.

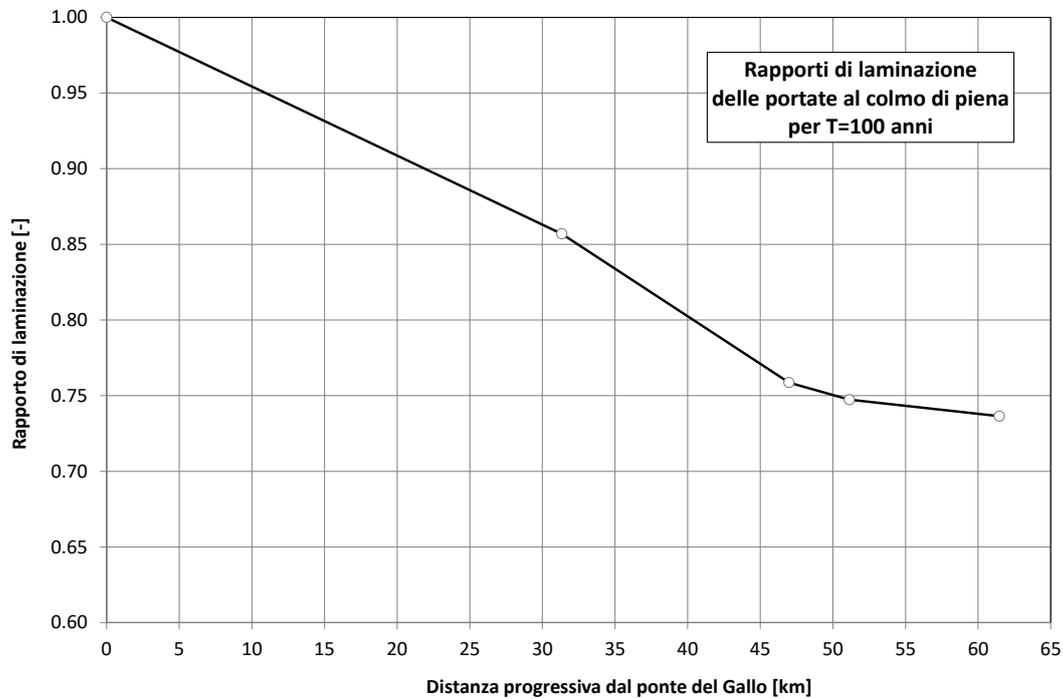
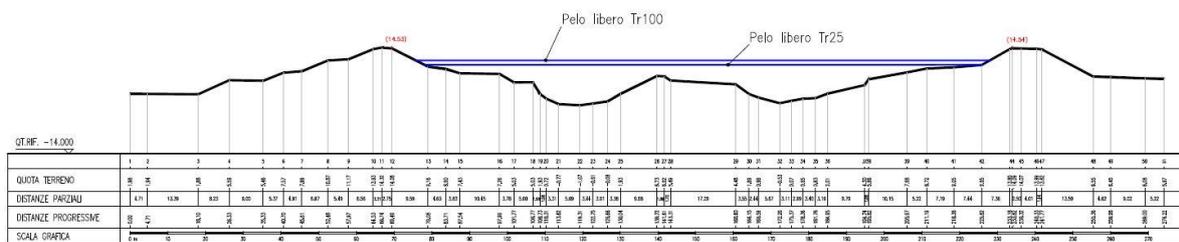


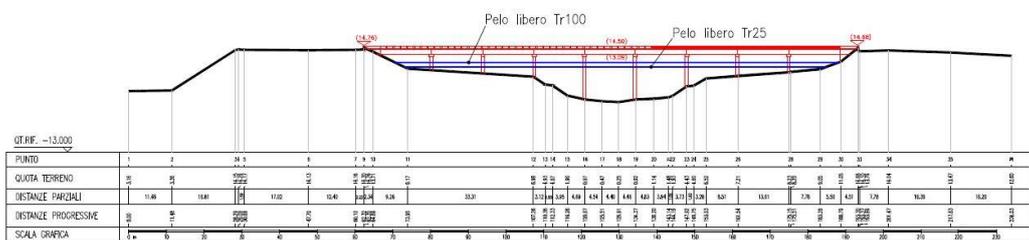
Figura 21 - Rapporto di laminazione dei colmi delle onde di piena 100-ennali nel tratto tra il ponte del Gallo e la foce.

