

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

DIPARTIMENTO DISTART

TESI DI LAUREA

in

Costruzioni idrauliche e protezione idraulica del territorio LS

**IPOTESI DI POTENZIAMENTO DELLA CAPACITA' DI LAMINAZIONE
DEL TRATTO MEDIO INFERIORE DEL FIUME PO ATTRAVERSO UNA
CORRETTA GESTIONE DEL SISTEMA DI ARGINATURE GOLENALI**

CANDIDATO
Elena Zannoni

RELATORE
Prof. Ing. Armando Brath

CORRELATORI
Dott. Ing. Attilio Castellarin
Dott. Ing. Alessio Domeneghetti

Anno Accademico 2008/09

Sessione III

INDICE

1. Introduzione	4
2. Caratterizzazione delle condizioni di rischio idraulico lungo l'asta valliva del Po: profili di piena di riferimento	8
2.1 Caratteristiche generali degli studi esistenti.....	8
2.2 SIMPO'82	9
2.2.1 SIMPO'82: il sistema golenale	12
2.3 SP1.1	13
2.4 ST1.19.....	21
2.4.1 Metodologia dello studio ST1.19.....	21
2.4.2 Profili di piena ST1.19	24
2.5. Analisi critica dei profili di piena esistenti	30
2.6 Aggiornamento del profilo di piena del fiume Po proposto da DISTART-AdB Po (2008)	39
2.6.1 Configurazione geometrica	39
2.6.2 Scenario idrologico e condizioni al contorno	39
2.6.3 Modalità di costruzione dell'evento idrologico di progetto.....	45
2.6.4 Contributo sintetico dell'Adda.....	49
2.6.5 Confronto tra gli idrogrammi simulati e quelli bisecolari.....	51
2.7 Profilo di piena di riferimento.....	52
3. Modello numerico quasi 2D dell'asta del Po da foce Tanaro all'incile del Po di Goro	56
3.1 Il sistema fluvio-golenale del corso medio inferiore del Po	56
3.1.1 Identificazione ed analisi del sistema di golene chiuse.....	56
3.2 Schematizzazione delle caratteristiche geometriche dell'alveo.....	64
3.3 Taratura del modello	72
3.3.1 Condizioni al contorno.....	73
3.3.2 Analisi dei risultati	78
4. Valutazione della capacità di laminazione delle portate di piena del sistema fluvio-golenale del Po: simulazioni numeriche sviluppate	84
4.1 Morfologia attuale (c.d. 2005) del sistema golenale del corso d'acqua.....	84
4.2 Indagini precedenti: geometrie e sollecitazioni idrologiche utilizzate.....	85
4.3 Onda di piena cinquecentennale (evento di piena ai limiti della prevedibilità).....	93
4.4 Ipotesi di configurazioni geometriche alternative: semplificazione della geometria attuale...	96
4.5 Configurazioni geometriche alternative: criterio omogeneo lungo l'asta fluviale	98
4.5.1 Criterio omogeneo lungo l'asta fluviale: presentazione dei risultati	103

4.5.2 Criterio omogeneo lungo l'asta fluviale: discussione dei risultati.....	110
4.6 Configurazioni geometriche alternative: criterio differenziato lungo l'asta fluviale.....	117
4.6.1 Criterio differenziato lungo l'asta fluviale: presentazione dei risultati.....	119
4.6.2 Criterio differenziato lungo l'asta fluviale: discussione dei risultati	127
5. Conclusioni	132
6. Appendice A: quote delle arginature golenali della Config 12L.....	135
7. Appendice B: quote delle arginature golenali della Config -1m.....	142
8. Appendice C: quote delle arginature golenali della Config -0.75m.....	149
Bibliografia	156

1. Introduzione

L'argomento principale del presente elaborato riguarda l'analisi del comportamento idraulico in condizioni di piena dell'asta fluviale medio valliva del Fiume Po; in particolare viene approfondito lo studio sulla capacità di laminazione delle piene all'interno delle arginature maestre. La zona medio-inferiore del corso d'acqua, orientativamente compresa tra foce Adda e foce Mincio, infatti, presenta una conformazione fluvio-golenale piuttosto complessa. All'interno delle arginature maestre sono presenti diversi ordini di argini golenali, il cui insieme compone un complesso sistema di golene difese, cioè aree delimitate dalle arginature stesse che possono essere invase durante i maggiori eventi di piena. Detto sistema trattiene una parte dei volumi di piena e, di conseguenza, produce effetti significativi sui livelli idrometrici e sulle portate di piena a valle della foce Mincio.

La ricerca del profilo di piena, definito come involucro delle quote massime del tirante idrico lungo il tratto considerato in condizioni di piena, riveste particolare importanza nell'ambito della difesa idraulica del territorio, poiché influenza il dimensionamento delle opere di contenimento. Il primo tentativo di affrontare tale problema in maniera organica può essere fatto risalire allo studio SIMPO, dei primi anni Ottanta. Esso ha permesso di mettere a punto un modello idraulico di tipo numerico per la propagazione delle onde di piena lungo l'intero corso medio vallivo del fiume, inoltre è stata effettuata una rappresentazione del complesso sistema fluvio- golenale, basata su un censimento che rappresenta ancor oggi un valido riferimento. Successivamente allo studio SIMPO sono state sviluppate altre indagini numeriche mirate allo studio del comportamento idraulico dell'asta medio- inferiore del Po in condizioni di piena (v. ad es. SP1.1 *Raggr. temp. Impr.*, 1997 e ST1.19 *Cons. Italcopo*, 2002, promossi dall'Autorità di Bacino del Po, AdB-Po), i quali aggiornano ed integrano i risultati dello studio SIMPO, avvalendosi di rilievi topografici e dati idrologici più recenti. Nel Capitolo II del presente elaborato è riportata l'analisi critica dei profili di piena prodotti nell'ambito dei tre principali studi esistenti.

Recentemente, è stato proposto dall'AdB-Po, in collaborazione col DISTART (Università di Bologna), un aggiornamento del profilo di piena del Fiume Po, ottenuto tramite un nuovo modello, chiamato Q2005D. Tale modello è stato messo a punto sulla base dei nuovi rilievi topografici resisi recentemente disponibili (DTM da rilievo Laserscanner 2005, sezioni topografiche trasversali AIPO 2004/2005) e, rispetto a modelli analoghi precedentemente sviluppati, si avvale dei più aggiornati strumenti numerici di elaborazione e gestione delle informazioni topografiche e degli sviluppi nella modellistica idraulica. Il criterio generale seguito durante la creazione del modello idraulico è stato quello di pervenire ad una accurata descrizione del funzionamento idraulico del complesso sistema fluvio-golenare nel tratto di Fiume Po compreso tra Isole Serafini (province di Piacenza e Cremona) e la confluenza con il Fiume Secchia (provincia di Mantova). Il modello Q2005D rientra nella classe di modelli quasi bidimensionali; infatti, sebbene le equazioni caratteristiche del modello descrivano il moto utilizzando una sola variabile spaziale, la schematizzazione di golene chiuse idraulicamente connesse all'alveo e, talvolta, interconnesse tra loro, permette di descrivere la dinamica del fenomeno di propagazione dell'onda di piena in maniera non necessariamente monodimensionale. Nel Capitolo III del presente elaborato vengono descritte le attività finalizzate all'implementazione e alla taratura del nuovo modello matematico.

Il modello Q2005D è stato utilizzato come supporto numerico nelle simulazioni sviluppate per stimare la capacità di laminazione del sistema di golene difese. L'analisi si è concentrata sul tratto di asta fluviale, di lunghezza pari a circa 190 km, compreso tra Cremona e Pontelagoscuro. Tale tratto è composto da una porzione di monte (da Cremona a foce Mincio, circa 120 km) che comprende la maggior parte delle golene chiuse presenti lungo l'asta fluviale del fiume Po. Nella restante porzione di valle del tratto fluviale considerato (da foce Mincio a Pontelagoscuro, circa 70 km) la morfologia dell'asta fluviale cambia sensibilmente, la larghezza delle espansioni laterali si riduce e, a valle della località Revere-Ostiglia (MN), le golene difese sono praticamente assenti. Gli effetti di laminazione indotti in condizioni di piena dal sistema di golene chiuse sgravano, da un

punto di vista idraulico, proprio questo ultimo tronco (da Revere–Ostiglia a Pontelagoscuro, circa 55 km), che pertanto è stato assunto come riferimento nel valutare i possibili vantaggi offerti da una diversa gestione del sistema di arginature golenali.

Lo scopo della presente ricerca è quello di verificare la possibilità di abbassare in quota il profilo di piena relativo a diverse piene di riferimento nel tratto di Fiume Po a valle di foce Mincio attraverso una corretta gestione delle arginature golenali. Dallo studio “Progetto strategico per il miglioramento delle condizioni di sicurezza idraulica dei territori di pianura lungo l’asta principale del Fiume Po” (DISTART, Università di Bologna) è emerso con riferimento ad una piena duecentennale che, aumentando la sommità degli argini golenali fino ad avere una differenza di quota tra argini golenali e argini maestri pari a 1 metro, si verifica un abbassamento medio del livello idrico massimo a valle di foce Mincio pari a 36 cm. L’abbassamento si verifica a causa di due fattori concomitanti, alzando la quota delle arginature golenali, infatti, 1) aumenta il volume d’acqua invasabile e 2) vengono trattenuti volumi di piena della parte alta dell’idrogramma. Entrambi i fattori comportano un aumento dell’effetto di laminazione naturale prodotto dal corso d’acqua. Partendo da questo presupposto sono state effettuate altre simulazioni, dove le quote degli argini golenali vengono alzate ulteriormente. L’idea di base è quella di trovare l’altezza degli argini golenali che massimizza l’effetto di laminazione del sistema fluvio-golenale. In un primo momento è stato applicato un criterio omogeneo, ovvero la quota degli argini golenali è ottenuta sottraendo la medesima quantità dagli argini maestri (ad esempio -1m, -0.75 m...), in un secondo momento è stato applicato un criterio differenziato, cioè per ogni argine golenale è stata trovata un certo valore di quota, indipendentemente dal rispettivo valore dell’argine maestro. Nel Capitolo IV vengono descritte in modo approfondito le nuove geometrie, le sollecitazioni idrologiche utilizzate e il metodo empirico col quale sono state ottenute le quote degli argini golenali; inoltre vengono riportati i risultati delle simulazioni in termini di beneficio, livelli ed idrogrammi di piena nella sezione di chiusura.

2. Caratterizzazione delle condizioni di rischio idraulico lungo l'asta valliva del Po: profili di piena di riferimento

In questo capitolo sono riportate le attività di studio inerenti l'analisi critica dei profili di piena prodotti nell'ambito dei tre principali studi esistenti sul comportamento idraulico del tratto medio-inferiore dell'asta del fiume Po.

2.1 Caratteristiche generali degli studi esistenti

Il tratto di asta fluviale di Po di interesse si estende tra la foce Tanaro e l'incile del Po di Goro. Nel corso dell'ultimo ventennio il comportamento idraulico del tratto di Po di interesse è stato analizzato da diverse ricerche e successivi aggiornamenti. Esse hanno identificato tramite simulazione idraulica su modello numerico diversi profili iniluppo di piena teorici, i quali rappresentano l'oggetto del presente capitolo. In particolare, in un primo momento, si sono considerati i seguenti studi:

- SIMPO'82 - "Studio e progettazione di massima delle sistemazioni idrauliche dell'asta principale del Po, dalle sorgenti alla foce, finalizzate alla difesa e alla conservazione del suolo e alla utilizzazione delle risorse idriche" del 1982, redatto dal Magistrato per il Po, per mezzo della società SIMPO.
- SP1.1 - "Piene e naturalità degli alvei fluviali" del 1997, sviluppato nell'ambito del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI), per mezzo di un raggruppamento di imprese (AQUATER S.p.A., HYDRODATA S.p.A., IDROSER AGENZIA, C. LOTTI & ASSOCIATI S.p.A., V.A.M.S. INGEGNERIA S.r.l.)
- ST1.19 - "Aggiornamento dell'assetto idraulico di progetto del fiume Po dalla confluenza del Tanaro all'incile del Po di Goro mediante analisi modellistica numerica in

moto vario” del 2003, sviluppato dall’Autorità di bacino del Fiume Po con il supporto tecnico di Italcopo.

Le caratteristiche degli studi citati e dei relativi profili di piena sono sinteticamente riassunte in

Tabella 1.

STUDIO	SIMPO’82	SP1.1	ST1.19
Anno	1982	1997	2003
Rilievo topologico	1979/1980	1991	2000
Evento di taratura	Piene del 1976, 1977, 1979	Piena del 1994	Piena del 2000
Condizioni di moto	Stazionario da foce Tanaro a foce Ticino	Non stazionario da foce Tanaro a incile Po di Goro	Non stazionario da foce Tanaro a incile Po di Goro
Sollecitazione idrologica	Applicazione per tronchi di ideogrammi sintetici	Simulazione della piena sintetica “1994+’51”	Simulazione della piena sintetica “1994+’51” Simulazione della piena sintetica “2000+’51” Applicazione per tronchi di ideogrammi sintetici

Tabella 1: Principali caratteristiche degli studi idraulici considerati.

2.2 SIMPO’82

Il primo tentativo di affrontare in maniera organica lo studio del comportamento idraulico del complesso sistema fluviale dell’intero tratto medio inferiore del Fiume Po attraverso l’impiego di un modello matematico di tipo quasi bidimensionale può essere fatto risalire allo studio SIMPO, dei primi anni ottanta (v. Magis.Po, 1982 e 1984). Il 14 luglio 1980, infatti, il Magistrato per il Po affidò alla società S.I.M.P.O. S.p.A., che già si era dedicata a studi e progettazioni sul Po dal 1957 al 1976, producendo una serie di elaborati noti come “Piano SIMPO”, l’incarico di studiare e realizzare la progettazione di massima delle sistemazioni idrauliche dell’asta principale del Po, dalle sorgenti alla foce, finalizzate alla difesa ed alla conservazione del suolo ed alla utilizzazione delle

risorse idriche. Il lavoro venne consegnato il 30 ottobre del 1982 e approvato il 1° dicembre dello stesso anno.

La prima parte del lavoro ha avuto l'obiettivo di acquisire il maggior numero di conoscenze sulla morfologia dell'asta principale del Po e tutto il bagaglio di studi, indagini, memorie, ricerche e progetti eseguiti sui principali argomenti riguardanti molteplici aspetti tecnici, scientifici e socioeconomici del corso d'acqua e del suo bacino. Successivamente sono stati condotti studi sull'idrologia generale, sulle maree e sulle correnti marine in prossimità del Delta, sul trasporto solido, sulle falde rivierasche superficiali, sul comportamento statico ed idraulico delle arginature; sono stati poi realizzati modelli matematici idrologico e di simulazione idraulica del corso d'acqua quali strumenti di base per la progettazione di massima degli interventi per la difesa dalle piene e per l'utilizzazione delle risorse idriche. Sono state inoltre condotte analisi di impatto ambientale e economico – finanziarie per caratterizzare il progetto sotto il profilo della effettiva fattibilità.

Lo studio SIMPO'82 ha considerato l'intera asta del Fiume Po dalle sorgenti alla foce identificando 17 tronchi aventi caratteristiche morfologiche, idrauliche e ambientali omogenee (v. Magis.Po-SIMPO, 1982). Dieci dei 17 tronchi identificati risultano di interesse nella presente analisi (v. Tabella 2).

Tronco	Da	A	Sez. di monte	Moto
T7	Tanaro	Scrvia	00A	Stazionario
T8	Scrvia	Ticino	1	Stazionario
T9	Ticino	Trebbia	5C	Non stazionario
T10	Trebbia	Adda	17B	Non stazionario
T11	Adda	Taro	24D	Non stazionario
T12	Taro	Parma	32A	Non stazionario
T13	Parma	Oglio	35D	Non stazionario
T14	Oglio	Mincio	40B	Non stazionario
T15	Mincio	Panaro	46C	Non stazionario
T16	Panaro	Po di Goro	61A	Non stazionario

Tabella 2 – Tronchi omogenei identificati nello studio SIMPO'82 relativi al tratto di Po da foce

Tanaro a Incile Po di Goro sezione di riferimento monte e condizione di moto adottata nelle simulazioni idrauliche.

Il profilo di piena di riferimento prodotto nell'ambito dello studio SIMPO'82 (v. Magis.Po-SIMPO, 1982) è stato ottenuto attraverso una serie di simulazioni su modello numerico-idraulico, come di seguito descritto.

Per quanto riguarda i due tronchi T7 e T8 di Tabella 2 è stata presa a riferimento una condizione di moto di tipo stazionario. In particolare lo studio ha fatto riferimento sia alla massima piena storica dell'epoca in cui lo studio è stato redatto che a portate di piena di progetto con assegnato tempo di ritorno, predisponendo dei profili del pelo libero in condizioni di moto permanente.

Con riferimento ai tronchi T9-T16 lo studio ha impiegato un modello numerico-idraulico in condizioni di moto non stazionario (v. Tabella 2). Il modello è stato utilizzato separatamente per i diversi tronchi considerati imponendo le condizioni al contorno di valle a distanza opportuna dalla sezione di valle del tronco. Attraverso il modello idraulico si è simulato il fenomeno di propagazione di un'onda di piena sintetica di forma trapezia di assegnate caratteristiche (portata al colmo, durata del colmo, durata della fase di crescita e relativo aumento della portata, durata della fase calante e relativa riduzione della portata, v. Magis.Po-SIMPO, 1982). In particolare, la Tabella 3, tratta dallo studio SIMPO'82, riporta i valori di portata al colmo utilizzati per i diversi tronchi e propone un confronto con i valori di portata al colmo ricostruiti per la piena del 1951.

Tronco	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
Piena massima di riferimento (m³/s)	12000	13000	13000	13000	13000	12500	12500	12500
Portata massima piena del 1951 (m³/s)	11300	12800	13500	12700	12100	11700	11200	11000

Tabella 3: SIMPO'82 Portate di piena di riferimento e portate massime ricostruite per la piena del

1951

La Figura 1.1 illustra l'andamento delle portate di riferimento utilizzate nello studio in funzione della distanza progressiva. Le Figure 1.2a-1.2c riportano i profili di piena suddividendo l'asta di Fiume Po indagata in tre tratti di lunghezza pari a circa 110 km. Il primo tratto (tratto di monte) da Isola Sant'Antonio fino a Caselle Landi, il secondo (tratto medio) fino a monte della foce Oglio ed il terzo (tratto di valle) fino a Pontelagoscuro.

2.2.1 SIMPO'82: il sistema golenale

Le elaborazioni ed il piano di interventi predisposti nell'ambito dello studio si sono serviti dei risultati ottenuti simulando il comportamento idraulico in condizioni di piena dell'intero corso medio vallivo del Fiume Po. La messa a punto del modello ha richiesto la rappresentazione del comportamento idraulico del sistema fluvio-golenale del Fiume Po. A tal fine, nell'ambito dello studio è stato condotto un censimento che rappresenta ancor oggi un valido riferimento e che, nel tratto tra la confluenza della Dora Baltea e l'incile del Delta, ha portato ad identificare 53 golene chiuse, per un volume massimo di invaso disponibile pari a circa 463 Mm³. Le golene chiuse identificate assumono massima estensione nel tratto compreso tra foce Adda e foce Oglio. L'approfondimento dello studio SIMPO (Magis.Po – SIMPO, 1984) ha concentrato l'attenzione proprio su questo tratto di asta fluviale, pervenendo ad una proposta di interventi per un insieme di 39 golene chiuse di Po, le cui caratteristiche sono elencate in Tabella 4.

Id golena	Vol max [Mm³]	Sup max [ha]
44	2.47	138
42	0.75	30
43	3.92	98
130	6.93	304
129	9.38	375
41	3.62	128
128	10	303
127	26.82	838
126	19.66	742
124	14.2	461
123	15.18	416

Id golena	Vol max [Mm³]	Sup max [ha]
125	13.81	523
122	24.14	802
120	17.93	482
119	19.97	472
118	15.93	504
117	7.56	216
116	9.45	264
115	16.4	519
114	8.92	236
113	14.5	366
112	19.0	513
111	11.9	273
26	1.6	51
110	10.6	260
24	5.3	125
109	11.5	233
22	5.3	122
107	14.4	345
19	1.8	82
18	3.2	83
106	17.3	360
105	15.7	247
17	0.9	37
104	12.0	230
14	4.1	99
13	2.7	65
103	24.3	542
101	9.8	240
Totale	432.7	12124

Tabella 4: Golene chiuse interessate dalla proposta di interventi (Magis. Po – SIMPO, 1984)

2.3 SP1.1

Lo studio del 1997 ha prodotto un profilo di piena di riferimento utilizzando, come in parte anticipato in Tabella 1, un modello numerico-idraulico di tipo quasi-bidimensionale e simulando in condizioni di moto non stazionario il fenomeno di propagazione di un'onda di piena, generata in base ad uno scenario idrologico di riferimento, denominato convenzionalmente "94+51".

Lo scenario di riferimento è stato identificato dapprima stimando i valori di portata al colmo per 200 anni di tempo di ritorno con un'analisi di inferenza statistica delle serie di portata massime al

colmo misurate alle stazioni di Becca, Piacenza, Cremona, Casalmaggiore, Borgoforte e Pontelagoscuro. La stima ha utilizzato i dati di portata disponibili all'epoca dello studio, compresi quelli misurati nel periodo 1986-1996 all'epoca non ancora pubblicati, ma forniti dal Servizio Idrografico e Mareografico, ed ha preso a riferimento la legge probabilistica di Gumbel. Per il calcolo dei quantili di portata bisecolari nel tratto a monte della stazione di Becca tra la confluenza del Tanaro e la confluenza del Ticino (non coperto da stazioni di misura dotate di serie storiche significative) è stato utilizzato un criterio di similitudine idrologica. La Tabella 5 riassume i valori dei quantili con tempo di ritorno 200 anni così ottenuti.

Idrometro	Portata di piena con tempo di ritorno pari a 200 anni (m³/s)
Confluenza Tanaro	11850
Becca	13420
Piacenza	12650
Cremona	14240
Casalmaggiore	13070
Borgoforte	13400
Pontelagoscuro	13190

Tabella 5: Valori della portata di piena per 200 anni di tempo di ritorno (tratta da SP1.1, 1997).

Lo scenario idrologico “94+51” è quindi stato costruito utilizzando alla confluenza del Tanaro un'onda in ingresso avente la stessa forma ricostruita per l'evento del 1994 (all'epoca dello studio, evento storico molto recente e particolarmente significativo) ed un valore di portata al colmo di piena pari al quantile bisecolare stimato nell'ambito dello studio. Proseguendo verso valle sono stati assegnati ai maggiori affluenti valori della portata di piena confrontabili con quelli che hanno caratterizzato l'evento di piena del 1951, utilizzando cautelativamente idrogrammi a deflusso costante per tutta la durata della piena. I valori di portata al colmo degli affluenti principali, illustrati in Tabella 6 (tratta da SP1.1, 1997) sono stati identificati riproducendo alle diverse sezioni di verifica i valori di portata al colmo per 200 anni di tempo di ritorno calcolati con l'analisi di regressione statistica.

A commento dell'analisi SP1.1 si può rilevare che lo scenario di verifica "94+51" è stato costruito sulla base dell'osservazione del comportamento idrologico del bacino padano nel corso delle due piene più gravose del cinquantennio precedente allo studio. La piena del 1994 è stata più intensa e gravosa di quella del 1951 sul bacino piemontese, ma non ha ricevuto contributi sostanziali dagli affluenti appenninici e dagli emissari dei grandi laghi alpini nel corso della sua traslazione verso valle, come avvenuto nel 1951. Lo scenario sintetico "94+51" ipotizza che il comportamento complessivo del bacino padano possa essere ugualmente gravoso sia per la porzione piemontese che per la parte emiliana e lombarda e nel contempo impone che alle sezioni strumentate il valore del colmo di piena risulti confrontabile con quello stimato per i 200 anni di tempo di ritorno.

Affluente	Piena '94 (m³/s)	Evento "94+51" (m³/s)
T.Scrivio	200	200
F.Ticino	600	1000
T.Lambro	300	500
T.Trebbia	200	1250
T.Nure	200	250
T.Chiavenna	100	250
F.Adda	800	1150
T.Taro	250	250
T.Parma	300	350
T.Enza	300	350
F.Oglio	-	550
F.Secchia	-	500
F.Panaro	-	500

Tabella 6: Portate stimate per gli affluenti (piena 1994 evento "94+51"; tratta da SP1.1, 1997).

Le portate al colmo di piena calcolate dal modello in corrispondenza dei sensori principali idrometrici di verifica per lo scenario sintetico "94+51" sono elencate in Tabella 7, mentre l'andamento dei valori di porta al picco della piena è illustrato in funzione della distanza progressiva in Figura 1.1. Il profilo di piena risultante, ottenuto costruendo l'involuppo dei colmi di livello calcolati attraverso un modello numerico idraulico di tipo quasi bidimensionale, è tracciato schematicamente per i tre tronchi di riferimento nelle Figure 1.2a–1.2c.

Idrometro	Portata massima (m³/s)
Becca	13600
Piacenza	13000
Cremona	14300
Casalmaggiore	13200
Boretto	13700
Borgoforte	13100
Pontelagoscuro	13000

Tabella 7: Portate massime calcolate alle sezioni strumentate per l'evento sintetico "94+51" (tratta da SP1.1, 1997).

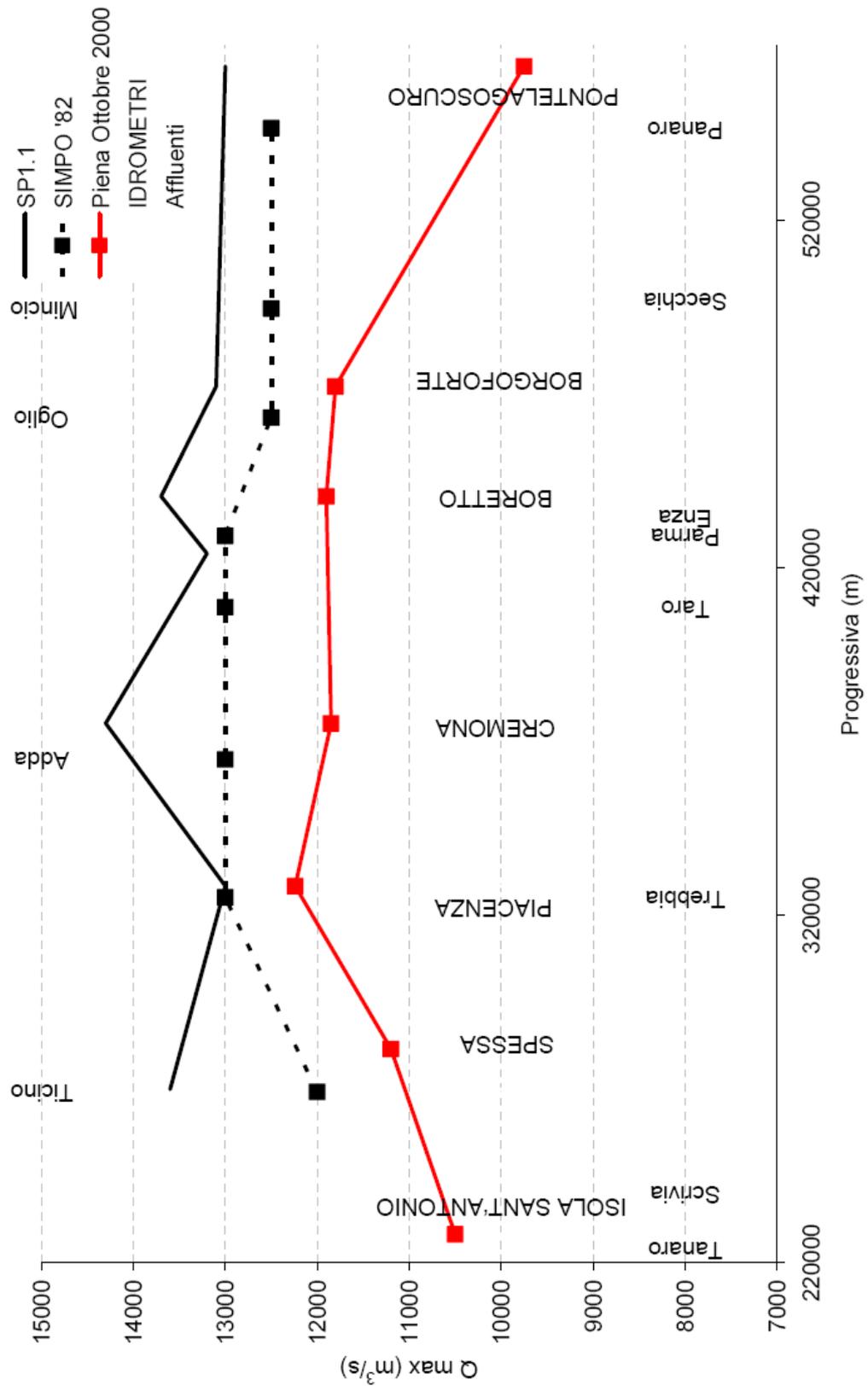


Fig. 1.1: Andamento delle portate storiche (evento di piena del 2000) e sintetiche massime al colmo in funzione della distanza progressiva (foce Tanaro: progressiva km 224.395).

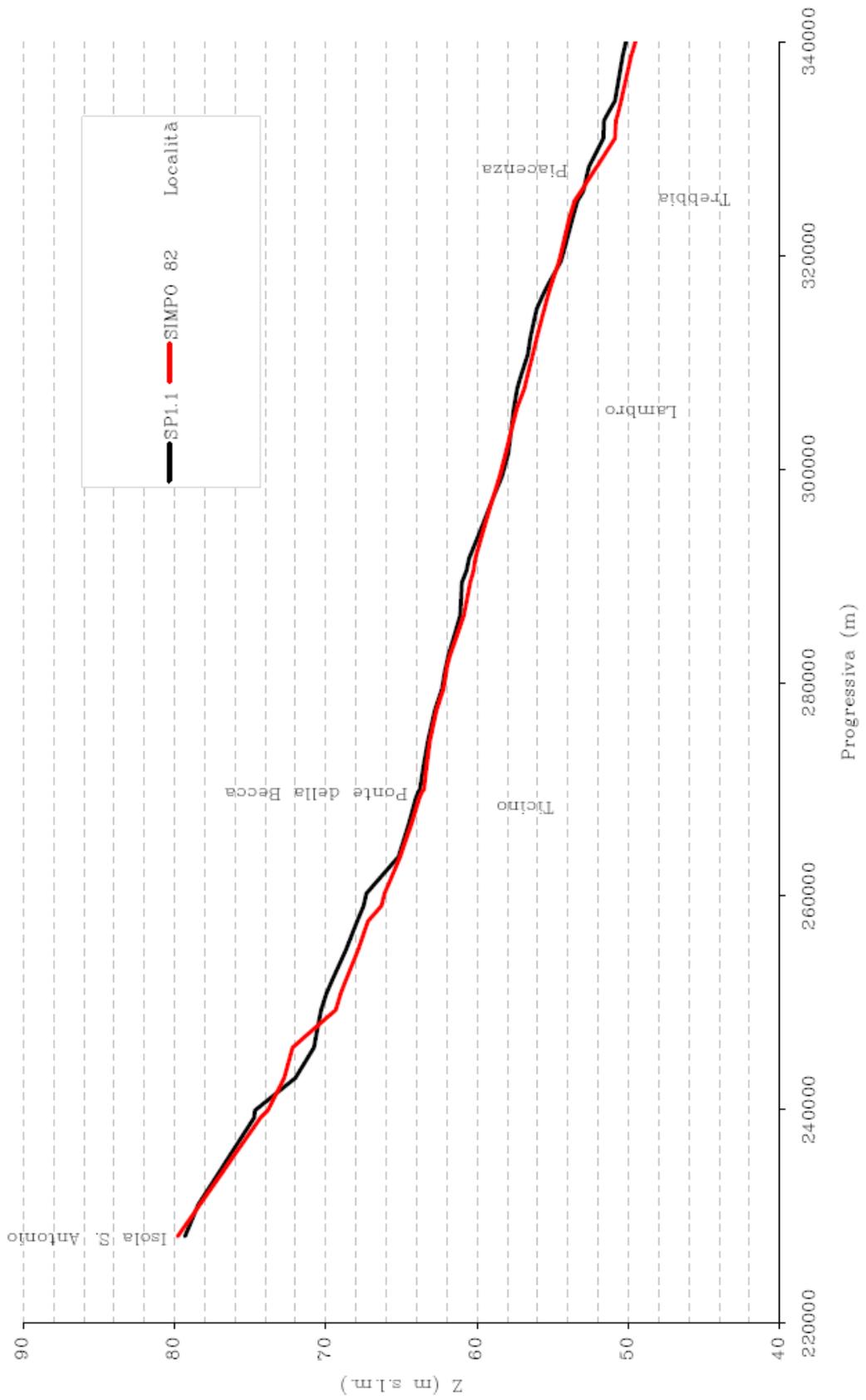


Fig. 1.2a: Tratto di monte: profili di piena SP1.1 e SIMPO '82 in funzione della distanza progressiva (foce Tanaro: progressiva km 224.395).

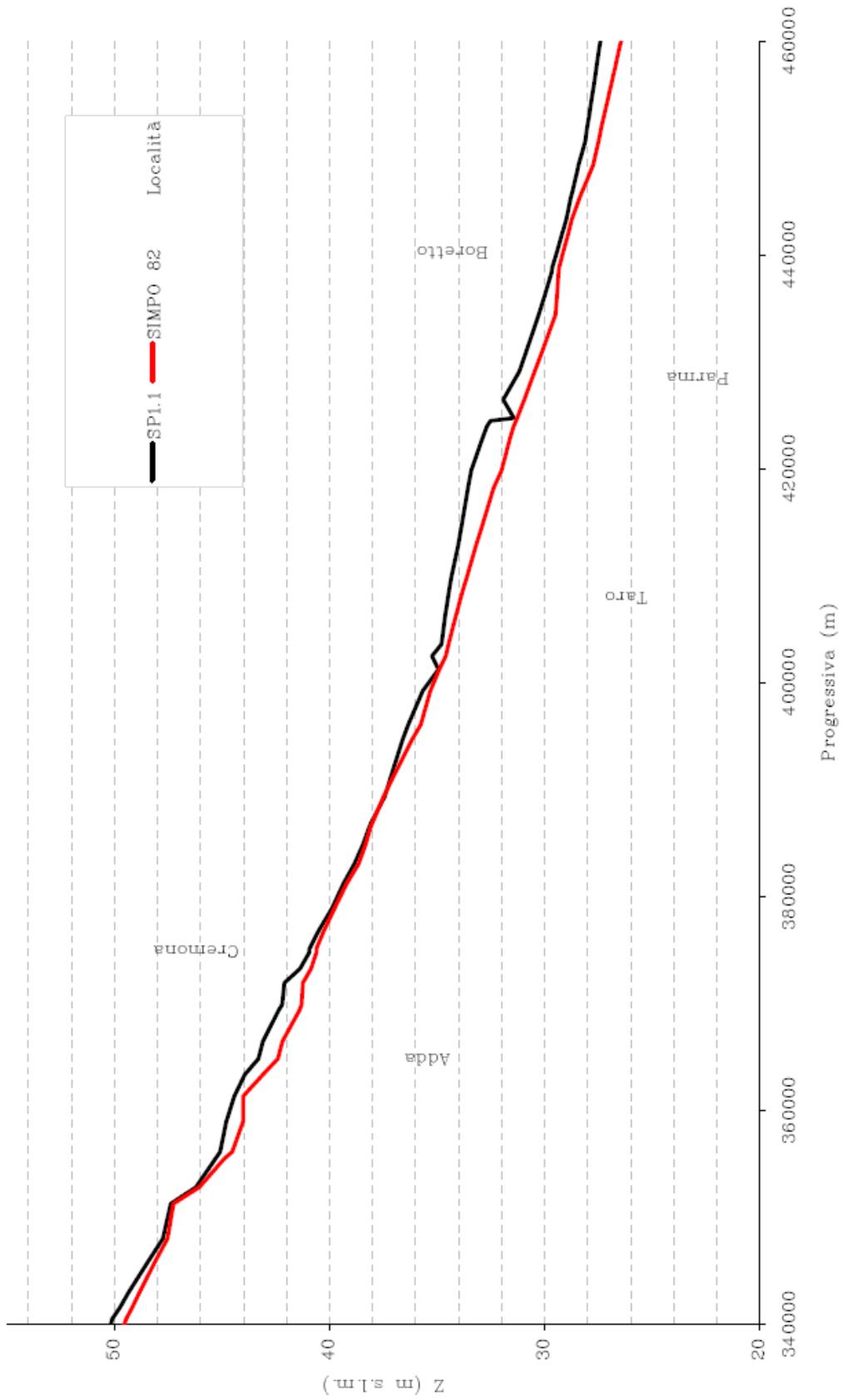


Fig. 1.2b: Tratto medio: profili di piena SP1.1 e SIMPO '82 in funzione della distanza progressiva (foce Tanaro: progressiva km 224.395).

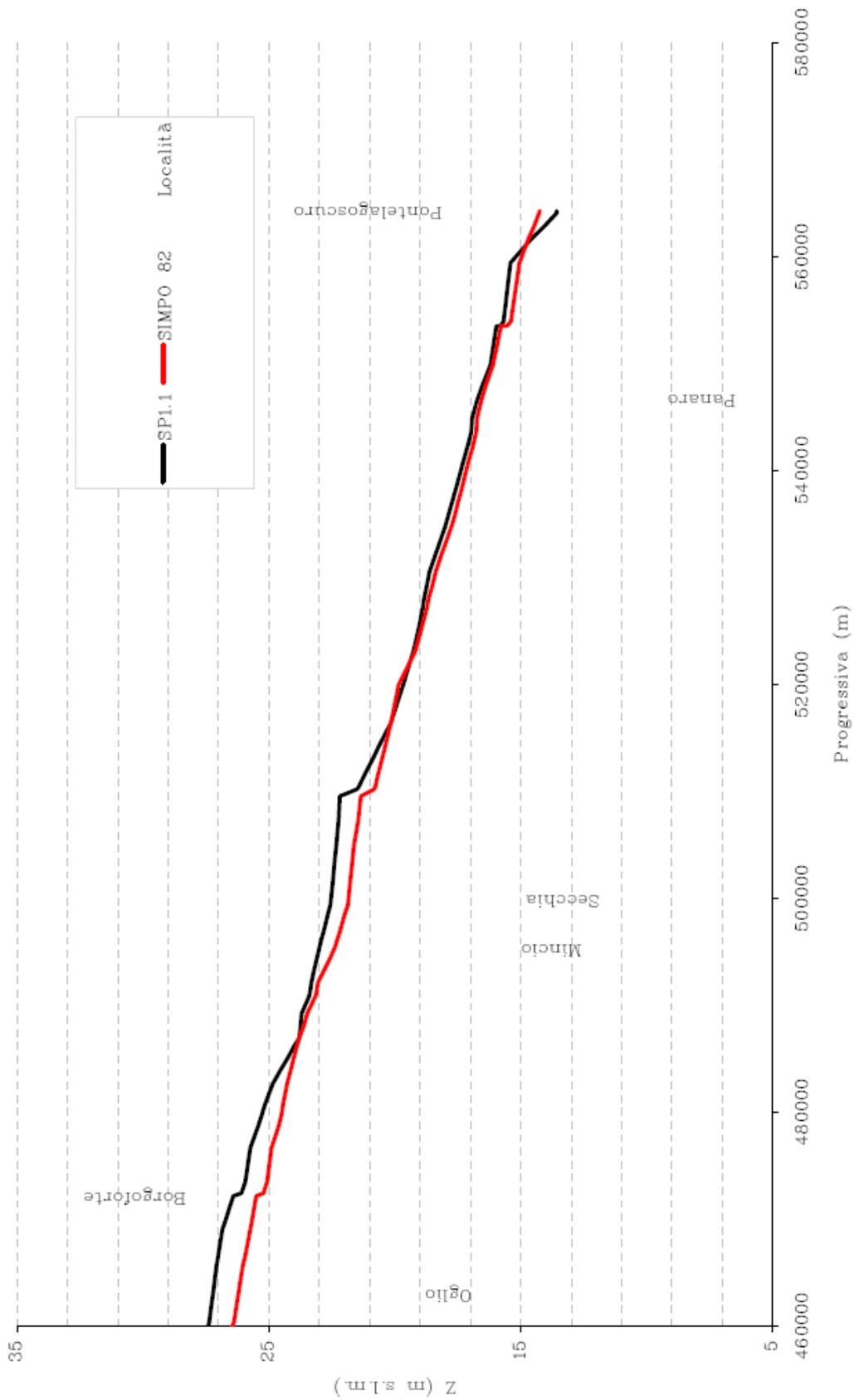


Fig. 1.2c: Tratto di valle: profili di piena SP1.1 e SIMPO '82 in funzione della distanza progressiva da foce Tanaro (Km 224.395).

2.4 ST1.19

Il presente paragrafo descrive i profili di piena relativi allo studio di “Aggiornamento dell’assetto idraulico di progetto del Fiume Po dalla confluenza del Tanaro all’incile del Po di Goro mediante analisi modellistica numerica in moto vario” (ST1.19, 2003), sviluppato dall’Autorità di bacino del Fiume Po con il supporto tecnico di Italcopo, denominato ST1.19.

2.4.1 Metodologia dello studio ST1.19

Nell’ambito dello studio ST1.19 è stato messo a punto un modello di moto vario quasi-2D del Fiume Po, dalla confluenza del fiume Tanaro a Pontelagoscuro, su una lunghezza d’asta di circa 324 km. La geometria dell’alveo di piena del Po è stata costruita sulla base del rilievo topografico eseguito dal Magistrato per il Po nel corso degli anni 1999-2000.

Il modello idraulico è stato prima calibrato sulla piena dell’ottobre 2000 e poi è stato utilizzato per simulare tre eventi di piena sintetici (v. anche Tabella 1):

- 94+51;
- 2000+51;
- 200 anni.

Lo scenario “94+51”, come detto, utilizza un’onda di monte, alla confluenza del Tanaro, di forma analoga a quella ricostruita per l’evento del 1994, ma assumendo come valore di picco della stessa quello ottenuto dalle valutazioni idrologiche relative all’evento con 200 anni di tempo di ritorno. Ai maggiori affluenti sono stati assegnati valori della portata di piena simili a quelli che hanno caratterizzato l’evento di piena del 1951, utilizzando cautelativamente idrogrammi a deflusso costante per tutta la durata della piena, in modo da riprodurre alle diverse sezioni di verifica i valori di portata al colmo per 200 anni di tempo di ritorno calcolati con l’analisi di regressione statistica.

La seguente tabella riporta, per tale scenario, i valori di portata al colmo lungo l’asta del Po.

Idrometro	Portata massima (m³/s)
Spessa	12250
Piacenza	13350
Cremona	13500
Boretto	13000
Borgoforte	12900
Pontelagoscuro	12480

Tabella 8: Portate massime calcolate alle sezioni strumentate per l'evento sintetico "ST1.19 94+51"
(tratta da ST1.19, 2003).

Lo scenario "2000+51" è caratterizzato da un'onda in ingresso alla confluenza del Tanaro di forma analoga a quella ricostruita per l'evento del 2000, ma assumendo come valore di picco quello ottenuto dalle valutazioni idrologiche relative all'evento con 200 anni di tempo di ritorno. Ai maggiori affluenti sono stati assegnati valori della portata di piena simili a quelli che hanno caratterizzato l'evento di piena del 1951, utilizzando cautelativamente idrogrammi a deflusso costante per tutta la durata della piena, in modo da riprodurre alle diverse sezioni di verifica i valori di portata al colmo per 200 anni di tempo di ritorno calcolati con l'analisi di regressione statistica.

La seguente tabella riporta, per tale scenario, i valori di portata al colmo lungo l'asta del Po.

Idrometro	Portata massima (m³/s)
Spessa	12000
Piacenza	13400
Cremona	13800
Boretto	13350
Borgoforte	13200
Pontelagoscuro	13200

Tabella 9: Portate massime calcolate alle sezioni strumentate per l'evento sintetico "ST1.19
2000+51" (tratta da ST1.19, 2003).

Lo scenario "200 anni" utilizza onde sintetiche a tempo di ritorno 200 anni, ottenute per mezzo di un modello statistico di tipo regionale. In particolare, tali onde sono state ricostruite sulla base di opportune elaborazioni statistiche delle serie storiche dei colmi di piena e di portata massima per

assegnata durata nelle seguenti stazioni idrometriche: Moncalieri, Meirano, Crescentino, Casale Monferrato, Valenza, Piacenza, Cremona, Boretto, Borgoforte, Pontelagoscuro.

La metodologia seguita per la determinazione delle suddette onde di progetto utilizza una procedura di regionalizzazione basata sulla costruzione della curva di riduzione dei colmi di piena e sulla individuazione della posizione media del picco in ciascuna durata a partire dall'analisi delle onde di piena storiche. Nello specifico, per i vari eventi di piena sono state estratte le portate massime per assegnata durata e la posizione del colmo (ascissa temporale). Tali dati sono stati poi statisticamente elaborati secondo leggi di regressione probabilistica al fine di ottenere la curva di riduzione dei colmi di piena. Infine, la costruzione dell'idrogramma sintetico è stata eseguita imponendo che la massima portata media in ciascuna durata coincida con quella prevista dalla curva di riduzione; la forma dell'idrogramma è invece determinata dal coefficiente esprimente la posizione del picco. La Tabella 10 riporta, per tale scenario, i valori di portata al colmo.

Idrometro	Portata massima (m³/s)
Spessa	13490
Piacenza	13920
Cremona	14030
Boretto	13850
Borgoforte	13260
Pontelagoscuro	12340

Tabella 10: Portate massime calcolate alle sezioni strumentate per l'evento sintetico "T = 200 anni"

(tratta da ST1.19, 2003).

A differenza degli scenari "94+51" e "2000+51" che prevedono un unico modello dell'asta di Po compresa fra Isola S. Antonio e Pontelagoscuro, la modellazione idraulica dello scenario "200 anni" è stata condotta suddividendo l'asta del Fiume Po in diversi tratti: Isola S. Antonio – Ticino; Ticino – Trebbia; Trebbia – Adda; Adda – Arda; Arda – Boretto; Boretto – Borgoforte; Borgoforte – Pontelagoscuro. Il comportamento idraulico di ciascun tratto viene simulato inserendo come condizione al contorno di monte la relativa onda sintetica a $T = 200$ anni, ottenuta mediante l'analisi

statistica di tipo regionale sopra descritta. In tal modo ci si svincola dalla necessità di mettere in conto il contributo degli affluenti

2.4.2 Profili di piena ST1.19

La Figura 2.3 riporta i valori di portata massima calcolati nelle sezioni strumentate per i tre scenari dello studio ST1.19 (94+51, 2000+51 e 200 anni). Le Figure 2.4 (*a*, *b* e *c*) riportano i tre profili di piena ST1.19 lungo l'asta del Fiume Po da foce Tanaro a Pontelagoscuro. In particolare, i profili sono rappresentati suddividendo l'asta di Fiume Po indagata in tre tratti di lunghezza pari a circa 110 km. Il primo tratto (tratto di monte) da Isola Sant'Antonio fino a Caselle Landi, il secondo (tratto medio) fino a monte della foce Oglio ed il terzo (tratto di valle) fino a Pontelagoscuro. Dall'analisi delle Figure 1.4, si rileva, in primo luogo, che nel tratto di monte (Figura 2.4*a*), a valle di Isola Sant'Antonio, lo scenario "94+51" fornisce livelli idrici uguali o superiori agli altri due scenari. Ciò dovrebbe essere dovuto all'utilizzo di un idrogramma in ingresso alla sezione di Isola Sant'Antonio (Figura 2.3) caratterizzato da un valore al colmo maggiore rispetto agli altri scenari, in apparente contrasto con quanto riportato nella relazione relativa allo studio ST1.19 di cui si è potuto disporre (ST1.19, 2003; v. anche Tabelle 8 e 9).

Nel tratto di monte (Figura 2.4*a*), a valle della confluenza del Ticino, i due profili "200 anni" e "2000+51" sono praticamente coincidenti ed entrambi lievemente inferiori (di una quantità al massimo pari a circa 30 cm) al profilo "94+51". Tale risultato non sembra trovare un riscontro diretto nell'andamento delle portate sintetiche al colmo (Figura 2.3) che mostra come negli scenari "94+51" e "2000+51" la portata al colmo sia pari a circa 12000 m³/s a Spessa e 13400 m³/s a Piacenza, mentre per lo scenario con idrogrammi sintetici la portata al colmo sia pari a 12400 m³/s a Spessa e a circa 14000 m³/s a Piacenza.

Nel tratto medio (Figura 2.4*b*), i tre profili sono praticamente coincidenti. Tuttavia la Figura 2.4*b* mostra una particolare singolarità: il profilo relativo allo scenario "200 anni" si distacca dagli altri su due tratti, presentando livelli idrometrici inferiori agli altri due: il primo a monte della confluenza

Adda, il secondo a valle di Boretto. Tali singolarità potrebbero essere dovute alla particolare metodologia utilizzata per simulare tale scenario sintetico, che non tiene conto (direttamente) dell'apporto degli affluenti (Paragrafo 2.4.1).

Nel tratto di valle (Figura 2.4c) si osserva che le altezze relative allo scenario "200 anni" si riducono fino al punto da rendere tale profilo di altezza sensibilmente inferiore a "1994+51" e "2000+51". Tale risultato concorda con l'andamento delle portate sintetiche al colmo (Figura 1.3) che mostra come lo scenario "2000+51" presenti i valori di portata maggiori nel tratto di valle dell'asta di Fiume Po indagata: a Pontelagoscuro tale scenario è caratterizzato da una portata pari a circa 13000 m³/s contro i 12340 dello scenario "200 anni" ed 12480 dello scenario "94+51". Sulla base di quanto osservato, i tre profili di piena ST1.19 sono praticamente equivalenti su gran parte dell'asta di Po oggetto del presente studio. La metodologia impiegata per ottenere il profilo "200 anni" sembrerebbe essere la metodologia più affidabile sia perché utilizza una sollecitazione idrologica basata sull'elaborazione statistica di dati osservati, sia perché fornisce, nel tratto di valle da Borgoforte a Pontelagoscuro, un andamento dei valori di portata ragionevolmente in accordo con quanto storicamente avvenuto negli eventi di piena storici (1951, 1994 e 2000).

