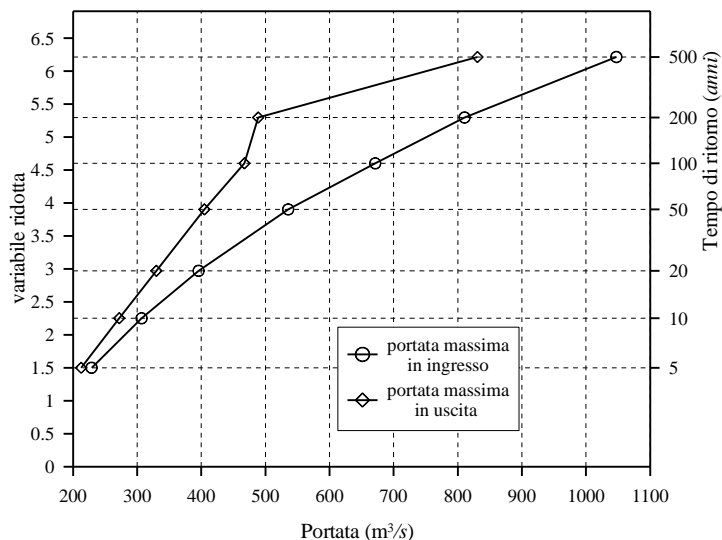
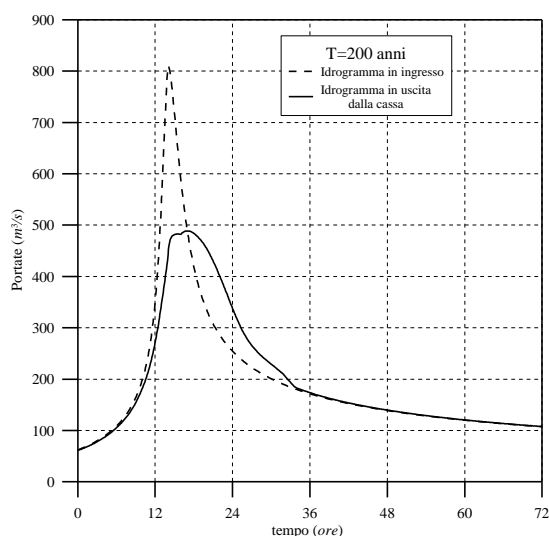


REGIONE EMILIA ROMAGNA
SERVIZIO PROVINCIALE DIFESA DEL SUOLO
RISORSE IDRICHE E FORESTALI - PARMA

***STUDIO DELLA MESSA IN SICUREZZA DEL
TERRITORIO PARMENSE, CON PARTICOLARE
RIFERIMENTO ALLA REALIZZAZIONE DELLA
CASSA DI ESPANSIONE DEL TORRENTE BAGANZA***

RELAZIONE IDRAULICA



**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
DELL'AMBIENTE, DEL TERRITORIO e ARCHITETTURA
UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PARMA**

Responsabile scientifico: Prof. Ing. Paolo Mignosa

Gruppo di lavoro: Ing. Francesca Aureli, Ing. Valerio Braglia,
Ing. Massimo Ferraresi, Ing. Renato Vacondio.

Parma,
dicembre 2003

INDICE

INTRODUZIONE	1
1. COSTRUZIONE E TARATURA DEL MODELLO MATEMATICO DEL SISTEMA PARMA-BAGANZA	3
1.1 Principali caratteristiche morfologiche ed idrauliche del bacino e dell'asta dei torrenti Parma e Baganza	3
1.1.1 <i>Torrente Parma</i>	3
1.1.2 <i>Torrente Baganza</i>	7
1.2 Costruzione del modello matematico	8
1.3 Stima/taratura del coefficiente di scabrezza per il modello matematico ...	12
1.3.1 <i>Taratura del coefficiente di scabrezza per il torrente Parma a valle della città</i>	13
2. VERIFICHE IDRAULICHE SUL SISTEMA PARMA-BAGANZA NELLA CONFIGURAZIONE ATTUALE	18
2.1 Torrente Baganza	18
2.1.1 <i>Analisi dei punti critici</i>	21
2.2 Torrente Parma a monte della confluenza	24
2.3 Torrente Parma dal ponte della ferrovia alla confluenza in Po	26
2.3.1 <i>Analisi dei punti critici</i>	30
2.4 Tratto cittadino del torrente Parma	32
3. ANALISI DEL FUNZIONAMENTO DELLA CASSA DI ESPANSIONE SUL TORRENTE PARMA	36
3.1 Effetto di laminazione nell'ipotesi di funzionamento ideale	39
3.2 Effetto di laminazione considerando il reale funzionamento della cassa ...	40
4. DIMENSIONAMENTO DI MASSIMA DELLA CASSA DI ESPANSIONE SUL TORRENTE BAGANZA	42
4.1 Predimensionamento del volume da assegnare alla cassa	43
4.2 Possibili ubicazioni della cassa	44
4.3 Caratteristiche principali della cassa	46
4.3.1 <i>Caratteristiche geometriche delle casse.....</i>	46
4.3.2 <i>Caratteristiche idrauliche degli organi di scarico.....</i>	48
4.4 Effetto di laminazione della cassa d'espansione sul torrente Baganza	54
4.5 Analisi della sicurezza idraulica del torrente Baganza a valle della cassa	56
5. ANALISI DEL SISTEMA PARMA-BAGANZA NELLE POSSIBILI CONFIGURAZIONI DI PROGETTO	59
5.1 Analisi dei possibili scenari e definizione delle onde di piena	59
5.1.1 <i>Analisi dei valori di sfasamento temporale.....</i>	62
5.2 Comportamento del sistema Parma-Baganza in presenza della sola cassa sul torrente Parma.....	63
5.3 Comportamento del sistema Parma-Baganza in presenza della casse sui torrenti Parma e Baganza.....	71
6. CONCLUSIONI	77
APPENDICE A	80
APPENDICE B	88
APPENDICE C	96
APPENDICE D	104
APPENDICE E	123

INTRODUZIONE

Il Servizio Provinciale Difesa del Suolo e Risorse Idriche Forestali della Regione Emilia Romagna ha affidato al Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio ed Architettura (DICATeA) dell'Università degli Studi di Parma l'incarico di eseguire uno *“Studio della messa in sicurezza del territorio parmense, con particolare riferimento alla realizzazione della cassa di espansione del torrente Baganza”*.

La presente relazione espone le metodologie ed i risultati delle analisi idrauliche svolte, finalizzate all'individuazione delle condizioni attuali di sicurezza e dei miglioramenti ottenibili con il completamento della cassa di espansione sul torrente Parma e con la realizzazione di un'ulteriore cassa di espansione sul torrente Baganza.

La relazione è organizzata nel modo seguente:

- nel capitolo 1 sono descritte le modalità di realizzazione e taratura del modello matematico delle aste del torrente Baganza (tra Marzolaro e la confluenza in Parma) e del Parma (da Panocchia alla confluenza in Po); il modello è stato realizzato, come concordato nella Convenzione, su piattaforma Mike 11 ver.4.0 in modo da essere compatibile con le altre attività previste (modello di previsione in tempo reale) sviluppate da altri soggetti.
- nel capitolo 2 vengono esposti i risultati delle verifiche idrauliche condotte sul sistema fluviale anzidetto nella configurazione attuale, ovvero in assenza delle casse di espansione; i risultati metteranno in evidenza la necessità di interventi strutturali di protezione idraulica del territorio ed in particolare la necessità di laminare le piene prima dell'ingresso delle acque nel tratto urbano della città di Parma, per garantirne un'adeguata sicurezza;
- nel capitolo 3 vengono esposti i risultati delle verifiche idrauliche condotte sul sistema fluviale in presenza della cassa di espansione, in fase di realizzazione, sul torrente Parma in località Alberi di Vigatto; si mostrerà come la cassa, nella configurazione di progetto prevista, sia in grado di migliorare sensibilmente la sicurezza idraulica sia nell'attraversamento urbano di Parma sia in quello di Colorno; ciò nonostante la sicurezza non appare ancora adeguata, in particolare a causa del fatto che le piene del Baganza non sono in nessun modo controllate e

possono combinarsi sfavorevolmente con quelle in uscita dalla cassa sul torrente Parma. Ciò mette in evidenza la necessità di un ulteriore intervento di laminazione controllata da effettuarsi sul torrente Baganza a monte della confluenza;

- nel capitolo 4 viene sviluppato lo studio di massima della cassa di espansione sul torrente Baganza. In particolare vengono individuati due possibili siti e viene valutato l'effetto benefico della cassa, limitatamente alla rimanente tratta del torrente Baganza a valle della cassa stessa;
- nel capitolo 5 viene analizzato l'intero sistema Parma-Baganza in presenza delle due casse. Si mostrerà come anche nelle combinazioni più sfavorevoli delle onde di piena in uscita dalle casse di espansione sia garantita un'adeguata sicurezza per la maggior parte dei territori attraversati dai due torrenti ed in particolare per il tratto cittadino del torrente Parma; si evidenzierà però che, a causa della scarsa officiosità idraulica del tratto urbano in Colorno, la sicurezza di questo centro abitato non sia ancora adeguata;
- nel capitolo 6 vengono sintetizzati i risultati dello studio.

1. COSTRUZIONE E TARATURA DEL MODELLO MATEMATICO DEL SISTEMA PARMA-BAGANZA

1.1 Principali caratteristiche morfologiche ed idrauliche del bacino e dell'asta dei torrenti Parma e Baganza

1.1.1 Torrente Parma

Il torrente Parma nasce dal complesso montuoso formato dal Monte Orsaro (1831 *m s.l.m.*) e dal Monte Marmagna (1851 *m s.l.m.*) che fa da spartiacque con il bacino del torrente Magra in provincia di Massa Carrara, dalla confluenza di tre rami iniziali: il torrente Parma del Lago Santo, delle Guadine e di Badignana. Ad est la quota più alta dello spartiacque con la valle del torrente Enza è quella del Monte Caio (1580 *m s.l.m.*), mentre ad ovest il Monte Borgognone (1401 *m s.l.m.*) fa da spartiacque con il bacino del torrente Baganza. Poco a valle di Corniglio confluisce nel Parma in destra idraulica dalla omonima valle, il torrente Bratica (bacino di 33.6 km^2), il più importante affluente per il tratto montuoso; nel tratto successivo non ci sono più altre confluenze significative, ma solo rii secondari fino a Capoponte dove confluisce, sempre in destra idraulica, il torrente Parmossa (bacino di 32.6 km^2). Appena a monte di Langhirano, in sinistra idraulica sfocia in Parma il rio Fabiola (bacino di 15.7 km^2), ultimo affluente degno di nota. Successivamente tra Langhirano e Torrechiara sfociano in Parma solo rii secondari che sottendono bacini di piccola superficie; inoltre in questa zona hanno inizio le maggiori derivazioni di canali irrigui verso la zona di media e bassa collina: in località Stadirano il canale Maggiore, il canale Comune poco più a valle e la canaletta di Ponticelli in prossimità di Mariano. Oltre a questi prelievi superficiali, vi sono delle perdite naturali dovute ad infiltrazioni nel subalveo e quindi successivamente nelle falde. Il fenomeno ha probabilmente inizio già in prossimità di Ghiare di Corniglio dove il corso d'acqua segue un andamento pressoché coincidente con una faglia fino in corrispondenza della confluenza con il torrente Parmossa.

A valle di Capoponte l'alveo è costituito da uno strato di ghiaie di spessore rilevante; l'infiltrazione si accentua a valle di Torrechiara dove l'alveo è alluvionato, presenta dimensioni trasversali notevoli (fino a 600 *m*) e pendenza minore. E' la classica

situazione in cui un corso d'acqua abbandonando un fondovalle montano, genera una conoide alluvionale depositando materiale solido a causa della perdita di capacità di trasporto per effetto della diminuzione della velocità della corrente.



Figura 1. 1: Confluenza del torrente Baganza nel torrente Parma.

Alla periferia della città confluisce nel Parma il cavo Ariana in destra idraulica, proveniente dalla campagna a sud-est della città; poco più a valle in sinistra idraulica poco a monte del Ponte Italia sfocia il torrente Baganza.

Il tratto urbano del torrente Parma (figura 1.1), che si sviluppa per una lunghezza di poco inferiore a 4 km, presenta andamento pressoché rettilineo e sostanzialmente canalizzato. Si riscontrano diversi progressivi restringimenti della sezione trasversale dovuti sia alla presenza di ponti ma anche all'effettivo avvicinamento delle sponde su cui sorgono il Lungo Parma a destra e le abitazioni di diversi quartieri della città. E' il caso della zona di ponte Dattaro, dove però l'altezza del piano stradale e dell'impalcato del ponte non provocano un'eccessiva ostruzione al moto della corrente. Diversamente accade in prossimità del ponte di Mezzo, che collega il centro storico della città con la zona dell'Oltretorrente a sinistra: l'esigua larghezza della sezione e l'ingombro delle pile del ponte, unitamente all'altezza delle sponde non eccessiva ne fanno uno dei punti più critici del tratto cittadino.

I ponti a valle, Verdi e Bottego, ed il ponte della Ferrovia MI-BO non provocano rilevanti rigurgiti della corrente perché situati laddove la sezione trasversale è sufficientemente larga.

A monte di Baganzola vi è l'immissione, regolata da una chiusa, in riva sinistra del Cavo Abbeveratoia che adduce le acque di scarico della parte della città a sinistra della Parma.

Il tratto del corso d'acqua a valle della città in pianura è caratterizzato da pendenze modeste, con alcuni tratti in contropendenza. verso foce Po.

Ciò provoca un progressivo rallentamento della corrente idrica che nel tempo ha determinato una situazione di alveo pensile rispetto al piano di campagna. Si distingue distintamente fino alla foce una classica morfologia di alveo meandriforme di pianura caratterizzata da due argini laterali che delimitano la golena, invasa solo in occasione di piene rilevanti, e l'alveo nel quale scorrono le portate di magra e di morbida.

E' proprio in questo tratto che si realizza una evidente laminazione del colmo di piena, effetto dovuto alla presenza di zone di golena che invasano consistenti volumi d'acqua ritardandone la velocità per effetto della loro maggiore scabrezza; per questo motivo le onde di piena registrate all'idrometro di Colorno si sviluppano su un arco temporale più

lungo con rami di concentrazione ed esaurimento meno ripidi rispetto a quelli registrati nel tratto cittadino. Già in prossimità di Colorno e fino alla foce in Po l'alveo si restringe ulteriormente divenendo ancor più pensile e, perdendo gran parte degli invasi golenali, presenta argini piuttosto alti che proteggono le abitazioni di campagna che si affacciano vicino.

A Colorno confluiscono nel Parma i tre più importanti canali di pianura (figura 1.3): il canale Lorno, il canale Galasso ed il canale Naviglio Navigabile.

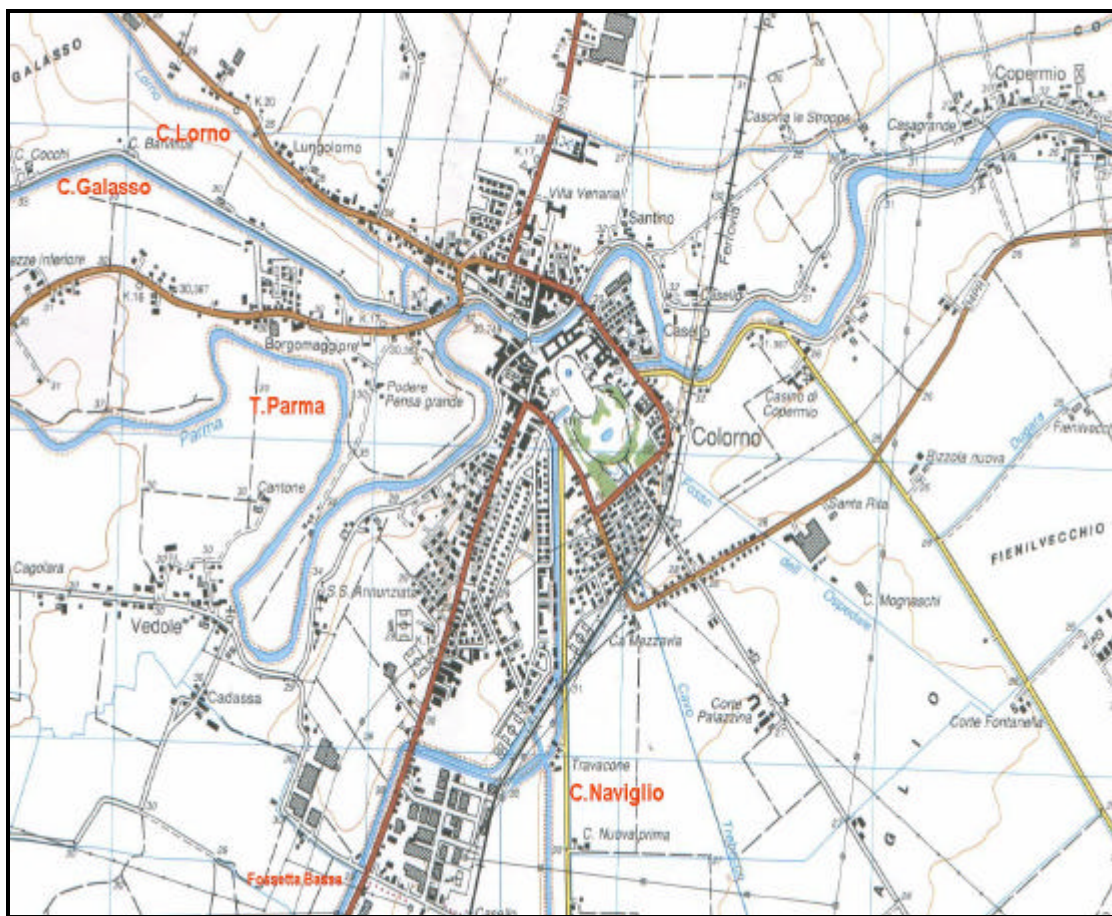


Figura 1. 2: Tratto del torrente Parma in prossimità di Colorno.

Durante gli eventi di piena più gravosi Colorno, per la presenza di questi quattro corsi d'acqua, diventa un nodo idraulico particolarmente critico perché di frequente i suddetti canali sono soggetti a fenomeni di rigurgito provocati dagli elevati livelli idrometrici del Parma che non permettono di scaricare le acque se non molto lentamente.

Poiché Colorno dista solo 7 km dalla foce in Po (in località Croce di Mezzani) ed in questo tratto si apprezza un dislivello del fondo alveo di soli 5 m, è da attendersi un significativo effetto di rigurgito in corrispondenza di elevati stati idrometrici alla confluenza.

1.1.2 Torrente Baganza

Il torrente Baganza ha origine dal complesso del Monte Borgognone (1375 m s.l.m.) e sfocia, dopo un percorso di circa 57 km, nel torrente Parma nella omonima città poco a valle di Ponte Nuovo, sezione in cui è ubicata una stazione idrometrografica ed una stazione di telerilevamento del livello idrico.

Da una analisi della situazione fisica del bacino, ne emergono principalmente due tratti: il tratto montano dalla sorgente sino a Marzolaro ed il successivo di bassa collina fino alla confluenza con il torrente Parma. Il bacino del torrente Baganza presenta forma allungata, all'incirca parallelo al bacino del torrente Parma, così come lo sono i due corsi d'acqua. Nella morfologia del bacino si riscontra una sostanziale asimmetria che si riflette in una altrettanto asimmetrica distribuzione delle aree drenate e della struttura del reticolo idrografico. Il corso d'acqua, soprattutto nella sua parte montana, scorre molto più vicino alla Val Taro che alla Val Parma: lo spartiacque che lo separa dalla Val Taro presenta altitudini più basse (Monte Formigare 1205 m s.l.m., Monte Marino 1068 m s.l.m.) rispetto allo spartiacque con il torrente Parma (Monte Cervellino 1492 m s.l.m., Monte Montagnana 1313 m s.l.m.). Ne consegue che per il tratto che va da Berceto sino a Calestano i versanti di sinistra sono poco estesi (difficilmente il loro sviluppo trasversale al fiume supera il chilometro di lunghezza sino ad un minimo di 500 metri) e molto pendenti. In sponda sinistra invece i versanti sono più dolci, il reticolo afferente all'asta principale in fondovalle è ordinato in modo piuttosto elementare e presenta una maggiore densità di drenaggio rispetto al versante sinistro.

Da Marzolaro in poi l'alveo del torrente si allarga e assume aspetto alluvionato, si hanno infiltrazioni nel subalveo che determinano lunghi periodi di totale secca del fiume; poi l'alveo si restringe nuovamente a San Martino Sinzano fino alla confluenza raggiungendo valori minimi di circa 50 metri in prossimità di Ponte Nuovo.

Poco a monte di Sala Baganza cessa completamente la funzione drenante del torrente nei confronti dei versanti e già da Marzolaro hanno inizio le derivazioni idriche superficiali quali il Canale del Vescovo ed il Canale di Felino. Unico affluente degno di nota del torrente Baganza è lo scolmatore del torrente Cinghio che vi si immette nei pressi di Gaione; infine poco a monte dell'idrometrografo di ponte Nuovo, sfocia in sponda sinistra lo scolmatore del Cavo Baganzale.

Circa 800 metri a valle di Ponte Nuovo il Baganza si immette nel torrente Parma.

1.2 Costruzione del modello matematico

Per la costruzione del modello matematico si sono utilizzati i rilievi disponibili delle sezioni dei due corsi d'acqua. Per il torrente Parma fino alla confluenza col Baganza e per il tratto a valle della città fino alla confluenza in Po, si è fatto riferimento al rilievo effettuato nell'anno 2000 dal Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Parma in convenzione con l'Amministrazione Provinciale di Parma.

Per il tratto in corrispondenza della città di Parma si è utilizzato il rilievo del 1972 effettuato dall'Ufficio del Genio Civile di Parma.

Per il tratto del torrente Baganza si è fatto riferimento al rilievo del 1998 effettuato dall'Assessorato Ambiente della Provincia di Parma.

Nelle tabelle 1.1 e 1.2 sono riportate le caratteristiche principali delle sezioni utilizzate nella costruzione del modello matematico sia per il torrente Baganza che per il torrente Parma.

Ogni sezione è individuata da una distanza progressiva a partire dalla prima sezione rilevata a monte. Le progressive sono pertanto diverse per il torrente Parma e per il torrente Baganza. Nelle terzultima e penultima colonna sono indicate rispettivamente le quote massime in sponda sinistra e destra, dedotte dal rilievo delle sezioni disponibili. Talvolta tali quote non corrispondono a quelle di effettivo contenimento (piano campagna o coronamento arginale) per incompletezza del rilievo topografico. Nelle sezioni in cui i risultati del calcolo indicheranno un franco insufficiente od addirittura negativo, occorrerà pertanto verificare se si tratta di insufficienza reale o solo

descrittiva. Nei casi in cui è stato possibile, questa verifica è già stata fatta e riportata nella relazione. Negli altri casi la verifica richiederà un'integrazione del rilievo.

Sezione n.	Anno rilievo	Prog. (m)	Quote (m s.l.m.)		
			max sx	max dx	fondo
98	2000	48247	164.27	165.83	161.50
95	2000	49955	149.77	150.51	145.70
94	2000	50172	147.43	148.62	143.32
92	2000	51285	136.94	137.32	133.10
89	2000	52122	128.88	129.21	125.00
84	2000	55122	109.59	109.20	94.00
81	2000	55763	98.17	99.51	90.15
79	2000	56692	90.49	91.49	86.00
76	2000	59195	75.67	75.81	70.80
15	1972	60851	68.71	68.63	61.26
14	1972	61496	67.70	67.70	60.13
Ponte Dattaro	m	1972	61806	67.00	67.20
	v	1972	61826	67.00	67.20
13	1972	61902	62.65	64.50	57.18
12_bis	1972	62110	63.44	64.53	56.35
12	1972	62312	63.34	63.04	56.46
11 Confluenza	1972	62606	62.90	63.58	55.32
Ponte Italia	m	1972	62756	64.40	64.00
	v	1972	62776	64.40	64.00
10	1972	62874	63.21	63.16	54.43
9	1972	63004	62.19	62.05	54.00
8 bis	1972	63164	61.00	61.76	54.48
Ponte Caprazzucca	m	1972	63179	60.80	60.80
	v	1972	63199	60.80	60.80
8	1972	63324	60.30	60.30	52.53
7	1972	63489	59.70	59.70	51.89
6 bis	1972	63609	59.46	59.46	52.23
Ponte di mezzo	m	1972	63619	58.00	59.20
	v	1972	63639	58.00	59.20
6	1972	63669	58.90	58.90	50.89
5	1972	63799	58.44	58.44	50.89
4 bis	1972	63859	59.27	59.23	50.91
Ponte Verdi	m	1972	63880	58.22	58.16
	v	1972	63890	58.22	58.16
4	1972	64004	58.00	58.00	50.72
3	1972	64168	58.12	57.95	49.67
2 bis	1972	64227	57.61	59.04	49.66
Ponte Bottego	m	1972	64287	58.20	57.80
	v	1972	64297	58.20	57.80
Idrometro	1972	64337	56.70	55.45	49.31

Tabella 1. 1 : Caratteristiche principali delle sezioni del torrente Parma

Sezione n.	Anno rilievo	Prog. (m)	Quote (m s.l.m.)		
			max sx	max dx	fondo
2	1972	64362	56.71	55.66	49.52
1	1972	64432	55.48	55.48	49.72
0 bis	1972	64490	55.54	55.54	49.42
Ponte Ferrovia	m	1972	64500	57.40	49.40
	v	1972	64520	57.40	48.40
0	1972	64670	54.56	55.13	48.36
71	2000	65686	51.10	50.97	44.59
69	2000	68260	48.10	47.25	39.59
68	2000	69070	46.94	46.14	39.20
67	2000	70716	46.13	46.84	36.95
66	2000	71081	46.03	45.29	35.47
64	2000	72328	44.96	44.59	34.51
62	2000	73643	44.07	44.10	32.12
59	2000	75476	43.26	43.22	31.65
55	2000	77574	42.73	42.74	29.75
53	2000	78712	41.90	42.15	28.06
49	2000	80571	41.25	41.01	27.86
46	2000	82243	40.72	40.76	26.85
44	2000	83083	40.19	40.16	26.39
42	2000	84081	39.61	39.36	25.02
38	2000	85897	38.40	38.85	24.65
36	2000	86932	37.94	37.81	23.73
Passerella	m	2000	87467	37.64	25.50
	v	2000	87510	37.64	25.50
34	2000	87887	37.70	37.39	24.61
32	2000	89169	36.63	36.43	22.75
29	2000	90231	35.76	35.93	22.26
26	2000	91807	34.59	34.73	22.72
21	2000	93706	33.93	33.51	20.27
20	2000	94159	33.32	33.09	21.35
18	2000	94582	32.50	32.54	22.23
Ponte Garibaldi	m	2000	94819	32.37	22.56
	v	2000	94839	32.37	22.56
Ponte Circonval.	m	2000	95064	31.73	23.13
	v	2000	95084	31.73	23.13
16	2000	95117	31.80	32.08	22.15
14	2000	95852	31.91	32.05	21.35
13	2000	96456	31.29	31.02	20.12
10	2000	97766	31.37	31.25	18.75
9	2000	98056	31.21	31.25	19.04
7	2000	99296	30.68	31.11	20.54
5	2000	100220	29.44	29.44	18.50
3	2000	101244	28.21	29.24	18.11
1	2000	102366	28.27	26.44	17.22

Tabella 1. 1 (continuazione): Caratteristiche principali delle sezioni del torrente Parma

Sezione n.	Anno rilievo	Prog. (m)	Quote (m s.l.m.)		
			max sx	max dx	fondo
57	1998	5910	306.86	307.86	301.87
56	1998	6330	299.54	299.15	296.90
55	1998	7165	286.05	288.05	283.88
54	1998	7685	279.55	283.74	276.15
53	1998	8335	265.77	269.78	266.42
52	1998	8900	260.27	261.92	257.60
51	1998	9250	256.11	255.32	253.14
50	1998	9715	249.08	248.98	246.29
P.te San Vitale	1998	9755	249.00	249.00	244.89
49	1998	10070	243.37	242.97	240.75
48	1998	10470	237.28	237.58	234.65
47	1998	11050	229.47	231.86	226.60
46	1998	11450	223.68	225.75	222.37
45	1998	11855	219.90	222.28	216.78
44	1998	12110	216.41	216.30	212.80
43	1998	12295	214.38	214.00	210.73
42	1998	13070	203.52	204.70	200.67
41	1998	13505	199.98	201.18	194.87
40	1998	14345	187.49	190.08	184.71
39	1998	14875	181.64	182.89	178.46
38	1998	15400	175.49	176.89	172.26
37	1998	15890	169.76	170.09	166.64
36	1998	16220	169.38	169.40	162.26
P.te Sala Baganza	1998	16223	169.83	169.90	162.38
35	1998	16282	164.72	164.54	161.76
34	1998	16655	159.78	160.51	156.93
33	1998	17149	154.59	154.71	151.00
31	1998	17510	150.72	151.11	147.30
28	1998	18135	145.63	143.70	140.17
24	1998	19604	128.60	130.29	124.36
22	1998	20120	123.20	123.49	119.50
21	1998	20316	119.87	120.87	117.67
19	1998	20652	117.10	117.87	114.39
18	1998	21240	111.38	111.80	108.50
17	1998	21737	107.27	107.26	104.35
16	1998	22171	104.16	103.57	100.28
14	1998	23054	95.61	95.61	91.35
13	1998	23561	91.94	90.94	87.50
12	1998	23951	88.99	89.14	83.73
11	1998	24403	85.44	85.73	80.68
10	1998	24841	83.19	83.22	78.01
9	1998	25286	79.91	81.20	74.78
8	1998	25625	76.85	78.15	71.93
7	1998	26037	74.95	74.49	68.52
6	1998	26286	72.89	72.90	66.92

Tabella 1. 2: Caratteristiche principali delle sezioni del torrente Baganza

Sezione n.	Anno rilievo	Prog. (m)	Quote (m s.l.m.)		
			max sx	max dx	fondo
5	1998	26765	69.69	67.49	63.90
4	1998	27062	67.77	67.79	62.19
3	1998	27431	65.33	65.44	59.73
1	1998	27682	64.50	64.10	59.37
Ponte Nuovo	m	1998	27802	64.50	64.60
	v	1998	27822	64.50	64.60
2	1998	27840	64.34	64.04	58.19
3	1998	28015	62.74	62.50	57.60

Tabella 1. 2 (continuazione): Caratteristiche principali delle sezioni del torrente Baganza.

1.3 Stima/taratura del coefficiente di scabrezza per il modello matematico

La valutazione del coefficiente di scabrezza, necessaria per calcolare le resistenze al moto, può essere effettuata in base a indicazioni reperibili nella letteratura tecnica o, ove possibile, può essere determinata per tentativi simulando mediante il modello uno o più eventi storici dei quali si abbiano registrazioni di altezze idrometriche e/o portate in più sezioni. Nel caso in studio quest'ultima procedura è stata applicata al tratto cittadino del torrente Parma, dove è disponibile un idrometro dotato di scala di deflusso, ed al tratto a valle della città. Per il tratto del torrente Parma a monte della città e per il torrente Baganza, invece, si sono assunti dei valori dedotti dalla letteratura tecnica, sulla base anche di sopralluoghi e valutazioni della granulometria del materiale d'alveo. Si sono pertanto assunti i seguenti valori:

- nel tratto del torrente Baganza compreso tra la sezione del Ponte di Marzolarà (Sez. n.57, prog. 5910 m) e quella di confluenza in Parma (Sez. n.3, prog. 28015 m), un coefficiente di scabrezza di Strickler variabile linearmente con la progressiva, da $c=20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ a $c=30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$;
- nel tratto di torrente Parma compreso tra la sezione Sez. N.98 (prog. 48247 m) e la N.12-bis (prog. 62110 m) un coefficiente di scabrezza di Strickler variabile con la progressiva da $c=20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ a $c=35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$;
- per tutto il tratto cittadino, dalla sezione 15 alla sezione 0, un coefficiente di scabrezza di Strickler pari a $c=35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$; tale valore è stato ricavato in modo tale

da ricostruire al meglio la scala di deflusso della stazione di Ponte Bottego (si veda il paragrafo 2.1.5 della Relazione Idrologica)

1.3.1 Taratura del coefficiente di scabrezza per il torrente Parma a valle della città

Come ricordato precedentemente, il tratto del torrente Parma a valle della città è caratterizzato da pendenze modeste, condizione che provoca un progressivo rallentamento della corrente idrica. Si distingue distintamente fino alla foce una classica morfologia di alveo meandriforme di pianura caratterizzata da due argini laterali che delimitano la golena, invasa solo in occasione di piene rilevanti, e l'alveo inciso nel quale scorrono le portate di magra e di morbida.

Si realizza in questo tratto una significativa laminazione del colmo di piena, per effetto dei volumi invasabili e del maggiore valore di scabrezza assunto dalle aree golenali; per questo motivo le onde di piena registrate all'idrometro di Colorno si sviluppano su un arco temporale più lungo, con rami di concentrazione ed esaurimento meno ripidi, rispetto a quelli registrati nel tratto cittadino.

Per la taratura del coefficiente di scabrezza e per verificare la capacità del modello matematico di descrivere i complessi fenomeni di propagazione e invaso si è studiato in dettaglio l'evento di piena del 13-17 novembre 2000, considerando il tratto di Parma compreso tra la sezione dell'idrometro di Ponte Bottego (progressiva 64337 m) e la confluenza in Po.

La taratura della scabrezza e la bontà della descrizione è stata effettuata per tentativi, cercando di riprodurre al meglio l'andamento dei livelli registrati dal teleidrometro posto a valle di Ponte Garibaldi a Colorno.

Come condizione di monte è stato inserito nel modello l'idrogramma di piena ottenuto dalla conversione, attraverso la scala di deflusso, dei livelli registrati all'idrometrografo di Ponte Bottego (figura 1.3).

Come condizione di valle, verificato che gli stati idrometrici del fiume Po influenzano quelli in corrispondenza del teleidrometro posto a valle di P.te Garibaldi a Colorno (progressiva 94829 m), si è cercato di ricostruire l'andamento delle quote idriche alla confluenza Parma-Po durante l'evento. In mancanza di tali informazioni, si è proceduto

per interpolazione lineare sulla base degli andamenti registrati agli idrometrografi di Casalmaggiore e di Boretto. L'andamento ottenuto, utilizzato come condizione al contorno di valle nel modello matematico, è riportato in figura 1.4.

Dopo vari tentativi si è determinato un valore di scabrezza pari a $c=25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per l'alveo inciso ed un valore di scabrezza pari a $c=18 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per le aree golenali.

A titolo di esempio nella figura 1.5 è riportata la suddivisione effettuata in corrispondenza della sezione n.53 (progressiva 78712 m), nella quale è indicata la quota alla quale avviene il cambio di valore di scabrezza.

In figura 1.6 sono riportati gli andamenti dei livelli idrici registrati dal teleidrometro di P.te Garibaldi a Colorno e quelli ottenuti attraverso la simulazione con il modello matematico.

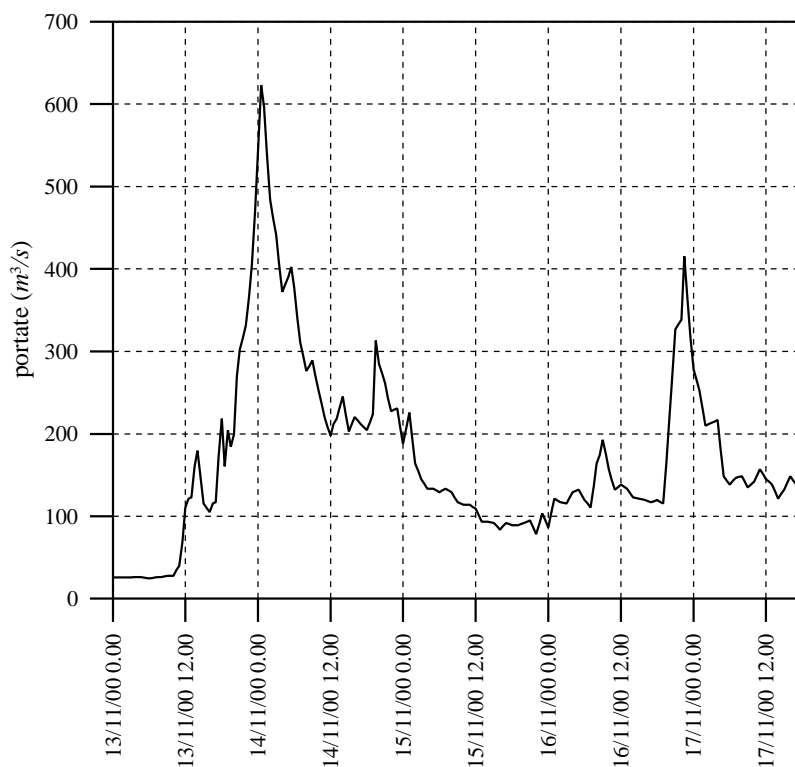


Figura 1.3: Onda di piena registrata a P.te Bottego (condizione al contorno di monte).

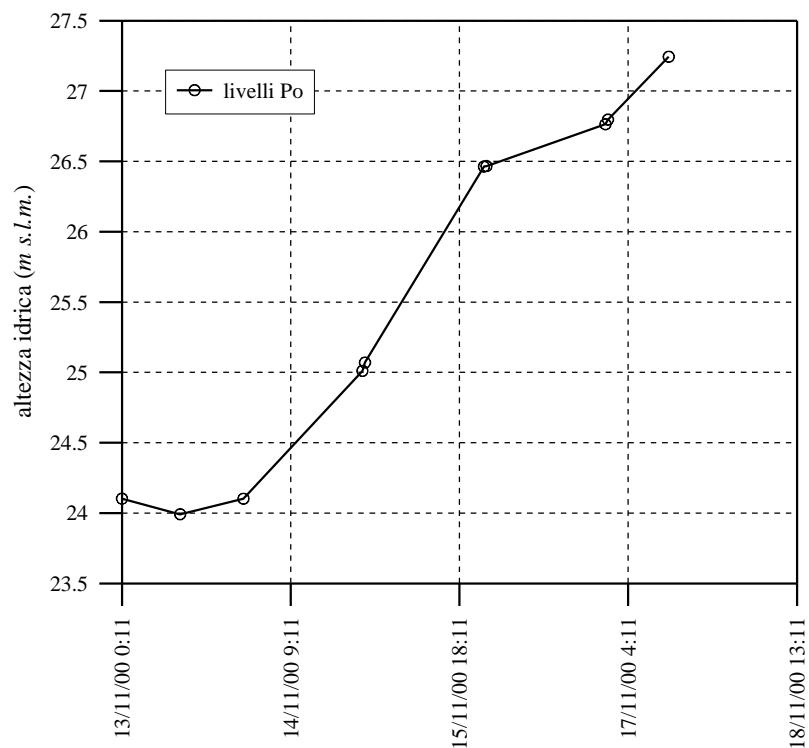


Figura 1.4: Andamento dei livelli idrici alla confluenza in Po (condizione al contorno di valle).

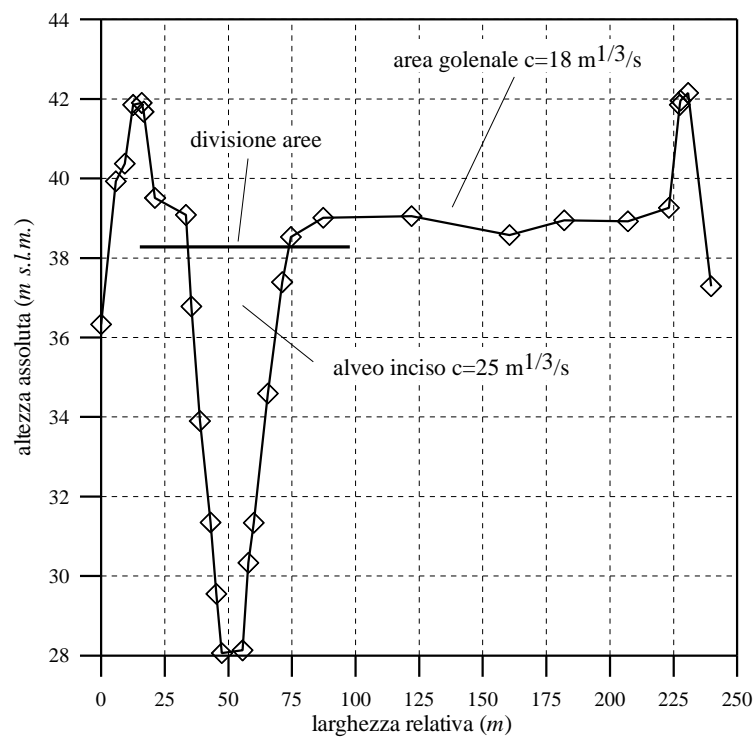


Figura 1.5: Esempio di suddivisione della sezione ed attribuzione dei valori di scabrezza (sezione n.53).

Dal confronto si può apprezzare una buona ricostruzione dell'andamento registrato; simulazioni con valori di scabrezza più elevati producono un ritardo dei colmi calcolati rispetto a quelli registrati ed una peggiore ricostruzione dell'onda nel suo complesso.

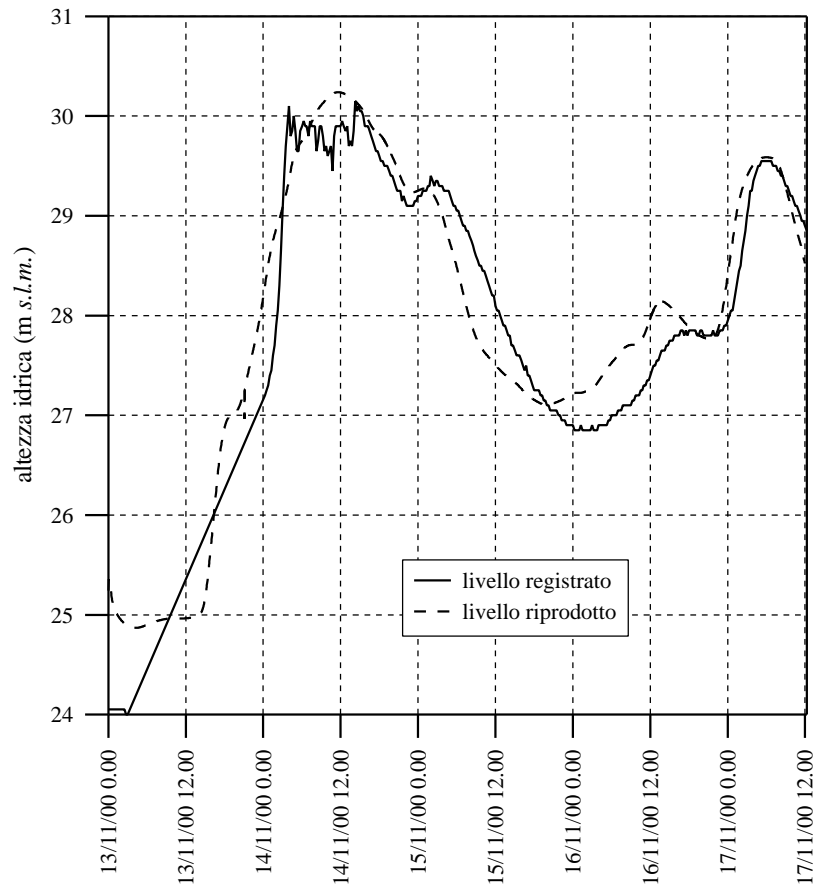


Figura 1. 6: Confronto tra i livelli idrici registrati e calcolati a Colorno per l'evento con inizio il 13/11/2000.

Per verificare la validità dei coefficienti di scabrezza così ottenuti, si è proceduto alla simulazione degli eventi storici dell'ottobre 1999 e dell'ottobre 2002, ottenendo i risultati riportati nelle figure 1.7 e 1.8. Da esse si può notare che la ricostruzione dei livelli idrometrici osservati, ottenuta mediante il modello matematico, è soddisfacente e che pertanto sia la rappresentazione geometrica implementata nel modello che i coefficienti di scabrezza attribuiti sono in grado di riprodurre con buona approssimazione il comportamento reale del corso d'acqua.

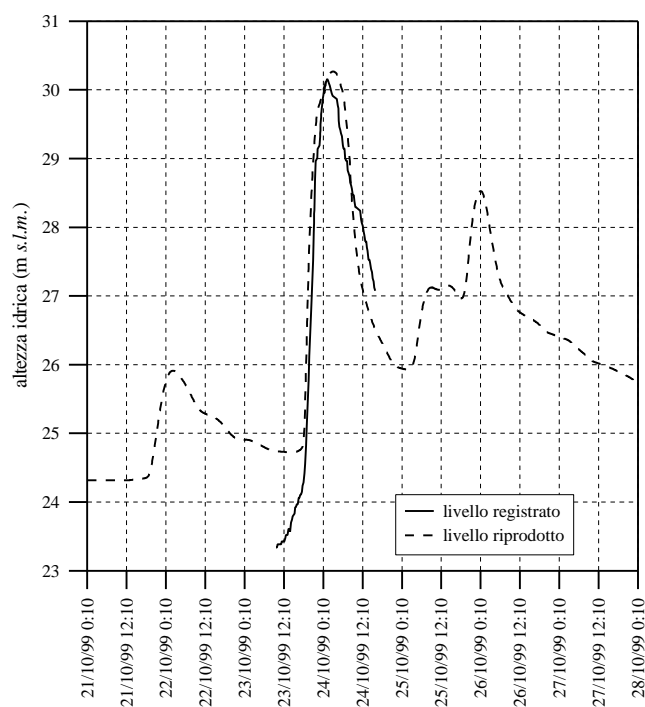


Figura 1. 7: Confronto tra i livelli idrici registrati e calcolati a Colorno per l'evento con inizio il 21/10/1999.

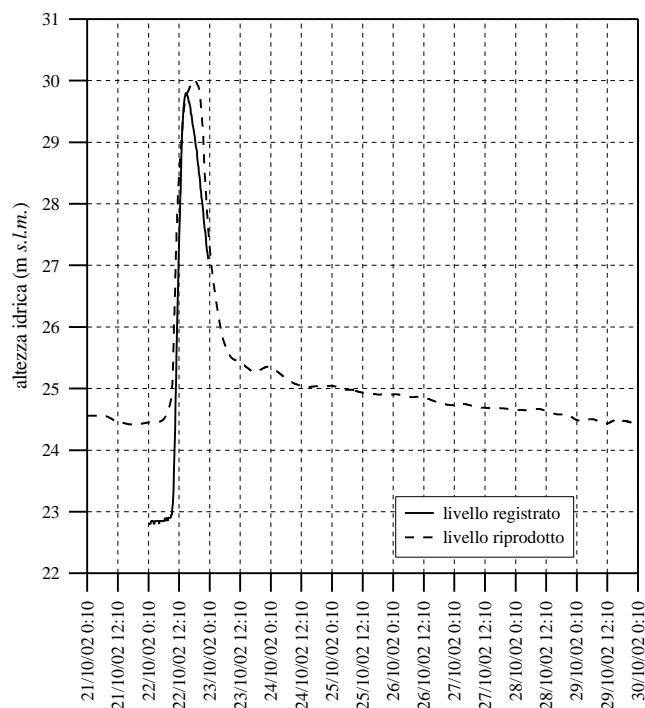


Figura 1. 8: Confronto tra i livelli idrici registrati e calcolati a Colorno per l'evento con inizio il 21/10/2002.

2. VERIFICHE IDRAULICHE SUL SISTEMA PARMA-BAGANZA NELLA CONFIGURAZIONE ATTUALE.

Una volta costruito e tarato il modello numerico del sistema fluviale Parma-Baganza si è proceduto a diverse simulazioni sia in condizioni di moto vario che permanente allo scopo di analizzarne il comportamento e determinare i livelli idrici massimi attesi in diversi scenari. Si è verificato il comportamento del fiume per eventi di 200 anni di tempo di ritorno, evidenziando le zone a rischio idraulico più elevato, sia a monte che a valle della città.

Nel seguito vengono presentati i risultati principali delle simulazioni effettuate, suddivisi nei seguenti tratti:

- Torrente Baganza a monte della confluenza;
- Torrente Parma a monte della confluenza;
- Torrente Parma dalla prima sezione a valle della città fino alla confluenza in Po;
- Torrente Parma nel tratto cittadino.

2.1 *Torrente Baganza*

Una prima simulazione numerica è stata effettuata imponendo come condizione al contorno di monte nella sezione iniziale del modello, corrispondente al Ponte di Marzolaro (Sezione n.57, progressiva 5910 m), l'onda di piena sintetica di 200 anni di tempo di ritorno ottenuta nello studio idrologico.

In figura 2.1 sono riportate sia l'onda di piena sintetica imposta come condizione al contorno, sia quella ottenuta dalla simulazione per la sezione n.1 in corrispondenza dell'idrometrografo di Ponte Nuovo, poco a monte della confluenza con il torrente Parma. Dal confronto tra le due onde si evince come il comportamento del torrente Baganza sia essenzialmente di tipo cinematico: esso tende a trasferire le onde di piena senza modificare apprezzabilmente né il valore del picco né la distribuzione dei volumi. La quota idrica massima ed il franco netto ottenuto dalla simulazione sono riportati in tabella 2.1. Nella medesima tabella è riportato anche il valore di portata compatibile, inteso come il valore di portata che, in condizioni di moto permanente, è in grado di transitare in quella sezione garantendo un franco pari ad un metro. Tali valori di portata

sono stati ottenuti attraverso simulazioni in condizioni di moto permanente. Nella figura 2.2 è riportato l'andamento del franco in funzione della progressiva lungo l'alveo. Dalla tabella e dalla figura si evince che in numerose sezioni il livello idrico massimo non solo lede il franco di un metro (i valori sono riportati in corsivo) ma è addirittura maggiore del livello di contenimento attuale (i valori sono riportati in corsivo grassetto), valutato in base della descrizione delle sezioni disponibile. In questi casi il modello non riproduce il reale fenomeno di esondazione, ma estende verticalmente verso l'alto le sezioni in modo da contenere sempre in alveo l'intera portata transitante. Per verificare se tali risultati corrispondono ad una reale insufficienza o ad una carenza descrittiva, i punti critici sono stati analizzati singolarmente.