Infine, nelle figure seguenti (da Figura 22 a Figura 31) sono riportate, per tutte le sezioni del fiume Reno poste nel tratto di specifico interesse del presente studio, ovvero da Argenta alla foce, i massimi livelli del pelo libero relativi alle piene aventi tempo di ritorno $T=25$ e $T=100$ anni.

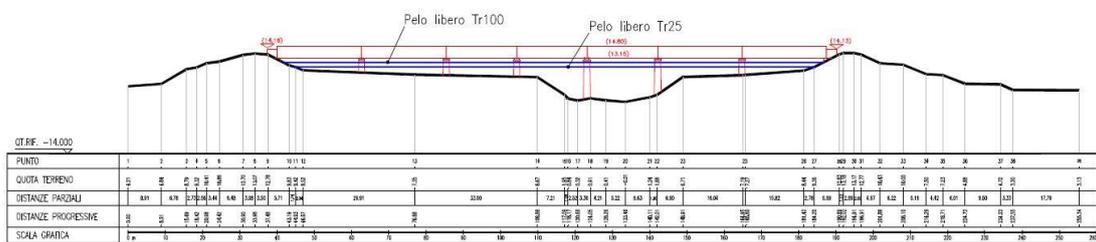
Sezione 164



Sezione 164a (Ponte SS16)



Sezione 166a (Ponte FS Ferrara-Rimini)



Sezione 168

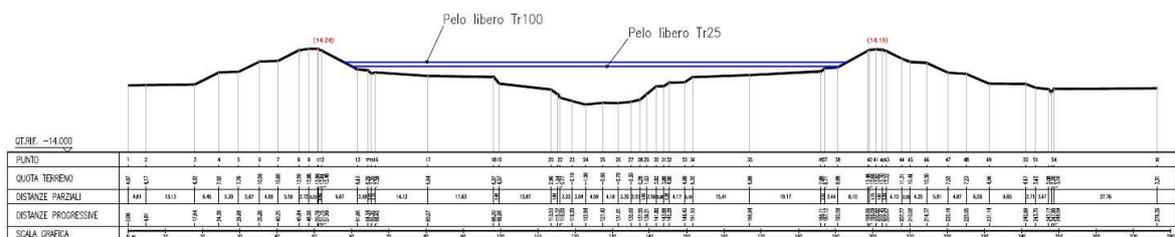


Figura 22 - Massimi livelli del profilo del pelo libero delle piene 25-ennale e 100-ennale in alcune sezioni del tratto di interesse.