Ad ogni modo, si vuole sottolineare che restano alcune riserve sullo studio ST1.19. In primo luogo, si ritiene che sarebbe opportuna una rigorosa verifica dell'attendibilità delle valutazioni statistiche condotte per conseguire le stime dei quantili di portata con tempo di ritorno 200 anni. Tali valori infatti differiscono da quelli utilizzati in altri studi (v. ad es., Politecnico di Milano, 2001). In secondo luogo, sarebbe opportuna una revisione della modellazione idraulica. Infatti, l'analisi dei profili di piena ha messo in luce che il profilo ST1.19 non è adatto come profilo di riferimento dato che: (a) nel tratto medio- alto presenta spesso quote idriche persino inferiori a quelle relative alla piena dell'ottobre 2000; (b) è caratterizzato da un andamento molto più irregolare sia rispetto ai profili di riferimento degli studi SIMPO'82 e SP1.1, che alle piene storiche.

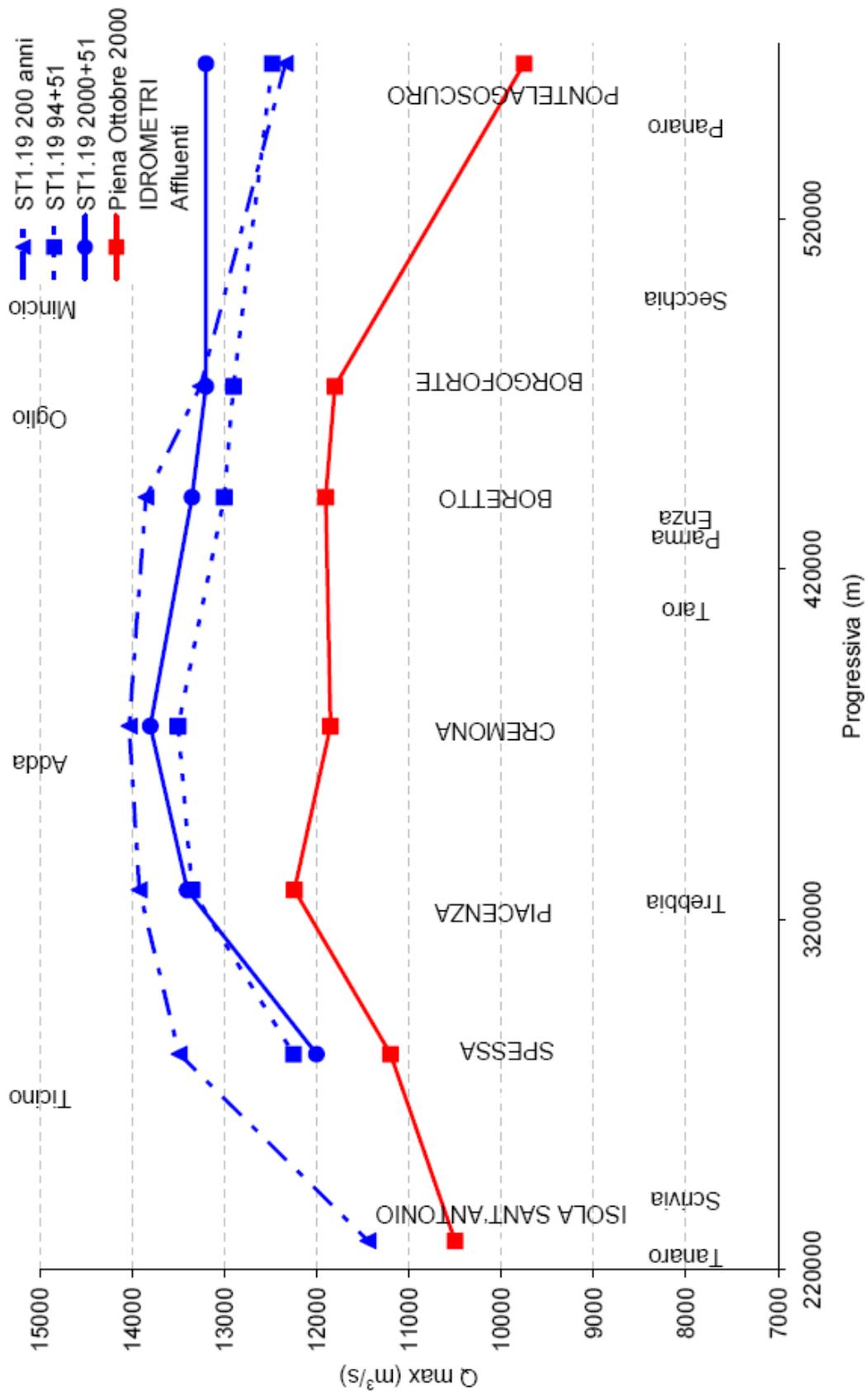


Fig. 1.3: Andamento delle portate storiche (evento di piena del 2000) e sintetiche massime al colmo in funzione della distanza progressiva (foce Tanaro: progressiva km 224.395).

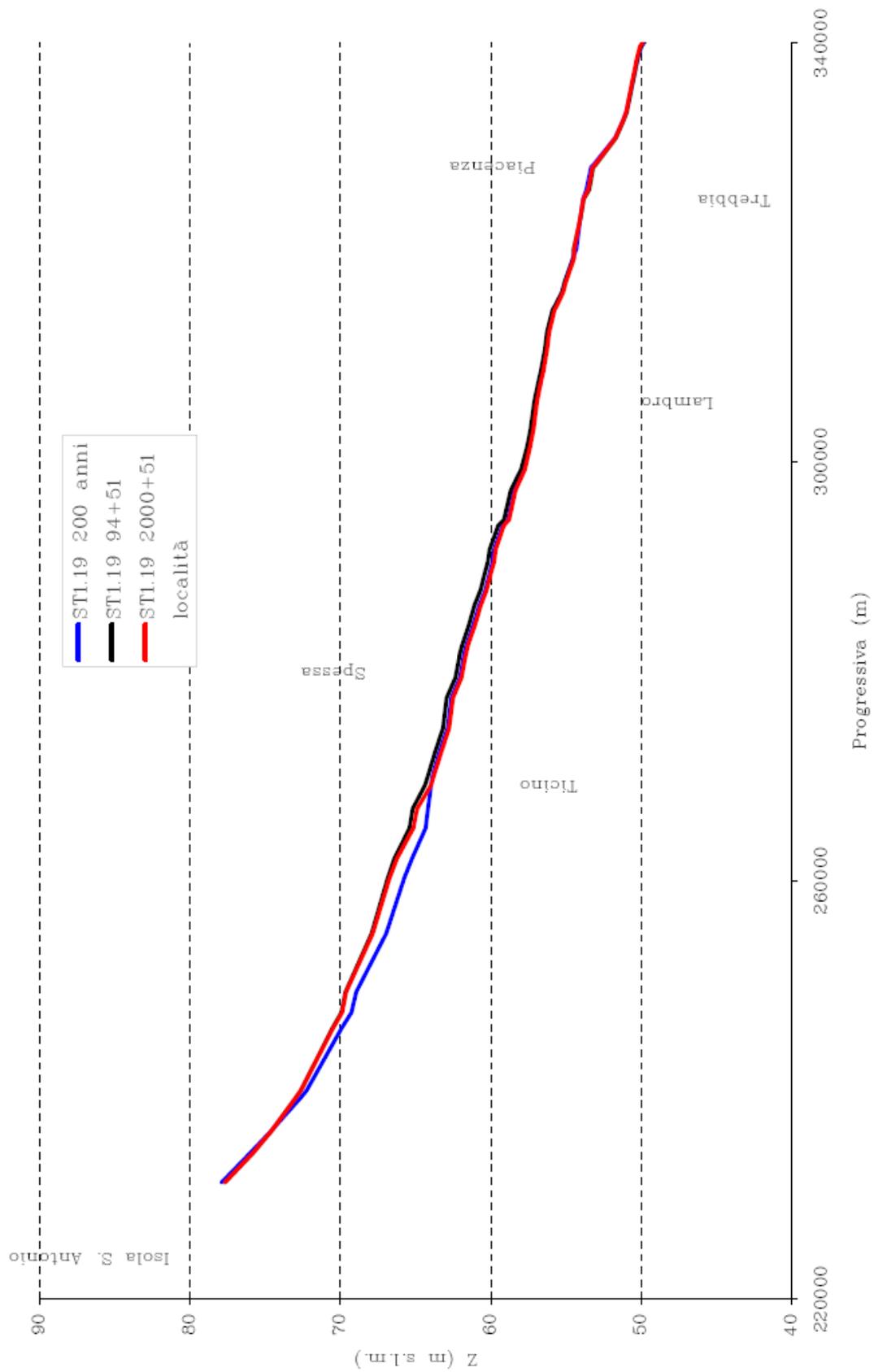


Fig. 1.4a: Tratto di monte: profili di piena ST1.19 in funzione della distanza progressiva (foce Tanaro progressiva: km 224.395).

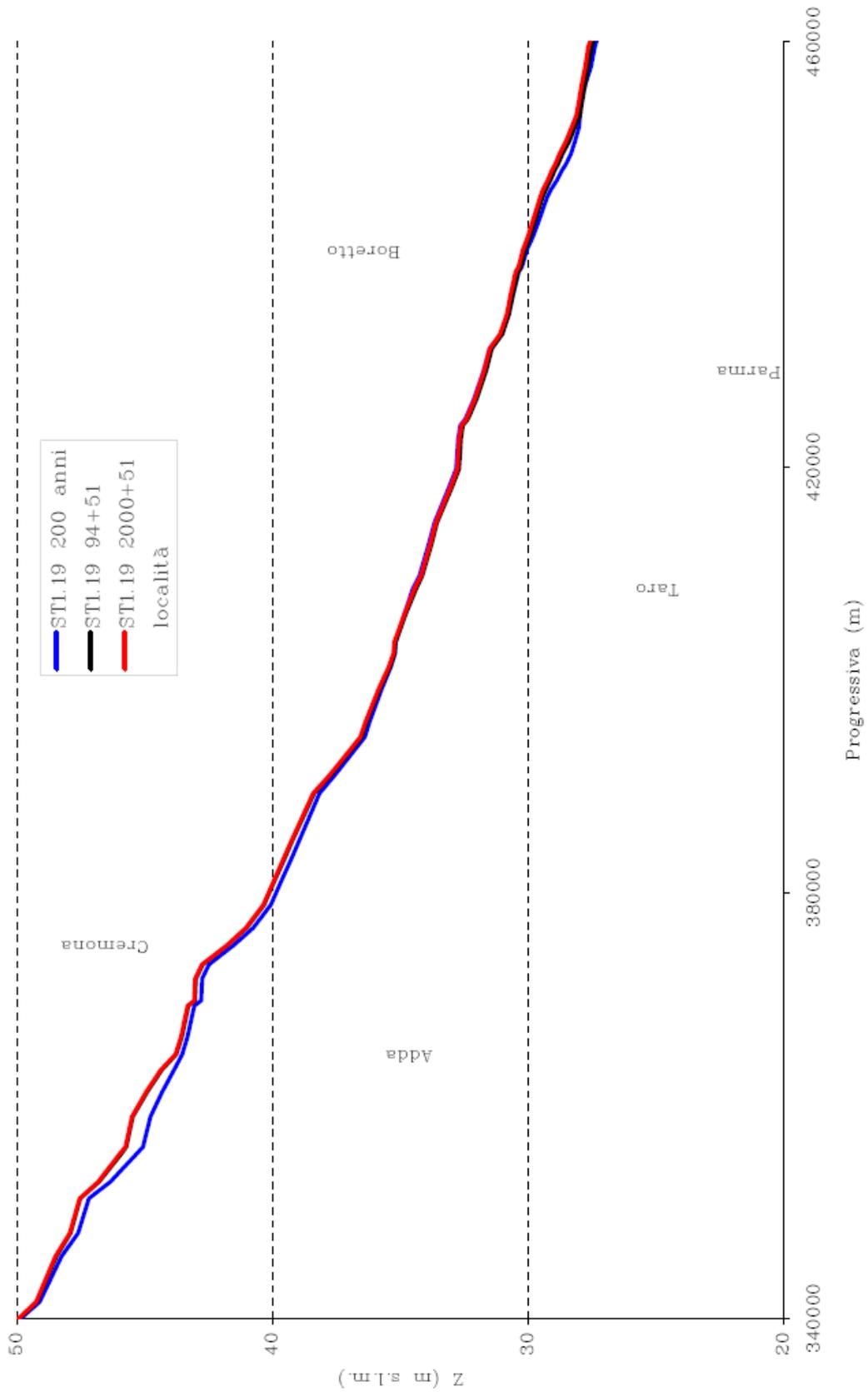


Fig. 1.4b: Tratto medio: profili di piena ST1.19 in funzione della distanza progressiva (foce Tanaro progressiva: km 224.395).

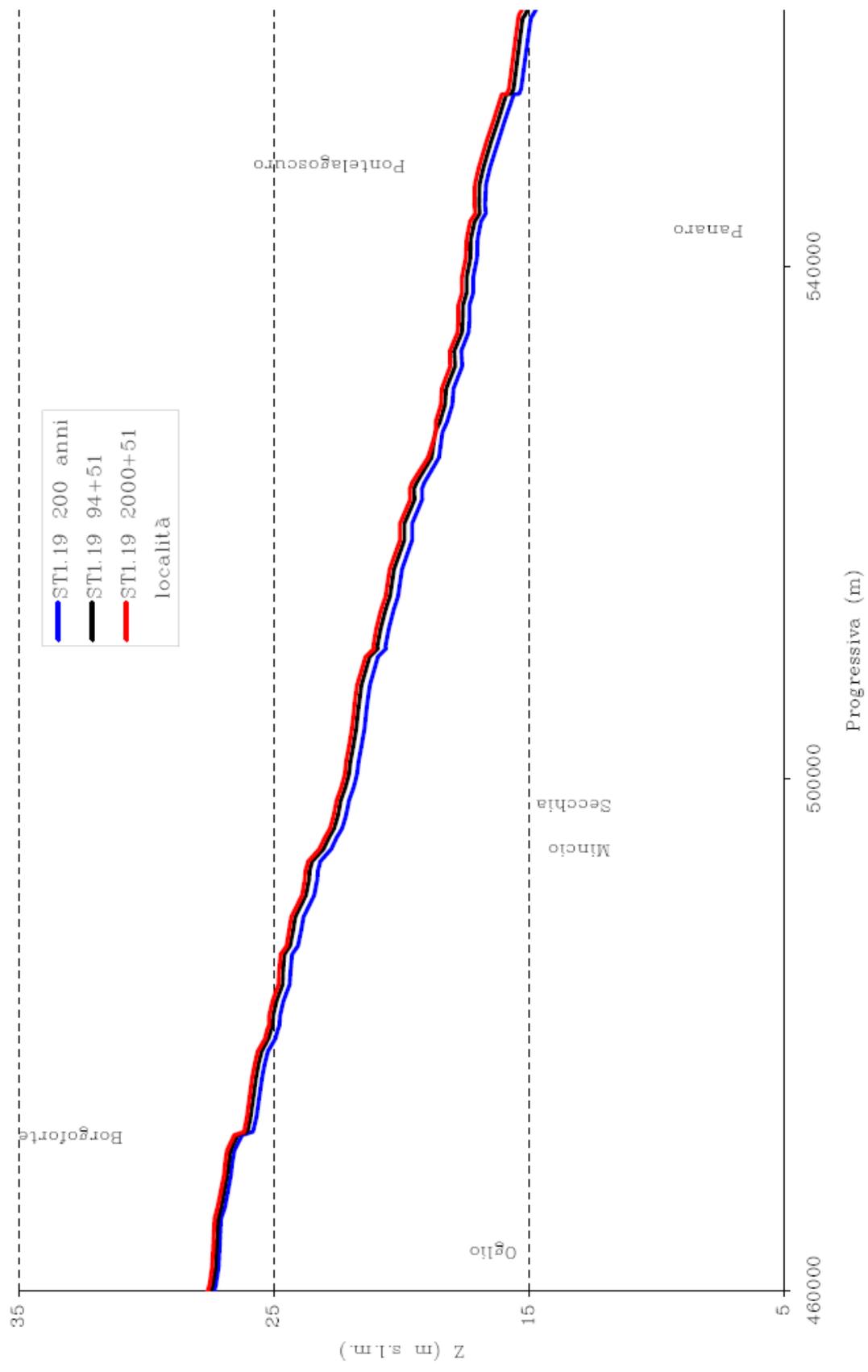


Fig. 1.4c: Tratto di valle: profili di piena ST1.19 in funzione della distanza progressiva (foce Tanaro progressiva: km 224.395).

2.5. Analisi critica dei profili di piena esistenti

L'obiettivo della presente parte dell'elaborato è quello di illustrare un'analisi critica dei profili di piena di riferimento ad oggi prodotti per il tratto medio basso dell'asta del Fiume Po. Le finalità principali sono: *i*) identificare, possibilmente in maniera univoca, il profilo di piena di riferimento più indicato alla luce delle conoscenze maturate nel corso degli studi idraulici ad oggi disponibili e a valle degli aggiornamenti della descrizione morfologica dell'alveo; *ii*) definire una proposta metodologica per l'identificazione degli scenari idrologici di riferimento, da impiegare nella verifica del comportamento idraulico in condizioni di piena del corso medio basso del Fiume Po. Per quanto riguarda il confronto tra i profili di riferimento prodotti negli studi SIMPO'82 e SP1.1 si sottolinea come i due studi si differenzino in maniera significativa principalmente per:

- le assunzioni in merito alle caratteristiche dell'evento di riferimento (stazionario nel tronco di monte per il SIMPO'82, non stazionario per l'intera asta fluviale per il SP1.1);
- la descrizione dell'alveo (monocursale a geometria semplificata nel SIMPO'82, quasi bidimensionale nel SP1.1);
- le intervenute variazioni geometriche e morfologiche dell'alveo (il SIMPO'82 adotta sezioni trasversali rilevate nel 1979/1980, lo studio SP1.1 considera sezioni rilevate nel 1991)
- l'evento idrologico di riferimento (relazionabile alla massima piena del 1951 per il SIMPO'82; scenario sintetico "94+51" con tempo di ritorno circa bicentenario per il SP1.1, decisamente più gravoso del precedente, v. Figura 1.1).

I livelli calcolati nei due studi riflettono evidentemente queste differenze. Fattori locali hanno prodotto per lo studio SIMPO'82 livelli di riferimento superiori ai corrispondenti livelli dello studio SP1.1, nonostante detto studio faccia riferimento a uno scenario più gravoso. Le incertezze di questo tipo presentano in ogni caso valenza locale e ricadono nei limiti di significatività delle schematizzazioni utilizzate in entrambi gli studi. In generale, si nota per il profilo SP1.1 (evento

“94+51”) un innalzamento medio dei livelli di circa 40 cm rispetto al precedente profilo SIMPO’82. Sovralzi anche superiori agli 80 cm si hanno in corrispondenza degli attraversamenti a causa delle perdite di carico localizzate (specialmente a monte di Piacenza di Casalmaggiore e del ponte della S.S.62), non schematizzate nello studio SIMPO’82 e presenti invece nello studio SP1.1 (v. SP1.1, 1997).

Sulla base delle considerazioni sopra esposte, unitamente all’esame dei valori di portata al colmo di piena ricostruiti per gli eventi storici maggiormente significativi, si ritiene che il profilo di piena di riferimento prodotto nell’ambito dello studio SP1.1 (evento “94+51”) possa effettivamente costituire un aggiornamento del profilo ottenuto nell’ambito dello studio SIMPO’82.

Come si è già avuto modo di segnalare al precedente Sottoparagrafo 1.5.1, sembra che dei tre scenari di riferimento presi in considerazione dallo studio ST1.19 (c.d., “94+51”, “2000+51” e “200 anni”, ovvero idrogrammi sintetici con tempo di ritorno pari a 200 anni), quello relativo agli idrogrammi sintetici sia il più significativo. Ciò sia in ragione della vasta base dati utilizzata per le elaborazioni statistiche che per il fatto di produrre, in linea di principio, un profilo di riferimento caratterizzato da una criticità dei livelli idrici omogenea sull’intera asta considerata.

Le Figure 2.5 e 2.6 propongono un confronto tra gli scenari di piena di riferimento SP1.1 e ST1.19 (“200 anni”) e l’evento di piena dell’ottobre 2000. In particolare, la Figura 2.5 riporta i valori di portata al colmo relativi ai tre casi elencati per alcune sezioni significative, mentre la Figura 2.6 propone il confronto dei tre corrispondenti profili di piena. Il profilo “Piena Ottobre 2000” riporta il valor medio della quota assoluta delle tracce di piena rilevate ex-post in destra e sinistra idraulica. I profili “SP1.1” e “ST1.19 200 anni” illustrano i valori massimi delle quote del pelo libero ottenute mediante simulazione idraulica nei due studi SP1.1 (1997) e ST1.19 (2003).

L’andamento dei valori di portata illustrato in Figura 2.5 evidenzia come vi sia un sostanziale accordo tra i due scenari sintetici adottati negli studi SP1.1 e ST1.19. Le differenze maggiori

riguardano il tratto di monte e le sezioni di Piacenza e di Cremona. E' opportuno rilevare inoltre come l'andamento delle portate al colmo caratteristico dello studio ST1.19 (scenario "200 anni") rifletta l'andamento delle portate ricostruite per l'evento di piena del 2000, mostrando in particolare una visibile riduzione dei valori al colmo di piena da Borgoforte a Pontelagoscuro. Nel confronto tra le tracce di piena rilevate in occasione dell'evento di piena dell'ottobre 2000 ed i profili di piena degli studi SP1.1 e ST1.19 (idrogrammi sintetici "200 anni") proposto nella Figura 2.6, si rileva che:

- il profilo di piena "94+51" costruito nello studio SP1.1 si mostra in sostanziale accordo con le tracce di piena dell'evento 2000, mantenendosi praticamente ovunque superiore ad esse. Nel tratto tra Piacenza e Boretto si rilevano distanze minime tra i due inviluppi di piena, mentre distanze maggiori sono presenti a monte e a valle del tratto indicato. In corrispondenza della sezione idrometrica di Piacenza le tracce di piena rilevate nel 2000 si mostrano localmente superiori al profilo SP1.1.
- nonostante le affinità tra gli andamenti lungo l'asta fluviale delle portate al colmo di piena illustrati in Figura 2.5, la Figura 2.6 evidenzia alcune incongruenze tra le tracce di piena rilevate ed il profilo di riferimento prodotto nell'ambito dello studio ST1.19 ("200 anni"). In particolare, spiccano quote del pelo libero confrontabili (se non inferiori) a quelle realmente osservate in seguito all'evento nella parte di monte (fino a confluenza Ticino), a cui segue un andamento altalenante del profilo di piena ST1.19 attorno alla traccia del 2000 fino a Borgoforte. A valle di Borgoforte il profilo di riferimento si distacca dalla traccia di piena dell'evento del 2000, mantenendosi ad essa superiore con distanze crescenti fino a Pontelagoscuro (anche superiori a 2 m).

Ad integrazione di queste considerazioni occorre rilevare che, mentre le simulazioni condotte nello studio SP1.1 (evento sintetico "94+51") consentono una schematizzazione del comportamento idraulico dell'intero tratto di asta fluviale di interesse, le simulazioni relative al profilo di riferimento citato per lo studio ST1.19 analizzano il comportamento idraulico del corso d'acqua per

tronchi. Ciò introduce necessariamente delle discontinuità, che da un punto di vista fisico sono difficilmente giustificabili. Per contro, proprio perché basati sulle osservazioni di portata disponibili, gli idrogrammi sintetici (studio ST1.19) riflettono in maniera più fedele il regime dei deflussi di piena dell'intero corso d'acqua (v. ad es. il confronto proposto in Figura 2.5).

La considerazione precedente si applica in particolare alla porzione di valle del tratto di interesse del Fiume Po (tra Borgoforte e Pontelagoscuro). Come illustrato nella Figura 2.5, l'andamento dei colmi di portata degli idrogrammi duecentennali sintetici riflette l'andamento dei colmi di portata ricostruiti per l'evento di piena del 2000. Gli scenari sintetici "94+51" (SP1.1, ST1.19) e "2000+51" (ST1.19) sono invece caratterizzati da assenza di laminazione nel tratto di asta di Po tra Borgoforte e Pontelagoscuro. Per lo scenario "2000+51" si segnala inoltre un valore di portata a Pontelagoscuro significativamente maggiore sia dei valori caratteristici di tutti gli altri studi considerati, che del valore riportato proprio nello stesso studio ST1.19 con riferimento alle simulazioni relative agli idrogrammi sintetici bisecolari.

In linea di principio, la maggior corrispondenza tra l'andamento dei valori di portata al colmo di piena degli idrogrammi sintetici bisecolari e quello delle portate ricostruite per diversi eventi di piena significativi dovrebbe tradursi in livelli idrici in alveo caratterizzati da un livello di criticità più omogeneo. Ciononostante, il confronto tra il profilo di riferimento ST1.19 ("200 anni") e le tracce di piena dell'evento dell'ottobre 2000 non sembra confermare questa considerazione.

Sulla base delle analisi condotte e delle considerazioni sopra esposte si ritiene quindi che il profilo di piena ottenuto nello studio SP1.1 (evento "94+51") possa rappresentare il profilo di riferimento, tra i profili di piena ad oggi disponibili. Si ritiene inoltre, come già segnalato, che l'impiego di idrogrammi sintetici di piena associati ad un preassegnato livello di rischio, espresso in termini di tempo di ritorno (200 anni), possa fornire utili indicazioni nell'identificare il profilo di piena di riferimento qualora il comportamento idraulico del corso d'acqua di interesse sia adeguatamente schematizzato.

A conclusione delle valutazioni presentate preme mettere in risalto che i limiti dell'attuale quadro dei profili di piena di riferimento possono essere superati, almeno in parte, attraverso lo sviluppo di ulteriori indagini mirate a produrre:

1. una verifica dell'attendibilità delle valutazioni statistiche condotte per conseguire stime di quantili con tempo di ritorno 200 anni.
2. una miglior caratterizzazione degli apporti degli affluenti nell'identificazione di scenari idrologici di progetto, quali il "94+51" e il "2000+51"; obiettivo principale è il superamento dell'impostazione corrente ad apporto costante nel tempo (v. studio SP1.1 e ST1.19), che è probabilmente una delle cause della limitata laminazione dei colmi di portata nella parte bassa del tratto di Po di interesse ottenute nei due studi menzionati.
3. una più efficace schematizzazione del comportamento idraulico del sistema fluvio-golenale del Fiume Po, che sfrutti efficacemente sia i nuovi rilievi topografici (DTM da rilievo Laserscanner 2005, sezioni topografiche trasversali 2004/2005), che strumenti numerici aggiornati per la elaborazione e gestione delle informazioni topografiche e per la modellizzazione idraulica (*aggiornamento del modello quasi-bidimensionale*).

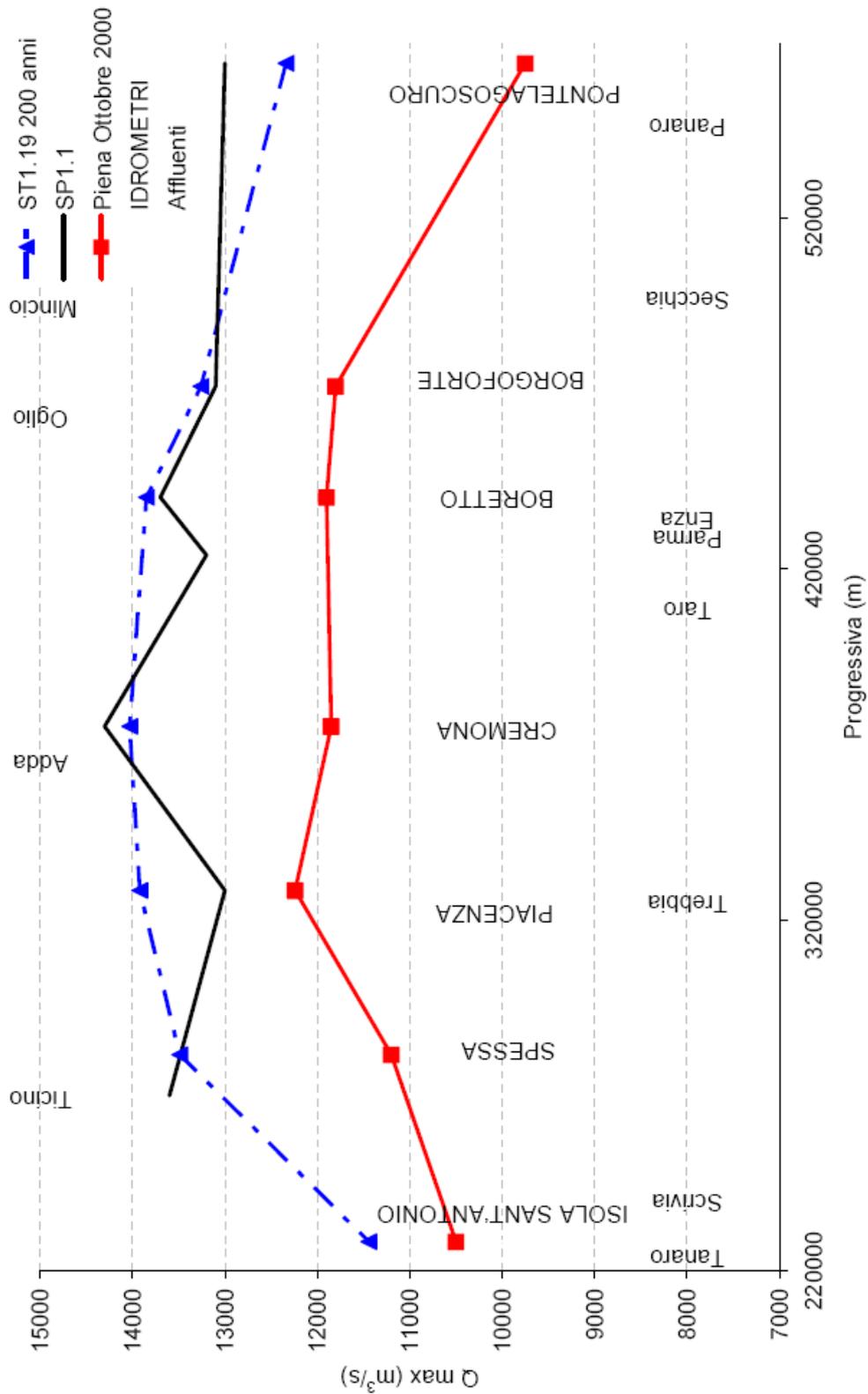


Figura 1

Fig. 1.5: Andamento dei massimi di portata al colmo di piena per l'evento dell'ottobre 2000 e per due differenti condizioni di riferimento in funzione della distanza progressiva (foce Tanaro: progressiva km 224.395).

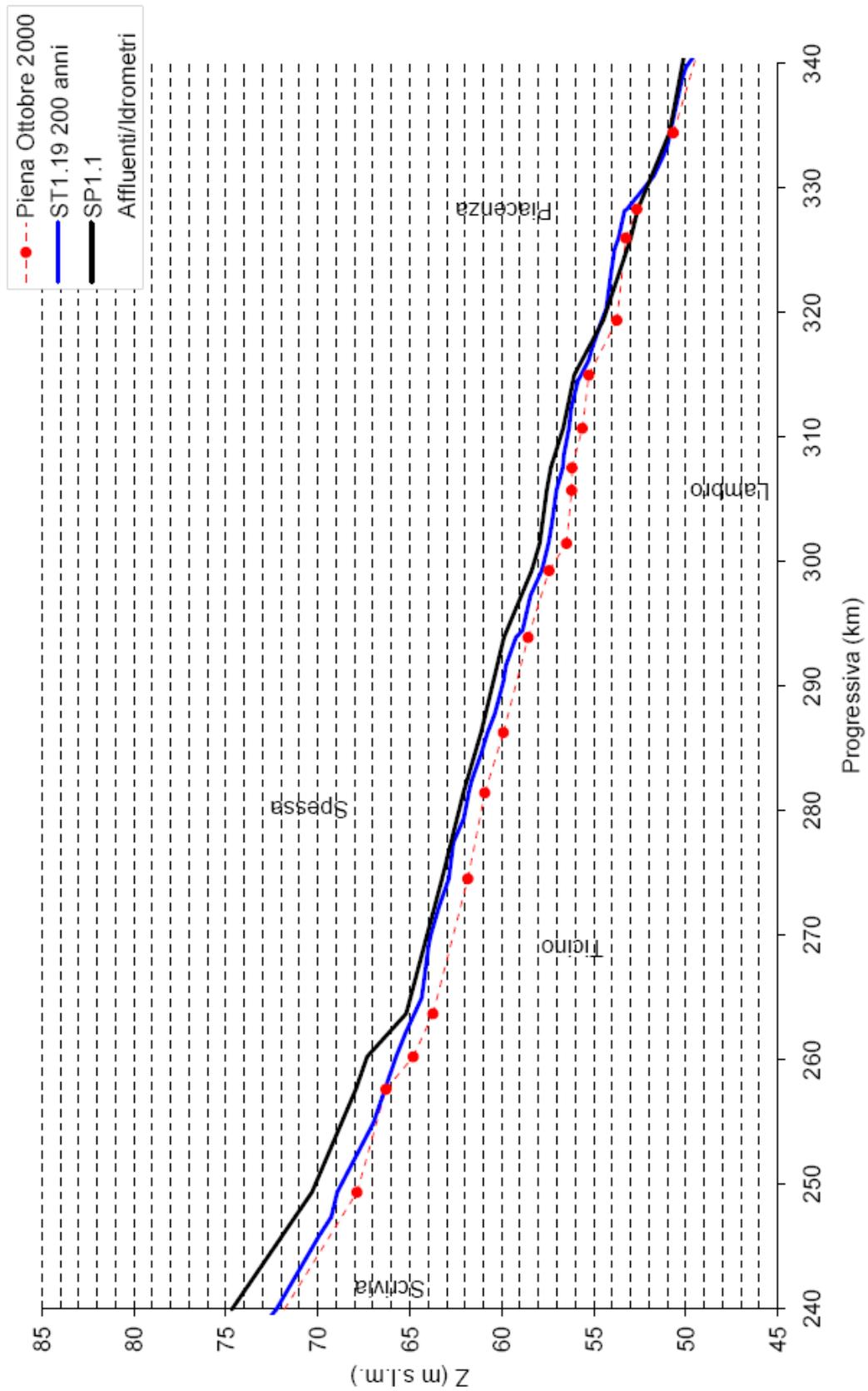


Fig. 1.6a: Tratto di monte: profili di piena ST1.19 (“200 anni”) e SP1.1 e tracce di piena rilevate per l’evento dell’ottobre 2000 (distanza progressiva foce Scriviale, Km 240).

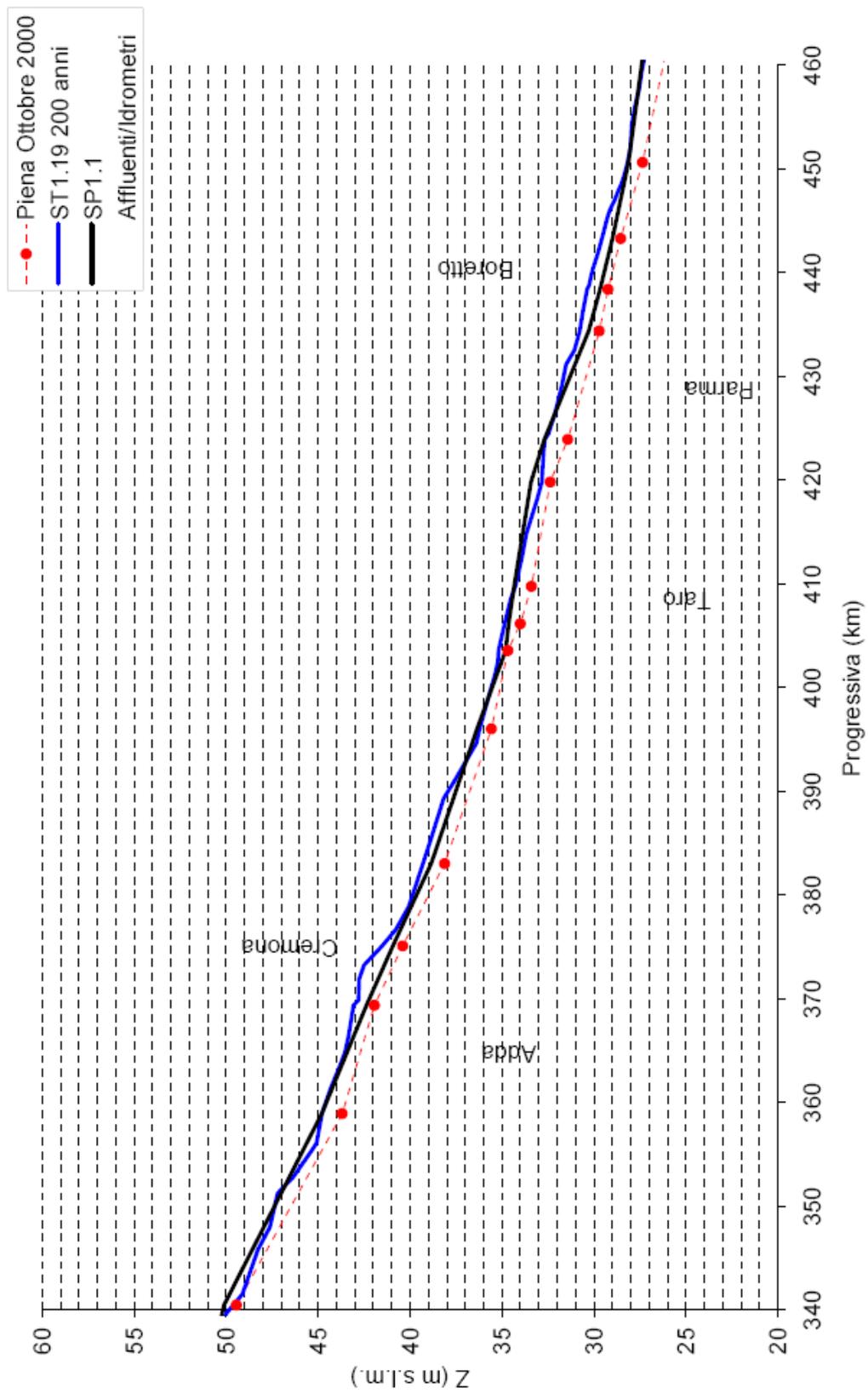


Fig. 1.6b: Tratto medio: profili di piena ST1.19 (“200 anni”) e SP1.1 e tracce di piena rilevate per l’evento dell’ottobre 2000 (distanza progressiva foce Scrivia, Km 240).

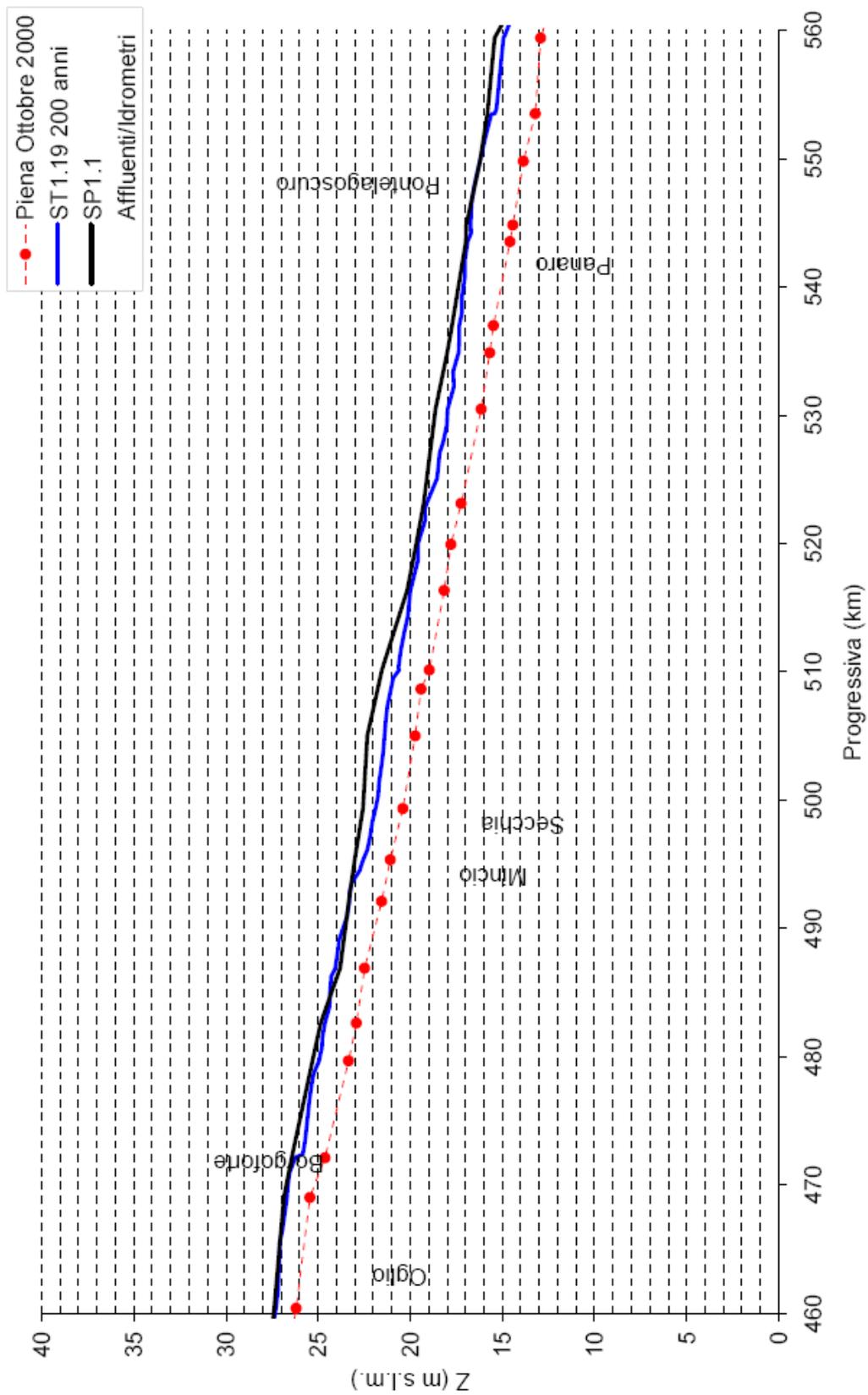


Fig. 1.6c: Tratto di valle: profili di piena ST1.19 (“200 anni”) e SP1.1 e tracce di piena rilevate per l’evento dell’ottobre 2000 (distanza progressiva foce Scrivia, Km 240).

2.6 Aggiornamento del profilo di piena del fiume Po proposto da DISTART-AdB Po (2008)

Il presente Paragrafo illustra l'attività svolta dal DISTART per l'aggiornamento del profilo di piena di riferimento del Fiume Po con tempo di ritorno pari a 200 anni, nel tratto compreso tra Isola S. Antonio e Pontelagoscuro. Le simulazioni idrauliche sono state condotte utilizzando il modello numerico quasi-bidimensionale denominato Q2005D, descritto all'interno del Capitolo III del presente elaborato.

2.6.1 Configurazione geometrica

Il modello utilizzato schematizza il comportamento idraulico del corso medio inferiore del Fiume Po considerando anche il funzionamento del sistema di golene chiuse comprese nel tratto tra Isola Serafini (tra le province di Piacenza e Cremona) e la confluenza con il fiume Secchia.

Come descritto in dettaglio al Capitolo III, la geometria del corso d'acqua tra la foce Ticino e Pontelagoscuro è stata definita in ambiente GIS a partire dai dati del rilievo laser-scanning condotto nel 2005 per conto dell'Autorità di Bacino del Fiume Po, che ha interessato l'asta del fiume Po (da argine ad argine, con ampliamenti nelle zone di confluenza degli affluenti) per una lunghezza complessiva di circa 340 km e per un'estensione di circa 740 km².

Le simulazioni sono state condotte facendo riferimento alla configurazione geometrica desumibile sulla base dei rilievi topografici più aggiornati e rappresenta l'attuale stato degli argini golenali (c.d. dell'anno 2005).

2.6.2 Scenario idrologico e condizioni al contorno

I profili di piena generati fanno riferimento a un ipotetico evento di piena avente tempo di ritorno bisecolare, per il quale sono supposti noti l'idrogramma di ingresso nella sezione di Isola S. Antonio e gli idrogrammi di piena in alcune sezioni di interesse. Detto evento è stato identificato attraverso una procedura iterativa che verrà descritta nel seguito (v. Paragrafo 2.2.1 del presente

Capitolo) e che è stata messa a punto sulla base delle considerazioni sulla definizione della sollecitazione idrologica di progetto sviluppate al Capitolo II della presente relazione.

Gli idrogrammi di piena di riferimento sono gli idrogrammi bisecolari ad oggi disponibili alle sezioni idrometriche di Isola S. Antonio, Piacenza, Cremona, Boretto, Borgoforte e Pontelagoscuro, valutati nell'ambito degli studi ST1.11 (Politecnico di Milano, 2001) e ST1.19 (ST1.19, 2003).

La Figura 1.7 rappresenta i valori dei colmi di piena alle stazioni di misura di interesse proposti da due studi analizzati, confrontati con gli stessi valori osservati durante la piena del 2000. La figura mostra come le portate al colmo di piena delle onde sintetiche dello studio ST1.19 siano in maggiore sintonia con l'andamento dei colmi registrato nel 2000. La Figura 1.8 rappresenta il confronto tra le onde di piena di progetto a Piacenza secondo gli studi ST1.11 e ST1.19, mentre la Figura 1.9 rappresenta il confronto tra le onde di piena a Pontelagoscuro.

Si può notare come il colmo di piena duecentennale a Piacenza per lo studio ST1.11 sia notevolmente inferiore a quello dello studio ST1.19 e molto simile a quello osservato nel 2000, mentre, procedendo verso valle, si nota un miglior accordo tra i colmi dei due studi ST1.11 e ST1.19. Si può ritenere che questa evenienza sia un risultato del fatto che lo studio ST1.11 non disponeva di idrogrammi osservati a Piacenza successivi all'anno 1985 e, pertanto, per tale sezione l'onda di piena sintetica bisecolare è stata costruita senza considerare i due maggiori eventi di piena del 1994 e 2000. Al contrario, lo studio ST1.19 adotta una procedura regionale nella derivazione degli idrogrammi bisecolari alle diverse sezioni idrometriche sull'asta del Fiume Po che, almeno indirettamente, permette di sfruttare al meglio le osservazioni idrometriche raccolte durante i due eventi di piena precedentemente menzionati. Per queste ragioni si è deciso di adottare gli idrogrammi di piena dello studio ST1.19 per le analisi successive.

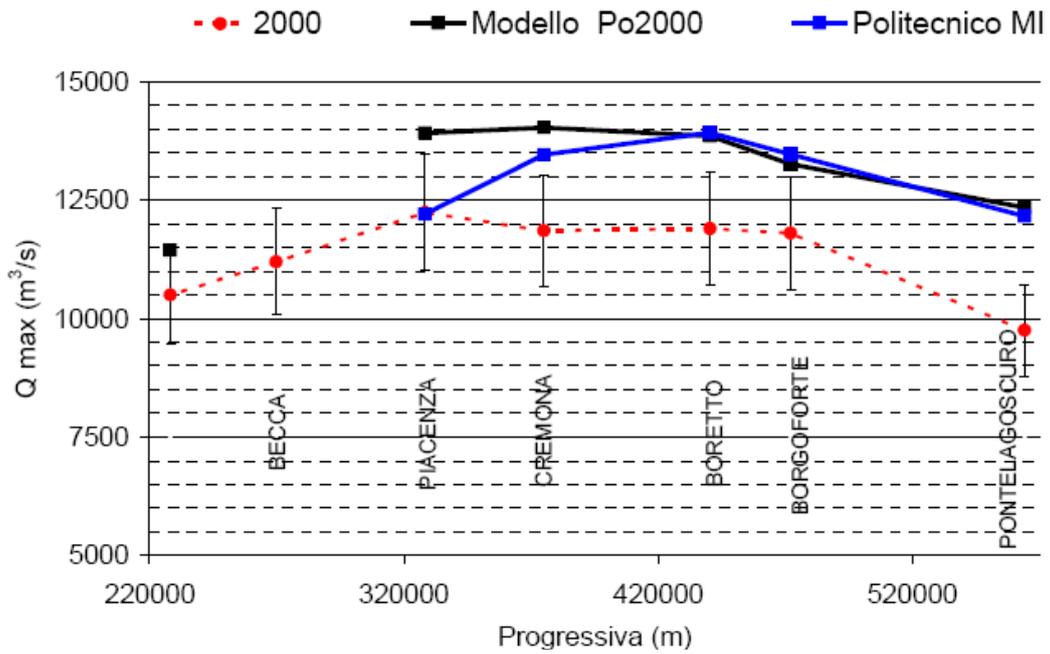


Fig. 1.7: Colmi di piena degli studi analizzati: ST1.11 (Politecnico MI); ST1.19 (Modello Po2000) e dell'evento dell'ottobre 2000 (2000).

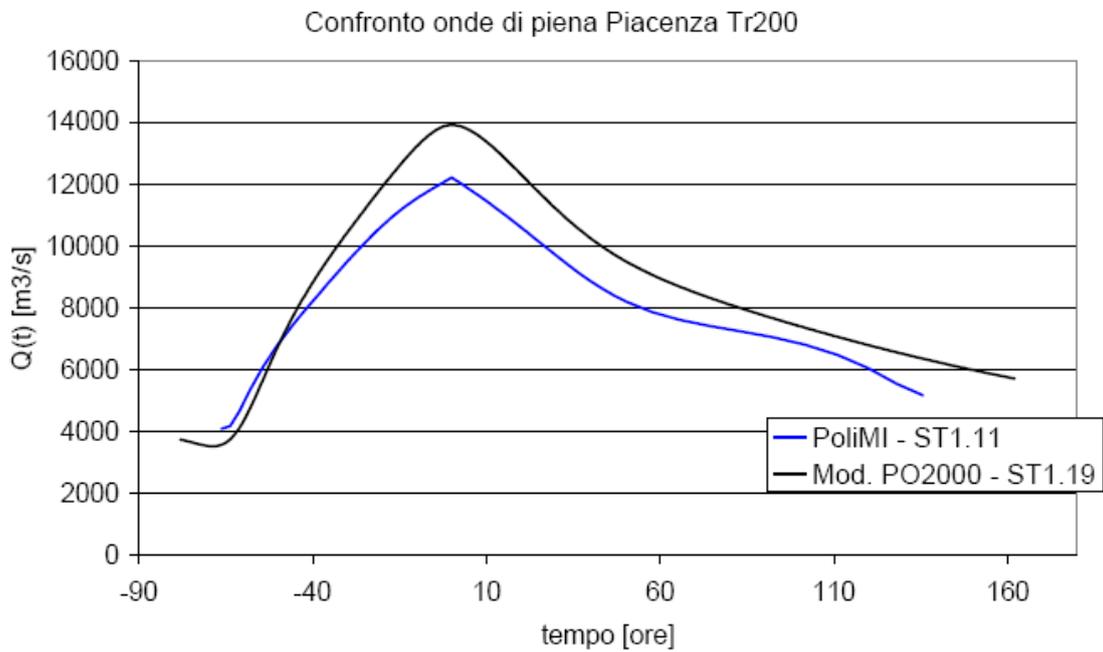


Fig. 1.8: Confronto onde di piena a Piacenza TR200.