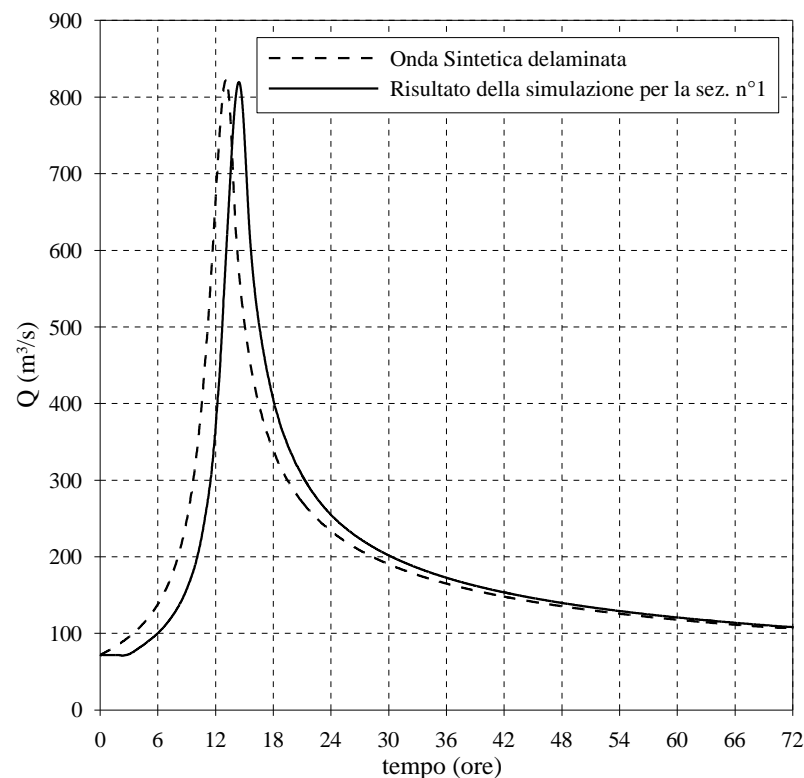


Figura 2.1: Onde di piena in ingresso al modello ed in corrispondenza dell'idrometrografo di Ponte Nuovo.

n° sezione	Progressiva (m)	Quota max sponda sx (m s.l.m.)	Quota max sponda dx (m s.l.m.)	Quota idrica massima (m s.l.m.)	franco minimo (m)	Portata compatibile (m ³ /s)
57	5910	306.86	307.86	305.38	1.48	>800
56	6330	299.54	299.15	298.98	0.17	230
55	7165	286.05	288.05	286.54	-0.49	<200
54	7685	279.55	283.74	278.32	1.23	>800
53	8335	265.77	269.78	265.01	0.76	600
52	8900	260.27	261.92	259.92	0.35	300
51	9250	256.11	255.32	254.92	0.40	270
50	9715	249.08	248.98	247.87	1.11	>800
P. San Vitale	9755	249.00	249.00	247.27	1.73	>800
49	10070	243.37	242.97	242.65	0.32	230
48	10470	237.28	237.58	236.53	0.75	680
47	11050	229.47	231.86	228.98	0.49	460
46	11450	223.68	225.75	224.32	-0.64	<200
45	11855	219.90	222.28	219.05	0.85	720
44	12110	216.41	216.30	215.47	0.83	600
43	12295	214.38	214.00	212.98	1.02	>800
42	13070	203.52	204.70	202.85	0.67	510
41	13505	199.98	201.18	197.15	2.83	>800
40	14345	187.49	190.08	187.19	0.30	430
39	14875	181.64	182.89	180.60	1.04	>800
38	15400	175.49	176.89	174.73	0.76	660
37	15890	169.76	170.09	169.08	0.68	600
36	16220	169.38	169.40	164.89	4.49	>800
P. Sala Baganza	16223	169.83	169.90	164.86	4.97	>800
35	16282	164.72	164.54	163.70	0.84	650
34	16655	159.78	160.51	159.15	0.63	425
33	17149	154.59	154.71	153.42	1.17	>800
31	17510	150.72	151.11	149.65	1.07	>800
28	18135	145.63	143.70	142.62	1.08	>800
24	19604	128.60	130.29	127.45	1.15	>800
22	20120	123.20	123.49	121.84	1.36	>800
21	20316	119.87	120.87	119.71	0.16	<200
19	20652	117.10	117.87	116.48	0.63	420
18	21240	111.38	111.80	110.78	0.60	455
17	21737	107.27	107.26	106.37	0.89	670
16	22171	104.16	103.57	102.65	0.92	730
14	23054	95.61	95.61	94.19	1.42	>800
13	23561	91.94	90.94	90.06	0.88	730
12	23951	88.99	89.14	86.83	2.16	>800
11	24403	85.44	85.73	83.94	1.50	>800
10	24841	83.19	83.22	80.56	2.63	>800
9	25286	79.91	81.20	77.62	2.29	>800
8	25625	76.85	78.15	75.02	1.83	>800
7	26037	74.95	74.49	72.21	2.28	>800
6	26286	72.89	72.90	70.42	2.47	>800
5	26765	69.69	67.49	68.25	-0.76	290
4	27062	67.77	67.79	66.24	1.53	>800
3	27431	65.33	65.44	64.63	0.70	740
1	27682	64.50	64.10	63.77	0.33	625
P.Nuovo monte	27802	64.495	64.60	63.49	1.01	>800
P.Nuovo valle	27822	64.495	64.60	62.84	1.66	>800
2	27840	64.34	64.04	62.71	1.33	>800
3	28015	62.74	62.50	61.52	0.98	735

Tabella 2.1: Torrente Baganza: risultati principali delle simulazioni per T=200 anni. La portata compatibile è da intendersi con 1 m di franco.

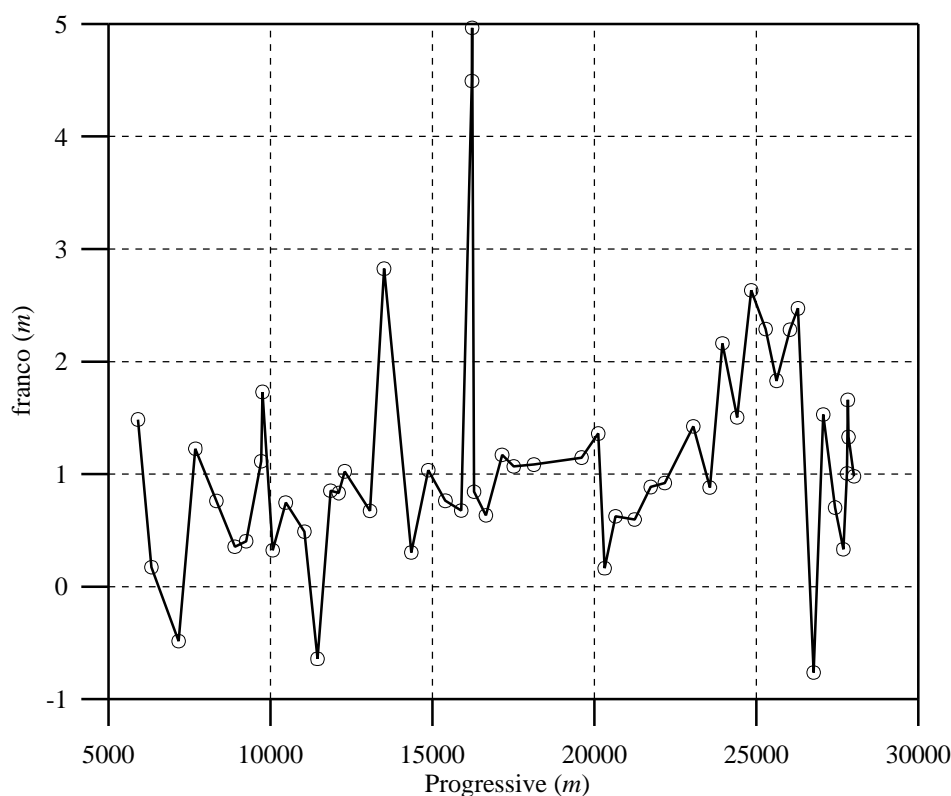


Figura 2.2: Franco in funzione della progressiva nel torrente Baganza per la simulazione avente come condizione al contorno di monte l'onda sintetica di 200 anni di tempo di ritorno.

2.1.1 Analisi dei punti critici

Le sezioni n° 55 e 46 di progressiva rispettivamente 7165 m e 11450 m presentano una insufficienza idraulica dovuta ad una incompletezza dei dati del rilievo. Infatti le sezioni descritte nel modello sono quelle del rilievo del 1998 ma osservando le planimetrie (figure 2.3, 2.4) ci si rende conto che le sezioni rilevate sono solo una porzione della reale sezione trasversale del fiume in quel punto. Anche le reali quote di contenimento in sponda sinistra appaiono maggiori di quelle riportate nelle sezioni del rilievo. Dai punti quotati riportati sulla cartografia regionale si stimerebbe infatti una quota di contenimento per la sponda sinistra pari a 292 m s.l.m. per la sezione n. 55 e maggiore di 224 m s.l.m. per la sezione n. 46.

Poiché è noto che tra le quote riportate sulla cartografia regionale e quelle rilevate topograficamente vi possono essere differenze anche molto significative, una valutazione definitiva richiederebbe una più approfondita indagine ed un ancoraggio tra i due rilievi.

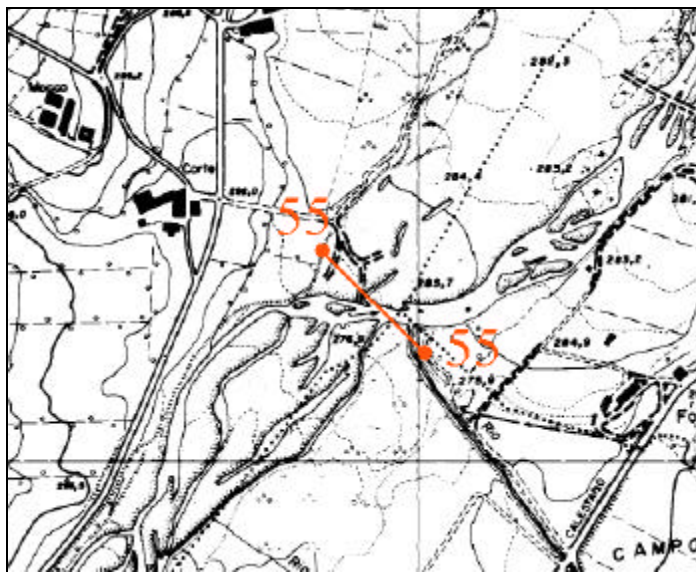


Figura 2.3: Planimetria indicante la sez. n.55 (prog. 7165 m), poco a valle di Marzolarà.

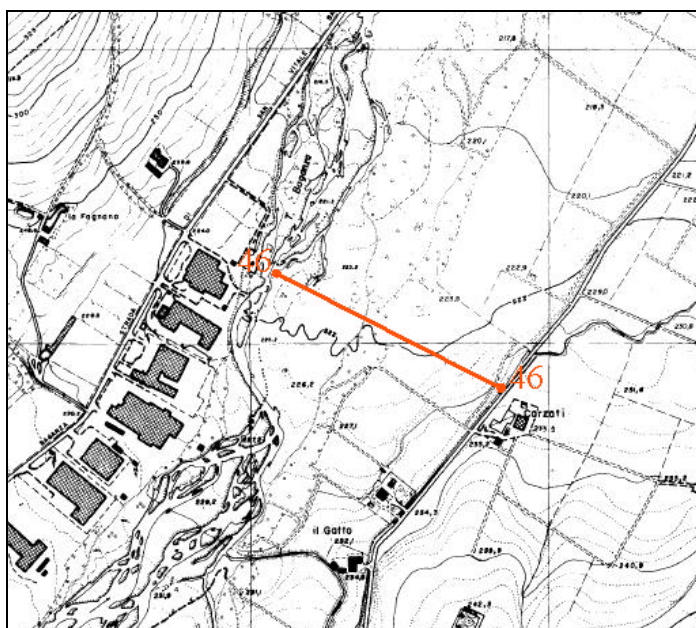


Figura 2.4: Planimetria indicante la sez. N.46 (prog. 11450 m), poco a monte di S. Michele Gatti.

La sezione n.21 ha un franco di soli 0.16 m che risulta inadeguato. Osservando la figura 2.5 si nota come la sezione rilevata corrisponda più o meno all'intero alveo inciso del fiume.

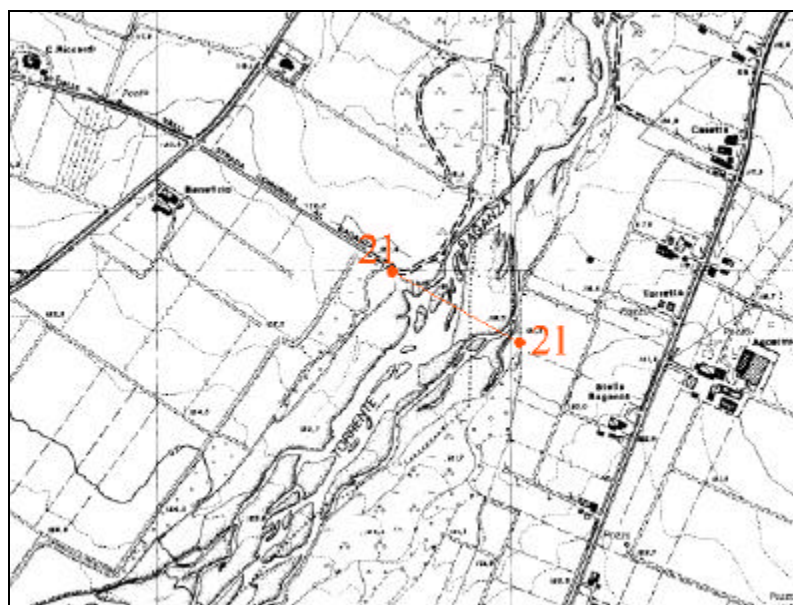


Figura 2.5: Planimetria indicante la sez. n.21 (prog. 20316 m), a valle di Sala Baganza.

La sezione n.5 ha un franco negativo, ovvero non è in grado di contenere la portata duecentennale. La cartografia non è sufficientemente dettagliata e non consente di trarre alcuna conclusione. Il rilievo della medesima sezione effettuato nel 1972 si estende però maggiormente in sponda destra, con quote di contenimento decisamente superiori. E' pertanto probabile che, anche in questo caso, l'insufficienza non sia reale ma sia dovuta ad una carenza descrittiva della sezione.



Figura 2.6: Planimetria indicante la sez. n.5 (prog. 26765 m), nel tratto cittadino del torrente Baganza.

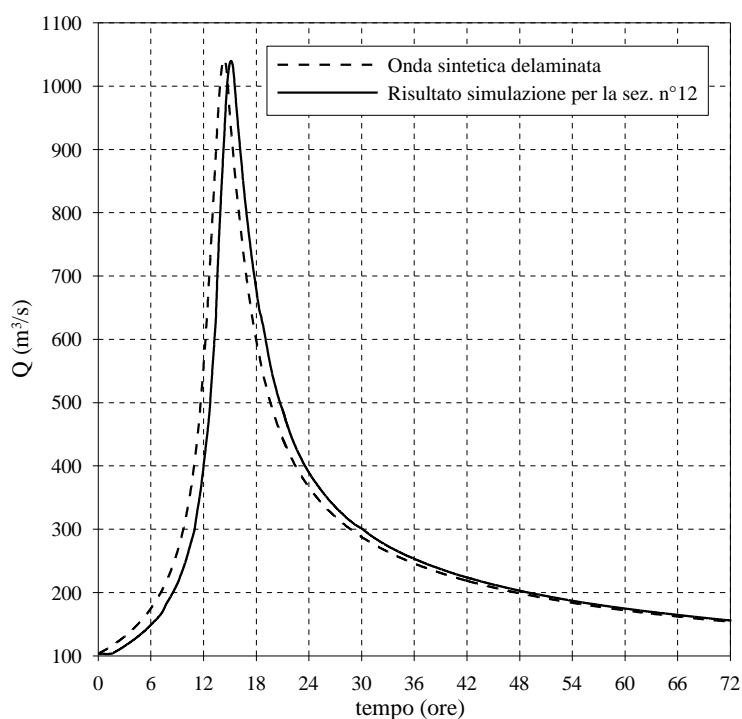


Figura 2.8: Condizione al contorno della simulazione effettuata e risultato nella sezione n.12 .

La quota idrica massima ed il franco netto ottenuto dalla simulazione sono riportati in tabella 2.2.

n° sezione	Progressiva (m)	Quota max sponda sx (m s.l.m.)	Quota max sponda dx (m s.l.m.)	Quota idrica massima (m s.l.m.)	franco minimo (m)
98	48247	164.27	165.83	163.87	0.40
95	49955	149.77	150.51	148.17	1.60
94	50172	147.43	148.62	145.98	1.45
92	51285	136.94	137.32	135.29	1.65
89	52122	128.88	129.21	127.40	1.48
84	55122	109.59	109.2	95.97	13.23
81	55763	98.17	99.51	94.11	4.06
79	56692	90.49	91.49	88.53	1.96
76	59195	75.67	75.81	73.74	1.93
15	60851	68.71	68.63	66.01	2.62
14	61496	67.7	67.7	64.81	2.89
Dattaro Monte	61806	67	67.2	64.20	2.80
Dattaro Valle	61826	67	67.2	61.98	5.02
13	61902	62.65	64.5	61.21	1.44
12_bis	62110	63.44	64.53	60.85	2.59
12	62312	63.34	63.04	60.46	2.58

Tabella 2.2: Torrente Parma: risultati principali delle simulazioni per T=200 anni.

Nella figura 2.9 è riportato l'andamento del franco in funzione della progressiva lungo l'alveo. Dalla tabella e dalla figura si evince che, ad eccezione della prima sezione modellata, il franco netto è sempre superiore ad un metro. Gli elevati valori del franco in corrispondenza della sezione n.84 sono dovuti alle arginature della costruenda cassa di espansione. Di tale cassa non è stato ancora realizzato il manufatto limitatore, perciò attualmente essa risulta non funzionante.

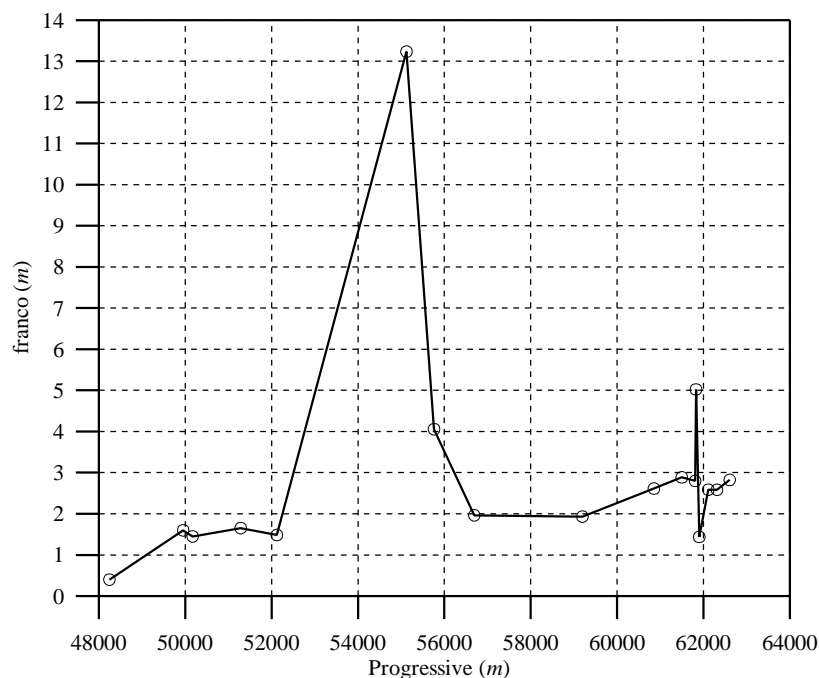


Figura 2.9: Andamento del franco in funzione della progressiva nel torrente Parma per la simulazione avente come condizione al contorno di monte l'onda sintetica di 200 anni di tempo di ritorno.

2.3 *Torrente Parma dal ponte della ferrovia alla confluenza in Po*

Anche per questo tratto del Parma si è effettuata una simulazione di moto vario tesa a verificare il comportamento idraulico del torrente nella situazione attuale. La simulazione, analogamente a quella per gli altri tratti, è stata effettuata imponendo come condizione al contorno di monte l'idrogramma sintetico di 200 anni di tempo di ritorno ricavato in corrispondenza della sezione dell'idrometrografo di Ponte Bottego.

L'analisi della sicurezza idraulica dell'ultimo tratto del torrente richiede però di considerare anche il fenomeno del rigurgito del Po. Non è perciò possibile definire, a parità di condizione al contorno di monte, un'altezza idrica (e quindi un franco) univoca

per tutte le sezioni del Parma poiché, da una certa progressiva in poi, influisce anche il livello del Po (che rappresenta la condizione al contorno di valle).

Per questo motivo la simulazione è stata ripetuta imponendo diverse altezze idriche a valle, da 23 *m s.l.m.* fino ad un massimo di 29 *m s.l.m.*, valore prossimo alla quota del coronamento degli argini di Po alla confluenza. Dalla sezione n.5 fino alla confluenza in Po il torrente ha il suo alveo all'interno dell'area golenale del Po: per questo motivo le quote spondali massime delle ultime tre sezioni sono tutte uguali e pari a 29.44 *m s.l.m.* (tabella 2.3), corrispondente alla quota del coronamento dell'argine maestro destro del Po. Nella simulazione in cui si è imposta una quota idrica in Po pari a 29 *m s.l.m.* la condizione al contorno di valle è stata assegnata in corrispondenza della sezione n.5, poiché per quel valore di altezza idrica tutta la zona golenale in cui si trovano le sezioni 3 e 1 risulta allagata.

Analizzando una qualsiasi simulazione fra quelle effettuate, ad esempio quella in cui si è imposta una condizione al contorno di valle pari a 25 *m s.l.m.* (figura 2.10) si nota come il tratto del torrente a valle della città induce un rilevante effetto di laminazione sulle piene.

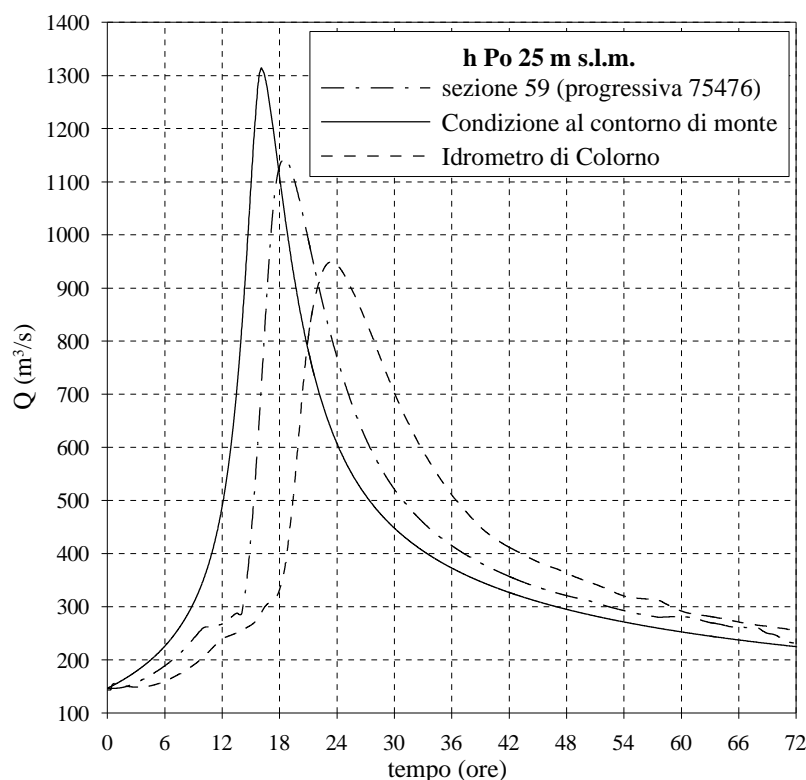


Figura 2.10: Onde di piena ricavate, per diverse sezioni, dalla simulazione effettuata con condizione al contorno di valle pari a 25 *m s.l.m.*.

Sezione n.	Prog. (m)	Quota max sponda (m s.l.m.) sx dx		$h_{p0}= 23 \text{ m s.l.m.}$		$h_{p0}= 25 \text{ m s.l.m.}$		$h_{p0}= 27 \text{ m s.l.m.}$		$h_{p0}= 29 \text{ m s.l.m.}$	
				Quota idr. massima (m s.l.m.)	Franco minimo (m)	Quota idr. massima (m s.l.m.)	Franco minimo (m)	Quota idr. massima (m s.l.m.)	Franco minimo (m)	Quota idr. massima (m s.l.m.)	Franco minimo (m)
0	64670	54.56	55.13	53.96	0.60	53.96	0.60	53.96	0.60	53.96	0.60
71	65686	51.10	50.97	51.66	-0.69	51.66	-0.69	51.66	-0.69	51.66	-0.69
69	68260	48.10	47.25	47.39	-0.14	47.39	-0.14	47.39	-0.14	47.39	-0.14
68	69070	46.94	46.14	46.76	-0.62	46.76	-0.62	46.76	-0.62	46.76	-0.62
67	70716	46.13	46.84	46.24	-0.11	46.24	-0.11	46.24	-0.11	46.24	-0.11
66	71081	46.03	45.29	45.98	-0.69	45.98	-0.69	45.98	-0.69	45.98	-0.69
64	72328	44.96	44.59	45.14	-0.55	45.14	-0.55	45.14	-0.55	45.14	-0.55
62	73643	44.07	44.1	44.66	-0.59	44.66	-0.59	44.66	-0.59	44.66	-0.59
59	75476	43.26	43.22	43.95	-0.73	43.95	-0.73	43.95	-0.73	43.95	-0.73
55	77574	42.73	42.74	42.69	0.04	42.69	0.04	42.69	0.04	42.69	0.04
53	78712	41.90	42.15	42.02	-0.12	42.02	-0.12	42.02	-0.12	42.02	-0.12
49	80571	41.25	41.01	41.26	-0.25	41.26	-0.25	41.26	-0.25	41.26	-0.25
46	82243	40.72	40.76	40.05	0.67	40.05	0.67	40.05	0.67	40.05	0.67
44	83083	40.19	40.16	39.03	1.13	39.03	1.13	39.03	1.13	39.03	1.13
42	84081	39.61	39.36	38.37	0.99	38.37	0.99	38.37	0.99	38.37	0.99
38	85897	38.40	38.85	37.59	0.81	37.59	0.81	37.59	0.81	37.60	0.80
36	86932	37.94	37.81	37.20	0.61	37.20	0.61	37.20	0.61	37.21	0.60
Pass monte	87467	37.64	37.64	36.71	0.93	36.71	0.93	36.72	0.92	36.73	0.91
Pass Valle	87510	37.64	37.64	36.67	0.97	36.67	0.97	36.67	0.97	36.69	0.95
34	87887	37.70	37.39	36.47	0.92	36.47	0.92	36.48	0.91	36.49	0.90
32	89169	36.63	36.43	36.05	0.38	36.05	0.38	36.06	0.37	36.08	0.35
29	90231	35.76	35.93	35.77	-0.01	35.77	-0.01	35.78	-0.02	35.80	-0.04
26	91807	34.59	34.73	35.09	-0.50	35.10	-0.51	35.11	-0.52	35.14	-0.55
21	93706	33.93	33.51	34.05	-0.54	34.05	-0.54	34.08	-0.57	34.11	-0.60
20	94159	33.32	33.09	33.85	-0.76	33.86	-0.77	33.88	-0.79	33.92	-0.83
18	94582	32.50	32.54	33.55	-1.05	33.56	-1.06	33.59	-1.09	33.63	-1.13
P.Garib. Monte	94819	32.37	32.5	32.92	-0.55	32.93	-0.56	33.10	-0.73	33.14	-0.77
P.Garib. Valle	94839	32.37	32.5	32.69	-0.32	32.70	-0.33	32.86	-0.49	32.91	-0.54
P. Circ Monte	95064	31.73	31.73	32.52	-0.79	32.54	-0.81	32.58	-0.85	32.63	-0.90
P. Circ Valle	95084	31.73	31.73	32.15	-0.42	32.16	-0.43	32.20	-0.47	32.24	-0.51
16	95117	31.8	32.08	32.20	-0.40	32.21	-0.41	32.25	-0.45	32.30	-0.50
14	95852	31.91	32.05	32.17	-0.26	32.19	-0.28	32.23	-0.32	32.28	-0.37
13	96456	31.29	31.02	31.88	-0.86	31.90	-0.88	31.95	-0.93	32.01	-0.99
10	97766	31.37	31.25	31.24	0.01	31.27	-0.02	31.35	-0.10	31.43	-0.18
9	98056	31.21	31.25	30.84	0.37	30.87	0.34	30.97	0.24	31.06	0.15
7	99296	30.68	31.11	29.78	0.90	29.84	0.84	30.01	0.67	30.16	0.52
5	100220	29.44	29.44	28.22	1.22	28.37	1.07	28.74	0.70	29.00	0.44
3	101244	29.44	29.44	26.26	3.18	27.03	2.41	28.04	1.40	29.00	0.44
1	102366	29.44	29.44	23.00	6.44	25.00	4.44	27.00	2.44	29.00	0.44

Tabella 2.3: Torrente Parma a valle della città: principali risultati delle simulazioni effettuate imponendo come condizione al contorno di monte è l'onda sintetica con tempo di ritorno pari a 200 anni e come condizione al contorno di valle diversi valori della quota idrica in Po.

Si passa infatti da una portata massima di $1313 \text{ m}^3/\text{s}$ nella sezione dell'Idrometro di ponte Bottego, a $949 \text{ m}^3/\text{s}$ all'idrometro di Colorno (sezione di progressiva 94.839 km). Tale effetto di laminazione è dovuto alla presenza di ampie aree golenali, alla ridotta pendenza del fiume, e alla maggior scabrezza rispetto a quella del tratto in città.

Fino alla sezione n.34 (prog. 87.887 km) le differenze fra i livelli idrici ottenuti dalle simulazioni con differenti condizioni al contorno sono trascurabili (figura 2.11) mentre da quella progressiva in poi l'effetto del rigurgito diventa sempre più rilevante (figura 2.12). In particolare in corrispondenza del centro urbano di Colorno l'effetto di rigurgito diventa significativo provocando un incremento di livello di 0.22 m in corrispondenza della sezione del ponte di Piazza Garibaldi¹.

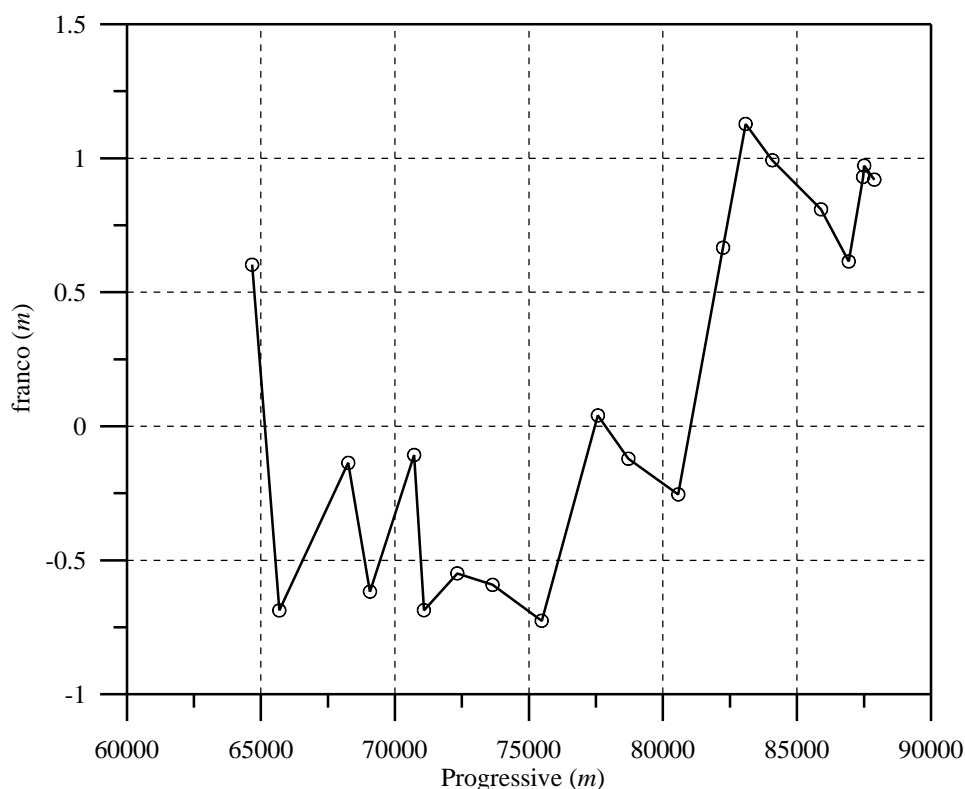


Figura 2.11: Franco nel torrente Parma in funzione della progressiva per il tratto non influenzato dal rigurgito in Po. La simulazione è stata effettuata imponendo come condizione al contorno di monte l'onda sintetica di 200 anni di tempo di ritorno.

¹ La variazione di livello idrico sarebbe molto maggiore per portate in Parma più modeste: questa differenza è quella fra i massimi livelli idrici ottenuti propagando l'onda sintetica di 200 anni di tempo di ritorno.

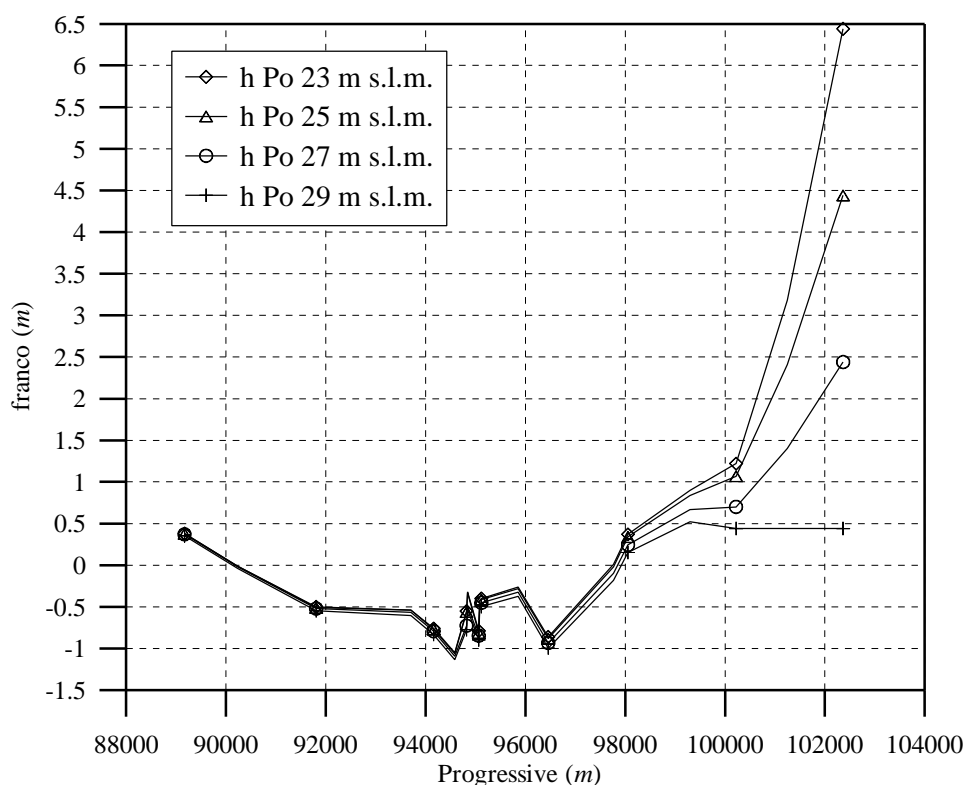


Figura 2.12: Franco nel torrente Parma in funzione della progressiva per il tratto influenzato dal rigurgito in Po. La simulazione è stata effettuata imponendo come condizione al contorno di monte l'onda sintetica di 200 anni di tempo di ritorno. I diversi andamenti si riferiscono alle differenti condizioni al contorno di valle (alla confluenza in Po).

2.3.1 Analisi dei punti critici

Analizzando l'andamento dei franchi (figure 2.11 e 2.12) si nota immediatamente che il tratto del torrente Parma a valle della città non è in grado di contenere l'onda di piena di 200 anni di tempo di ritorno. In numerosi punti il livello idrico supera addirittura la quota arginale (franchi negativi); laddove la piena è contenuta in alveo non è quasi mai garantito il franco di un metro.

Allo scopo di definire la portata compatibile nei vari tratti sono state effettuate diverse simulazioni in condizioni di moto permanente. In tabella 2.4 si riportano i valori di tale portata per le sezioni non influenzate dal rigurgito di Po. Per le restanti sezioni non è definibile una portata compatibile univoca, in quanto il livello idrico dipende anche dalla condizione di valle.

Sezione. N.	Progressiva (m)	Portata compatibile (m^3/s)
71	65686	<500
69	68260	550
68	69070	580
67	70716	850
66	71081	600
64	72328	600
62	73643	650
59	75476	680
55	77574	900
53	78712	860
49	80571	750
46	82243	1050
44	83083	1250
42	84081	1150

Tabella 2.4: Portate compatibili per le sezioni a valle della città che non risentono del rigurgito di Po.

La sezione maggiormente critica di tutto il tratto del Parma a valle della città è comunque quella del Ponte storico di piazza Garibaldi a Colorno (figura 2.13). In questo punto è già presente l'effetto del rigurgito di Po e dunque non è possibile definire univocamente una portata ammissibile: tuttavia, imposta un'altezza idrica in Po di 27 m s.l.m., il pelo libero uguaglia l'intradosso del ponte in corrispondenza ad un valore di portata di $650 m^3/s$ mentre sormonta l'impalcato in corrispondenza di $850 m^3/s$. Il valore di portata corrispondente ad un metro di franco è invece pari a $525 m^3/s$.

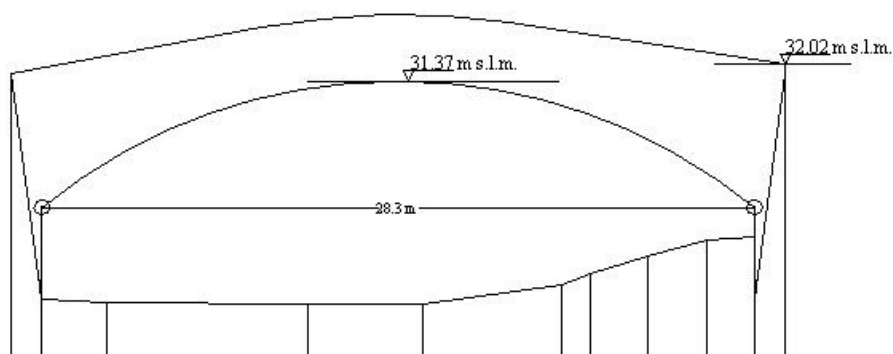


Figura 2.13: Sezione del ponte di Piazza Garibaldi a Colorno vista da valle.

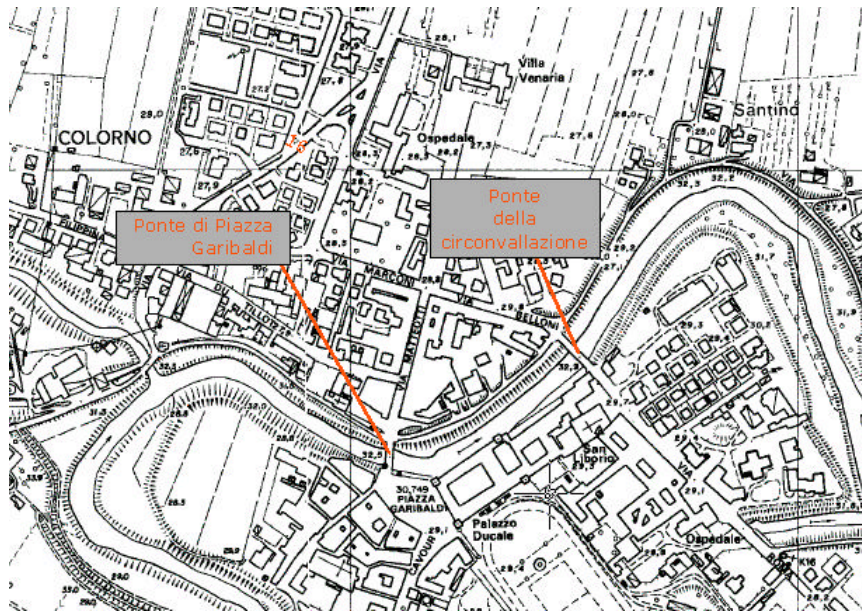


Figura 2.14: Planimetria indicante l'ubicazione delle sezioni dei ponti a Colorno.

2.4 Tratto cittadino del torrente Parma

Per verificare la sufficienza idraulica del tratto cittadino del torrente Parma si è ricavata, per tentativi, la portata compatibile attraverso una serie di simulazioni in condizioni di moto permanente. Usualmente con portata compatibile si intende quella contenibile in alveo con un franco di un metro. Nel caso in esame, stante l'elevata velocità media della corrente in condizioni di piena e l'elevato rischio connesso anche ad esondazioni localizzate, si è preferito calcolare il franco non a partire dal pelo libero ma a partire dall'intero livello energetico della corrente.

Le velocità medie in condizioni di piena nel tratto cittadino del torrente Parma risultano essere dell'ordine di 3 m/s; pertanto la componente cinetica dell'energia specifica è dell'ordine:

$$\frac{v^2}{2g} \cong 0.5 \text{ m.}$$

Detta E l'energia specifica e h il tirante idrico, si ricorda che:

$$E = h + \frac{v^2}{2g}$$

Nei casi in cui la componente cinetica dell'energia non è trascurabile, è opportuno valutare il franco non sul valore del tirante idrico h ma sull'intera energia specifica E . In

questo modo si tiene in considerazione anche il caso in cui una eventuale ostacolo (rappresentato ad esempio dalla pila o dalla spalla di un ponte) riduca la velocità locale tramutando l'altezza cinetica in un sopralzo del pelo libero.

Alla luce di queste considerazioni, analizzando i risultati delle simulazioni riportati in tabella 2.5 e in figura 2.15 si è stimata una portata compatibile per il tratto cittadino del Torrente Parma pari a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$.

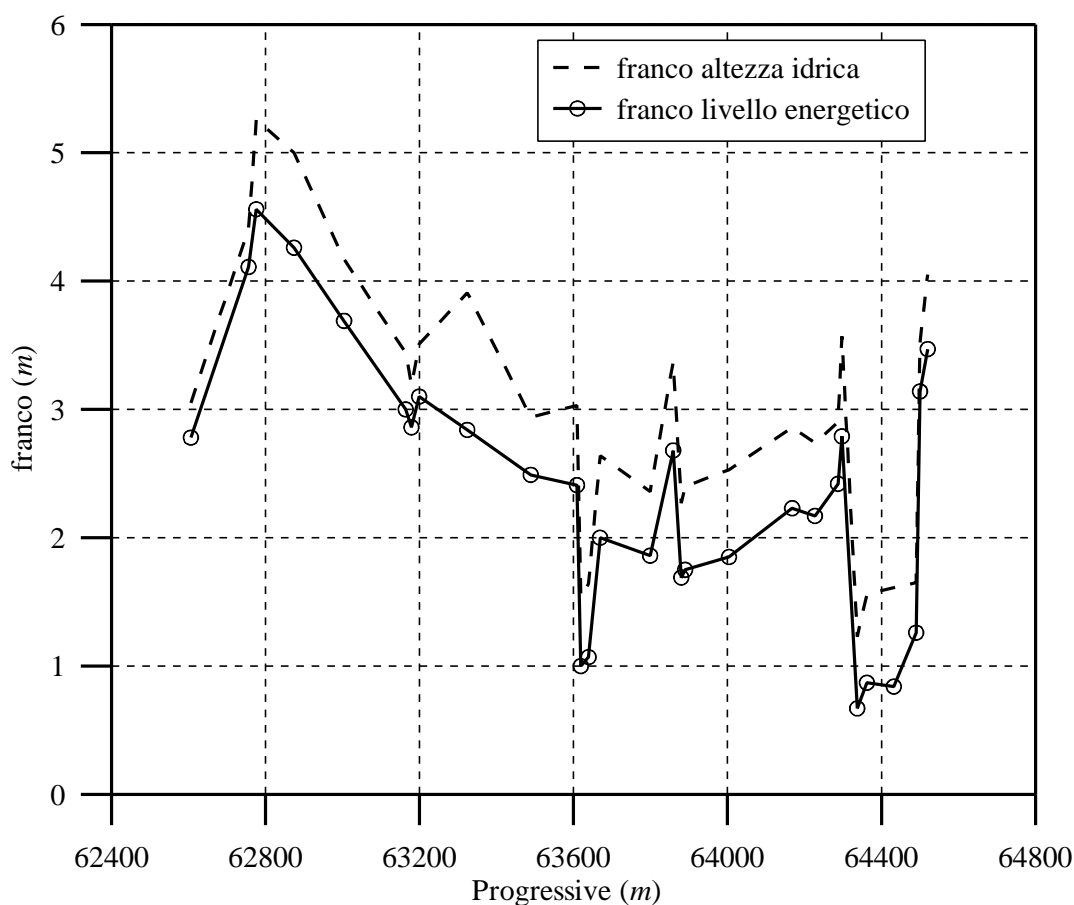


Figura: 2.15: Franchi calcolati in base al livello energetico e all'altezza idrica nel torrente Parma ottenuti dalla simulazione in condizioni di moto permanente con portata di $1000 \text{ m}^3/\text{s}$.

2.4.1 Analisi dei punti critici.

Le sezioni più critiche (tabella 2.5, figura 2.16) per il tratto cittadino risultano quelle dell'idrometro e la n.1 e 2, ubicate tra ponte Bottego e il ponte della Ferrovia.

Un ulteriore sezione critica è rappresentata dal ponte di Mezzo, le cui imposte degli archi non sono tutte alla medesima quota; in particolare le arcate in sinistra idraulica

sono più basse delle altre e, per la portata di $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, la differenza fra l'imposta dell'ultima arcata in sinistra e il livello energetico è di appena di 0.43 m . Tutti gli altri ponti non rischiano la chiusura delle luci per la portata di $1000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Sezione n.	Progressiva (m)	Quota max sponda sx (m s.l.m.)	Quota max sponda dx (m s.l.m.)	Quota idrica (m s.l.m.)	Franco quota idrica (m)	Energia specifica (m s.l.m.)	Franco energia specifica (m)
11	62606	62.90	63.58	59.85	3.05	60.12	2.78
Ponte Italia m.	62756	64.40	64.00	59.59	4.41	59.89	4.11
Ponte Italia v.	62776	64.40	64.00	58.74	5.26	59.44	4.56
10	62874	63.21	63.16	58.16	5.00	58.90	4.26
9	63004	62.19	62.05	57.88	4.17	58.36	3.69
8 bis	63164	61.00	61.76	57.56	3.44	58.00	3.00
Ponte Caprazzucca m.	63179	60.80	60.80	57.61	3.19	57.94	2.86
Ponte Caprazzucca v.	63199	60.80	60.80	57.29	3.51	57.70	3.10
8	63324	60.30	60.30	56.39	3.91	57.46	2.84
7	63489	59.70	59.70	56.76	2.94	57.21	2.49
6 bis	63609	59.46	59.46	56.43	3.03	57.05	2.41
Ponte di Mezzo m.	63619	58.00	59.20	56.46	1.54	57.00	1.00
Ponte di Mezzo v.	63639	58.00	59.20	56.36	1.64	56.93	1.07
6	63669	58.90	58.90	56.26	2.64	56.90	2.00
5	63799	58.44	58.44	56.08	2.36	56.58	1.86
4 bis	63859	59.27	59.23	55.86	3.37	56.55	2.68
Ponte Verdi m.	63880	58.22	58.16	55.89	2.27	56.47	1.69
Ponte Verdi v.	63890	58.22	58.16	55.76	2.40	56.41	1.75
4	64004	58.00	58.00	55.47	2.53	56.15	1.85
3	64168	58.12	57.95	55.09	2.86	55.72	2.23
2 bis	64227	57.61	59.04	54.87	2.74	55.44	2.17
Ponte Bottego m.	64287	58.20	57.80	54.90	2.90	55.39	2.42
Ponte Bottego v.	64297	58.20	57.80	54.23	3.57	55.01	2.79
Idrometro	64337	56.70	55.45	54.22	1.23	54.78	0.67
2	64362	56.71	55.66	54.10	1.56	54.79	0.87
1	64432	55.48	55.48	53.87	1.61	54.64	0.84
0 bis	64490	55.54	55.54	53.89	1.65	54.28	1.26
Ponte Ferrovia m.	64500	57.40	57.40	53.88	3.52	54.26	3.14
Ponte Ferrovia v.	64520	57.40	57.40	53.35	4.05	53.93	3.47

Tabella 2.5: Quota idrica, Energia specifica e franchi (valutati sia rispetto alla quota idrica che all'energia specifica) ottenuti dalla simulazione in condizioni di moto permanente con portata di $1000 \text{ m}^3/\text{s}$.

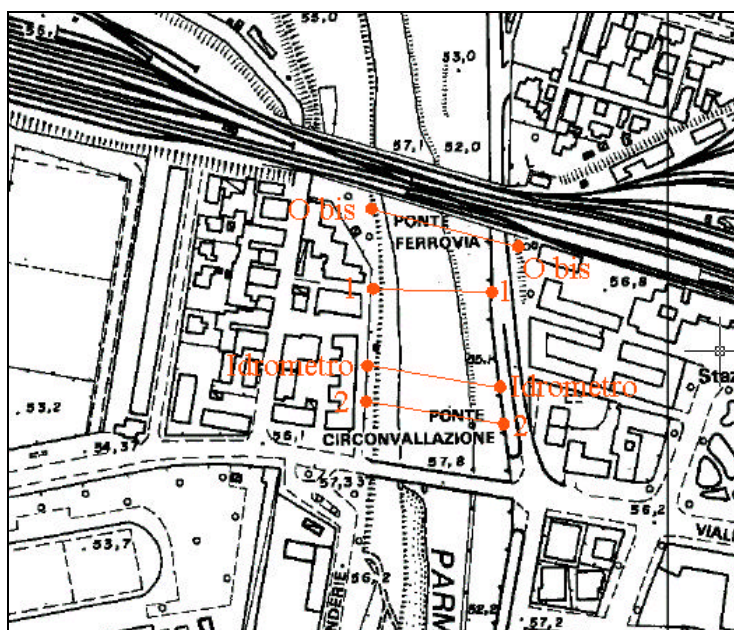


Figura 2.16: Planimetria indicante le sezioni critiche per il tratto cittadino del Torrente Parma.

3. ANALISI DEL FUNZIONAMENTO DELLA CASSA DI ESPANSIONE SUL TORRENTE PARMA.

Nel Novembre 1983 fu predisposto un progetto generale di massima in base al quale si prevedeva una cassa di espansione sul torrente Parma (con invaso di $6 \cdot 10^6 m^3$) e una sul Baganza (con invaso di $3.5 \cdot 10^6 m^3$), poste poco a monte della confluenza.

Fu poi abbandonata l'ipotesi di una doppia cassa, prevedendone una sola di maggior volume posizionata sul torrente Parma a monte della confluenza. Il progetto esecutivo di questa seconda soluzione risale al 1988. Esso prevede un unico invaso in linea di $12 \cdot 10^6 m^3$ e l'assunzione di una portata massima transitabile in corrispondenza della città pari a $990 m^3/s$. La cassa è ubicata in località Vigatto (figura 3.1).