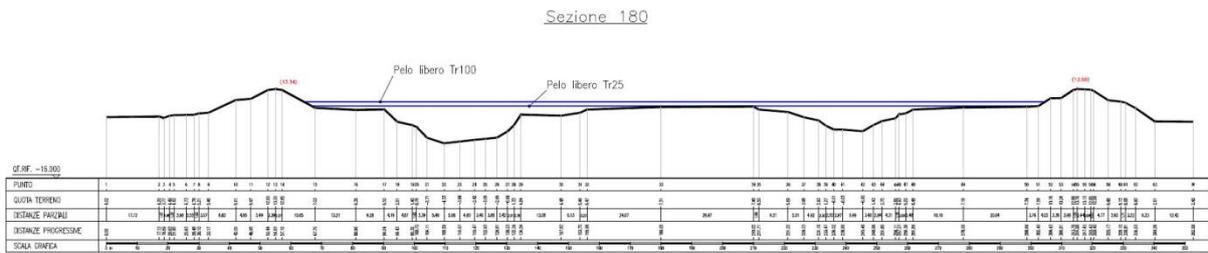
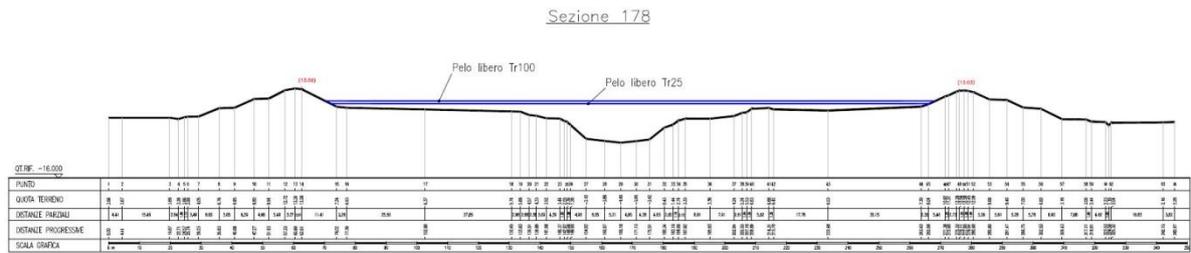
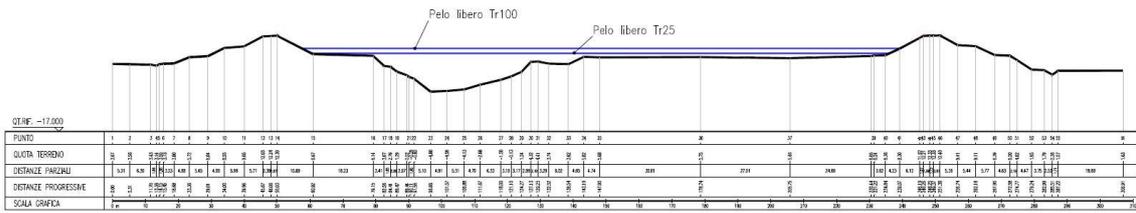
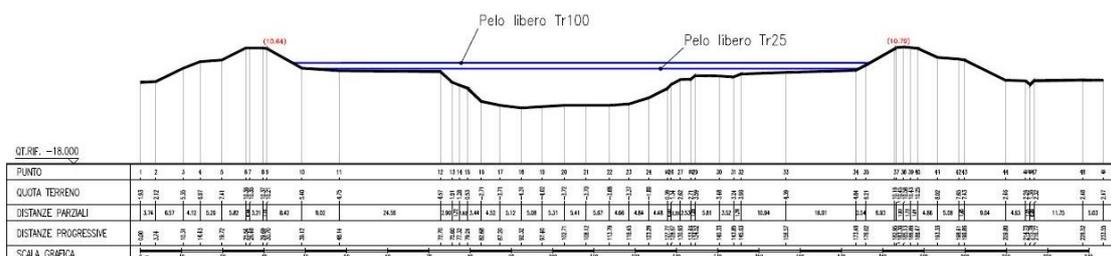


Figura 24 - Massimi livelli del profilo del pelo libero delle piene 25-ennale e 100-ennale in alcune sezioni del tratto di interesse.