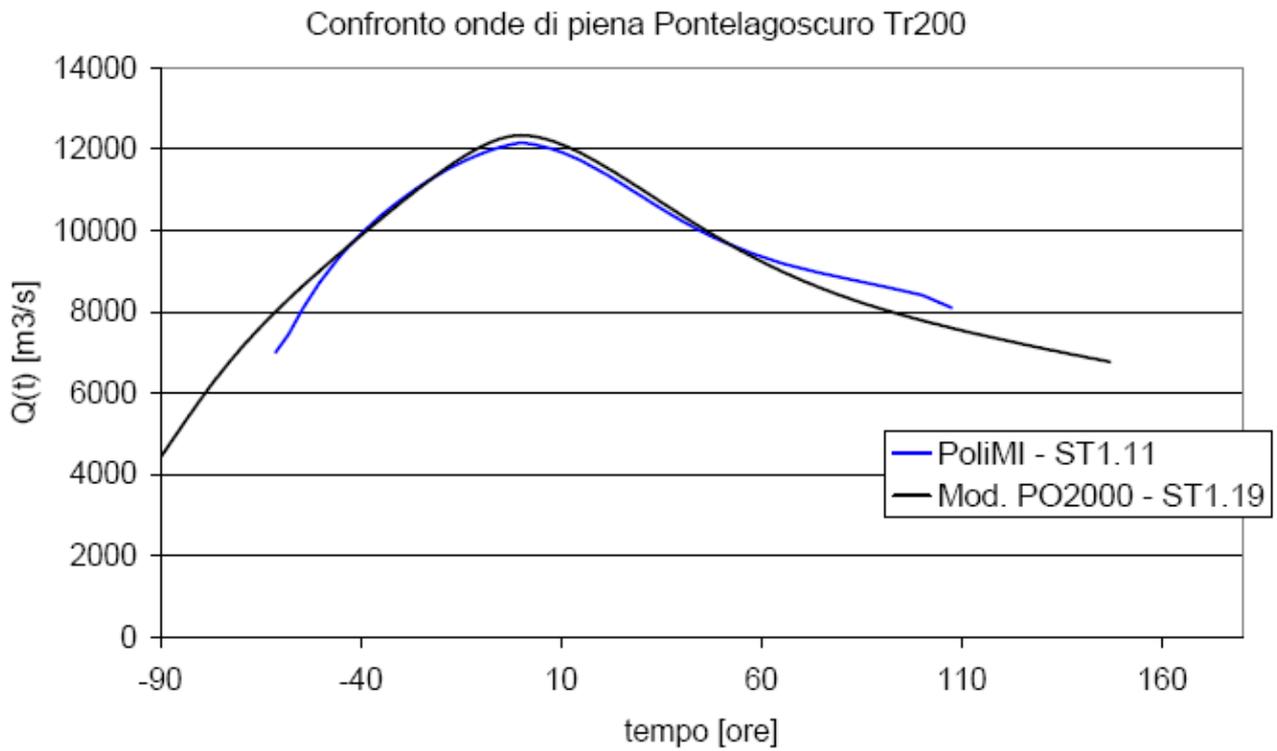


Fig. 1.9: Confronto onde di piena a Pontelagoscuro TR200.

La Figura 1.10 rappresenta l'idrogramma di piena bisecolare a Isola S. Antonio desunto dallo studio ST1.19 e adottato nello studio come condizione al contorno di monte durante le simulazioni numeriche di moto vario.

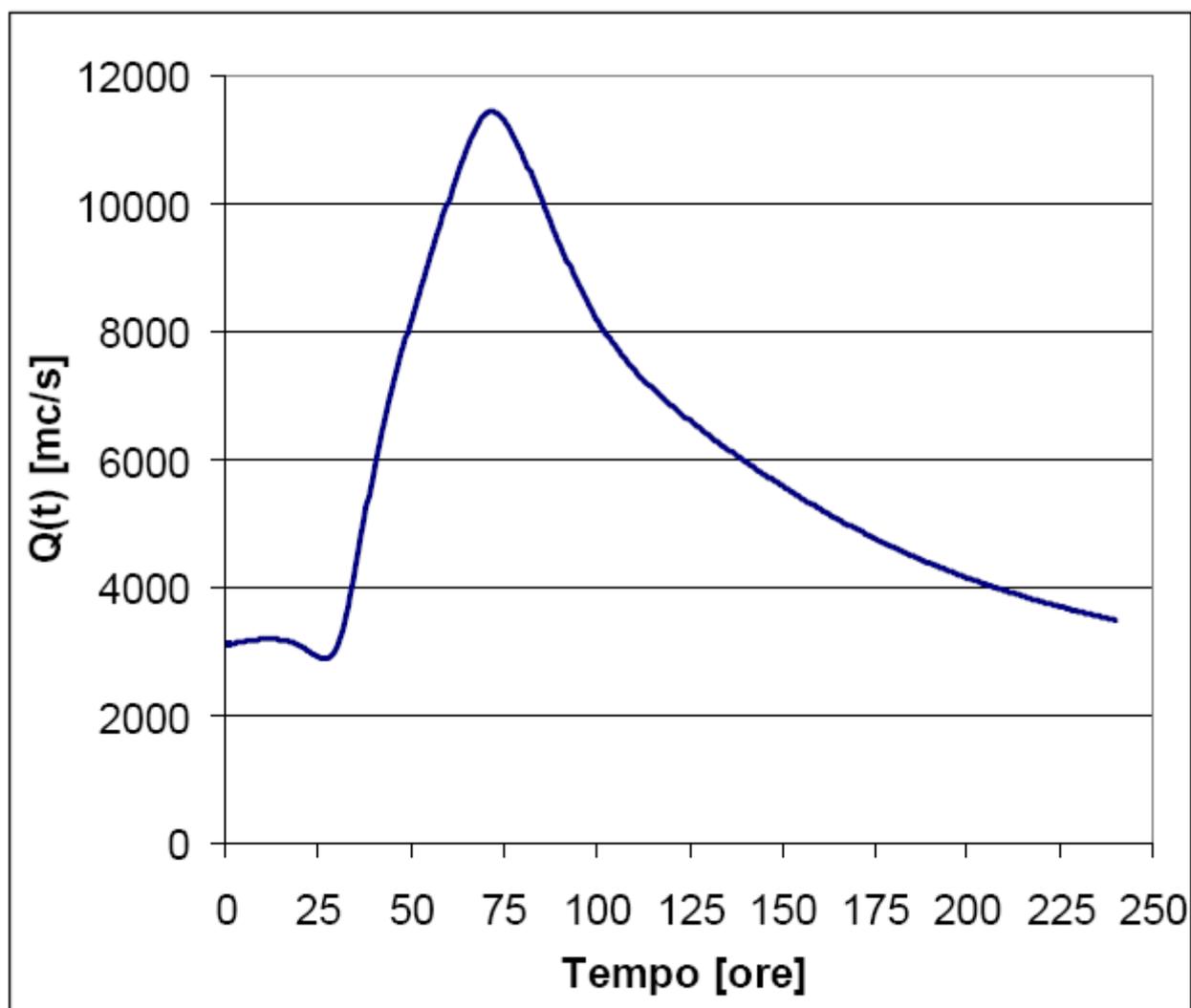


Fig. 2.10: Idrogramma di piena di progetto Tr200 a Isola S. Antonio.

Per quanto concerne la condizione al contorno nella sezione di valle (vale a dire Pontelagoscuro) le simulazioni numeriche hanno adottato due diverse scale di deflusso:

1. scala di deflusso di moto permanente avente pendenza motrice (cadente idraulica) fissata;
2. scala di deflusso dell'idrometro di Pontelagoscuro costruita dal S.I.M.N.

La prima delle due condizioni al contorno è stata calcolata con riferimento alla sezione trasversale dell'idrometro di Pontelagoscuro, ai valori di scabrezza calibrati per il tratto di Po di interesse (v. Capitolo III) e ad una pendenza motrice pari a 0.00016 m/m (0.16 ‰).

Tale valore è stato ottenuto come media tra il valore di pendenza del fondo dell'asta fluviale tra le località Sermide e Pontelagoscuro, pari a circa 0.00013 m/m, ed il rapporto tra la quota della sommità arginale a Pontelagoscuro e la distanza tra Pontelagoscuro e la foce del Po, pari a circa 0.00019 m/m. La Figura 2.11 consente di confrontare le due condizioni al contorno adottate in corrispondenza della sezione di valle.

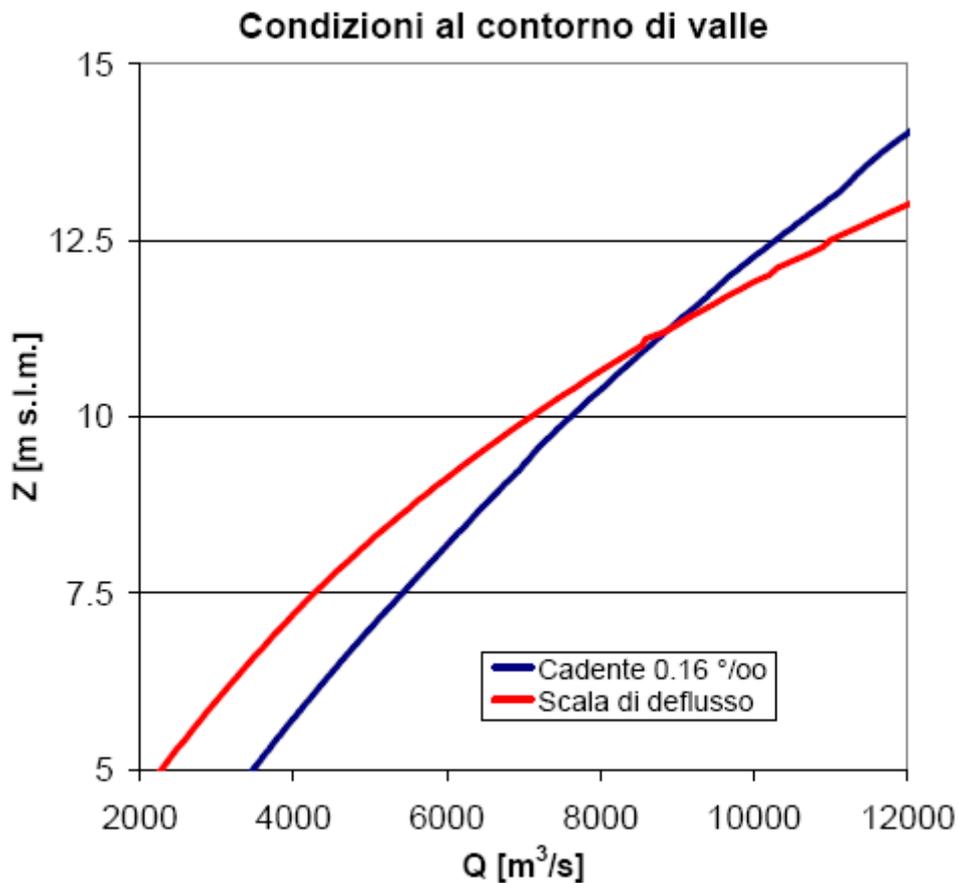


Figura 2.11: Confronto tra le condizioni al contorno di valle adottate nello studio.

Si può notare come per elevati valori di portata, la prima condizione risulti più cautelativa, e presumibilmente rappresenti una condizione di deflusso ostacolato da valle, rispetto alla scala di deflusso pubblicata sugli Annali Idrologici.

2.6.3 Modalità di costruzione dell'evento idrologico di progetto

Il profilo di piena di riferimento prodotto nell'ambito dello studio "Progetto strategico per il miglioramento delle condizioni di sicurezza idraulica dei territori di pianura lungo l'asta principale del fiume Po", DISTART, rappresenta un aggiornamento dei profili di piena precedentemente prodotti per l'asta fluviale medio-valliva del Fiume Po (v. Capitolo II). In primo luogo per il fatto che si basa sui recenti dati topografici messi a disposizione dall'Autorità di Bacino del Fiume Po. In secondo luogo per le modalità di costruzione dell'evento idrologico di progetto, che rappresentano un miglioramento rispetto alle modalità adottate nello studio ST1.19 per la costruzione del profilo di piena denominato "200 anni". Anziché utilizzare una composizione di profili di piena validi per tronchi, si è infatti ottenuto un unico profilo di piena di riferimento valido per l'intera asta fluviale considerata. Tale profilo è stato ottenuto propagando dalla sezione di Isola S. Antonio verso valle l'onda di portata illustrata in Figura 2.10 e considerando un contributo sintetico dei maggiori affluenti di Po, valutato in maniera tale da avere una congruenza tra gli idrogrammi di piena in termini di portata ottenuti attraverso la simulazione numerica in corrispondenza degli idrometri di Piacenza, Cremona, Boretto e Borgoforte ed i corrispondenti idrogrammi bisecolari desunti dallo studio ST1.19.

La valutazione dell'apporto sintetico dei maggiori affluenti ha richiesto una procedura iterativa. Dapprima, infatti, è stata propagata l'onda di piena riprodotta in Figura 2.10 da Isola S. Antonio a Piacenza. Successivamente è stata calcolata la differenza tra l'onda di piena calcolata per Piacenza e quella bisecolare relativa alla stessa sezione idrometrica e utilizzata nello studio ST1.19. Detta differenza è stata attribuita ai maggiori affluenti compresi tra Isola S. Antonio e Piacenza (c.d., Ticino, Scrivia e Trebbia), utilizzando come criterio quello di non eccedere in termini di portata al colmo di piena quanto indicato sulla Direttiva PAI "*Portate di progetto affluenti Po*".

Dette indicazioni sono riassunte in Tabella 11 in termini di portate bisecolari.

Affluenti	Qmax TR200 (m ³ /s)
Scrivia	2870
Ticino	2300
Trebbia	3050
Adda	2000
Taro	2390
Parma	1000
Enza	570
Oglio	1500

Tabella 11 - Estratto direttiva PAI portate di progetto affluenti Po AdB Po, Autorità di bacino del Fiume Po (1999).

Si veda a titolo d'esempio la Figura 2.12, che riporta i risultati conseguiti nel tratto tra la sezione di Isola S. Antonio e quella di Piacenza, nel quale, come già precisato, sono stati considerati gli affluenti Scrivia, Ticino e Trebbia.

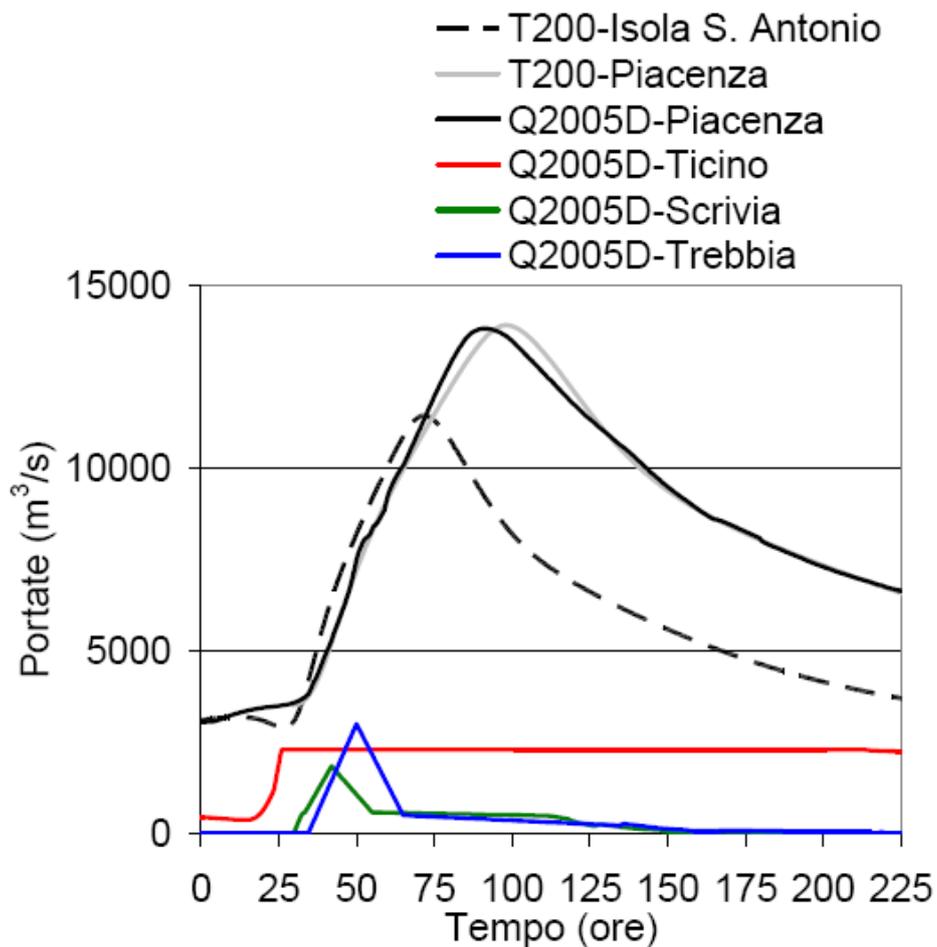


Fig. 2.12: Idrogrammi di piena a Isola S. Antonio, Piacenza e apporti sintetici valutati per i maggiori affluenti.

Come si può notare l'idrogramma ottenuto per la sezione di Piacenza (Figura 2.12, tratto continuo nero spesso) ben ricalca la forma dell'onda di progetto bisecolare per la stessa sezione idrometrica (Figura 2.12, tratto continuo grigio spesso), riuscendo a riprodurre fedelmente, seppure con un leggero anticipo, il valore del colmo di portata. In termini di volumi le due onde si equivalgono, essendoci compensazione tra i volumi eccedenti nella fase che precede il colmo di portata e la fase che lo segue.

A questo punto si è proceduto in modo analogo per le ulteriori stazioni idrometriche considerate. Il procedimento precedentemente descritto, infatti, è stato applicato in seguito al tratto tra Piacenza e Cremona, ed ai tratti successivi, fino a Pontelagoscuro.

La Figura 2.13 mostra una visione d'insieme del tratto di Po analizzato, e in essa sono evidenziati i maggiori affluenti considerati nelle simulazioni numeriche del modello Q2005D.

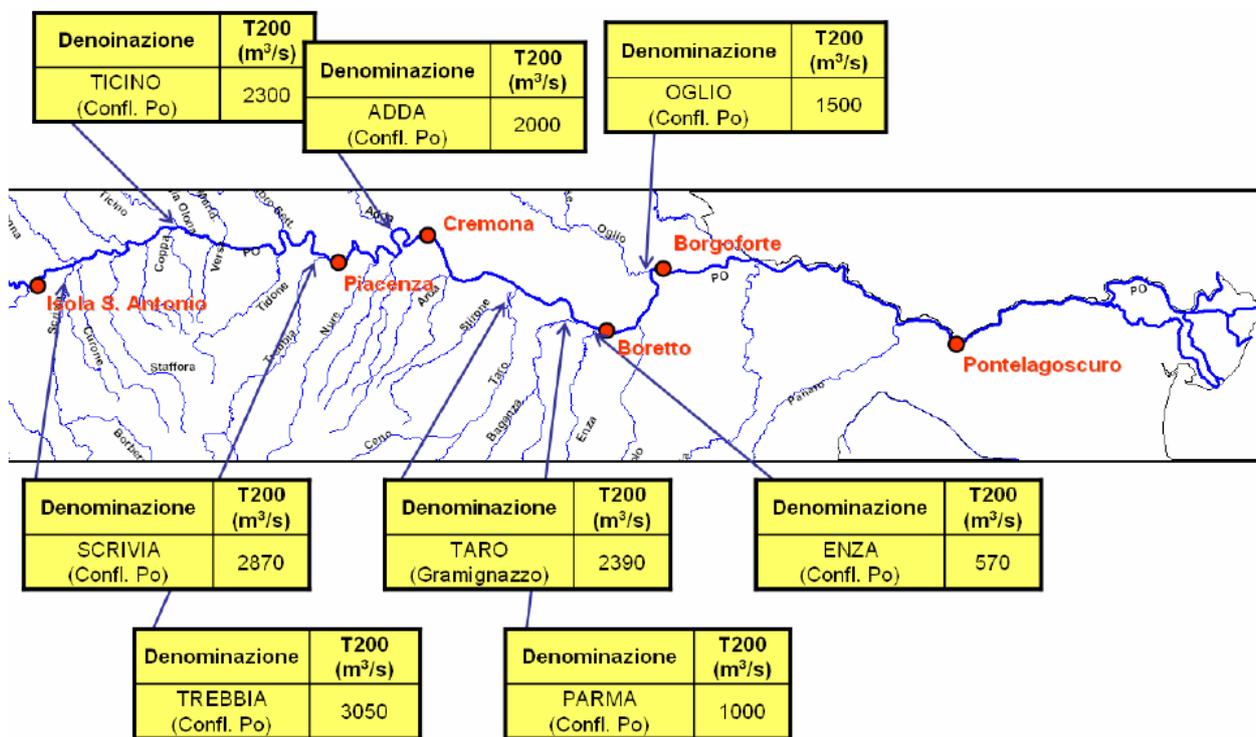


Fig. 2.13: Vista schematica d'insieme del tratto di Po analizzato e affluenti schematizzati, con indicazioni sulle portate bisecolari tratte dalla direttiva PAI "Portate di progetto affluenti Po", (AdB Po, 1999).

Per agevolare l'identificazione delle sezioni idrometriche e delle foci dei maggiori affluenti nel modello Q2005D, la Tabella 12 riporta le sezioni Brioschi relative agli idrometri considerati e alle confluenze degli affluenti schematizzati, oltre ai rispettivi tratti di appartenenza nel modello Q2005D stesso.

Afluente/Località	Sez. Brioschi	Tratto Modello Q2005D
Isola S. Antonio	S00B1	S00B1_s6
Scrvia	S1	S00B1_s6
Ticino	S6	s6_s9d
Trebbia	S17B	S10_s18
Piacenza	S20	S18a_S25
Adda	S24D	S18a_S25
Cremona	S26	S25_02_S27C
Taro	S33	S30_s33b
Parma	S35E	S33c_s36a
Enza	S36	S33c_s36a
Boretto	37B	S37_S41A
Oglio	S40	S37_S41a
Borgoforte	S42	S41B_S45C
Pontelagoscuro	S64D	S64D_S69B

Tabella 12 - Sezioni e progressive delle località di interesse.

Infine, la Figura 2.14 rappresenta gli idrogrammi sintetici valutati per il complesso di affluenti considerati. In figura manca l'Adda, trattato a parte al seguente Paragrafo 2.6.4.

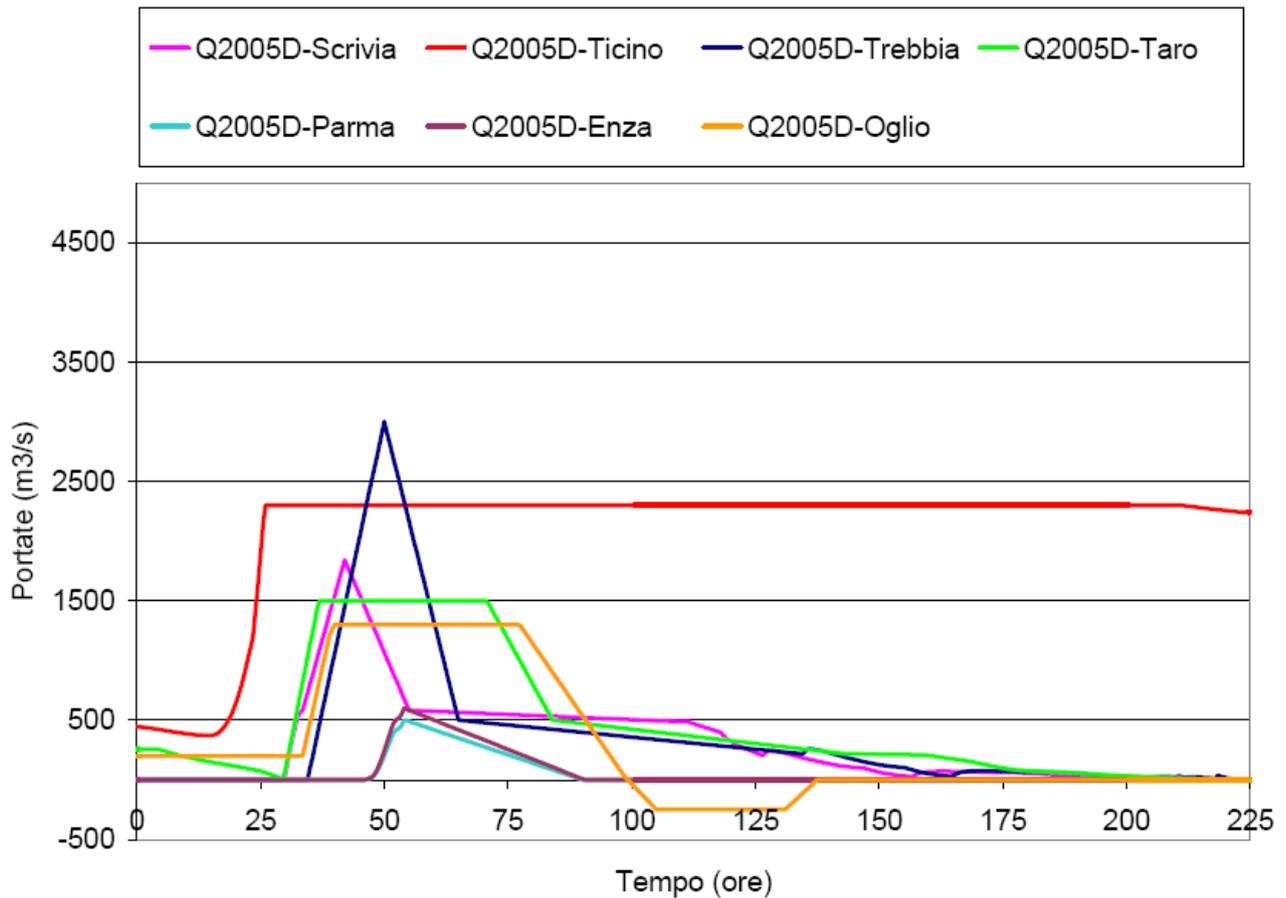


Fig. 2.14: Idrogrammi sintetici di piena degli affluenti.

È stato inoltre deciso di non considerare l’apporto dei Fiumi Mincio, Secchia e Panaro, poiché questi affluenti, come riscontrato in fase di taratura del Modello Q2005D (v. Capitolo III), risentono sensibilmente dell’effetto di rigurgito esercitato dal Po e non riescono ad apportare un contributo significativo durante la piena.

2.6.4 Contributo sintetico dell’Adda.

Il contributo sintetico attribuito al fiume Adda, riportato in Figura 2.15, è stato valutato tenendo conto dell’esigenza di colmare le differenze ottenute in simulazione tra l’idrogramma di piena simulato dal modello e quello bisecolare di riferimento desunto da ST1.19, relativi alla sezione di Cremona. Il valore al picco supera notevolmente la portata bisecolare riportata per l’Adda alla foce nella Direttiva PAI “*Portate di progetto affluenti Po*” (v. Tabella 10) e non pare quindi essere

fisicamente sensato. A questo proposito pare comunque opportuno sottolineare che sulle onde di piena bisecolari desunte in base allo studio ST1.19 gravano le incertezze caratteristiche delle scale di deflusso costruite per le sezioni idrometriche qui considerate, tanto maggiori, quanto maggiori sono i valori di portata considerati. Alla luce di questi risultati sembra opportuno sottolineare la necessità di condurre un approfondimento del presente studio mirato al perfezionamento di tali scale di deflusso, e di conseguenza degli idrogrammi di piena bisecolari.

Solo a valle di tale approfondimento si potrà pervenire ad una modellazione della piena sintetica bisecolare del Fiume Po utilizzando contributi credibile per tutti i maggiori affluenti, incluso il Fiume Adda.

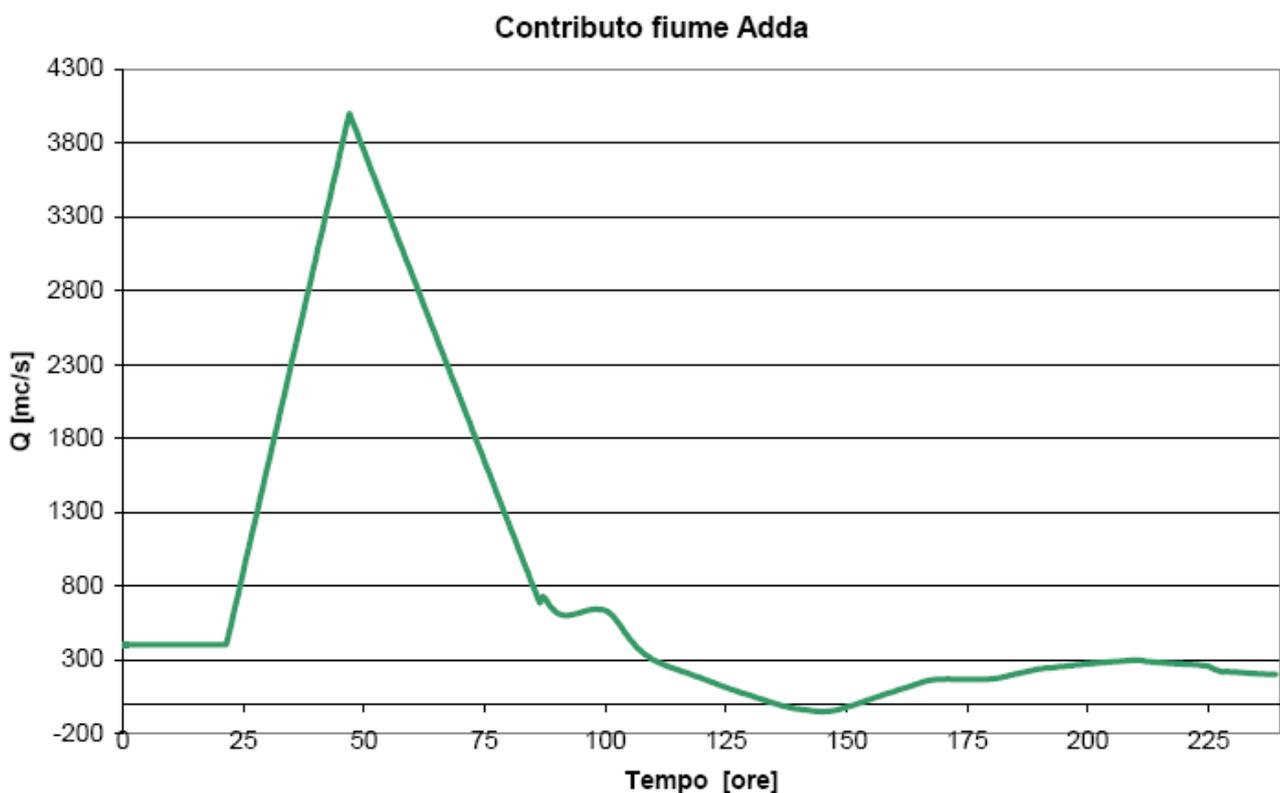


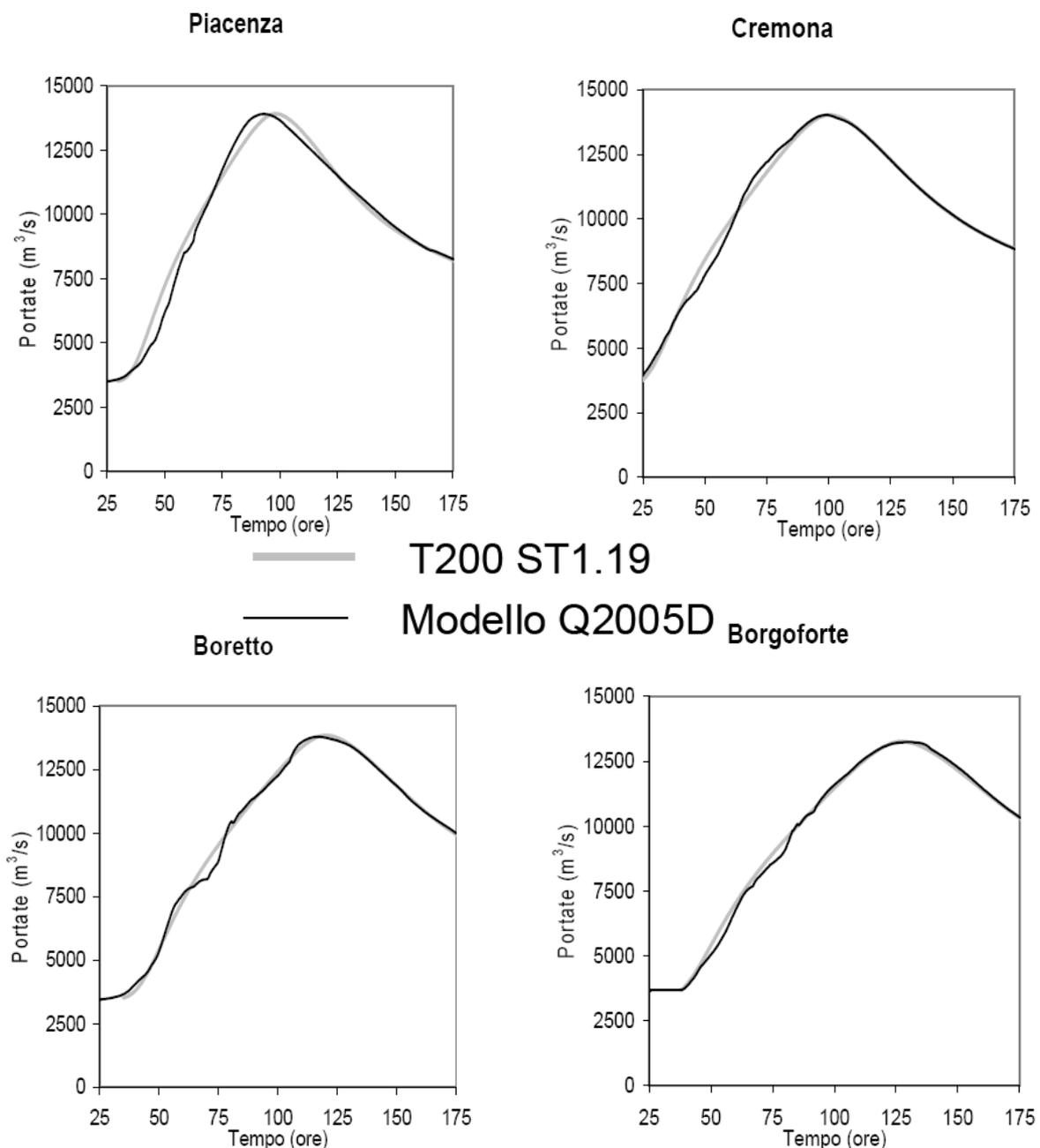
Fig. 2.15: Contributo sintetico Adda.

Tuttavia, nello studio si sono ripetute le simulazioni anche utilizzando contributi sintetici per il Fiume Adda decapitati al valore di 2500 m^3/s , in linea con i valori di Figura 2.13 e Tabella 10. I risultati ottenuti in base a tali simulazioni in termini di profili di piena sono praticamente coincidenti con quelli che schematizzano in contributo del Fiume Adda come illustrato in Figura

2.15. Il risultato è facilmente spiegabile in quanto il picco di portata dell'idrogramma sintetico di Figura 2.15 serve a "irrobustire" l'idrogramma di piena a Cremona nella parte iniziale dell'evento e non in corrispondenza del colmo di piena (v. anche idrogrammi a Cremona nella seguente Figura 2.16).

2.6.5 Confronto tra gli idrogrammi simulati e quelli bisecolari.

A chiusura del presente paragrafo si riporta in Figura 2.16 il confronto tra gli idrogrammi simulati e quelli bisecolari per le sezioni idrometriche di interesse.



2.7 Profilo di piena di riferimento

Nelle figure seguenti sono riportati i profili di piena riferimento ottenuti come inviluppo dei colmi di livello, simulati con entrambe le condizioni al contorno di valle precedentemente illustrate.

I profili di piena denotati con la sigla “Q2D” si riferiscono ai risultati ottenuti in base alle simulazioni numeriche condotte con il modello Q2005D. Come nel Capitolo II, i profili vengono presentati suddivisi in tre tratti (di monte, medio e di valle). In particolare, la Figura 2.17 riporta il profilo di piena di riferimento a confronto con il profilo PAI e con lo sviluppo longitudinale della sommità delle arginature maestre destra e sinistra.

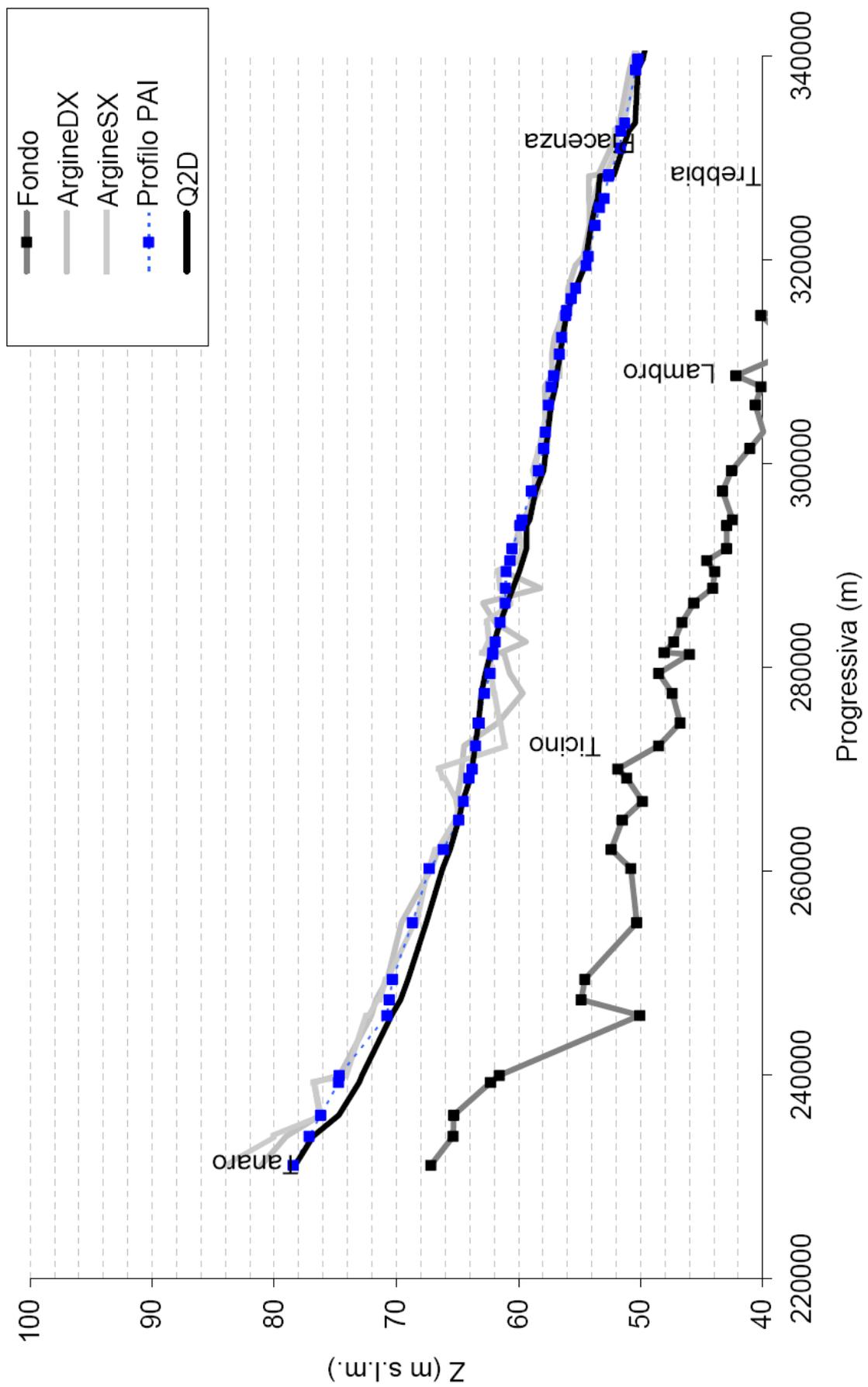


Figura 3.2 - Profilo tratto di monte con indicazione sommità arginature

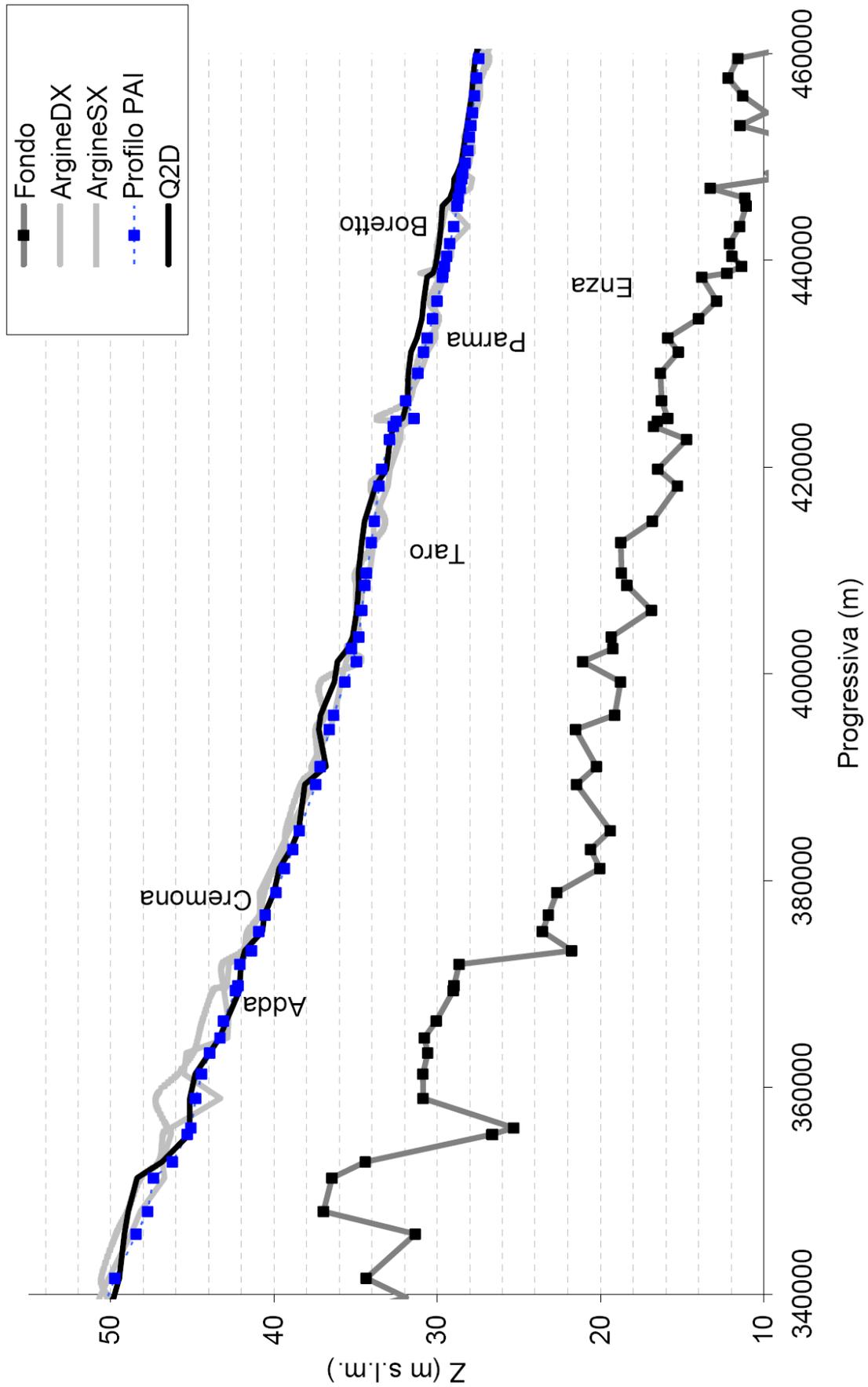


Figura 3.2 - Profilo tratto medio con indicazione sommità arginature.

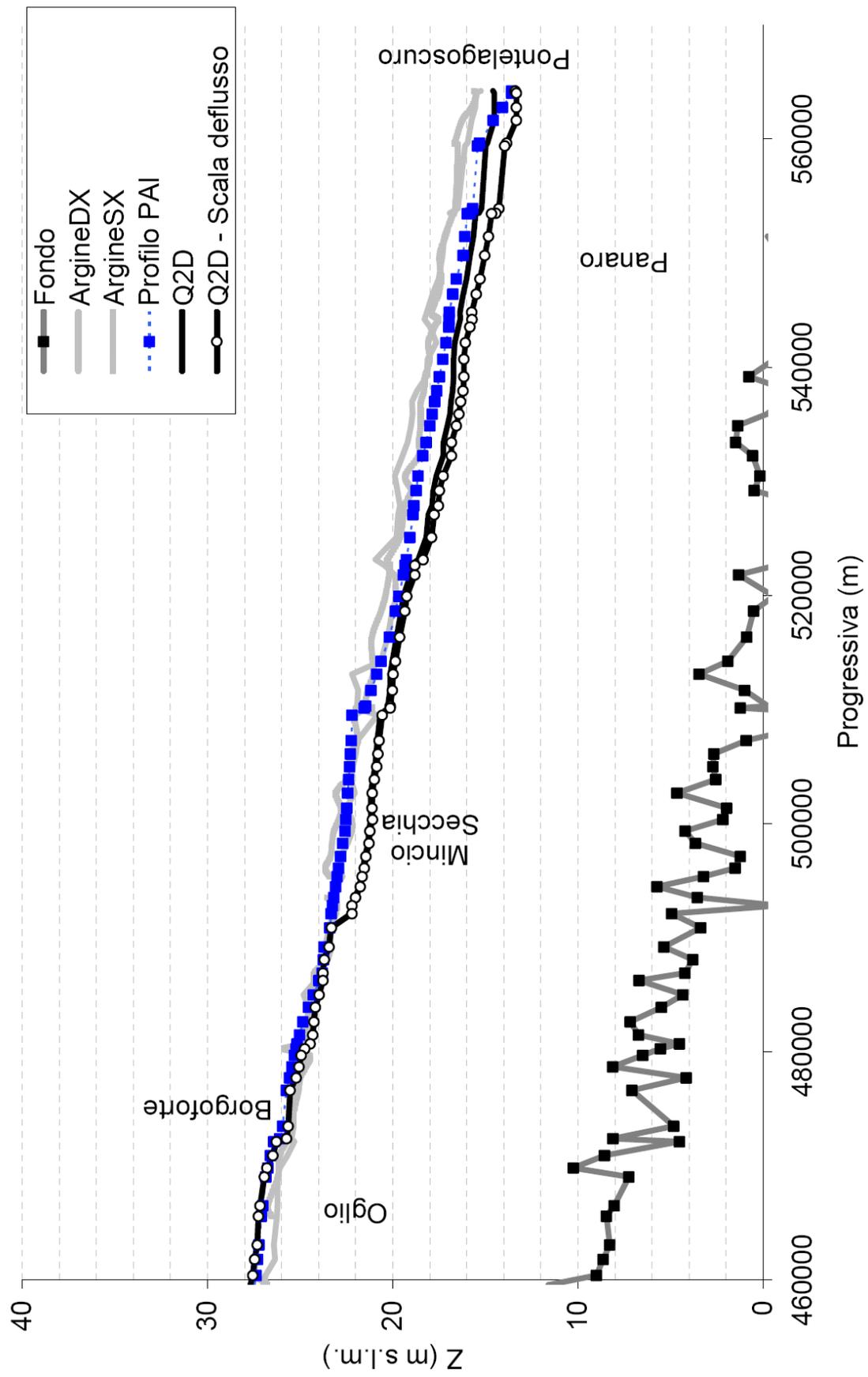


Figura 3.2 - Profilo tratto di valle con indicazione sommità arginate.

3. Modello numerico quasi 2D dell'asta del Po da foce Tanaro all'incile del Po di Goro

Il presente Capitolo della relazione illustra le caratteristiche del modello che simula la propagazione dell'onda di piena nell'asta medio-inferiore del fiume Po. Tale modello è stato messo a punto dal DISTART (Università di Bologna) sulla base dei nuovi rilievi topografici resisi recentemente disponibili (DTM da rilievo Laserscanner 2005, sezioni topografiche trasversali AIPO 2004/2005) e, rispetto a modelli analoghi precedentemente sviluppati, si avvale dei più aggiornati strumenti numerici di elaborazione e gestione delle informazioni topografiche e degli sviluppi nella modellistica idraulica.

3.1 Il sistema fluvio-golenale del corso medio inferiore del Po

Il criterio generale seguito durante la creazione del modello idraulico è stato quello di pervenire ad una accurata descrizione del funzionamento idraulico del complesso sistema fluvio-golenare nel tratto di fiume Po compreso tra Isole Serafini (province di Piacenza e Cremona) e la confluenza con il fiume Secchia (provincia di Mantova). A tal fine è stato condotto un censimento che, nel tratto tra la confluenza della Dora Baltea e l'incile del Delta, ha portato ad identificare 53 golene chiuse per un volume massimo di invaso disponibile pari a circa 463 Mm³. Per sviluppare questa indagine è stato utilizzato come supporto il recente modello digitale delle quote del terreno (Digital Terrain Model, DTM) fornito dall'AdB Po e precedenti elaborati come lo studio SIMPO (Magis.Po-SIMPO, 1982 e 1984).