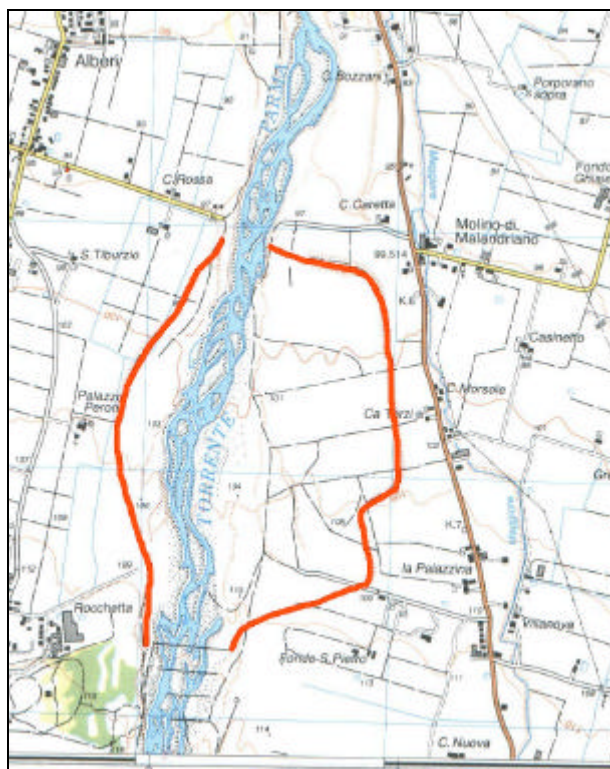
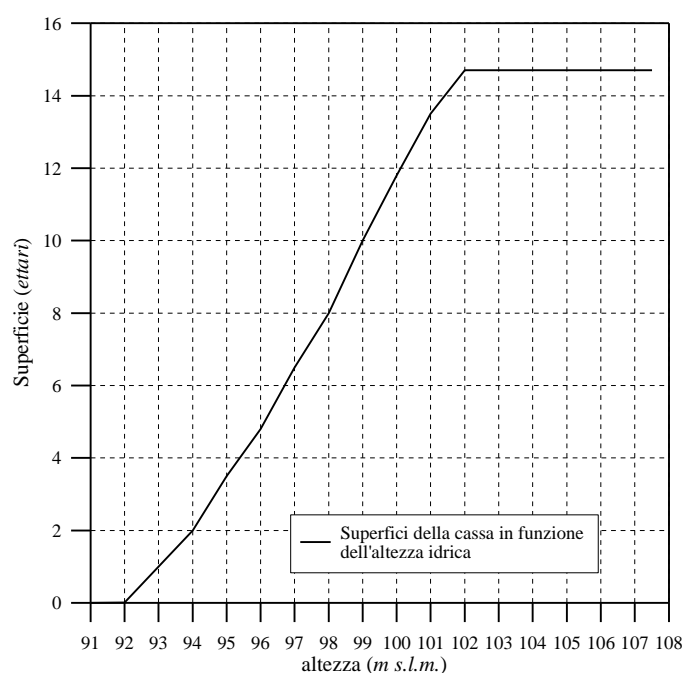


Figura 3.1: Posizione della cassa di espansione sul Torrente Parma indicata nel progetto esecutivo del 1988.

In figura 3.2 è riportato l'andamento della superficie allagata in funzione della quota idrica nella cassa.



h (m. s.l.m.)	Superficie (ha)
91	0
92	0.01
93	1.0
94	2.0
95	3.5
96	4.8
97	6.5
98	8.0
99	10.0
100	11.8
101	13.5
102	14.7
103	14.7
104	14.7
105	14.7
105.6	14.7
106.0	14.7
106.5	14.7
107.0	14.7
107.5	14.7

Figura 3.2: Andamento della Superficie allagata in funzione dell'altezza idrica per la cassa di espansione sul torrente Parma

Il manufatto limitatore (figura 3.3) ha la sommità a quota 105.6 m s.l.m.; la quota di imposta delle luci di fondo è pari a 91 m s.l.m., l'altezza di ritenuta è pertanto pari a 14.6 m; lo sfioro (sagomato secondo un profilo Creager) ha uno sviluppo complessivo di 216.5 m comprendente sia la traversa che i due sfioratori laterali a becco d'anatra previsti ai lati di questa. La portata allontanata dai due sfioratori laterali viene convogliata tramite canali collettori all'interno della vasca di smorzamento assieme alla portata uscente dalle luci di fondo e a quella sfiorante dallo stramazzo. La dissipazione dell'energia cinetica è affidata a grandi blocchi e ad una depressione della platea di fondo rispetto alla quota dell'alveo a valle della struttura.

Le luci di fondo sono tre, di forma rettangolare, larghe 7 m e alte 1.7 m. Esse sono fornite di paratoie allo scopo di collaudo e controllo durante l'esercizio ma non sono previste manovre di regolazione durante le piene.

In figura 3.4 è riportata la legge di efflusso del manufatto limitatore.

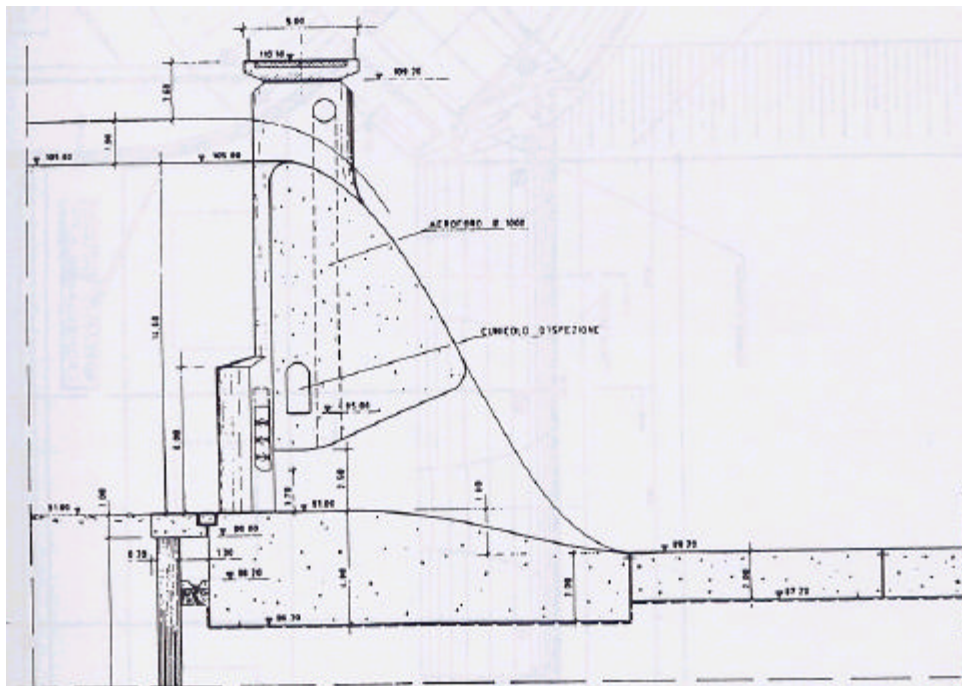
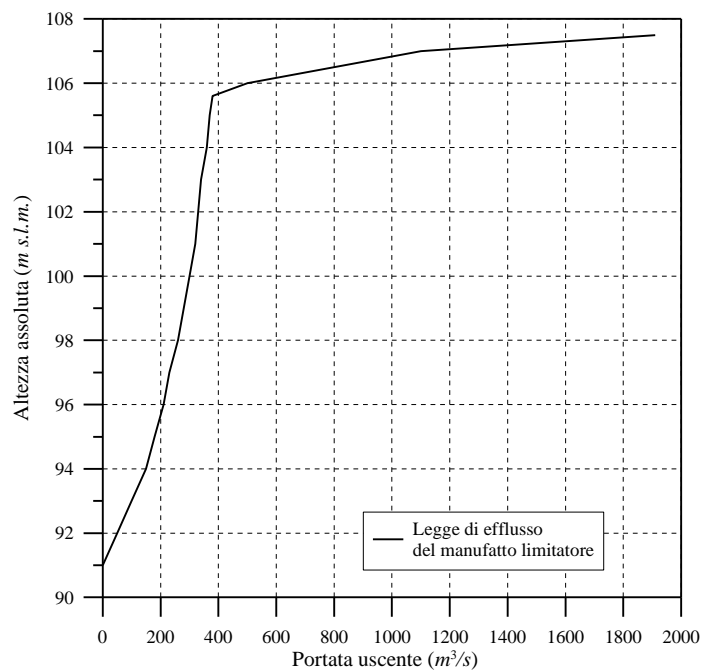


Figura 3.3: Particolare del manufatto limitatore



h (<i>m. s.l.m.</i>)	Superficie (<i>ha</i>)
91	0
92	50
93	100
94	150
95	180
96	210
97	230
98	260
99	280
100	300
101	320
102	330
103	340
104	360
105	370
105.6	380
106.0	500
106.5	800
107.0	1100
107.5	1910

Figura 3.4: Legge di efflusso dal manufatto limitatore previsto nel progetto esecutivo della cassa di espansione sul Torrente Parma.

Sopra al manufatto, sostenuto da 6 pile, è previsto un ponte di servizio a quota coronamento (110 m s.l.m.) necessario per il sollevamento delle paratoie, per l'accesso alle misure (idrometrografo e piezometri) e agli areofori.

3.1 Effetto di laminazione nell'ipotesi di funzionamento ideale

In figura 3.5 è riportato l'andamento dei volumi delle onde di piena sintetiche di assegnato tempo di ritorno al di sopra di prefissati valori di portata.

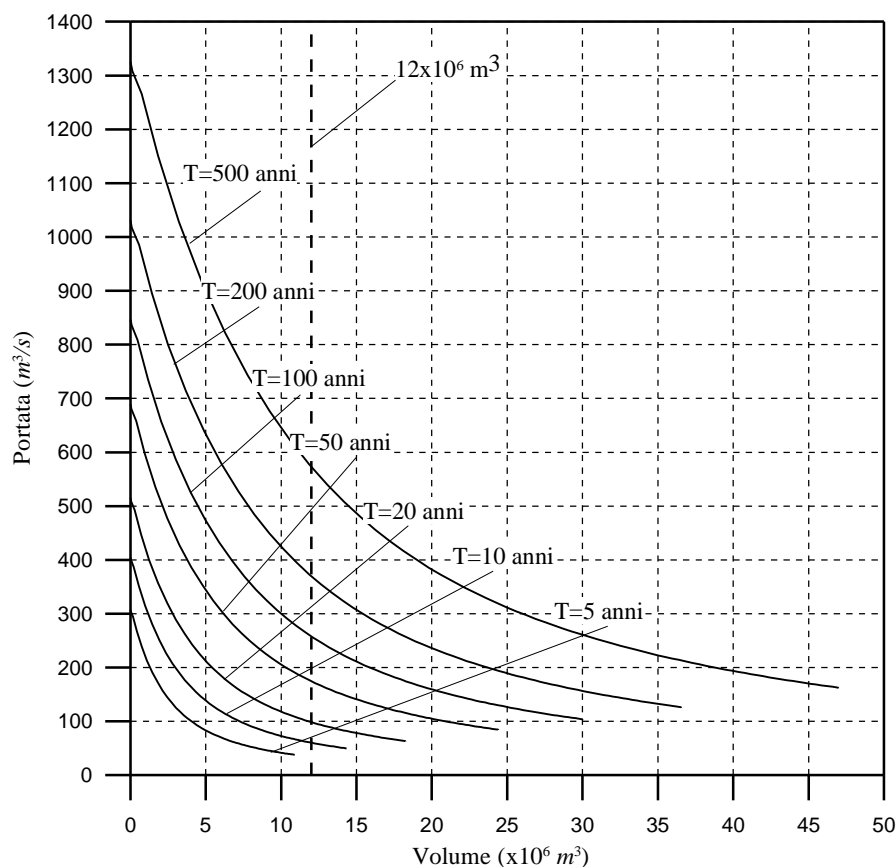


Figura 3.5: Volumi che è necessario invasare per ridurre la massima portata dell'idrogramma in uscita dalla cassa al valore riportato sull'asse delle ordinate. Ipotesi di laminazione ideale.

Nell'ipotesi di funzionamento ideale della cassa, ovvero di manovra degli organi di scarico tale da decapitare orizzontalmente l'onda di piena, e noto il volume disponibile, dal grafico è possibile dedurre a quale valore di portata è possibile abbattere l'onda di

piena in ingresso. Si nota come con un volume pari a $12 \cdot 10^6 m^3$ sia teoricamente possibile abbattere la portata al colmo dell'onda con 200 anni di tempo di ritorno a circa $360 m^3/s$. Questo valore di portata non è raggiungibile praticamente, ma è comunque un'utile indicazione in quanto evidenzia le potenzialità di laminazione massima di una generica cassa capace di invasare quel dato volume.

3.2 Effetto di laminazione considerando il reale funzionamento della cassa

Sono state poi realizzate verifiche sul comportamento della cassa così come è prevista nel progetto esecutivo del 1988 considerando in ingresso gli idrogrammi sintetici per differenti tempi di ritorno.

A tale proposito si è utilizzato un programma di calcolo appositamente realizzato che risolve le equazioni descriventi il fenomeno di laminazione riportate in Appendice A.

I risultati di tali simulazioni sono restituiti in forma grafica e sono riportati in Appendice B.

La figura 3.6 e la tabella 3.1 sintetizzano i principali risultati; nella tabella sono riportate, per ogni tempo di ritorno, le seguenti grandezze:

- portata massima in ingresso alla cassa Q_{emax} ;
- portata massima in uscita dalla cassa Q_{umax} ;
- rapporto di laminazione $h = Q_{umax}/Q_{emax}$;
- quota idrica massima nella cassa z_{max} ;
- volume massimo invasato nella cassa W_{max} .

Valori massimi	Tempo di ritorno (anni)						
	5	10	20	50	100	200	500
$Q_{emax} (m^3/s)$	308	405	522	698	857	1042	1325
$Q_{umax} (m^3/s)$	221	261	292	328	360	516	944
$h = Q_{umax}/Q_{emax}$	0.72	0.64	0.56	0.47	0.42	0.49	0.71
$z_{max} (m \text{ s.l.m.})$	96.54	98.03	99.58	101.85	104.03	106.03	106.74
$W_{max} (10^6 m^3)$	1.175	2.206	3.698	6.622	9.838	12.765	13.816

Tabella 3.1: Principali risultati ottenuti dalla simulazione del funzionamento della cassa di espansione.

La massima efficienza della cassa, corrispondente al rapporto di laminazione minimo $h = 0.42$, si ottiene per eventi di piena di 100 anni di tempo di ritorno. L'efficienza minima si ottiene sia per eventi di basso tempo di ritorno ($T = 5$ anni) per i quali la cassa si invasa solo in minima parte, sia per eventi di elevato tempo di ritorno ($T = 500$ anni) in cui la cassa si riempie completamente prima del colmo della piena.

Dai risultati principali della simulazione, riportati in forma grafica in Appendice B, si osserva che per i tempi di ritorno più elevati (500 e 200 anni) la cassa inizia a riempirsi in maniera consistente già nella fase crescente della piena, invasando una parte del volume disponibile prima dell'arrivo dei valori più elevati di portata in ingresso. Per gli stessi eventi entra in funzione lo scaricatore di superficie, diminuendo l'efficienza della cassa che comunque rimane ancora piuttosto elevata anche per $T = 500$ anni.

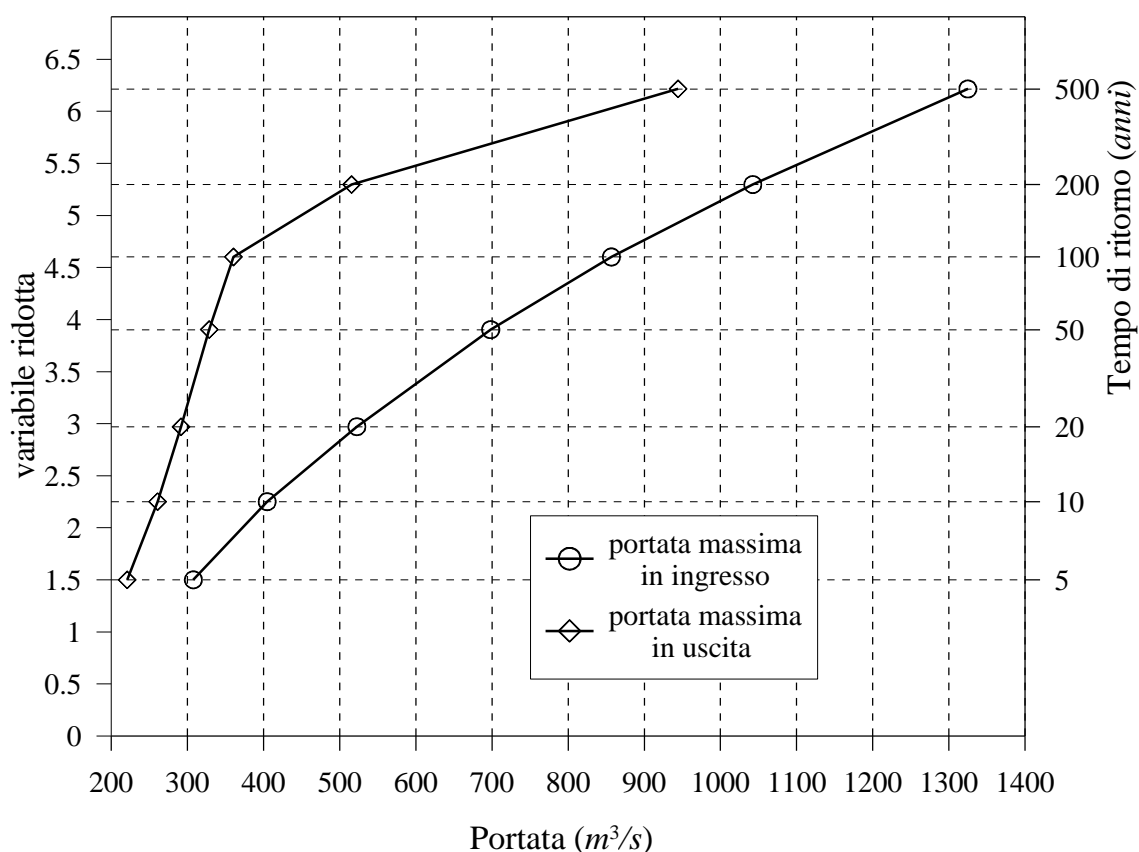


Figura 3.6: Portate massime in ingresso e in uscita dalla cassa di espansione in funzione del tempo di ritorno.

4 DIMENSIONAMENTO DI MASSIMA DELLA CASSA DI ESPANSIONE SUL TORRENTE BAGANZA

La cassa di espansione sul torrente Parma non è in grado da sola di garantire la sicurezza idraulica della città di Parma in occasione di eventi di tempo di ritorno duecentennale. E' pertanto indispensabile realizzare una seconda cassa di espansione sul torrente Baganza. L'obiettivo è quello di abbattere la portata duecentennale nel tratto cittadino del torrente Parma ad un valore non superiore alla portata compatibile, stimata in $1000 \text{ m}^3/\text{s}$.

La cassa di espansione sul torrente Parma è in grado di abbattere la portata duecentennale ad un valore poco superiore ai $500 \text{ m}^3/\text{s}$ ($516 \text{ m}^3/\text{s}$, cfr. tabella 3.1). La cassa sul torrente Baganza dovrebbe allora essere dimensionata in modo da garantire anch'essa, per un evento del medesimo tempo di ritorno, una portata massima in uscita non superiore ai $500 \text{ m}^3/\text{s}$. Solo così, anche nella peggiore delle ipotesi corrispondente ad un evento duecentennale su entrambe gli affluenti ed ad una perfetta fasatura dei colmi di piena in corrispondenza della confluenza Parma-Baganza, si avrebbe la garanzia di non superare in città la portata compatibile di $1000 \text{ m}^3/\text{s}$.¹

Come si evince dalla Relazione Idrologica, i volumi e le portate al colmo delle onde di piena del torrente Baganza sono, a parità di tempo di ritorno, inferiori a quelle del torrente Parma. Il volume da assegnare alla cassa di espansione sul torrente Baganza, necessario per abbattere le portate al colmo al valore di $500 \text{ m}^3/\text{s}$, sarà pertanto inferiore a quello della cassa di espansione sul torrente Parma.

Nei paragrafi seguenti, dopo aver effettuato un dimensionamento di massima della cassa di espansione sul torrente Baganza ed aver individuato alcune possibili ubicazioni, viene valutato in dettaglio l'effetto di laminazione della cassa nei confronti di onde di piena di differente tempo di ritorno.

¹ In realtà all'evento composto da due onde di piena duecentennali sui torrenti Parma e Baganza, per di più con i colmi fasati tra loro alla confluenza, corrisponde un tempo di ritorno sicuramente superiore ai duecento anni a valle della confluenza. Gli eventi di piena del sistema Parma-Baganza sono però fortemente correlati tra loro, in quanto causati dagli stessi fenomeni meteorologici, come si evince dalle analisi idrologiche. Si è preferito pertanto, in questa fase, operare a favore di sicurezza e considerare due eventi duecentennali contemporanei sui due torrenti. Nel capitolo 5 verrà approfondita l'analisi della probabilità composta dei due eventi e della loro fasatura temporale.

4.1 Predimensionamento del volume da assegnare alla cassa

In figura 3.5 è riportato, per il torrente Baganza, l'andamento dei volumi delle onde di piena sintetiche di assegnato tempo di ritorno al di sopra di prefissati valori di portata.

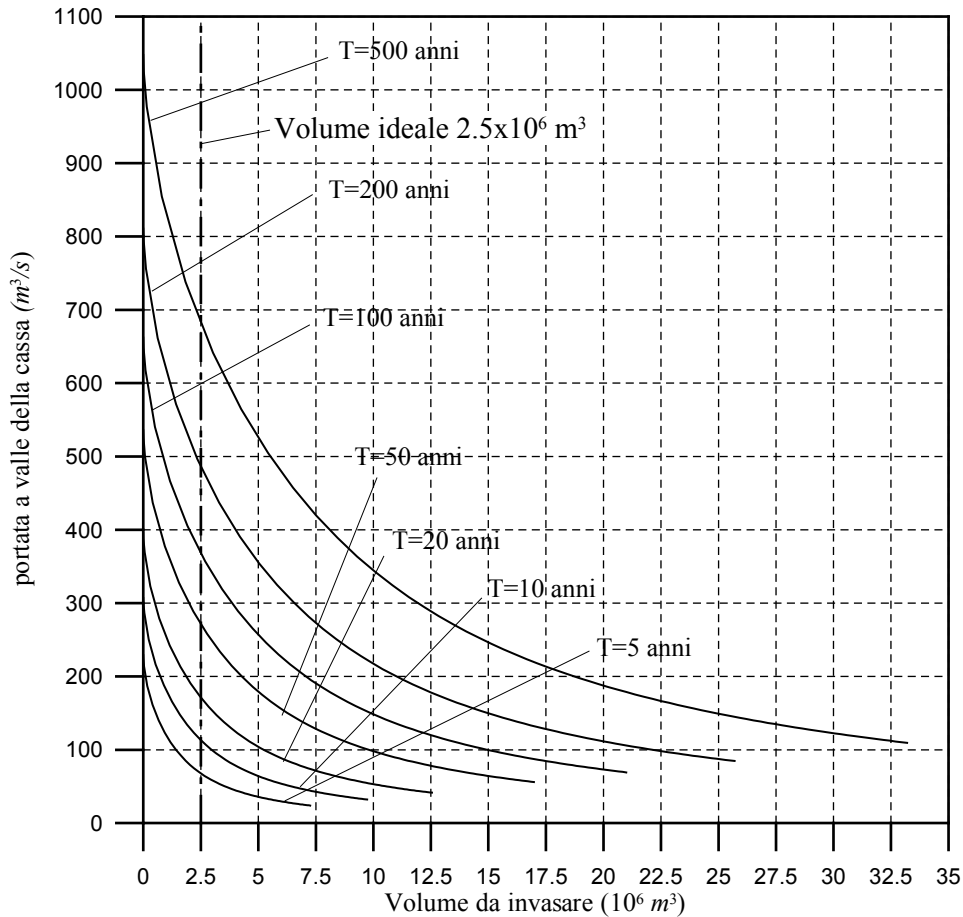


Figura 4.1: Volumi che è necessario invasare per ridurre la massima portata dell'idrogramma in uscita dalla cassa al valore riportato sull'asse delle ordinate. Ipotesi di laminazione ideale.

Dal grafico è possibile dedurre il volume minimo necessario per abbattere la portata uscente ad un prefissato valore nell'ipotesi di funzionamento ideale della cassa, ovvero di manovra degli organi di scarico tale da decapitare orizzontalmente l'onda di piena. Con un volume pari a $2.5 \cdot 10^6 m^3$ è teoricamente possibile abbattere la portata al colmo dell'onda di tempo di ritorno $T = 200$ anni a circa $500 m^3/s$. Il volume così dedotto non è praticamente sufficiente, ma è un valore di partenza che deve essere opportunamente maggiorato per tener conto del reale funzionamento degli organi di scarico.

La maggiorazione da apportare è dell'ordine del 50-60% e pertanto il volume da assegnare alla cassa, in via del tutto preliminare, è stimabile in circa $4 \cdot 10^6 m^3$.

4.2 Possibili ubicazioni della cassa

Sulla base di questo predimensionamento, si sono ricercate le ubicazioni, nel tratto a valle del ponte di Sala Baganza, che fossero adatte ad accogliere la cassa. Si è utilizzata a questo scopo la cartografia regionale ed un DEM (Digital Elevation Model) fornito dal Servizio Provinciale Difesa del Suolo della Regione Emilia Romagna.

Individuato un possibile sito, si è proceduto a definire il contorno delle arginature in modo da evitare il coinvolgimento, ove possibile, di edifici od infrastrutture all'interno della cassa. Mediante procedure automatiche si sono poi calcolati gli andamenti dei volumi e delle superfici in funzione delle quote.

In figura 4.2 è rappresentata una prima ipotesi di collocazione della cassa di espansione, immediatamente a valle del ponte di Sala Baganza.

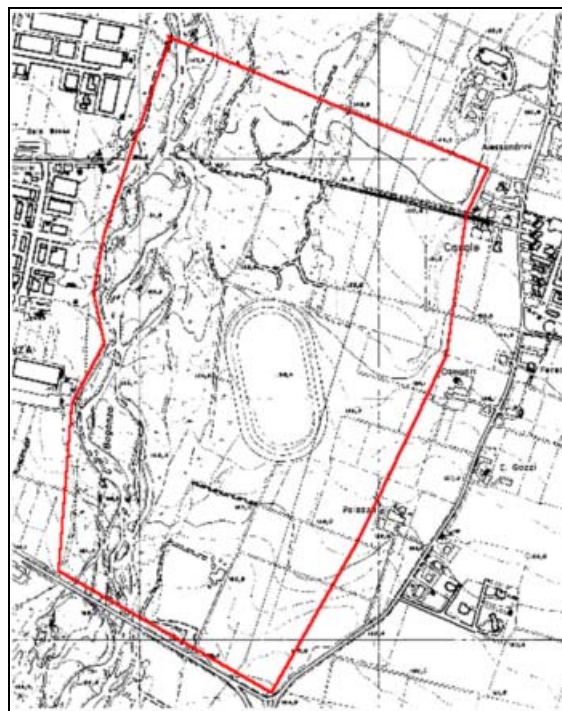


Figura 4.2: Prima ipotesi di collocazione della cassa d'espansione

In questo tratto il torrente Baganza scorre in sinistra idraulica e, per garantire un funzionamento più efficiente, la cassa potrebbe essere suddivisa in una porzione in linea, più modesta, ed una fuori linea di volume maggiore. I volumi calcolati nell'ipotesi di non prevedere alcuno scavo e di realizzare uno sbarramento alto non più di 10 m rispetto al fondo alveo, si sono rivelati però non superiori a $3 \cdot 10^6 m^3$ e quindi presumibilmente insufficienti per ottenere l'effetto di laminazione voluto.

In figura 4.3 è rappresentata una seconda ipotesi di collocazione della cassa di espansione, più a valle di Sala Baganza con chiusura in corrispondenza della sezione n.21.

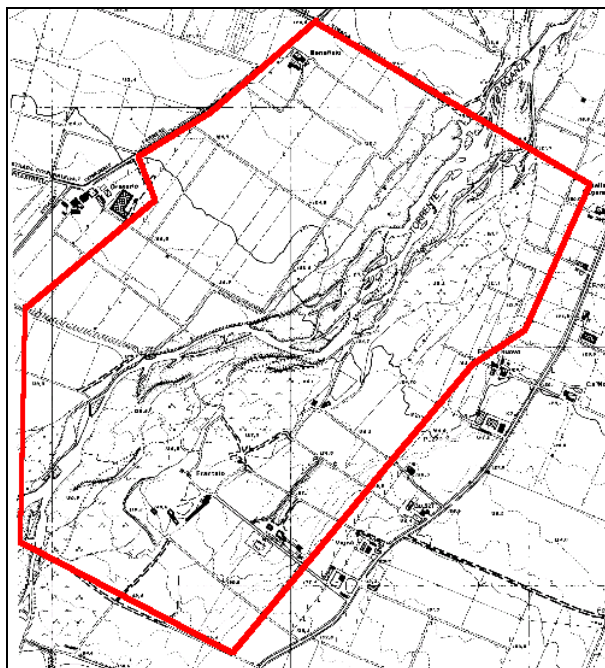


Figura 4.3: Seconda ipotesi di collocazione della cassa d'espansione

In questa zona sembrerebbe disponibile il volume necessario a laminare l'onda di 200 anni di tempo di ritorno, stimato in prima approssimazione pari a $4 \cdot 10^6 m^3$, nell'ipotesi di realizzare nella sezione di chiusura uno sbarramento alto non più di 10 m rispetto al fondo alveo, senza prevedere alcuno scavo.

L'ubicazione definitiva deve però essere effettuata sulla base di considerazioni non solo di tipo idraulico, ma anche economico, ambientale, paesaggistico e potrà pertanto essere

oggetto di variazioni. Le analisi svolte nel seguito hanno pertanto valore di indicazioni di massima e potranno essere affinate successivamente.

4.3 Caratteristiche principali della cassa

In figura 4.4 è rappresentata la proposta di suddivisione delle superfici planimetriche da attribuire alla cassa in linea e alla cassa fuori linea, nel sito dove si propone di realizzare la cassa d'espansione. La scelta di suddividere la cassa in una porzione in linea ed una cassa fuori linea è suggerita da un più efficiente funzionamento del sistema rispetto alla soluzione di un'unica cassa in linea.

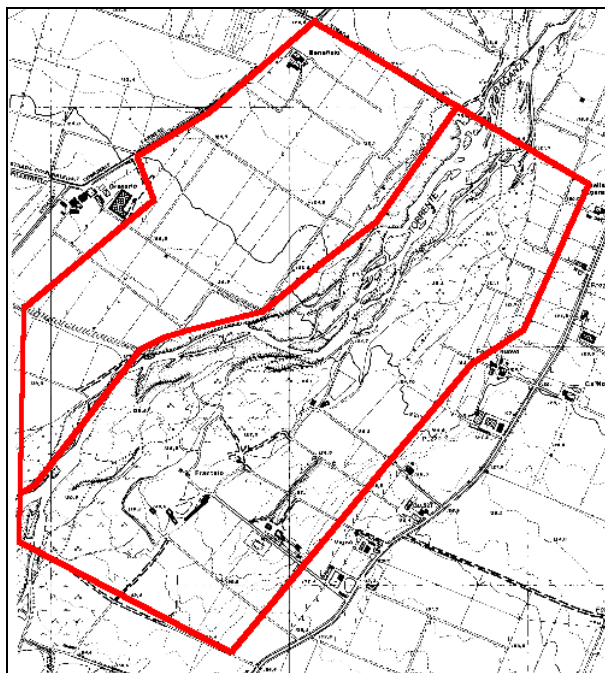


Figura 4.4: Suddivisione delle superfici nella zona di realizzazione della cassa d'espansione

4.3.1 Caratteristiche geometriche delle casse

Le caratteristiche geometriche che interessano ai fini del presente studio sono i legami superfici-quote idriche separatamente per ciascuna cassa, dalle quali è possibile dedurre immediatamente per integrazione i corrispondenti andamenti volumi-quote idriche. Per la loro determinazione si è fatto riferimento alla cartografia esistente e al modello digitale del terreno fornito dal Servizio Provinciale Difesa del Suolo della Regione

Emilia Romagna. Sulla base di tali informazioni, attraverso l'utilizzo del programma Surfer 8, si è giunti a definire la batimetria delle casse dalla quale sono stati poi ricavati gli andamenti riportati nelle seguenti Tabella 4.1-Figura 4.5 e Tabella 4.2-Figura 4.6.

Quota z_1 (m s.l.m.)	Superficie S_1 (ha)	Volume $10^6 m^3$
119.5	0.09	0.000
120.0	1.43	0.002
120.5	3.43	0.015
121.0	5.62	0.038
121.5	7.25	0.072
122.5	11.70	0.173
123.0	14.07	0.238
124.0	17.53	0.401
125.0	21.75	0.601
126.0	26.18	0.846
127.0	31.11	1.140
128.0	36.06	1.485
129.0	41.68	1.882
130.0	46.48	2.335
130.5	48.72	2.582
131.0	48.72	2.825
131.5	48.72	3.069
132.0	48.72	3.312

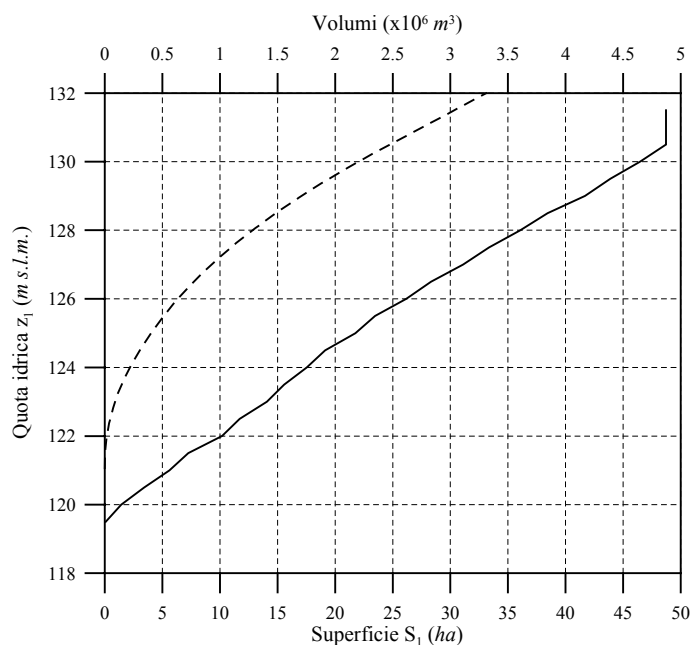


Tabella 4.1-Figura 4.5:Caratteristiche geometriche della cassa in linea.

Quota z_2 (m s.l.m.)	Superficie S_2 (ha)	Volume $10^6 m^3$
119.5	0.01	0.000
120.0	0.28	0.001
120.5	1.06	0.005
121.0	2.28	0.014
121.5	4.18	0.031
122.5	7.94	0.097
123.0	9.79	0.143
124.0	13.59	0.268
125.0	18.77	0.435
126.0	21.96	0.647
127.0	25.37	0.893
128.0	27.79	1.173
129.0	28.54	1.469
130.0	29.92	1.772
130.5	32.08	1.937
131.0	32.08	2.098
131.5	32.08	2.258
132.0	32.08	2.419

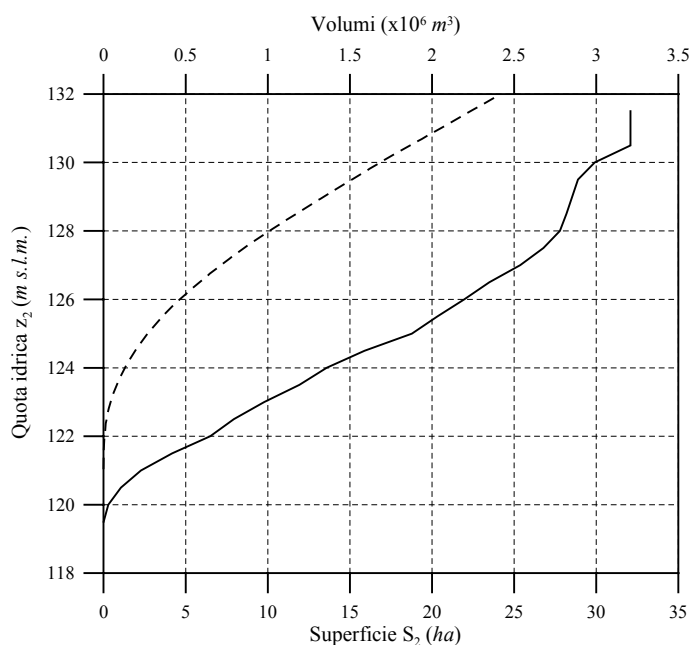


Tabella 4.2 - Figura 4.6: Caratteristiche geometriche cassa fuori linea.

4.3.2 Caratteristiche idrauliche degli organi di scarico

Il manufatto principale è costituito da una traversa tracimabile al fondo della quale sono aperte 3 luci di sezione rettangolare. Le dimensioni e le quote principali del manufatto sono riportate in Tabella 4.3. Ai fini del problema in studio, interessa valutare le portate allontanabili dagli organi di scarico del manufatto principale in funzione della quota idrica della cassa in linea.

Quota fondo luci manufatto principale z_f (m s.l.m.)	119.5
Larghezza di ciascuna luce b (m)	7.0
Altezza di ciascuna luce h (m)	1.7
Area della sezione di ciascuna luce A (m^2)	11.9
Quota ciglio sfiorante (m s.l.m.)	130
Lunghezza ciglio sfiorante (m)	170

Tabella 4.3: Dimensioni e quote principali del manufatto regolatore.

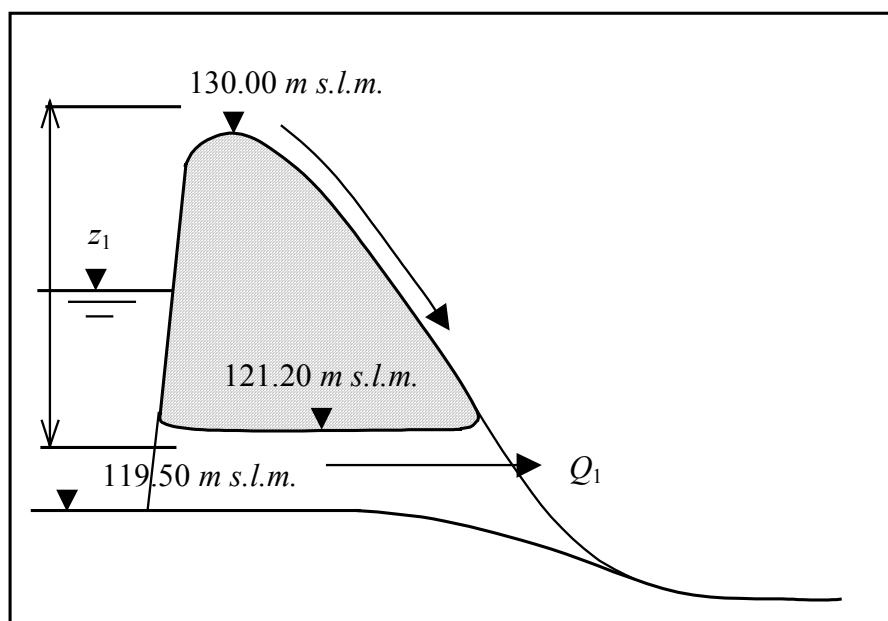


Figura 4.7: Sezione trasversale schematica del manufatto regolatore.

Con riferimento allo schema di figura 4.7 possono essere identificate le seguenti situazioni di efflusso dal manufatto principale:

- 1) Efflusso a pelo libero non rigurgitato da valle. La corrente lenta proveniente da monte subisce un passaggio attraverso lo stato critico in corrispondenza di una

sezione in prossimità dell'imbocco. Trascurando la velocità di arrivo, il legame tra la portata scaricata e la quota idrica di monte z_1 può essere calcolato con l'espressione:

$$Q_1 = 3 \cdot b \left(\frac{2}{3} (z_1 - z_f) \right) \sqrt{g \left(\frac{2}{3} (z_1 - z_f) \right)} \quad (4.1)$$

dove Q_1 è la portata che attraversa le luci, g l'accelerazione di gravità e gli altri simboli hanno il significato riportato in Tabella 4.3.

Tale regime di efflusso può ritenersi valido nel campo $119.5 < z_1 \leq 122 \text{ m s.l.m.}$;

- 2) Efflusso in pressione. Oltre 122 m s.l.m. (0.8 m al di sopra del cielo dei condotti di scarico) il funzionamento delle luci avviene in pressione. La portata scaricata può essere calcolata con l'espressione

$$Q_1 = 3 \cdot \mu_{f1} A \sqrt{2g(z_1 - z_v)} \quad (4.2)$$

dove si è assunto $\mu_{f1} = 1$, nell'ipotesi di imbocco perfettamente raccordato.

Tale regime di efflusso può ritenersi valido nel campo $122 \leq z_1 \leq 130 \text{ m s.l.m.}$, ovvero fino alla quota del ciglio sfiorante;

- 3) Efflusso in pressione e sfioratore in funzione. Alla portata scaricata dalle luci di fondo si aggiunge quella tracimata al di sopra dello sfioratore di superficie. La portata complessiva può calcolarsi con l'espressione

$$Q_1 = 3 \cdot \mu_f A \sqrt{2g(z_1 - z_v)} + \mu_s L(z_1 - z_s) \sqrt{2g(z_1 - z_s)} \quad (4.3)$$

dove si è assunto $\mu_s = f((z_1 - z_s)/(z_0 - z_s))$, con z_0 carico di progetto sullo stramazzo. Lo scaricatore di superficie è uno stramazzo Creager; il profilo di questo tipo di stramazzo viene definito in modo che quando nella cassa si raggiunge il livello idrico di progetto (nel caso in esame pari a 132 m s.l.m. corrispondente a un carico $(z_0 - z_s) = 2 \text{ m}$) la vena lo segua perfettamente e la pressione lungo il contatto con il manufatto sia nulla.

Per valori $0.2 \leq ((z_1 - z_s)/(z_0 - z_s)) \leq 2$ si è assunta la formula proposta da Chow:

$$\frac{\mu_s}{\mu_0} = \left(\frac{z_1 - z_s}{z_0 - z_s} \right)^{0.12}, \text{ dove } \mu_0 = 0.490 \text{ (valore per lo stramazzo tipo Creager);}$$

Per valori $0 < ((z_1 - z_s)/(z_0 - z_s)) < 0.2$ si è assunto un valore variabile linearmente da $\mu_s = 0.404$ per $((z_1 - z_s)/(z_0 - z_s)) = 0.2$ a $\mu_s = 0.385$ per $((z_1 - z_s)/(z_0 - z_s)) = 0$ nell'ipotesi di stramazzo a larga soglia.

Tale regime di efflusso si verifica per $z_1 > 130 \text{ m s.l.m.}$

La scala delle portate effluenti dal manufatto principale, ottenuta mediante l'applicazione delle (4.1)-(4.3) è riportata in Tabella 4.4 e figura 4.8.

h (m s.l.m.)	Portata (m^3/s)
119.5	0.0
120.0	12.1
120.5	34.3
121.0	63.1
121.5	97.1
122.0	135.8
122.5	173.0
123.0	203.5
124.0	253.8
125.0	295.7
126.0	332.3
127.0	365.3
128.0	395.6
128.5	409.9
129.0	423.7
129.5	437.0
130.0	450.0
130.5	573.5
131.0	815.8
132.0	1546.4

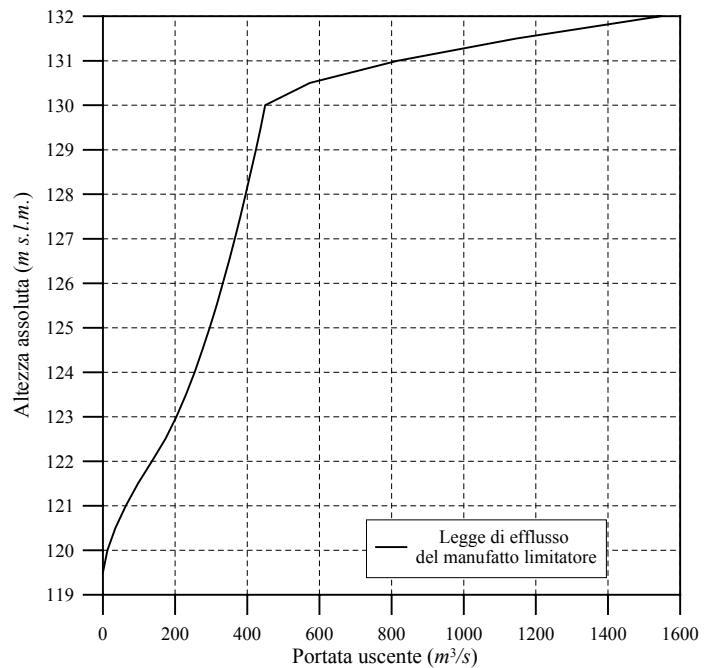


Tabella 4.4 - Figura 4.8:Scala delle portate del manufatto principale.

Il manufatto di scarico della cassa fuori linea è costituito da un tombino di sezione quadrata $2 \times 2 \text{ m}$ che attraversa l'argine della cassa fino a scaricare in alveo, alcune decine di metri a valle del manufatto principale. Le dimensioni e le quote principali del manufatto sono riportate in Tabella 4.5.

Quota fondo luce z_{f2} (m s.l.m.)	119.5
Larghezza luce b_2 (m)	2
Altezza luce h (m)	2

Tabella 4.5: Quota e dimensioni principali del manufatto di scarico della cassa fuori linea.

La determinazione della portata allontanata dallo scarico di fondo risulta funzione, oltre che della geometria del tombino, anche della contemporanea portata transitante in alveo, che può rigurgitare lo sbocco del manufatto. A seconda del valore di detta portata, il tombino può funzionare completamente in pressione, con sezione di controllo posta al termine del manufatto stesso, ovvero parzialmente o totalmente a pelo libero, con sezione di controllo all'imbocco od allo sbocco a seconda della pendenza e della scabrezza del tombino. Poiché tali informazioni non sono note e la portata allontanata da tale scarico è comunque modesta, si è ritenuto lecito semplificarne il funzionamento, identificando i seguenti due regimi di efflusso dal manufatto:

1. Efflusso a pelo libero con sezione di controllo all'imbocco. La corrente lenta proveniente da monte subisce un passaggio attraverso lo stato critico in corrispondenza di una sezione in prossimità dell'imbocco. Trascurando la velocità di arrivo il legame tra la portata scaricata e la quota idrica di monte z_2 può essere calcolato con l'espressione:

$$Q_2 = b_2 \left(\frac{2}{3} (z_2 - z_{f2}) \right) \sqrt{g \left(\frac{2}{3} (z_2 - z_{f2}) \right)} \quad (4.4)$$

dove Q_2 è la portata che attraversa la luce e gli altri simboli hanno il significato riportato in Tabella 4.5.

2. Efflusso con imbocco in pressione. Oltre 122 *m s.l.m.* (0.5 *m* al di sopra del cielo del condotto di scarico) si può ritenere che il funzionamento dell'imbocco avvenga sotto battente. Supponendo che la corrente nel resto tombino si mantenga a pelo libero la portata scaricata può essere calcolata con l'espressione

$$Q_2 = \mu_{f2} A_2 \sqrt{2g(z_2 - z_c)} \quad (4.5)$$

dove z_c è la quota del pelo libero in corrispondenza della sezione contratta, assunta pari a 121.1 *m s.l.m.* e μ_{f2} il coefficiente di efflusso, considerato pari a 0.76. Tale regime di efflusso può ritenersi valido nel campo $z_2 \geq 122$ *m s.l.m.*.

La scala delle portate effluenti dallo scarico della cassa fuori linea, ottenuta mediante l'applicazione delle (4.4)-(4.5) è riportata in Tabella 4.6 e figura 4.9.

h (m s.l.m.)	Portata (m ³ /s)
119.5	0
120.0	1.5
120.5	4.2
121.0	7.7
121.5	11.8
122.0	16.5
122.5	19.0
123.0	21.3
124.0	25.2
125.0	28.6
126.0	31.6
127.0	34.3
128.0	36.9
128.5	38.1
129.0	39.3
129.5	40.4
130.0	41.5
130.5	42.6
131.0	43.6
132.0	45.7

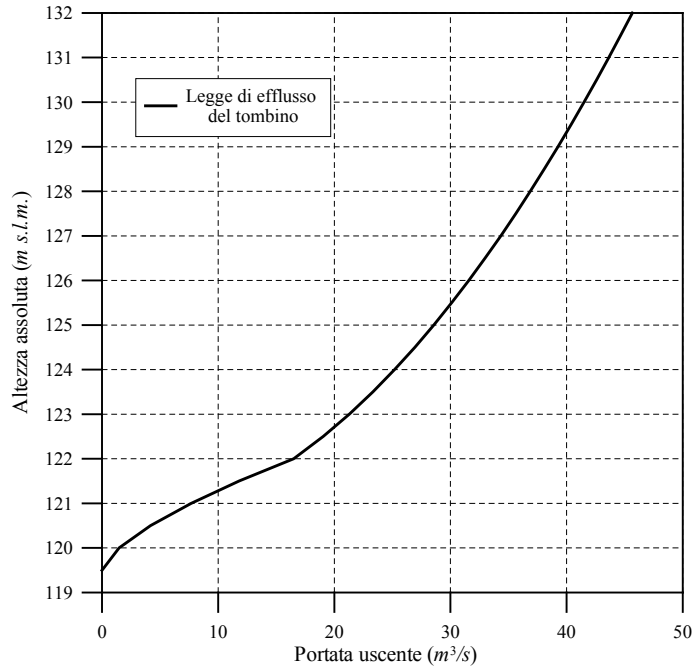


Tabella 4.6 - Figura 4.9: Scala delle portate dello scarico di fondo della cassa fuori linea.

Lo sfioratore di collegamento tra le casse è costituito da una soglia di lunghezza $L = 250 \text{ m}$ posta a quota $z_{s12} = 129.1 \text{ m s.l.m.}$. A seconda del livello nelle due casse, l'efflusso può risultare libero ovvero rigurgitato. Poiché lo svasso della cassa in linea avviene più rapidamente, grazie alla maggior capacità di allontanamento degli organi di scarico, durante la fase calante può avvenire anche che la portata transiti sullo scaricatore provenendo dalla cassa fuori linea, a quota maggiore, verso quella in linea. La portata scaricata dalla cassa in linea verso quella fuori linea può essere calcolata con l'espressione

$$Q_{12} = c(z_1, z_2, z_{s12}) \mu_{12} L (z_1 - z_{s12}) \sqrt{2g(z_1 - z_{s12})} \quad (4.6)$$

dove μ_{12} è il coefficiente di efflusso, assunto pari a 0.385 come per uno stramazzo a larga soglia, e $c(z_1, z_2, z_{s12})$ è un coefficiente riduttore di portata che tiene conto, se necessario, del rigurgito provocato dal livello idrico z_2 della cassa fuori linea. Per la determinazione di tale coefficiente si è fatto riferimento agli studi di M. Schmidt (1954). L'andamento è riportato in figura 4.10: per $(z_2 - z_{s12}) \leq 0.81(z_1 - z_{s12})$ l'efflusso non è rigurgitato ($c(z_1, z_2, z_{s12}) = 1$); oltre tale valore il coefficiente $c(z_1, z_2, z_{s12})$ assume i

valori riportati in figura 4.10.