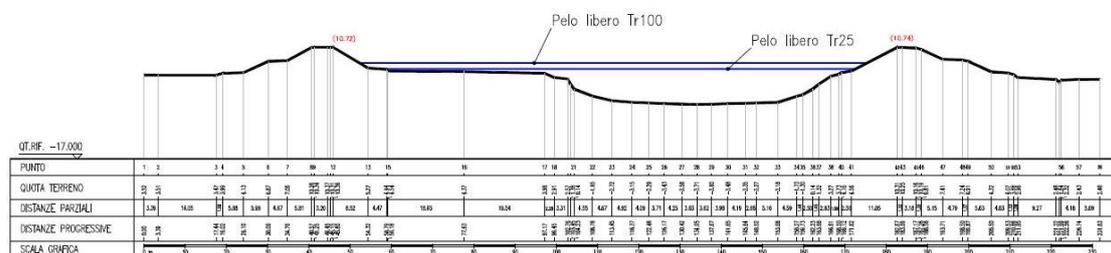
Sezione 186



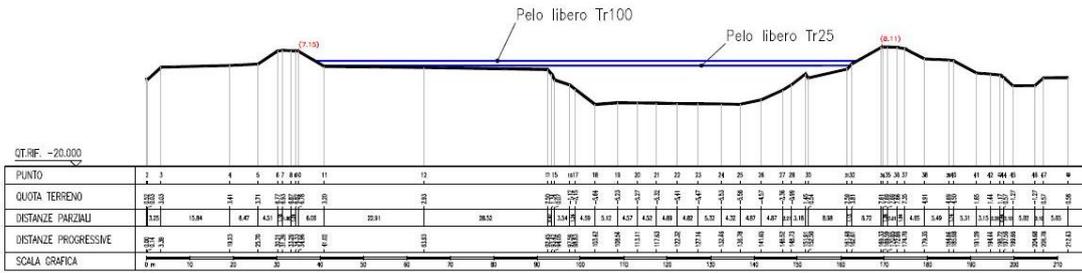
Sezione 200



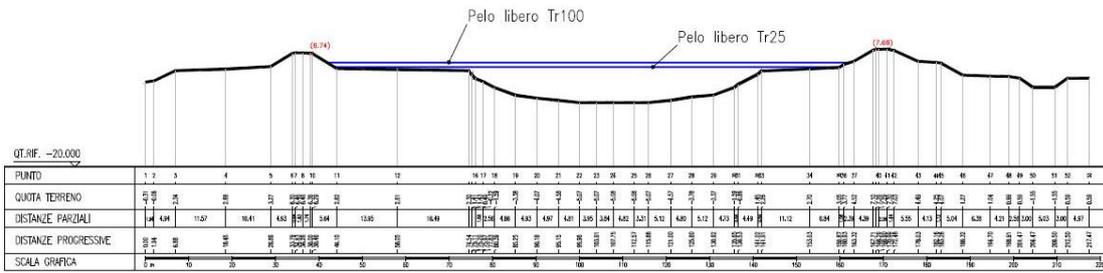
Sezione 202



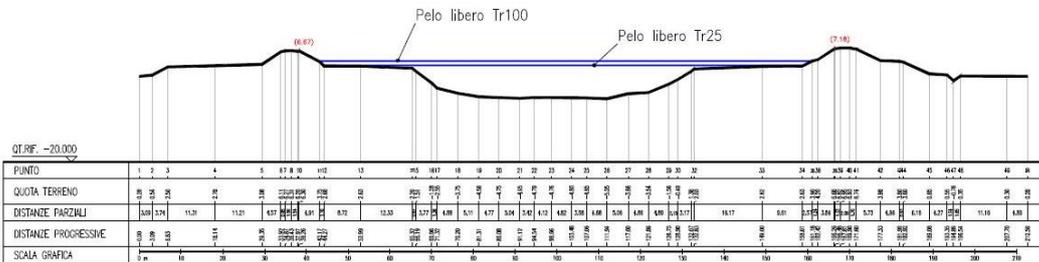
Sezione 218



Sezione 220



Sezione 222



Sezione 224

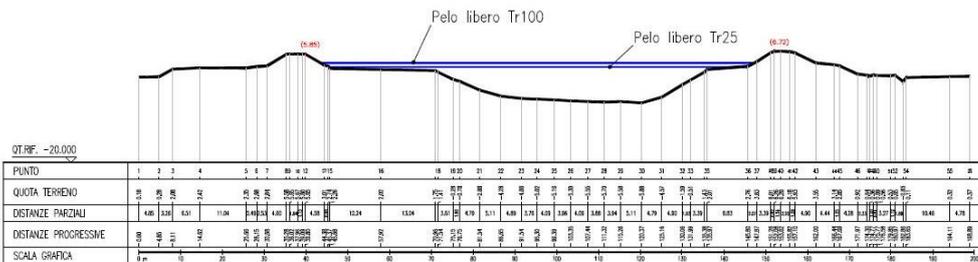
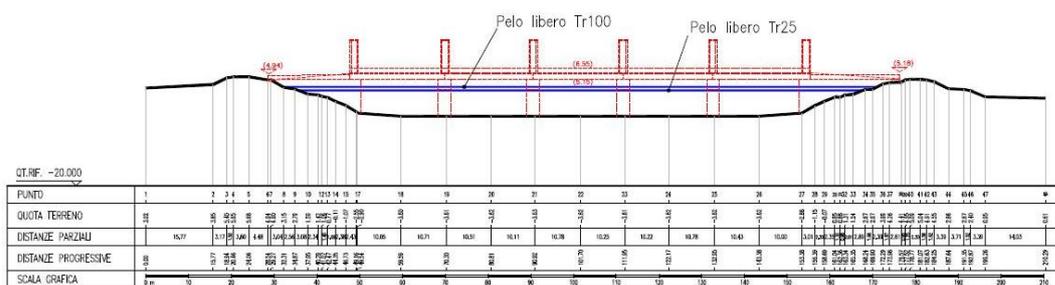
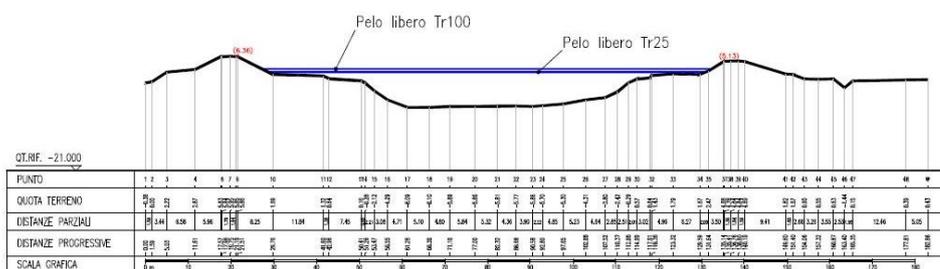