3.1.1 Identificazione ed analisi del sistema di golene chiuse

Con l'ausilio di strumenti GIS (*Geographic Information System*) è stato possibile analizzare il modello digitale delle quote del terreno predisposto per l'asta fluviale del Po compresa tra la

confluenza con il Fiume Ticino e Pontelagoscuro, interessata dalla presenza di aree golenali aperte e chiuse. L'analisi ha permesso di pervenire ad una dettagliata descrizione della capacità d'invaso delle maggiori golene chiuse presenti nell'area di interesse, resa i termini di curve quota- superficie di invaso e quota- volumi di invaso. I risultati ottenuti sono stati confrontati con le indicazioni riportate nello studio SIMPO.

L'analisi si è articolata in una prima fase di identificazione degli argini golenali che, successivamente, sono stati digitalizzati. Una volta identificate le arginature di frontiera del sistema di golene chiuse, si è proceduto al calcolo dei volumi invasabili e delle corrispondenti superfici di invaso per diverse quote del pelo libero.

Il sistema di golene chiuse preso a riferimento nello studio è individuato dalle tre planimetrie schematiche riportate nella Figura 3.1. In tali figure, le golene chiuse sono indicate con una campitura blu scuro, mentre la traccia degli argini maestri è rappresentata in rosso. Il tratto d'asta fluviale considerato, ove si concentra la maggior parte di golene chiuse, si estende da Cremona a Ostiglia. La Figura 3.1 utilizza per identificare la singola golena chiusa una numerazione in accordo con la numerazione adottata nello studio SIMPO.

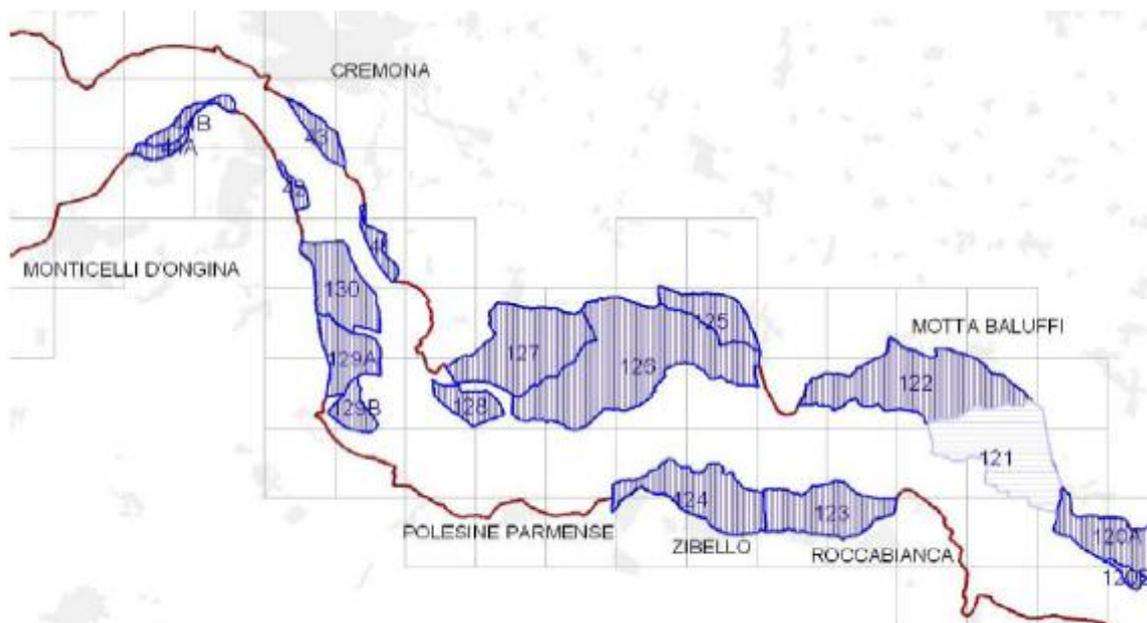


Fig. 3.1a: Sistema di golene chiuse analizzato nello studio (tratto di monte)

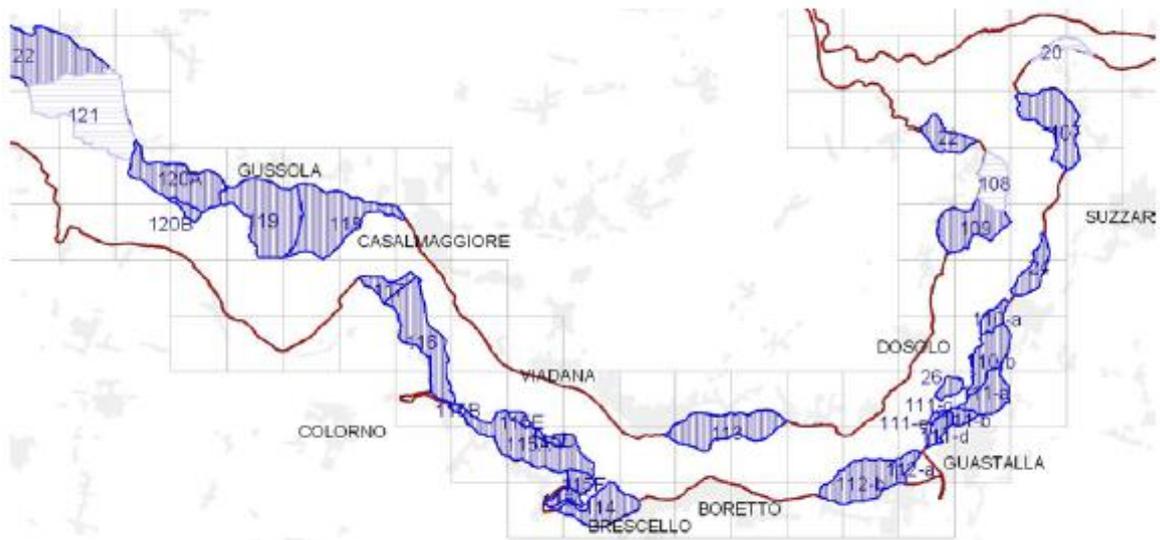


Fig. 3.1b: Sistema di golene chiuse analizzato nello studio (tratto centrale)



Fig. 3.1c: Sistema di golene chiuse analizzato nello studio (tratto di valle)

I passi dell'analisi sono esemplificati dalle Figure 3.2, 3.3 e 3.4 che, con riferimento alla golena 105 (San Benedetto Po), illustrano rispettivamente il dato di partenza, ovvero il modello digitale delle quote del terreno, l'identificazione degli argini di frontiera e lo specchio liquido (blue) per diverse quote del pelo libero.



Fig. 3.2: Golena 105 (San Benedetto Po), modello digitale delle quote del terreno

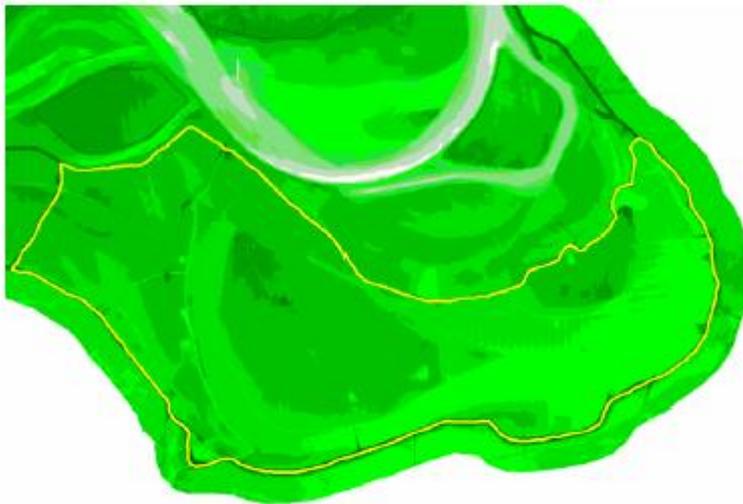


Fig. 3.3: Golena 105 (San Benedetto Po)

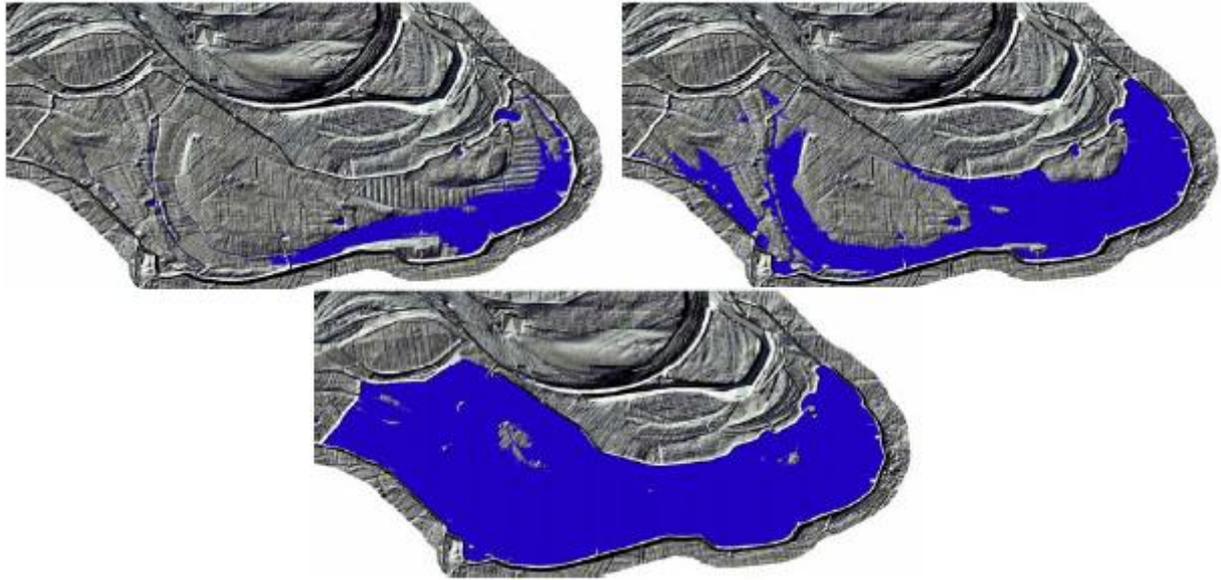


Fig. 3.4: Golena 105 (San Benedetto Po), calcolo dei volumi e delle superfici di invaso

Si riportano in figura 3.5 alcuni grafici relativi agli andamenti del volume e della superficie di invaso in funzione della quota del livello idrico. Nelle figure sono stati evidenziati i valori puntuali di superfici e volumi di invaso riportati nello studio SIMPO, per alcune quote significative.

Nel corso dello studio si è potuto osservare come alcune golene chiuse identificate nell’elaborato “A.4 – Planimetria generale 1: 50.000 – Configurazione di progetto” dello studio SIMPO del 1984, preso a riferimento durante la fase iniziale di identificazione delle golene, si presentassero suddivise in più parti nel modello digitale delle quote del terreno del 2005. Esse sono state trattate come tali, assegnando loro un nome formato dell’identificativo della golena SIMPO originaria e da una lettera: ad esempio la golena SIMPO 44 è stata suddivisa in due golene alle quali è stato assegnato rispettivamente il nome 44A e 44B. Per poter confrontare i valori di volume e superficie indicati nel progetto SIMPO con quelli ricavati in ambito GIS, si è operata una somma a parità di quota di pelo libero.

Come si può chiaramente vedere dai grafici riportati in Figura 3.5, i volumi e le superfici, stimati del progetto SIMPO a determinate quote di invaso, nella maggior parte dei casi sono praticamente

coincidenti con i valori calcolati, alle stesse quote, del modello delle quote del terreno (DTM): i punti che rappresentano i valori SIMPO in questi casi giacciono sulle curve di volume e superficie ricavate dall'analisi del DTM, o sono prossimi ad esse.

Diversi sono tuttavia i casi in cui i dati SIMPO non trovano riscontro con quanto determinato elaborando il DTM. La causa principale di queste discrepanze risiede nel fatto che alcune golene hanno forme diverse allo stato attuale da quanto riportato nel citato elaborato del progetto SIMPO. Ne sono un esempio le golene 130 e 129. Oggi infatti la golena chiusa indicata con il codice 130 occupa anche parte della golena chiusa che nel progetto SIMPO era indicata con il codice 129. Considerando le golene chiuse 129 e 130 simultaneamente, però, si ottengono dal DTM indicazioni analoghe a quelle riportate nello studio SIMPO.

Va inoltre sottolineato il fatto che per 4 delle 43 golene chiuse prese in considerazione (c.d. 121, 181, 20, 102, facendo riferimento alla nomenclatura SIMPO) non era più riconoscibile un argine golenale.

In conclusione, dal confronto della situazione illustrata negli elaborati dello studio SIMPO con quella attuale desunta dal DTM si riscontra un buon accordo di volumi e superfici di invaso. Infatti, il progetto SIMPO prevedeva un volume invasabile di circa 430 Mm³ ed una superficie di oltre 12120 ha; allo stato attuale è stato valutato un volume pari a 446 Mm³ ed una superficie di poco inferiore i 12000 ha. La Tabella 12 propone un quadro riassuntivo di confronto tra i risultati della presente analisi e le indicazioni riportate nello studio SIMPO.

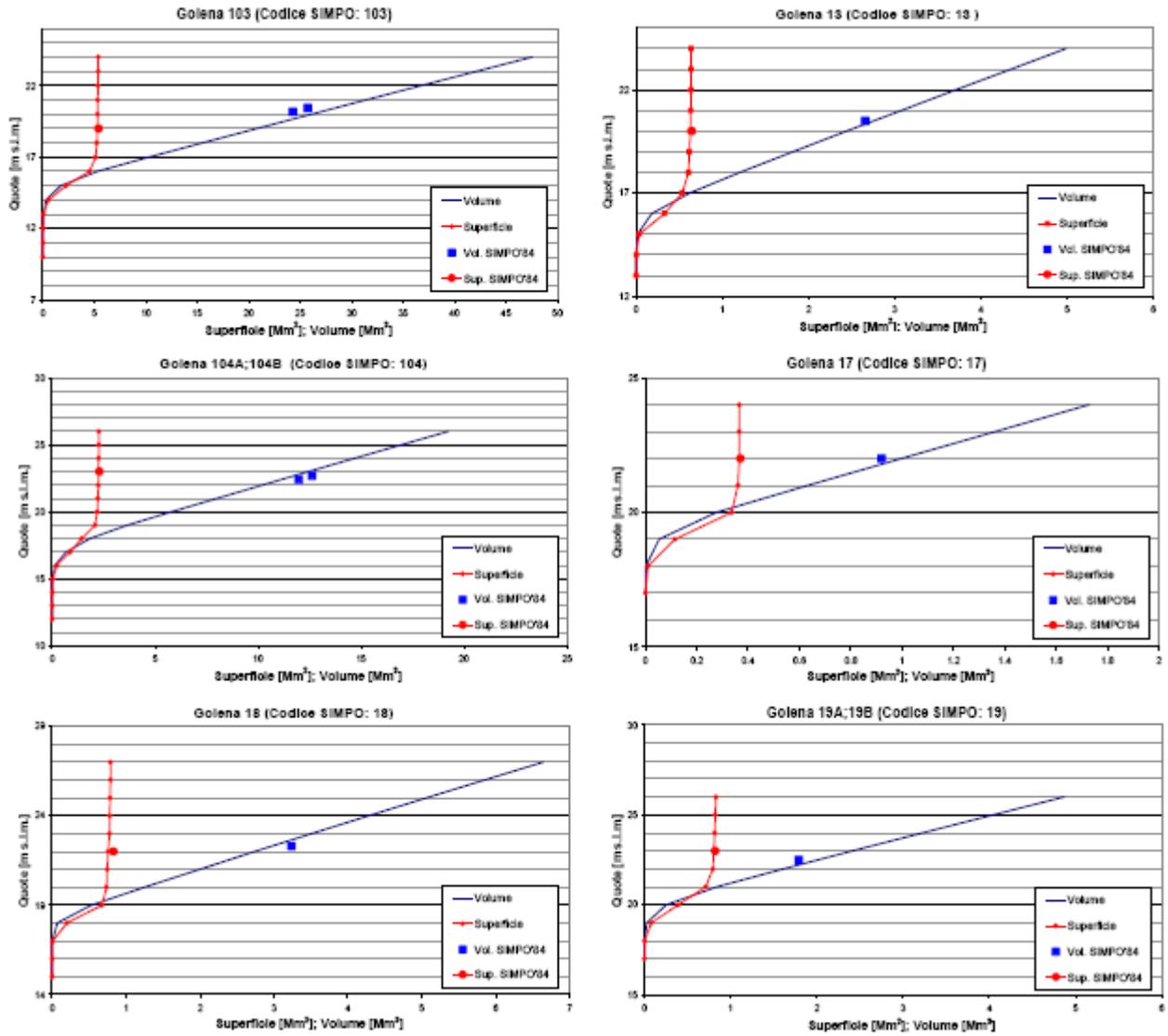


Fig. 3.5: Golene chiuse, risultati delle analisi quantitative sviluppate nell'ambito del presente lavoro e confronto con i dati desunti nel progetto SIMPO

SIMPO 84			Presente analisi						
Id golena	Vol. max. [Mmc]	Sup. max. [ha]	Quota min. argine maestro [m]	Vol. quota SIMPO [Mmc]	Vol. quota min. argine maestro [Mmc]	Vol. 1 m sotto quota min. argine maestro [Mmc]	Sup. quota SIMPO [ha]	Sup. quota min argine maestro [ha]	Sup. 1 m sotto quota min argine maestro [ha]
44A			39	0.62	0.23	0.05	46.15	29.01	8.21
44B			37	1.87	0.01	0.00	87.90	6.14	0.16
44	2.47	138		2.49		0.05	134.05		
42	0.75	30	37	0.85	0.18	0.06	36.75	25.08	5.97
43	3.92	98	36	4.12	0.47	0.12	97.50	59.85	15.38
130	6.93	304	35	13.90	1.21	0.13	345.96	186.54	13.67
129A			35	7.22	0.79	0.12	239.70	118.10	25.56
129B			35	2.97	0.12	0.01	107.87	33.11	25.22
129	9.38	375		10.20			347.57		
41	3.62	128	35	3.19	0.10	0.00	70.30	18.43	1.42
128	10	303	33	5.36	0.01	0.00	138.71	3.83	0.00
127	26.82	838	34	18.99	1.54	0.14	647.47	280.19	280.19
126	19.66	742	33	39.04	3.46	0.31	1280.27	624.66	77.14
124	14.2	461	30	13.47	0.02	0.01	459.80	3.36	0.64
123	15.18	416	30	16.05	0.17	0.02	412.08	30.53	3.47
125	13.81	523	31	7.74	0.01	0.00	220.26	3.47	0.02
122	24.14	802	31	25.73	3.07	0.11	786.07	542.22	41.99
120A			30	14.74	3.63	1.10	376.33	326.25	162.97
120B			29	0.99	0.05	0.00	34.80	13.01	0.53
120	17.93	482		16.09			411.77		
119	19.97	472	30	20.89	10.58	6.09	520.79	488.55	404.43
118	15.93	504	30	17.96	12.99	8.08	496.81	495.33	476.20
117	7.56	216	29	3.43	1.72	0.89	86.16	84.18	81.26
116	9.45	264	27	13.45	2.27	0.31	379.64	330.15	49.38
115A			25	15.40	0.83	0.37	442.57	66.93	22.89
115B			29	0.17	0.17	0.10	6.69	6.69	6.43

SIMPO 84			Presente analisi						
Id golena	Vol. max. [Mmc]	Sup. max. [ha]	Quota min. argine maestro [m]	Vol. quota SIMPO [Mmc]	Vol. quota min. argine maestro [Mmc]	Vol. 1 m sotto quota min. argine maestro [Mmc]	Sup. quota SIMPO [ha]	Sup. quota min argine maestro [ha]	Sup. 1 m sotto quota min argine maestro [ha]
115C			29	1.66	1.66	1.18	48.13	48.13	47.37
115D			25	1.12	0.07	0.02	28.38	11.81	1.31
115E			26	0.80	0.09	0.00	25.42	15.43	0.97
115F			28	2.13	1.57	1.10	57.02	54.63	53.36
115	16.4	519		21.27			608.21		
114	8.92	236	25	8.92	0.57	0.12	224.32	14.90	14.90
113	14.5	366	29	14.2	17.80	14.20	367	363.35	363.35
112A			22	2.5	0.17	0.06	55	13.30	7.76
112B			27	12.5	12.49	9.47	304	302.47	300.82
112	19.0	513		15.0			359		
111A			27	7.6	7.55	5.95	161	160.74	159.64
111B			28	1.5	1.90	1.51	38	40.61	39.27
111C			25	0.2	0.01	0.00	5	0.68	0.25
111D			28	2.3	2.83	2.25	58	59.86	58.92
111E			26	0.3	2.50	1.65	9	8.65	8.39
111	11.9	273		11.8			270		
26	1.6	51	25	1.5	1.00	0.51	51	49.54	48.08
110A			28	2.6	3.83	3.21	62	62.09	61.86
110B			26	8.5	8.52	6.62	192	192.39	190.30
110	10.6	260		11.1			254		
24	5.3	125	27	5.1	7.54	6.32	124	121.83	121.89
109	11.5	233	26	13.8	13.80	10.91	292	289.70	287.44
22	5.3	122	25	4.6	7.01	5.78	123	123.00	122.50
107	14.4	345	25	11.8	15.10	11.80	335	329.95	327.85
19A			24	1.5	3.03	2.28	77	75.91	74.99
19B			21	0.1	0.02	0.00	6	3.90	0.60
19	1.8	82		1.6			83		
18	3.2	83	23	2.7	3.50	2.74	79	77.40	75.84

SIMPO 84			Presente analisi						
Id golena	Vol. max. [Mmc]	Sup. max. [ha]	Quota min. argine maestro [m]	Vol. quota SIMPO [Mmc]	Vol. quota min. argine maestro [Mmc]	Vol. 1 m sotto quota min. argine maestro [Mmc]	Sup. quota SIMPO [ha]	Sup. quota min argine maestro [ha]	Sup. 1 m sotto quota min argine maestro [ha]
106	17.3	360	22	2.2	1.72	1.22	54	51.22	50.48
105	15.7	247	23	33.2	33.24	27.85	548	540.84	538.10
105+106	33.0	607		35.5			602		
17	0.9	37	20	1.0	0.27	0.05	37	33.58	11.49
104A			24	9.0	12.81	10.88	193	192.71	192.42
104B			24	1.2	1.90	1.57	33	32.96	32.83
104	12.0	230		10.2			227		
14	4.1	99	18	3.6	1.48	0.55	112	102.91	75.91
13	2.7	65	22	2.4	3.71	3.07	64	63.69	63.46
103	24.3	542	23	26.1	42.12	36.76	539	537.88	535.48
101A			21	9.6	13.58	11.58	199	200.46	199.49
101B			11	1.3	0.01	0.00	35	0.60	0.44
101	9.8	240		10.9			234		
Totale	432.7	12124		446.1			11856		

Tabella 13: Confronto schematico dei risultati della presente analisi e dei valori riportati nello studio SIMPO.

3.2 Schematizzazione delle caratteristiche geometriche dell'alveo

Il nuovo modello numerico idraulico del Po chiamato Q2005D è stato messo a punto utilizzando il pacchetto software Hec-Ras che rappresenta lo stato dell'arte in quanto a riproduzione del comportamento idraulico di complessi sistemi di corsi d'acqua naturali e canali artificiali mediante schematizzazioni di tipo 1D e impiega il noto codice di calcolo di moto vario 1D UNET (Barkau, 1997). Il modello Q2005D rientra nella classe di modelli quasi quasi-bidimensionali. Infatti, sebbene le equazioni caratteristiche del modello descrivano il moto utilizzando una sola variabile spaziale, la schematizzazione di golene chiuse idraulicamente connesse all'alveo e, talvolta, interconnesse tra loro, permette di descrivere la dinamica del fenomeno di propagazione dell'onda di piena in maniera non necessariamente monodimensionale.

Viste le finalità dello studio "Progetto strategico per il miglioramento delle condizioni di sicurezza idraulica dei territori di pianura lungo l'asta principale del fiume Po" (DISTART, Università di Bologna) che ha dato origine a questo modello, e la scala spaziale di riferimento, nella messa a punto del modello si è deciso di non rappresentare le strutture interferenti con il corso

d'acqua, quali ad esempio attraversamenti viari e ferroviari, opere di derivazione e di regolazione. Infatti, in condizioni di piena le perdite di carico concentrate e gli effetti di rigurgito prodotti da tali strutture risultano essere marginali.

L'implementazione della descrizione geometrica dell'alveo fluviale nel modello quasi-bidimensionale ha richiesto la suddivisione del tratto d'asta considerato in tronchi e la successiva analisi del DTM relativo a ciascun tronco mediante procedure di interrogazione in ambiente GIS. La suddivisione del tratto di Po analizzato si è resa necessaria a causa dell'elevata mole di dati da elaborare, non potendo gestire l'intero DTM del tratto di fiume Po d'interesse in maniera unitaria (Tabella 14).

Tronco (sez.monte sez.valle)	Monte	Valle	Lunghezza (Km)
S00B1_s6a	Idrometro Isola S. Antonio (AL)	Confluenza Ticino (PV)	38.761
S6_s9d	Confluenza Ticino (PV)	Loc. Castel San Giovanni (PC)	24.112
S10_s18	Loc. Castel San Giovanni (PC)	Confluenza Trebbia (PC)	35.832
S18a_s25	Confluenza Trebbia (PC)	Isola Serafini (PC)	41.394
S2502_s27c	Isola Serafini (PC)	Loc. Polesine Parmense (PR)	20.679
S28_s29	Loc. Polesine Parmense (PR)	Loc. Isola Pescaroli (CR)	11.124
S30_s33b	Loc. Isola Pescaroli (CR)	Colorno (PR)	20.380
S33c_s36a	Colorno (PR)	Confluenza Enza (RE)	20.908
S37_s41a	Confluenza Enza (RE)	Loc. Borgoforte (MN)	33.941
S41b_s45c	Loc. Borgoforte (MN)	Loc. Correggio Micheli (MN)	21.369
S46_s54a	Loc. Correggio Micheli (MN)	Bergantino (RO)	28.600
S55_s59b	Bergantino (RO)	Salara (RO)	21.283
S59c_s64c	Salara (RO)	Pontelagoscuro (FE)	24.263
		Totale	342.646

Tabella 14: Suddivisione in tronchi

La descrizione della geometria del tronco più a monte tra quelli considerati, non interessato dalla presenza di golene chiuse, è stata condotta attraverso la schematizzazione monodimensionale classica, ritenuta più che attendibile in questo caso. Per questa ragione il tratto è stato schematizzato utilizzando esclusivamente le sezioni topografiche trasversali rilevate in occasione della campagna di rilievo del 2004 commissionata da AIPO.

I rimanenti tratti fluviali sono invece stati schematizzati estraendo l'informazione piano altimetrica direttamente dal DTM. L'attendibilità del dato estratto da DTM in base alla procedura di interrogazione GIS è stata verificata attraverso un confronto con le sezioni topografiche AIPO del 2005. La Figura 3.6 propone per alcune sezioni topografiche Brioschi un confronto tra il dato ricavato dal DTM (Laser) e quello relativo al rilievo topografico AIPO del 2005 (AdBPO). Ai fini pratici, le sezioni trasversali ottenute dal DTM sono risultate praticamente coincidenti con quelle rilevate nello stesso anno con metodi tradizionali.

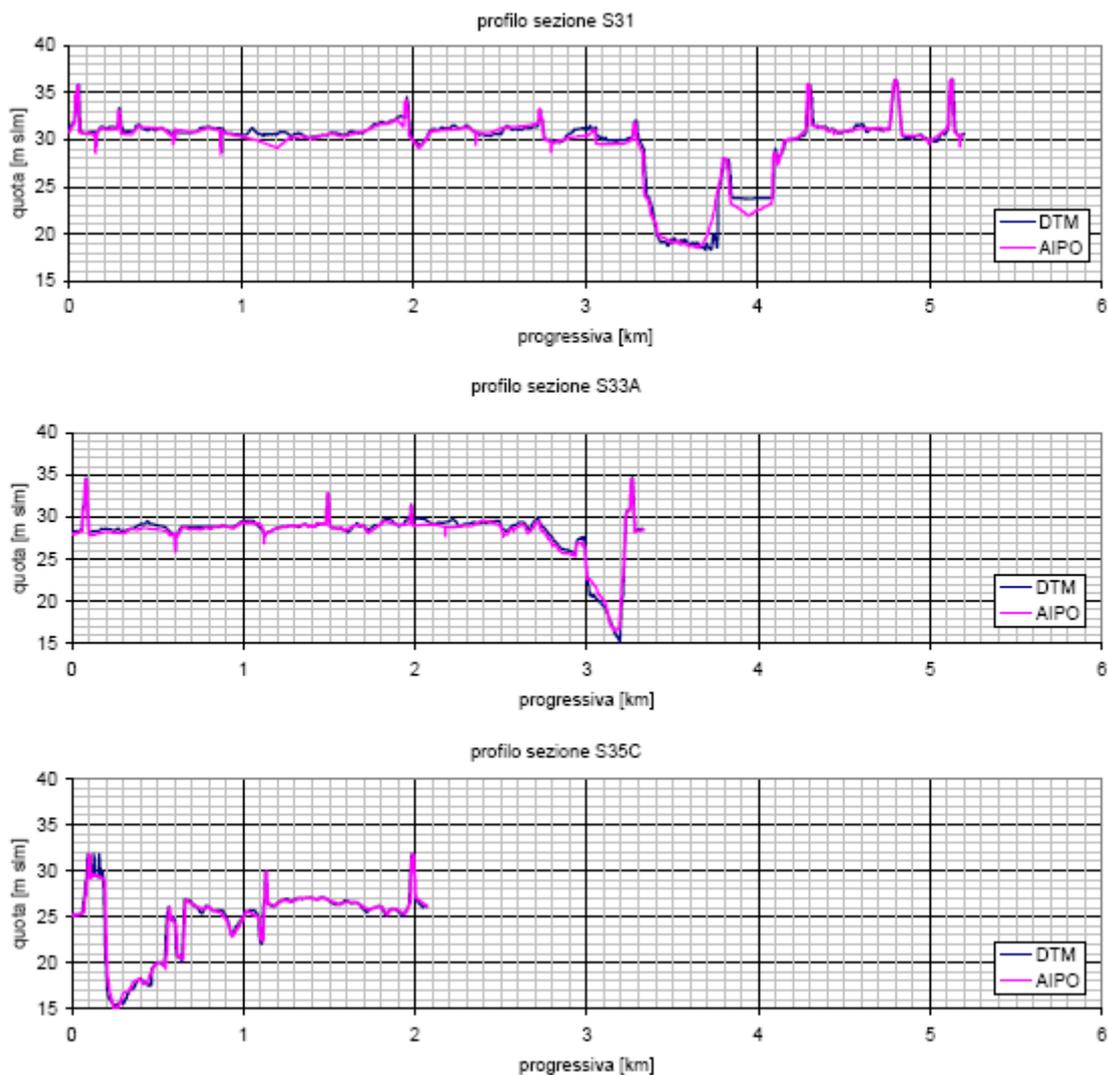


Fig. 3.6: Confronto tra alcune sezioni trasversali del fiume Po.

Il criterio generalmente seguito è stato quello di rappresentare nel modello esclusivamente le sezioni trasversali di riferimento del Po (c.d. sez. Brioschi, v. ad es. Coratza, 2005), in maniera da permettere un più corretto confronto dei risultati ottenuti in questo studio con quelli relativi a studi precedenti. Ciononostante, le tracce planimetriche di alcune delle sezioni estratte del DTM e schematizzate nel modello Q2005D possono differire in parte dalle tracce delle corrispondenti sezioni Brioschi. I motivi principali sono così sintetizzabili:

1. la traccia planimetrica della sezione Brioschi non è ortogonale alla sezione media della corrente, come invece richiesto dalla schematizzazione 1D (v. ad es. Samuels, 1990, Di Baldassarre et al., 2006, Natale e Savi, 2001);
2. la traccia planimetrica della sezione Brioschi interessa una o più golene chiuse;
3. due tracce planimetriche delle sezioni Brioschi presentano un punto di intersezione;
4. la traccia della sezione interessa solo l'alveo inciso.

Con riferimento al punto 1 si è proceduto a una rotazione della traccia planimetrica della sezione attorno al punto di intersezione tra traccia Brioschi e asse fluviale. Come verrà meglio descritto nel seguito, nel caso 2 si è proceduto ad un troncamento della sezione trasversale relativamente alla parte interessante la golenata chiusa. Nel caso 3, invece, è stata operata una roto- traslazione delle tracce delle sezioni, onde evitarne l'intersezione. Infine, nel caso 4, si è operata la rimozione della sezione nel caso in cui l'informazione veicolata dalla stessa fosse ritenuta ridondante (si veda ad es. Di Baldassarre et al., 2006, sulla spaziatura ottimale delle sezioni trasversali in modelli idraulici 1D e quasi- 2D), oppure, la traccia stessa è stata estesa fino ad interessare l'intero alveo fluviale delimitato dagli argini maestri.

La Figura 3.7 illustra, attraverso un esempio relativo ad un breve tratto di Po a monte della confluenza Taro, alcuni dei punti elencati precedentemente. In particolare, il pannello di sinistra

riporta alcuni elementi dei tematismi GIS utilizzati come appoggio nella messa a punto del modello Q2005D.

tratto rosso spesso: sviluppo planimetrico degli argini maestri;

aree campite con tratteggi blu e blu scuro: golene chiuse;

tratto giallo spesso: tracce planimetriche delle sezioni Brioschi;

linea orientata blu: asse fluviale;

linea orientata verde: direzione media del flusso nelle golene aperte;

tratto sottile rosso: limite dell'alveo inciso.

Il pannello di destra invece illustra come questi elementi sono stati riprodotti nel modello:

aree a campitura blu: golene chiuse schematizzate come aree di accumulo;

linea blu: asse fluviale

tratti verdi: tracce planimetriche delle sezioni trasversali inserite nel modello (eventualmente ruotate e troncate come indicato)

punti rossi: identificano la suddivisione di ciascuna sezione tra le parti a diversa scabrezza di fondo (alveo principale e golene aperte destra e sinistra).

Con riferimento al pannello di destra della Figura 3.7 è opportuno puntualizzare che la parte di alveo attiva, quella che partecipa attivamente al deflusso fluviale, è quella rappresentata in bianco e interessata dalle sezioni trasversali. Il comportamento idraulico delle golene chiuse, infatti, è schematizzato nel modello come una successione di stati idrostatici e in esse l'acqua viene supposta priva di velocità nella direzione media del moto.

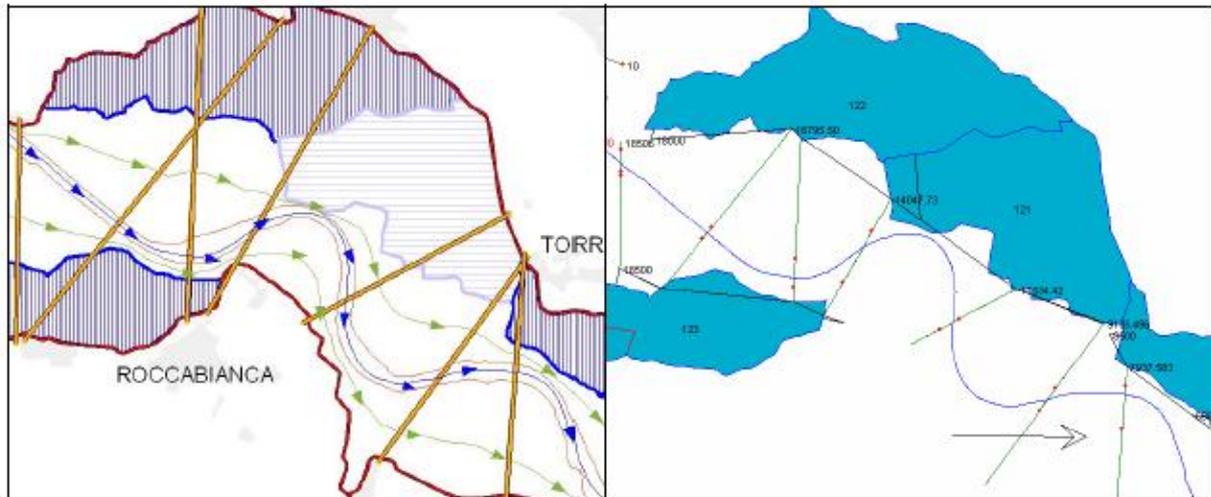


Fig. 3.7: Messa a punto del modello Q2005D: elementi costituenti il sistema fluvio-golenale e loro schematizzazione.

Come anticipato, le golene chiuse sono rappresentate nel modello come aree di accumulo laterali (*storage area*) che non partecipano attivamente al deflusso. Il comportamento idraulico di ogni golena chiusa schematizzata nel modello è stato descritto attraverso la relativa curva quota- volume, che descrive il volume idrico invasato in funzione della quota del pelo libero. Le golene chiuse sono collegate al corso d'acqua tramite l'inserimento di sfioratori laterali, rappresentanti gli argini golenali, il cui sviluppo altimetrico è stato ricavato interrogando il DTM. Sono stati schematizzati anche i collegamenti idraulici presenti tra golene chiuse adiacenti attraverso sfioratori rappresentanti i tratti di argine golenale in comune tra le coppie di golene. Le Figure 3.8 e 3.9 riportano due esempi di schematizzazione dei collegamenti idraulici appena descritti.

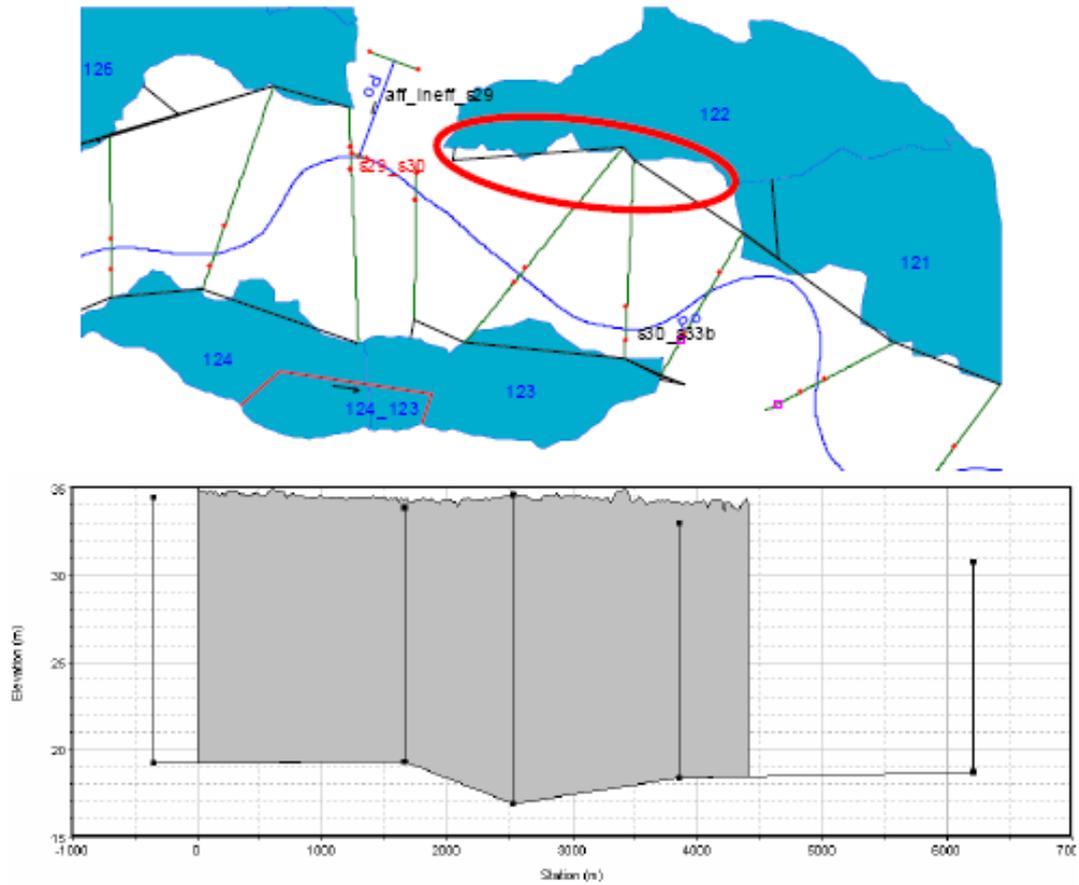


Fig. 3.8: Schematizzazione del collegamento idraulico tra corso d'acqua e golena chiusa 122: in rosso viene evidenziato lo sfioratore laterale avente lo sviluppo altimetrico descritto nel riquadro in basso (i segmenti neri rappresentano le sezioni trasversali implementate nel modello)

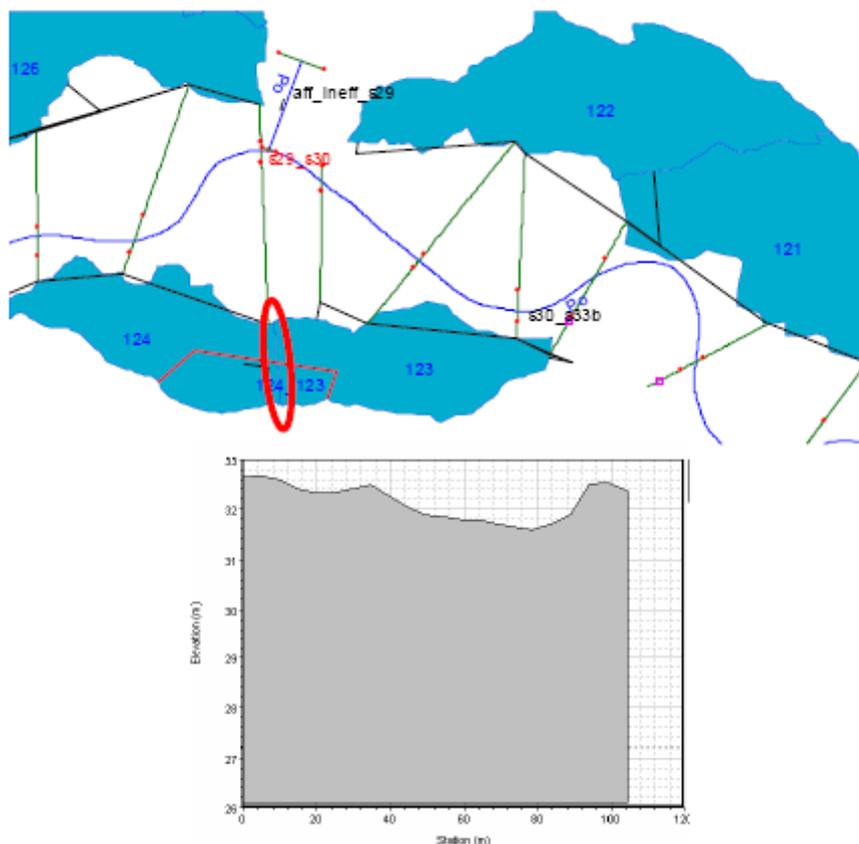


Fig. 3.9: Schematizzazione del collegamento idraulico tra le golene chiuse 123 e 124: in rosso viene evidenziato lo sfioratore avente lo sviluppo altimetrico descritto nel riquadro a destra

Un discorso analogo può essere fatto per le modalità di schematizzazione della vasta area in destra idraulica identificata dagli argini maestri del Po in corrispondenza di foce Panaro. Infatti, anche tale area è stata schematizzata nel modello come area di accumulo laterale. Essa è stata caratterizzata dalla curva quota- volumi che è stato possibile ricavare mediante l'analisi del DTM e collegata al corso d'acqua principale mediante uno sfioratore laterale. Lo sfioratore laterale fittizio è stato assunto a quota costante e pari alla quota del piano golena in corrispondenza della foce Panaro. Le Figure 3.10 e 3.11 illustrano in dettaglio le modalità di schematizzazione.

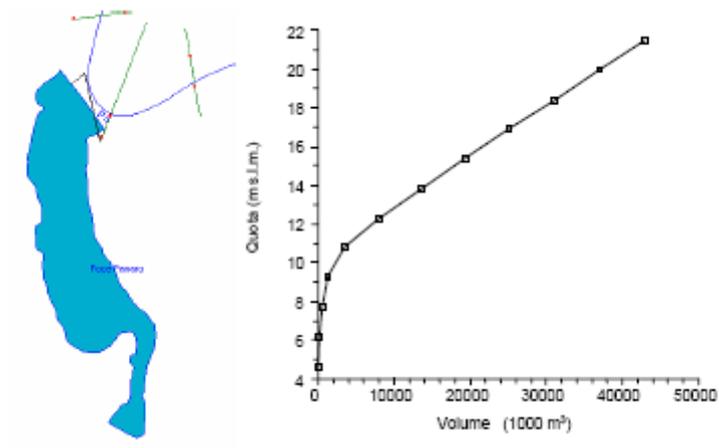


Fig. 3.10: Area di accumulo schematizzante l'espansione golenale presente in corrispondenza di foce Panaro e relativa curva quota-volumi, come derivata dall'analisi del DTM.

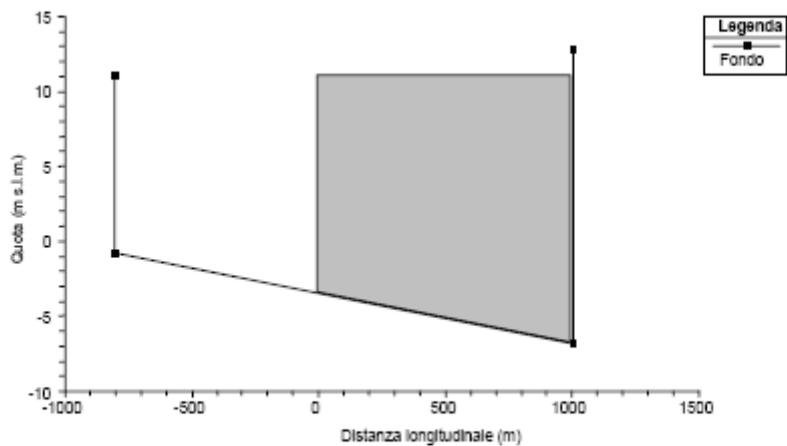


Fig. 3.11: Sfiatore laterale schematizzante il collegamento idraulico tra l'asta di Po e l'espansione golenale presente in corrispondenza di foce Panaro.

3.3 Taratura del modello

Il modello Q2005D è stato calibrato con riferimento al recente evento di piena dell'ottobre 2000, in ragione della significatività di tale evento e della completezza dei dati di piena registrati.

La fase di taratura è stata finalizzata all'identificazione dei coefficienti distribuiti di resistenza al moto caratteristici delle diverse sezioni trasversali impiegate dal modello idraulico. In particolare, per quanto concerne la rappresentazione delle condizioni di scabrezza del fiume Po, si è deciso di

differenziare il coefficiente di scabrezza del canale principale da quello delle espansioni laterali. Ogni sezione trasversale è stata pertanto divisa in due porzioni, una rappresentativa dell'alveo inciso, caratterizzata da un preciso valore del coefficiente di scabrezza, e due rappresentative delle espansioni laterali che partecipano attivamente al deflusso idrico, caratterizzate da un diverso valore del coefficiente di scabrezza.

I due valori di scabrezza caratteristici della generica sezione trasversale (alveo inciso e golene aperte) sono stati mantenuti costanti all'interno di tratti fluviali omogenei e sono stati identificati proprio attraverso la fase di taratura del modello. Detta fase ha l'obiettivo di pervenire, attraverso il modello, ad una corretta riproduzione del comportamento idraulico dell'asta medio- inferiore del fiume Po per l'evento di piena di riferimento.

Il comportamento idraulico dell'asta è stato sintetizzato mediante le seguenti grandezze di riferimento:

- osservazioni idrometriche (ideogrammi di piena osservati in corrispondenza delle stazioni idrometriche disponibili e tracce di piena identificate a valle dell'evento, v. Coratza, 2005);
- dinamica di invaso delle golene chiuse (istanti di inizio invaso, v. Coratza, 2005, e tiranti idrici massimi);
 - valori di portata al colmo (valori di portata al colmo in corrispondenza delle sezioni idrometriche di riferimento, desunti dalle scale di deflusso rese disponibili dal S.I.M.I., v. STI.19, 2003).

3.3.1 Condizioni al contorno

Le Figure 3.12 e 3.13 illustrano le condizioni al contorno di monte e di valle utilizzate in simulazione. La Figura 3.12 riporta la condizione al contorno di monte adottata in corrispondenza della sezione Brioschi 00B1, ovvero l'idrogramma di piena in termini di portata desunto per la sezione idrometrica di Isola Sant'Antonio, fornito da Arpa- Piemonte (Arpa Piemonte, 2006). La Figura 3.13, invece, riporta la condizione al contorno di valle utilizzata in corrispondenza della

sezione di Pontelagoscuro, coincidente con l'idrogramma di piena in termini di livello (v. ad es. STI.19).