Qualora la portata transiti dalla cassa fuori linea verso la cassa in linea si è utilizzata l'espressione simmetrica

$$Q_{21} = c(z_1, z_2, z_{s12}) \mu_{21} L(z_2 - z_{s12}) \sqrt{2g(z_2 - z_{s12})} \quad (4.7)$$

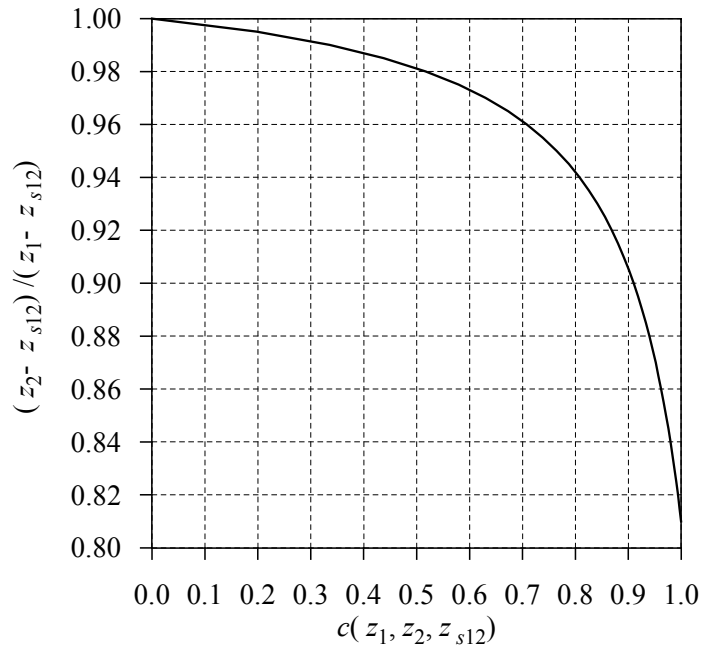


Figura 4.10: Coefficiente di riduzione di portata per efflusso rigurgitato

4.4 Effetto di laminazione della cassa d'espansione sul torrente Baganza

Il progetto della cassa d'espansione sul torrente Baganza è stato realizzato considerando in ingresso alla cassa l'onda di 200 anni di tempo di ritorno ricavata nella Relazione Idrologica. Fissati gli andamenti delle superfici e dei volumi in funzione della batimetria per le due casse, si è dimensionato lo stramazzo di collegamento tra le due casse in modo tale che lo sfioratore del manufatto principale della cassa in linea non entrasse in funzione. Il funzionamento della cassa è poi stato verificato con le onde sintetiche ricavate per gli altri tempi di ritorno.

I risultati principali delle simulazioni sono riportati in Appendice C.

La figura 4.11 e la tabella 4.7 sintetizzano i principali risultati. Sono riportate, per ogni tempo di ritorno le seguenti grandezze:

- portata massima in ingresso alla cassa Q_e ;
- portata massima in uscita dal manufatto regolatore della cassa in linea Q_1 ;
- portata massima in uscita dallo scarico della cassa fuori linea Q_2 ;
- rapporto di laminazione $\eta = (Q_1 + Q_2) / Q_e$;
- portata massima scambiata tra la cassa 1 (in linea) e 2 (fuori linea) Q_{1-2} ;
- portata massima scambiata tra la cassa 2 (fuori linea) e 1 (in linea) Q_{2-1} ;
- quota idrica massima nella cassa in linea z_1 ;
- quota idrica massima nella cassa fuori linea z_2 ;
- dislivello idrico massimo tra la cassa in linea e quella fuori linea $\Delta z_{1-2} = (z_1 - z_2)$;
- dislivello idrico massimo tra la cassa fuori linea e quella in linea $\Delta z_{2-1} = (z_2 - z_1)$;
- volume massimo invasato nella cassa in linea W_1 ;
- volume massimo invasato nella cassa fuori linea W_2 .

La massima efficienza della cassa, corrispondente al rapporto di laminazione minimo $\eta = 0.60$, si ottiene per l'evento di piena di 200 anni di tempo di ritorno. L'efficienza minima si manifesta per eventi di basso tempo di ritorno ($T = 5-10$ anni) per i quali la cassa in linea si invasa solo in parte, mentre quella fuori linea non si invasa affatto. Per questi tempi di ritorno le portate sono comunque compatibili con l'alveo di valle.

Valori massimi	Tempo di ritorno (anni)						
	5	10	20	50	100	200	500
$Q_e (m^3/s)$	229	307	396	536	671	811	1047
$Q_1 (m^3/s)$	213	272	330	405	441	448	787
$Q_2 (m^3/s)$	0	0	0	0	31	41	43
$(Q_1 + Q_2) (m^3/s)$	213	272	330	405	467	489	831
$\eta = (Q_1 + Q_2) / Q_e$	0.93	0.89	0.83	0.76	0.70	0.60	0.79
$Q_{1-2} (m^3/s)$	0	0	0	0	177	318	523
$Q_{2-1} (m^3/s)$	0	0	0	0	0	3	0
$z_1 (m \text{ s.l.m.})$	123.17	124.42	125.93	128.32	129.66	129.92	130.94
$z_2 (m \text{ s.l.m.})$	119.50	119.50	119.50	119.50	125.67	129.90	130.94
$\Delta z_{1-2} (m)$	3.67	4.92	6.43	8.82	9.54	9.43	9.49
$\Delta z_{2-1} (m)$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.90	0.80
$W_1 (10^6 m^3)$	0.26	0.47	0.80	1.56	2.11	2.23	2.72
$W_2 (10^6 m^3)$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.55	1.66	1.99

Tabella 4.7: Valori delle principali grandezze ottenute dalle elaborazioni nell'ipotesi di cassa d'espansione sul torrente Baganza formato da due invasi.

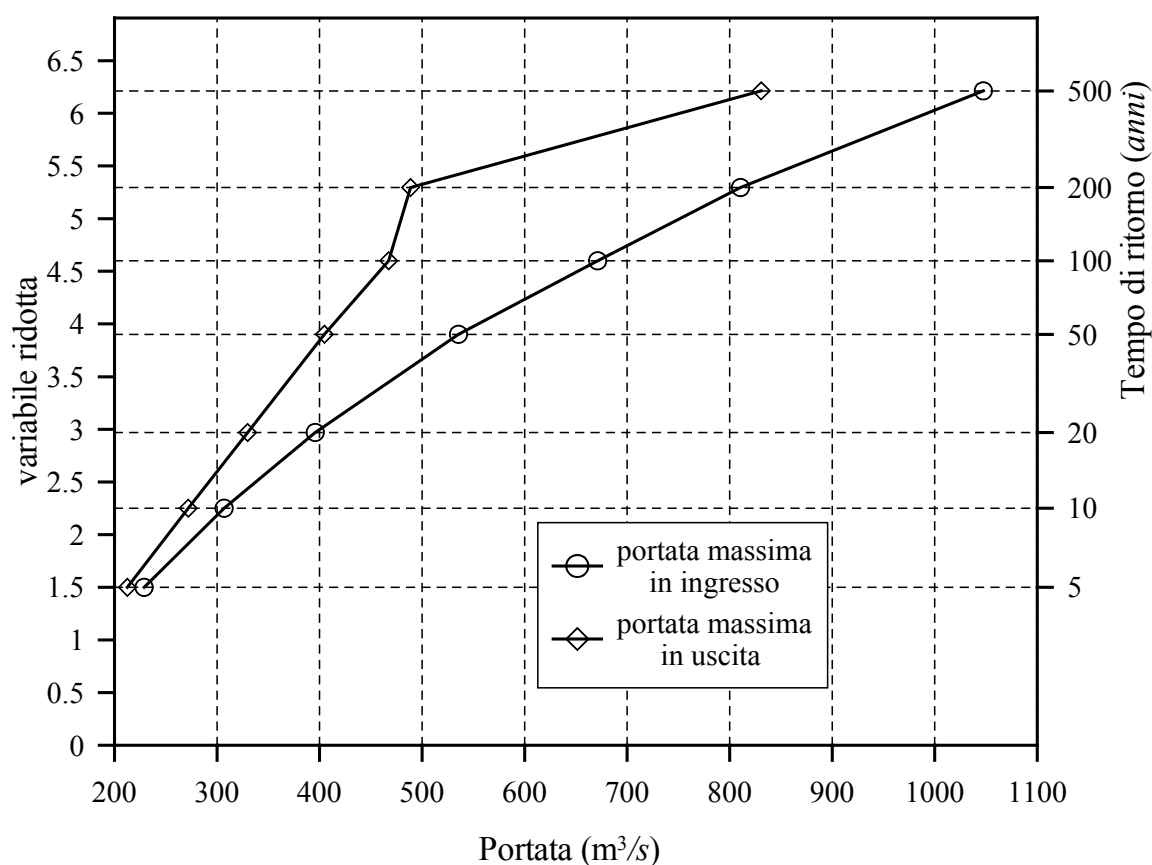


Figura 4.11: Andamento, in funzione del tempo di ritorno T , delle portate al colmo in ingresso Q_e ed in uscita ($Q_1 + Q_2$) dalla cassa.

La soluzione con doppia cassa permette di evitare che entri in funzione lo stramazzo dell'organo limitatore della cassa in linea anche nel caso dell'idrogramma sintetico in ingresso di 200 anni di tempo di ritorno (figura 4.12).

Dai risultati riportati in Appendice C si nota che la cassa fuori linea viene coinvolta solo per onde con tempo di ritorno maggiore di 50 anni, e quindi una parte dell'area destinata alla cassa viene preservata da inondazioni più frequenti.

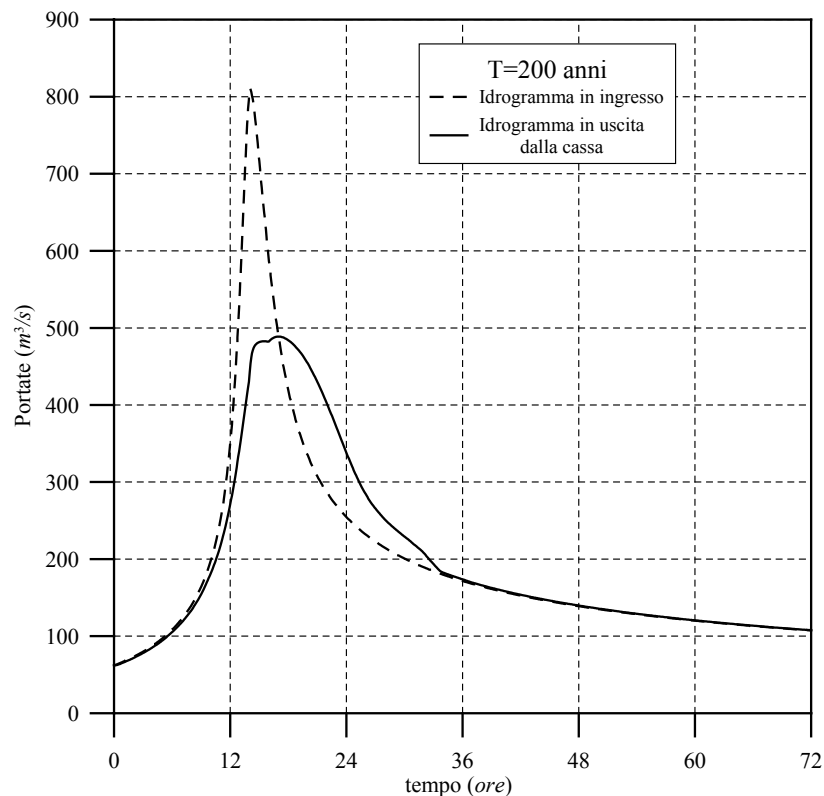


Figura 4.12: Risultati ottenibili dalla laminazione dell'onda con 200 anni di tempo di ritorno per la cassa d'espansione sul torrente Baganza

4.5 Analisi della sicurezza idraulica del torrente Baganza a valle della cassa

Per valutare la sicurezza idraulica del torrente Baganza in presenza della cassa di espansione è stata effettuata una ulteriore simulazione propagando lungo l'asta l'onda di piena laminata dalla cassa per un tempo di ritorno $T = 200$ anni. Tale condizione è stata

imposta nella sezione del torrente immediatamente a valle della cassa. I risultati sono sintetizzati nella tabella 4.8. La figura 4.13 riporta l'andamento del franco minimo lungo l'asta, confrontato con quello ottenuto in assenza di cassa. Si apprezza un netto miglioramento, con incrementi del franco che, nel tratti cittadino, raggiungono l'entità del metro. Permangono invero alcune situazioni in cui il franco risulta inferiore al metro, ma si è già avuto modo di segnalare nel Capitolo 2 che la maggior parte di queste situazioni è dovuta ad una non completa descrizione delle sezioni. Così è per la sezione n.5 in destra idraulica, l'unica nella quale il franco appare decisamente insufficiente. Nel rimanente tratto cittadino, compresa la sezione n.1 che prima evidenziava un franco insufficiente, il franco, in presenza della cassa di espansione, appare adeguato.

n° sezione	Progressiva (m)	Quota max sponda sx (m s.l.m.)	Quota max sponda dx (m s.l.m.)	Quota idrica massima (m s.l.m.)	franco minimo (m)
21	20316	119.87	120.87	119.33	0.54
19	20652	117.10	117.87	116.19	0.91
18	21240	111.38	111.80	110.42	0.96
17	21737	107.27	107.26	106.10	1.16
16	22171	104.16	103.57	102.35	1.22
14	23054	95.61	95.61	93.64	1.97
13	23561	91.94	90.94	89.53	1.41
12	23951	88.99	89.14	86.32	2.67
11	24403	85.44	85.73	83.29	2.15
10	24841	83.19	83.22	79.97	3.22
9	25286	79.91	81.20	77.02	2.89
8	25625	76.85	78.15	74.39	2.46
7	26037	74.95	74.49	71.45	3.04
6	26286	72.89	72.90	69.51	3.38
5	26765	69.69	67.49	67.29	0.20
4	27062	67.77	67.79	65.35	2.42
3	27431	65.33	65.44	63.44	1.89
1	27682	64.50	64.10	62.60	1.50
P. Nuovo monte	27802	64.495	64.60	62.25	2.25
P. Nuovo valle	27822	64.495	64.60	61.96	2.53
2	27840	64.34	64.04	61.82	2.22
3	28015	62.74	62.5	60.71	1.79

Tabella 4.8: Andamento delle altezze idriche massime e dei franchi per il tratto del torrente Baganza a valle della cassa di espansione per 200 anni di tempo di ritorno.

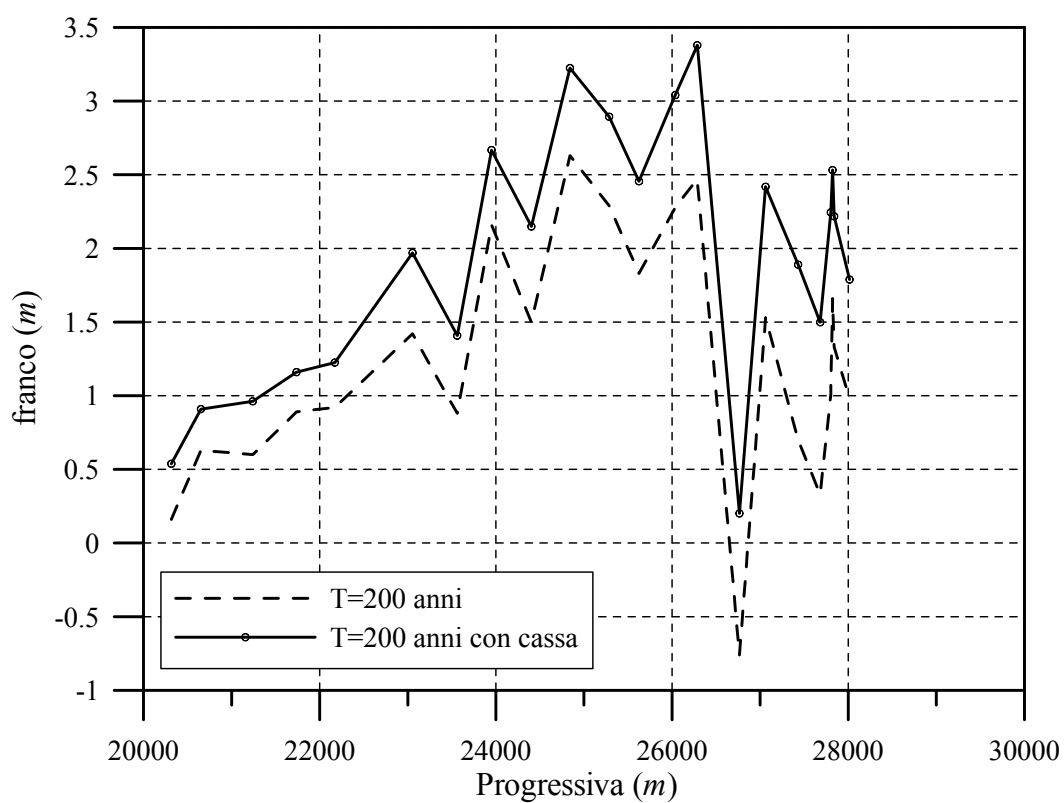


Figura 4.13 - Andamento dei franchi ($T=200$ anni) per il tratto del Baganza a valle della cassa di espansione (sezione n° 21) in presenza ed in assenza della cassa.

5. ANALISI DEL SISTEMA PARMA-BAGANZA NELLE POSSIBILI CONFIGURAZIONI DI PROGETTO

5.1 *Analisi dei possibili scenari e definizione delle onde di piena*

Nel Capitolo precedente sono stati analizzati gli effetti di laminazione ottenibili a seguito del completamento della cassa di espansione sul torrente Parma e di quella in progetto sul torrente Baganza.

In questo Capitolo si vuole analizzare con maggiore dettaglio l'effetto delle casse di espansione sul sistema Parma-Baganza a valle della confluenza, fino alla foce in Po.

A questo scopo si sono considerati i due possibili scenari futuri:

1. completamento della cassa di espansione sul torrente Parma a monte della confluenza in assenza della cassa sul torrente Baganza;
2. completamento di entrambe le casse di espansione.

La simulazione del comportamento del sistema Parma-Baganza, in presenza di una o entrambe le casse di espansione, è piuttosto complesso. Occorre infatti definire non solo la forma ed il volume delle onde di piena che è possibile attendersi in ingresso alla (alle) casse di espansione, ma anche la loro fasatura temporale. Si è già avuto modo di accennare, nel capitolo precedente, come l'evento composto da due onde di piena duecentennali sui torrenti Parma e Baganza corrisponda ad un evento con tempo di ritorno sicuramente superiore ai duecento anni a valle della confluenza. Ciò è ben evidente se si osservano gli idrogrammi sintetici ottenuti dalle analisi idrologiche (cfr. capitolo 4 della Relazione Idrologica) per le sezioni di Ponte Bottego (a valle della confluenza), di Ponte Nuovo (sul torrente Baganza) e di Ponte Dattaro (sul torrente Parma). Fissato un generico tempo di ritorno, la somma dei volumi delle due onde di piena confluenti risulta significativamente maggiore dell'onda di piena del medesimo tempo di ritorno ricavata per la sezione di Ponte Bottego. Ciò dimostra che, pur essendo gli eventi di piena del sistema Parma-Baganza correlati tra loro, in quanto causati dagli stessi fenomeni meteorologici, non è lecito, dal punto di vista probabilistico, considerarli totalmente correlati.

Si pone pertanto il problema di definire una ragionevole coppia di idrogrammi sui torrenti Parma e Baganza alla quale attribuire un significato statistico.

In mancanza di più precise informazioni idrologiche¹ si è ritenuto che, per ogni tempo di ritorno T prescelto, la coppia di idrogrammi da considerare sugli affluenti dovesse essere tale da generare alla confluenza proprio l'onda di piena di quel tempo di ritorno T ricavata a Ponte Bottego. Questa condizione, da sola, non è ovviamente sufficiente a definire una coppia univoca di idrogrammi di piena sui due torrenti, ma ne vincola solo il volume complessivo e la distribuzione temporale. Per ogni tempo di ritorno, si sono pertanto analizzate diverse coppie di idrogrammi sui due torrenti, ciascuna delle quali però ricavata in modo da rispettare la condizione precedente.

Più precisamente, per ogni tempo di ritorno T sono state ricavate sei coppie di idrogrammi la cui somma riproduce l'onda sintetica ricavata per la sezione di Ponte Bottego per il medesimo tempo di ritorno.

Nelle prime tre si è imposto sul torrente Parma a monte della confluenza (Ponte Dattaro) l'idrogramma con tempo di ritorno pari a T dedotto dalle analisi idrologiche (regionalizzazione) e si è ricavato quello da assegnare al torrente Baganza (Ponte Nuovo) per differenza. Le tre coppie di onde differiscono per lo sfasamento temporale assegnato fra il colmo dell'idrogramma sintetico di Ponte Dattaro e quello di Ponte Bottego: in un caso i due colmi sono stati considerati in fase, in un altro si è considerato che il colmo dell'onda di piena a Ponte Dattaro precedesse quello a Ponte Bottego; nel terzo caso che il colmo dell'onda di piena a Ponte Dattaro seguisse quello a Ponte Bottego².

In modo del tutto analogo si sono ricavate tre ulteriori coppie di idrogrammi imponendo sul torrente Baganza (Ponte Nuovo) l'onda di piena con tempo di ritorno pari a T dedotta dalle analisi idrologiche e ricavando quella da assegnare al torrente Parma (Ponte Dattaro) per differenza. Anche in questo caso le tre coppie di onde di piena differiscono per lo sfasamento temporale assegnato fra il colmo dell'idrogramma

¹ Si ricorda che sul torrente Parma non sono disponibili serie storiche sufficientemente lunghe da consentire di effettuare analisi probabilistiche e che gli idrogrammi sintetici per questo torrente sono stati pertanto dedotti con procedure di regionalizzazione.

² Per la definizione dei possibili sfasamenti temporali si rimanda al paragrafo seguente.

sintetico di Ponte Nuovo e quello di Ponte Bottego.

Per maggior chiarezza è stata introdotta una nomenclatura delle coppie di onde di piena e delle relative simulazioni. Le prime tre coppie di idrogrammi ottenute per $T=200$ anni in cui a Ponte Dattaro si è imposto l'idrogramma sintetico duecentennale ricavando poi per differenza l'idrogramma a Ponte Nuovo sono state denominate: “200_Datt_fasate”, “200_Datt_prima”, “200_Datt_dop”; in tali simulazioni il colmo dell'onda sintetica transitante a Ponte Dattaro è in fase, in anticipo, in ritardo rispetto a quella transitante a Ponte Bottego. A titolo di esempio, la figura 5.1 riporta le onde di piena ottenute, per $T=200$ anni, denominate “200_Datt_fasate”.

Analogamente, le altre tre simulazioni sono state denominate: “200_Nuo_fasate”, “200_Nuo_prima”, “200_Nuo_dopo”; anche per esse la posizione temporale del colmo dell'idrogramma di Ponte Nuovo è in fase, in anticipo, in ritardo rispetto a quello di Ponte Bottego.

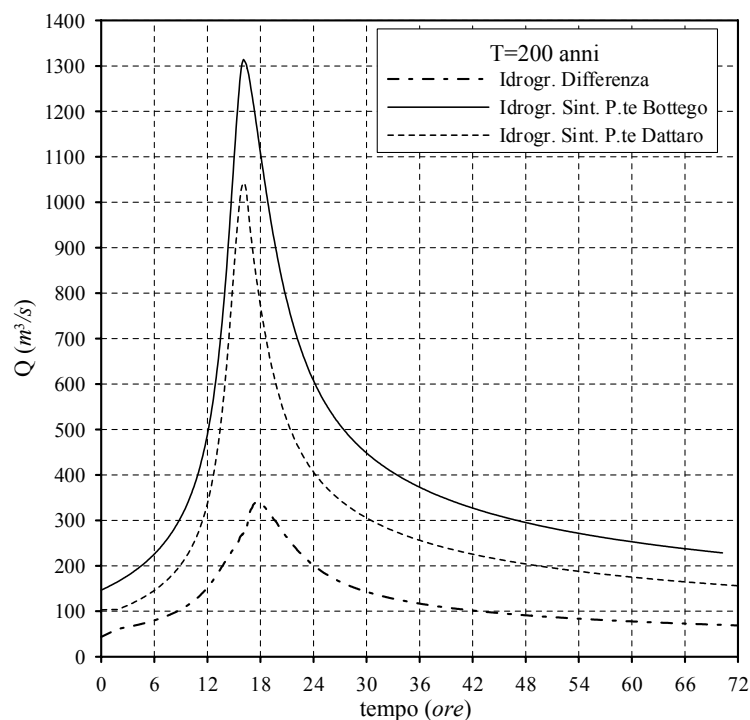


Figura 5.1 – Esempio di coppia di idrogrammi sul torrente Parma-Baganza per $T=200$ anni denominato “200_Datt_fasate”. A Ponte Dattaro si è imposto l'idrogramma sintetico duecentennale, mentre a Ponte Nuovo è stata imposta un'onda ottenuta come la differenza fra l'onda sintetica duecentennale di Ponte Bottego e quella di ponte Dattaro. La figura riporta il caso in cui i colmi dei due idrogrammi sintetici sono fasati.

5.1.1 *Analisi dei valori di sfasamento temporale*

Lo sfasamento temporale tra l'idrogramma sintetico a monte della confluenza (Ponte Dattaro o Ponte Nuovo) e quello a Ponte Bottego non deve ovviamente dar luogo ad onde ricostruite per differenza sull'altro affluente che presentino valori di portata negativi o rami di esaurimento troppo rapidi e quindi non realistici.

Mentre la prima condizione appare del tutto ovvia, la seconda richiede ulteriori approfondimenti. Allo scopo di quantificare la massima rapidità possibile del ramo di esaurimento delle onde di piena sui torrenti Parma e Baganza a monte della confluenza è stata effettuata un'analisi sugli eventi storici registrati nella stazione idrometrografica di Ponte Nuovo, considerando in particolare quelli che hanno dato luogo ai rami di esaurimento più rapidi (15/10/1980, 08/11/1982, 15/10/1990, 02/05/1991, 16/10/1992, 08/09/1994, 21/10/1999, 02/11/2000, 21/10/2002). Ciascun ramo di esaurimento è stato poi approssimato con una funzione esponenziale del tipo:

$$Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\frac{t-t_0}{k}} \quad (5.1)$$

dove Q_0 e t_0 sono l'istante ed il valore di portata all'inizio del ramo di esaurimento e k è una costante temporale che descrive la rapidità con cui l'idrogramma si esaurisce. Per ogni evento si è cercato, attraverso una regressione semilogaritmica sulla (5.1), il valore di k che meglio approssimasse il ramo di esaurimento. Analizzando i valori così ottenuti si è giunti a stabilire che valori di k inferiori alle due ore non sono compatibili con le caratteristiche del bacino del torrente Baganza. Si è ritenuto pertanto che anche le onde di piena sintetiche dedotte per differenza sul torrente Baganza dovessero rispettare tale vincolo. I valori di sfasamento considerati fra i picchi degli idrogrammi sintetici sul torrente Parma a monte della confluenza (Ponte Dattaro) ed a valle (Ponte Bottego) sono allora i massimi possibili che originano un'idrogramma differenza sul torrente Baganza con portate non negative e con un ramo di esaurimento che rispetti il vincolo prima stabilito ($k \geq 2$ ore).

In conclusione gli sfasamenti massimi per il colmo dell'onda sintetica di Ponte Dattaro sono risultati di 30 minuti in anticipo e 30 minuti in ritardo rispetto al colmo dell'onda di Ponte Bottego.

Sul torrente Parma a monte della confluenza non si avevano analoghi dati per poter valutare quale costante di esaurimento k fosse compatibile con il bacino idrografico. Si è allora assunto, vista la non grande differenza tra i due bacini, lo stesso valore ($k \geq 2$ ore) dedotto per il torrente Baganza. In questo caso gli sfasamenti massimi del colmo dell'onda di Ponte Nuovo sono risultati di 1 h 30 min. in anticipo e 2 ore in ritardo, sempre rispetto al colmo dell'onda sintetica di Ponte Bottego. Questi valori sono sostanzialmente gli stessi per ogni tempo di ritorno e sono in buon accordo con quanto osservato storicamente.

5.2 Comportamento del sistema Parma-Baganza in presenza della sola cassa sul torrente Parma

Al fine di analizzare quale sia il livello di sicurezza idraulica raggiungibile a valle della confluenza Parma-Baganza nella configurazione che prevede il completamento e l'entrata in funzione della sola cassa di espansione sul torrente Parma, sono state realizzate numerose simulazioni numeriche seguendo lo schema descritto nel paragrafo 5.1. In particolare sono state effettuate sei simulazioni per ogni tempo di ritorno T . L'idrogramma di piena ottenuto, in ognuna delle sei combinazioni, per il torrente Parma a monte della confluenza è stato inserito in ingresso alla cassa di espansione, ricavandone l'onda di piena in uscita. Tale onda è stata poi sommata a quella proveniente dal torrente Baganza e successivamente propagata, mediante il modello matematico, lungo l'asta del Parma fino alla foce in Po.

A titolo di esempio nella figura 5.2 sono riportati i risultati di una delle sei simulazioni per il tempo di ritorno $T = 200$ anni e precisamente quella nell'ipotesi che, in assenza di cassa di espansione, l'idrogramma sintetico sul torrente Parma a Ponte Dattaro fosse perfettamente in fase con quello di Ponte Bottego. Nella figura sono riportati:

1. l'onda di piena assegnata in ingresso alla cassa di espansione sul torrente Parma;
2. l'onda di piena in uscita dalla medesima cassa di espansione;
3. l'onda di piena proveniente dal torrente Baganza;
4. la somma di 2) e 3) transitante a Ponte Bottego;

5. l'onda di piena 4) propagata lungo l'asta del torrente Parma e valutata in corrispondenza dell'abitato di Colorno.

Dall'analisi di questa simulazione si evince come, in questa situazione in cui l'onda di piena principale proviene dal torrente Parma, la cassa di espansione è in grado di abbattere la portata in città (Ponte Bottego) da 1315 m^3/s (valore corrispondente al colmo dell'evento sintetico di $T=200$ anni dedotto dall'analisi idrologica³) a meno di 800 m^3/s . A Colorno il colmo dell'onda di piena subisce un ulteriore abbattimento, dovuto all'effetto di laminazione nel tratto fluviale, assestandosi su di un valore poco inferiore ai 700 m^3/s .

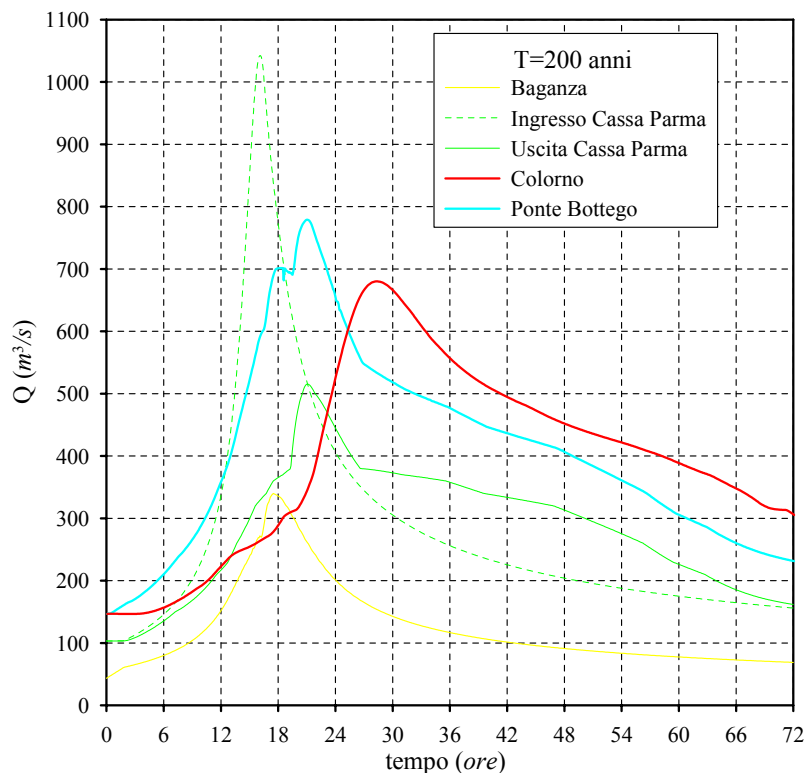


Figura 5.2 – Risultati della simulazione per $T=200$ anni nella combinazione denominata “200_Datt_fasate” in presenza della cassa di espansione sul torrente Parma.

Ben diverso sarebbe il risultato, soprattutto in corrispondenza della città di Parma, se si considerasse invece, sempre per il medesimo tempo di ritorno $T=200$ anni, che il

³ L'idrogramma sintetico dedotto per la sezione di Ponte Bottego in assenza di cassa di espansione non è riportato in figura 5.2, per evitare ulteriori appesantimenti di lettura. Si veda la figura 4.6 della relazione idrologica od i valori numerici riportati in tabella F.5 dell'Appendice F della stessa relazione.

contributo principale provenisse dal torrente Baganza. La figura 5.3 riporta i risultati che si otterrebbero in questo caso.

L'onda di piena a Ponte Bottego raggiungerebbe un colmo di circa $1100 \text{ m}^3/\text{s}$, superiore alla portata compatibile stimata in circa $1000 \text{ m}^3/\text{s}$. A Colorno le differenze, rispetto al caso precedente, si attenuano grazie alla maggiore laminazione operata dall'asta fluviale sull'onda di piena che si presenta più ripida della precedente (si ricorda che il volume è sempre il medesimo); il colmo a Colorno si attesta comunque intorno ai $750 \text{ m}^3/\text{s}$, valore superiore alla portata compatibile nel tratto urbano.

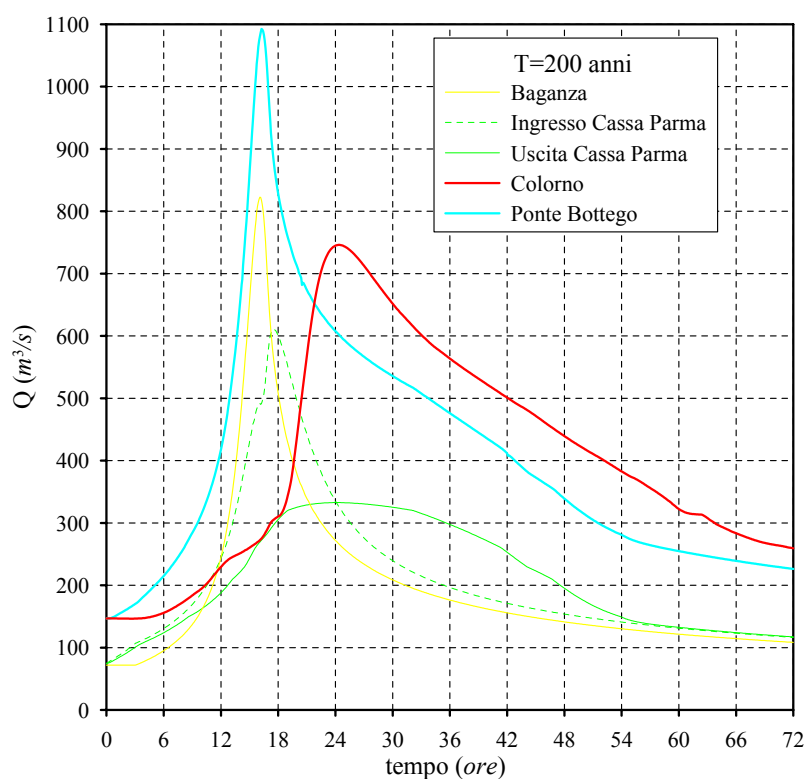


Figura 5.3 – Risultati della simulazione per T=200 anni nella combinazione denominata “200_Nuo_fasate” in presenza della cassa di espansione sul torrente Parma.

I risultati di tutte le simulazioni effettuate (sei simulazioni per i tempi di ritorno di 5, 10, 20, 50, 100 e 200 anni, per un totale di $6 \times 6 = 36$ simulazioni) sono riportati in forma grafica in Appendice D.

La sintesi di queste simulazioni, ovvero le portate al colmo risultanti nelle varie combinazioni e per i vari tempi di ritorno, sono riportati in figura 5.4 per la sezione di

Ponte Bottego, rappresentativa dell'intero tratto cittadino del torrente Parma. In particolare in figura 5.4 sono riportati, per ogni tempo di ritorno:

- i valori dei sei colmi in corrispondenza della sezione di Ponte Bottego,
- il valore della portata al colmo, sempre per la sezione di Ponte Bottego, in assenza di cassa di espansione.

Nella figura è anche evidenziato il valore di portata compatibile stimato per il tratto cittadino.

I valori estremi, per ogni tempo di ritorno, sono stati raccordati tra loro mediante linee continue, che definiscono la possibile fascia nella quale verrà a collocarsi l'effettiva distribuzione di probabilità delle portate al colmo in presenza della cassa di espansione sul torrente Parma. Purtroppo, data la complessità del sistema e la carenza di informazioni storiche, non si è in grado di definire più esattamente tale distribuzione.

Dal grafico di figura 5.4 possono però trarsi alcune interessanti considerazioni.

- le tre simulazioni denominate “Nuo_dopo, Nuo_fasato”, “Nuo_prima”, in cui l'onda di piena principale proviene dal torrente Baganza, danno luogo ai valori di colmo più elevati a Ponte Bottego. Ciò appare evidente se si considera che in queste tre simulazioni il maggior contributo proviene dal torrente Baganza sul quale non è presente alcuna cassa di espansione in grado di attenuarne i colmi (per i dettagli si vedano i grafici riportati in Appendice D);
- per il tempo di ritorno $T = 200$ anni, assunto come riferimento, le portate al colmo in corrispondenza del tratto cittadino superano, come già evidenziato, il valore della portata compatibile. **Ciò giustifica la necessità di attenuare anche le onde di piena provenienti dal torrente Baganza, mediante la realizzazione di un'apposita cassa di espansione;**
- per i tempi di ritorno più bassi (5-20 anni) per i quali l'effetto della cassa di espansione è più modesto, è teoricamente possibile che le portate al colmo risultino maggiori in presenza della cassa; ciò si deduce in figura 5.4 dall'intreccio tra la linea che rappresenta l'involuppo dei massimi valori di portata ottenuti dalle simulazioni con quella dedotta in assenza di casse. Tale risultato è probabilmente

più teorico che reale, ma comunque si riferisce a valori di portata molto inferiori alla portata compatibile e quindi privi di rilevanza pratica.

•

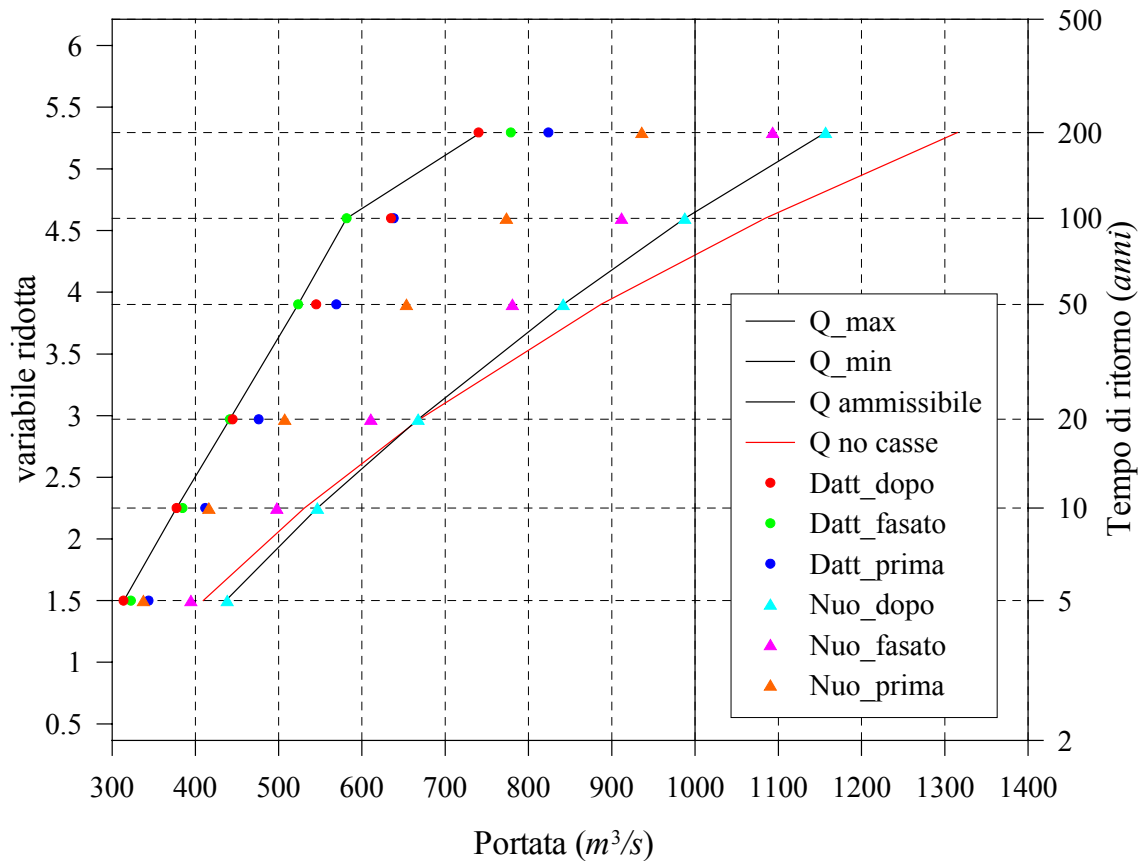


Figura 5.4 – Risultati delle simulazioni in presenza della cassa di espansione sul torrente Parma in corrispondenza della sezione di Ponte Bottego.

In figura 5.5 è riportato l'andamento dei franchi nel tratto cittadino del torrente Parma. Essi sono stati dedotti dall'involuppo dei livelli ottenuti dalle sei simulazioni effettuate per $T = 200$ anni. Si apprezza un miglioramento rispetto alla condizione in assenza di cassa, ma si notano altresì ancora dei punti nei quali il franco di un metro non è garantito⁴.

⁴ Al contrario che nel Capitolo 2, i franchi sono riportati in figura 5.5 sono riferiti ai livelli idrici e non al livello energetico. Considerato che l'entità delle altezze cinetiche è di circa 0.5 m , i franchi dovrebbero essere ridotti di questa entità.

In figura 5.6 è riportata la sintesi dei risultati delle simulazioni in corrispondenza della sezione del Ponte di piazza Garibaldi a Colorno.

A differenza che per il tratto in corrispondenza della città di Parma, si è però già mostrato al paragrafo 2.3 che non è possibile definire un valore univoco di portata ammissibile per il Ponte di piazza Garibaldi a Colorno poiché i livelli idrici risentono dell'effetto del rigurgito di Po. La simulazione realizzata imponendo a valle un livello pari a 27 *m s.l.m.* fornisce un valore di portata compatibile di 525 m^3/s , che è stato assunto come riferimento.

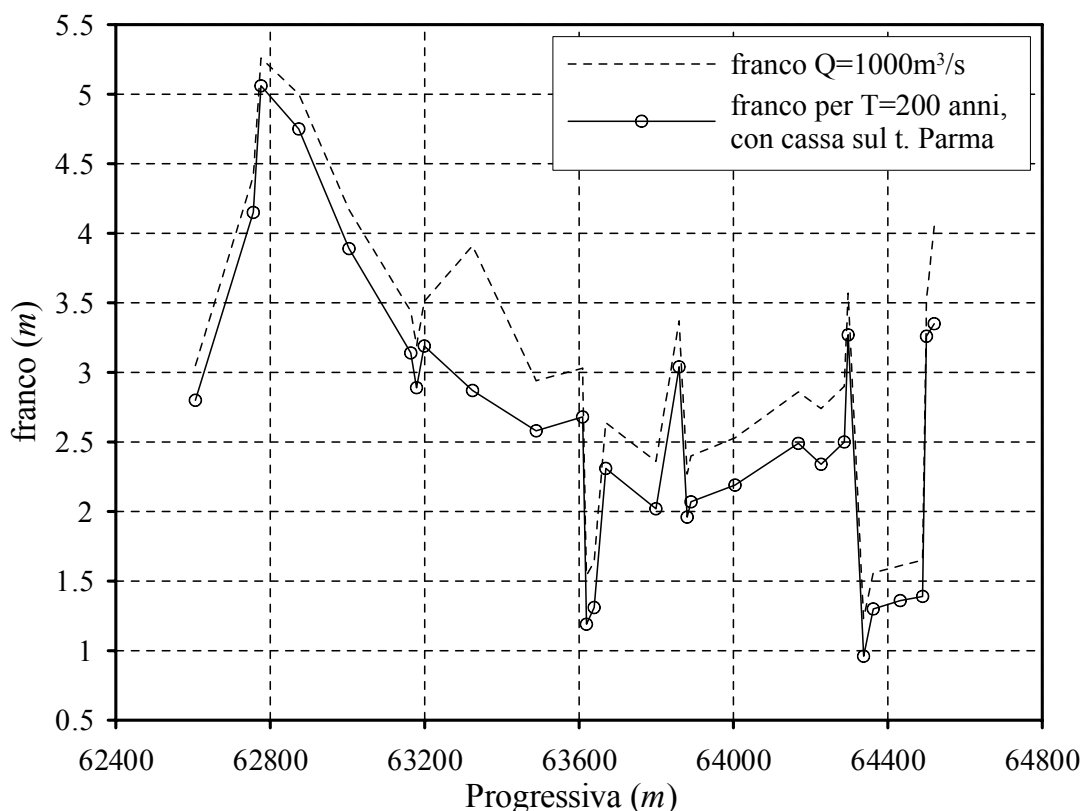


Figura 5.5 – Andamento dei franchi nel tratto cittadino del torrente Parma ottenuti dall'involuppo delle simulazioni per $T=200$ anni in presenza della cassa di espansione sul torrente Parma a monte della confluenza.

Dalla figura 5.6 si nota come la presenza della cassa di espansione sul torrente Parma migliori la situazione a Colorno, rispetto alla condizione di assenza di casse. Il livello di sicurezza ottenibile appare comunque insufficiente: infatti per tempi di ritorno di 100 e 200 anni neppure le combinazioni più favorevoli sono in grado di abbattere la portata al

di sotto della portata compatibile; anche per un tempo di ritorno di soli 50 anni, a seconda della combinazione considerata, la compatibilità idraulica non è garantita.

Verrà però messo in evidenza nel paragrafo seguente che neppure la realizzazione di due casse di espansione, una sul torrente Parma ed una sul torrente Baganza, sarà in grado di garantire la sicurezza idraulica di Colorno fino al tempo di ritorno duecentennale.

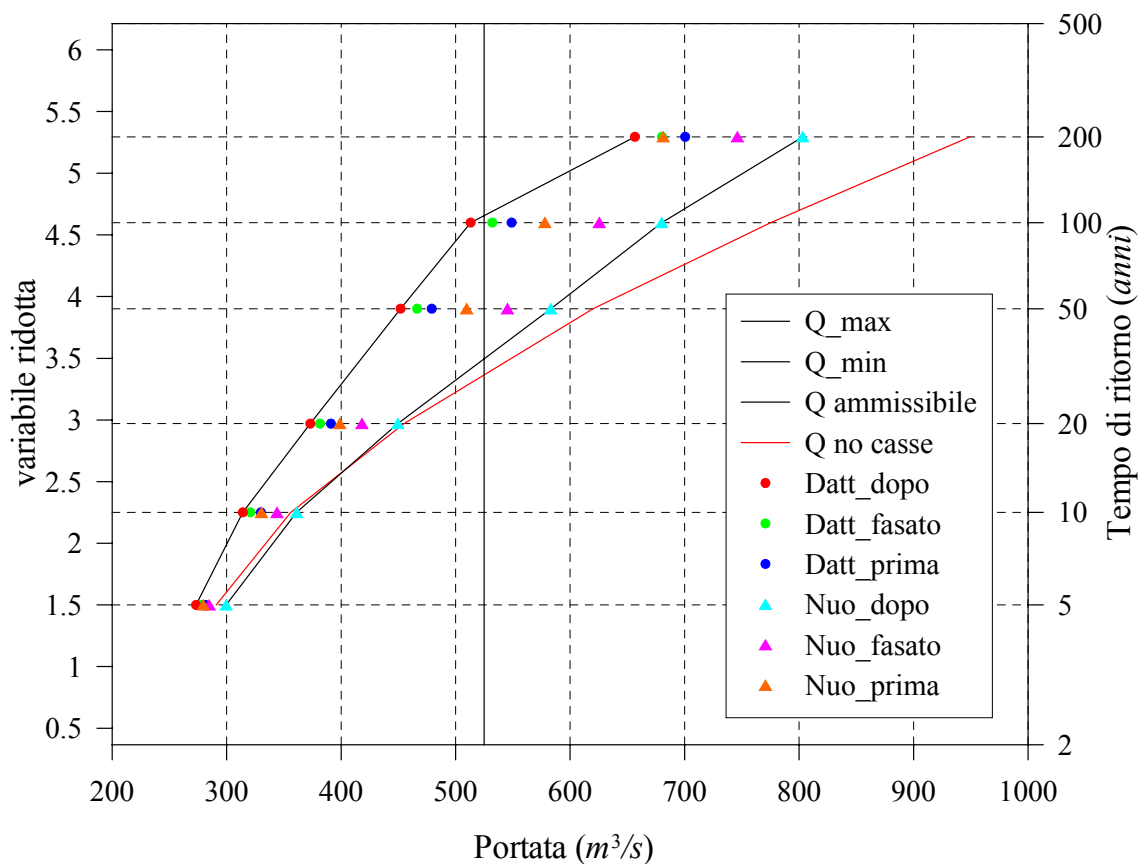


Figura 5.6 – Risultati delle simulazioni in presenza della cassa di espansione sul torrente Parma in corrispondenza della sezione del Ponte di Piazza Garibaldi a Colorno.

In figura 5.7 è riportato l'andamento dei franchi nel tratto tra l'uscita della città di Parma e la confluenza in Po. Essi sono stati dedotti dall'involuppo delle altezze idriche ottenute dalle sei simulazioni effettuate per $T=200$ anni. Nonostante il miglioramento ottenuto, si evidenziano ancora numerosi tratti con franco inadeguato od addirittura

negativo, a dimostrazione dell'insufficiente capacità di portata del fiume e della necessità di ulteriori interventi di protezione idraulica.