Figura 29 - Massimi livelli del profilo del pelo libero delle piene 25-ennale e 100-ennale in alcune sezioni del tratto di interesse.

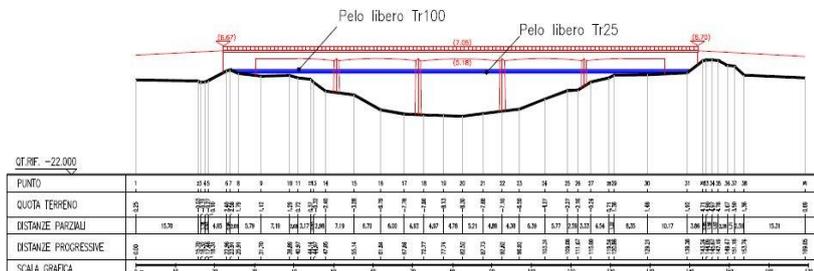
Sezione 226a (Traversa Volta Scirocco)



Sezione 230



Sezione 232a (Ponte SS309)



Sezione 234



Sezione 234

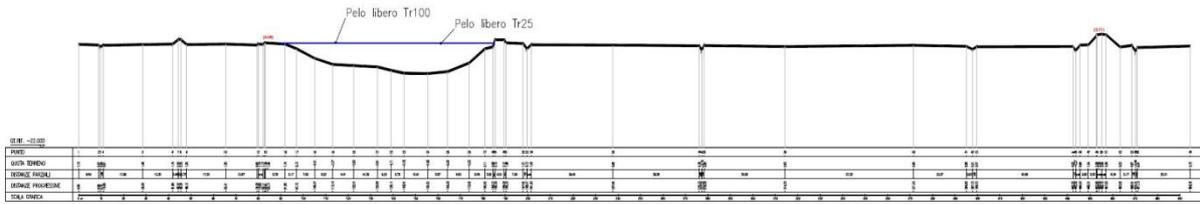


Figura 31 - Massimi livelli del profilo del pelo libero delle piene 25-ennale e 100-ennale in alcune sezioni del tratto di interesse.

6. EFFETTI DELLE OPERE PRESENTI IN ALVEO NEL TRATTO TERMINALE DEL CORSO D'ACQUA

Si descrivono di seguito le specifiche elaborazioni, effettuate al fine di valutare gli effetti esercitati dagli ostacoli presenti nelle golene fluviali del tratto terminale del fiume Reno; la presenza di tali ostacoli potrebbe comportare aumenti, in linea di principio anche significativi, dei livelli idrici di piena all'interno dell'asta fluviale.