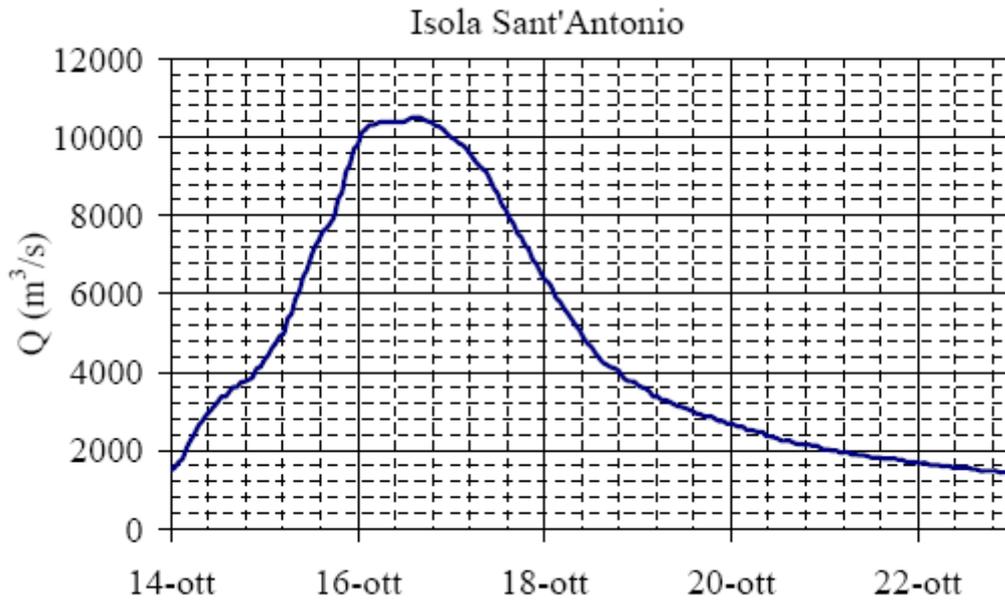


Figura 3.12: condizione al contorno di monte

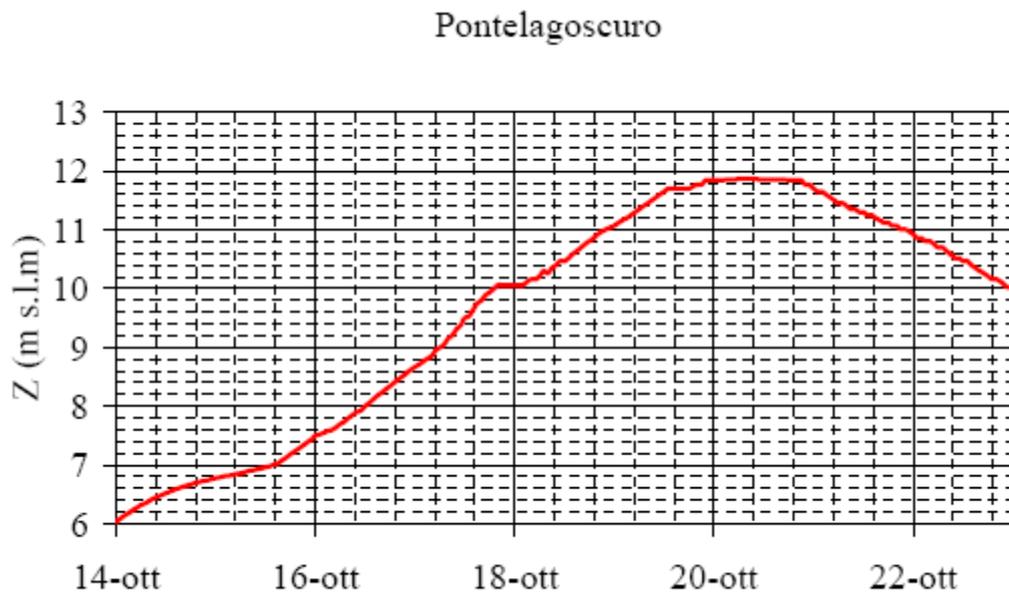


Figura 3.13: condizione al contorno di valle

Informazioni sugli apporti idrici dei principali affluenti sono state reperite in STI.19 (2003). Partendo dai dati illustrati in figura 3.14 si è cercato di pervenire ad una realistica quantificazione dei volumi idrici effettivamente immessi in Po durante l'evento di piena dell'Ottobre 2000. A tal fine i volumi di piena relativi alla stazione idrometrica di Isola Sant'Antonio sono stati confrontati con quelli relativi alla sezione di Cremona. Le due sezioni idrometriche sono state scelte in virtù della buona attendibilità delle scale di deflusso per esse costruite (per la sezione idrometrica di Isola Sant'Antonio si veda ARPA – Piemonte, 2006; per la sezione di Cremona si veda Falcettoni, 2003). I volumi di piena per le due sezioni sono stati calcolati in un'opportuna finestra temporale, differenziata tra le due sezioni in maniera da tener conto del tempo di trasferimento tra Isola S. Antonio e Cremona.

I risultati ottenuti sono:

- onda di piena a Isola S. Antonio in termini di portata, integrata tra il 14 Ottobre 2000 alle ore 00:00 e il 18 Ottobre alle ore 20:00. Volume: 2.845 Mm^3 (Figura 3.11);
- onda di piena a Cremona in termini di portata, integrata tra il 14 Ottobre 2000 alle ore 13:00 e il 20 Ottobre alle ore 07:00. Volume: 3.739 Mm^3 (Figura 3.11).

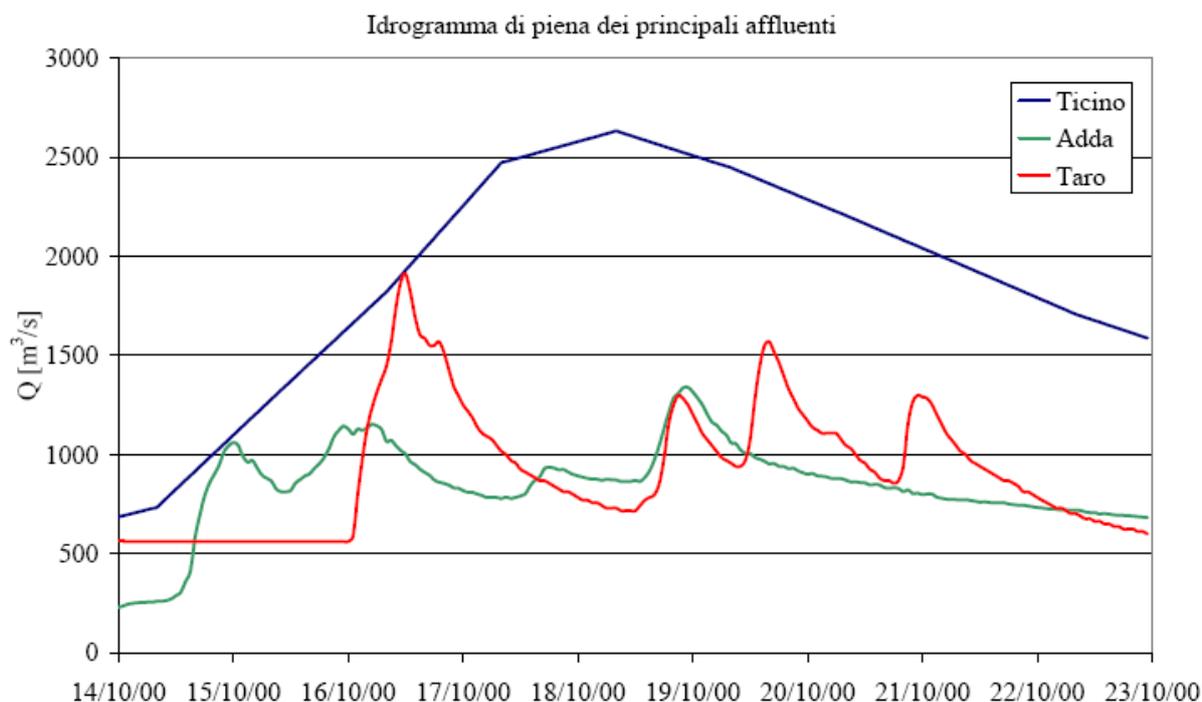


Fig. 3.14: portate dei principali affluenti durante l'evento

La differenza tra i volumi transitati a Cremona e a Isola Sant'Antonio (circa 894 Mm³) fornisce un'indicazione dei volumi idrici apportati dagli affluenti in Po nel tratto considerato durante il transito dell'onda di piena. Sulla base di questa indicazione sono state quantificate le condizioni al contorno necessarie per la simulazione del tratto considerato. Gli apporti idrici laterali sono stati distribuiti in tre diverse sezioni trasversali, scelte per comodità coincidenti con le sezioni localizzate in corrispondenza di foce Ticino, foce Trebbia e foce Adda. Complessivamente, la somma dei volumi idrici immessi in corrispondenza delle tre sezioni nell'arco temporale preso a riferimento per i calcoli sopra descritti coincide con la differenza precedentemente indicata. Nonostante la schematizzazione modellistica adottata non consenta di rappresentare con elevata precisione le dinamiche di scambio di volumi idrici tra l'asta principale di Po e i suoi affluenti, si ritiene che essa fornisca una rappresentazione approssimata, ma sufficientemente realistica, degli scambi di volumi idrici tra affluenti e asta di Po in occasione dell'evento esaminato e per il tratto d'asta tra Isola S. Antonio e Cremona.

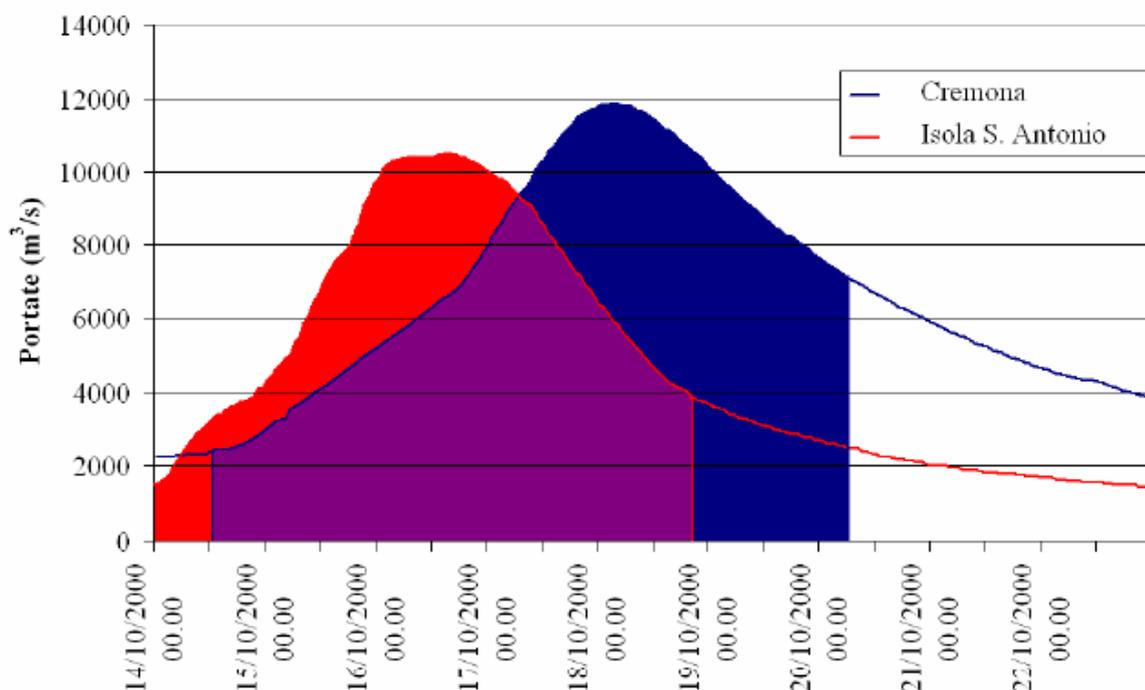


Fig. 3.15 : valutazione degli apporti idrici tra Isola S. Antonio e Cremona durante l'evento di piena dell'ottobre 2000

Nel tratto di asta di Po a valle di Cremona anche gli apporti idrici del Taro sono stati schematizzati come una immissione laterale concentrata in corrispondenza della foce del corso d'acqua. Gli apporti degli affluenti a valle di foce Taro sono invece stati trascurati, assumendo che, durante il transito del colmo di piena, fosse marginale il loro apporto idrico a causa dei fenomeni di rigurgito. Come si vedrà nel seguito, la scelta adottata nella schematizzazione degli apporti idrici degli affluenti fornisce una corretta riproduzione dei valori idrometrici sperimentali (tiranti massimi e valori di portata al colmo di piena) anche nel tratto di asta fluviale a valle della sezione di Cremona. Come illustrato, nel condurre le simulazioni della fase di taratura gli affluenti sono stati rappresentati come ingressi laterali concentrati. Questa approssimazione, adottata anche negli studi precedenti, non consente di riprodurre correttamente gli scambi di volumi idrici tra affluenti ed asta

principale durante il passaggio dell'onda di piena nell'asta principale stessa. Infatti, per una corretta riproduzione dei fenomeni di rigurgito indotti dal passaggio dell'onda di piena in corrispondenza delle confluenze sarebbe necessario utilizzare un modello numerico a rete, schematizzante la geometria degli affluenti oltre che quella dell'alveo principale di Po. Si ritiene auspicabile che tra le prossime attività di studio e ricerca promosse dall'AdB Po venga inclusa anche un'analisi del comportamento degli affluenti principali di Po in corrispondenza delle foci. Tale analisi dovrebbe necessariamente utilizzare un modello numerico- idraulico quale quello indicato e permetterebbe di meglio chiarire il comportamento idraulico degli affluenti durante la propagazione di un generico evento di piena lungo l'asta medio inferiore del Po, riducendo così i margini di incertezza ancora presenti relativamente alla quantificazione degli apporti idrici in condizioni di piena.

3.3.2 Analisi dei risultati

La figura 3.16 riporta un confronto tra gli ideogrammi osservati e quelli simulati dal modello nella configurazione finale, i cui coefficienti di scabrezza verranno descritti in chiusura del presente paragrafo. Come mostrato in figura, il modello calibrato consente di pervenire ad una corretta riproduzione del fenomeno propagatorio lungo i 340 km circa di asta fluviale considerati nell'indagine. In particolare, la riproduzione appare migliore in corrispondenza del colmo di piena, per il quale diventano meno significativi gli effetti indotti dalle condizioni iniziali assunte per la simulazione e dalle modalità di schematizzazione degli affluenti.

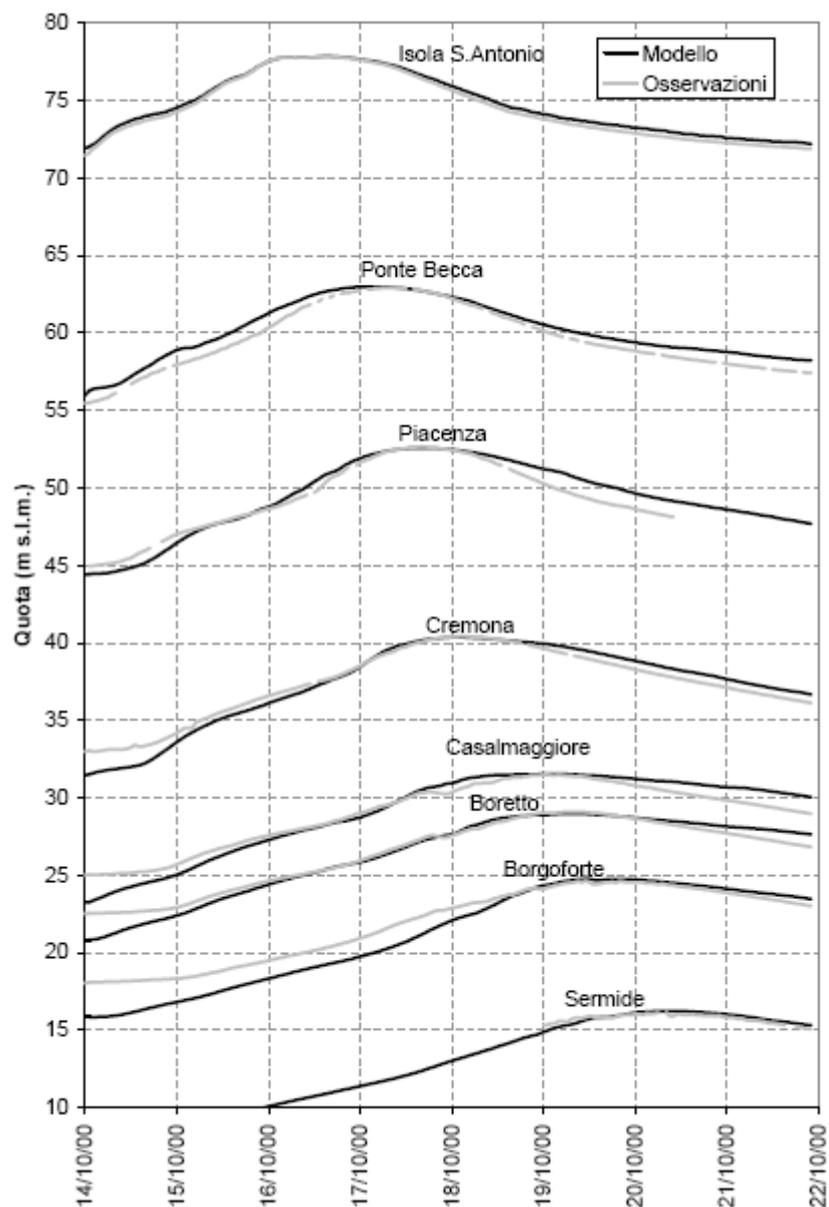


Fig. 3.16: confronto tra gli idrogrammi di piena simulati e osservati

Inoltre, come prevedibile data la fedele riproduzione delle caratteristiche geometriche del sistema composto da alveo inciso, golene aperte e chiuse, il modello Q2005D si è mostrato in grado di rappresentare in maniera soddisfacente la dinamica di invaso del sistema di golene chiuse. Infatti, oltre alle massime quote del pelo libero è stato possibile verificare anche una corretta riproduzione degli istanti di inizio invaso. La Tabella 15 riporta un esempio di confronto tra gli istanti di inizio invaso osservati e simulati per i cinque maggiori sistemi di golene chiuse. Come mostrato dalla

tabella le differenze sono uguali o inferiori a 6 ore per quattro dei cinque sistemi di golene chiuse considerati pari a 10 ore nel caso restante.

Golena	Lato	Sup. (ha)	Vol. (M m³)	Inizio invaso* (osservazioni)	Inizio invaso (modello)	Diff. (h)
Consorzio Tombone PR	dx	950	31.859	10/17/2000 15:00	10/17/2000 16:00	1
Casalmaggiore CR	sx	1653	51.213	10/17/2000 18:00	10/17/2000 13:00	-5
Sommo con Porto CR	sx	2253	59.873	10/17/2000 19:00	10/18/2000 1:00	6
Motta Baluffi CR	sx	962	29.845	10/17/2000 21:00	10/17/2000 16:00	-5
Po Morto – S, Benedetto MN	dx	727	40.018	10/18/2000 12:00	10/18/2000 22:00	10
TOT		6545	212.808			

Tabella 15: Taratura del modello: dinamica temporale di inizio invaso (Coratza, 2004)

La figura 3.18 riporta il confronto tra i valori di portata al colmo di piena simulati dal modello in corrispondenza di alcune sezioni idrometriche significative e i valori corrispondenti desunti sulla base delle osservazioni idrometriche. Anche con riferimento a questo ulteriore parametro di controllo si può osservare come il modello Q2005D fornisca una riproduzione piuttosto accurata dei valori sperimentali. Infatti, le portate simulate sono in buon accordo con i corrispondenti valori empirici e ampiamente contenute nella fascia di incertezza caratteristica di misure di portata di buona precisione, valutabile in $\pm 10\%$ come indicato in bibliografia (IAHS,2003).

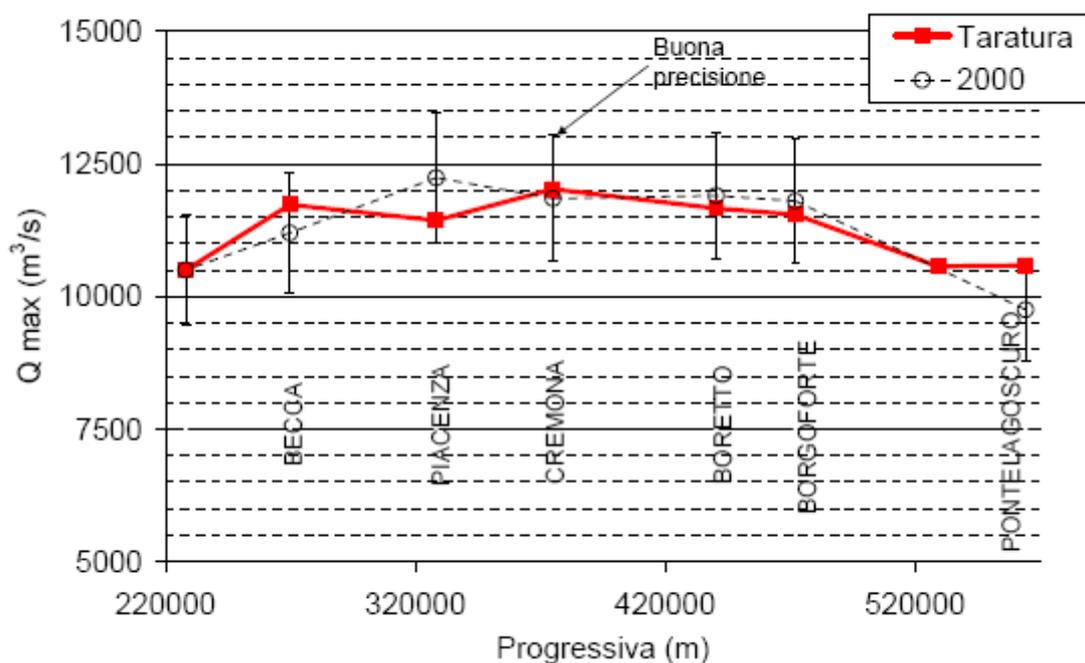


Fig. 3.17: Taratura del modello: valori di portata al colmo

In chiusura di paragrafo si riportano i coefficienti di scabrezza di Manning identificati per alveo inciso e golena durante la fase di taratura del modello. La Tabella 16 elenca tali valori e mette in luce come, in accordo con i criteri seguiti per la messa a punto del modello, il numero di tronchi omogenei identificati, nove in tutto, sia piuttosto contenuto. Inoltre, si nota in maniera piuttosto evidente come siano contenute le differenze in termini di scabrezza sia dell'alveo inciso che delle golene tra un tronco e l'altro. I coefficienti di scabrezza identificati, infatti, variano limitatamente attorno ai valori medi: $0.04 \text{ s m}^{-1/3}$ per alveo inciso e $0.10 \text{ s m}^{-1/3}$ per le golene (media pesata in funzione della lunghezza del tratto).

A ulteriore conferma della bontà dei risultati ottenuti si sottolinea che i valori del coefficiente di scabrezza per alveo inciso e golene risultanti dal processo di taratura trovano riscontro in letteratura (v. ad es. Chow,1959). Essi sono inoltre molto prossimi ai valori identificati per un modello monodimensionale puro (assenza di aree di accumulo laterali) dello stesso tratto di Po, messo a

punto precedentemente al modello Q2005D e utilizzato nello studio come termine di paragone nella valutazione della capacità del modello Q2005D di riprodurre correttamente il comportamento idraulico dell'asta medio inferiore del Fiume Po.

Tratto (Sez. monte – Sez. valle)	Scabrezza alveo inciso	Scabrezza Golene
s00B1_s6a	0.045	0.1
s6_s9d	0.042	0.1
s10_s18	0.040	0.1
s18a_s25	0.042	0.1
s2502_s27c	0.045	0.1
s28_s29		
s30_s33b	0.040	0.1
s33c_s36a		
s37_s41a		
s41b_s45c	0.042	0.1
s46_s54a	0.035	0.09
s55_s59b		
s59c_s64c	0.030	0.09

Tabella 16: Taratura del modello: coefficienti di scabrezza di Manning ($s\ m^{-1/3}$)

4. Valutazione della capacità di laminazione delle portate di piena del sistema fluvio-golenale del Po: simulazioni numeriche sviluppate

Il modello idraulico descritto precedentemente ha costituito lo strumento di analisi per la valutazione della capacità di laminazione del sistema fluvio-golenale del corso medio inferiore del Fiume Po. L'analisi si è concentrata sul tratto di asta fluviale, di lunghezza pari a circa 190 km, compreso tra Cremona e Pontelagoscuro. Tale tratto è composto da una porzione di monte (da Cremona a foce Mincio, circa 120 km) che comprende la maggior parte delle golene chiuse presenti lungo l'asta fluviale, la cui capacità di laminazione delle piene costituisce l'oggetto principale del presente elaborato. Nella restante porzione di valle del tratto considerato (da foce Mincio a Pontelagoscuro, circa 70 km) la morfologia dell'asta fluviale cambia sensibilmente, la larghezza delle espansioni laterali si riduce e, a valle della località Revere-Ostiglia (MN), le golene difese sono praticamente assenti. Gli effetti di laminazione indotti in condizioni di piena dal sistema di golene chiuse sgravano, da un punto di vista idraulico, proprio questo ultimo tronco (da Revere-Ostiglia a Pontelagoscuro, circa 55 km), che pertanto è stato assunto come riferimento nel valutare i possibili vantaggi offerti da una diversa gestione del sistema di arginature golenali.

4.1 Morfologia attuale (c.d. 2005) del sistema golenale del corso d'acqua

La morfologia attuale del corso d'acqua è stata ottenuta attraverso l'analisi del modello digitale delle quote del terreno (*Digital Terrain Model, DTM*) fornito dall'AdB Po per lo studio "Progetto strategico per il miglioramento delle condizioni di sicurezza idraulica dei territori di pianura lungo l'asta principale del fiume Po". Il DTM è stato analizzato in ambiente GIS (*Geographic Information System*) con lo scopo di aggiornare e approfondire le conoscenze maturate nell'ambito degli studi SIMPO (vedere Capitolo 2). Seguendo la procedura descritta in dettaglio nel Capitolo 3 del presente

elaborato, sono stati individuati dapprima gli argini golenali e successivamente sono stati calcolati i volumi invasabili in ogni golena chiusa e le corrispondenti superfici libere per diversi valori del livello idrico. I risultati ottenuti sono poi stati confrontati con quelli riportati nello studio SIMPO.

Le informazioni ottenute dal DTM sono state importate nel pacchetto di software HEC-RAS come *Geometry Data* e vengono utilizzate nelle simulazioni numeriche. In particolare, gli argini golenali sono stati riprodotti nel modello attraverso una moltitudine di punti ravvicinati tra loro, i quali rendono la rappresentazione complessa e articolata; in seguito risulterà quindi necessario elaborare la conformazione degli argini golenali per ottenere una descrizione più semplice.

4.2 Indagini precedenti: geometrie e sollecitazioni idrologiche utilizzate

In questo paragrafo si riportano le simulazioni effettuate nell'ambito dello studio "Progetto strategico per il miglioramento delle condizioni di sicurezza idraulica dei territori di pianura lungo l'asta principale del Fiume Po", commissionato dall'AdB-Po al DISTART dell'Università di Bologna.

Le simulazioni condotte hanno preso a riferimento numerose configurazioni geometriche dell'alveo. Si elencano qui di seguito e si considerano nella parte restante del seguente paragrafo solo tre di esse: lo stato attuale, così come desumibile dal DTM fornito da AbB-Po, e due configurazioni limite che ben si prestano ad affrontare e discutere il problema del miglioramento della capacità di laminazione del Fiume Po all'interno delle arginature maestre.

Le configurazioni sono illustrate di seguito e descritte graficamente attraverso l'esempio di Figura 4.1:

- *Config. C*: sistema di arginature golenali attuali, come da DTM dell'AdB- Po;
- *Config. E*: quota della sommità degli argini golenali invariata rispetto alla Config. C in tutti i casi in cui la differenza di quota tra l'argine golenale e il corrispondente argine

maestro è inferiore a 1m; nei casi restanti, sommità degli argini golenali innalzata rispetto alla Config. C fino ad avere una differenza in quota tra argini golenali e argini maestri pari a 1m;

- *Config. G*: sommità delle arginature golenali portata alla quota del piano golenale (trasformazione delle golene chiuse in golene aperte).

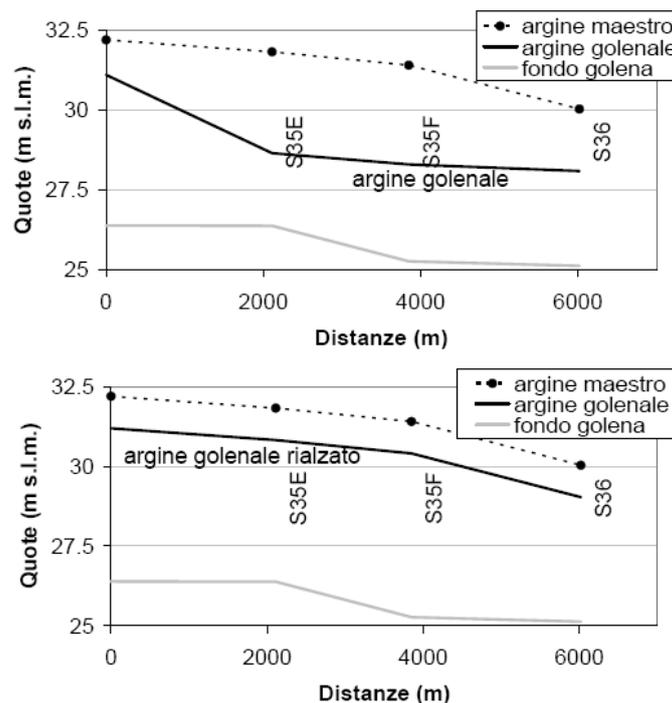


Fig 4.1: Config. geometriche C ed E degli argini golenali per una golena chiusa

Riguardo alle sollecitazioni idrologiche da utilizzare nell'indagine in corrispondenza della sezione di monte (idrometro di Cremona), è evidente che i risultati di un'analisi numerica quale quella sviluppata dallo studio sono necessariamente legati al particolare evento di piena scelto. Dato l'obiettivo generale, l'attenzione si è concentrata su due eventi di piena sintetici particolarmente gravosi, identificati nell'ambito dei principali studi del comportamento idraulico in condizioni di piena del corso medio inferiore del Po (c.d., SIMPO *Magis.Po*, 1982; SP1.1 *Raggr. temp. Impr.*, 1997 e ST1.19 *Cons. Italcopo*, 2002). Il primo dei due idrogrammi considerati, ONDA2, definito

nell'ambito dello studio SIMPO (*Magis Po*, 1982), deriva dalla maggiorazione del 5% dell'idrogramma, espresso in termini di portata, ricostruito per l'evento di piena del 1951. Invece, il secondo idrogramma, TR200, definito nell'ambito dello studio *DIAR* (ST1.11, 2001) prendendo a riferimento un tempo di ritorno duecentennale, ha un chiaro significato statistico ed è stato desunto applicando alle serie storiche disponibili per l'idrometro di Cremona la metodologia per la costruzione di idrogrammi sintetici associati a un prefissato tempo di ritorno, descritta ad es. in *Majone et al. (2000)*. Gli idrogrammi ONDA2 e TR200 sono stati scelti perché ricavati mediante approcci sostanzialmente diversi e perché particolarmente gravosi sia in termini di portata al colmo di piena che di volumi di piena. La Figura 4.2 confronta gli idrogrammi di riferimento sintetici considerati nello studio con l'idrogramma relativo al recente evento di piena dell'ottobre 2000.

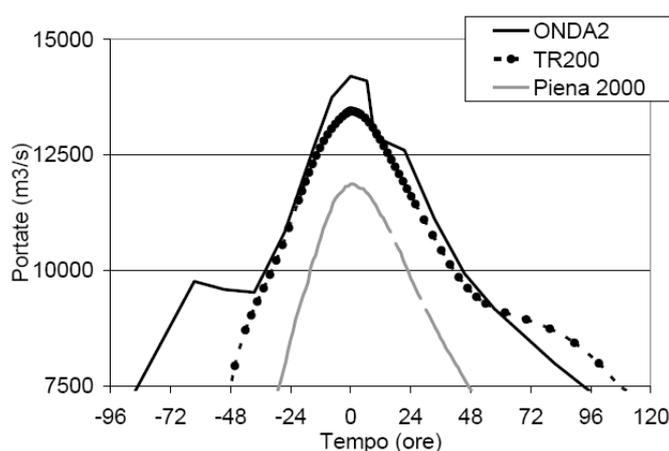


Fig 4.2: idrogrammi di riferimento sintetici considerati nello studio con l'idrogramma relativo all'evento di piena dell'ottobre 2000

Tutte le simulazioni effettuate suppongono assenza di apporti idrici laterali lungo il tratto di asta fluviale considerato. Inoltre adottano come condizione al contorno di valle (sezione idrometrica di Pontelagoscuro) la scala di deflusso di moto permanente ottenuta considerando una cadente idraulica valutata come valor medio tra la pendenza media di fondo sui 10 km d'asta a monte di Pontelagoscuro, il rapporto tra l'altezza sul livello del medio mare del coronamento arginale a Pontelagoscuro e la distanza tra Pontelagoscuro e la foce.

Risultati ottenuti

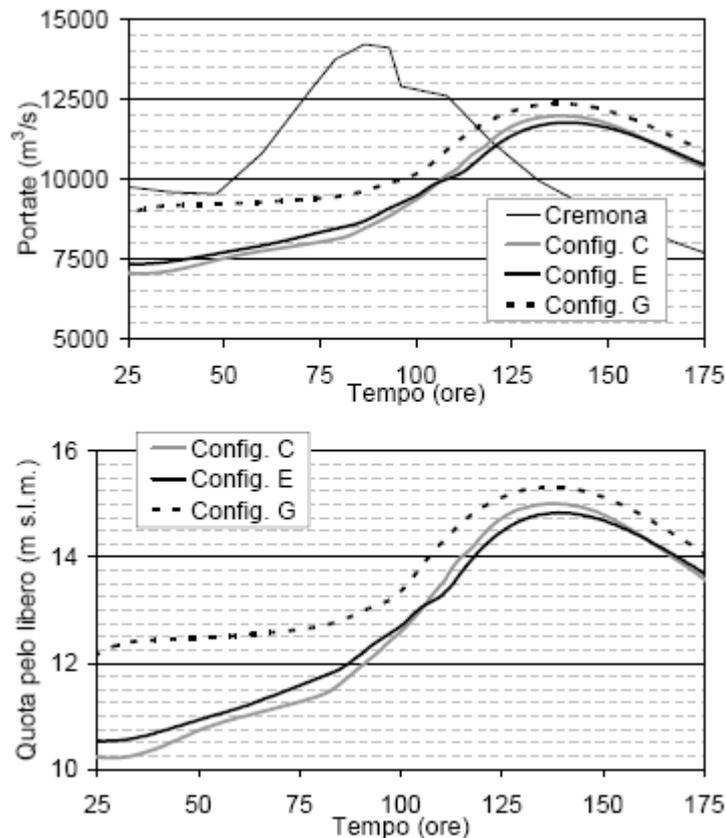


Fig 4.3: risultati ottenuti in termini di idrogrammi di piena alla sezione di Pontelagoscuro con riferimento alla sollecitazione idrologica Onda 2.

La figura 4.3 mostra come la parte iniziale dell'evento, corrispondente a portate a Cremona inferiori a $10000 \text{ m}^3/\text{s}$, sia sensibilmente attenuata nella sezione di valle, eccetto che nel caso della Config G (assenza di arginature golenali) a causa dell'invaso parziale nel sistema di golene chiuse. La possibilità di trattenere volumi d'acqua nella golena permette di ottenere un idrogramma di piena laminato nella sezione di valle. I volumi invasati dipendono dalla conformazione geometrica degli argini maestri e golenali; nel caso in cui quest'ultimi vengano rialzati (Config. E), le golene inizieranno a invasare acqua con tiranti idrici maggiori, ma in compenso aumentano anche i volumi trattenuti; infatti, incrementando l'altezza delle arginature golenali, aumentano i volumi d'acqua contenuti nelle golene. In corrispondenza di basse portate la Config. C permette una laminazione migliore, poiché, presentando gli argini golenali più bassi, l'invaso dell'acqua si verifica per altezze

minori, tuttavia per portate crescenti si nota un'inversione e la Config. E risulta essere più efficace. Conseguentemente, alla sezione di Pontelagoscuro il valore del tirante idrico massimo ottenuto per la Config. E è inferiore a quello relativo alle altre due geometrie. Considerazioni analoghe possono essere fatte per le simulazioni numeriche relative all'onda di piena TR200.

I diagrammi di Figura 4.4 e Figura 4.5 illustrano i risultati delle simulazioni numeriche condotte nello studio per le configurazioni geometriche e le sollecitazioni idrologiche considerate in termini di inviluppo dei massimi livelli idrici per il tratto di asta fluviale compreso tra foce Mincio e Pontelagoscuro.

I profili di piena illustrano chiaramente come a partire dalla progressiva ~510 km (Revere, sez. Brioschi 50) verso valle i massimi livelli idrici simulati per la Config. G (assenza di argini golenali) siano invariabilmente superiori a quelli ottenuti per le Config. C (geometria degli argini golenali da DTM 2005) e della Config. E (arginature golenali modificate) e, in particolare, come i valori più bassi dei massimi livelli idrici siano relativi alla Config. E per entrambe le sollecitazioni idrologiche considerate (c.d., ONDA2, TR200).

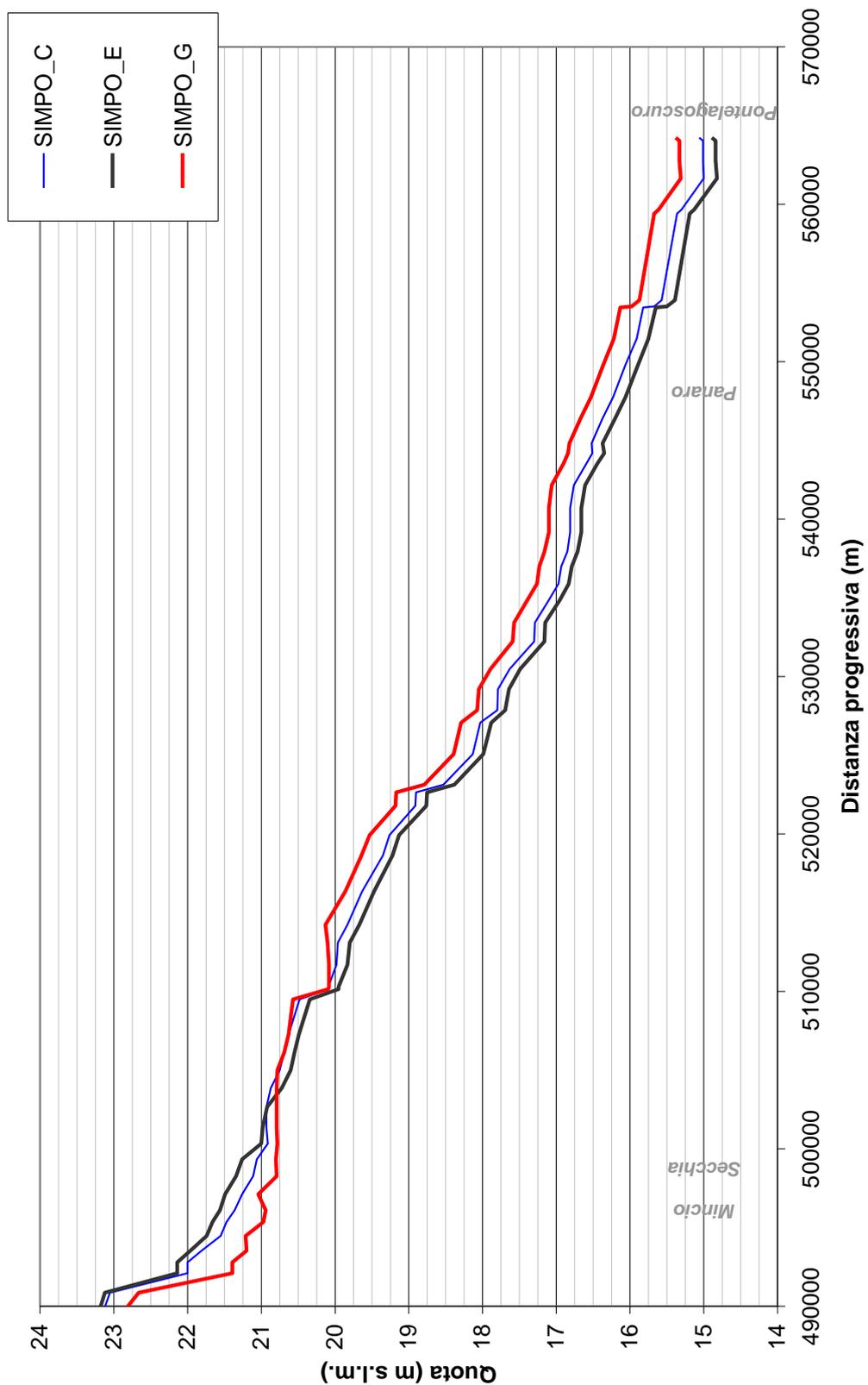


Figura 4.4: Involuppo dei massimi livelli idrici ottenuti in base alle simulazioni numeriche con riferimento alla sollecitazione idrologica ONDA2, scala delle ordinate ingrandita (tratto foce Mincio-Pontelagoscuro)

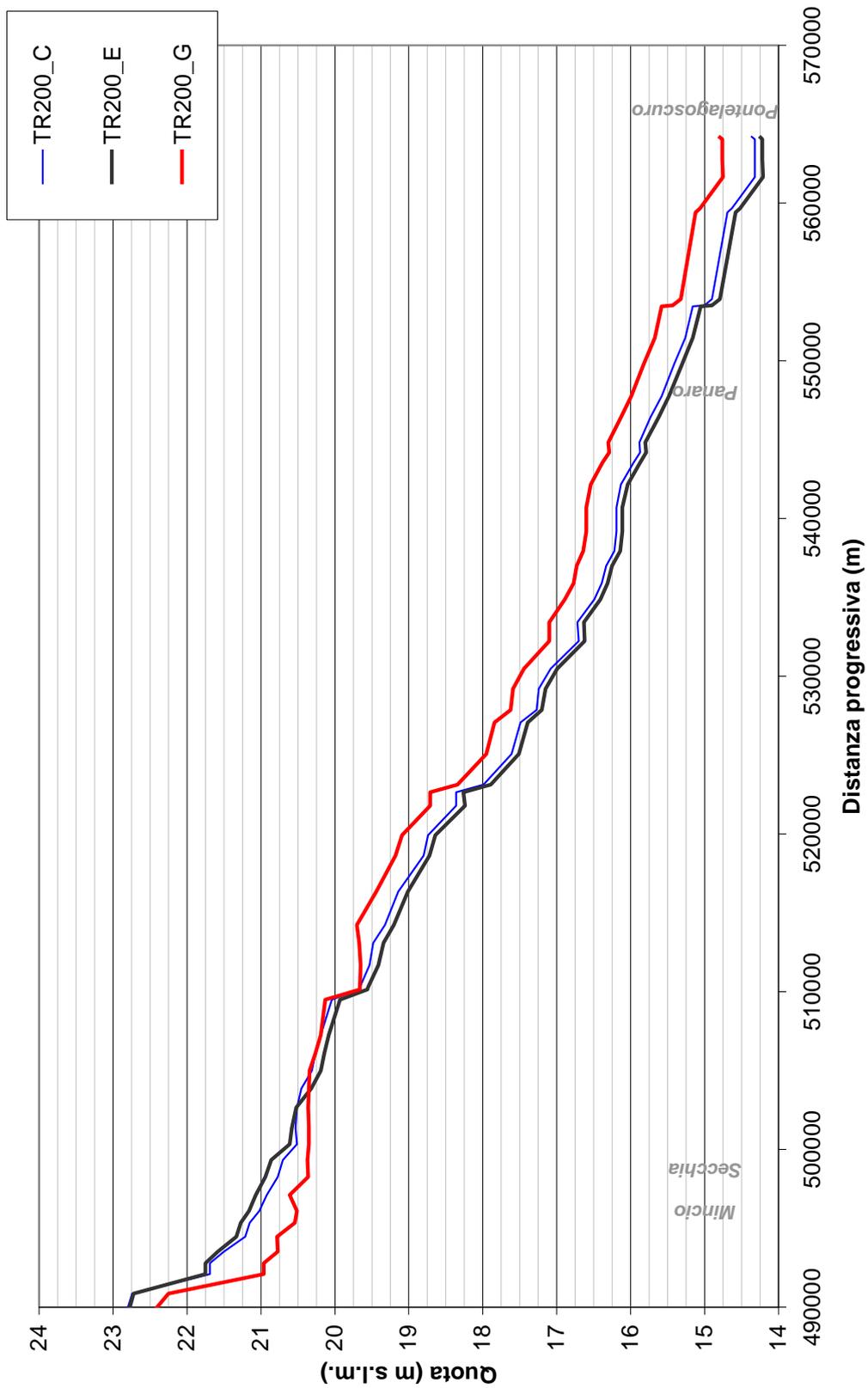


Figura 4.5: Involuppo dei massimi livelli idrici ottenuti in base alle simulazioni numeriche con riferimento alla sollecitazione idrologica TR200, scala delle ordinate ingrandita (tratto foce Mincio-Pontelagoscuro)

La Tabella 17 sintetizza i risultati ottenuti in termini di abbassamento del livello idrometrico nel tratto compreso tra la Revere-Ostiglia (MN) e Pontelagoscuro. Si riporta la differenza media del livello ed il valore massimo con valenza locale.

Abbassamento del livello idrometrico Tratto: Revere-Ostiglia, MN – Pontelagoscuro, FE (≈55km)		
Onda di piena	C rispetto a G	E rispetto a C
ONDA2	medio: 27 cm (max: 33 cm)	medio: 15 cm (max: 18 cm)
TR200	medio: 36 cm (max: 44 cm)	medio: 10 cm (max: 14 cm)

Tabella 17: risultati delle simulazioni numeriche

Il confronto tra i risultati delle simulazioni associate alle Config. C (argini golenali attuali) e G (assenza di argini golenali) permette di quantificare l'incremento di capacità di laminazione all'interno delle arginature maestre associata alla presenza del sistema di golene difese.

Dai valori riportati in Tabella 17 si può osservare quanto negativa risulterebbe, in termini di massimi livelli idrometrici simulati per il tratto a valle, l'ipotesi di apertura delle golene chiuse per entrambe le onde considerate. Il confronto tra i risultati ottenuti per le Config. C e E (argini golenali modificati) permette, invece, la quantificazione dell'incremento della capacità di laminazione del sistema fluviogolenale del Po in condizioni di piena qualora venga adottata una diversa politica di gestione delle arginature golenali.

4.3 Onda di piena cinquecentennale (evento di piena ai limiti della prevedibilità)

Nell'ambito dello studio del comportamento del sistema fluvio-golenale del Po, in aggiunta alle due sollecitazioni idrologiche precedentemente descritte, è stata considerata l'onda con tempo di ritorno cinquecentennale.

La genesi di questa onda fa riferimento allo studio "Caratterizzazione idrologica dell'asta principale del fiume Po nel tratto che va dalla confluenza della Dora Baltea all'incile del Po di Goro", effettuato dal Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale e del Rilevamento del Politecnico di Milano (M.G. Tanda, P. Mignosa, M. Tomirotti, R. Gardelli, S. Adami, 2001) ; si riportano brevemente alcuni passaggi che riguardano la ricerca dei dati, rimandando la trattazione statistico-matematica del lavoro al documento originale.

Lo scopo dello studio sopra citato è quello di elaborare le onde di piena sintetiche in corrispondenza delle sezioni di misura lungo l'asta del Po dotate di un periodo sufficientemente lungo di osservazioni idrometriche. Si ricorda che le onde di interesse nel caso del presente elaborato sono quelle presenti nella sezione di Cremona, esse infatti rappresentano la condizione al contorno di monte del sistema.

Per la definizione di un'onda di progetto in una sezione fluviale a partire dall'analisi dei dati idrometrici è necessario acquisire le registrazioni relative alle onde di piena più rilevanti per portata al colmo e volume in assegnata durata verificatesi storicamente in quella sezione. L'informazione utilizzabile a questo scopo è rappresentata principalmente dalle registrazioni idrometriche effettuate dal Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale. Nel caso dell'asta del Po, le stazioni idrometrografiche funzionanti nell'ultimo cinquantennio e utilizzate nello studio sono rappresentate in Figura 4.6.

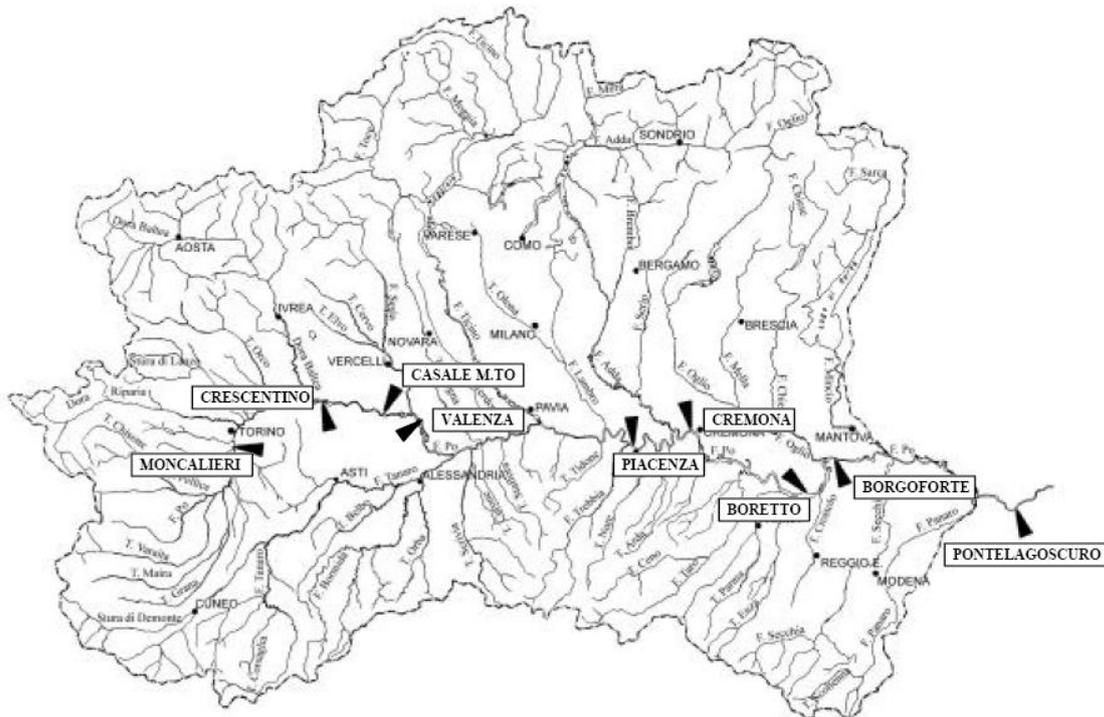


Fig. 4.7: bacino idrografico del Po e localizzazione delle stazioni idrometriche di riferimento

Per ogni stazione è stato necessario recuperare presso le sezioni dell'Ufficio Idrografico del Po le relative registrazioni dei livelli idrometrici in corrispondenza dei periodi di piena. Per ottenere un campione significativo e allo stesso tempo il più possibile omogeneo ai fini dell'analisi statistica si è condotta una lettura sistematica del materiale disponibile a partire dall'anno 1951. Per ogni anno è stato necessario verificare la completezza delle registrazioni e la loro attendibilità effettuando dei confronti con i dati pubblicati sugli Annali Idrologici e sulle pubblicazioni riassuntive, ove possibile. Frequentemente, infatti, le registrazioni conservate presso le sezioni dell'Ufficio Idrografico sono incomplete per vari motivi, che vanno dal mancato funzionamento dello strumento, dovuto all'inzeppamento del galleggiante o alla mancanza di inchiostro nel pennino registratore, alla illeggibilità dei fogli o all'irreperibilità delle registrazioni relative anche ad anni interi di osservazione. Oltre alle registrazioni idrometriche è stato necessario recuperare per ogni evento la scala di deflusso valevole per il periodo corrispondente, necessaria per il passaggio dai livelli alle portate. Per le stazioni considerate nella sezione relativa ai bilanci idrologici sulla Parte II

degli Annali Idrologici relativi al bacino padano sono pubblicate anche le scale di deflusso utilizzate per quell'anno; per le altre stazioni idrometrografiche e per gli anni posteriori al 1985 (ultimo anno disponibile per la Parte II degli Annali Idrologici) la scala di deflusso è di solito mancante e si è dovuto necessariamente estendere il campo di validità delle scale disponibili.