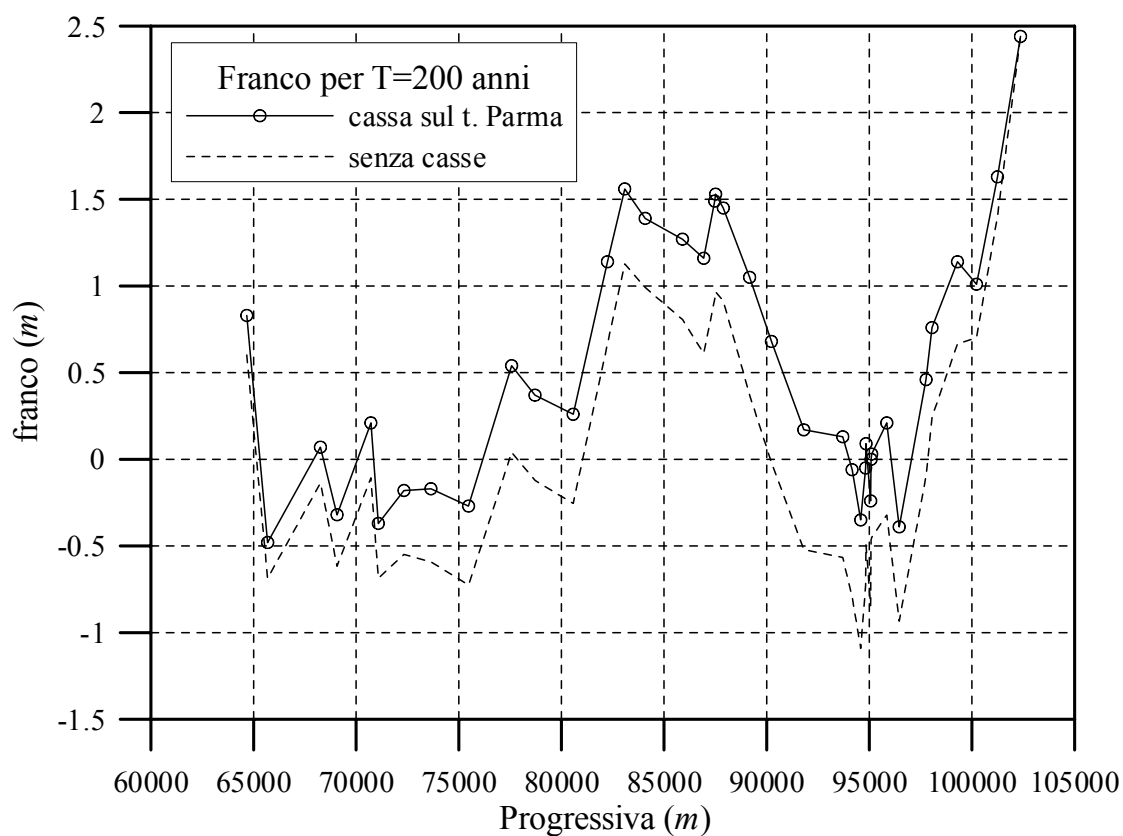


Figura 5.7 – Andamento dei franchi nel tratto del torrente Parma dall'uscita della città fino alla confluenza in Po ottenuti dall'involuppo delle simulazioni per $T=200$ anni in presenza della cassa di espansione sul torrente Parma a monte della confluenza.

5.3 Comportamento del sistema Parma-Baganza in presenza della casse sui torrenti Parma e Baganza

Al fine di analizzare quale sia il livello di sicurezza idraulica raggiungibile a valle della confluenza Parma-Baganza nella configurazione che prevede il completamento e l'entrata in funzione sia della cassa di espansione sul torrente Parma che di quella sul torrente Baganza, sono state ripetute le simulazioni numeriche riportate al paragrafo precedente. In particolare sono state effettuate sei simulazioni per ogni tempo di ritorno T . L'idrogramma di piena ottenuto, in ognuna delle sei combinazioni, per il torrente Parma a monte della confluenza è stato inserito in ingresso alla cassa di espansione, ricavandone l'onda di piena in uscita. In maniera del tutto analoga l'idrogramma di piena ottenuto, in ognuna delle sei combinazioni, per il torrente Baganza a monte della confluenza è stato inserito in ingresso alla rispettiva cassa di espansione, ricavandone l'onda di piena in uscita.

Tali onde sono state poi sommate in corrispondenza della confluenza e successivamente propagate, mediante il modello matematico, lungo l'asta del Parma fino alla foce in Po. A titolo di esempio nella figura 5.8 sono riportati i risultati della medesima simulazione riportata in figura 5.3, questa volta però in presenza anche della cassa di espansione sul torrente Baganza. Nella figura sono riportati:

1. l'onda di piena assegnata in ingresso alla cassa di espansione sul torrente Parma;
2. l'onda di piena in uscita dalla cassa di espansione sul torrente Parma;
3. l'onda di piena assegnata in ingresso alla cassa di espansione sul torrente Baganza;
4. l'onda di piena in uscita dalla cassa di espansione sul torrente Baganza;
5. la somma di 2) e 4) transitante a Ponte Bottego;
6. l'onda di piena 5) propagata lungo l'asta del torrente Parma e valutata in corrispondenza dell'abitato di Colorno.

Dal confronto con l'analoga simulazione riportata in figura 5.3 si evidenzia il benefico effetto della realizzazione della cassa sul torrente Baganza. La portata al colmo a Ponte Bottego, rappresentativa dell'intero tratto urbano in Parma a valle della confluenza, risulta di poco superiore agli $800 \text{ m}^3/\text{s}$ e ben inferiore sia al valore che si sarebbe manifestato in assenza della cassa sul Baganza (circa $1100 \text{ m}^3/\text{s}$) sia soprattutto al valore della portata compatibile nel tratto cittadino ($1000 \text{ m}^3/\text{s}$).

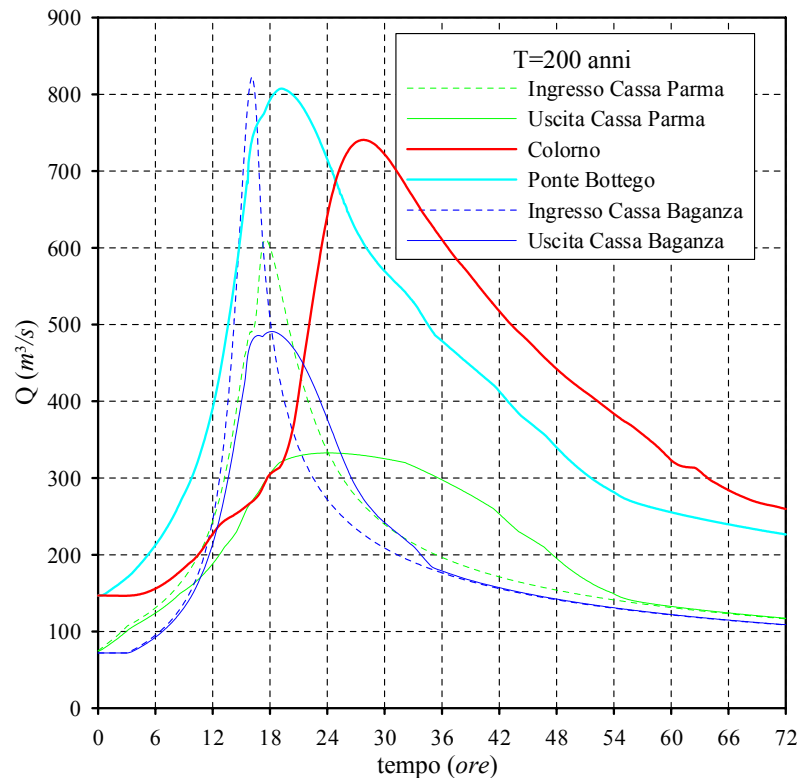


Figura 5.8 – Risultati della simulazione per T=200 anni nella combinazione denominata “200_Nuo_fasate” ed in presenza delle due casse di espansione.

A Colorno invece la portata al colmo rimane sostanzialmente immutata (intorno ai $750 \text{ m}^3/\text{s}$) e ben superiore alla portata compatibile nel tratto urbano (circa $525 \text{ m}^3/\text{s}$).

I risultati di tutte le simulazioni effettuate sono riportati in forma grafica in Appendice E. Essi sono poi sintetizzati in figura 5.9 per la sezione di Ponte Bottego, rappresentativa dell'intero tratto cittadino del torrente Parma.

In particolare in figura 5.9 sono riportati, per ogni tempo di ritorno:

- i valori dei sei colmi in corrispondenza della sezione di Ponte Bottego;
- il valore della portata al colmo, sempre per la sezione di Ponte Bottego, in assenza di cassa di espansione.

La figura 5.9 è analoga alla figura 5.4, ottenuta considerando la presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma. L'effetto dell'introduzione della cassa di espansione sul torrente Baganza si può pertanto apprezzare per confronto tra queste due figure.

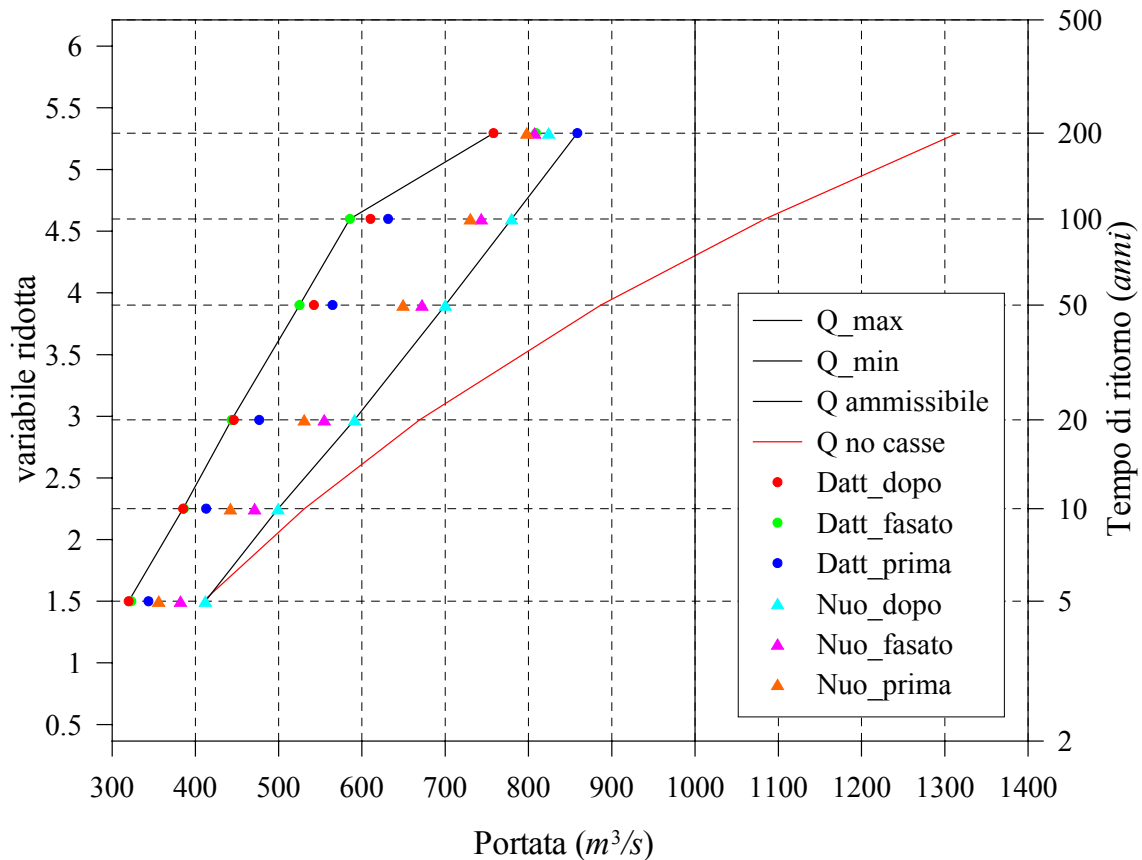


Figura 5.9 – Risultati delle simulazioni in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza in corrispondenza della sezione di Ponte Bottego.

Dalla figura 5.9 si nota innanzitutto come per un assegnato tempo di ritorno T l'intervallo dei valori dei colmi di piena è più ristretto rispetto a quella dello scenario in cui è presente la sola cassa di espansione sul torrente Parma (figura 5.4).

In presenza delle due casse di espansione il livello di difesa idraulica raggiungibile nel tratto cittadino del torrente Parma appare più che adeguato anche per eventi di tempo di ritorno $T=200$ anni. Infatti, anche nelle combinazioni più sfavorevoli, la portata al colmo duecentennale si mantiene al di sotto degli $800 \text{ m}^3/\text{s}$ e quindi ben al di sotto della portata compatibile in questo tratto ($1000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Ciò è ulteriormente evidenziato dalla figura 5.10, che riporta l'andamento dei franchi nel tratto cittadino del torrente Parma. Essi sono stati dedotti dall'involuppo dei livelli

energetici ottenuti dalle sei simulazioni effettuate per $T = 200$ anni. Il franco risulta sempre abbondantemente superiore ad un metro.

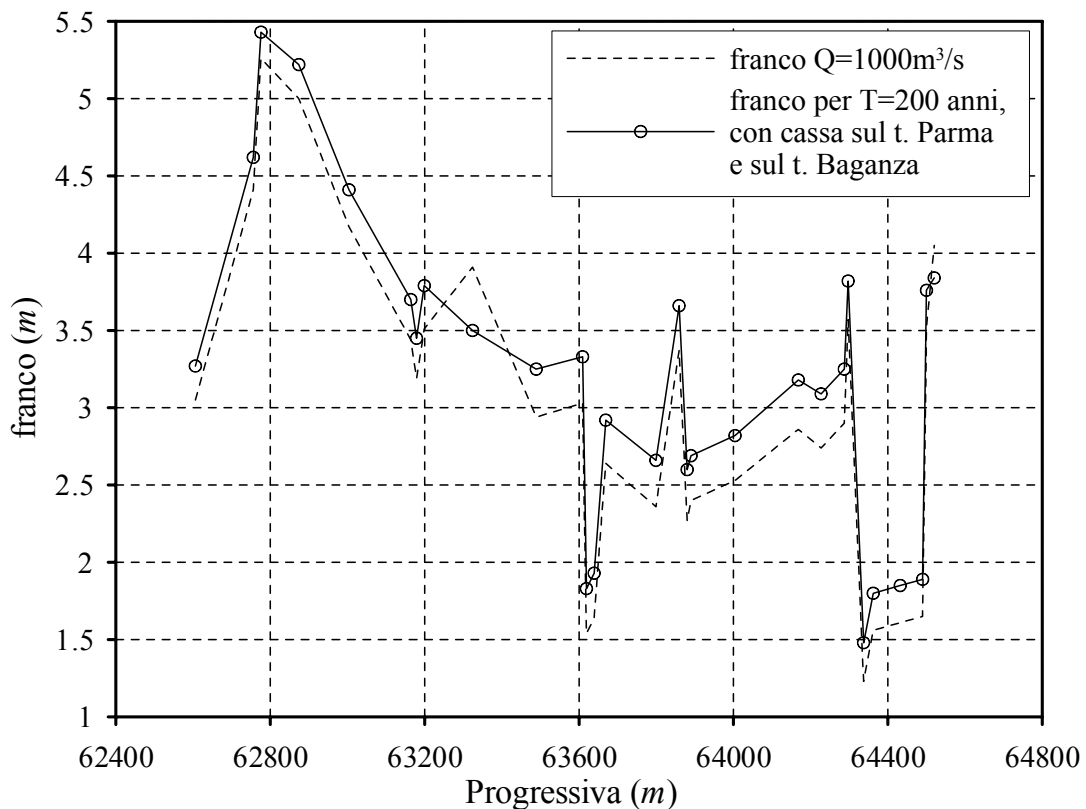


Figura 5.10 – Andamento dei franchi nel tratto cittadino del torrente Parma ottenuti dall'involuppo delle simulazioni per $T = 200$ anni in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

In figura 5.11 sono riportati i risultati ottenuti dalle simulazioni in corrispondenza della sezione del Ponte di piazza Garibaldi a Colorno.

Le portate al colmo transanti a Colorno non subiscono modifiche sostanziali rispetto allo scenario con una sola cassa di espansione (Figura 5.4); ciò significa che l'effetto della cassa di espansione posizionata sul torrente Baganza non è in grado migliorare ulteriormente la sicurezza idraulica dell'abitato di Colorno. La portata compatibile per la sezione del Ponte di piazza Garibaldi è superata già per alcune simulazioni fra quelle con tempo di ritorno pari a 50 anni.

Ciò mette in evidenza, ancora una volta, la necessità di ulteriori e diversi interventi se si vuole ricondurre la portata al colmo duecentennale a Colorno al di sotto del valore compatibile.

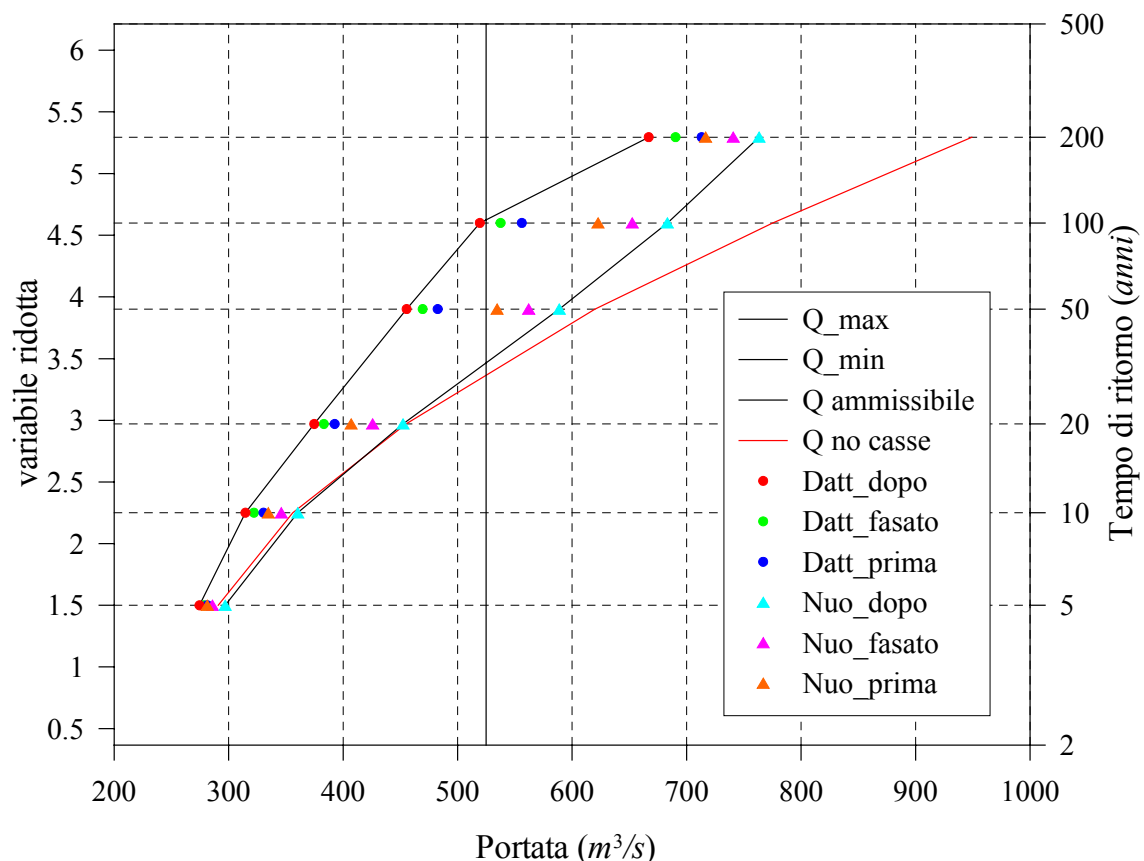


Figura 5.11 – Risultati delle simulazioni in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza in corrispondenza della sezione del Ponte di Piazza Garibaldi a Colorno.

In figura 5.12 è riportato l'andamento dei franchi nel tratto tra l'uscita della città di Parma e la confluenza in Po. Essi sono stati dedotti dall'involuppo delle altezze idriche ottenute dalle sei simulazioni effettuate per $T=200$ anni. Si confermano ancora numerosi tratti con franco inadeguato od addirittura negativo, a dimostrazione dell'insufficiente capacità di portata del torrente e della necessità di ulteriori interventi di protezione idraulica.

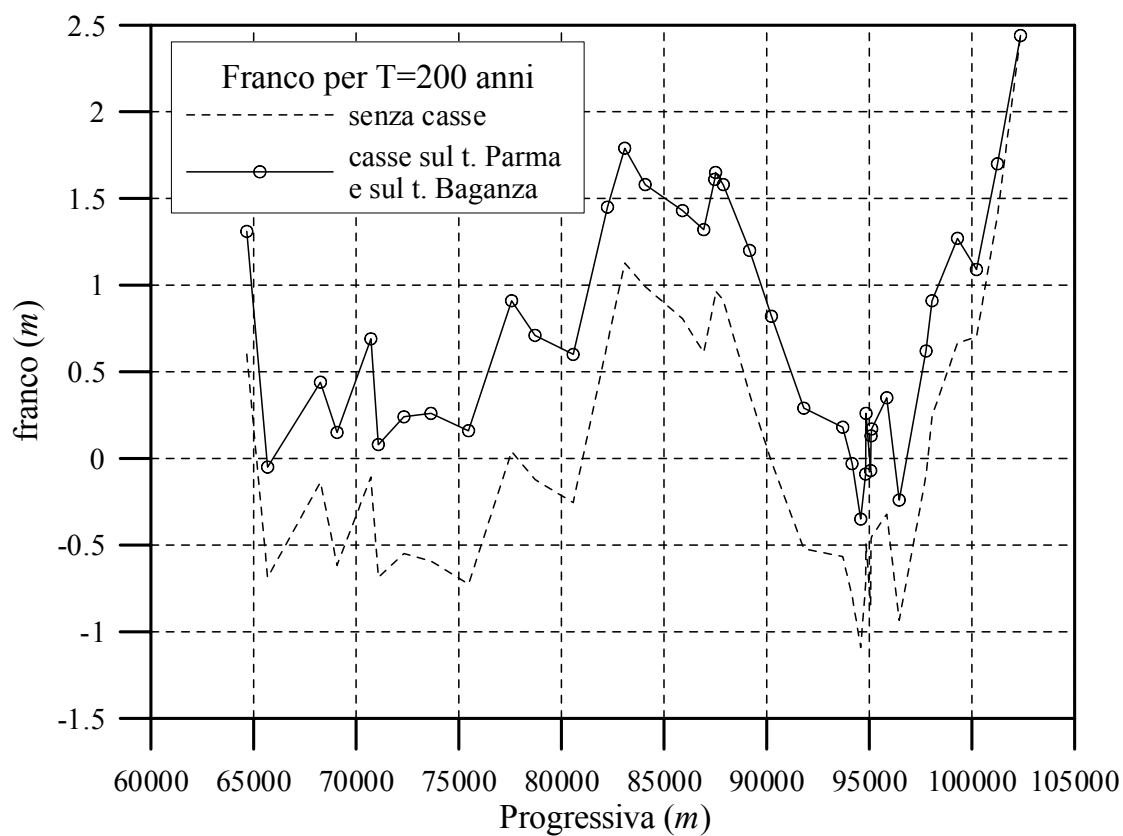


Figura 5.12 – Andamento dei franchi nel tratto del torrente Parma dall'uscita della città fino alla confluenza in Po ottenuti dall'involuppo delle simulazioni per $T=200$ anni in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

6. CONCLUSIONI

Dalle analisi svolte, finalizzate all'individuazione delle condizioni attuali di sicurezza e dei miglioramenti ottenibili con il completamento della cassa di espansione sul torrente Parma e con la realizzazione di un'ulteriore cassa di espansione sul torrente Baganza, possono trarsi le conclusioni riportate nel seguito.

1. Nella condizione attuale (assenza di casse di espansione sia sull'asta del torrente Parma che su quella del torrente Baganza):
 - sull'asta del torrente Baganza si evidenziano alcuni punti critici, il principale dei quali è ubicato in prossimità dell'ospedale Piccole Figlie (nel tratto cittadino) dove il franco, per un evento di tempo di ritorno $T = 200$ anni, è insufficiente (0.33 m);
 - sull'asta del torrente Parma a monte della confluenza non si evidenziano punti critici;
 - nel tratto cittadino del torrente Parma, a valle della confluenza con il torrente Baganza, la portata compatibile è di circa $1000\text{ m}^3/\text{s}$, mentre la portata con tempo di ritorno $T = 200$ anni è stimata in $1315\text{ m}^3/\text{s}$; la sicurezza idraulica non è pertanto garantita per eventi con tempo di ritorno $T = 200$ anni, ma solo per eventi di tempo di ritorno compreso tra 50 e 100 anni;
 - nel tratto del torrente Parma a valle della città fino alla confluenza in Po si evidenziano numerosi punti critici, nei quali l'evento di piena duecentennale non è assolutamente contenibile in alveo; tra questi, uno dei più critici è costituito dall'attraversamento urbano in Colorno, in particolare in corrispondenza del Ponte di Piazza Garibaldi; ivi sono contenibili attualmente eventi di piena di tempo di ritorno non superiore a 20-30 anni.
2. Nella condizione in cui venga completata la sola cassa di espansione sul torrente Parma:
 - sull'asta del torrente Baganza a monte della confluenza non si riscontrano ovviamente modifiche rispetto alla situazione precedente;
 - sull'asta del torrente Parma a monte della confluenza non si evidenziano, a maggior ragione, punti critici;

- nel tratto cittadino del torrente Parma, a valle della confluenza con il torrente Baganza, la sicurezza idraulica è aumentata fino a contenere eventi centenari ma non è ancora garantita per eventi con tempo di ritorno $T = 200$ anni;
 - nel tratto del torrente Parma, a valle dell'omonima città fino alla confluenza in Po, i miglioramenti ottenuti sono piuttosto modesti; si evidenziano ancora numerosi punti critici, nei quali l'evento di piena duecentennale non è assolutamente contenibile in alveo; tra questi, uno dei più critici rimane l'attraversamento urbano in Colorno, in particolare in corrispondenza del Ponte di Piazza Garibaldi.
3. Nella condizione in cui siano realizzate e funzionanti entrambe le casse di espansione (sul torrente Parma e sul torrente Baganza):
- sull'asta del torrente Baganza a monte della confluenza i punti critici (ospedale Piccole Figlie) sono risolti e l'evento duecentennale è ovunque contenibile in alveo con franchi adeguati;
 - sull'asta del torrente Parma a monte della confluenza non si evidenziano, a maggior ragione, punti critici;
 - nel tratto cittadino del torrente Parma, a valle della confluenza con il torrente Baganza, la sicurezza idraulica risulta garantita anche per eventi con tempo di ritorno $T = 200$ anni;
 - nel tratto del torrente Parma, a valle dell'omonima città fino alla confluenza in Po, i miglioramenti sono ancora piuttosto modesti; rimangono numerosi punti critici, nei quali l'evento di piena duecentennale non è assolutamente contenibile in alveo; tra questi, uno dei più critici rimane l'attraversamento urbano in Colorno, in particolare in corrispondenza del Ponte di Piazza Garibaldi.

In conclusione si ritiene che il completamento della cassa sul torrente Parma e la realizzazione della cassa sul torrente Baganza siano in grado di risolvere i problemi di sicurezza idraulica nei tratti a monte della confluenza e nel tratto cittadino. Il sistema così configurato sarebbe infatti in grado di contenere con franchi adeguati gli eventi con tempo di ritorno $T = 200$ anni.

Non altrettanto può dirsi per il tratto a valle della città di Parma, dove la realizzazione delle case migliora in maniera modesta la sicurezza idraulica. Ivi, come più volte ricordato nei capitoli della presente relazione, occorre progettare ulteriori interventi strutturali se si vuole garantire il contenimento di eventi di piena di tempo di ritorno duecentennale.

APPENDICE A

**Equazioni che descrivono il funzionamento delle casse di
espansione**

A.1 EQUAZIONI CHE DESCRIVONO IL FENOMENO DELLA LAMINAZIONE PER UNA CASSA IN LINEA SEMPLICE

Le equazioni fondamentali che reggono il fenomeno della laminazione in un invaso composto da un'unica vasca in linea sono le seguenti:

1. Equazione di continuità:

$$Q_e(t) - Q_u(t) = \frac{dW(t)}{dt} \quad (\text{A.1})$$

nella quale $Q_e(t)$ e $Q_u(t)$ rappresentano rispettivamente la portata uscente e entrante all'istante t e $W(t)$ è il volume immagazzinato nel medesimo istante nel serbatoio;

2. Equazione di efflusso dagli organi di scarico:

$$Q_u = f(z, z_v, t) \quad (\text{A.2})$$

nella quale la portata uscente $Q_u(t)$ dipende dalla quota idrica z dell'invaso ed, eventualmente, dalla quota idrica a valle z_v se le luci di scarico sono rigurgitate ed anche esplicitamente dal tempo t , se gli organi di scarico sono mobili. La funzione $f(z, z_v, t)$ specifica tale legame, dipendente dalla conformazione e dalla manovra degli organi di scarico. Nel caso di efflusso libero ed organi non manovrabili la A.2 si semplifica nella:

$$Q_u = f(z) \quad (\text{A.2'})$$

3. Equazione che descrive la geometria dell'invaso:

$$W = g(z) \quad (\text{A.3})$$

Il sistema composto dalle (A.1), (A.2) o (A.2') e (A.3) definisce completamente il problema, una volta noto l'andamento nel tempo della portata in ingresso $Q_e(t)$, le due funzioni $f(z)$ e $g(z)$ e le condizioni iniziali dell'invaso. La sua risoluzione consente di determinare il valore assunto, ad ogni istante, dalle tre grandezze $Q_u(t)$, $W(t)$, $z(t)$.

A causa della complessità degli organi di scarico dell'opera di ritenuta, la funzione $f(z, z_v, t)$ non è in generale esprimibile analiticamente; essa viene di solito valutata numericamente (o mediante prove su modello fisico) in corrispondenza a prefissati

livelli idrici nell'invaso. Anche la conformazione del territorio è in generale irregolare e non consente di esprimere la funzione $g(z)$ in termini analitici. Infine, l'onda di piena in ingresso è anch'essa nota solo ad intervalli temporali prefissati.

Il sistema composto dalle (A.1), (A.2 o A.2') e (A.3) viene pertanto a essere risolto numericamente per intervalli finiti \mathbf{Dt} . L'ampiezza di tali intervalli deve essere sufficientemente piccola da ben descrivere la variazione nel tempo delle funzioni $Q_e(t)$, $Q_u(t)$, $W(t)$. L'integrazione numerica del sistema (A.1-A.3) può essere effettuata con varie metodologie: di seguito si espone quella che si basa sulla costruzione, a partire dalle relazioni che descrivono numericamente le (A.2') e (A.3), della variabile di servizio

$$O(z) = \left(W(z) + \frac{\Delta t}{2} \cdot Q_u(z) \right) \quad (\text{A.4})$$

in funzione della quota idrica z nell'invaso.

L'equazione (A.1), integrata in un intervallo generico \mathbf{Dt} diviene:

$$\int_t^{t+\Delta t} Q_e(t) dt - \int_t^{t+\Delta t} Q_u(t) dt = W(t + \Delta t) - W(t) \quad (\text{A.5})$$

Ammessi, nell'intervallo \mathbf{Dt} , una variazione lineare delle portate $Q_e(t)$, $Q_u(t)$, la (A.5) si scrive:

$$\frac{\Delta t}{2} \cdot (Q_e(t) + Q_e(t + \Delta t)) - \frac{\Delta t}{2} \cdot (Q_u(t) + Q_u(t + \Delta t)) = W(t + \Delta t) - W(t) \quad (\text{A.6})$$

Raccogliendo al primo membro tutte le grandezze all'istante t , nonché la portata entrante (nota) all'istante $(t + \mathbf{Dt})$ si ottiene:

$$\frac{\Delta t}{2} \cdot (Q_e(t) + Q_e(t + \Delta t)) - \frac{\Delta t}{2} \cdot (Q_u(t)) - W(t) = W(t + \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} \cdot (Q_u(t + \Delta t)) \quad (\text{A.7})$$

Ammessi di conoscere le condizioni dell'invaso all'istante $t = t_0$ di inizio dei calcoli ovvero il volume invasato $W(t_0)$ e la portata uscente $Q_u(t_0)$, nonché l'intero andamento della portata entrante $Q_e(t)$ i termini contenuti al primo membro della (A.7) sono noti ed è noto, di conseguenza, anche il valore assunto dal secondo membro. Attraverso la (A.4) precedentemente calcolata è possibile pertanto ricavare il valore di $z(t_0 + \Delta t)$. I valori di

$Q_u(t_0 + \Delta t)$ e $W(t_0 + \Delta t)$ si ricavano poi rispettivamente, dalla (A.2') e dalla (A.3). A questo punto è possibile analizzare il passo temporale successivo. I valori assunti dalle grandezze all'inizio di tale intervallo coincidono con quelli appena ricavati per la fine dell'intervallo precedente. È pertanto ancora possibile calcolare il valore assunto dal primo membro della (A.7) e, mediante la (A.4) ricavare il valore della quota idrica z alla fine dell'intervallo considerato. L'elaborazione procede nel tempo fino a che il fenomeno non si è esaurito, ovvero il volume invasato è tornato pressoché a zero. Nel caso interessi solamente il massimo valore della portata uscente i calcoli possono essere arrestati quando la portata uscente comincia a diminuire.

A.2 EQUAZIONI CHE DESCRIVONO IL FENOMENO DELL'AMMINISTRAZIONE PER UNA CASSA COMPOSTA DA DUE INVASI

Una cassa di espansione composta da due invasi, uno in linea e uno fuori linea, può essere schematizzata dal punto di vista del calcolo come riportato in figura A.1. La portata proveniente da monte $Q_e(t)$ entra nella cassa in linea, la cui quota di pelo libero, supposto orizzontale, è in ogni istante pari a $z_1(t)$. Dal manufatto di regolazione principale fuoriesce la portata $Q_1(t)$. Se la quota $z_1(t)$ supera la quota dello sfioratore tra le casse viene scambiata una portata $Q_{12}(t)$ tra la cassa 1 e la cassa 2, la cui quota è in ogni istante pari a $z_2(t)$. A sua volta la cassa 2 scarica verso il fiume la portata $Q_2(t)$. La portata totale in alveo è pari in ogni istante a $Q_1(t) + Q_2(t)$. Se la quota $z_1(t)$ supera quella del ciglio sfiorante del manufatto principale, parte della portata $Q_1(t)$ tracima al di sopra di quest'ultimo. Durante lo svaso la portata di scambio tra le casse $Q_{12}(t)$ può invertirsi, e la cassa fuori linea può alimentare attraverso lo sfioratore quella in linea.

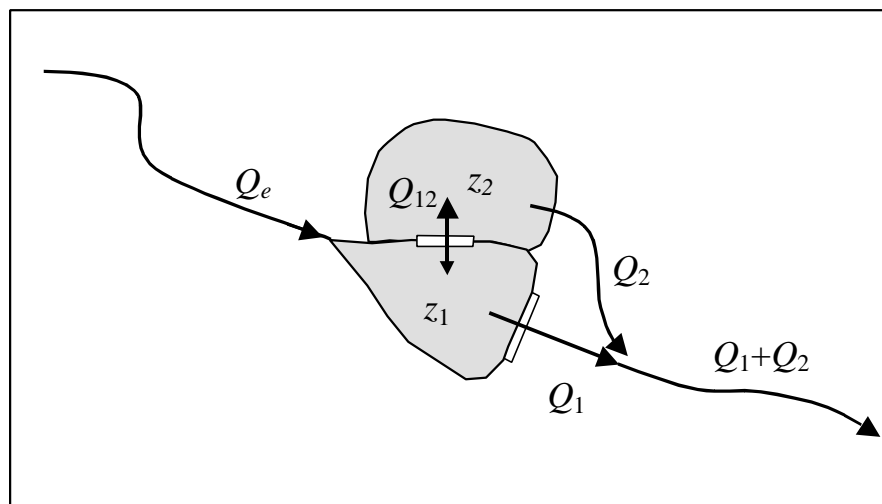


Figura A. 1: Schema di funzionamento della cassa di espansione composta da un invaso in linea ed uno fuori linea.

Dal punto di vista matematico lo schema testé descritto può essere formalizzato nelle seguenti due equazioni differenziali ordinarie, che esprimono il bilancio dei volumi nelle due casse:

$$\begin{cases} \frac{dz_1(t)}{dt} = \frac{Q_e(t) - Q_1(t) - Q_{12}(t)}{S_1(z_1)} \\ \frac{dz_2(t)}{dt} = \frac{Q_{12}(t) - Q_2(t)}{S_2(z_2)} \end{cases} \quad (\text{A.8})$$

alle quali vanno associate le relazioni che esprimono le leggi di efflusso dai manufatti, e che quindi devono essere già note:

$$\begin{cases} Q_1(t) = f_1(z_1, z_v) \\ Q_2(t) = f_2(z_2) \\ Q_{12}(t) = f_3(z_1, z_2) \end{cases} \quad (\text{A.9})$$

Il sistema di due equazioni differenziali (A.8) nelle incognite z_1 e z_2 può essere risolto con vari metodi numerici. Nel presente studio si è adottato il metodo di Runge-Kutta al quarto ordine, i cui lineamenti principali sono sintetizzati nel paragrafo A.2.1.

La soluzione procede nel tempo passo-passo una volta assegnate le condizioni iniziali $z_1(t=0)$ e $z_2(t=0)$. Si è assunta la quota iniziale della cassa fuori linea pari alla quota di fondo del manufatto di scarico. Per la cassa in linea la condizione iniziale $z_1(t=0)$ non è invece di così immediata determinazione. Si è ritenuto lecito assumere per $z_1(t=0)$ il valore corrispondente ad una situazione di moto permanente con portata in ingresso (e quindi anche in uscita) pari a $Q_e(t=0)$. Ciò è in genere cautelativo in virtù del fatto che le onde di piena sintetiche presentano un valore di portata iniziale già piuttosto elevato.

Per cogliere le rapide variazioni che si verificano quando si passa da efflusso libero a rigurgitato sullo sfioratore tra le casse, o quando la portata sul medesimo sfioratore si inverte, si è adottato un passo di calcolo $\Delta t = 0.1$ min.

A.2.1 Metodo di Runge-Kutta per la risoluzione del sistema di equazioni differenziali ordinarie del problema di laminazione.

Vengono di seguito brevemente espresse le relazioni del Metodo di Runge-Kutta al 4° ordine, utilizzato nel programma di laminazione.

Partendo dal sistema di equazioni (A.8), che esprime l'equazione di continuità per ciascuna cassa la soluzione procede dal tempo t al tempo $t + \Delta t$ in quattro passi ricavando delle opportune correzioni nelle incognite z_1 e z_2 secondo le seguenti relazioni.

1° passo

Dal sistema (A.8) discretizzato si ottiene un primo valore delle correzioni Δz_{11} e Δz_{21}

$$\begin{cases} \Delta z_{11} = \Delta t \frac{Q_e(t) - Q_1(z_1) - Q_{12}(z_1, z_2)}{S_1(z_1)} \\ \Delta z_{21} = \Delta t \frac{Q_{12}(z_1, z_2) - Q_2(z_2)}{S_2(z_2)} \end{cases} \quad (A.10)$$

dove le portate e le superfici idriche sono calcolate con i valori al tempo t ed con le quote idriche z_1 e z_2 all'inizio del passo.

2° passo

Dal sistema (A.8) discretizzato si ottiene un secondo valore delle correzioni Δz_{12} e Δz_{22} :

$$\begin{cases} \Delta z_{12} = \Delta t \frac{Q_e\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) - Q_1\left(z_1 + \frac{\Delta z_{11}}{2}\right) - Q_{12}\left(z_1 + \frac{\Delta z_{11}}{2}; z_2 + \frac{\Delta z_{21}}{2}\right)}{S_1\left(z_1 + \frac{\Delta z_{11}}{2}\right)} \\ \Delta z_{22} = \Delta t \frac{Q_{12}\left(z_1 + \frac{\Delta z_{11}}{2}; z_2 + \frac{\Delta z_{21}}{2}\right) - Q_2\left(z_2 + \frac{\Delta z_{21}}{2}\right)}{S_2\left(z_2 + \frac{\Delta z_{21}}{2}\right)} \end{cases} \quad (A.11)$$

dove le portate e le superfici idriche sono calcolate con i valori al tempo $t + \frac{\Delta t}{2}$ e con le

quote idriche $z_1 + \frac{\Delta z_{11}}{2}$ e $z_2 + \frac{\Delta z_{21}}{2}$

3° passo

Dal sistema (A.8) discretizzato si ottiene un terzo valore delle correzioni Δz_{13} e Δz_{23}

$$\begin{cases} \Delta z_{13} = \Delta t \frac{Q_e\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) - Q_1\left(z_1 + \frac{\Delta z_{12}}{2}\right) - Q_{12}\left(z_1 + \frac{\Delta z_{12}}{2}; z_2 + \frac{\Delta z_{22}}{2}\right)}{S_1\left(z_1 + \frac{\Delta z_{12}}{2}\right)} \\ \Delta z_{23} = \Delta t \frac{Q_{12}\left(z_1 + \frac{\Delta z_{12}}{2}; z_2 + \frac{\Delta z_{22}}{2}\right) - Q_2\left(z_2 + \frac{\Delta z_{22}}{2}\right)}{S_2\left(z_2 + \frac{\Delta z_{22}}{2}\right)} \end{cases} \quad (A.12)$$

dove le portate e le superfici idriche sono calcolate con i valori al tempo $t + \frac{\Delta t}{2}$ e con le

quote idriche $z_1 + \frac{\Delta z_{12}}{2}$ e $z_2 + \frac{\Delta z_{22}}{2}$

4° passo

Dal sistema (A.8) discretizzato si ottiene un quarto valore delle correzioni Δz_{14} e Δz_{24}

$$\begin{cases} \Delta z_{14} = \Delta t \frac{Q_e(t + \Delta t) - Q_1(z_1 + \Delta z_{13}) - Q_{12}(z_1 + \Delta z_{13}; z_2 + \Delta z_{23})}{S_1(z_1 + \Delta z_{13})} \\ \Delta z_{23} = \Delta t \frac{Q_{12}(z_1 + \Delta z_{13}; z_2 + \Delta z_{23}) - Q_2(z_2 + \Delta z_{23})}{S_2(z_2 + \Delta z_{23})} \end{cases} \quad (A.13)$$

dove le portate e le superfici idriche sono calcolate con i valori al tempo $t + \Delta t$ e con le quote idriche $z_1 + \Delta z_{13}$ e $z_2 + \Delta z_{23}$

Soluzione

La soluzione al termine del passo $t + \Delta t$ viene calcolata con l'espressione

$$\begin{cases} z_1(t + \Delta t) = z_1(t) + \frac{1}{6}(\Delta z_{11} + 2\Delta z_{12} + 2\Delta z_{13} + \Delta z_{14}) \\ z_2(t + \Delta t) = z_2(t) + \frac{1}{6}(\Delta z_{21} + 2\Delta z_{22} + 2\Delta z_{23} + \Delta z_{24}) \end{cases} \quad (A.14)$$

APPENDICE B

**Risultati delle simulazioni effettuate sulla cassa di espansione
del torrente Parma**

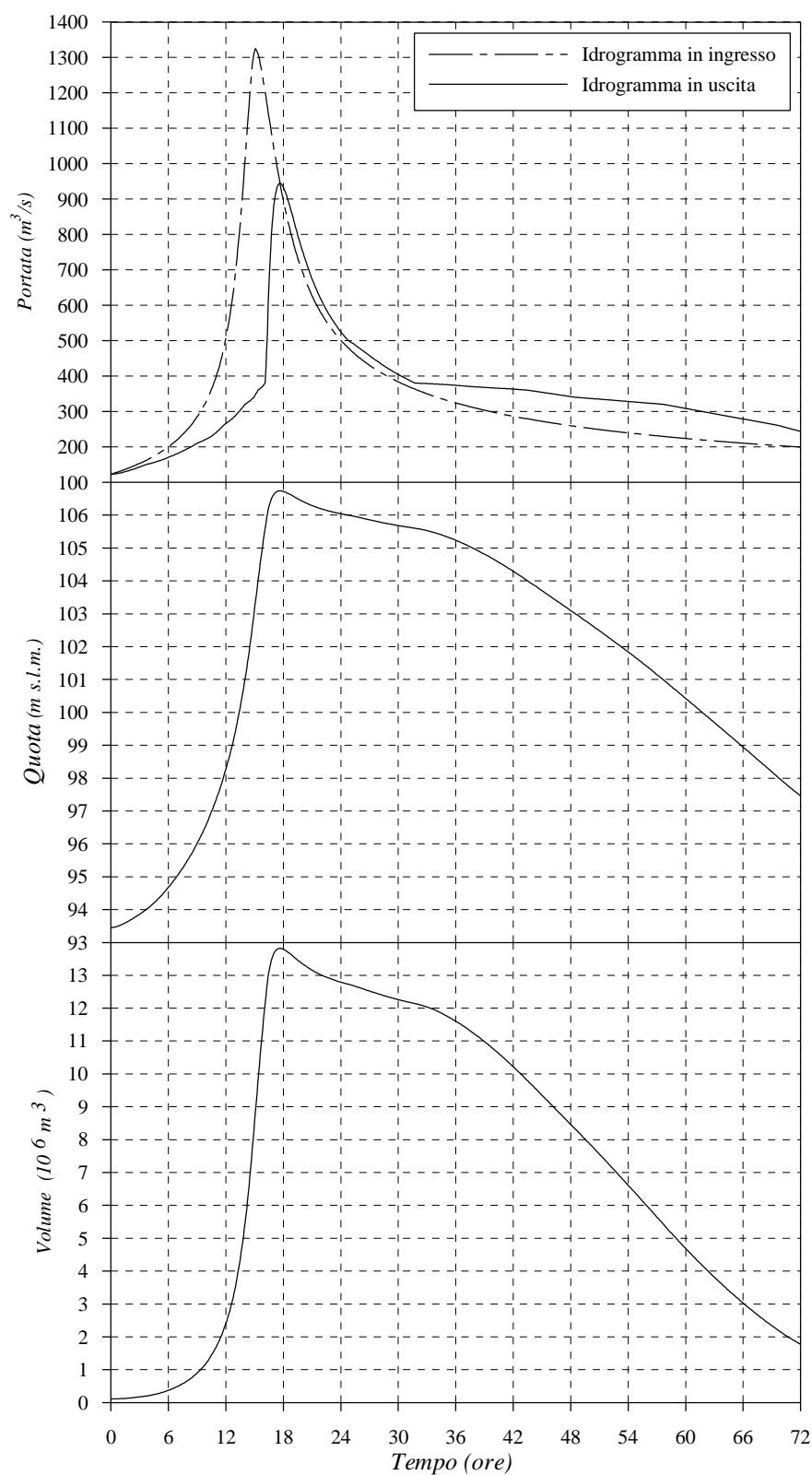


Figura B.1 – Cassa di laminazione sul torrente Parma: Portate, Quote idriche e Volumi invasati ottenuti dalla simulazione dell'idrogramma sintetico con tempo di ritorno pari a 500 anni.

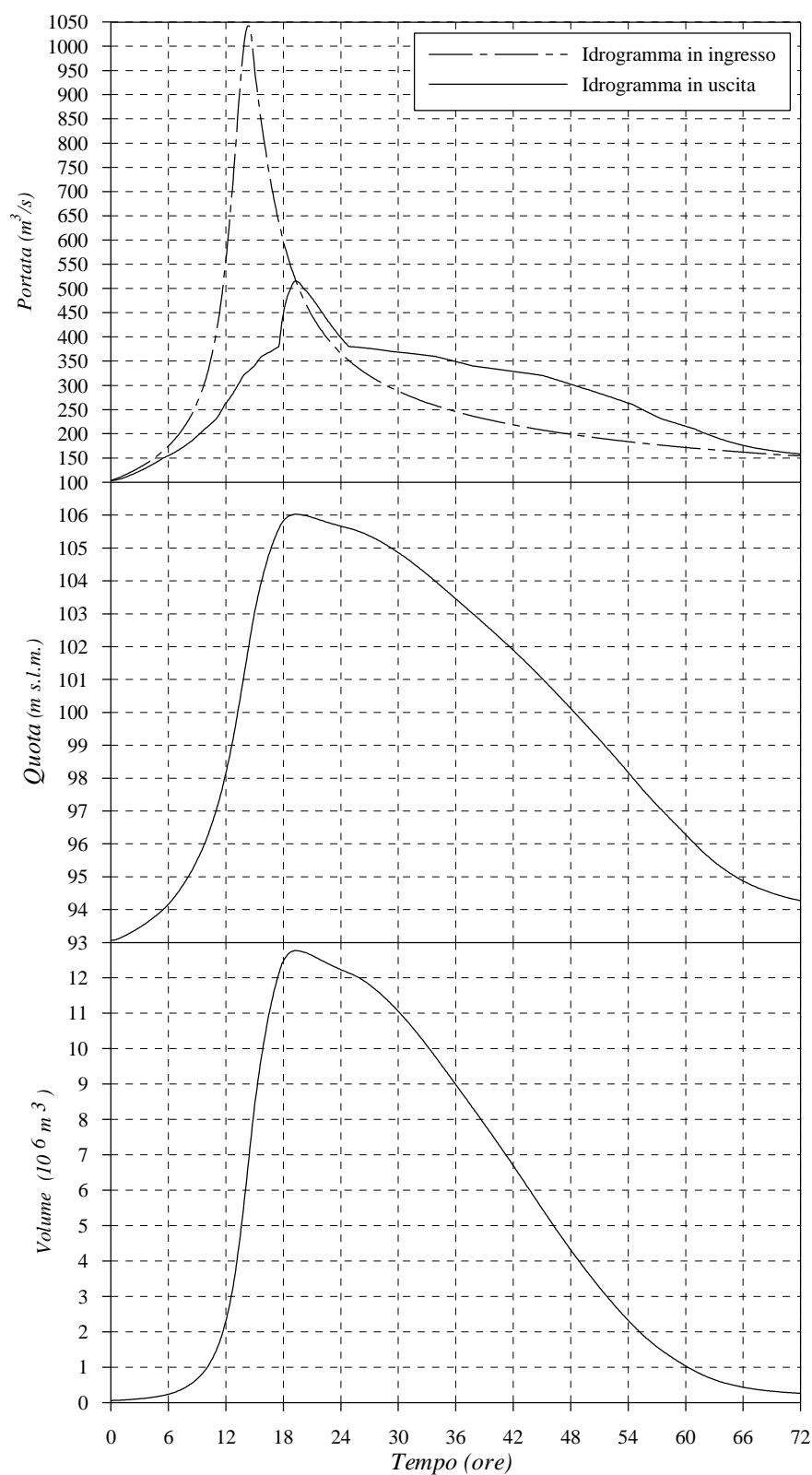


Figura B.2 – Cassa di laminazione sul torrente Parma: Portate, Quote idriche e Volumi invasati ottenuti dalla simulazione dell'idrogramma sintetico con tempo di ritorno pari a 200 anni.