A tal fine, nella geometria del modello matematico del corso d'acqua già messa a punto, è stata inserita la rappresentazione di tutti i capanni presenti del tronco terminale, a valle della traversa di Volta Scirocco. La posizione planimetrica dei capanni è stata desunta incrociando le risultanze dell'apposita planimetria recante l'ubicazione dei capanni stessi, facente parte del Piano di Protezione Civile Comunale-Piano specifico di emergenza rischio idraulico allertamento capanni da pesca, messa a disposizione dal Comune di Ravenna, con quelle della CTR Regionale, in scala 1:5.000.

Sono state considerate una serie di sezioni trasversali aggiuntive rispetto a quelle di rilievo, che sono state ricostruite e inserite nella schematizzazione geometrica del corso d'acqua, all'interno del modello matematico, prevedendo, ove necessario, una sezione aggiuntiva in corrispondenza di ciascun capanno (v. la planimetria riportata nella Figura 32); la geometria di queste sezioni è stata ricavata per interpolazione, a partire da quelle delle sezioni del rilievo topografico di partenza (agevolmente identificabili nella Figura 32 in base alla numerazione).

Nel modello matematico i capanni stati considerati come elementi parallelepipedi, uguali fra loro, con superficie pari a circa 70 mq, in accordo con le indicazioni ricevute dal Comune. Si è assunta una dimensione pari a 8 metri nella direzione trasversale all'asse del corso d'acqua e a 9 metri nella direzione longitudinale (lato parallelo al verso della corrente). Le ostruzioni sono state considerate completamente impermeabili al deflusso.

Nella realtà, le tipologie dei capanni esistenti sono piuttosto differenziate da caso a caso; di fatto sono presenti sia tipologie costruttive che determinano un ingombro massimo della sezione fluviale su tutto il loro sviluppo altimetrico sia tipologie di capanni fondati su pali, che determinano ingombri minori della sezione fluviale. La schematizzazione geometrica adottata (v. anche le sezioni trasversali, riportate nelle figure seguenti) si può ritenere quindi cautelativa.

Incidentalmente, va rilevato che quanto trattato in questa sede riguarda il solo aspetto dell'effetto idraulico esercitato dai capanni, prescindendo da qualunque valutazione sulla sicurezza e

sulle condizioni di rischio delle strutture edilizie e delle persone che ne usufruiscono, argomento che esula completamente dalle finalità del presente studio.



Figura 32 – Ubicazione dei capanni, delle sezioni trasversali del rilievo topografico e di quelle aggiuntive, utilizzate per la modellazione specifica dell'effetto dei capanni, nel tratto terminale del fiume Reno.

E' stato quindi simulato il transito delle onde di piena 25-ennali e 100-ennali, confrontando il caso reale (presenza di capanni) con un'ipotetica situazione ideale di assenza dei capanni (il relativo profilo coincide con quello già disponibile dalle simulazioni precedentemente discusse, in quanto la presenza dei capanni non era ivi contemplata).

La Tavola 4 riporta il confronto tra i profili del pelo libero del tratto terminale del fiume Reno per T=25 e T=100 anni, nella situazione in presenza ed in quella in assenza dei capanni. Si può notare come l'effetto del sovrizzo, dovuto alla presenza dei capanni, sui profili di piena del fiume Reno, sia modesto e sempre contenuto entro valori di circa 2 cm.

Nella Figura 33 e nella Figura 34 viene mostrato il confronto tra i livelli di piena in presenza ed in assenza dei capanni in due diverse sezioni poste nel tratto terminale del fiume Reno, al transito delle piene di tempo di ritorno T=25 e T=100 anni. Si nota come i profili liquidi in assenza e in presenza di capanni siano praticamente coincidenti fra loro, risultando graficamente indistinguibili. Dalla Figura 33, che si riferisca alla sezione 230, si nota come il sovralzato dovuto alla presenza dei capanni sia di soli 2 cm, sia per la piena 25-ennale che per quella 100-ennale. Nel caso della sezione 234, più vicina alla foce, la presenza dei capanni porta ad un innalzamento del pelo libero inferiore, che, come si può dedurre dalla Figura 34, risulta pari a 1 cm (v. Figura 34).