Dopo una prima parte di reperimento dei dati è seguito uno studio statistico che ha portato alla generazione di onde sintetiche con vari tempi di ritorno in corrispondenza delle sezioni strumentate del Po; in figura 4.8 sono rappresentate le onde sintetiche generate in corrispondenza della sezione di Cremona, punto di partenza dell'asta medio-inferiore del corso d'acqua.

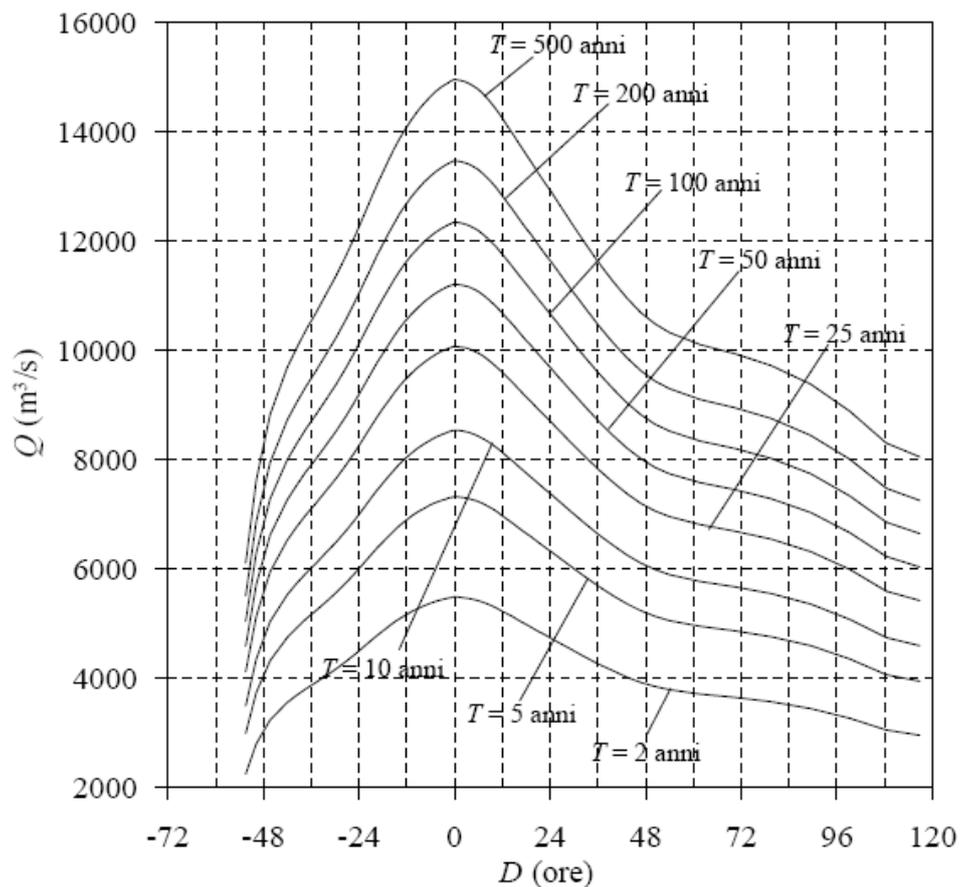


Fig. 4.8: onde di piena sintetiche per la stazione di Cremona

4.4 Ipotesi di configurazioni geometriche alternative: semplificazione della geometria attuale

Dai risultati espressi nel paragrafo precedente (4.2.1) emerge come una corretta gestione del complesso sistema fluvio-golenale del Fiume Po possa diminuire il rischio idraulico lungo tutta l'asta medio-inferiore, ma soprattutto nell'ultimo tratto, da Revere-Ostiglia a Pontelagoscuro, caratterizzato dalla mancanza di golene difese. Dopo aver dimostrato che la Config E è ottimale rispetto alla Config C e Config G, l'idea è quella di cercare altre geometrie che possano dare un beneficio migliore rispetto alla Config E in termini di abbassamento del livello e laminazione del colmo di piena. Sono quindi state messe a punto nuove configurazioni geometriche facendo variare la quota degli argini golenali, in modo tale da poter trattenere nelle golene difese un maggior volume idrico e contemporaneamente riuscire a invasare pressoché tutte le golene disponibili.

Per prima cosa è stato necessario predisporre un criterio di semplificazione della morfologia, infatti, allo stato attuale, gli argini golenali vengono modellati attraverso una grande quantità di punti. Ebbene, dato che il lavoro preposto è quello di alzare le arginature golenali, sarebbe risultato operativamente molto difficoltoso modificare arginature composte da 30 o più coordinate, pertanto è preferibile ricondursi ad argini configurati al massimo con 5 punti. Il criterio utilizzato per la semplificazione considera come dato di partenza la quota degli argini maestri ottenuta dalle livellazioni del 2005 e del 1999 effettuate dall'Autorità di Bacino del Fiume Po. L'andamento delle quote delle arginature golenali viene ottenuto sottraendo dalle quote degli argini maestri una certa quantità, in particolare, in questo elaborato, sono stati considerati argini golenali a -1 m, -0.75 m, -0,50 m, -0.25 m, -0 m rispetto ai corrispondenti argini maestri.

In Figura 4.9 sono rappresentate, per gli stessi argini golenali, la conformazione come ricavata da DTM e quella semplificata.

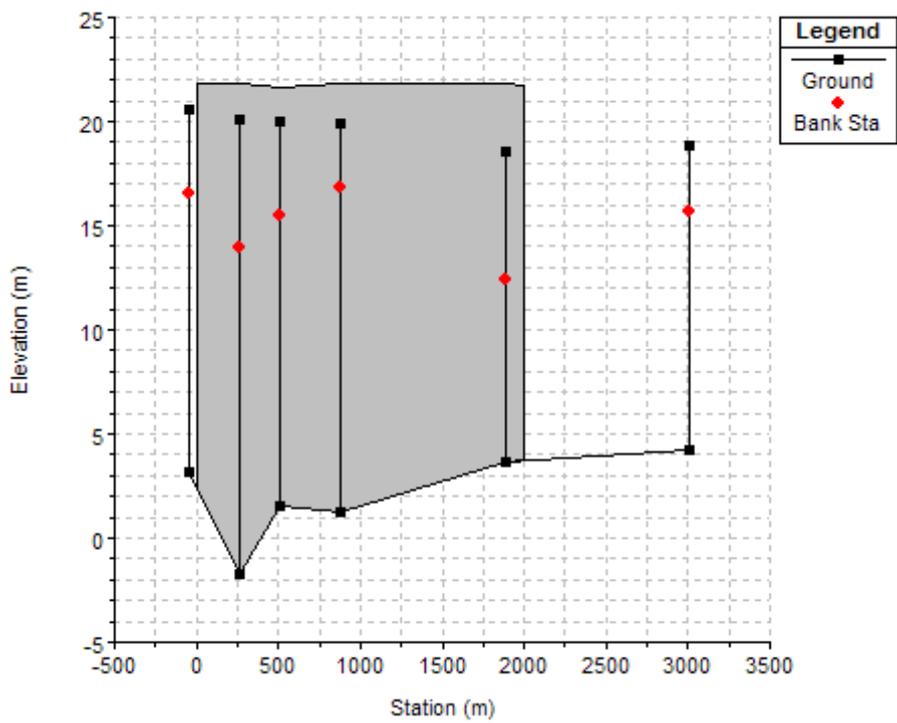
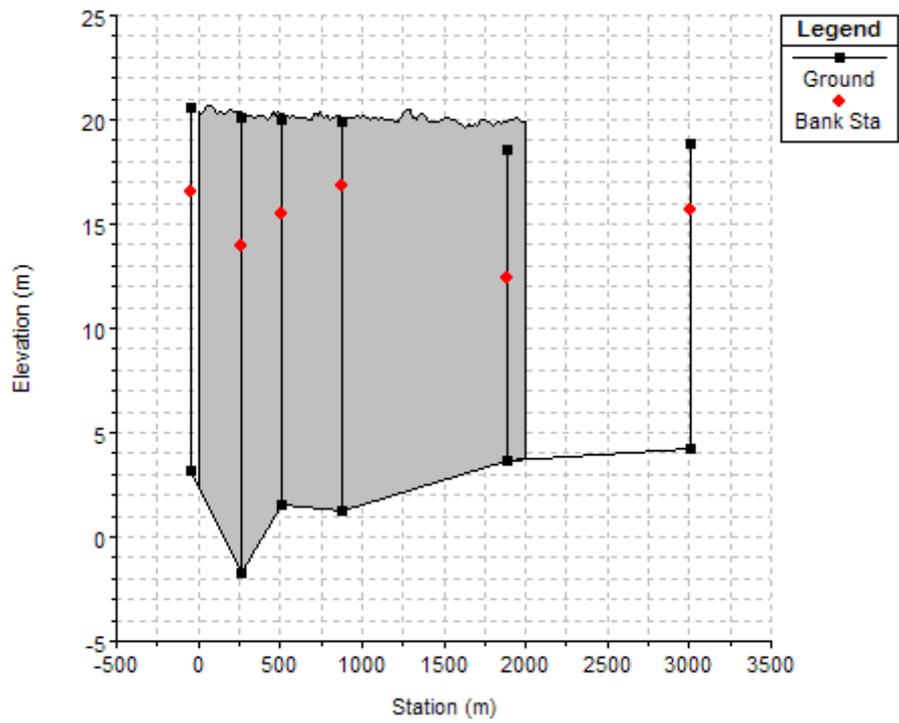


Fig. 4.9: semplificazione dell'andamento delle quote per l'argine 24500, ramo S46_S54A

4.5 Configurazioni geometriche alternative: criterio omogeneo lungo l'asta fluviale

Come anticipato nel paragrafo precedente, le quote degli argini golenali sono state ricavate sottraendo una certa quantità dalle quote degli argini maestri, in modo tale da ottenere una semplificazione nella rappresentazione delle *Lateral Structure* in HEC- RAS (v. Hydrologic Engineering Center “HEC–RAS River Analysis System User’s Manual”, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California, 2002). Il criterio previsto nella definizione di queste nuove geometrie è omogeneo, ovvero si prevede il medesimo innalzamento per tutte le arginature golenali dell'asta medio-inferiore del Fiume Po.

Nel seguente elenco vengono illustrate le nuove configurazioni e la Config E utilizzata nelle simulazioni dello studio dell'AdB-Po, preso come riferimento per questo elaborato.

- *Config. E*: quota della sommità degli argini golenali invariata rispetto alla Config. C in tutti i casi in cui la differenza di quota tra l'argine golenale ed il corrispondente argine maestro è inferiore a 1 m; nei casi restanti, sommità degli argini golenali innalzata rispetto alla Config. C fino ad avere una differenza in quota tra argini golenali e argini maestri pari a 1m;
- *Config. -1m*: quota della sommità degli argini golenali ribassata di 1 m rispetto alla quota degli argini maestri;
- *Config. -0.75m*: quota della sommità degli argini golenali ribassata di 0.75 m rispetto alla quota degli argini maestri;
- *Config. -0.5m*: quota della sommità degli argini golenali ribassata di 0.5 m rispetto alla quota degli argini maestri;
- *Config. -0.25m*: quota della sommità degli argini golenali ribassata di 0.25 m rispetto alla quota degli argini maestri;

- *Config. -0m*: quota della sommità degli argini golenali ribassata di 0 m rispetto alla quota degli argini maestri, cioè altezza degli argini golenali pari a quella degli argini maestri.

Si noti come la *Config. E* e la *Config. -1m* risultino decisamente simili, l'unica cosa che cambia è il dato di partenza, ovvero, la *Config. E* nasce dall'elaborazione dei risultati del DTM e la *Config. -1m* deriva dalla sottrazione di un metro dai valori di quota degli argini maestri. Per poter validare i dati della nuova geometria (*Config.-1m*) è quindi necessario che i risultati delle due simulazioni non siano troppo diversi. In Figura 4.10 e 4.11 sono rappresentati i profili di piena corrispondenti alle due geometrie interessate lungo tutta l'asta medio-inferiore del Fiume Po per entrambe le onde in ingresso (ONDA2 e TR200).

ONDA2

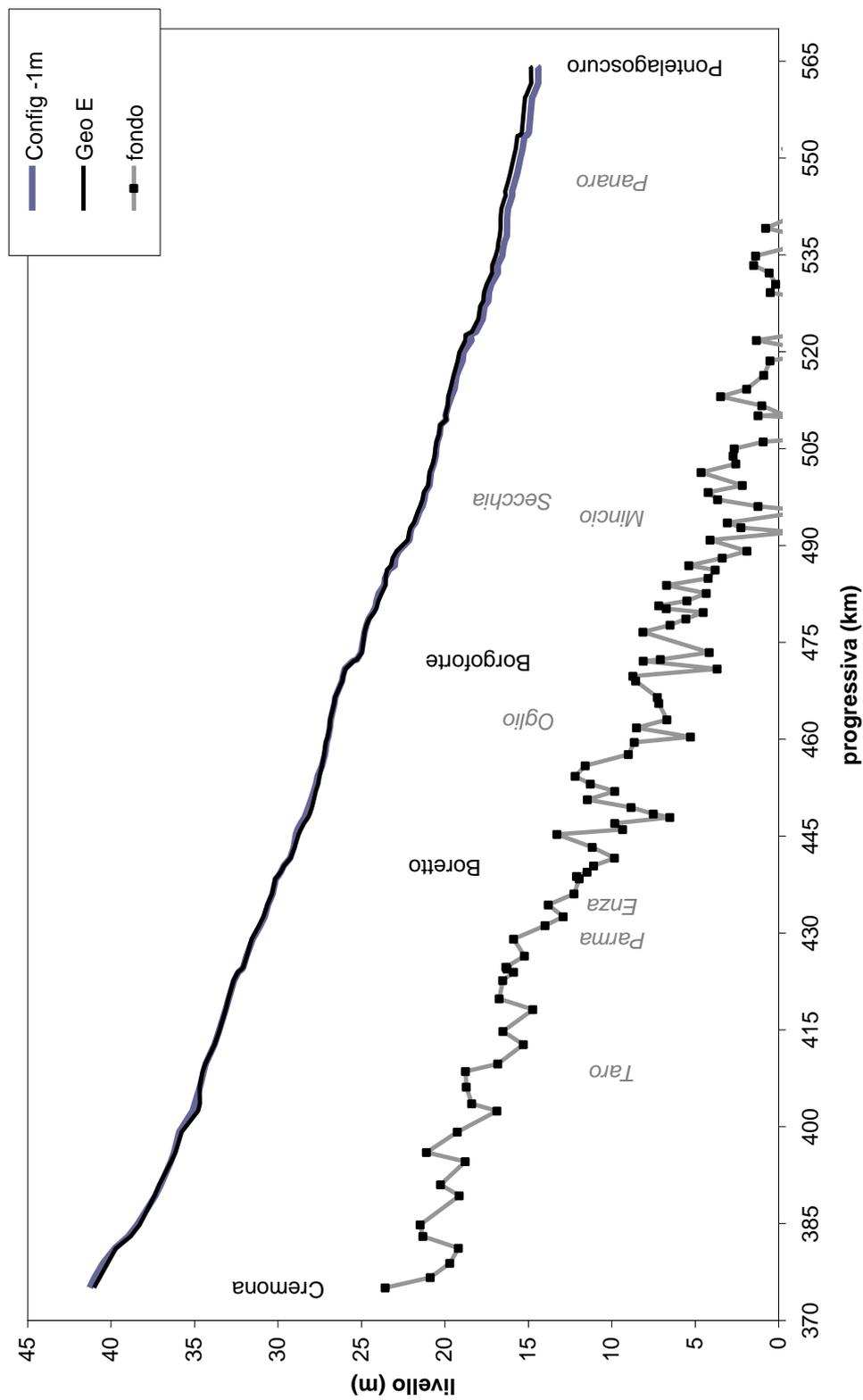


Figura 4.10: confronto fra i livelli corrispondenti alla *Config. E* e alla *Config. -1m* lungo tutta l'asta fluviale interessata considerando ONDA2 come sollecitazione idrologica

TR200

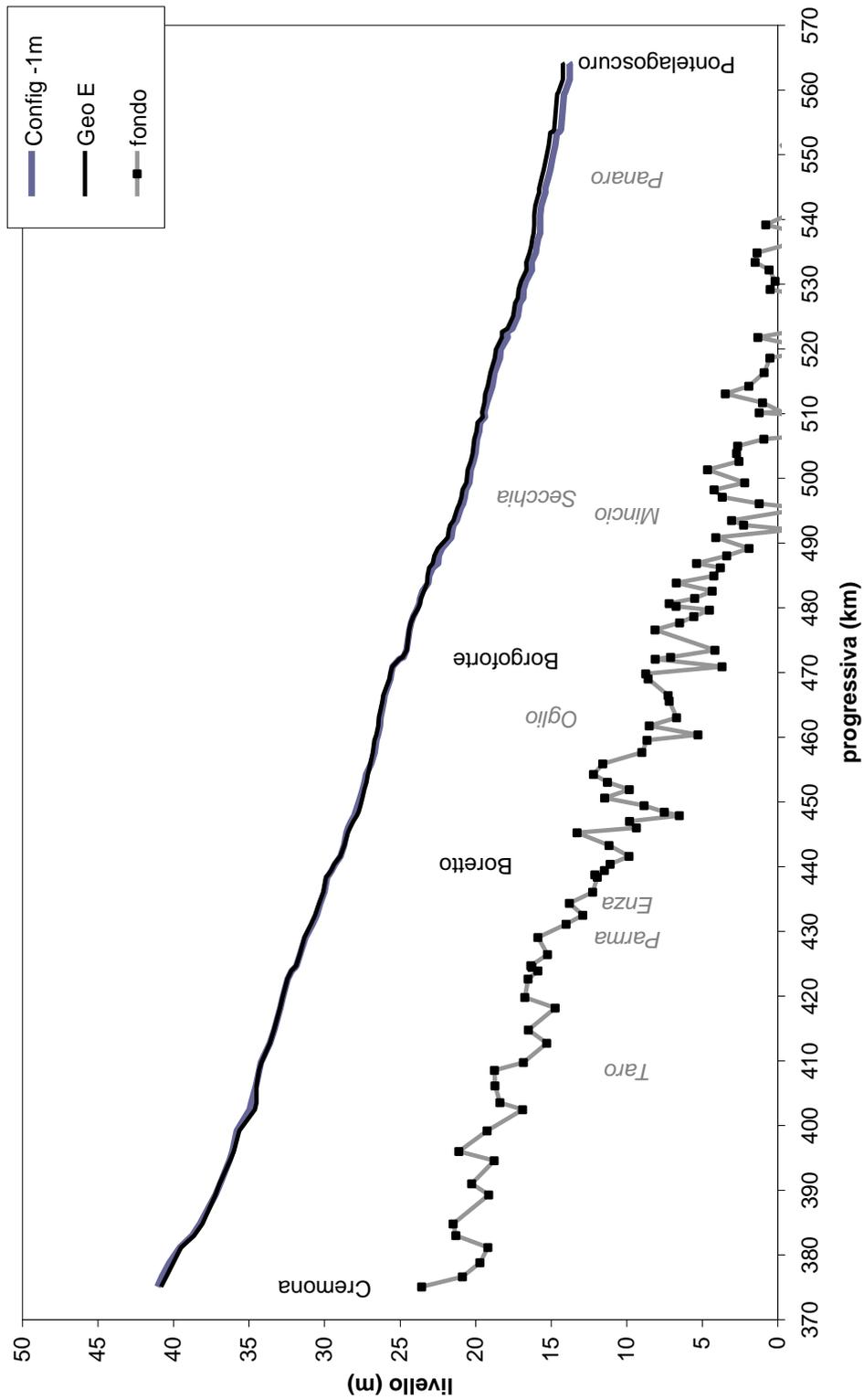


Figura 4.11: confronto fra i livelli corrispondenti alla *Config. E* e alla *Config. -1m* lungo tutta l'asta fluviale interessata considerando TR200 come sollecitazione idrologica

Dai grafici sopra riportati emerge come le soluzioni siano del tutto simili, viene così confermata la bontà dei dati utilizzati nella creazione delle nuove configurazioni geometriche. Il fatto che le due curve si discostino l'una dall'altra verso la parte finale può significare che, nella semplificazione delle arginature, ci sia stato anche un piccolo rialzo; infatti, alzando di poco gli argini golenali, sono aumentati i volumi trattenuti nelle golene difese quindi è calato il livello nell'ultimo tratto (da Revere–Ostiglia a Pontelagoscuro), dove le golene difese sono praticamente inesistenti. Questo piccolo scostamento, tuttavia, non inficia sulla bontà dei dati utilizzati.

Dopo aver dimostrato che Config. E e Config. -1m provocano gli stessi risultati, si vuole ora confrontare la Config. -1m con le altre descritte precedentemente in questo paragrafo. L'idea di base è quella di aumentare la quota delle arginature golenali al fine di incrementare i volumi d'acqua accumulabili nelle golene difese; infatti, maggiore è la quantità d'acqua trattenuta, minore dovrebbe essere il livello che si verifica nel tratto d'interesse (da Revere–Ostiglia a Pontelagoscuro, circa 55 km).

4.5.1 Criterio omogeneo lungo l'asta fluviale: presentazione dei risultati

Per un'adeguata analisi dei risultati, si riportano, per ciascuna onda, tre tipi di grafici:

- *livelli*: in questo grafico sono rappresentati i livelli delle 5 configurazioni di interesse nel tratto finale del corso d'acqua, dove non ci sono golene difese (da Revere–Ostiglia a Pontelagoscuro, circa 55 km); è stato considerato questo tronco poiché, data la posizione nella parte terminale del fiume, è quello che trae maggior vantaggio da una corretta gestione delle golene chiuse poste a monte di esso;
- *beneficio*: i grafici del beneficio rappresentano per ogni configurazione la diminuzione o l'aumento di livello rispetto alla Config -1m nel tratto di interesse; il beneficio si ricava sottraendo il valore dei livelli ottenuti dalle nuove geometrie al valore del livello ottenuto dalla Config -1m. Come riferimento è stata scelta la Config -1m poiché essa rappresenta il criterio adottato a livello prescrittivo dall'Autorità di Bacino del Po in base al quale gli argini golenali debbano avere quote sommitali sempre inferiori di almeno un metro rispetto a quelle degli argini maestri;
- *idrogrammi*: in questi grafici è rappresentata l'onda di piena in termini di portata nella sezione finale del corso d'acqua (Pontelagoscuro) per ogni geometria considerata; inoltre è stata inserita anche l'onda in ingresso a Cremona, in questo modo emerge l'effetto di laminazione causato dall'invaso dell'acqua nelle golene chiuse.

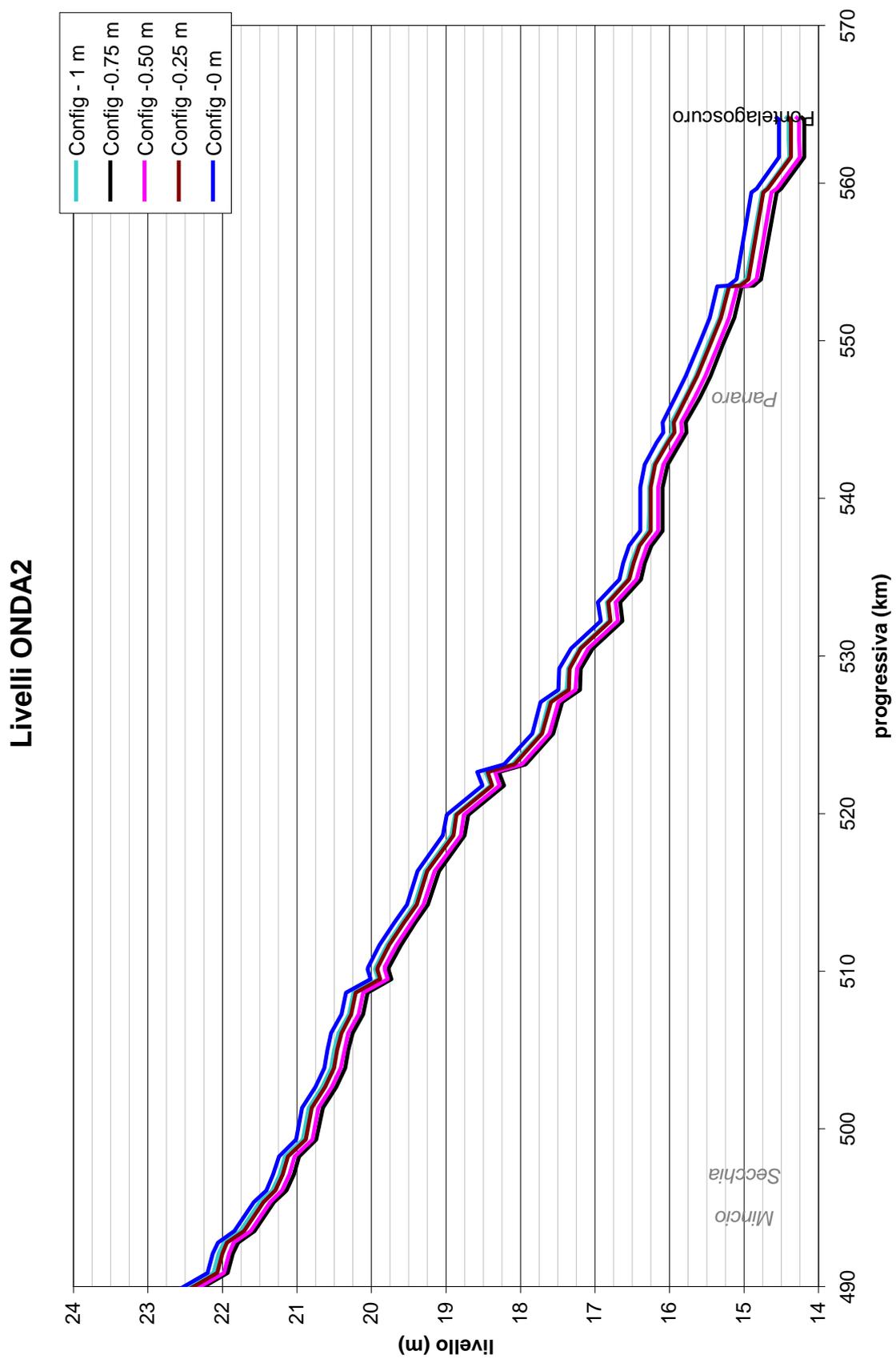


Fig 4.12: involucro dei massimi livelli idrici con riferimento alla sollecitazione idrologica ONDA2

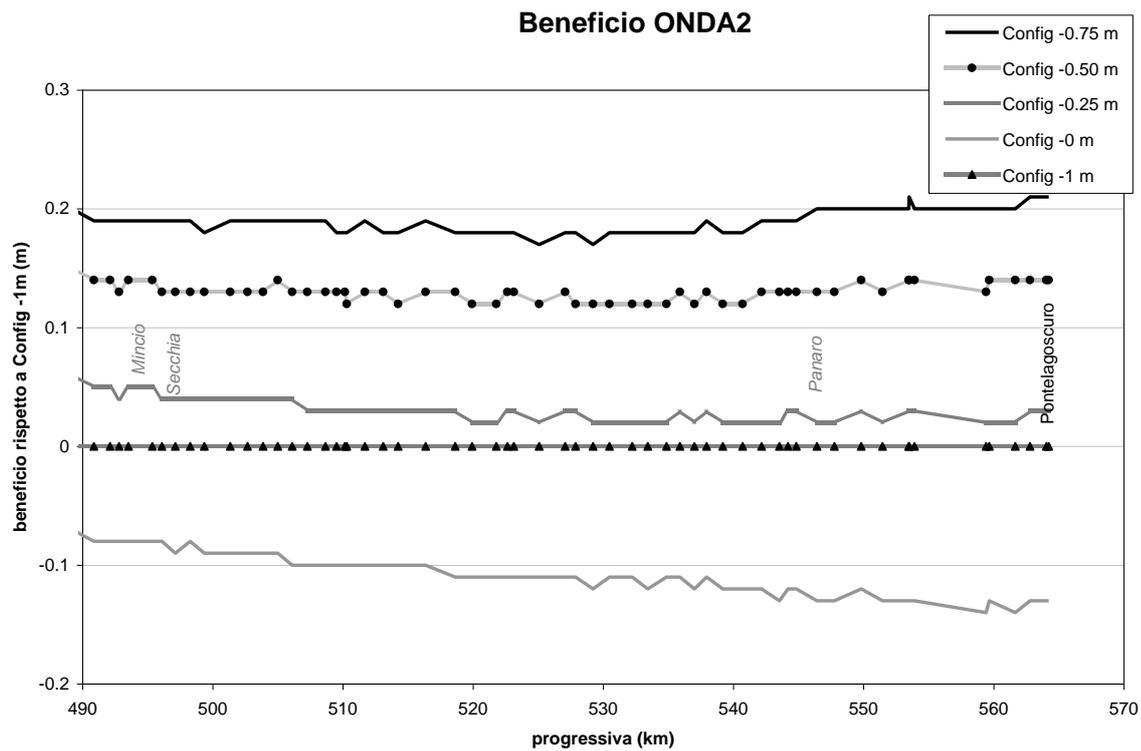


Fig. 4.13: beneficio rispetto alla Config -1m con riferimento alla sollecitazione idrologica ONDA2

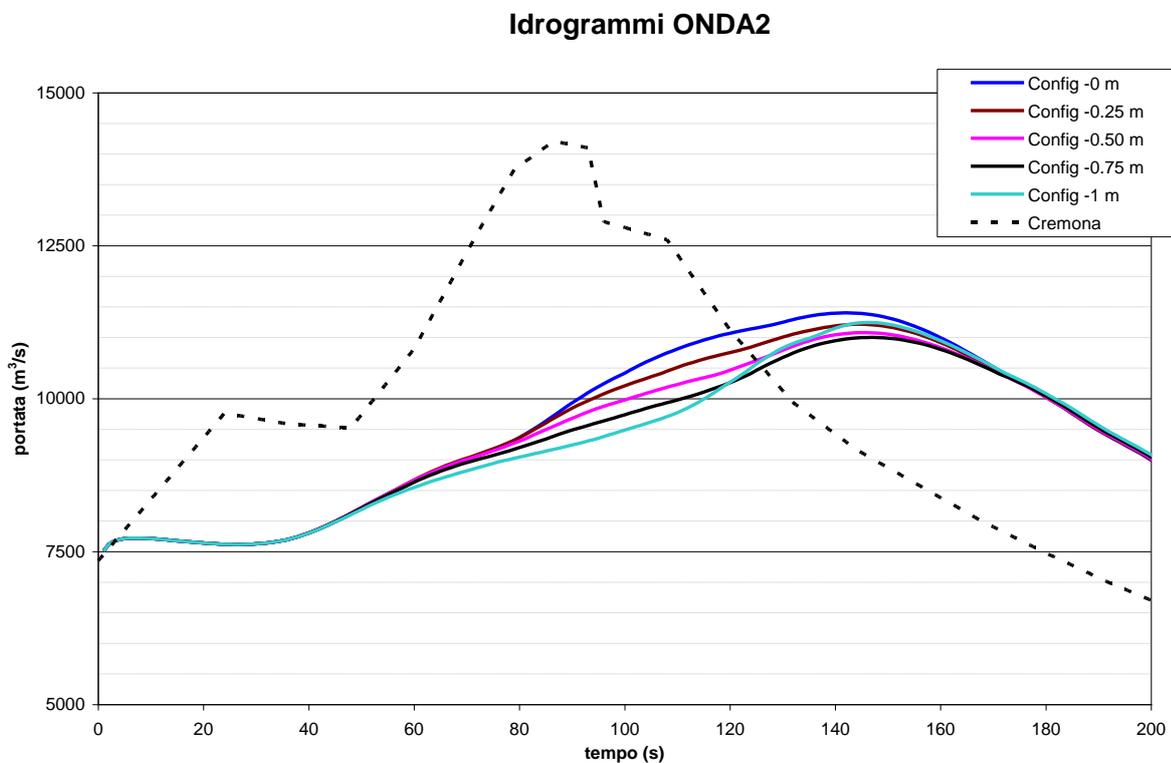


Fig. 4.14: ideogrammi di piena con riferimento alla sollecitazione idrologica ONDA2

Livelli TR200

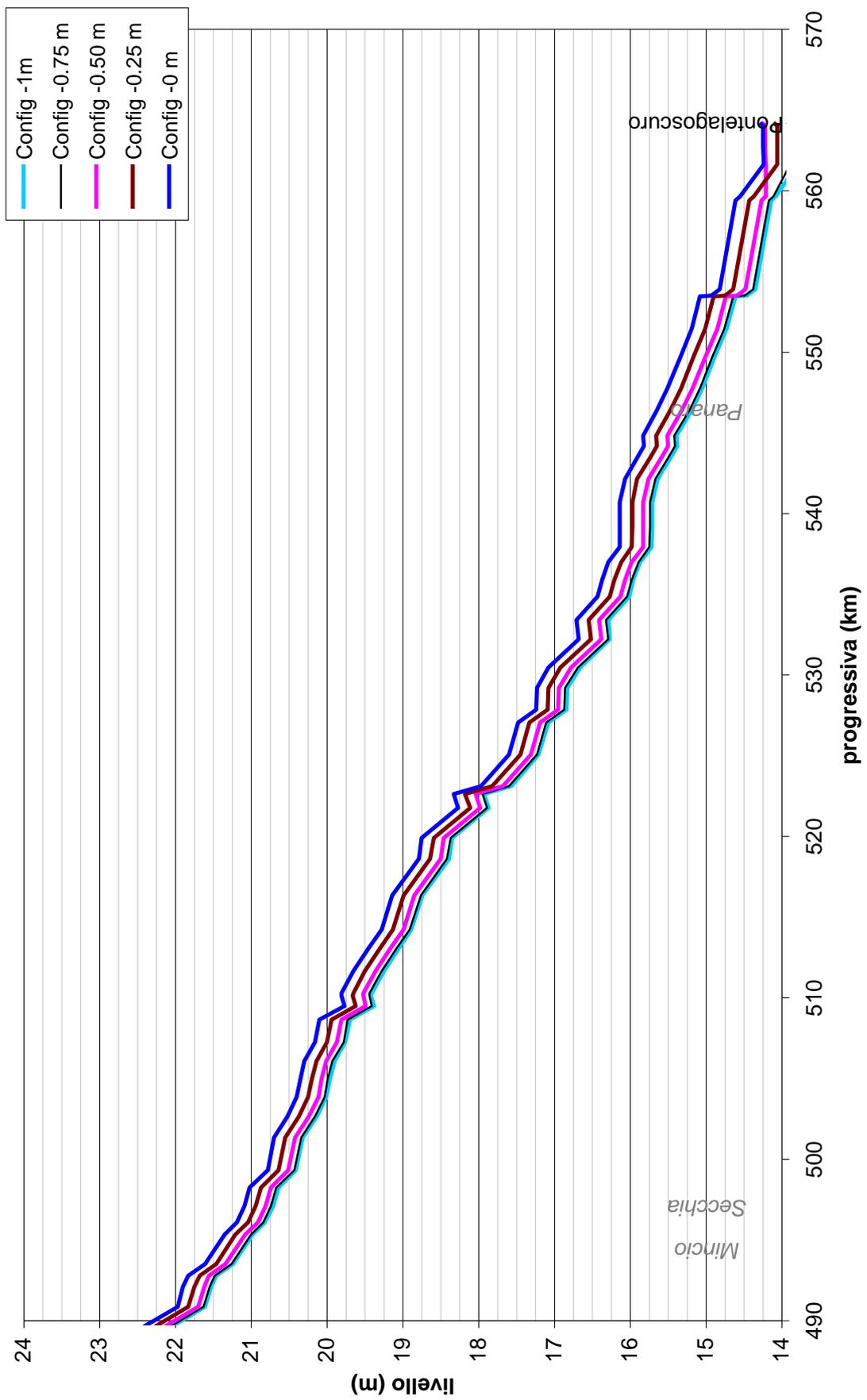


Fig 4.15: inviluppo dei massimi livelli idrici con riferimento alla sollecitazione idrologica TR200

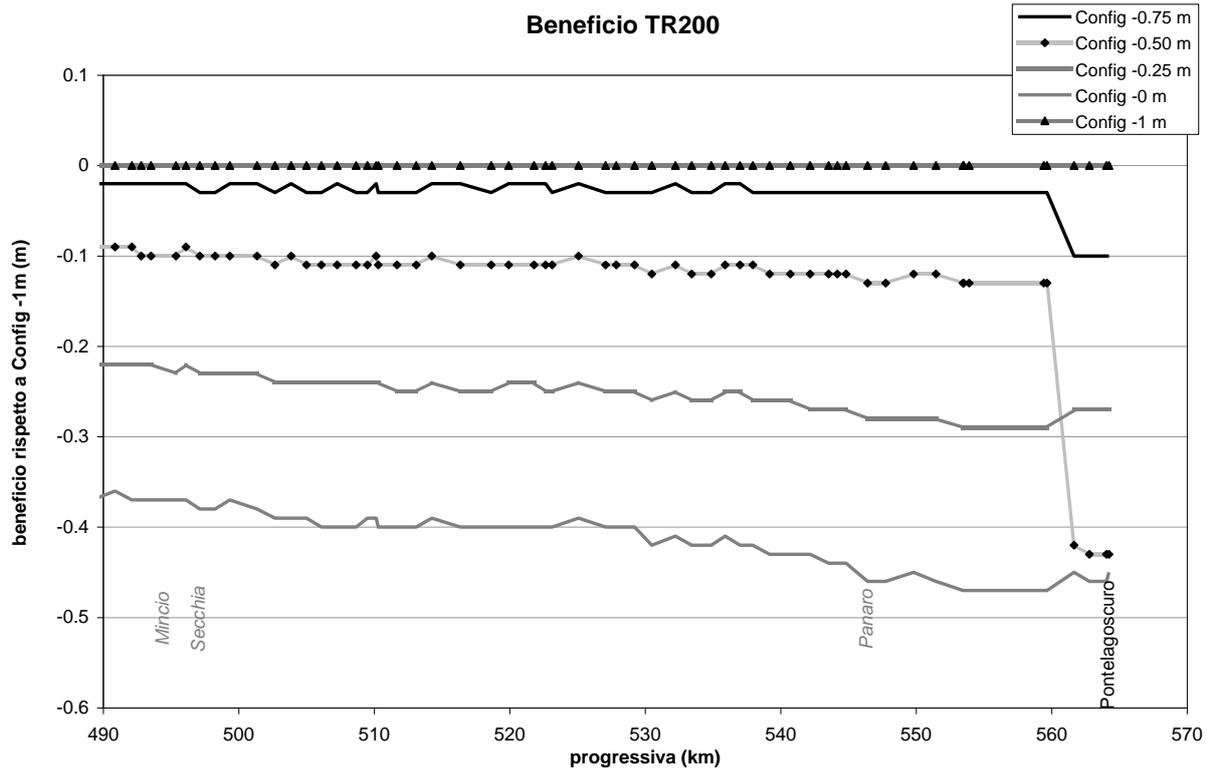


Fig. 4.16: beneficio rispetto alla Config -1m con riferimento alla sollecitazione idrologica TR200

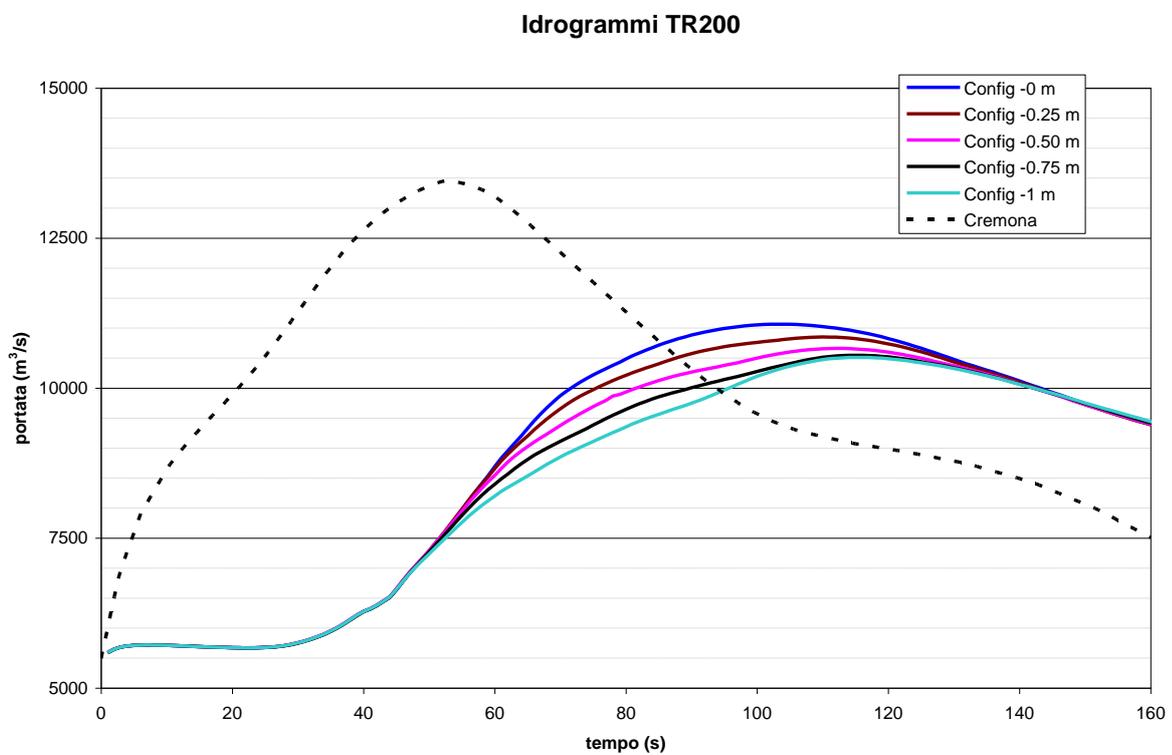


Fig. 4.17: ideogrammi di piena con riferimento alla sollecitazione idrologica TR200

Livelli TR500

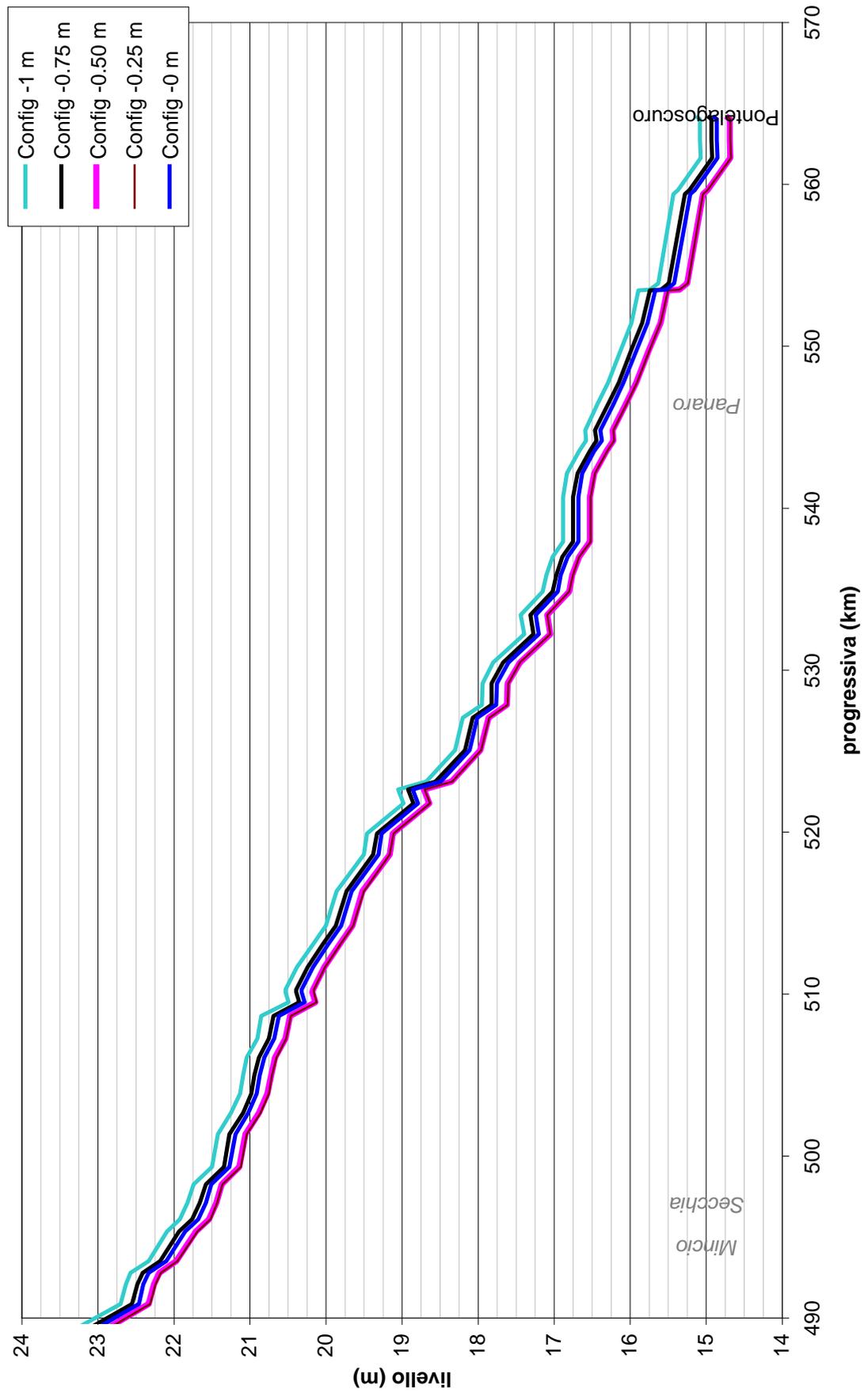


Fig 4.18: inviluppo dei massimi livelli idrici con riferimento alla sollecitazione idrologica TR500

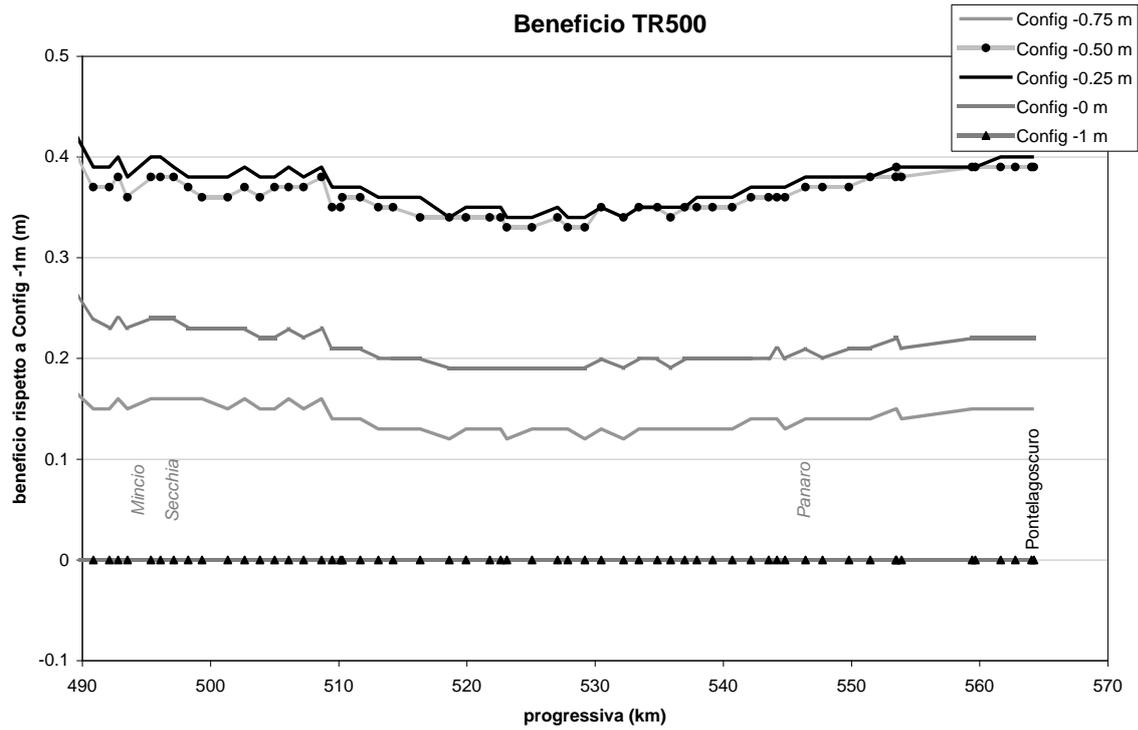


Fig. 4.19: beneficio rispetto alla Config -1m con riferimento alla sollecitazione idrologica TR500

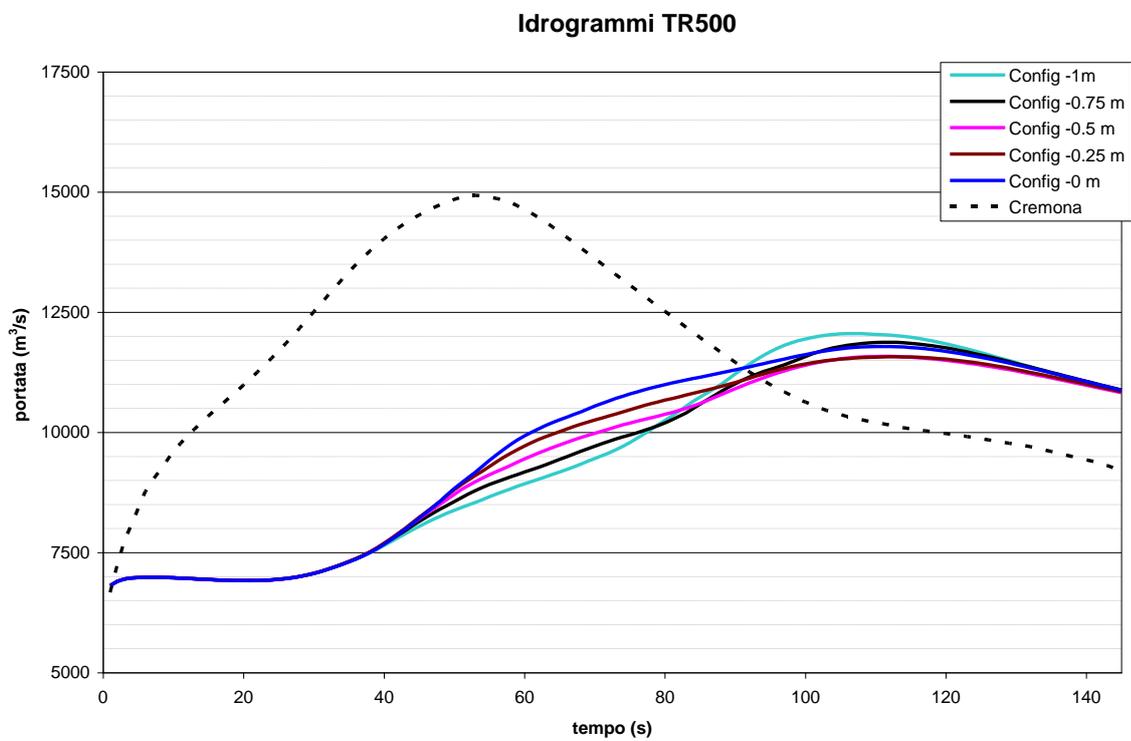


Fig. 4.20: idrogrammi di piena con riferimento alla sollecitazione idrologica TR500

4.5.2 Criterio omogeneo lungo l'asta fluviale: discussione dei risultati

ONDA2

Dai risultati ottenuti emerge che la configurazione geometrica migliore per la sollecitazione idrologica ONDA2 è Config -0.75m; essa, infatti, minimizza il livello nel tratto di interesse (Figura 4.12), massimizza il beneficio (Figura 4.13) e l'effetto di laminazione (Figura 4.14). In particolare, si ha un abbassamento medio rispetto a Config -1m di 0.19 m e massimo di 0.21 m (nel tratto di interesse); inoltre la riduzione di portata al colmo rispetto all'onda in ingresso è di circa 3173 m³/s, cioè 244 m³/s in più rispetto alla laminazione che avviene nella Config -1m (2929 m³/s).