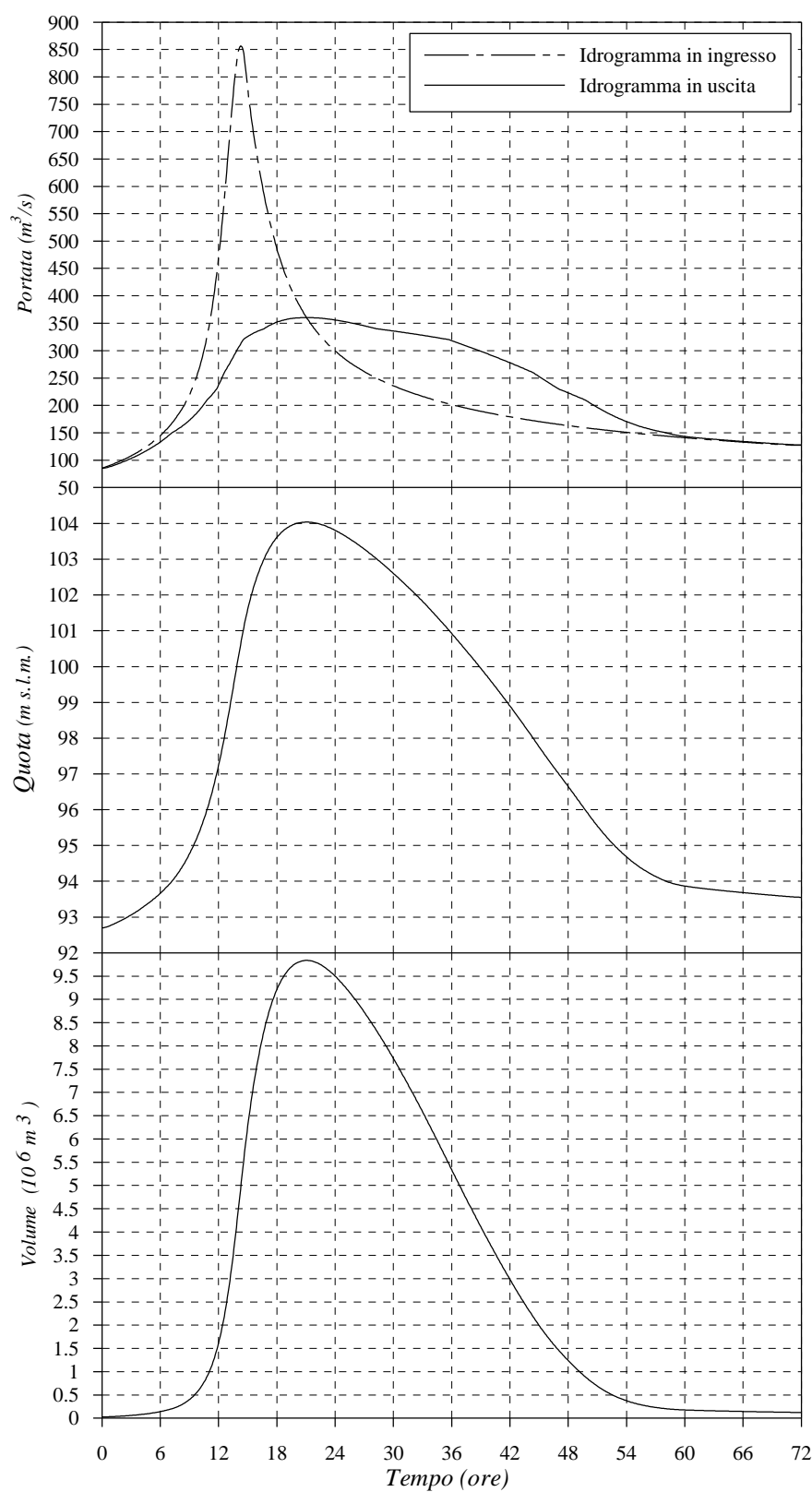


Figura B.3 – Cassa di laminazione sul torrente Parma: Portate, Quote idriche e Volumi invasati ottenuti dalla simulazione dell'idrogramma sintetico con tempo di ritorno pari a 100 anni.

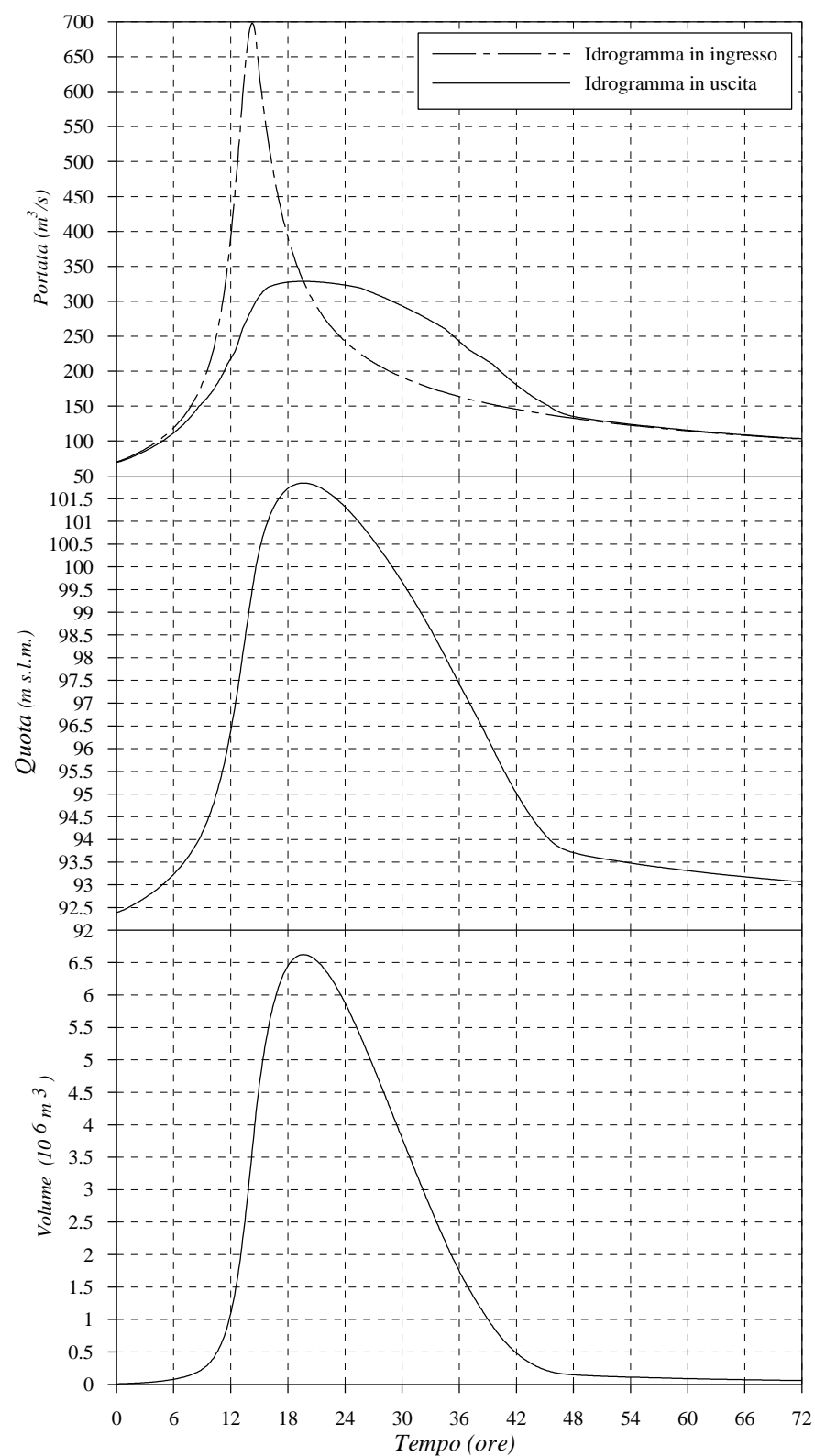


Figura B.4 – Cassa di laminazione sul torrente Parma: Portate, Quote idriche e Volumi invasati ottenuti dalla simulazione dell'idrogramma sintetico con tempo di ritorno pari a 50 anni.

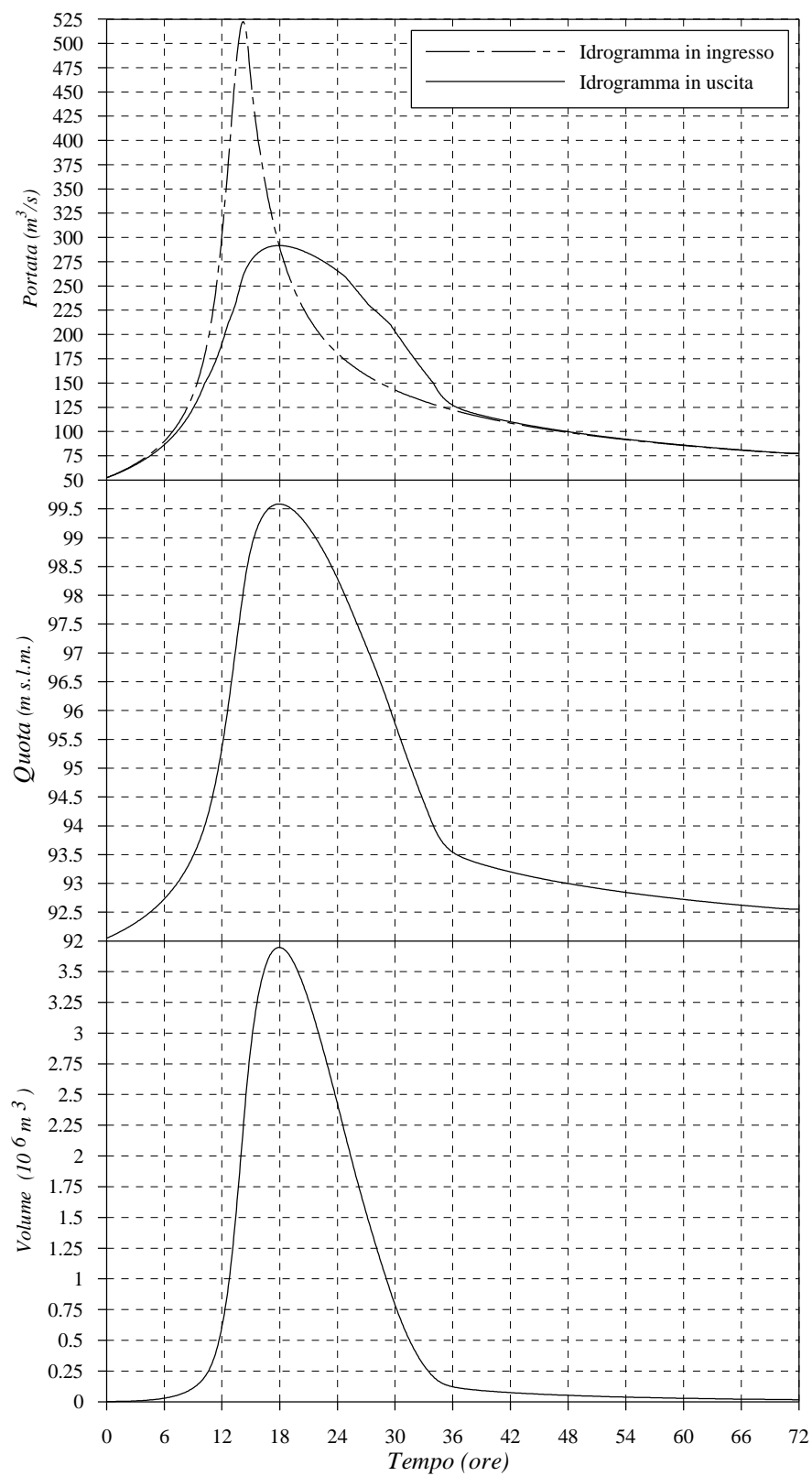


Figura B.5 – Cassa di laminazione sul torrente Parma: Portate, Quote idriche e Volumi invasati ottenuti dalla simulazione dell'idrogramma sintetico con tempo di ritorno pari a 20 anni.

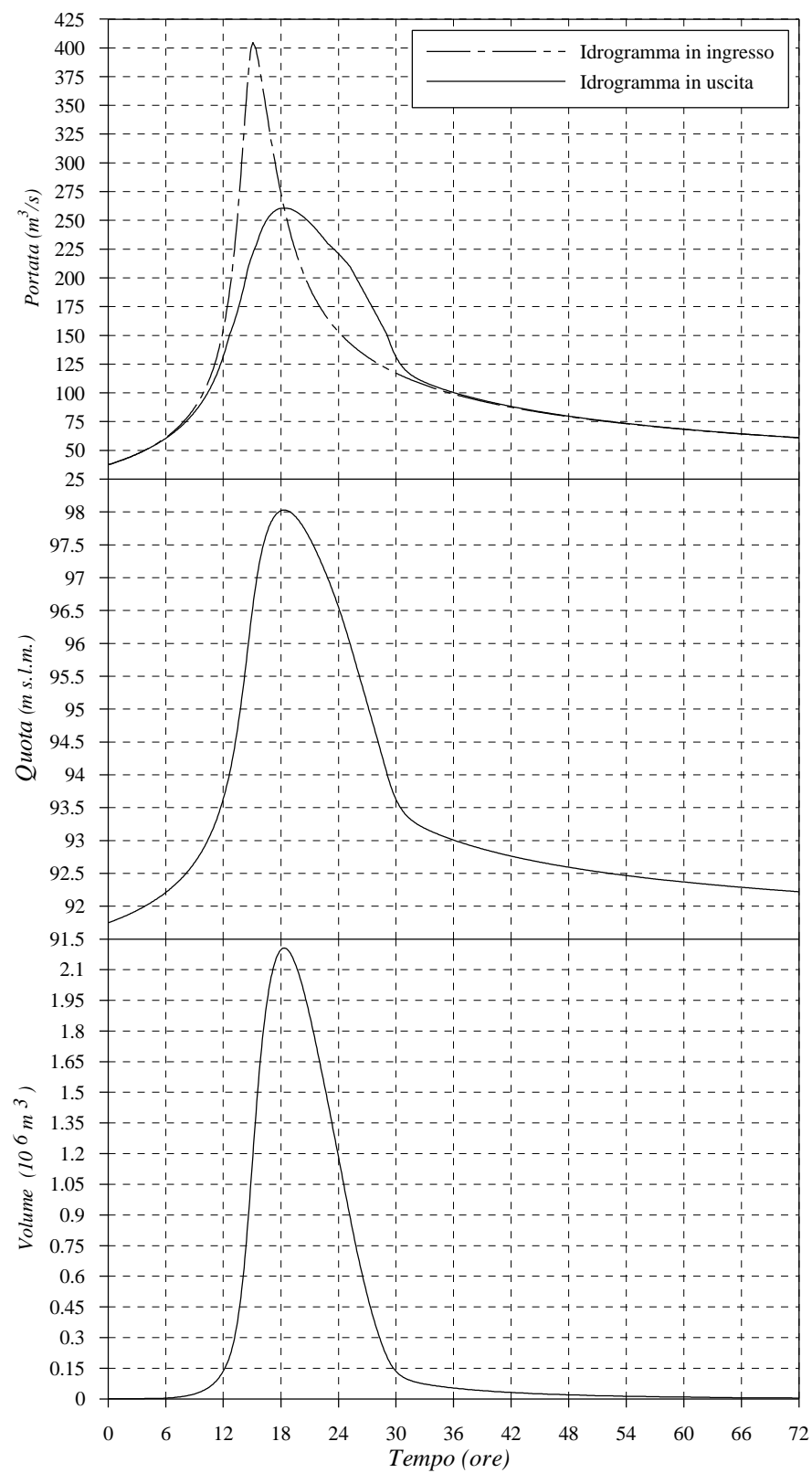


Figura B.6 – Cassa di laminazione sul torrente Parma: Portate, Quote idriche e Volumi invasati ottenuti dalla simulazione dell'idrogramma sintetico con tempo di ritorno pari a 10 anni.

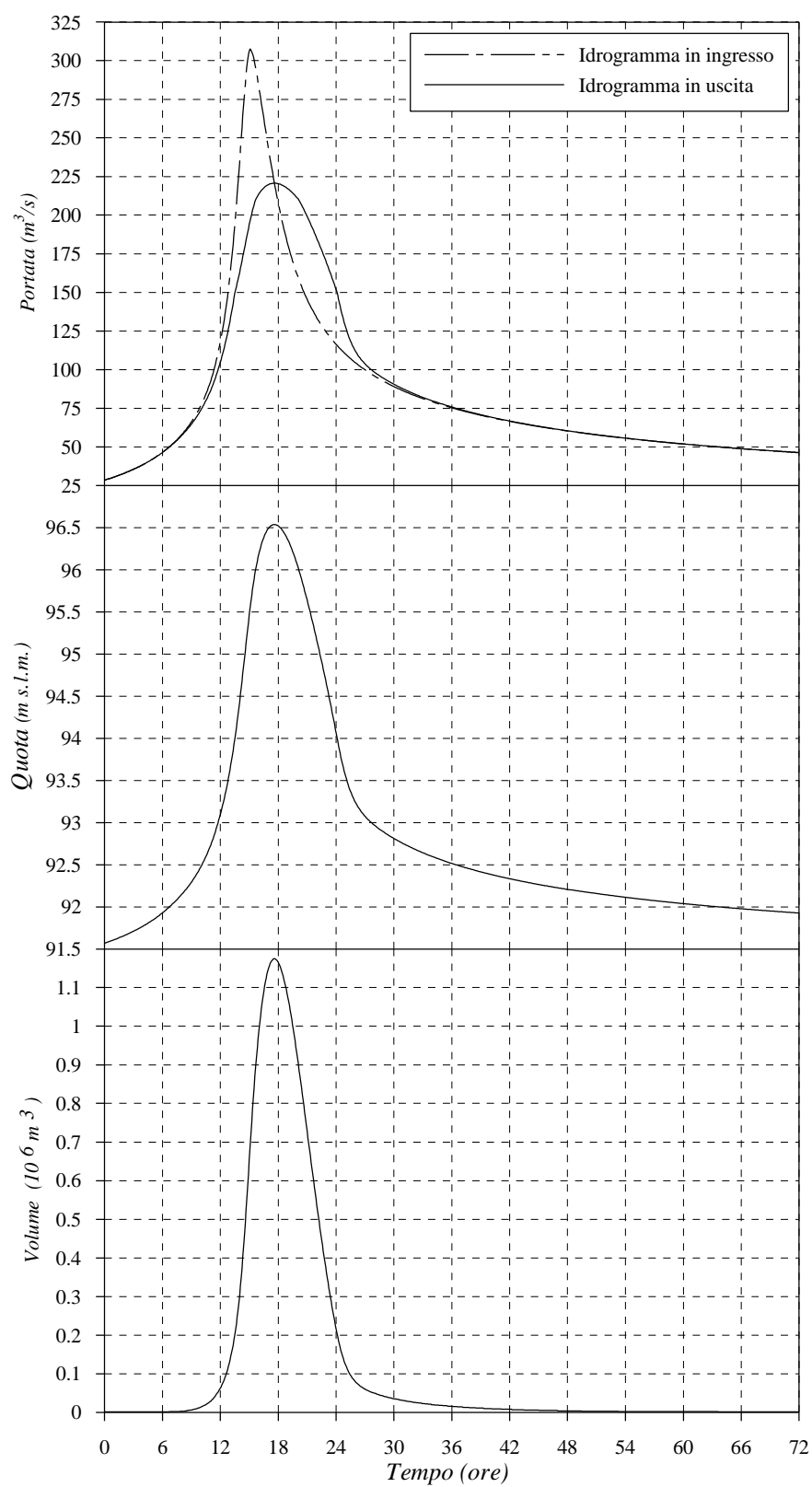


Figura B.7 – Cassa di laminazione sul torrente Parma: Portate, Quote idriche e Volumi invasati ottenuti dalla simulazione dell'idrogramma sintetico con tempo di ritorno pari a 5 anni.

APPENDICE C

**Risultati delle simulazioni effettuate sulla cassa di espansione
del torrente Baganza**

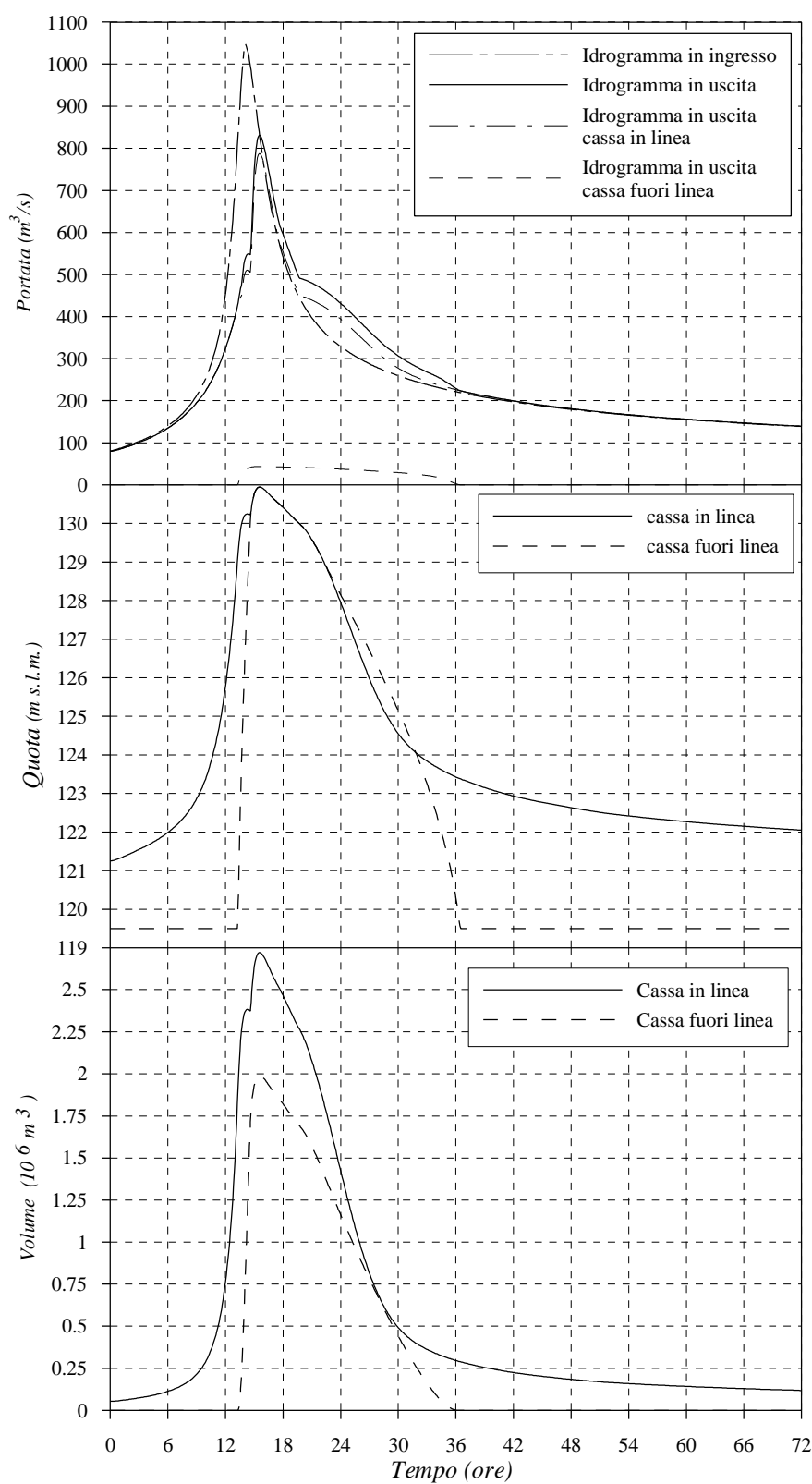


Figura C.1 – Cassa di laminazione sul torrente Baganza: Portate, Quote idriche e Volumi invasati ottenuti dalla simulazione dell'idrogramma sintetico con tempo di ritorno pari a 500 anni.

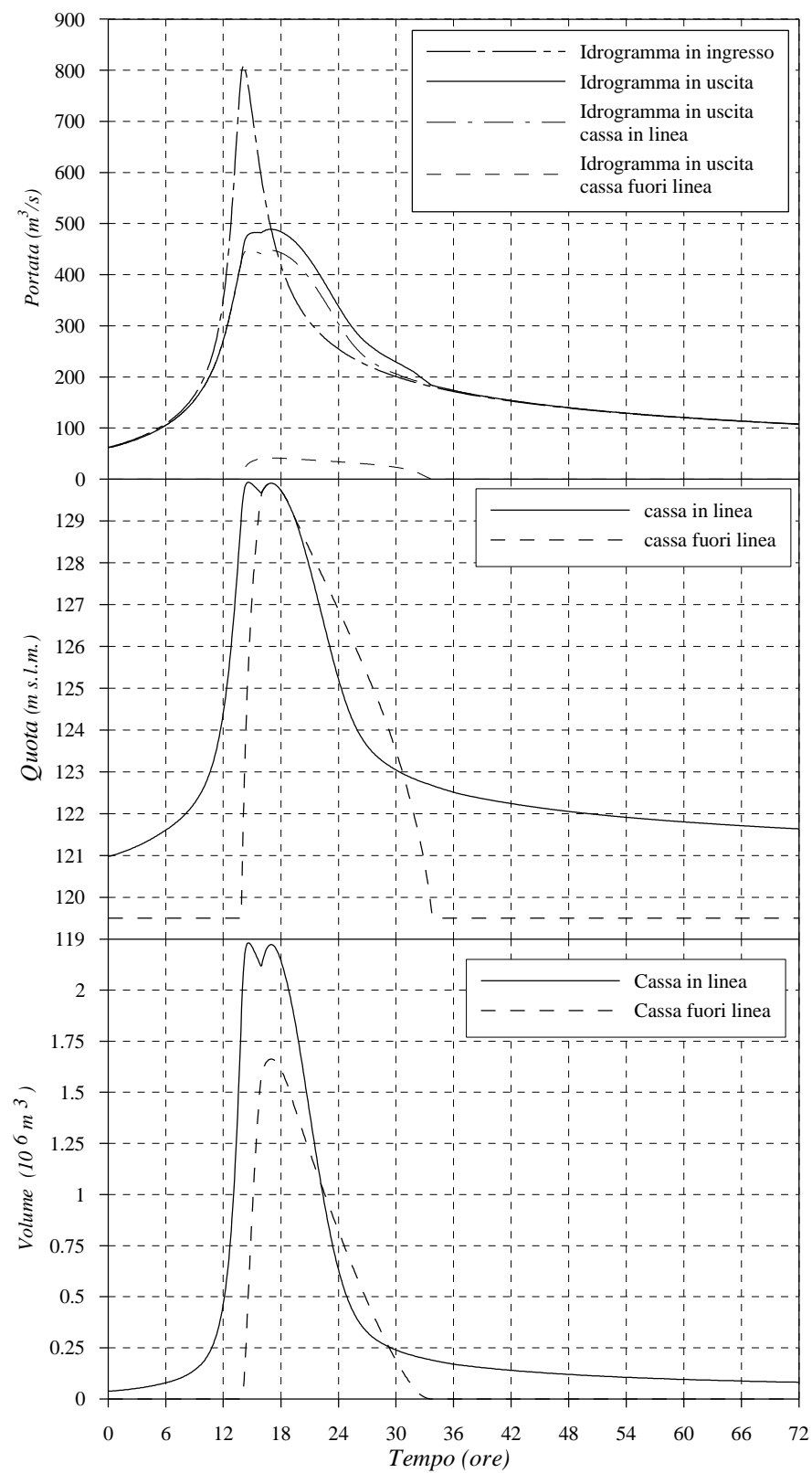


Figura C.2 – Cassa di laminazione sul torrente Baganza: Portate, Quote idriche e Volumi invasati ottenuti dalla simulazione dell'idrogramma sintetico con tempo di ritorno pari a 200 anni.

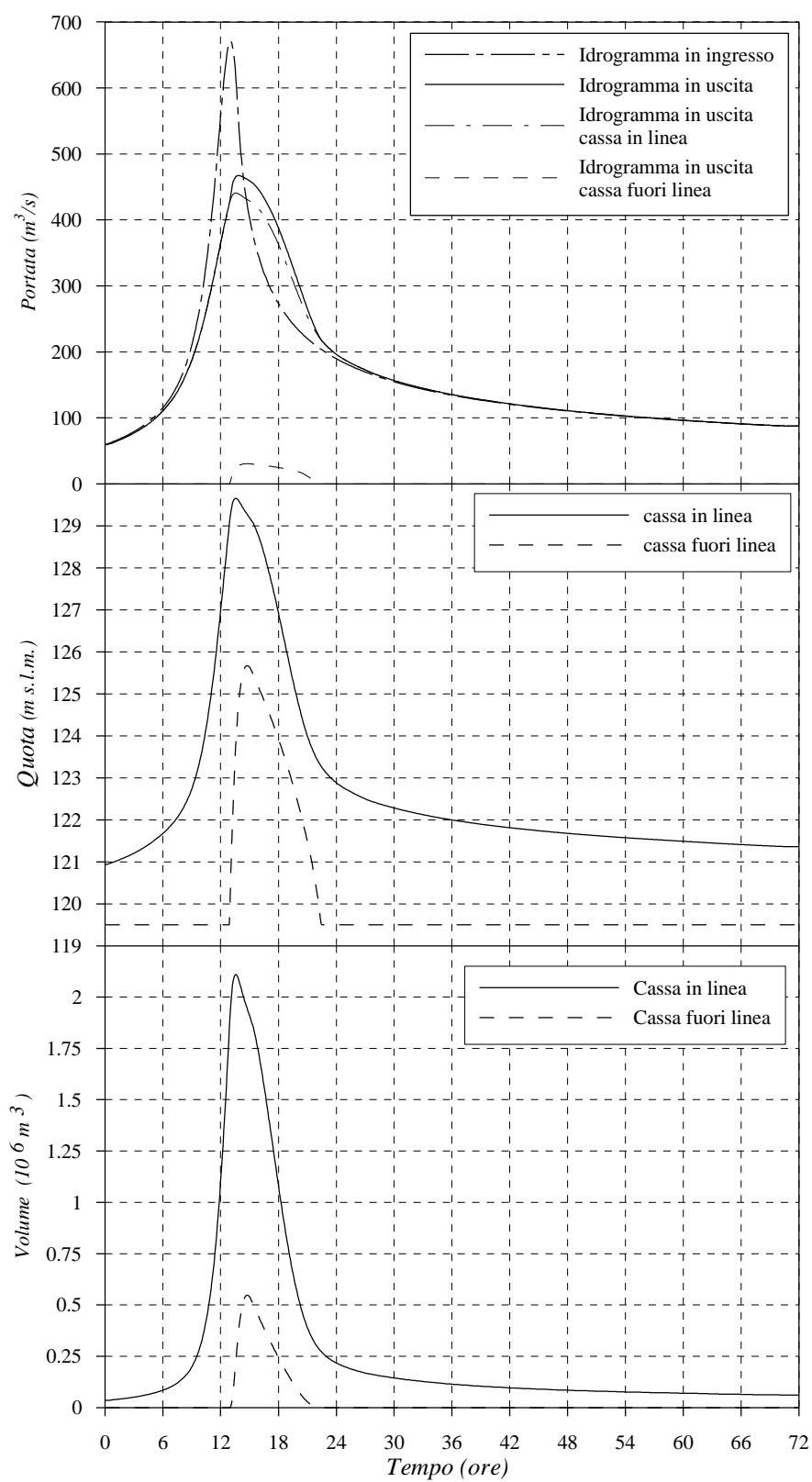


Figura C.3 – Cassa di laminazione sul torrente Baganza: Portate, Quote idriche e Volumi invasati ottenuti dalla simulazione dell'idrogramma sintetico con tempo di ritorno pari a 100 anni.

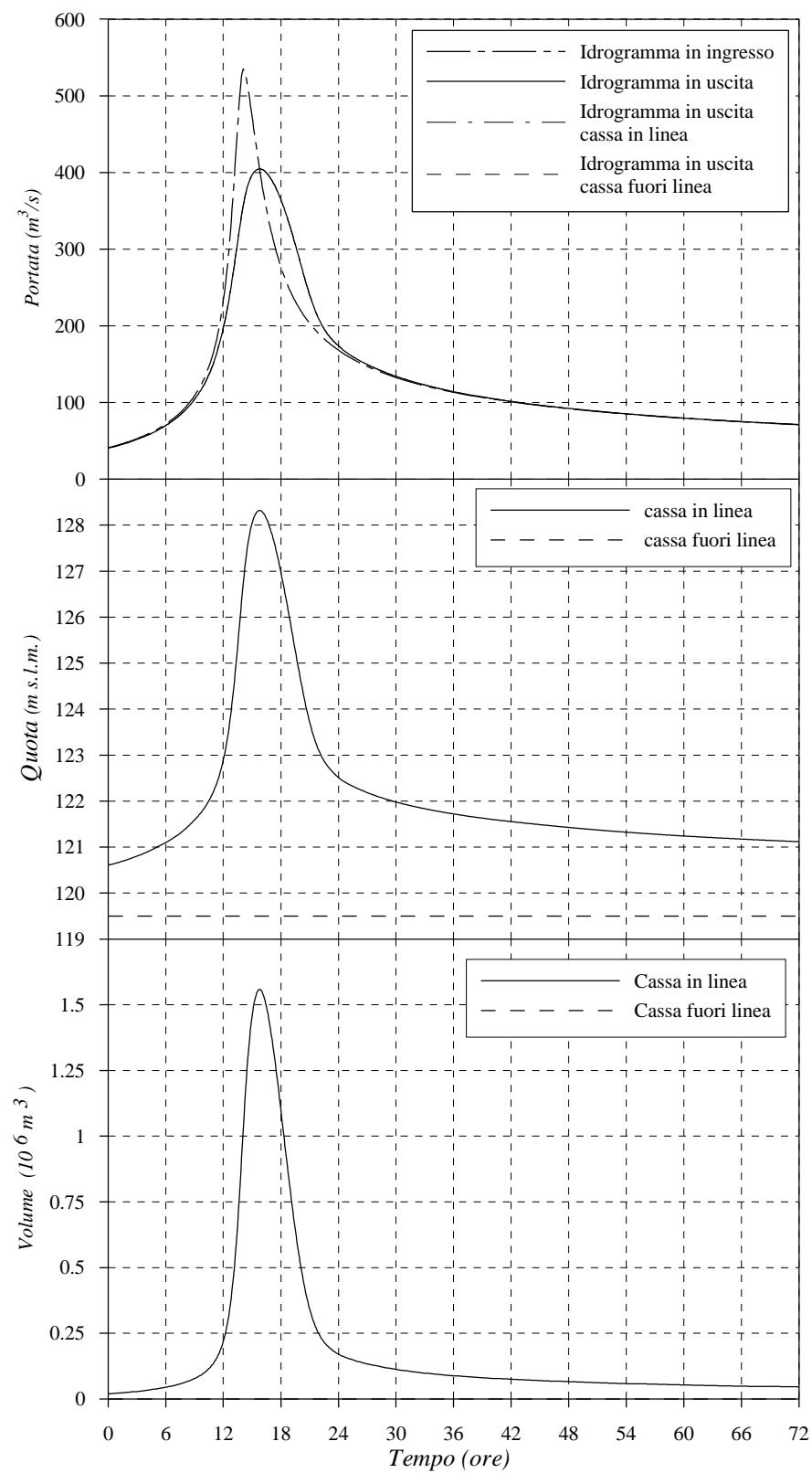


Figura C.4 – Cassa di laminazione sul torrente Baganza: Portate, Quote idriche e Volumi invasati ottenuti dalla simulazione dell'idrogramma sintetico con tempo di ritorno pari a 50 anni.

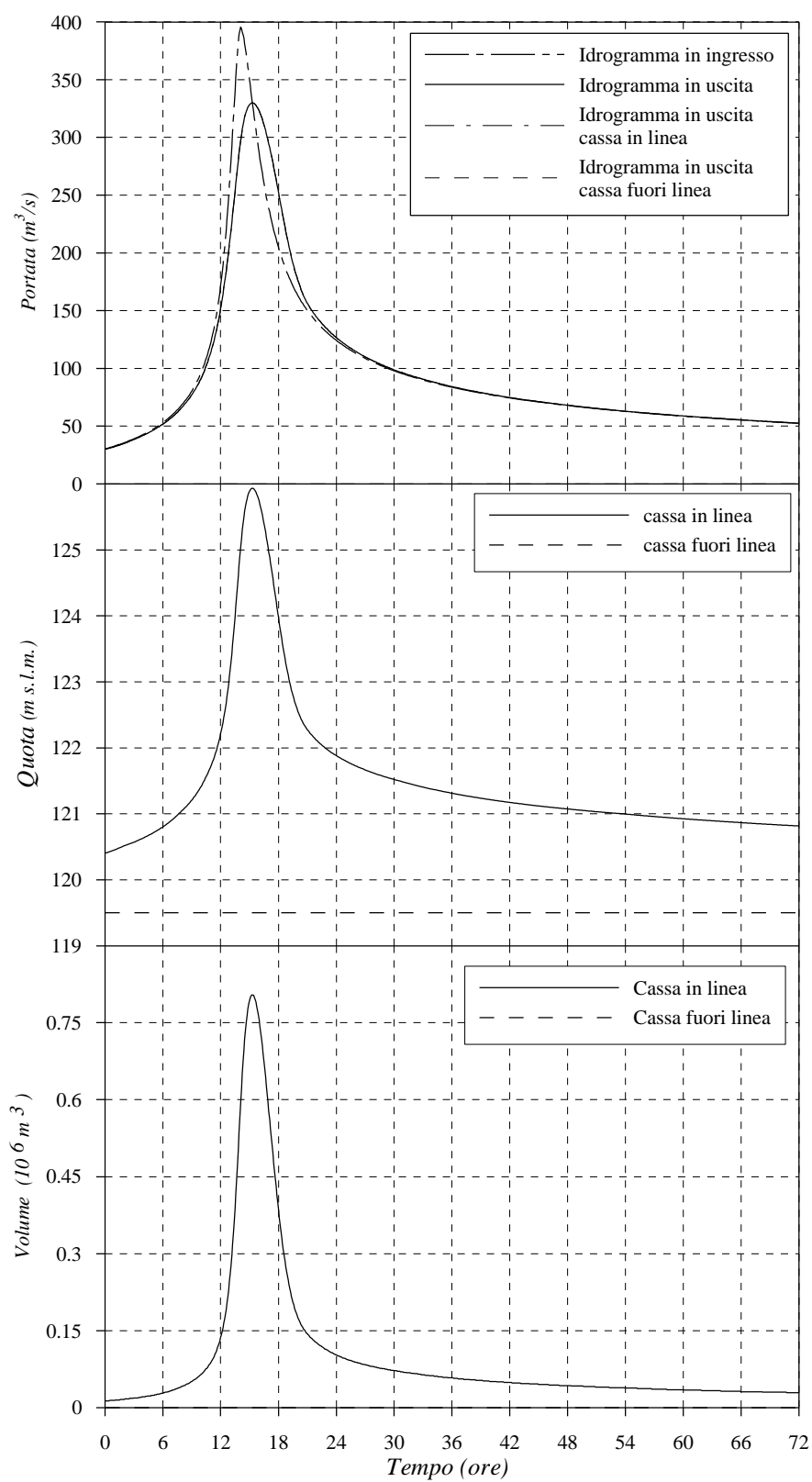


Figura C.5 – Cassa di laminazione sul torrente Baganza: Portate, Quote idriche e Volumi invasati ottenuti dalla simulazione dell'idrogramma sintetico con tempo di ritorno pari a 20 anni.

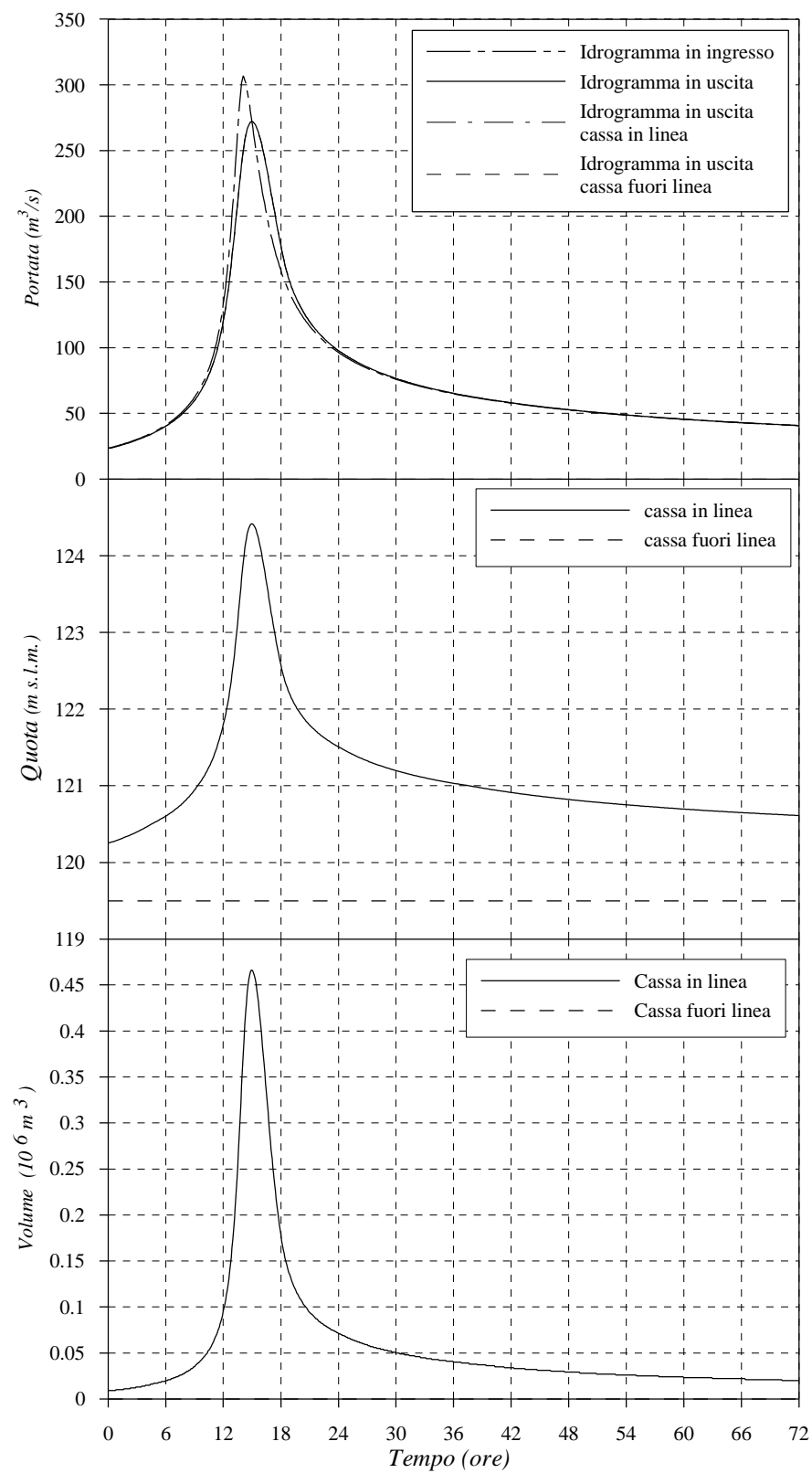


Figura C.6 – Cassa di laminazione sul torrente Baganza: Portate, Quote idriche e Volumi invasati ottenuti dalla simulazione dell'idrogramma sintetico con tempo di ritorno pari a 10 anni.

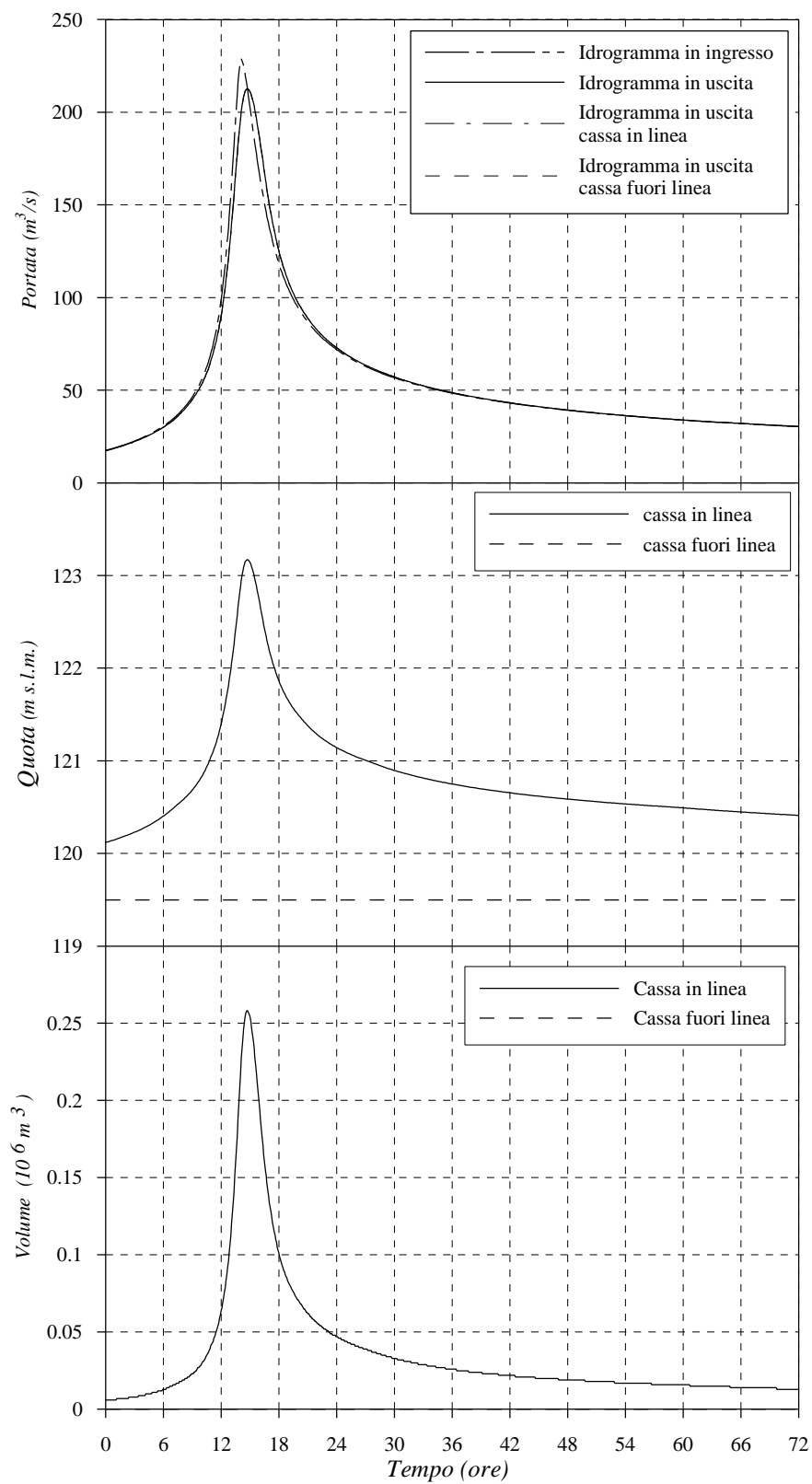


Figura C.7 – Cassa di laminazione sul torrente Baganza: Portate, Quote idriche e Volumi invasati ottenuti dalla simulazione dell'idrogramma sintetico con tempo di ritorno pari a 5 anni.