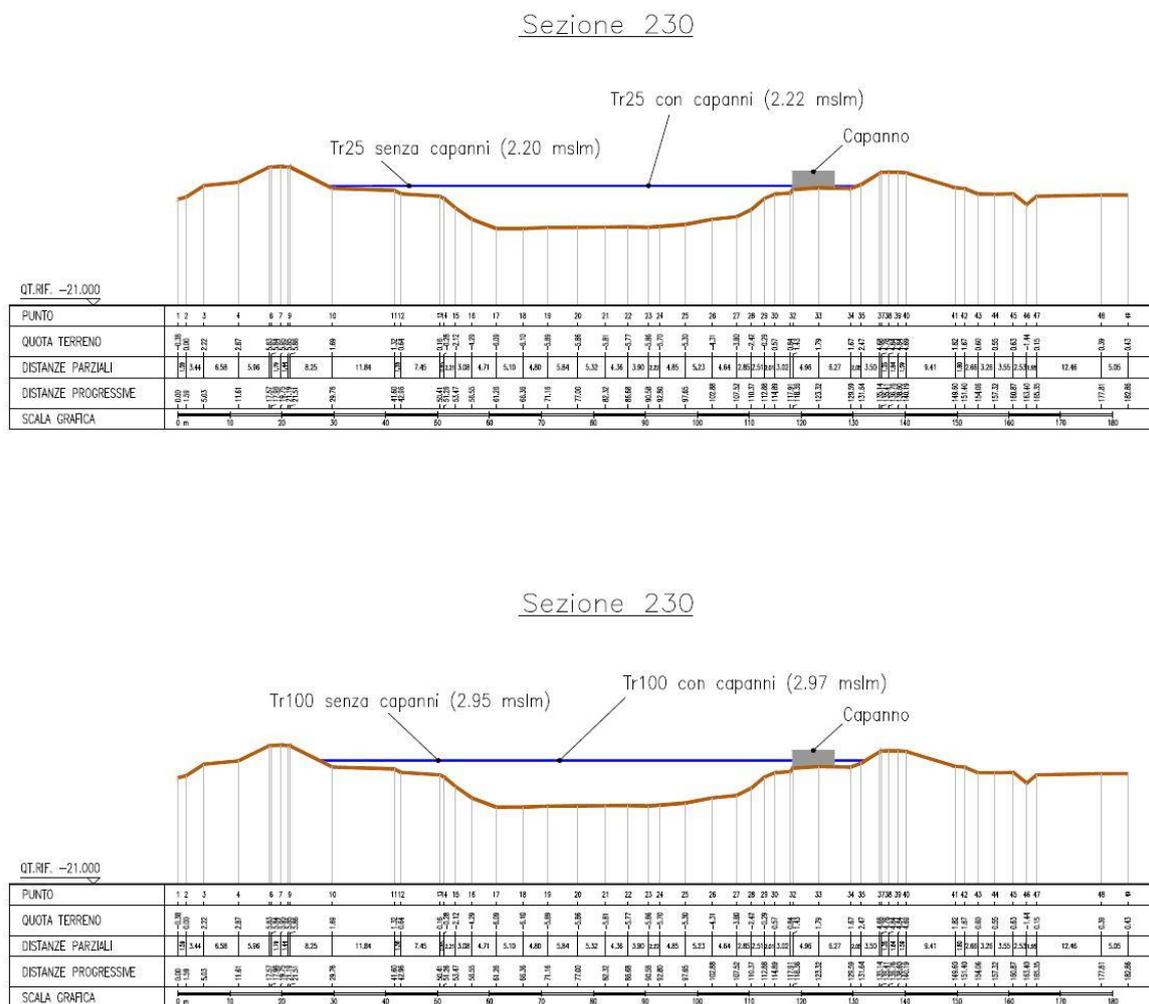
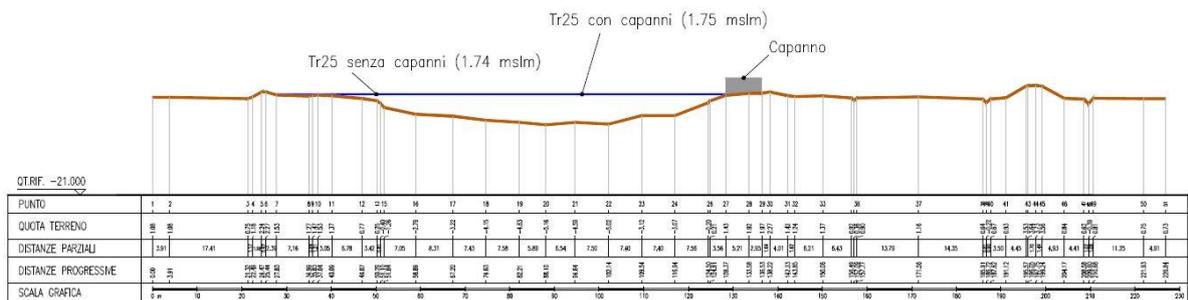