La geometria che genera minor beneficio è Config -0m, ovvero argini golenali pari a quelli maestri; in questo caso si verifica un innalzamento medio rispetto a Config -1m di 0.11 m e massimo di 0.14 m (nel tratto finale), l'effetto di laminazione è di 2771 m³/s, 158 m³/s in meno rispetto Config -1m (2929 m³/s).

Le altre configurazioni presentano dei risultati intermedi che, in termini di beneficio, si collocano nel modo seguente (da beneficio maggiore a minore): Config -0.75m, Config -0.50m, Config -0.25m, Config -1m, Config -0m. Questo andamento è riscontrabile in ogni grafico sopra esposto.

Dalla precedente trattazione emerge un risultato interessante, infatti, all'aumentare della quota delle arginature golenali, aumenta il volume accumulabile nelle golene difese, di conseguenza il livello a valle si dovrebbe abbassare; tuttavia dai risultati ottenuti si ottiene che configurazioni con argini golenali maggiorati alzano il livello e le portate nel tratto di valle. L'incongruenza nasce dal momento in cui non si considera un passaggio fondamentale nella dinamica del fenomeno, cioè la possibilità o meno dell'invaso delle golene difese; infatti, alzando la quota delle arginature golenali, aumenta l'altezza di sfioro, quindi non è scontato che l'acqua riesca ad entrare nelle aree di accumulo. In particolare, all'aumentare della quota degli argini golenali diminuisce la probabilità d'invaso delle golene difese.

Partendo da questo presupposto è stata condotta un'analisi sulle golene chiuse, in cui sono state individuate quelle vuote e quelle piene per ogni geometria considerata. I risultati sono riportati in Tabella 18.

ONDA2	Numero golene invasate	Numero golene vuote
Config -1m	51	17
Config -0.75 m	47	21
Config -0.50 m	45	23
Config -0.25 m	39	29
Config -0 m	36	32

Tabella 18: numero di golene invasate e vuote considerando come sollecitazione idrologica ONDA2 (Config. -0.75m)

La tabella sopra riportata illustra come il numero di golene vuote sia elevato, anche nel caso più favorevole (Config -0.75m) e come aumenta incrementando la quota delle arginature golenali. Si noti il legame di proporzionalità diretta fra il numero di golene vuote e l'aumento dei livelli nel tratto di valle; la Config -0.75m invasa 47 golene e ha il beneficio maggiore, la Config -0.50m invasa 45 golene e ha un beneficio intermedio, Config -0.25m invasa 39 golene e ha il beneficio minore. La ragione per cui Config -1m ha un beneficio basso pur invasando il maggior numero di golene va ricercata nell'altro importante fenomeno che interessa l'innalzamento delle arginature golenali, cioè l'aumento del volume accumulabile nelle golene stesse; la geometria Config -1m, a causa della quota più bassa degli argini golenali, non permette di stoccare un volume d'acqua tale da aumentare il beneficio nel tratto di valle. Le golene sono invasate, ma riescono ad immagazzinare un volume minore di acqua, quindi il livello a valle aumenta.

Dall'analisi è ulteriormente emerso che le golene vuote sono in gran parte situate nel tratto a valle del corso d'acqua, ciò si verifica poiché in questo tratto l'onda è già stata laminata, quindi difficilmente riuscirà a sfiorare ed invasare le golene difese. In Figura 4.21 sono rappresentate le golene invasate (colorate di azzurro) e quelle vuote (colorate di rosso), nel caso della geometria Config -0.75m sollecitata con ONDA2.

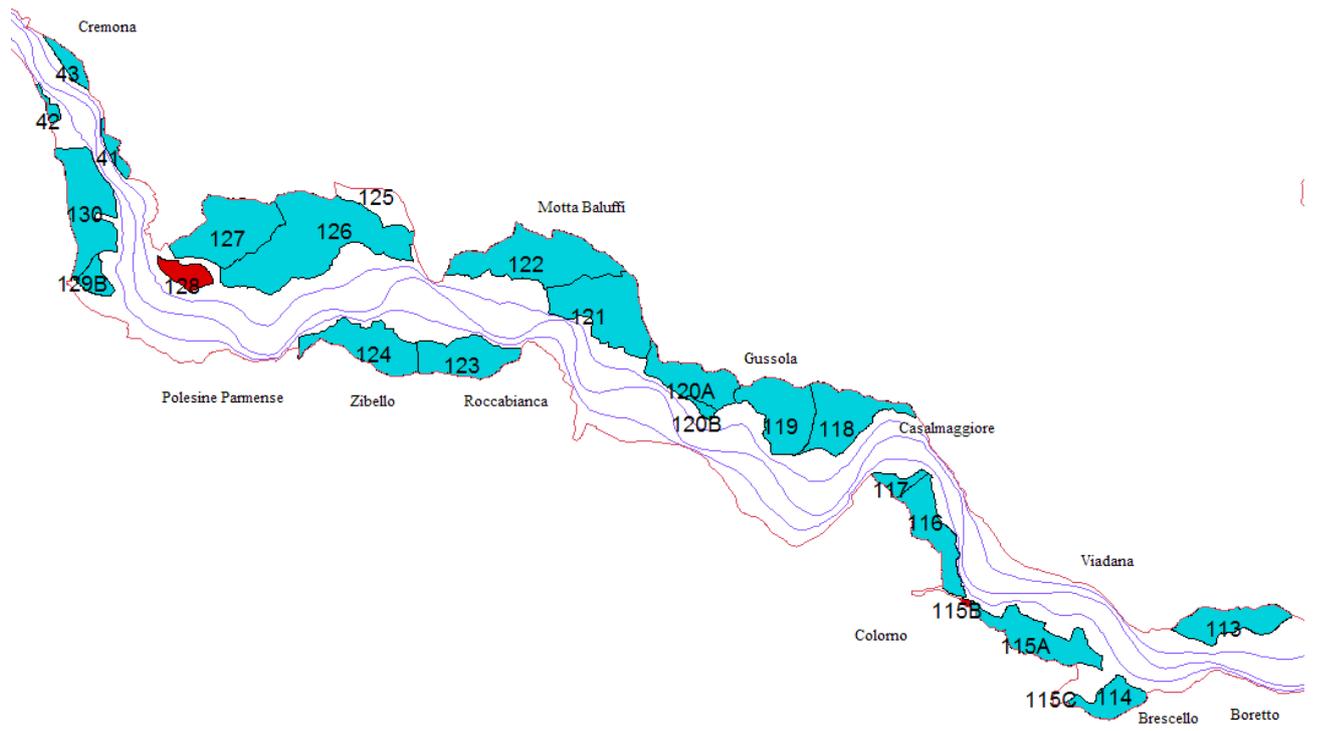


Fig. 4.21a: golene vuote e golene invase nel tronco di monte dell'asta interessata

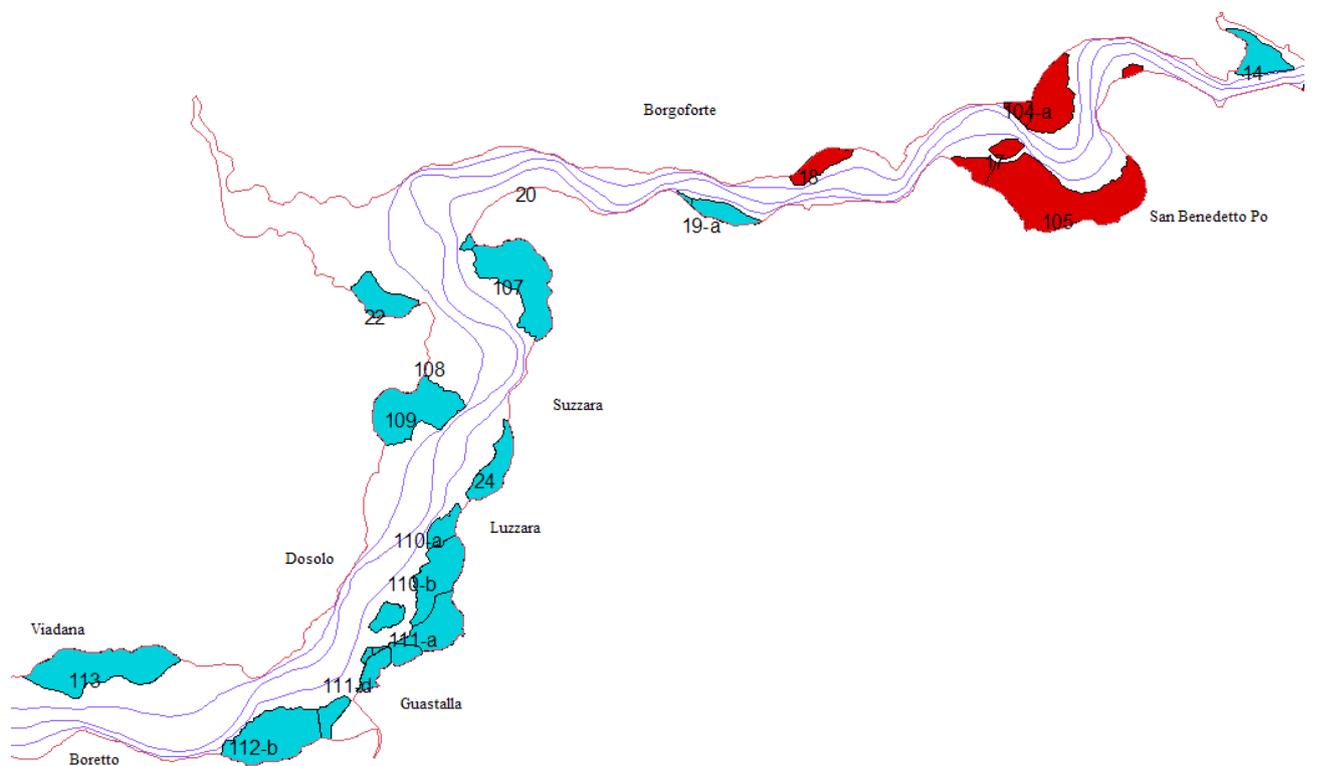


Fig. 4.21b: golene vuote e golene invase nel tronco intermedio dell'asta interessata

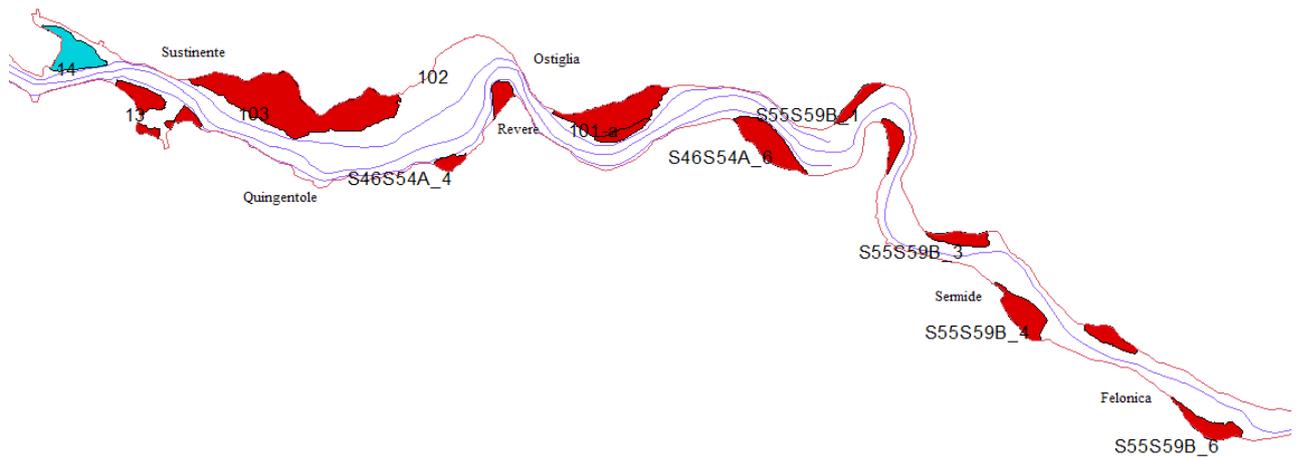


Fig. 4.21c: golene vuote e golene invase nel tronco di valle dell'asta interessata

Riassumendo, dalle simulazioni emerge che, alzando gli argini golenali, non sempre il livello nel tratto di valle diminuisce, poiché man mano che gli argini vengono alzati sempre meno golene riescono a essere invase. Il fatto che alcune golene non si riempiono provoca un aumento del livello nel tratto a valle.

TR200

Dai risultati ottenuti emerge che la configurazione geometrica migliore per TR200 è Config -1m; essa, infatti, minimizza il livello nel tratto di interesse (Figura 4.15), massimizza il beneficio (Figura 4.16) e l'effetto di laminazione (Figura 4.17). Dal grafico in Figura 4.16 si nota come tutte le altre configurazioni generino un beneficio negativo, cioè un'innalzamento del livello nel tratto di valle; gli stessi risultati in termini di portata emergono da Figura 4.17. La riduzione di portata al colmo (differenza fra portata in ingresso a Cremona e portata in uscita a Pontelagoscuro), ottenuta con Config -1m, è di circa 2933 m³/s.

La geometria che genera il minor beneficio è Config -0m, ovvero argini golenali pari a quelli maestri; in questo caso si verifica un innalzamento medio rispetto a Config -1m di 0.41 m e massimo di 0.47 m, l'effetto di laminazione è di 2379 m³/s, 554 m³/s in più rispetto Config -1m (2933 m³/s).

Le altre configurazioni presentano dei risultati intermedi che, in termini di beneficio, si collocano nel modo seguente (da beneficio maggiore a minore): Config -1m, Config -0.75m, Config -0.50m, Config -0.25m, Config -0m.

Il numero di golene vuote e il numero di golene invase è riportato in Tabella 19; si noti come, anche in questo caso, vi sia proporzionalità diretta fra il numero di golene vuote e la perdita di beneficio.

TR200	Numero golene invase	Numero golene vuote
Config -1m	46	22
Config -0.75 m	41	27
Config -0.50 m	38	30
Config -0.25 m	34	34
Config -0 m	26	42

Tabella 19: numero di golene invase e vuote considerando come sollecitazione idrologica TR200 (Config...)

In questa trattazione valgono le stesse considerazioni fatte per ONDA2, tuttavia, per l'onda con tempo di ritorno duecentennale, la configurazione che genera il beneficio massimo è Config -1m, invece di Config -0.75m. I livelli minimi si ottengono quindi con una quota delle arginature golenali più bassa di un metro rispetto a quella degli argini maestri. La ragione di questa differenza è nella forma diversa delle due onde in ingresso; infatti TR200 presenta un colmo e un'ampiezza minore (Figura 4.22).

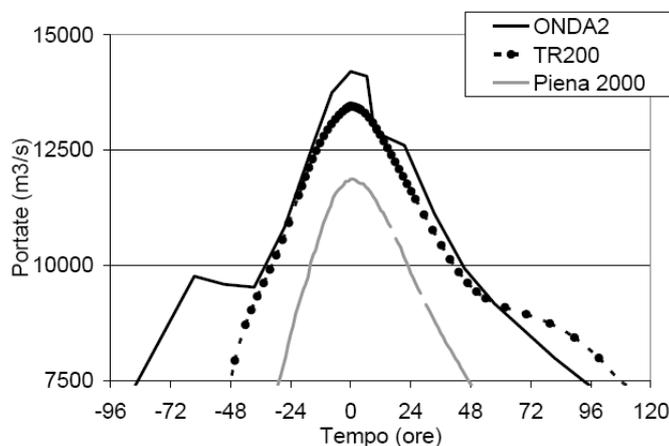


Fig 4.22: confronto fra gli idrogrammi considerati nel presente elaborato

Essendo ONDA2 più intensa, trae maggior beneficio dall'innalzamento delle arginature (Config -0.75m), poiché l'acqua riesce a sfiorare e contemporaneamente aumentano i volumi invasabili; al contrario per l'onda TR200 Config -0.75m non genera un beneficio maggiore, poiché l'acqua non riesce ad entrare nelle golene difese.

TR500

Dai risultati ottenuti emerge che la configurazione geometrica migliore per l'onda con tempo di ritorno cinquecentennale è Config -0.25m; essa, infatti, minimizza il livello nel tratto di interesse (Figura 4.18), massimizza il beneficio (Figura 4.19) e l'effetto di laminazione (Figura 4.20). In particolare si ha un abbassamento medio rispetto a Config -1m di 0.37m e massimo di 0.40m (nel tratto di interesse); inoltre la riduzione di portata al colmo rispetto all'onda in ingresso è di circa 3355 m³/s, cioè 479 m³/s in più rispetto alla laminazione che avviene nella Config -1m (2876 m³/s).

La geometria che genera minor beneficio è Config -1m, quindi, se si attua la prescrizione dell'AbB-Po di portare gli argini golenali alla Config -1m, nel caso in cui il sistema sia sollecitato con un'onda cinquecentennale non si ottiene alcun beneficio.

Le altre configurazioni presentano dei risultati intermedi che, in termini di beneficio, si collocano nel modo seguente (da beneficio maggiore a minore): Config -0.25m, Config -0.50m, Config -0m, Config -0.75m, Config -1m.

Il numero di golene vuote e il numero di golene invase è riportato in Tabella 20.

TR200	Numero golene invase	Numero golene vuote
Config -1m	60	8
Config -0.75 m	52	16
Config -0.50 m	48	20
Config -0.25 m	46	22
Config -0 m	43	25

Tabella 20: numero di golene invase e vuote considerando come sollecitazione idrologica TR500

Dalla Tabella 20 emerge che, per l'onda TR500, si perde il rapporto di linearità fra il numero di golene invase e l'aumento del beneficio; per esempio, nella Config -0.75m si riempiono più

golene rispetto a Config -0.25m, ma il beneficio è minore. Come accennato precedentemente, è importante riuscire a invadere tutte le golene, ma è anche necessario che queste riescano a contenere un volume elevato d'acqua. Nella geometria Config -1m, anche se vengono riempite quasi tutte le golene, il beneficio ottenuto è basso, perché i volumi trattenuti sono limitati, essendo la quota delle arginature golenali minore rispetto alle altre configurazioni. Al contrario, nella Config -0.25m il numero di golene invadate è minore, ma ognuna trattiene un volume d'acqua maggiore rispetto a Config -1m, perché le arginature golenali sono rialzate di 75 cm.

Da Figura 4.18 si può notare che Config -0.25m e Config -0.50m generano dei livelli nel tratto di interesse molto simili, è il caso in cui si ha una sorta di bilanciamento fra i due fenomeni che regolano le dinamiche del processo: nella Config -0.25m il numero di golene invadate è minore ma contengono un volume maggiore d'acqua, nella Config -0.50m il numero di golene invadate è maggiore ma il volume d'acqua in esse contenuto è minore. Di conseguenza il risultato finale in termini di livello, beneficio e portata rimane invariato. Ragionando in questo modo è possibile ottenere una spiegazione riguardo ai risultati, a prima vista un po' bizzarri, delle simulazioni aventi come sollecitazioni idrologica in ingresso l'onda cinquecentennale.

Contrariamente alle altre due sollecitazioni idrologiche, nel caso dell'onda TR500 la configurazione che massimizza il beneficio è Config -0.25m. In questa geometria gli argini golenali sono posti a una quota piuttosto elevata, di conseguenza aumentano i volumi accumulabili; inoltre, essendo l'onda molto alta e ampia, la maggior parte degli sfioratori si attiva e le golene vengono invadate.

Dalle constatazioni fatte fin'ora emerge che, modificando la quota arginale, si verificano due fenomeni: l'aumento dei volumi invasabili e il possibile non invaso delle golene difese. Per minimizzare il livello nel tratto di valle è necessario che ogni golena difesa contenga la quantità massima d'acqua e contemporaneamente riesca ad invasarsi; il primo fenomeno avviene se si aumenta la quota degli argini e il secondo si verifica con più probabilità al diminuire di essa. Per

ogni golena sarà quindi necessario trovare un'altezza ottimale degli argini golenali. Da questo presupposto si evince che cercare l'altezza ottimale degli argini golenali attraverso un criterio omogeneo (uguale abbassamento da argini maestri per ogni argine golenale) è un approccio che non considera un elemento fondamentale nella dinamica del processo: l'invasamento o meno delle golene difese. Nel paragrafo successivo viene descritta una possibile metodologia di ricerca dell'altezza ottimale di ogni sfioratore, considerando anche la necessità di invasare il maggior numero di golene chiuse.

4.6 Configurazioni geometriche alternative: criterio differenziato lungo l'asta fluviale

In questo paragrafo viene descritta la genesi di una nuova configurazione geometrica, dove il valore degli argini golenali si ottiene sottraendo diverse quantità dalla quota degli argini maestri; in particolare, per ogni golena è stato ricavato un opportuno valore dello sfioratore laterale (o argine golenale) che permette il riempimento dell'area di accumulo.

Si riportano ora alcune considerazioni importanti per capire come si è giunti alla creazione di questa nuova geometria:

- l'onda, mentre prosegue verso valle, si lamina, di conseguenza le arginature golenali nel tratto di valle devono essere ribassate per riuscire a far invasare l'acqua;
- a monte (dove l'onda è alta quindi riesce ad invasare) è necessario massimizzare i volumi trattenuti, quindi le arginature golenali dovranno essere piuttosto alte;
- dalle simulazioni precedenti emerge che le golene vuote sono poste nel tratto a valle (Figura 4.21), dove l'onda è ormai molto laminata.

Lo scopo della nuova configurazione, chiamata Config 12L, è quello di riuscire ad invasare tutte le golene e massimizzare i volumi contenuti in esse. Config 12L è stata ricavata prendendo come

riferimento la sollecitazione idrologica ONDA2 e il procedimento utilizzato per ottenere la quota ottimale delle arginature golenale è di tipo iterativo.

Partendo da Config -0.75m, geometria che genera il maggior beneficio con il criterio omogeneo, sono state individuate tutte le golene vuote o semi-vuote e sono stati ribassati di 25 cm gli sfioratori ad esse corrispondenti. Il criterio utilizzato per definire una golena vuota è il seguente: se la distanza fra l'altezza minima dello sfioratore e il pelo libero dell'acqua nell'area di accumulo è maggiore di 1m allora la golena è vuota, altrimenti è piena. Una volta ribassati gli argini golenali interessati è stata fatta una nuova simulazione con la Config -0.75m modificata; ottenuti i risultati, erano presenti ancora delle golene vuote (meno dell'iterazione precedente), di conseguenza sono stati abbassati di altri 25 cm gli argini golenali corrispondenti alle golene vuote. Poi è stata fatta una nuova simulazione con la Config -0.75m modificata due volte. Le iterazioni sono terminate solo quando tutte le golene sono state riempite e la configurazione geometrica corrispondente all'ultimo passaggio è Config 12L. In questo modo è stato raggiunto lo scopo della nuova geometria: riempire tutte le golene. I livelli emersi per ottenere questo risultato sono dodici: -0.75m, -1m, -1.5m, -1.75m, -2m, -2,25 m, -2.5m, -1.25m, -2.75m, -3m, -3.5m, -4m rispetto alle quote degli argini maestri. In Appendice si riportano i valori delle quote degli argini golenali della Config 12L, schematizzati in Hec-Ras come sfioratori laterali.

Config 12L è la configurazione geometrica che permette il completo invaso di tutte le golene se il sistema viene sollecitato con ONDA2, quindi è ovvio che sarà proprio quest'onda a trarne il maggior beneficio, tuttavia sono state fatte simulazioni anche con l'onda TR200 e TR500 (vedere paragrafo successivo).

4.6.1 Criterio differenziato lungo l'asta fluviale: presentazione dei risultati

Per un'adeguata analisi dei risultati, si riportano, per ciascuna onda, tre tipi di grafici:

- *livelli*: in questo grafico sono rappresentati i livelli della Config 12L confrontati con la configurazione geometrica migliore del criterio omogeneo e con Config -1m. La configurazione che crea maggior beneficio nel criterio omogeneo per ONDA2 è Config -0.75m, per TR200 è Config -1m, e per TR500 è Config -0.25m;
- *beneficio*: i grafici del beneficio rappresentano per ogni configurazione la diminuzione o l'aumento di livello rispetto alla Config -1m; il beneficio si ricava sottraendo il valore dei livelli ottenuti dalle nuove geometrie al valore del livello ottenuto della Config -1m. Come riferimento è stata scelta la Config -1m poiché essa rappresenta il criterio adottato a livello prescrittivo dall'Autorità di Bacino del Po in base al quale gli argini golenali debbano avere quote sommitali sempre inferiori di almeno un metro rispetto a quelle degli argini maestri;
- *idrogrammi*: in questi grafici è rappresentata l'onda di piena in termini di portata nella sezione finale del corso d'acqua (Pontelagoscuero) per *Config 12L*, per la configurazione geometrica migliore del criterio omogeneo e per *Config -1m*; inoltre è stata inserita anche l'onda in ingresso a Cremona, la quale evidenzia l'effetto di laminazione causato dall'invaso delle golene chiuse.

Livelli ONDA2

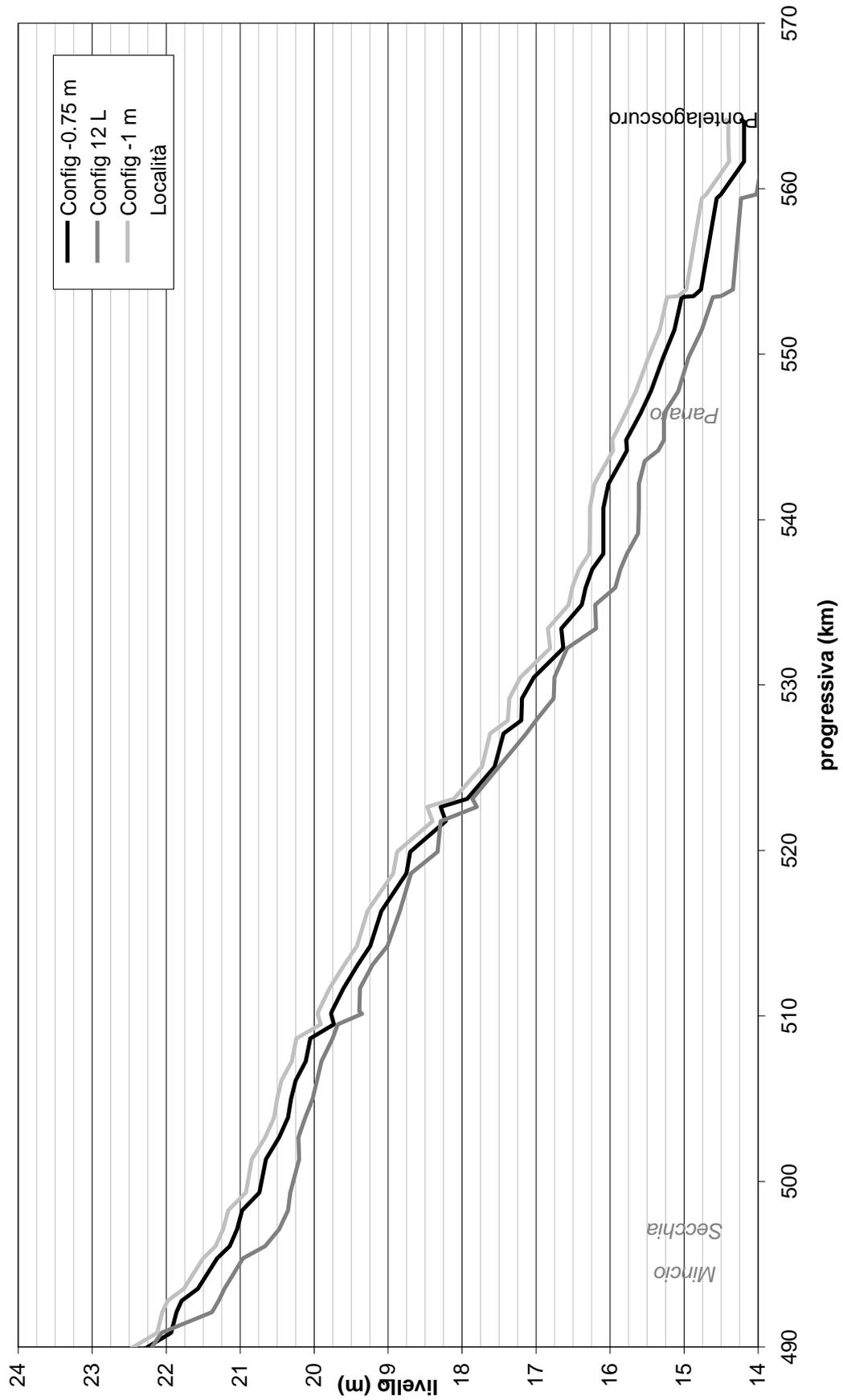


Fig. 4.23: involucre dei massimi livelli idrici con riferimento alla sollecitazione idrologica ONDA2

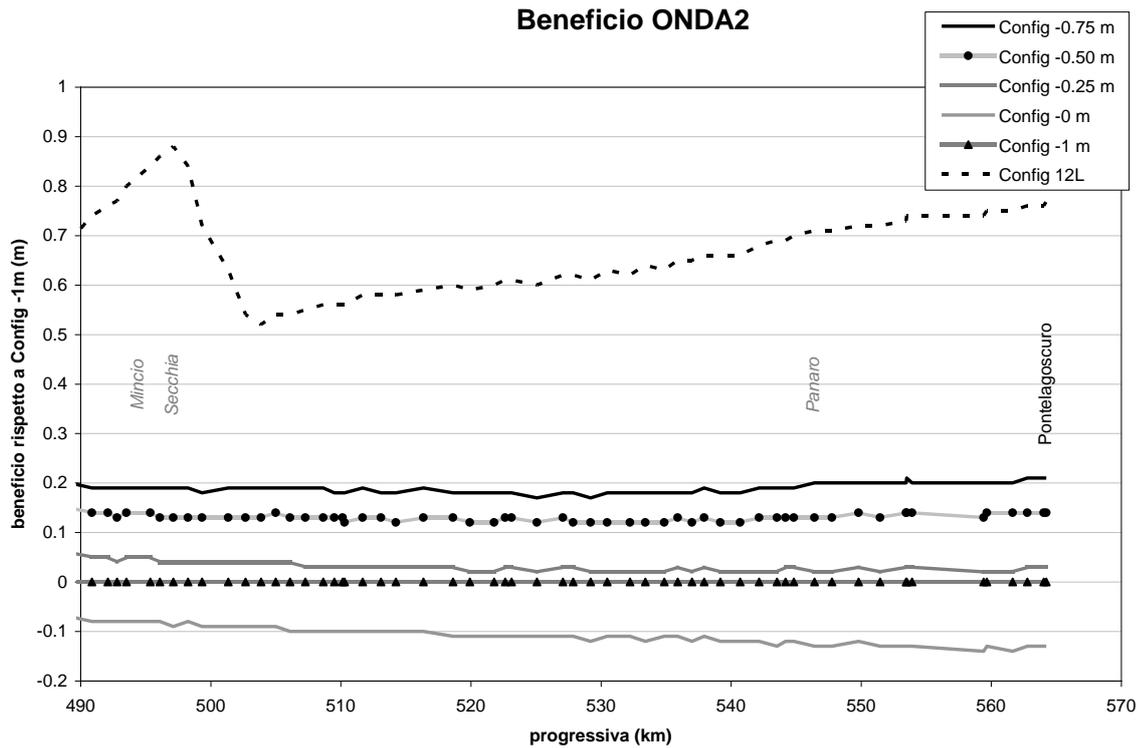


Fig. 4.24: beneficio rispetto alla Config -1m con riferimento alla sollecitazione idrologica ONDA2

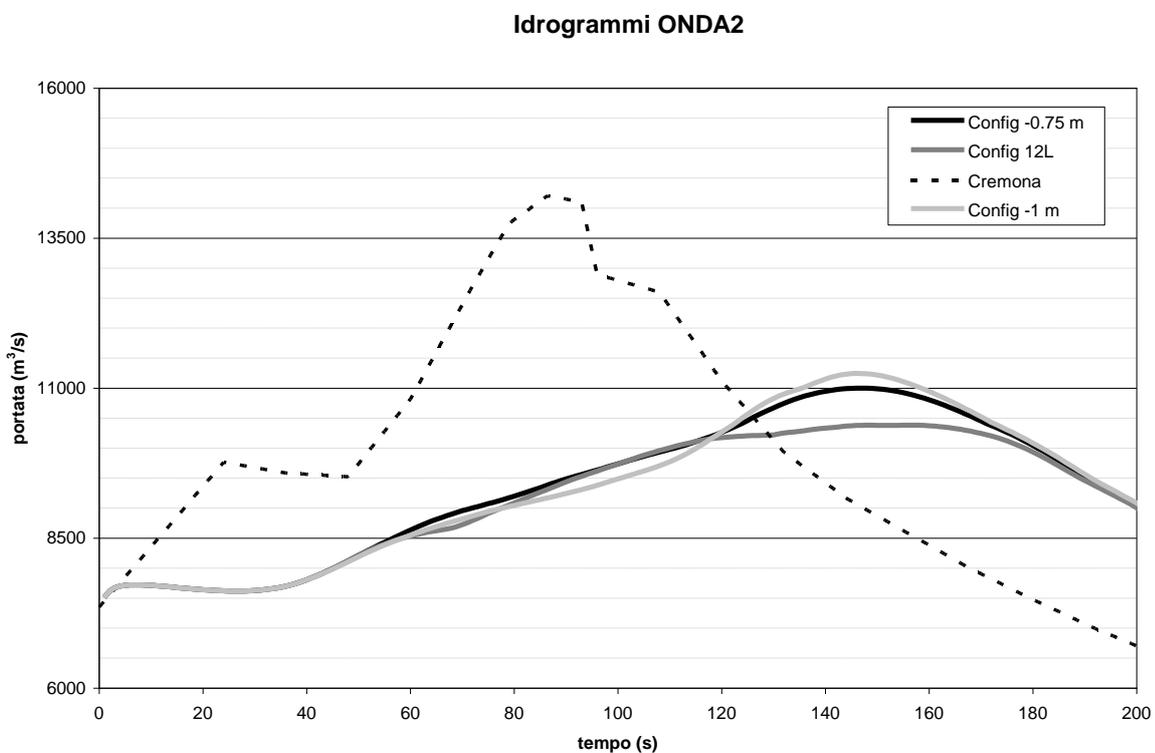


Fig. 4.25: idrogrammi di piena con riferimento alla sollecitazione idrologica ONDA2

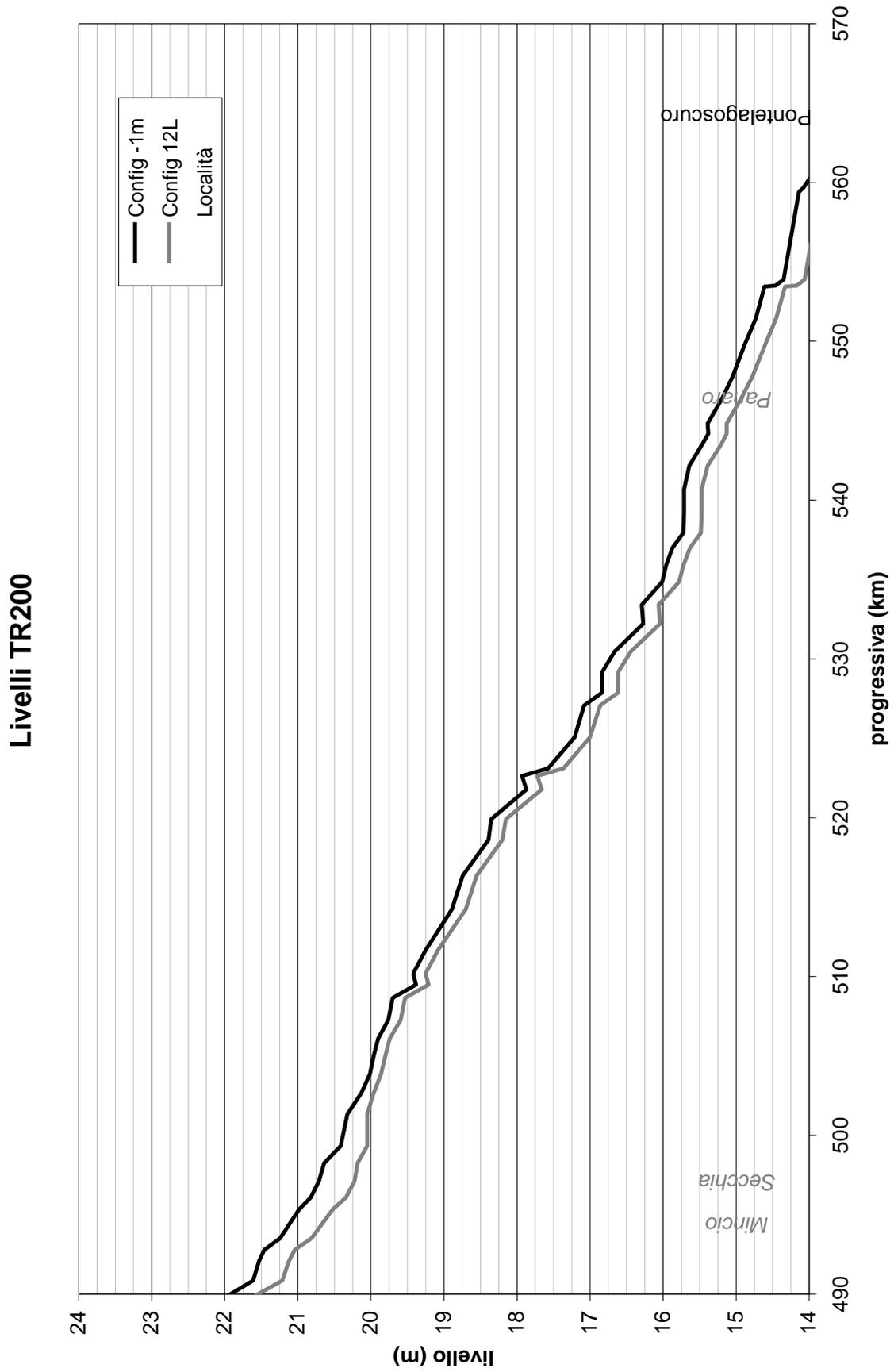


Fig. 4.26: inviluppo dei massimi livelli idrici con riferimento alla sollecitazione idrologica TR200

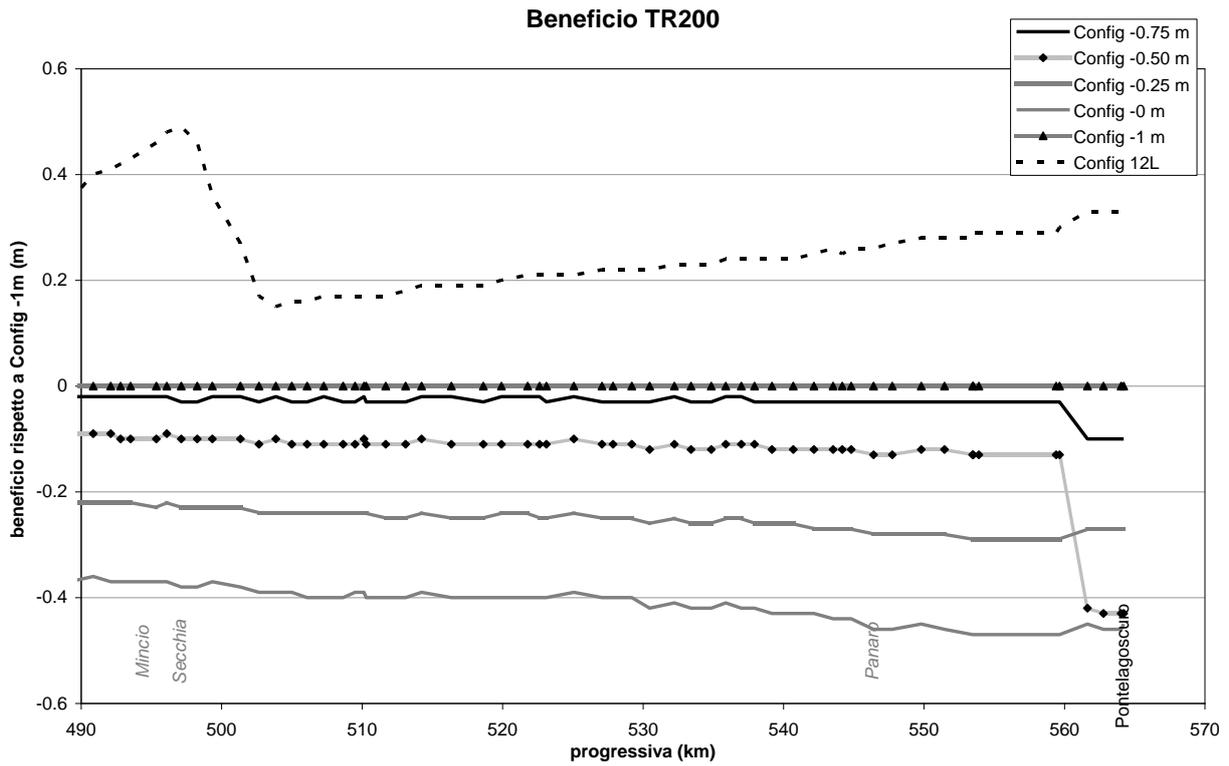


Fig. 4.27: beneficio rispetto alla Config -1m con riferimento alla sollecitazione idrologica TR200

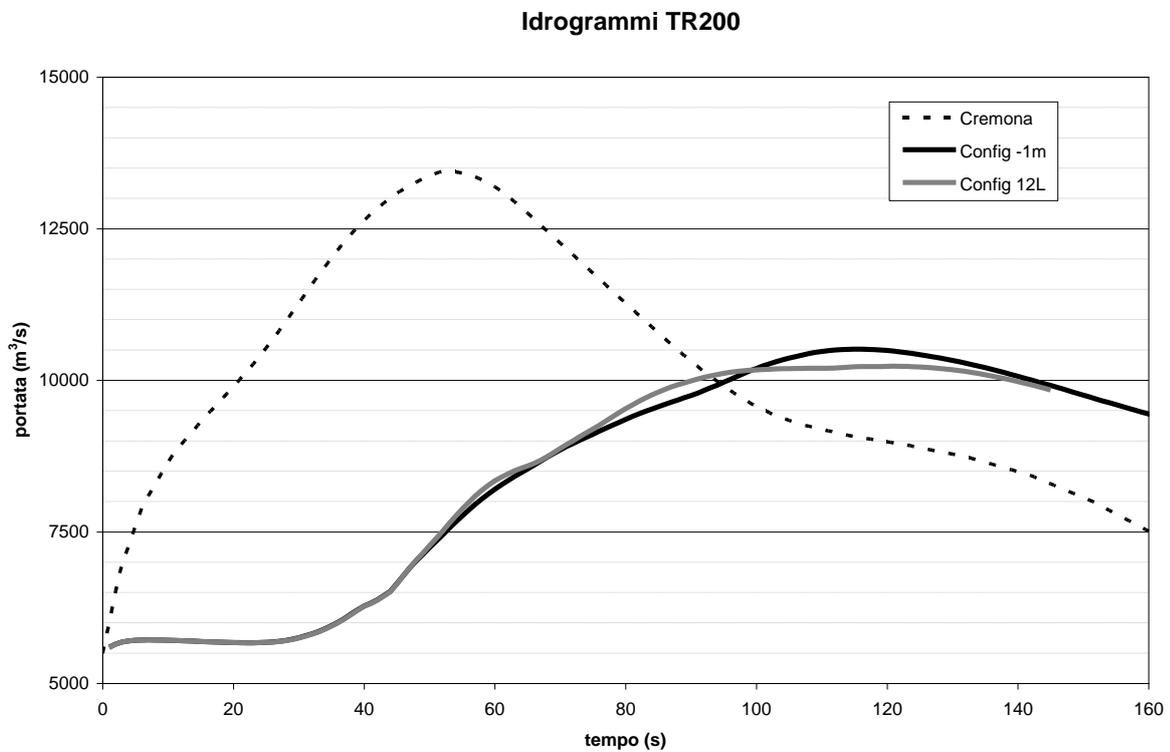


Fig. 4.28: idrogrammi di piena con riferimento alla sollecitazione idrologica TR200

Livelli TR500

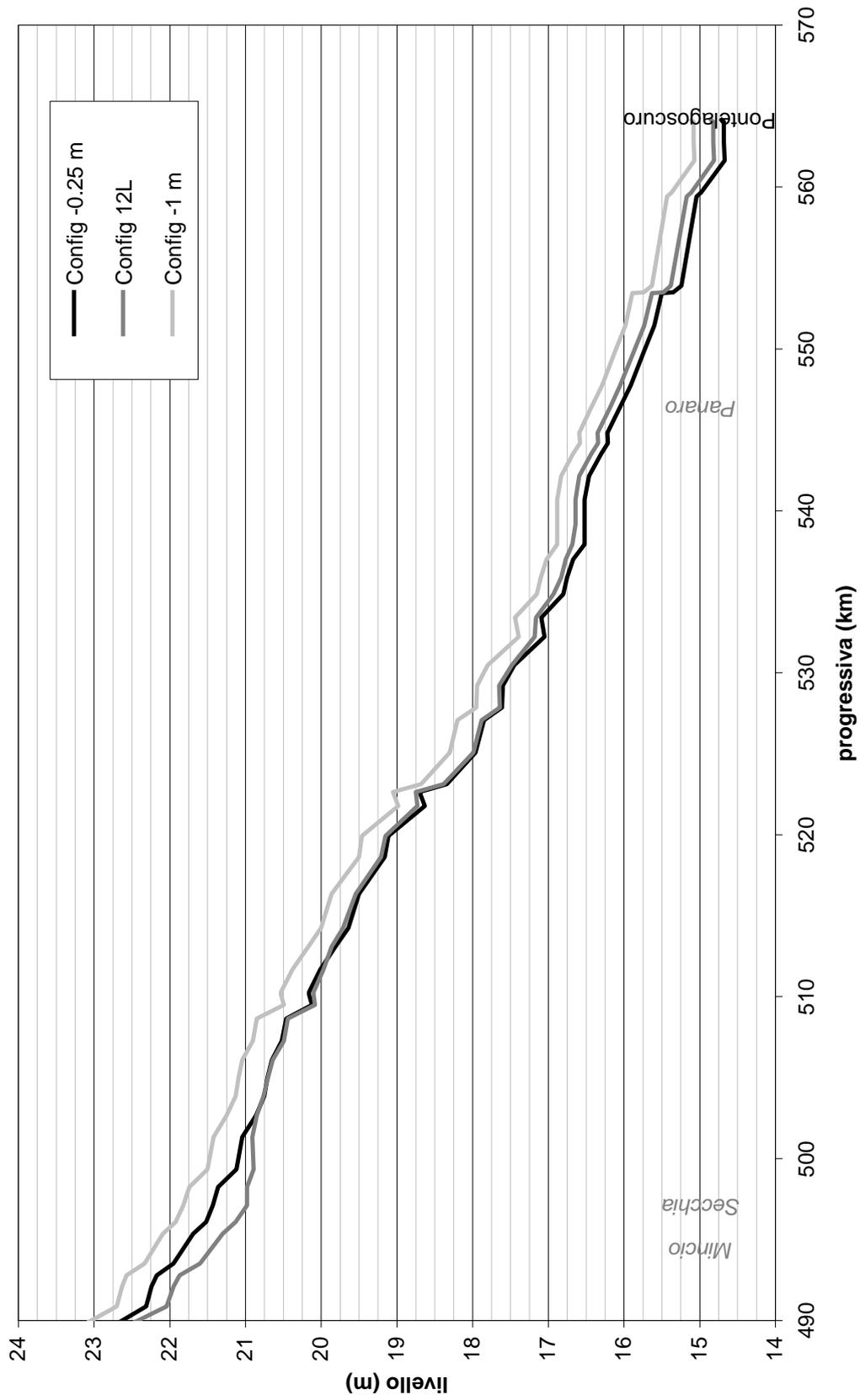


Fig. 4.29: involuipo dei massimi livelli idrici con riferimento alla sollecitazione idrologica TR500