APPENDICE D

**Risultati delle simulazioni a valle della
confluenza Parma-Baganza in presenza della
cassa di espansione sul torrente Parma**

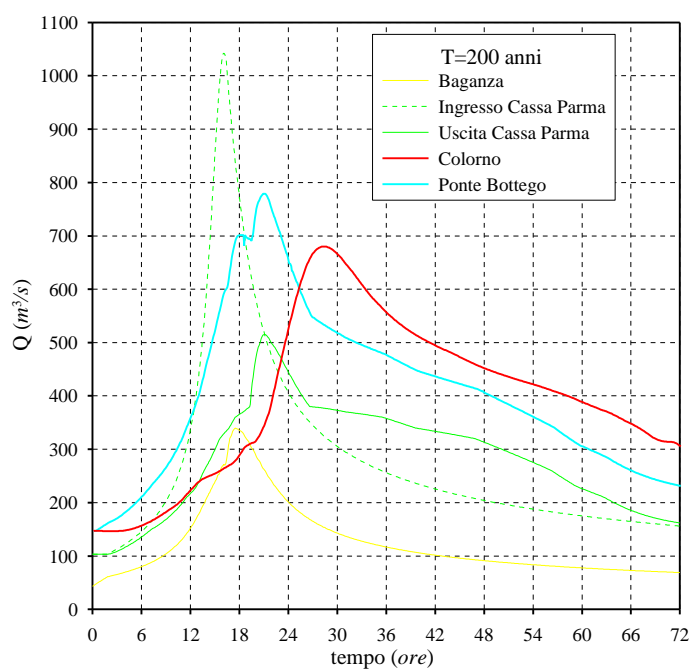


Figura D.1 – Risultati della simulazione per T=200 anni nella combinazione denominata “200_Datt_fasate” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

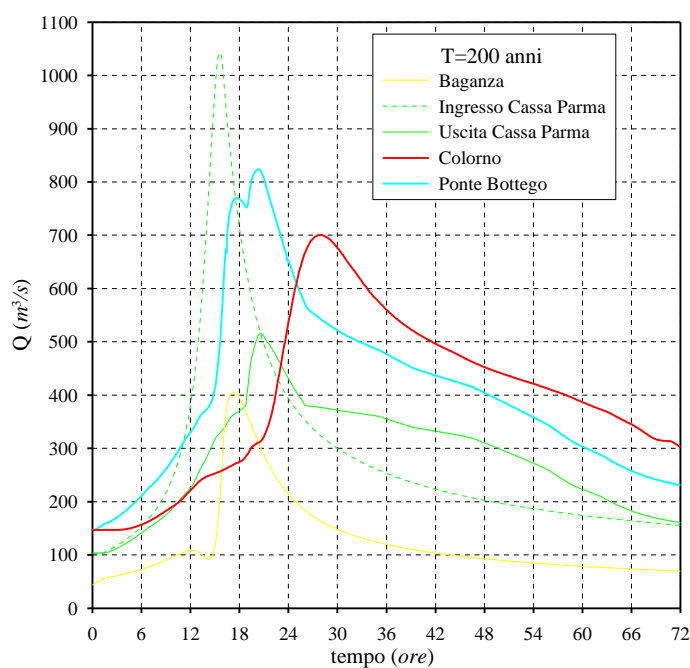


Figura D.2 – Risultati della simulazione per T=200 anni nella combinazione denominata “200_Datt_prima” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

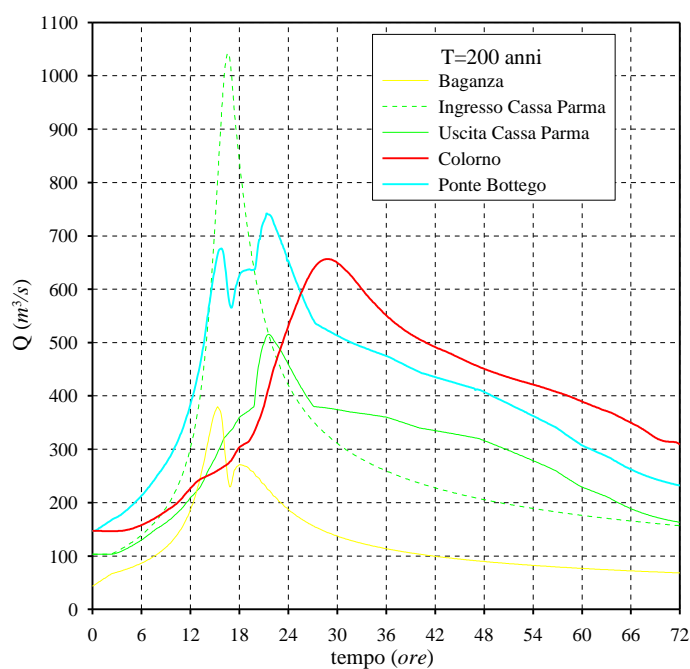


Figura D.3 – Risultati della simulazione per T=200 anni nella combinazione denominata “200_Datt_dopo” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

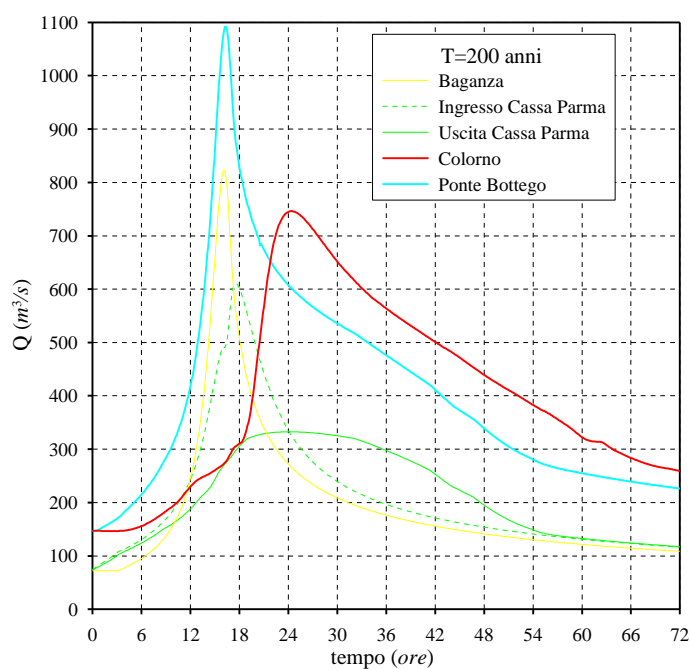


Figura D.4 – Risultati della simulazione per T=200 anni nella combinazione denominata “200_Nuo_fasate” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

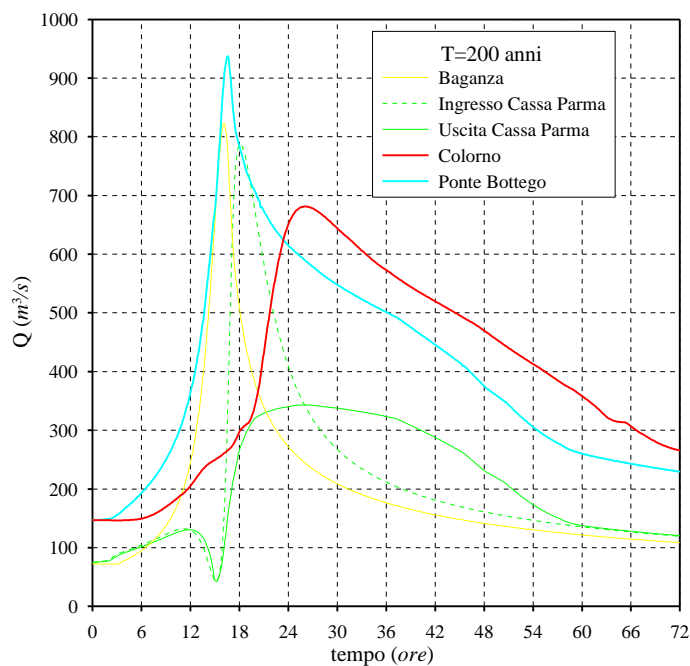


Figura D.5 – Risultati della simulazione per T=200 anni nella combinazione denominata “200_Nuo_prima” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

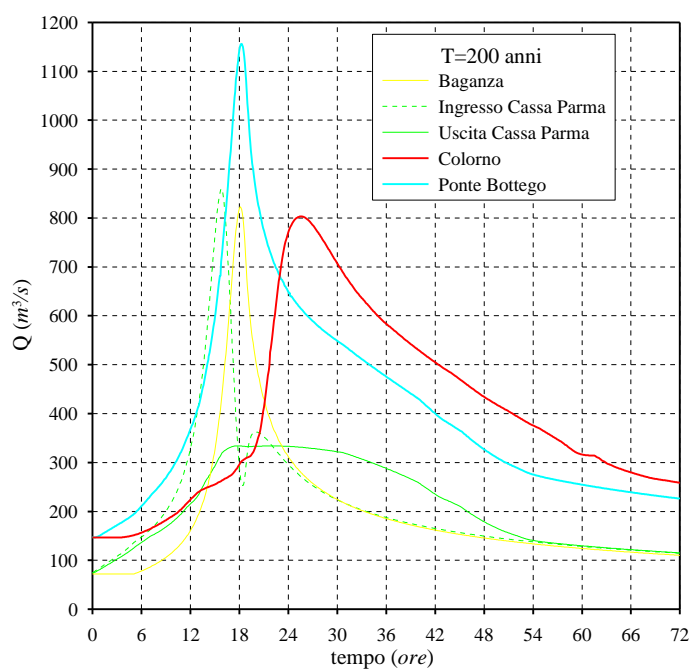


Figura D.6 – Risultati della simulazione per T=200 anni nella combinazione denominata “200_Nuo_dopo” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

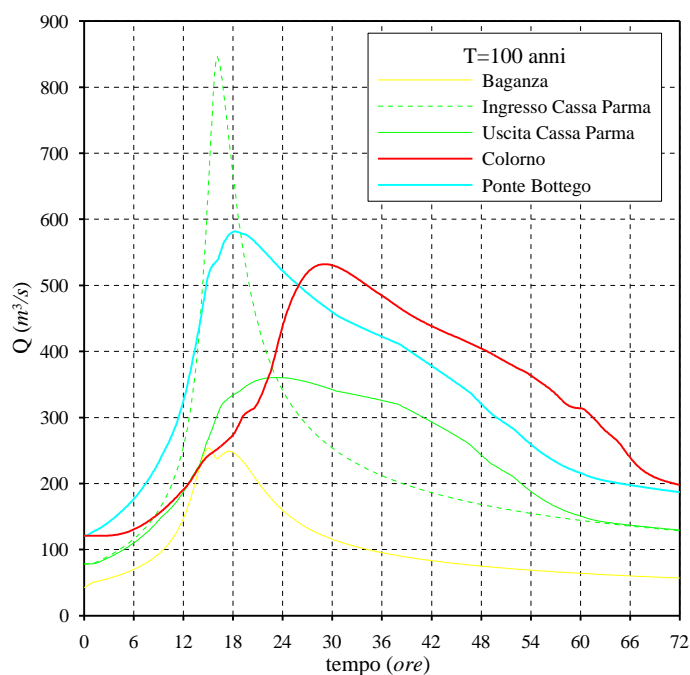


Figura D.7 – Risultati della simulazione per T=100 anni nella combinazione denominata “100_Datt_fasate” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

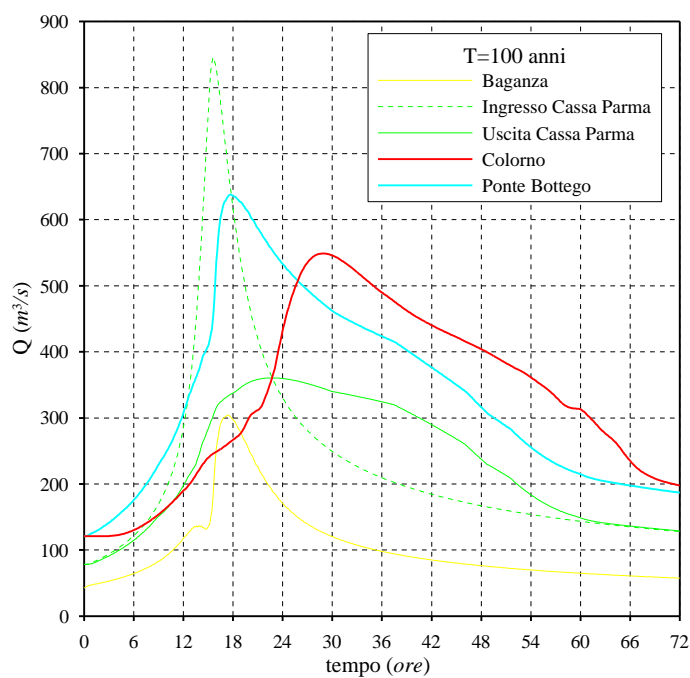


Figura D.8 – Risultati della simulazione per T=100 anni nella combinazione denominata “100_Datt_prima” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

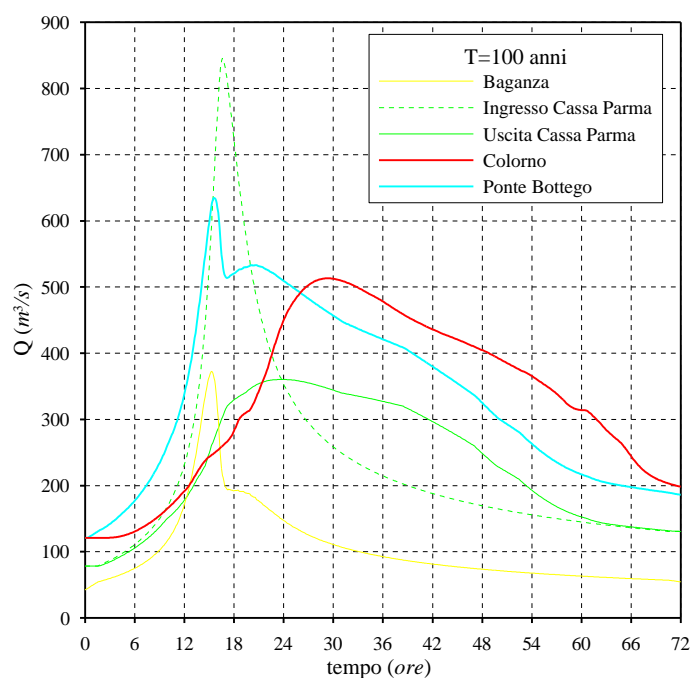


Figura D.9 – Risultati della simulazione per T=100 anni nella combinazione denominata “100_Datt_dopo” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

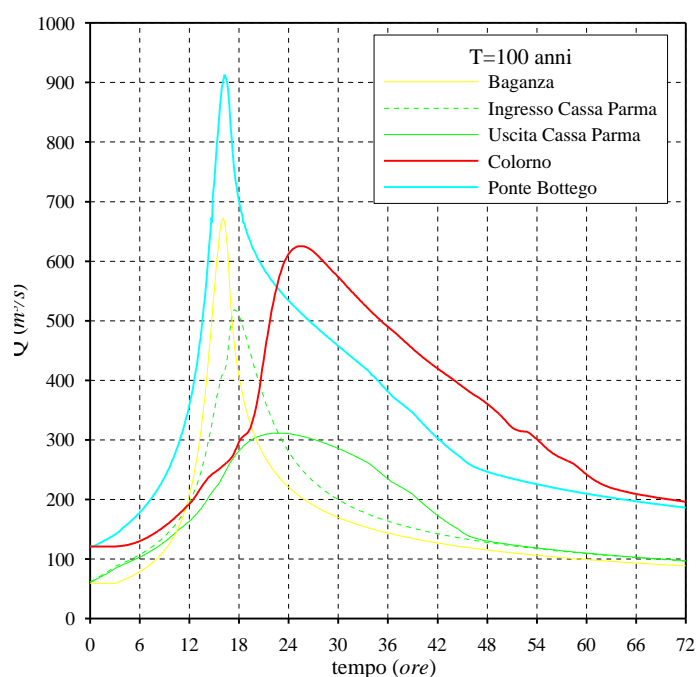


Figura D.10 – Risultati della simulazione per T=100 anni nella combinazione denominata “100_Nuo_fasate” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

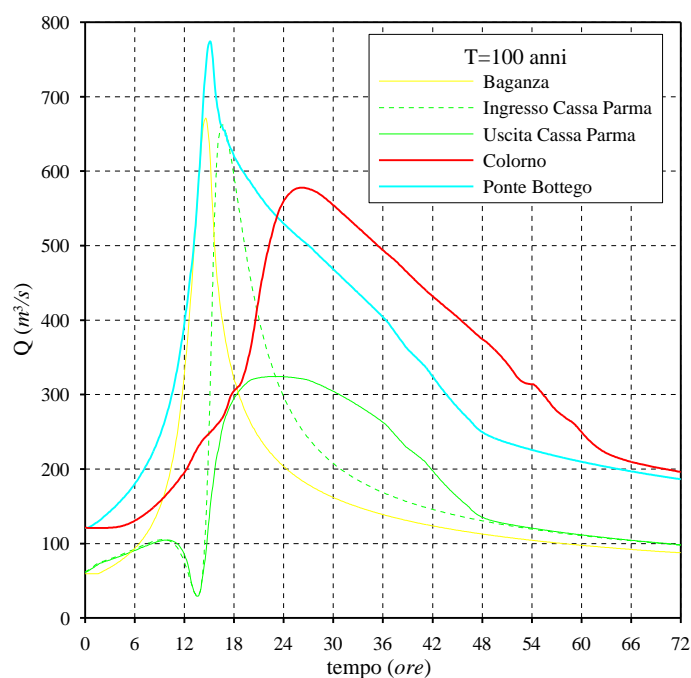


Figura D.11 – Risultati della simulazione per $T=100$ anni nella combinazione denominata “100_Nuo_prima” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

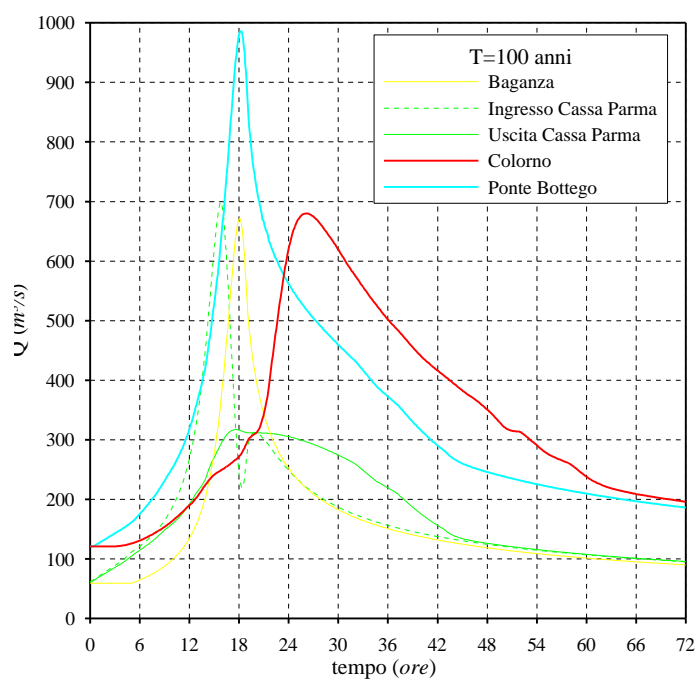


Figura D.12 – Risultati della simulazione per $T=100$ anni nella combinazione denominata “100_Nuo_dopo” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

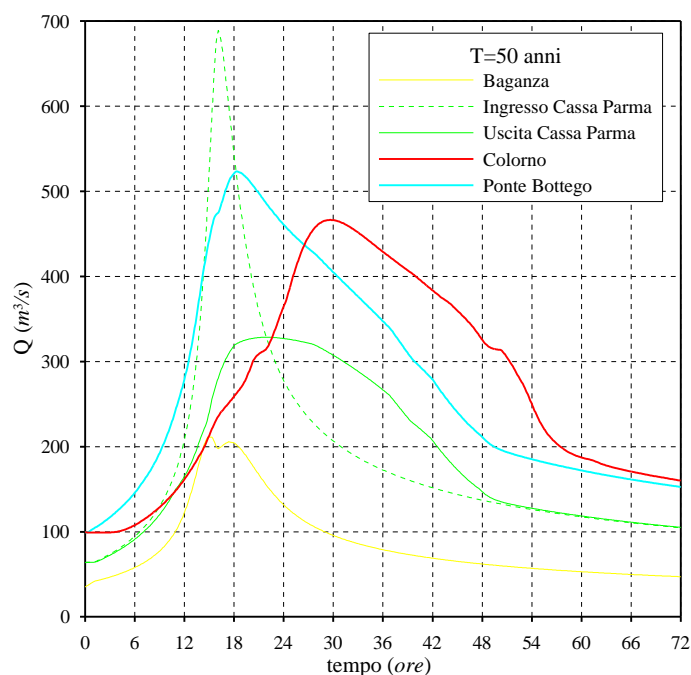


Figura D.13 – Risultati della simulazione per T=50 anni nella combinazione denominata “50_Datt_fasate” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

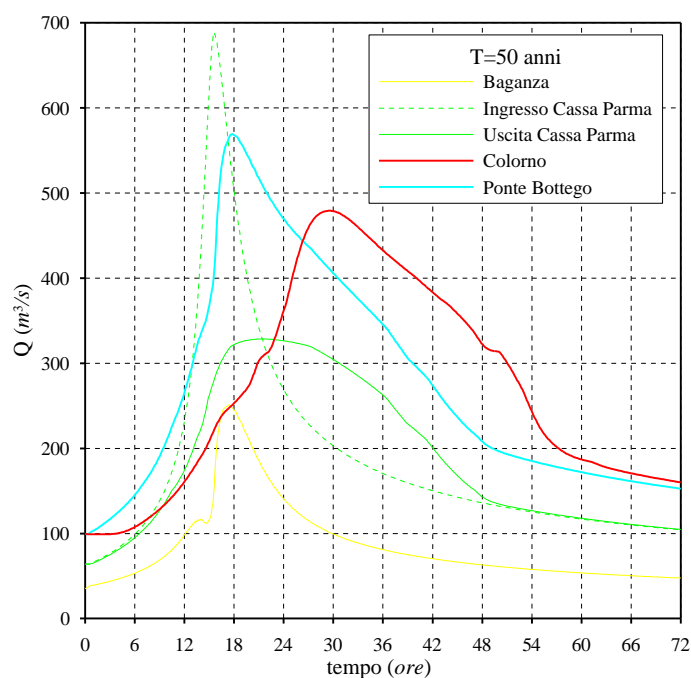


Figura D.14 – Risultati della simulazione per T=50 anni nella combinazione denominata “50_Datt_prima” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

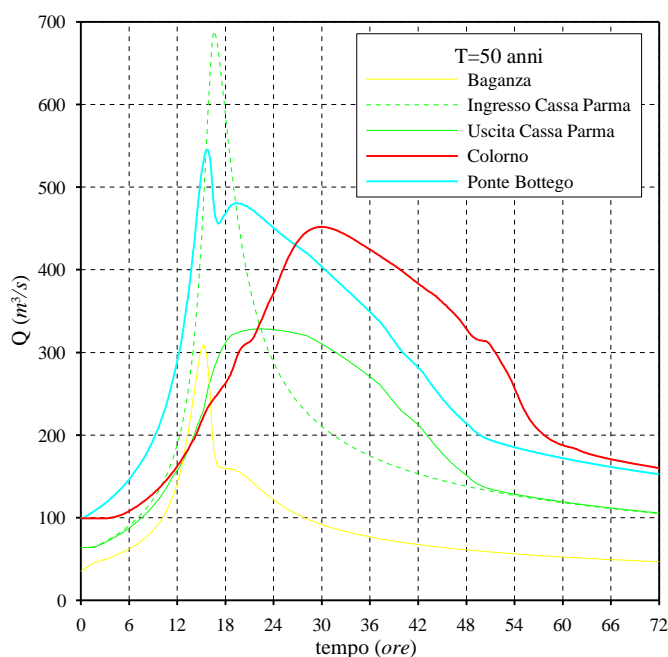


Figura D.15 – Risultati della simulazione per T=50 anni nella combinazione denominata “50_Datt_dopo” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

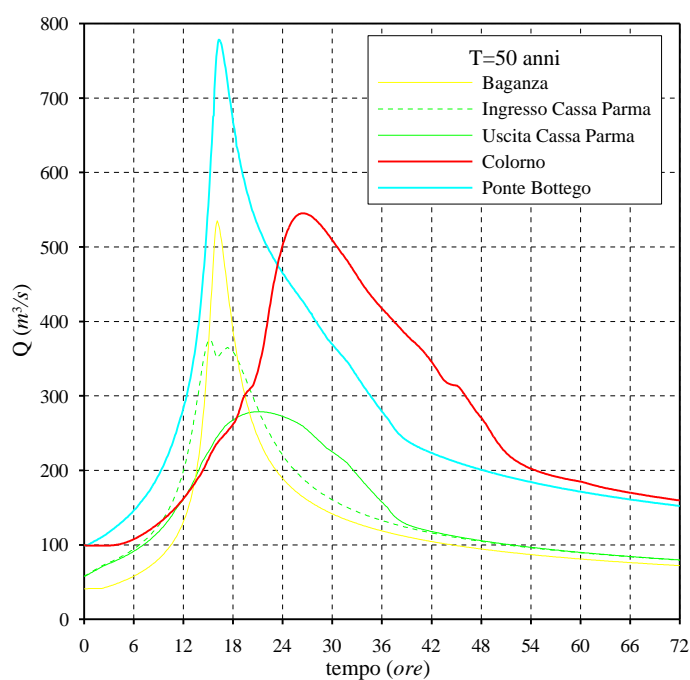


Figura D.16 – Risultati della simulazione per T=50 anni nella combinazione denominata “50_Nuo_fasate” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

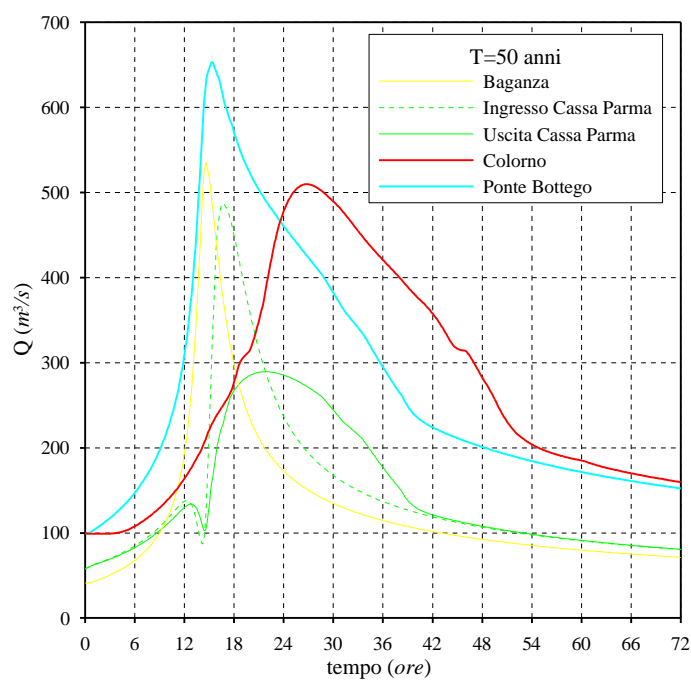


Figura D.17 – Risultati della simulazione per T=50 anni nella combinazione denominata “50_Nuo_prima” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

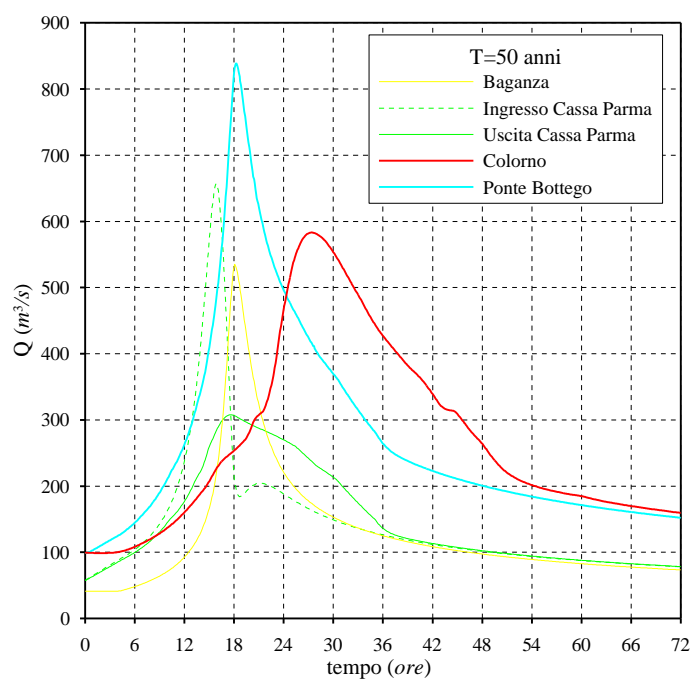


Figura D.18 – Risultati della simulazione per T=50 anni nella combinazione denominata “50_Nuo_dopo” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

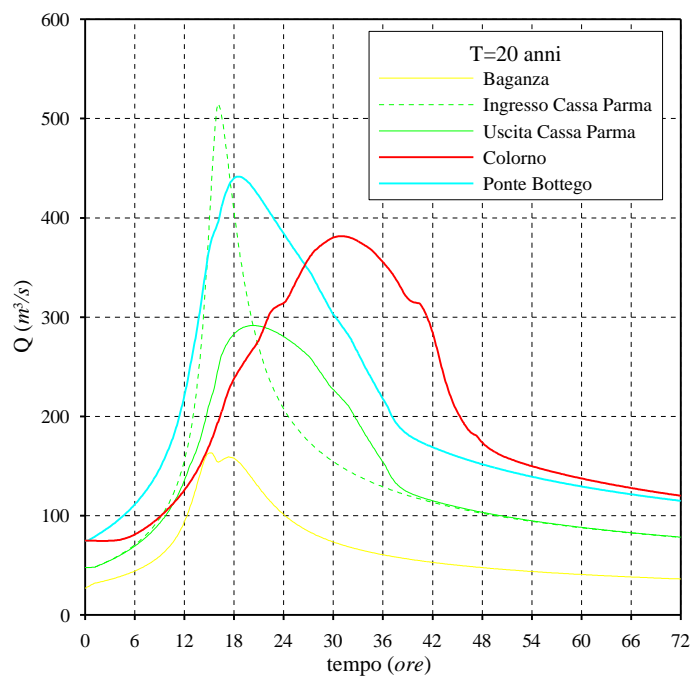


Figura D.19 – Risultati della simulazione per $T=20$ anni nella combinazione denominata “20_Datt_fasate” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

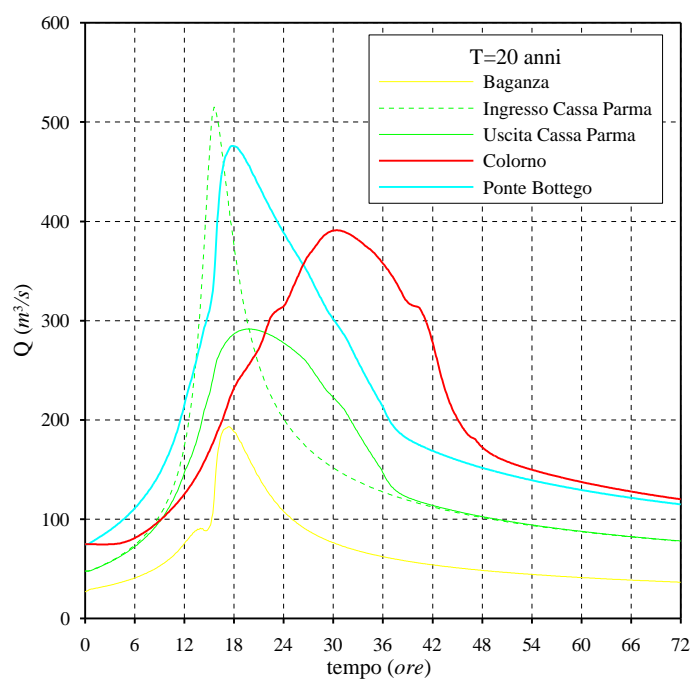


Figura D.20 – Risultati della simulazione per $T=20$ anni nella combinazione denominata “20_Datt_prima” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

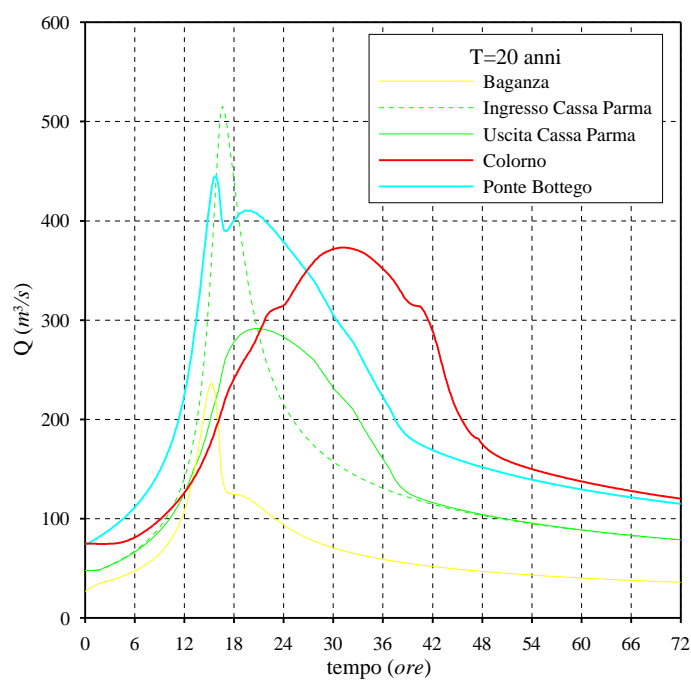


Figura D.21 – Risultati della simulazione per T=20 anni nella combinazione denominata “20_Datt_dopo” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

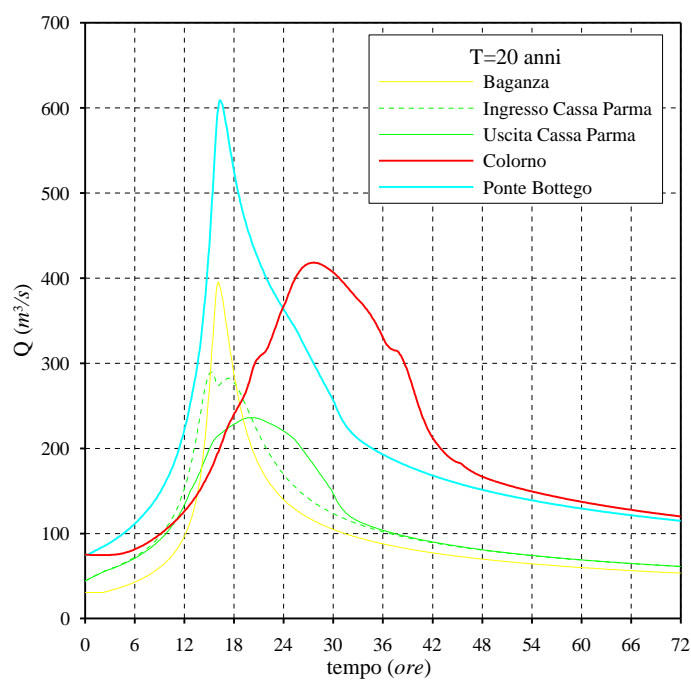


Figura D.22 – Risultati della simulazione per T=20 anni nella combinazione denominata “20_Nuo_fasate” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

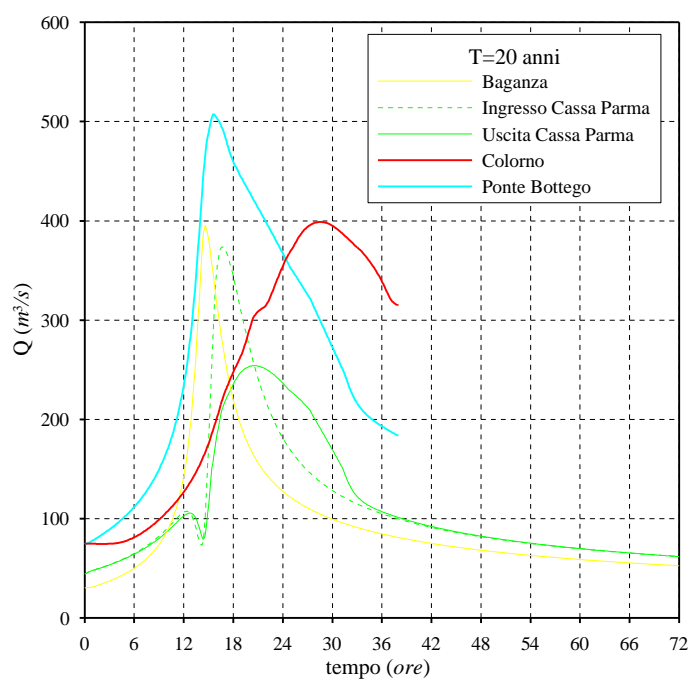


Figura D.23 – Risultati della simulazione per T=20 anni nella combinazione denominata “20_Nuo_prima” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

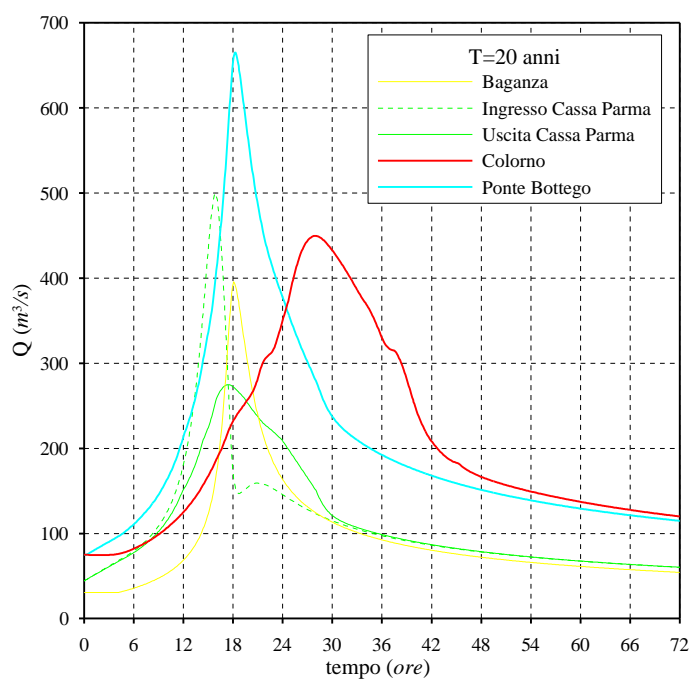


Figura D.24 – Risultati della simulazione per T=20 anni nella combinazione denominata “20_Nuo_dopo” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

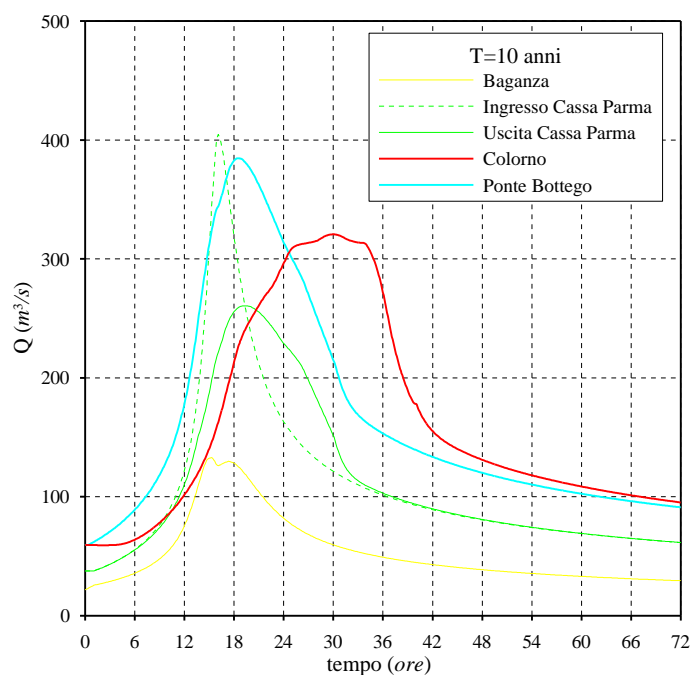


Figura D.25 – Risultati della simulazione per T=10 anni nella combinazione denominata “10_Datt_fasate” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

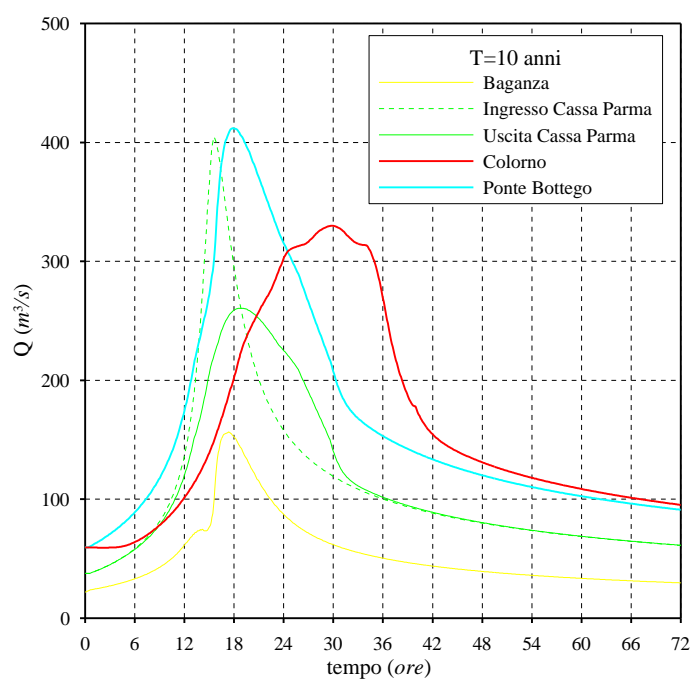


Figura D.26 – Risultati della simulazione per T=10 anni nella combinazione denominata “10_Datt_prima” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

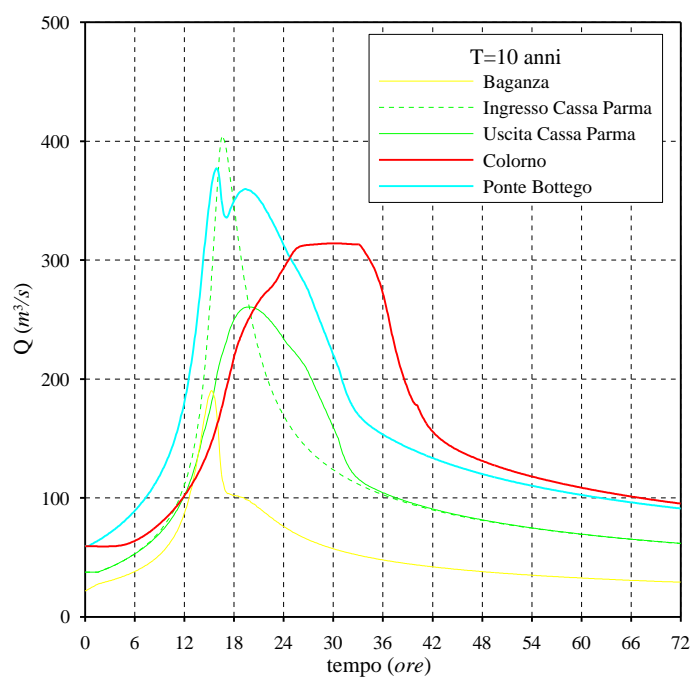


Figura D.27 – Risultati della simulazione per T=10 anni nella combinazione denominata “10_Datt_dopo” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

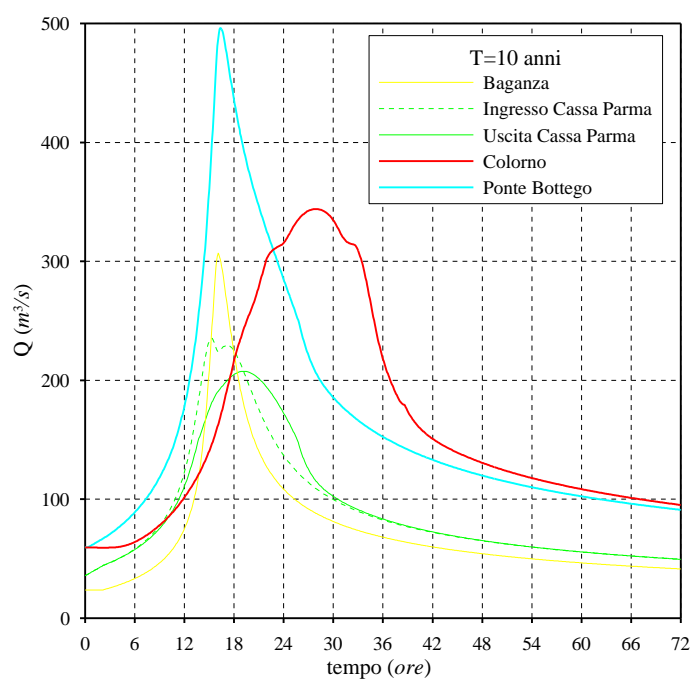


Figura D.28 – Risultati della simulazione per T=10 anni nella combinazione denominata “10_Nuo_fasate” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

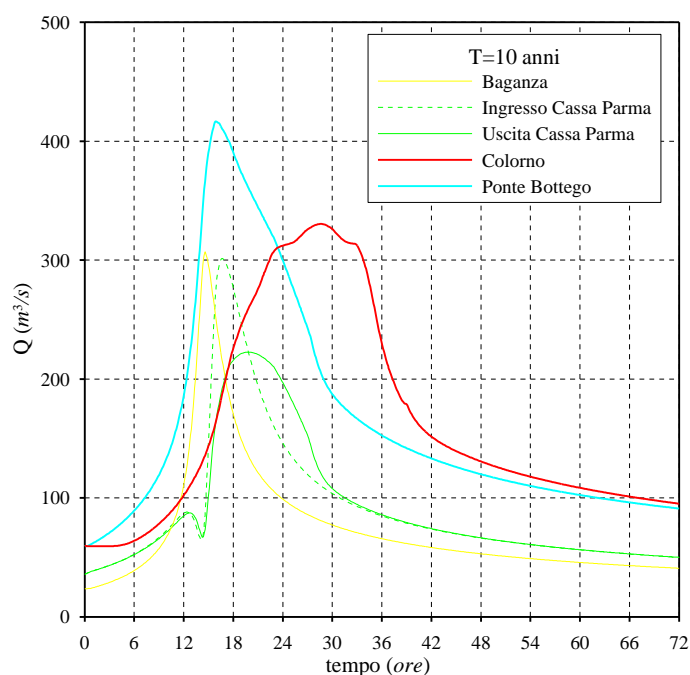


Figura D.29 – Risultati della simulazione per T=10 anni nella combinazione denominata “10_Nuo_prima” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

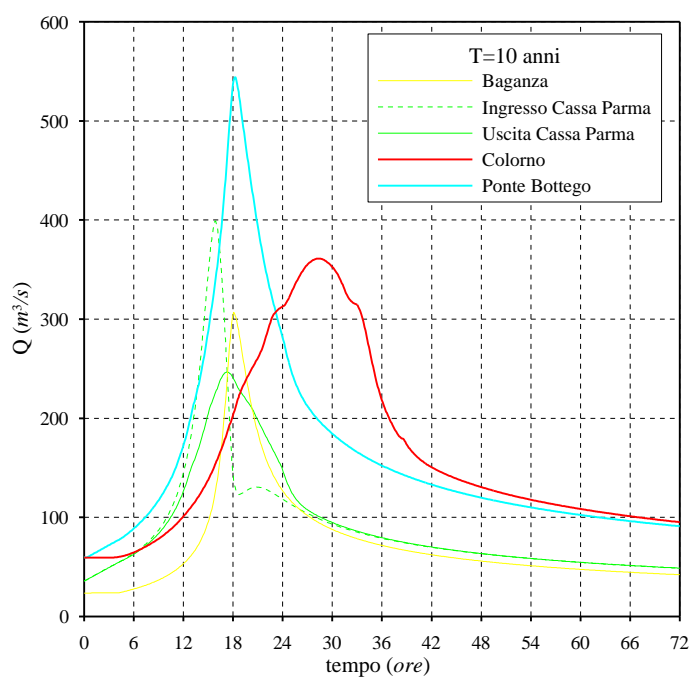


Figura D.30– Risultati della simulazione per T=10 anni nella combinazione denominata “10_Nuo_dopo” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

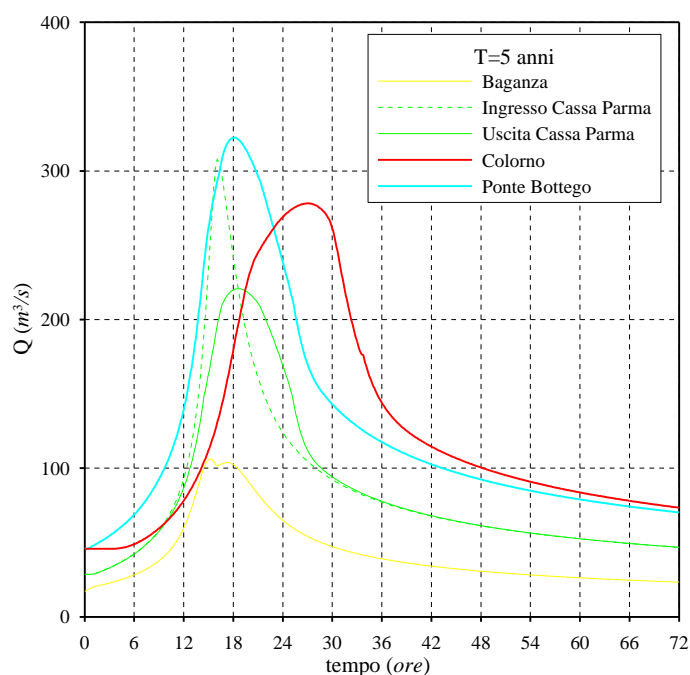


Figura D.31 – Risultati della simulazione per $T=5$ anni nella combinazione denominata “5_Datt_fasate” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

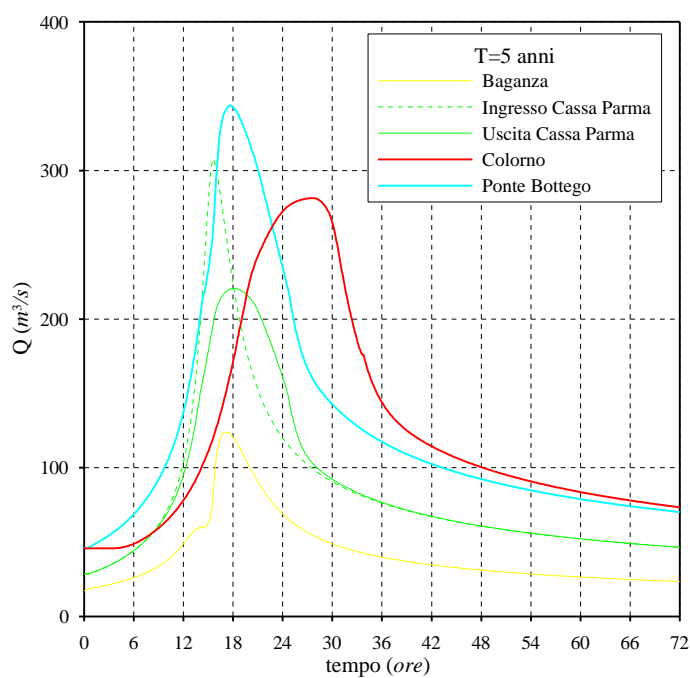


Figura D.32 – Risultati della simulazione per $T=5$ anni nella combinazione denominata “5_Datt_prima” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

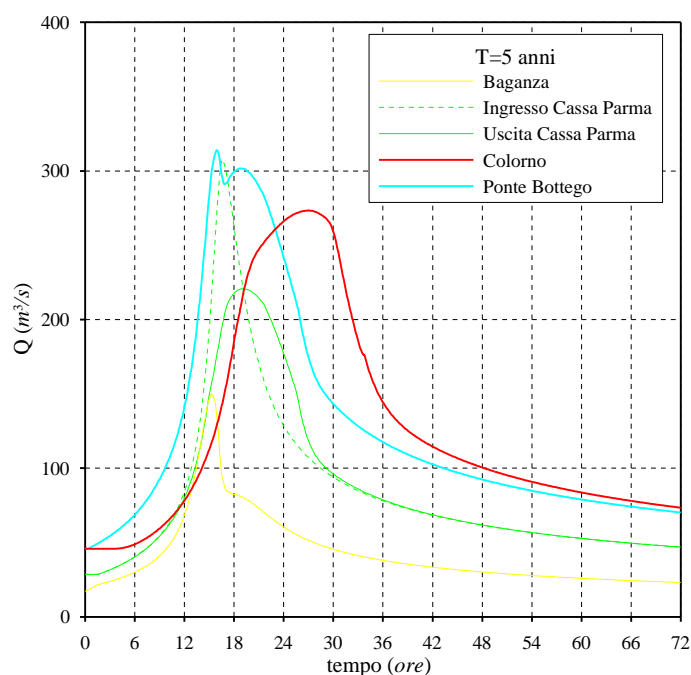


Figura D.33 – Risultati della simulazione per $T=5$ anni nella combinazione denominata "5_Datt_dopo" in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

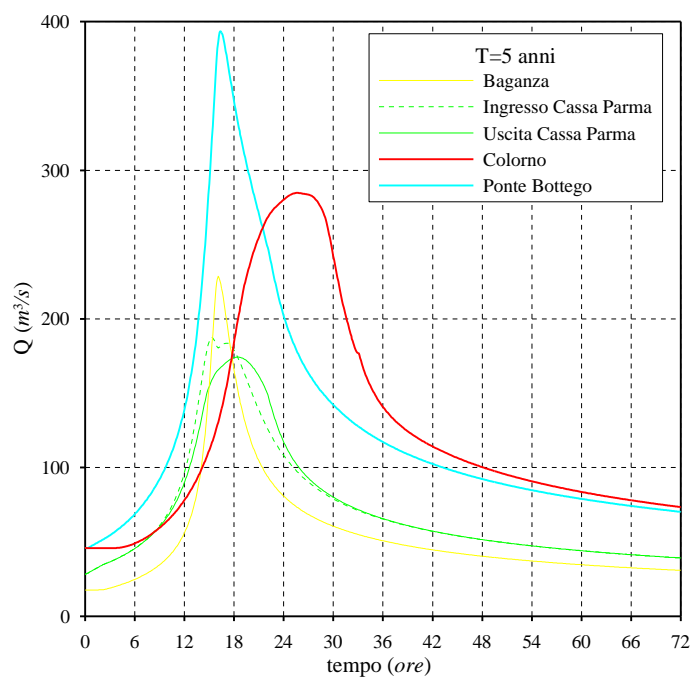


Figura D.34 – Risultati della simulazione per $T=5$ anni nella combinazione denominata "5_Nuo_fasate" in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

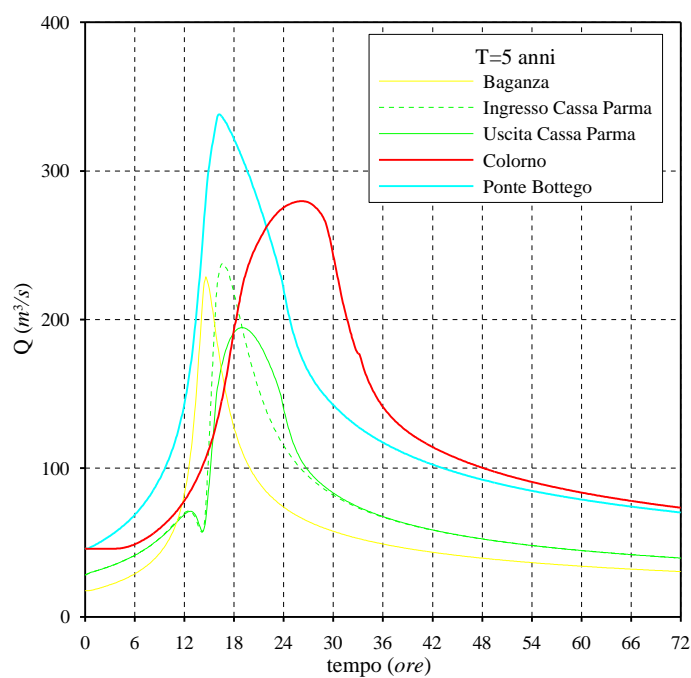


Figura D.35 – Risultati della simulazione per T=5anni nella combinazione denominata “5_Nuo_prima” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

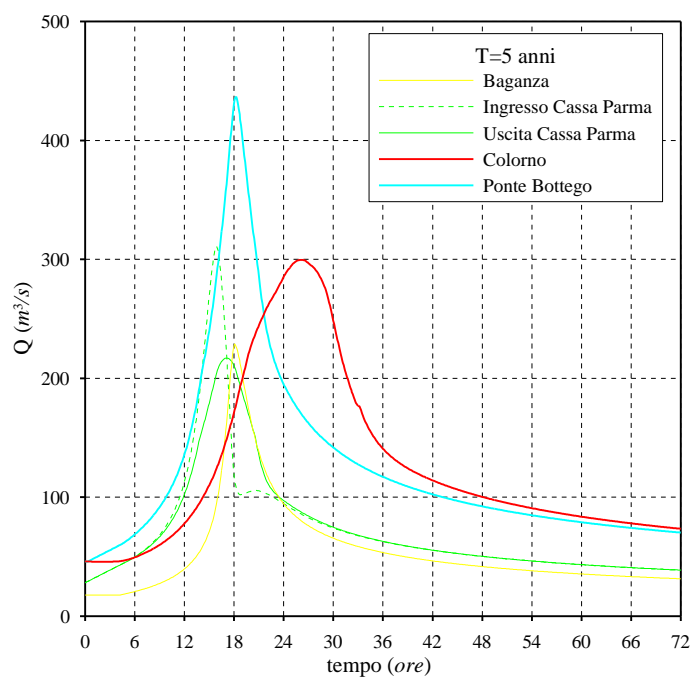


Figura D.36 – Risultati della simulazione per T=5 anni nella combinazione denominata “5_Nuo_dopo” in presenza della sola cassa di espansione sul torrente Parma.