Figura 33 - Confronto tra i livelli di piena 100-ennali, in assenza ed in presenza dei capanni, nella sezione 230, ubicata nel tratto terminale del fiume Reno.

Sezione 234



Sezione 234

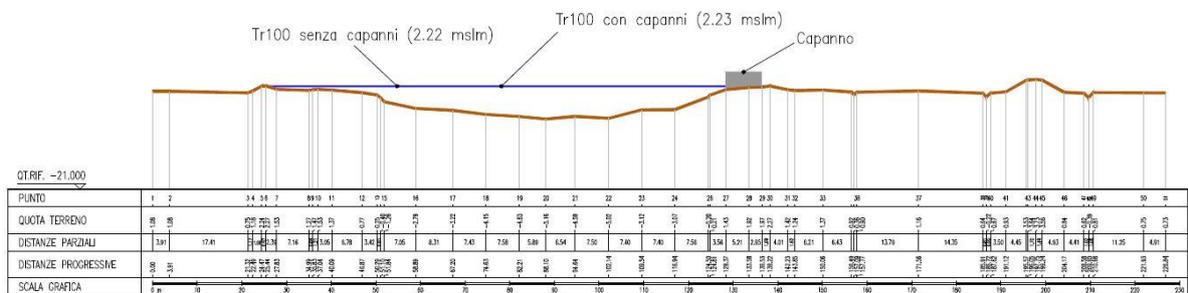


Figura 34 - Confronto tra i livelli di piena 100-ennali, in assenza ed in presenza dei capanni, nella sezione 234, ubicata nel tratto terminale del fiume Reno.

Nel complesso, i risultati ottenuti portano a concludere che l'effetto di sovrizzo del pelo libero di piena dovuto ai capanni è molto modesto, pur in presenza di una schematizzazione impiegata per descriverne la geometria che è da ritenersi cautelativa.

In proposito, va osservato che la schematizzazione impiegata in questa sede può essere ritenuta appropriata a fornire indicazioni sull'effetto complessivo esercitato dai capanni in termini di incremento dei livelli di piena mentre non potrebbe essere considerata idonea ove volesse valutarsi l'effetto che il singolo capanno produce sull'idrodinamica della corrente fluviale; ciò in quanto tutti i capanni sono stati schematizzati come aventi la medesima geometria mentre, come visto, i vari capanni presentano dimensioni e tipologie edilizie anche molto diversificate da caso a caso.

Al riguardo, corre l'obbligo di segnalare che l'uso dei risultati di una modellazione monodimensionale, quale quella condotta in questa sede, non appare appropriato per la

determinazione dei parametri idraulici locali in corrispondenza del fabbricato (quali le altezze del pelo libero e le velocità della corrente), necessari nel caso in cui si intenda procedere a verifiche di stabilità del fabbricato stesso o anche ad analizzarne le possibili interazioni con i rilevati arginali. Per tale scopo, si raccomanda l'uso di una modellistica bidimensionale.

Infine, merita di essere rilevato che alcuni capanni potrebbero comunque favorire l'arresto di materiale flottante, eventualmente trasportato dalla corrente fluviale, con conseguenti effetti di rigurgito. Ovviamente di tali effetti non è possibile tenere conto nella modellazione matematica se non schematizzando opportunamente in essa le risultanze di precise evidenze sperimentali, necessariamente derivanti dall'osservazione storica di eventi di piena del passato.

Bologna, giugno 2018

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