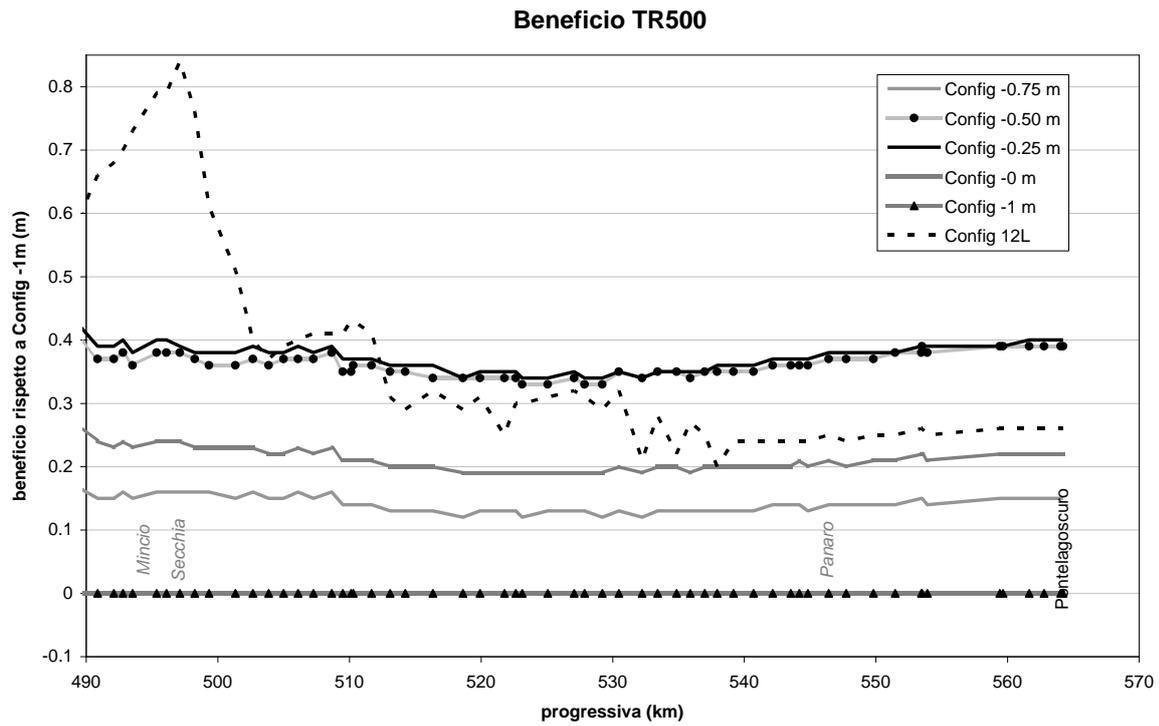


Fig. 4.30: beneficio rispetto alla Config -1m con riferimento alla sollecitazione idrologica TR500

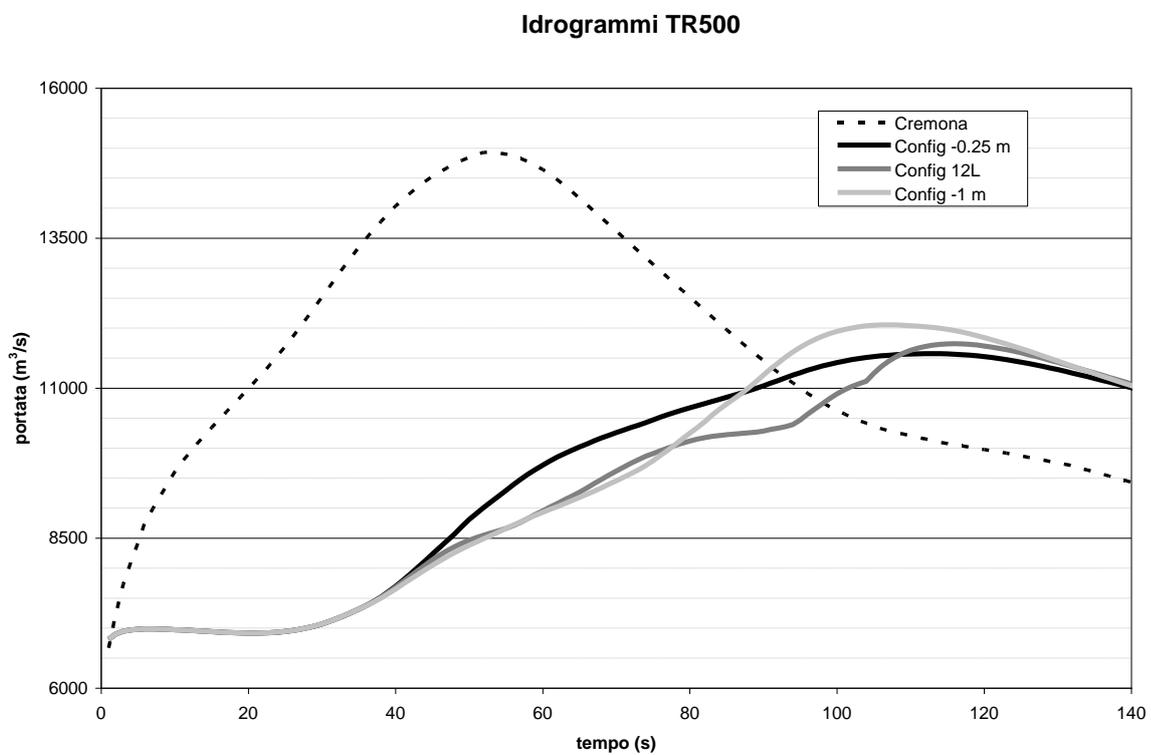


Fig. 4.31: idrogrammi di piena con riferimento alla sollecitazione idrologica TR500

Livelli TR500

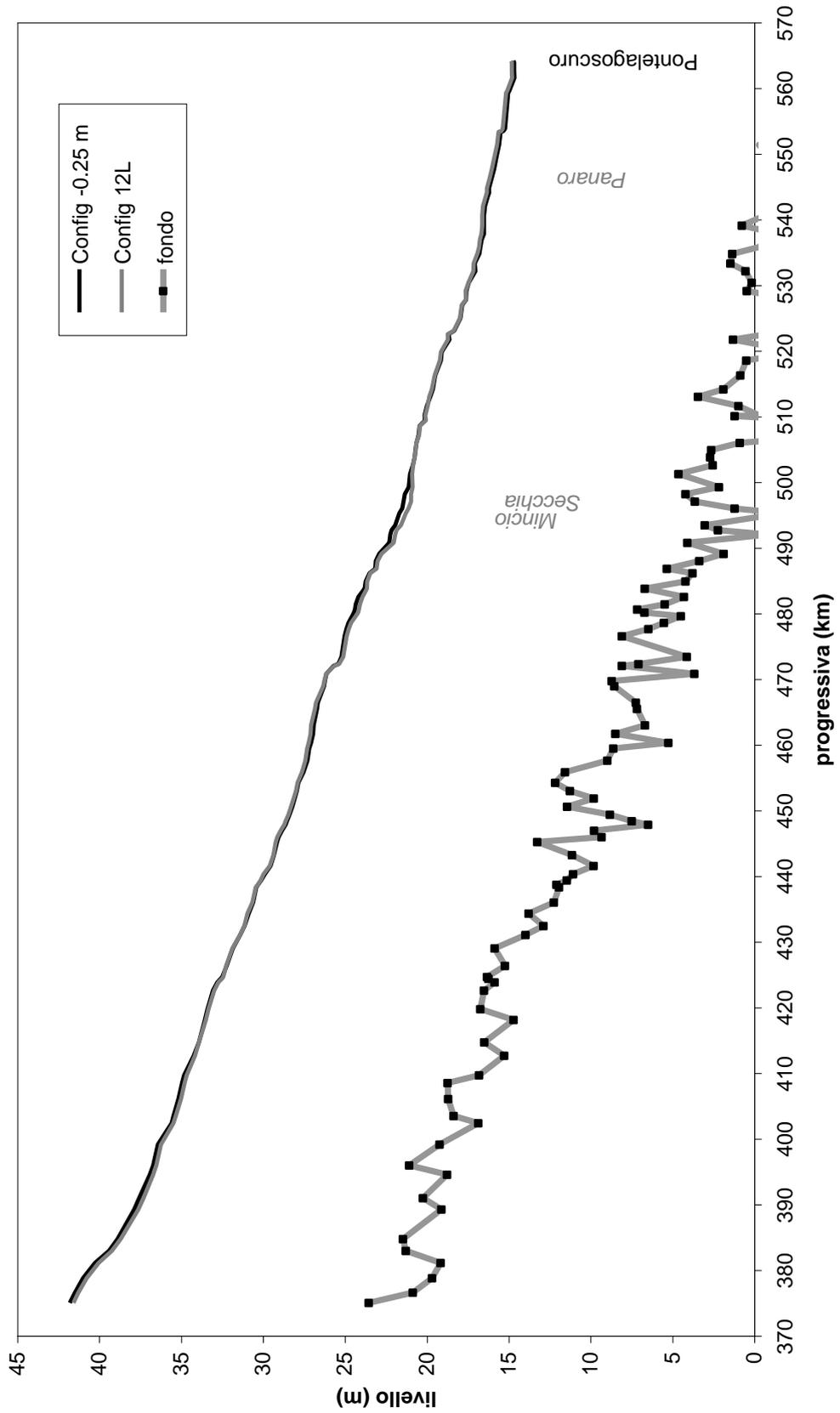


Fig. 4.32: inviluppo dei massimi livelli idrici lungo tutta l'asta interessata con riferimento alla sollecitazione idrologica TR500

4.6.2 Criterio differenziato lungo l'asta fluviale: discussione dei risultati

ONDA2

In Figura 4.23 e 4.25 i risultati della Config 12L vengono confrontati sia con i risultati di Config -0.75m, cioè la configurazione che massimizza il beneficio utilizzando un criterio di ricerca omogeneo, sia con i risultati di Config -1m, geometria presa a riferimento dall'AdB Po (in questo elaborato viene considerata come situazione attuale).

Da Figura 4.24 emerge che l'aumento medio del beneficio nel tratto di interesse rispetto a Config -0.75m è 0.48m, con un massimo di 0.69m; l'effetto di laminazione generato da Config 12L è di 3815 m³/s, 618 m³/s in meno rispetto a Config -0.75m (3197 m³/s). Confrontando i risultati con Config -1m si ottiene un beneficio medio pari a 0.67m e un beneficio massimo pari a 0.88m; l'effetto di laminazione ottenuto con Config -1m è 2929 m³/s, si ha quindi una differenza di portata nella sezione di uscita pari a 886 m³/s.

Da Figura 4.24 emerge che la nuova geometria è molto più efficace rispetto alle configurazioni omogenee in termini di aumento del beneficio; va però sottolineato che Config 12L è stata creata utilizzando come riferimento proprio ONDA2, di conseguenza i benefici non saranno così elevati nel caso delle onde TR200 e TR500.

TR200

In questo caso la nuova geometria viene confrontata con Config -1m, la quale rappresenta sia la configurazione omogenea migliore sia la configurazione prescritta dall'AdB Po. L'aumento medio di beneficio nel tratto di interesse è di 0.26m, con un massimo di 0.49m; l'effetto di laminazione per Config 12L è 3214 m³/s, 281 m³/s in meno rispetto Config -1m (2933 m³/s). Come previsto si verifica un calo del beneficio rispetto ONDA2, ma questo rimane comunque diverso da zero e positivo, quindi il livello nel tratto di valle del corso d'acqua si abbassa.

TR500

Nel caso dell'onda cinquecentennale non si nota un netto aumento del beneficio tra Config 12L e Config -0.25m (Figura 4.30) nel tratto di interesse, infatti il beneficio medio calcolato è di 0.01m. L'ipotesi che Config 12L non migliora la situazione rispetto a Config -0.25m è confermata ulteriormente dai grafici in Figura 4.29 e Figura 4.31.

Si consideri ora Figura 4.32, dove sono rappresentati i due livelli corrispondenti alle geometrie interessate lungo l'intero tratto (da Cremona a Pontelagoscuro); nel primo tronchetto il livello di Config -0.25m supera di poco quello di Config 12L, segue un lungo tratto in cui i livelli si uguagliano e infine si ha il superamento del livello di Config 12L rispetto Config -0.25m. Si ricorda che, essendo l'onda TR500 alta, il livello nel tratto in cui sono presenti le golene difese dipende dall'altezza dello sfioratore, invece, nel tratto di valle caratterizzato dall'assenza di golene chiuse, il livello dipende da quanta acqua è stata immagazzinata a monte. Questo ragionamento trova riscontro nel grafico in Figura 4.32, infatti, nel primo tratto Config -0.25m presenta quote arginali più elevate di Config 12L, dal momento che nella costruzione della nuova geometria è stata presa come riferimento Config -0.75m (gli sfioratori nella zona a monte non sono stati modificati); nell'ultimo tratto il livello di Config 12L è maggiore perché, avendo abbassato le arginature golenali rispetto Config -0.25m, il volume stoccato a monte è minore.

Dal momento che Config 12L offre dei risultati del tutto simili a Config -0.25m, si rimanda al paragrafo 4.5.2 (TR500) per il confronto numerico con Config -1m.

Le Tabelle 21 e 22 sintetizzano i risultati ottenuti in base all'insieme delle simulazioni condotte. Allo scopo si riporta la differenza media nell'intero tratto considerato e nel tratto di particolare interesse (da Revere-Ostiglia a Pontelagoscuro) delle quote del profilo di piena rispetto a Config -1m, considerata come lo stato attuale. Nel caso del criterio omogeneo l'onda TR200 non viene considerata, poichè, essendo Config -1m la geometria che massimizza il beneficio, i livelli generati

dalle altre configurazioni non possono che aumentare. Dove non è segnato alcun valore si verifica un aumento del livello.

Criterio omogeneo		ONDA2	TR500
Config -0.75m	Medio	0.12m	0.07m
	Max	0.25m	0.18m
Config -0.50m	Medio	0.06m	0.20m
	Max	0.24m	0.43m
Config -0.25m	Medio	-	0.21m
	Max	-	0.46m
Config -0m	Medio	-	0.06m
	Max	-	0.30m

Criterio differenziato		ONDA2	TR200	TR500
Config 12L	Medio	0.40m	0.14m	0.23m
	Max	0.88m	0.49m	0.84m

Tabella 21: abbassamento dei livelli rispetto alla configurazione -1m lungo tutta l'asta considerata

(da Cremona a Pontelagoscuro)

Criterio omogeneo		ONDA2	TR500
Config -0.75m	Medio	0.19m	0.14m
	Max	0.21m	0.16m
Config -0.50m	Medio	0.13m	0.36m
	Max	0.14m	0.39m
Config -0.25m	Medio	0.03m	0.37m
	Max	0.05m	0.40m
Config -0m	Medio	-	0.21m
	Max	-	0.24m

Criterio differenziato		ONDA2	TR200	TR500
Config 12L	Medio	0.67m	0.26m	0.36m
	Max	0.88m	0.49m	0.84m

Tabella 22: abbassamento dei livelli idrometrici rispetto alla configurazione -1m lungo il tratto interessato (da Revere- Ostiglia (MN) a Pontelagoscuro (FE))

Confrontando i valori riportati in Tabella 22 emerge quanto diminuisce il livello nel tratto di interesse adottando un criterio differenziato anziché omogeneo di modellamento delle arginature golenali.

5. Conclusioni

Lo scopo dell'indagine qui esposta è quello di analizzare la possibilità di aumentare l'effetto di laminazione del sistema fluvio-golenale del Po attraverso una corretta gestione delle arginature golenali. Lungo il tratto medio-inferiore del corso d'acqua, infatti, sono presenti numerose golene che, se invase, trattengono volumi idrici e provocano un abbassamento del livello nel tratto a valle. Il documento preso come riferimento nel presente studio è "Progetto strategico per il miglioramento delle condizioni di sicurezza idraulica dei territori di pianura lungo l'asta principale del fiume Po", commissionato dall'AdB-Po al DISTART dell'Università di Bologna. Da tale ricerca si evince che alzando gli argini golenali fino a una quota inferiore di almeno 1 m rispetto a quella degli argini maestri (limite massimo secondo la direttiva attualmente in uso presso l'Agenzia Interregionale per il Fiume Po, AIPO) si ottiene un beneficio in termini di abbassamento del livello idrometrico rispetto alla situazione attuale, ricavata attraverso un rilievo Laserscanner. Ciò accade poiché il volume idrico trattenuto nelle golene difese non va ad alimentare il tratto di valle; per cui, maggiore è il volume idrico che le golene riescono a contenere, minore è il livello e la portata nel tratto di interesse. L'abbassamento, infatti, viene stimato nella zona di valle dell'asta considerata, dove le golene difese sono più rare, precisamente da Revere-Ostiglia (MN) a Pontelagoscuro (FE).

Partendo dai risultati ottenuti nello studio sopra citato sono state create nuove geometrie, in cui gli argini golenali vengono alzati ulteriormente e gradualmente, allo scopo di aumentare i volumi invasabili dal sistema di golene chiuse. Nella definizione delle nuove configurazioni è stato adottato un criterio omogeneo, ovvero la quota degli argini golenali è stata ricavata sottraendo la stessa quantità dai corrispondenti argini maestri; per esempio in "Config -0.75 m" l'altezza di ogni argine golenale è pari alla quota del corrispondente argine maestro meno 0.75 m. Attraverso questo procedimento sono state create cinque nuove geometrie: "Config -1 m", "Config -0.75 m", "Config -0.5 m", "Config -0.25 m" e "Config -0 m", in cui la quota degli argini golenali è pari a quella degli argini maestri. Per quanto riguarda le sollecitazioni idrologiche in ingresso, sono state utilizzate tre

onde: TR200, TR500 e ONDA2. Le prime due rappresentano l'onda con tempo di ritorno duecentennale e cinquecentennale; ONDA2 è simile a TR200, ma presenta un valore di picco più elevato ed è stata ottenuta maggiorando l'onda di piena osservata durante l'evento del novembre 1951 (v. paragrafo 4.2). Una volta ricavate le configurazioni e le sollecitazioni idrologiche sono state svolte le simulazioni; l'ipotesi di base è che all'aumentare dell'altezza delle arginature golenali, diminuisce il livello nel tratto di interesse.

I risultati delle simulazioni effettuate smentiscono in parte tale ipotesi; si nota infatti un aumento dei livelli all'aumentare della quota delle arginature, sia per l'onda con tempo di ritorno duecentennale sia per ONDA2 (Figura 4.15 e Figura 4.12). Il significato dei risultati ottenuti va ricercato nel fatto che all'aumentare delle quote degli argini golenali sempre meno golene riescono ad invadere acqua, di conseguenza i volumi idrici che prima venivano stoccati nelle aree di accumulo ora permangono nel corso d'acqua, provocando l'aumento del livello nel tratto di valle. Nelle Tabelle 18 e 19 si può notare la corrispondenza tra il numero di golene vuote e l'aumento del livello nel tratto di interesse. L'ipotesi precedente si verifica nel caso delle simulazioni aventi come sollecitazione idrologica l'onda con tempo di ritorno cinquecentennale (Figura 4.18), infatti, l'onda genera dei tiranti idrici così elevati che permettono l'invaso delle golene anche con argini rialzati. Dalle considerazioni effettuate finora emerge che incrementare la quota delle arginature golenali attraverso un criterio omogeneo, in cui il valore è ottenuto sottraendo la medesima quantità dagli argini maestri, è un approccio poco corretto, poiché non tiene conto dell'invaso o meno della golena corrispondente all'argine rialzato. Pertanto è necessario cercare un valore della quota arginale che massimizzi il volume invasabile e contemporaneamente permetta l'entrata dell'acqua nella golena.

Tale valore è stato ottenuto tramite una procedura iterativa descritta nel paragrafo 4.6, secondo la quale il valore della quota di ciascun argine golenale viene ricavato imponendo il riempimento di ogni golena difesa. La configurazione geometrica così ottenuta, denominata "Config 12L" (v. Appendice), è ottimizzata per la sollecitazione idrologica ONDA2, tuttavia le simulazioni eseguite nel presente studio hanno evidenziato che, con questa geometria, si ha un aumento del beneficio

anche per l'onda duecentennale (Figura 4.24); per quanto riguarda l'onda cinquecentennale, il beneficio ottenuto è simile a quello della configurazione migliore nel caso del criterio omogeneo (Config -0.25 m). In Tabella 21 vengono riportati i valori dell'abbassamento medio del livello delle varie geometrie rispetto alla "Configurazione -1m", presa in questo studio come situazione attuale, poiché rappresenta il criterio adottato a livello prescrittivo dall'AdB Po (in base al quale gli argini golenali devono avere quote sommitali sempre inferiori di almeno un metro rispetto a quelle degli argini maestri). Il confronto tra i risultati ottenuti permette la quantificazione dell'incremento della capacità di laminazione del sistema fluvio-golenale del Po in condizioni di piena qualora venga adottata una diversa politica di gestione delle arginature golenali; in particolare emerge come sia molto più efficace adottare un criterio differenziato di analisi delle quote arginali, attraverso il quale si raggiungono abbassamenti medi del livello nel tratto di interesse pari a 0.66 m.

In conclusione, il presente studio ha permesso di individuare dei valori di quota delle arginature golenali tali da massimizzare l'effetto di laminazione del sistema fluvio-golenale del Fiume Po. In questo modo, attraverso un semplice intervento di innalzamento e ingrossamento di alcuni argini golenali, si ottengono notevoli benefici in termini di riduzione delle portate e dei livelli di piena.

6. Appendice A: quote delle arginature golenali della Config 12L

Le pagine seguenti riportano una descrizione della Config 12L. In particolare, ogni ramo è identificato attraverso una sigla sXX_sYY, in cui sXX e sYY sono rispettivamente gli identificativi delle sezioni Brioschi di monte e di valle del ramo.

DESTRA IDRAULICA

Ramo	ID sfioratore	ID golena	x	z
s25_02_s27c	LS 11500	42	0.00	40.37
			238.97	40.35
			746.24	40.31
			1300.86	40.26
			1657.17	40.21
			1776.46	40.17
s25_02_s27c	LS 8000	130	0.00	39.78
			236.92	39.73
			845.06	39.58
			1397.01	39.36
			2017.75	39.11
			2371.00	38.94
s25_02_s27c	LS 5200	129A	0.00	38.79
			460.58	38.31
			996.00	38.48
			1385.00	38.39
s25_02_s27c	LS 4000	129B	0.00	38.36
			232.19	38.31
			667.08	38.27
			1694.43	38.22
s28_s29	LS 5000	124	0.00	37.23
			2205.21	35.89
			3469.47	36.35
			5470.56	36.02
s30_s33b	LS 18500	123	0.00	35.54
			1085.15	35.65
			2835.71	35.03
			3668.58	34.76
			3820.00	35.60
s33c_s36a	LS 16500	117	0.00	32.69
			1367.06	32.42
			2233.84	31.40
			2310.00	32.47

Ramo	ID sfioratore	ID golena	x	z
s33c_s36a	LS 12900	116	0.00	32.43
			77.68	31.09
			415.61	31.54
			2087.02	31.07
			4644.64	30.50
			5270.00	31.41
s33c_s36a	LS 8000	115B	0.00	31.27
			430.20	31.18
s33c_s36a	LS 7900	115A	0.00	31.44
			1744.37	31.07
			3264.35	30.50
			5178.92	29.31
			6615.49	29.30
			6720.00	29.30
s33c_s36a	LS 1200	114	0.00	29.30
			236.57	29.30
			1386.82	29.30
S37_S41A	LS 27000	112-b	0.00	29.12
			709.67	27.21
			1786.38	28.62
			2625.28	28.49
			3708.02	28.14
			4200.00	28.20
S37_S41A	LS 24000	112-a	0.00	28.30
			482.74	28.14
			890.93	28.01
S37_S41A	LS 23700	111-d	0.00	27.93
			843.90	27.75
S37_S41A	LS 23000	111-e	0.00	27.90
			143.90	27.75
			563.47	29.32
S37_S41A	LS 22400	111-b	0.00	28.50
			227.34	29.34
S37_S41A	LS 22500	111-c	0.00	27.95
			358.00	29.51
S37_S41A	LS 22000	111-a	0.00	29.77
			679.83	27.90
S37_S41A	LS 21500	26	0.00	29.26
			637.81	27.85
			1342.00	27.80

Ramo	ID sfioratore	ID golena	x	z
S37_S41A	LS 21000	110-b	0.00	27.77
			922.89	27.50
			2232.60	27.79
			2770.60	27.79
S37_S41A	LS19000	110-a	0.00	27.79
			509.71	27.79
			1720.75	27.31
			1845.74	27.31
S37_S41A	LS 17000	24	0.00	27.29
			677.08	26.84
			2392.74	26.58
			2916.51	26.55
S37_S41A	LS 12000	107	0.00	26.35
			940.34	26.20
			2065.31	26.51
			2659.56	26.08
			3253.62	25.56
			3642.86	25.57
			4099.93	25.59
4190.00	25.53			
S37_S41A	LS 9700	S37S41_1	0.00	25.69
			144.06	25.56
			533.30	25.57
			879.78	25.59
S41B_S45C	LS 19600	19-b	0.00	24.55
			533.95	24.55
S41B_S45C	LS 18600	19-a	0.00	24.55
			931.29	24.66
			2068.30	24.60
S41B_S45C	LS 11000	106	0.00	23.43
			341.62	23.13
			1228.19	23.22
S41B_S45C	LS 9100	17	0.00	23.23
			936.72	23.02
			1088.65	23.02
S41B_S45C	LS 9000	105	0.00	23.02
			856.72	23.02
			1610.21	23.69
			4082.34	22.83
			4890.00	22.73
S41B_S45C	LS 2600	S41BS45C_1	0.00	21.67
			961.82	21.94

Ramo	ID sfioratore	ID golena	x	z
S46_S54A	LS 24500	13	0.00	20.58
			257.80	20.53
			513.85	20.42
			875.68	20.61
			1892.95	20.54
			2001.39	20.48
S46_S54A	LS 22500	S46S54_3	0.00	20.49
			767.36	20.09
S46_S54A	LS 23535	S46S54_2	0.00	20.32
			312.87	20.30
S46_S54A	LS 23530	S46S54_1	0.00	20.35
			858.34	20.29
S46_S54A	LS 14600	S46S54_4	0.00	19.89
			1046.26	19.84
S46_S54A	LS 13500	S46S54_5	0.00	20.21
			588.52	20.14
			1211.12	19.25
			1665.93	19.25
			1863.87	19.47
S46_S54A	LS 3300	S46S54_6	0.00	19.00
			1763.49	18.99
			2885.97	17.81
S55_S59B	LS 17800	S55S59B_2	0.00	17.70
			2048.94	17.64
S55_S59B	LS 10000	S55S59B_4	0.00	16.36
			1549.65	15.87
			2213.93	15.76
S55_S59B	LS 4000	S55S59B_6	0.00	15.95
			519.91	15.84
			1390.25	15.59
			2496.78	15.19
S59C_S64C	LS 18000	Foce Panaro	0.00	14.96
			1008.71	14.85

SINISTRA IDRAULICA

Ramo	ID sfior	ID golena	x	z
s25_02_s27c	LS 13000	43	0.00	39.79
			29.45	39.79
			614.90	39.96
			905.50	40.31
			1283.97	40.22
			1793.74	40.15
			2321.29	40.06
2658.46	40.02			
s25_02_s27c	LS 9000	41	0	40.49
			531.93	40.33
			1121.94	40.15
			1542.28	39.37
			2055.64	39.18
			2454.878	39.03
s25_02_s27c	LS 3400	128	0.00	38.16
			313.81	38.10
			792.43	37.84
			1163.84	37.75
			2504.73	37.43
s25_02_s27c	LS 3500	127	0	38.42
			363.81	38.35
			842.43	38.09
			1213.84	38
			1433	37.95
s28_s29	LS 9500	127	0	37.67
			377.563	37.55
s28_s29	LS 9000	126	0	37.47
			1816.05	36.49
			4998	36.29
s28_s29	LS 3500	127	0	36.29
			2066	36.21
			3200	35.38
s30_s33b	LS 18000	122	0.00	35.32
			1657.98	35.24
			2527.62	34.89
			3853.13	34.98
			4891.00	34.98
s30_s33b	LS 14000	121	0.00	34.26
			9135.50	34.27

Ramo	ID sfior	ID golena	x	z
s30_s33b	LS 8500	120A	0.00	34.27
			582.39	34.27
			2293.04	33.84
s30_s33b	LS 6500	120B	0.00	33.95
			1365.98	33.60
s30_s33b	LS 4000	119	0.00	33.47
			2133.29	32.52
			2890.09	32.52
			3790.00	32.52
s33c_s36a	LS 19000	118	0	32.32
			1210.6	32.36
			4185.4	31.74
			5030	31.73
S37_S41A	LS 32000	113	0	29.46
			508.87	29.71
			1293.73	29.4
			2344.94	29.25
			3945.07	29.2
S37_S41A	LS 17500	109	0.00	26.90
			312.97	26.93
			2188.89	26.91
			3470.09	26.50
			4645.80	26.06
S37_S41A	LS 9600	22	0	26.25
			712.13	26.13
			1701.33	26.13
			2039.026	26.13
S41B_S45C	LS 16000	18	0.00	24.26
			536.08	24.20
			1892.88	23.93
			2301.99	23.93
S41B_S45C	LS 9150	104-b	0.00	22.97
			928.65	22.70
S46_S54A	LS 26800	14	0.00	24.18
			80.56	23.90
			463.40	22.82
			911.80	20.15
			1430.82	21.49
			1756.52	21.49

Ramo	ID sfior	ID golena	x	z
S46_S54A	LS 22000	103	0	19.4
			1017.33	19.22
			2106.17	19.13
			3097.25	18.78
			4068.32	18.69
			5167.44	19.06
			6248.69	18.46
7110	18.32			
S46_S54A	LS 9300	101-a	0	19.2
			534.67	19.1
			1506.902	18.95
S46_S54A	LS 8400	101-b	0	18.97
			704.94	18.86
			1759.36	18.78
			1944.756	18.78
S46_S54A	LS 5400	101-a	0	18.78
			1179.051	18.81
S55_S59B	LS 20500	S55S59B_1	0	17.87
			1134.64	17.72
			2048.943	17.74
S55_S59B	LS 13400	S55S59B_3	0	16.99
			245.67	16.99
			1560.08	16.47
			2191.204	16.61
S55_S59B	LS 7000	S55S59B_5	0.00	15.93
			1296.63	15.69
			1815.07	15.67

7. Appendice B: quote delle arginature golenali della Config -1m

DESTRA IDRAULICA

Ramo	ID sfior	ID golena	x	z
s25_02_s27c	LS 11500	42	0.00	40.12
			238.97	40.10
			746.24	40.06
			1300.86	40.01
			1657.17	39.96
			1776.46	39.92
s25_02_s27c	LS 8000	130	0.00	39.53
			236.92	39.48
			845.06	39.33
			1397.01	39.11
			2017.75	38.86
			2371.00	38.69
s25_02_s27c	LS 5200	129A	0.00	38.54
			460.58	38.06
			996.00	38.23
			1385.00	38.14
s25_02_s27c	LS 4000	129B	0.00	38.11
			232.19	38.06
			667.08	38.02
			1694.43	37.97
s28_s29	LS 5000	124	0.00	36.98
			2205.21	35.64
			3469.47	36.10
			5470.56	35.77
s30_s33b	LS 18500	123	0.00	35.29
			1085.15	35.40
			2835.71	34.78
			3668.58	34.51
			3820.00	35.35
s33c_s36a	LS 16500	117	0.00	32.44
			1367.06	32.17
			2233.84	31.15
			2310.00	32.22
s33c_s36a	LS 12900	116	0.00	32.18
			77.68	30.84
			415.61	31.29
			2087.02	30.82
			4644.64	30.25
			5270.00	31.16

Ramo	ID sfior	ID golena	x	z
s33c_s36a	LS 8000	115B	0.00 430.20	31.27 31.18
s33c_s36a	LS 7900	115A	0.00 1744.37 3264.35 5178.92 6615.49 6720.00	31.19 30.82 30.25 29.06 29.05 29.05
s33c_s36a	LS 1200	114	0.00 236.57 1386.82	29.05 29.05 29.05
S37_S41A	LS 27000	112-b	0.00 709.67 1786.38 2625.28 3708.02 4200.00	28.87 26.96 28.37 28.24 27.89 27.95
S37_S41A	LS 24000	112-a	0.00 482.74 890.93	28.05 27.89 27.76
S37_S41A	LS 23700	111-d	0.00 843.90	27.68 27.50
S37_S41A	LS 23000	111-e	0.00 143.90 563.47	27.65 27.50 29.07
S37_S41A	LS 22400	111-b	0.00 227.34	28.25 29.09
S37_S41A	LS 22500	111-c	0.00 358.00	27.70 29.26
S37_S41A	LS 22000	111-a	0.00 679.83	29.52 27.65
S37_S41A	LS 21500	26	0.00 637.81 1342.00	29.01 27.60 27.55
S37_S41A	LS 21000	110-b	0.00 922.89 2232.60 2770.60	27.52 27.25 27.54 27.54

Ramo	ID sfior	ID golena	x	z
S37_S41A	LS19000	110-a	0.00	27.54
			509.71	27.54
			1720.75	27.06
			1845.74	27.06
S37_S41A	LS 17000	24	0.00	27.04
			677.08	26.59
			2392.74	26.33
			2916.51	26.30
S37_S41A	LS 12000	107	0.00	26.10
			940.34	25.95
			2065.31	26.26
			2659.56	25.83
			3253.62	25.31
			3642.86	25.32
			4099.93	25.34
4190.00	25.28			
S37_S41A	LS 9700	S37S41_1	0.00	25.44
			144.06	25.31
			533.30	25.32
			879.78	25.34
S41B_S45C	LS 19600	19-b	0.00	24.30
			533.95	24.30
S41B_S45C	LS 18600	19-a	0.00	24.30
			931.29	24.41
			2068.30	24.35
S41B_S45C	LS 11000	106	0.00	23.68
			341.62	23.38
			1228.19	23.47
S41B_S45C	LS 9100	17	0.00	23.48
			936.72	23.27
			1088.65	23.27
S41B_S45C	LS 9000	105	0.00	23.27
			856.72	23.27
			1610.21	23.94
			4082.34	23.08
			4890.00	22.98
S41B_S45C	LS 2600	S41BS45C_1	0.00	22.67
			961.82	22.94

Ramo	ID sfior	ID golena	x	z
S46_S54A	LS 24500	13	0.00	21.83
			257.80	21.78
			513.85	21.67
			875.68	21.86
			1892.95	21.79
			2001.39	21.73
S46_S54A	LS 22500	S46S54_3	0.00	21.74
			767.36	21.34
S46_S54A	LS 23535	S46S54_2	0.00	21.82
			312.87	21.80
S46_S54A	LS 23530	S46S54_1	0.00	21.85
			858.34	21.79
S46_S54A	LS 14600	S46S54_4	0.00	21.14
			1046.26	21.09
S46_S54A	LS 13500	S46S54_5	0.00	20.96
			588.52	20.89
			1211.12	20.00
			1665.93	20.00
			1863.87	20.22
S46_S54A	LS 3300	S46S54_6	0.00	20.00
			1763.49	19.99
			2885.97	18.81
S55_S59B	LS 17800	S55S59B_2	0.00	19.45
			2048.94	19.39
S55_S59B	LS 10000	S55S59B_4	0.00	18.86
			1549.65	18.37
			2213.93	18.26
S55_S59B	LS 4000	S55S59B_6	0.00	17.95
			519.91	17.84
			1390.25	17.59
			2496.78	17.19

SINISTRA IDRAULICA

Ramo	ID sfior	ID golena	x	z
s25_02_s27c	LS 13000	43	0.00	39.54
			29.45	39.54
			614.90	39.71
			905.50	40.06
			1283.97	39.97
			1793.74	39.90
			2321.29	39.81
2658.46	39.77			
s25_02_s27c	LS 9000	41	0	40.24
			531.93	40.08
			1121.94	39.9
			1542.28	39.12
			2055.64	38.93
			2454.878	38.78
s25_02_s27c	LS 3400	128	0.00	38.16
			313.81	38.10
			792.43	37.84
			1163.84	37.75
			2504.73	37.43
s25_02_s27c	LS 3500	127	0	38.17
			363.81	38.1
			842.43	37.84
			1213.84	37.75
			1433	37.7
s28_s29	LS 9500	127	0	37.42
			377.563	37.3
s28_s29	LS 9000	126	0	37.22
			1816.05	36.24
			4998	36.04
s28_s29	LS 3500	127	0	36.04
			2066	35.96
			3200	35.13
s30_s33b	LS 18000	122	0.00	35.07
			1657.98	34.99
			2527.62	34.64
			3853.13	34.73
			4891.00	34.73
s30_s33b	LS 14000	121	0.00	34.73
			2350.00	34.01

Ramo	ID sfior	ID golena	x	z
s30_s33b	LS 8500	120A	0.00	34.02
			582.39	34.02
			2293.04	33.59
s30_s33b	LS 6500	120B	0.00	33.70
			1365.98	33.35
s30_s33b	LS 4000	119	0.00	33.22
			2133.29	32.27
			2890.09	32.27
			3790.00	32.27
s33c_s36a	LS 19000	118	0	32.07
			1210.6	32.11
			4185.4	31.49
			5030	31.48
S37_S41A	LS 32000	113	0	29.21
			508.87	29.46
			1293.73	29.15
			2344.94	29
			3945.07	28.95
S37_S41A	LS 17500	109	0.00	26.65
			312.97	26.68
			2188.89	26.66
			3470.09	26.25
			4645.80	25.81
S37_S41A	LS 9600	22	0	26.25
			712.13	26.13
			1701.33	26.13
			2039.026	26.13
S41B_S45C	LS 16000	18	0.00	25.01
			536.08	24.95
			1892.88	24.68
			2301.99	24.68
S41B_S45C	LS 9150	104-b	0.00	24.22
			928.65	23.95
S46_S54A	LS 26800	14	0.00	23.93
			80.56	23.65
			463.40	22.57
			911.80	19.90
			1430.82	21.24
			1756.52	21.24

Ramo	ID sfior	ID golena	x	z
S46_S54A	LS 22000	103	0	22.4
			1017.33	22.22
			2106.17	22.13
			3097.25	21.78
			4068.32	21.69
			5167.44	22.06
			6248.69	21.46
7110	21.32			
S46_S54A	LS 9300	101-a	0	20.45
			534.67	20.35
			1506.902	20.2
S46_S54A	LS 8400	101-b	0	20.22
			704.94	20.11
			1759.36	20.03
			1944.756	20.03
S46_S54A	LS 5400	101-a	0	20.03
			1179.051	20.06
S55_S59B	LS 20500	S55S59B_1	0	19.37
			1134.64	19.22
			2048.943	19.24
S55_S59B	LS 13400	S55S59B_3	0	18.49
			245.67	18.49
			1560.08	17.97
			2191.204	18.11
S55_S59B	LS 7000	S55S59B_5	0.00	17.68
			1296.63	17.44
			1815.07	17.42

8. Appendice C: quote delle arginature golenali della Config - 0.75m

DESTRA IDRAULICA

Ramo	ID sfior	ID golena	x	z
s25_02_s27c	LS 11500	42	0.00	40.37
			238.97	40.35
			746.24	40.31
			1300.86	40.26
			1657.17	40.21
			1776.46	40.17
s25_02_s27c	LS 8000	130	0.00	39.78
			236.92	39.73
			845.06	39.58
			1397.01	39.36
			2017.75	39.11
			2371.00	38.94
s25_02_s27c	LS 5200	129A	0.00	38.79
			460.58	38.31
			996.00	38.48
			1385.00	38.39
s25_02_s27c	LS 4000	129B	0.00	38.36
			232.19	38.31
			667.08	38.27
			1694.43	38.22
s28_s29	LS 5000	124	0.00	37.23
			2205.21	35.89
			3469.47	36.35
			5470.56	36.02
s30_s33b	LS 18500	123	0.00	35.54
			1085.15	35.65
			2835.71	35.03
			3668.58	34.76
			3820.00	35.60
s33c_s36a	LS 16500	117	0.00	32.69
			1367.06	32.42
			2233.84	31.40
			2310.00	32.47

Ramo	ID sfior	ID golena	x	z
s33c_s36a	LS 12900	116	0.00	32.43
			77.68	31.09
			415.61	31.54
			2087.02	31.07
			4644.64	30.50
			5270.00	31.41
s33c_s36a	LS 8000	115B	0.00	31.52
			430.20	31.43
s33c_s36a	LS 7900	115A	0.00	31.44
			1744.37	31.07
			3264.35	30.50
			5178.92	29.31
			6615.49	29.30
			6720.00	29.30
s33c_s36a	LS 1200	114	0.00	29.30
			236.57	29.30
			1386.82	29.30
S37_S41A	LS 27000	112-b	0.00	29.12
			709.67	27.21
			1786.38	28.62
			2625.28	28.49
			3708.02	28.14
			4200.00	28.20
S37_S41A	LS 24000	112-a	0.00	28.30
			482.74	28.14
			890.93	28.01
S37_S41A	LS 23700	111-d	0.00	27.93
			843.90	27.75
S37_S41A	LS 23000	111-e	0.00	27.90
			143.90	27.75
			563.47	29.32
S37_S41A	LS 22400	111-b	0.00	28.50
			227.34	29.34
S37_S41A	LS 22500	111-c	0.00	27.95
			358.00	29.51
S37_S41A	LS 22000	111-a	0.00	29.77
			679.83	27.90
S37_S41A	LS 21500	26	0.00	29.26
			637.81	27.85
			1342.00	27.80

Ramo	ID sfior	ID golena	x	z
S37_S41A	LS 21000	110-b	0.00	27.77
			922.89	27.50
			2232.60	27.79
			2770.60	27.79
S37_S41A	LS19000	110-a	0.00	27.79
			509.71	27.79
			1720.75	27.31
			1845.74	27.31
S37_S41A	LS 17000	24	0.00	27.29
			677.08	26.84
			2392.74	26.58
			2916.51	26.55
S37_S41A	LS 12000	107	0.00	26.35
			940.34	26.20
			2065.31	26.51
			2659.56	26.08
			3253.62	25.56
			3642.86	25.57
4099.93	25.59			
4190.00	25.53			
S37_S41A	LS 9700	S37S41_1	0.00	25.69
			144.06	25.56
			533.30	25.57
			879.78	25.59
S41B_S45C	LS 19600	19-b	0.00	24.55
			533.95	24.55
S41B_S45C	LS 18600	19-a	0.00	24.55
			931.29	24.66
			2068.30	24.60
S41B_S45C	LS 11000	106	0.00	23.93
			341.62	23.63
			1228.19	23.72
S41B_S45C	LS 9100	17	0.00	23.73
			936.72	23.52
			1088.65	23.52
S41B_S45C	LS 9000	105	0.00	23.52
			856.72	23.52
			1610.21	24.19
			4082.34	23.33
			4890.00	23.23
S41B_S45C	LS 2600	S41BS45C_1	0.00	22.92
			961.82	23.19

Ramo	ID sfior	ID golena	x	z
S46_S54A	LS 24500	13	0.00	22.08
			257.80	22.03
			513.85	21.92
			875.68	22.11
			1892.95	22.04
			2001.39	21.98
S46_S54A	LS 22500	S46S54_3	0.00 767.36	21.99 21.59
S46_S54A	LS 23535	S46S54_2	0.00 312.87	22.07 22.05
S46_S54A	LS 23530	S46S54_1	0.00 858.34	22.10 22.04
S46_S54A	LS 14600	S46S54_4	0.00 1046.26	21.39 21.34
S46_S54A	LS 13500	S46S54_5	0.00	21.21
			588.52	21.14
			1211.12	20.25
			1665.93	20.25
			1863.87	20.47
S46_S54A	LS 3300	S46S54_6	0.00	20.25
			1763.49	20.24
			2885.97	19.06
S55_S59B	LS 17800	S55S59B_2	0.00 2048.94	19.70 19.64
S55_S59B	LS 10000	S55S59B_4	0.00	19.11
			1549.65	18.62
			2213.93	18.51
S55_S59B	LS 4000	S55S59B_6	0.00	18.20
			519.91	18.09
			1390.25	17.84
			2496.78	17.44

SINISTRA IDRAULICA

Ramo	ID sfior	ID golena	x	z
s25_02_s27c	LS 13000	43	0.00	39.79
			29.45	39.79
			614.90	39.96
			905.50	40.31
			1283.97	40.22
			1793.74	40.15
			2321.29	40.06
2658.46	40.02			
s25_02_s27c	LS 9000	41	0	40.49
			531.93	40.33
			1121.94	40.15
			1542.28	39.37
			2055.64	39.18
			2454.878	39.03
s25_02_s27c	LS 3400	128	0.00	38.41
			313.81	38.35
			792.43	38.09
			1163.84	38.00
			2504.73	37.68
s25_02_s27c	LS 3500	127	0	38.42
			363.81	38.35
			842.43	38.09
			1213.84	38
			1433	37.95
s28_s29	LS 9500	127	0	37.67
			377.563	37.55
s28_s29	LS 9000	126	0	37.47
			1816.05	36.49
			4998	36.29
s28_s29	LS 3500	127	0	36.29
			2066	36.21
			3200	35.38
s30_s33b	LS 18000	122	0.00	35.32
			1657.98	35.24
			2527.62	34.89
			3853.13	34.98
			4891.00	34.98
s30_s33b	LS 14000	121	0.00	34.98
			2350.00	34.26

Ramo	ID sfior	ID golena	x	z
s30_s33b	LS 8500	120A	0.00	34.27
			582.39	34.27
			2293.04	33.84
s30_s33b	LS 6500	120B	0.00	33.95
			1365.98	33.60
s30_s33b	LS 4000	119	0.00	33.47
			2133.29	32.52
			2890.09	32.52
			3790.00	32.52
s33c_s36a	LS 19000	118	0	32.32
			1210.6	32.36
			4185.4	31.74
			5030	31.73
S37_S41A	LS 32000	113	0	29.46
			508.87	29.71
			1293.73	29.4
			2344.94	29.25
			3945.07	29.2
S37_S41A	LS 17500	109	0.00	26.90
			312.97	26.93
			2188.89	26.91
			3470.09	26.50
			4645.80	26.06
S37_S41A	LS 9600	22	0	26.5
			712.13	26.38
			1701.33	26.38
			2039.026	26.38
S41B_S45C	LS 16000	18	0.00	25.26
			536.08	25.20
			1892.88	24.93
			2301.99	24.93
S41B_S45C	LS 9150	104-b	0.00	24.47
			928.65	24.20
S46_S54A	LS 26800	14	0.00	24.18
			80.56	23.90
			463.40	22.82
			911.80	20.15
			1430.82	21.49
	1756.52	21.49		

Ramo	ID sfior	ID golena	x	z
S46_S54A	LS 22000	103	0	22.65
			1017.33	22.47
			2106.17	22.38
			3097.25	22.03
			4068.32	21.94
			5167.44	22.31
			6248.69	21.71
7110	21.57			
S46_S54A	LS 9300	101-a	0	20.7
			534.67	20.6
			1506.902	20.45
S46_S54A	LS 8400	101-b	0	20.47
			704.94	20.36
			1759.36	20.28
			1944.756	20.28
S46_S54A	LS 5400	101-a	0	20.28
			1179.051	20.31
S55_S59B	LS 20500	S55S59B_1	0	19.62
			1134.64	19.47
			2048.943	19.49
S55_S59B	LS 13400	S55S59B_3	0	18.74
			245.67	18.74
			1560.08	18.22
			2191.204	18.36
S55_S59B	LS 7000	S55S59B_5	0.00	17.93
			1296.63	17.69
			1815.07	17.67

Bibliografia

AdB Po - DISTART, “Attività di studio, ricerca e supporto tecnico-scientifico nell’ambito del Progetto strategico per il miglioramento delle condizioni di sicurezza idraulica dei territori di pianura lungo l’asta principale del Fiume Po” (Contratto di Ricerca tra Autorità di Bacino Fiume Po e Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque, Rilevamento, Territorio dell’Università di Bologna, Resp. scient. Prof. A. Brath), Relazione Finale, Autorità di Bacino Fiume Po, Parma, 2008.

HEC (Hydrologic Engineering Center) “HEC-RAS River Analysis System User’s Manual”, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California, 2002

Magis.Po - SIMPO Interventi per le golene chiuse del Fiume Po, 1984.

Magis.Po - SIMPO Studio e progettazione di massima delle sistemazioni idrauliche dell’asta principale del Po dalle sorgenti alla foce finalizzate alla difesa e alla conservazione del suolo e alla utilizzazione delle risorse idriche, Convenzione del 14 luglio 1980, 1982.

ST 1.11 Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale e del Rilevamento del Politecnico di Milano (M.G. Tanda, P. Mignosa, M. Tomirotti, R. Gardelli, S. Adami) Caratterizzazione idrologica dell’asta principale del Fiume Po nel tratto che va dalla confluenza della Dora Baltea all’Incile del Po di Goro, 2001.

SP1.1 - Raggruppamento temporaneo di imprese (AQUATER S.p.A. HYDRODATA S.p.A. IDROSER AGENZIA C. LOTTI & ASSOCIATI S.p.A. V.A.M.S. INGEGNERIA S.r.l.) Piene e naturalità degli alvei fluviali, 1997.

ST1.11 DIAR - Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale e del Rilevamento del Politecnico di Milano, Caratterizzazione idrologica dell’asta principale del fiume Po nel tratto che va dalla confluenza della Dora Baltea all’incile del Po di Goro, 2001.

ST1.19 - Consorzio Italcopo Aggiornamento dell’assetto idraulico di progetto del fiume Po dalla

confluenza del Tanaro all'incile del Po di goro mediante analisi modellistica numerica in moto vario, 2003.