APPENDICE E

**Risultati delle simulazioni a valle della
confluenza Parma-Baganza in presenza delle
casse di espansione sui torrenti Parma e
Baganza**

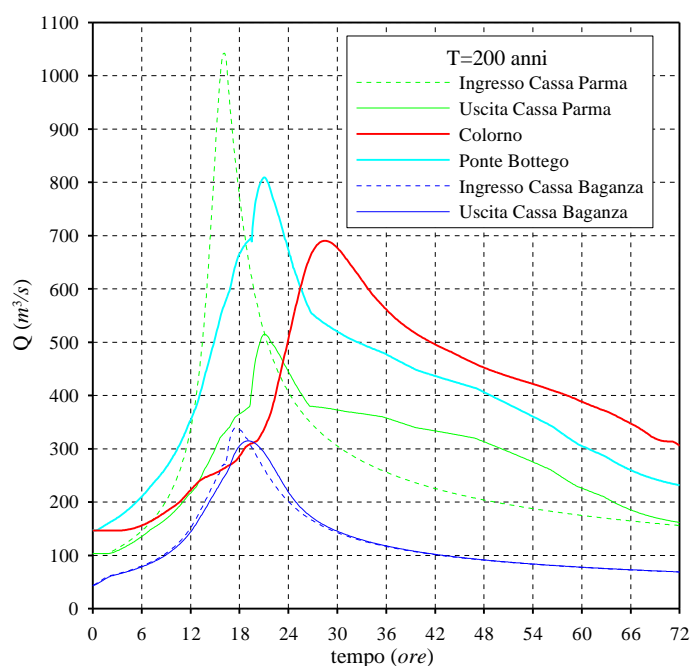


Figura E.1 – Risultati della simulazione per T=200 anni nella combinazione denominata “200_Datt_fasate” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

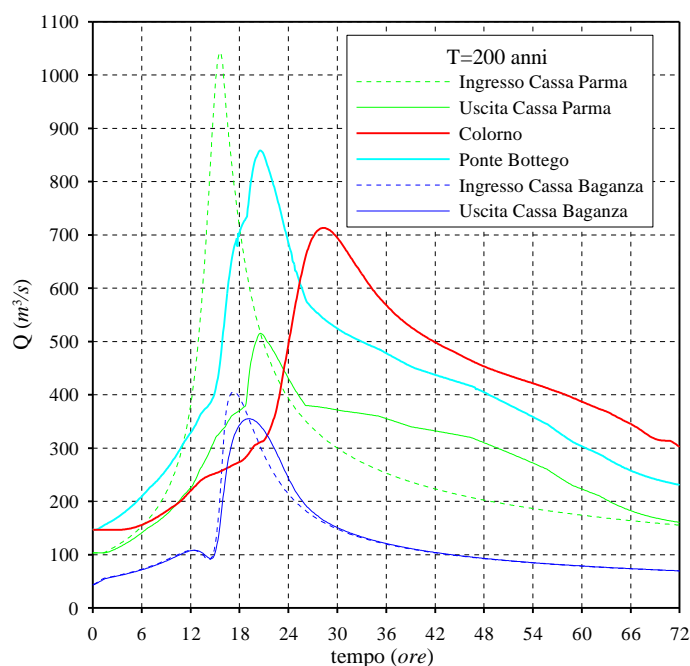


Figura E.2 – Risultati della simulazione per T=200 anni nella combinazione denominata “200_Datt_prima” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

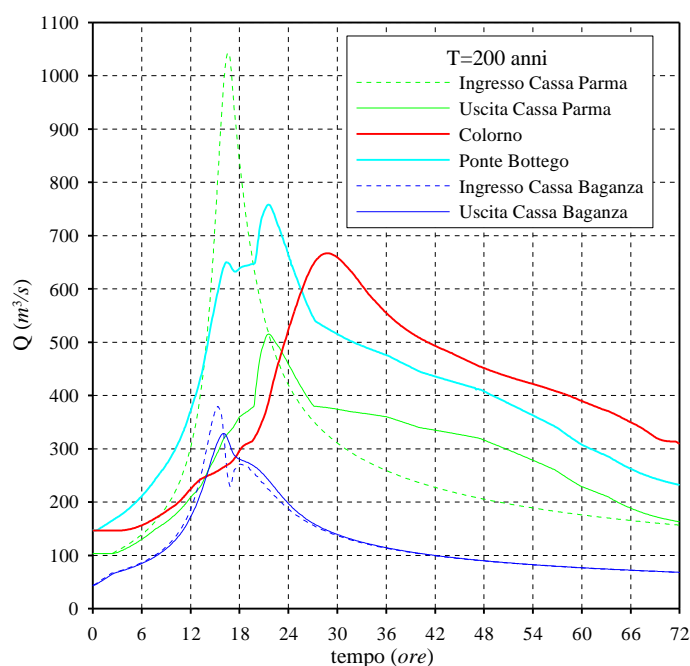


Figura E.3 – Risultati della simulazione per T=200 anni nella combinazione denominata “200_Datt_dopo” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

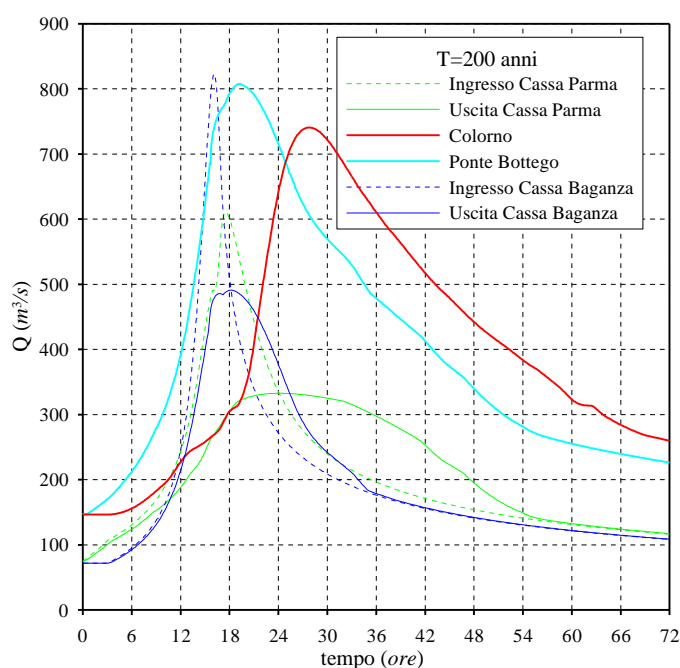


Figura E.4 – Risultati della simulazione per T=200 anni nella combinazione denominata “200_Nuo_fasate” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

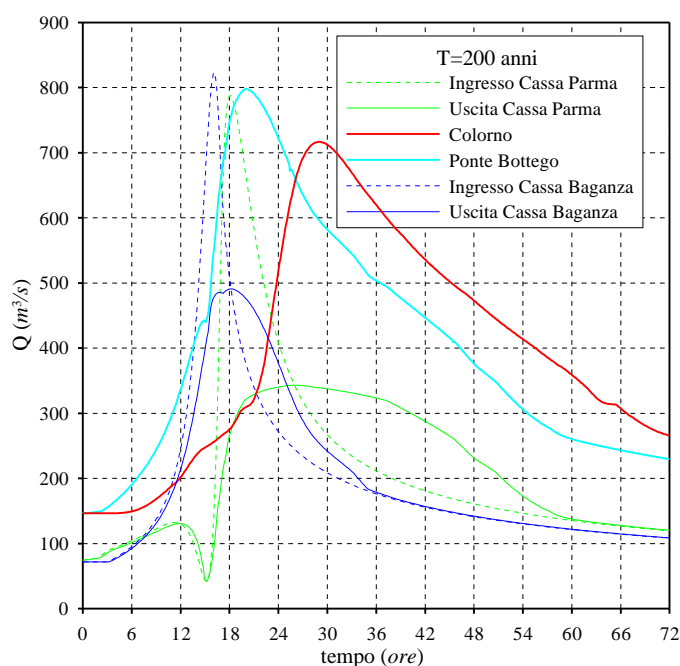


Figura E.5 – Risultati della simulazione per T=200 anni nella combinazione denominata “200_Nuo_prima” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

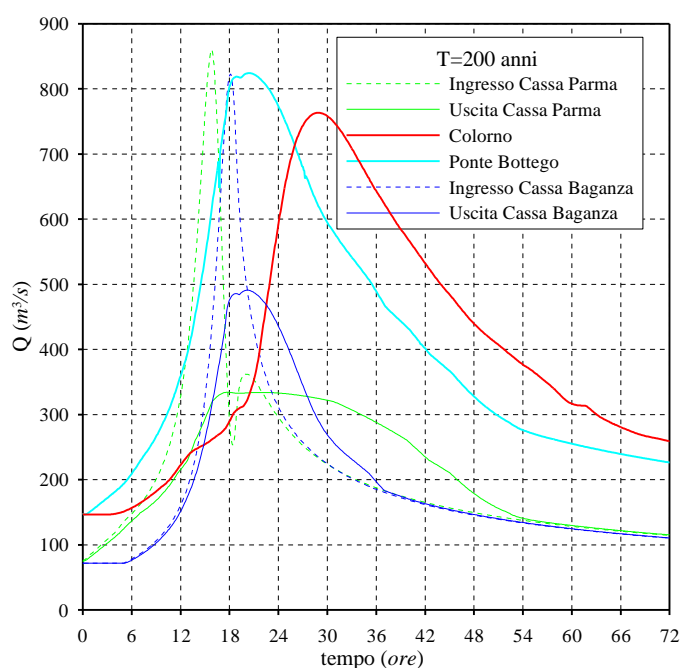


Figura E.6 – Risultati della simulazione per T=200 anni nella combinazione denominata “200_Nuo_dopo” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

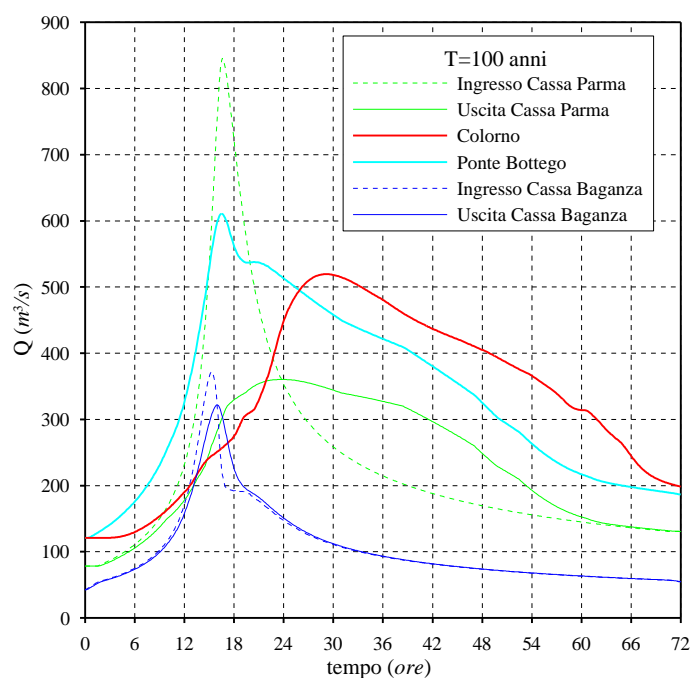


Figura E.7 – Risultati della simulazione per T=100 anni nella combinazione denominata “100_Datt_fasate” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

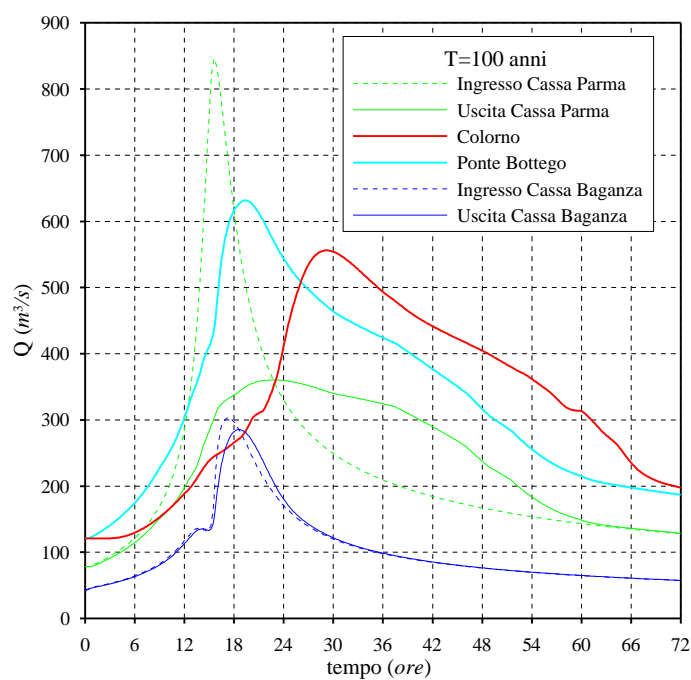


Figura E.8 – Risultati della simulazione per T=100 anni nella combinazione denominata “100_Datt_prima” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

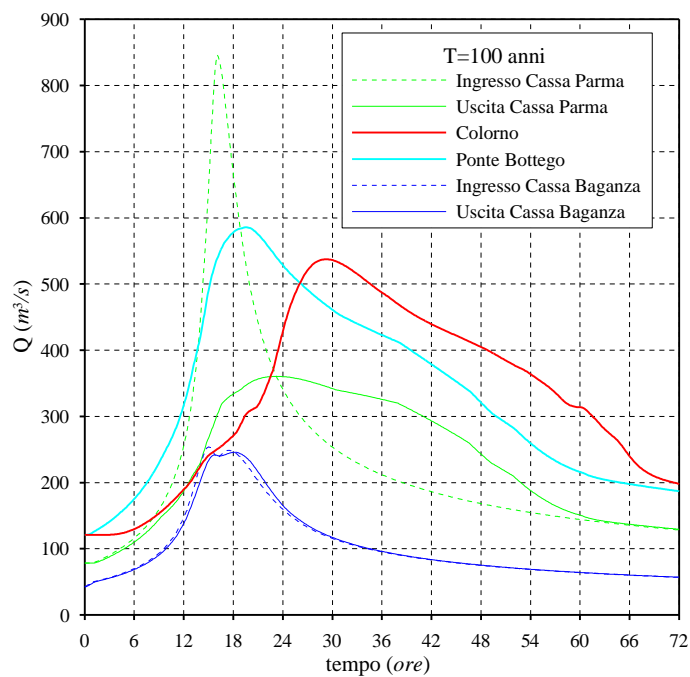


Figura E.9 – Risultati della simulazione per T=100 anni nella combinazione denominata “100_Datt_dopo” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

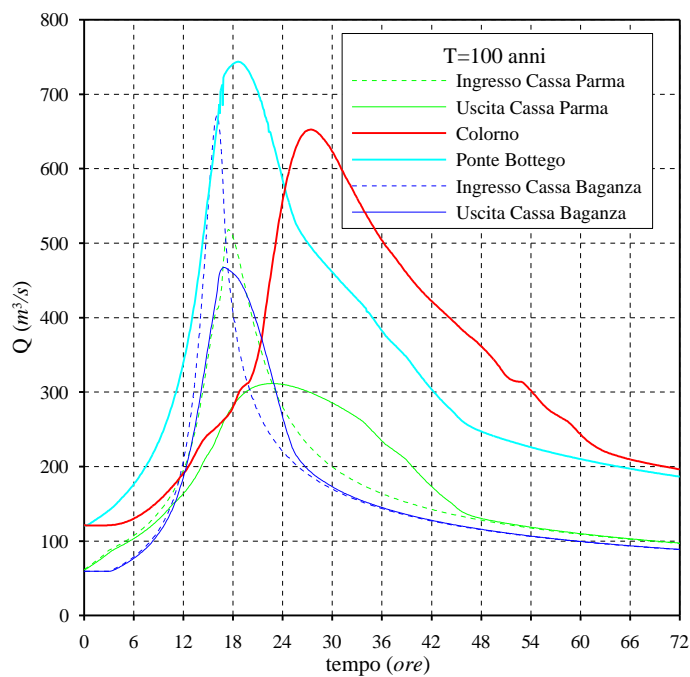


Figura E.10 – Risultati della simulazione per T=100 anni nella combinazione denominata “100_Nuo_fasate” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

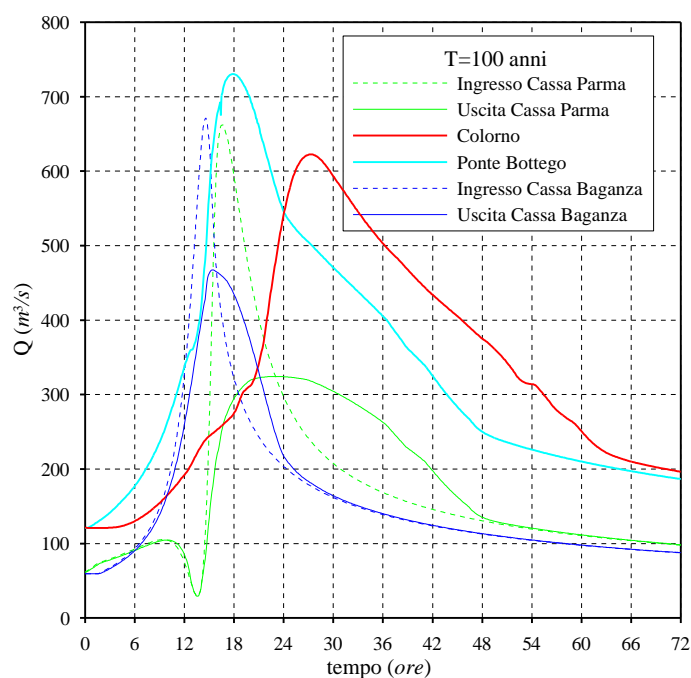


Figura E.11 – Risultati della simulazione per T=100 anni nella combinazione denominata “100_Nuo_prima” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

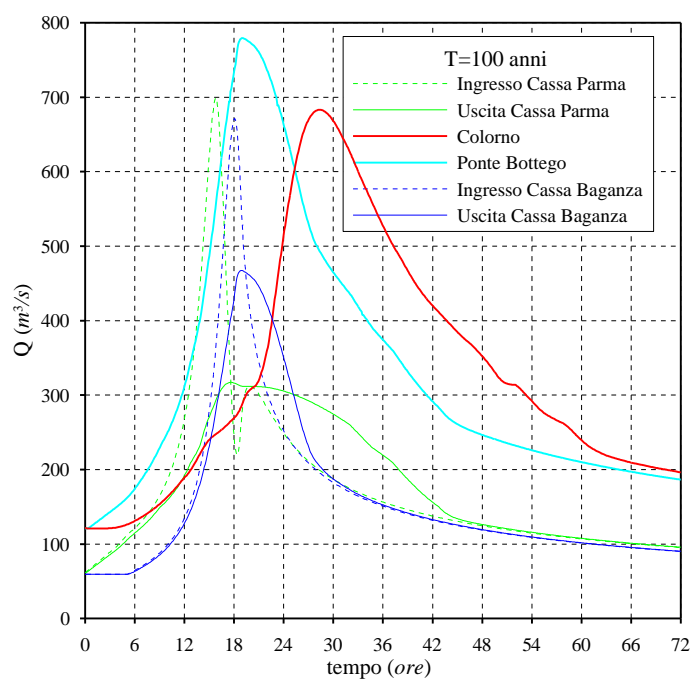


Figura E.12 – Risultati della simulazione per T=100 anni nella combinazione denominata “100_Nuo_dopo” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

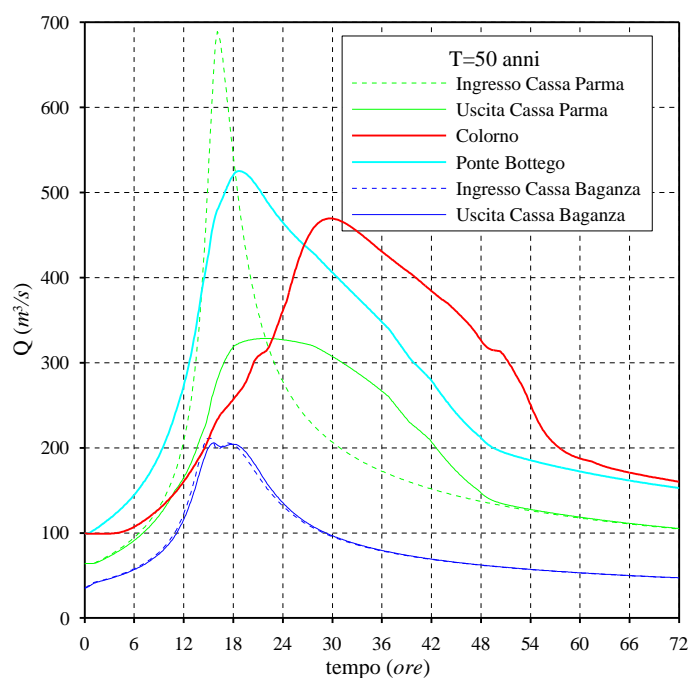


Figura E.13 – Risultati della simulazione per T=50 anni nella combinazione denominata “50_Datt_fasate” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

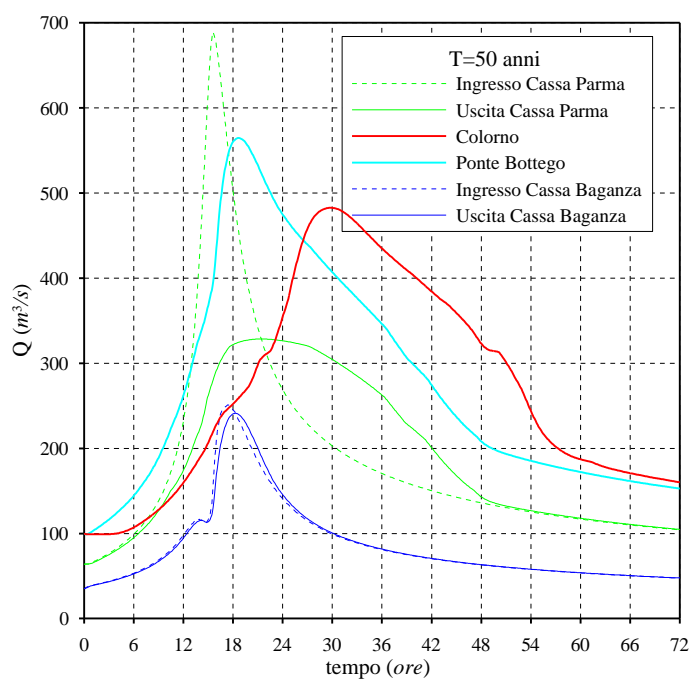


Figura E.14 – Risultati della simulazione per T=50 anni nella combinazione denominata “50_Datt_prima” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

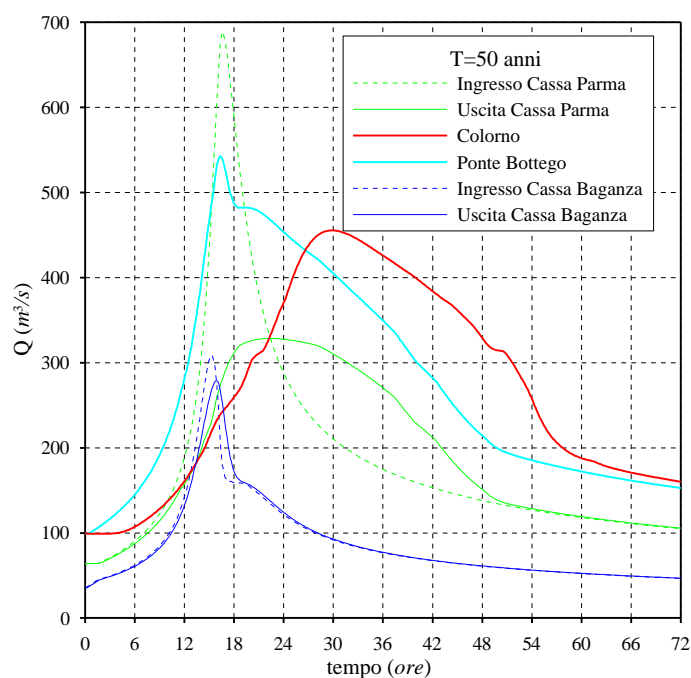


Figura E.15 – Risultati della simulazione per T=50 anni nella combinazione denominata “50_Datt_dopo” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

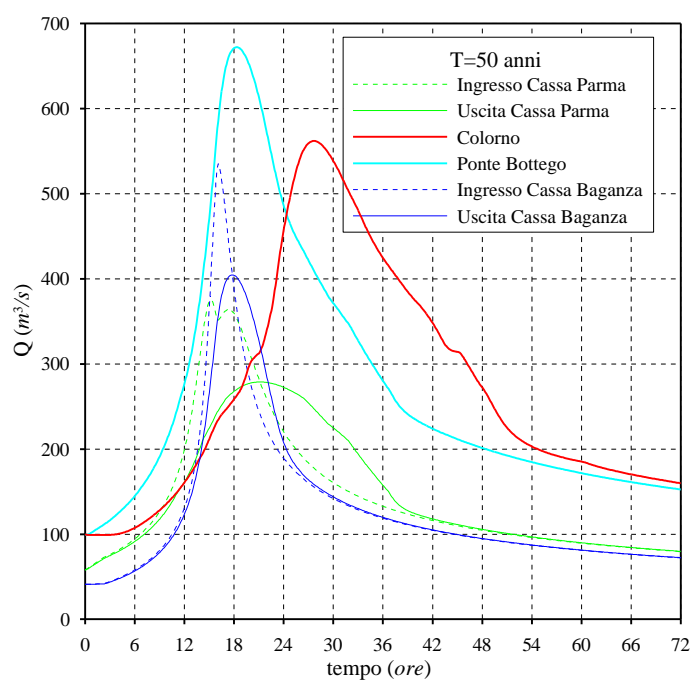


Figura E.16 – Risultati della simulazione per T=50 anni nella combinazione denominata “50_Nuo_fasate” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

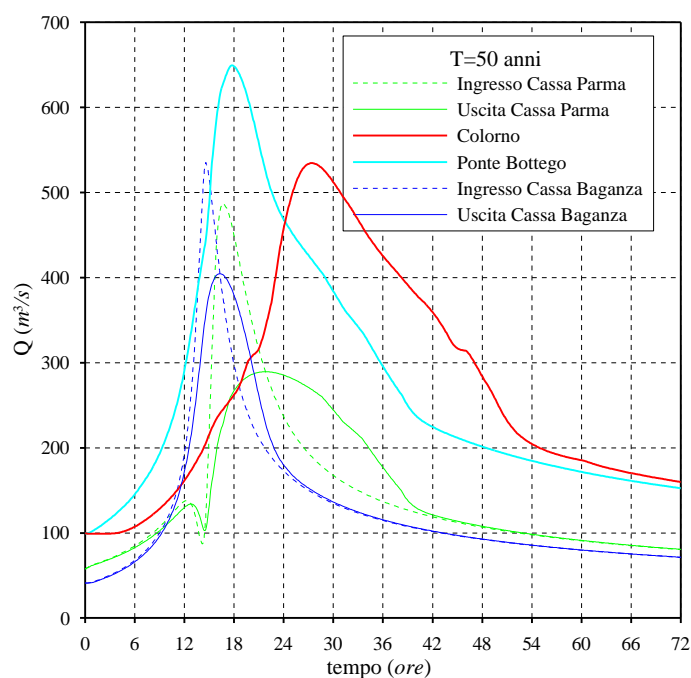


Figura E.17 – Risultati della simulazione per T=50 anni nella combinazione denominata “50_Nuo_prima” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

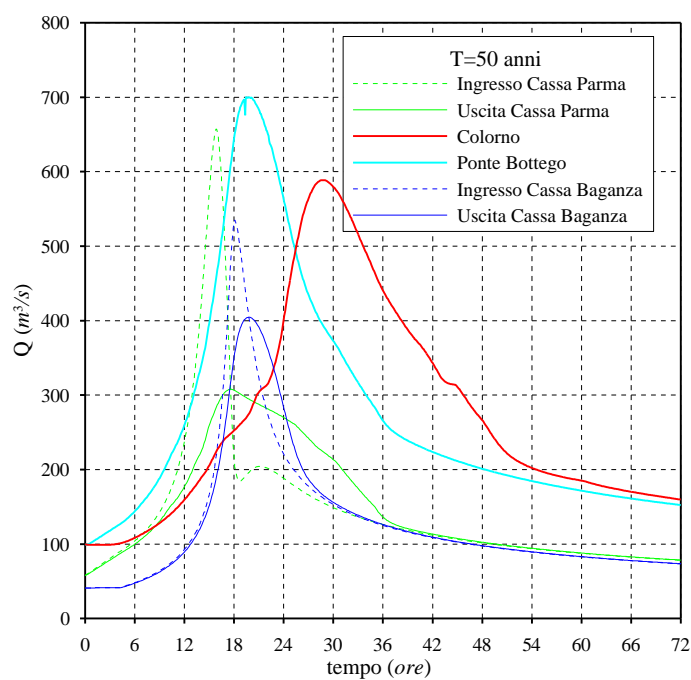


Figura E.18 – Risultati della simulazione per T=50 anni nella combinazione denominata “50_Nuo_dopo” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

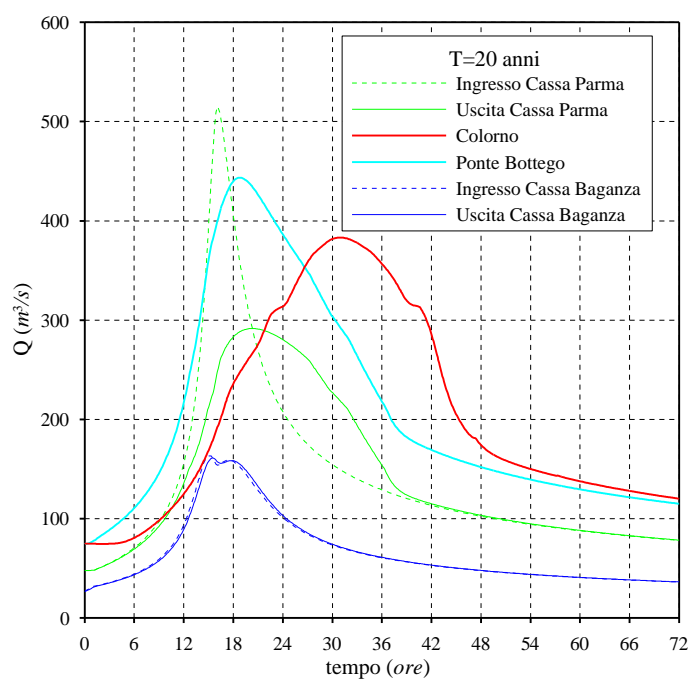


Figura E.19 – Risultati della simulazione per T=20 anni nella combinazione denominata “20_Datt_fasate” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

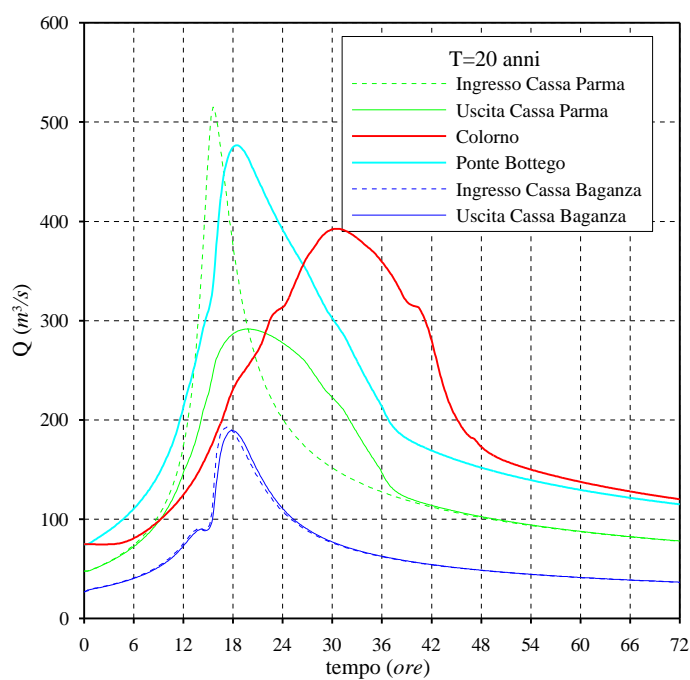


Figura E.20 – Risultati della simulazione per T=20 anni nella combinazione denominata “20_Datt_prima” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

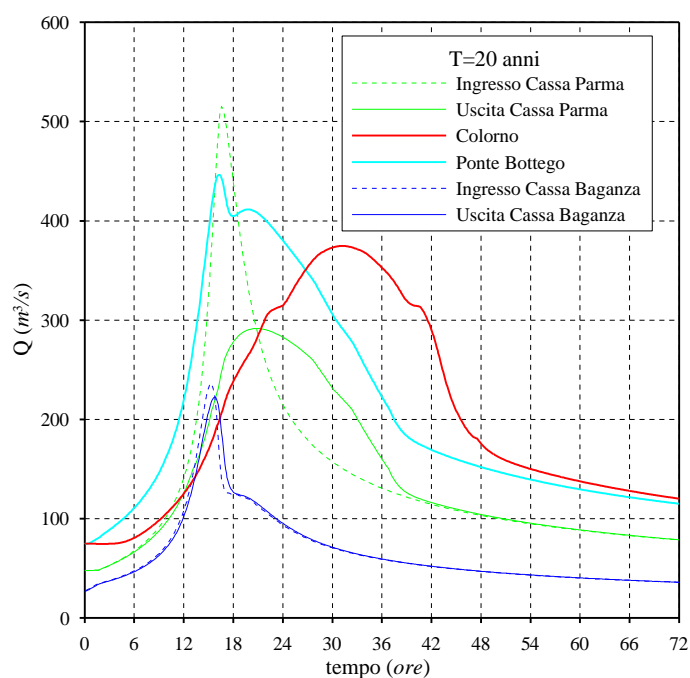


Figura E.21 – Risultati della simulazione per T=20 anni nella combinazione denominata “20_Datt_dopo” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

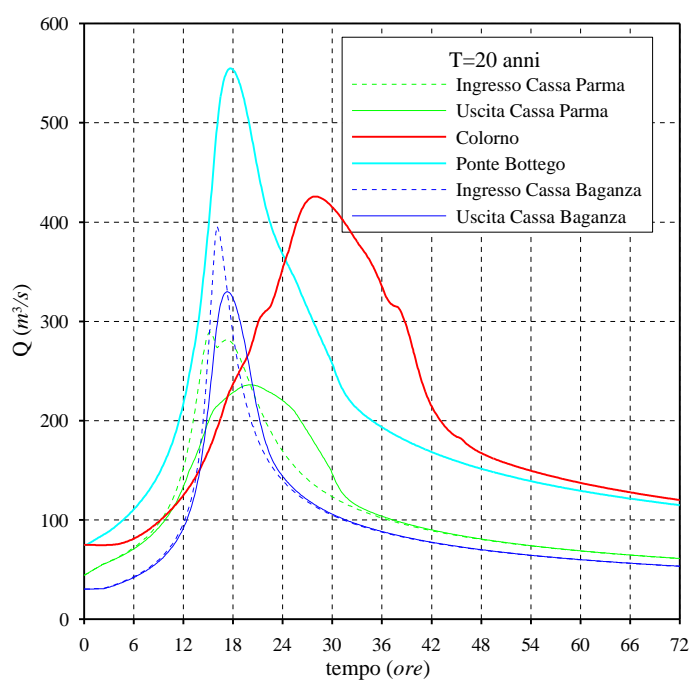


Figura E.22 – Risultati della simulazione per T=20 anni nella combinazione denominata “20_Nuo_fasate” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

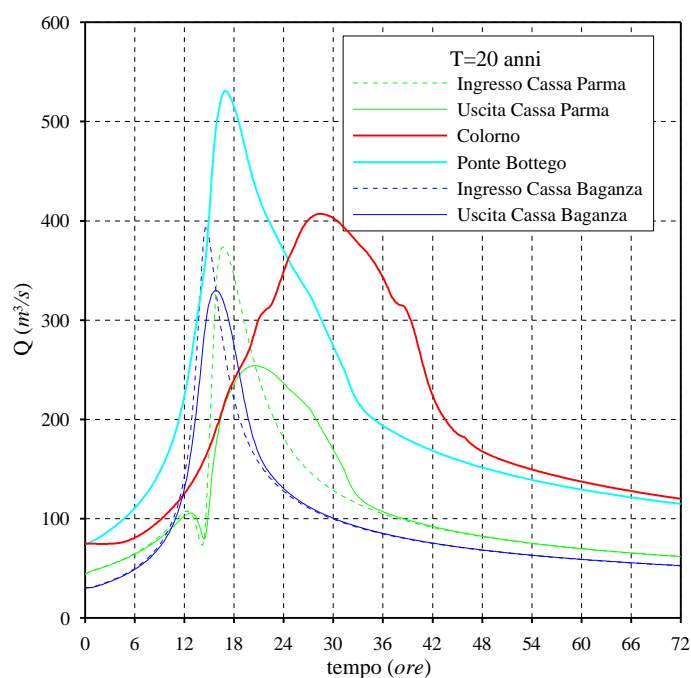


Figura E.23 – Risultati della simulazione per T=20 anni nella combinazione denominata “20_Nuo_prima” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

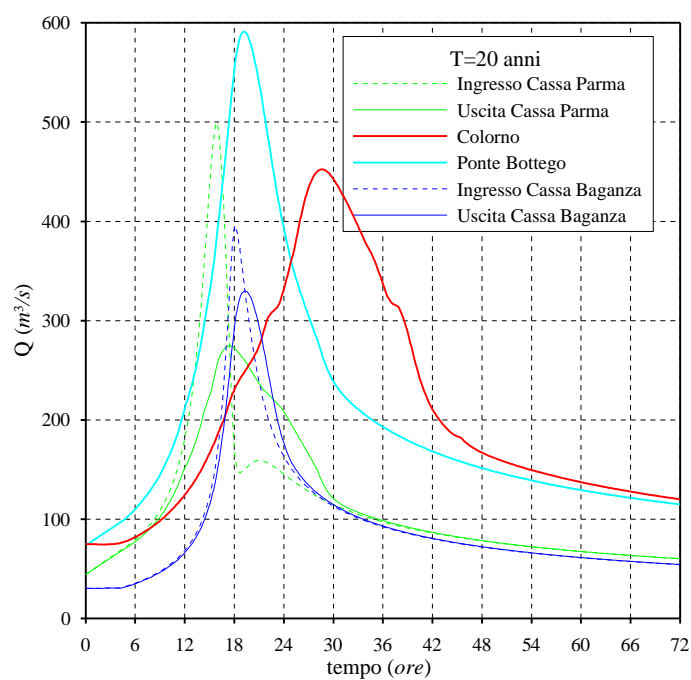


Figura E.24 – Risultati della simulazione per T=20 anni nella combinazione denominata “20_Nuo_dopo” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

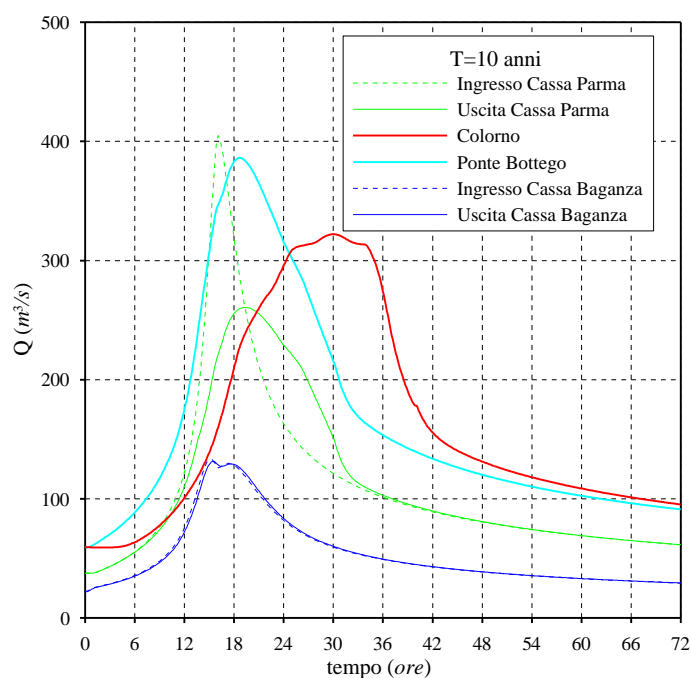


Figura E.25 – Risultati della simulazione per T=10 anni nella combinazione denominata “10_Datt_fasate” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

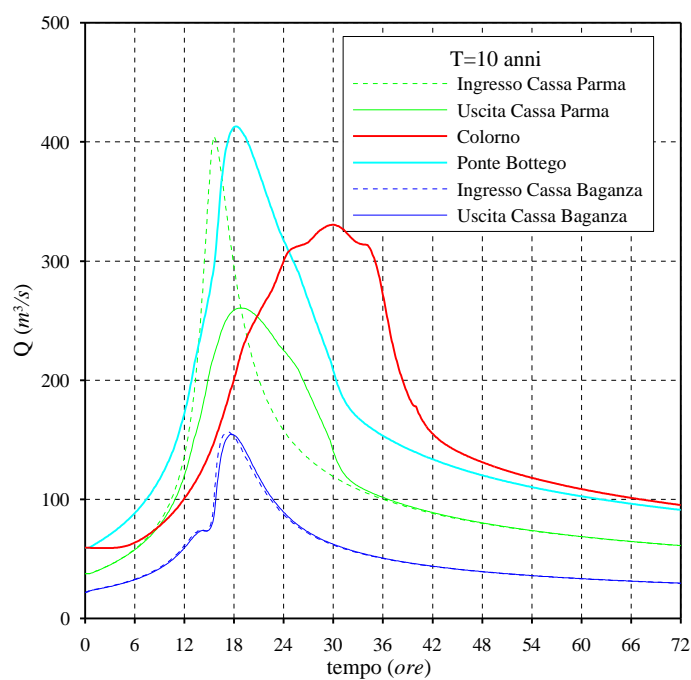


Figura E.26 – Risultati della simulazione per T=10 anni nella combinazione denominata “10_Datt_prima” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

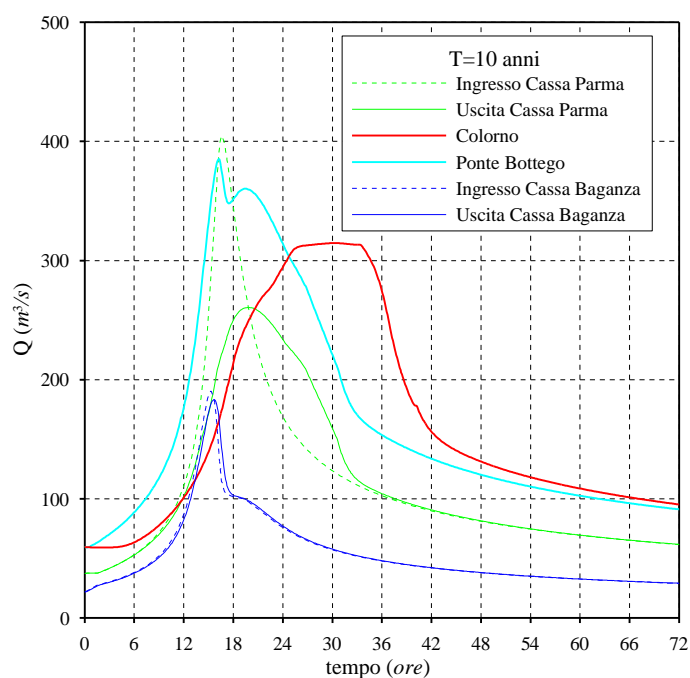


Figura E.27 – Risultati della simulazione per T=10 anni nella combinazione denominata “10_Datt_dopo” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

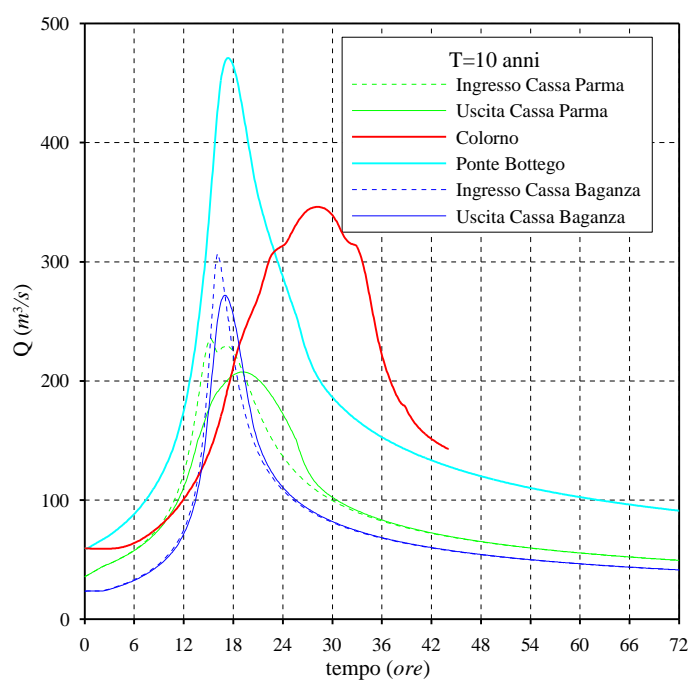


Figura E.28 – Risultati della simulazione per T=10 anni nella combinazione denominata “10_Nuo_fasate” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

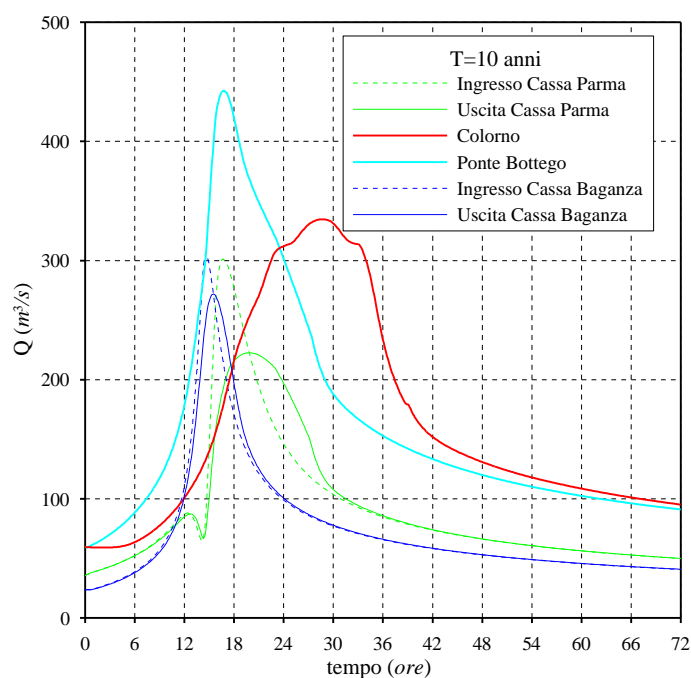


Figura E.29 – Risultati della simulazione per T=10 anni nella combinazione denominata “10_Nuo_prima” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

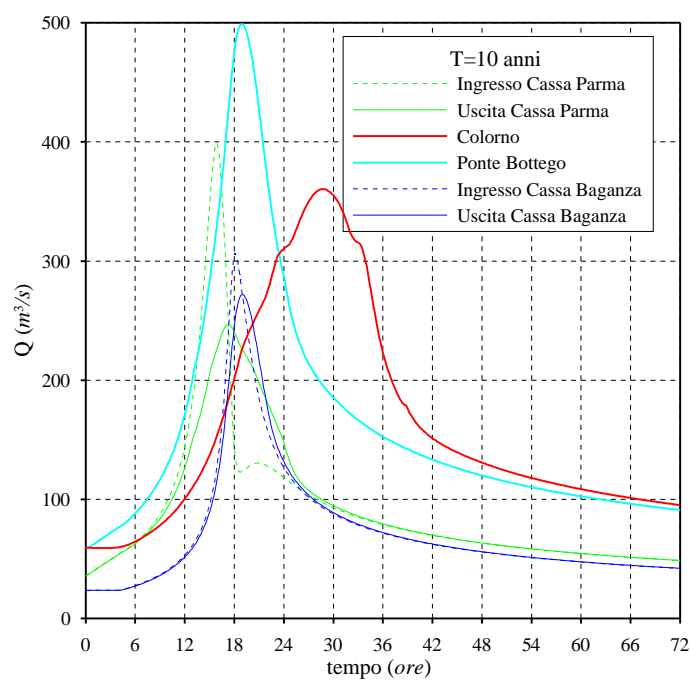


Figura E.30– Risultati della simulazione per T=10 anni nella combinazione denominata “10_Nuo_dopo” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

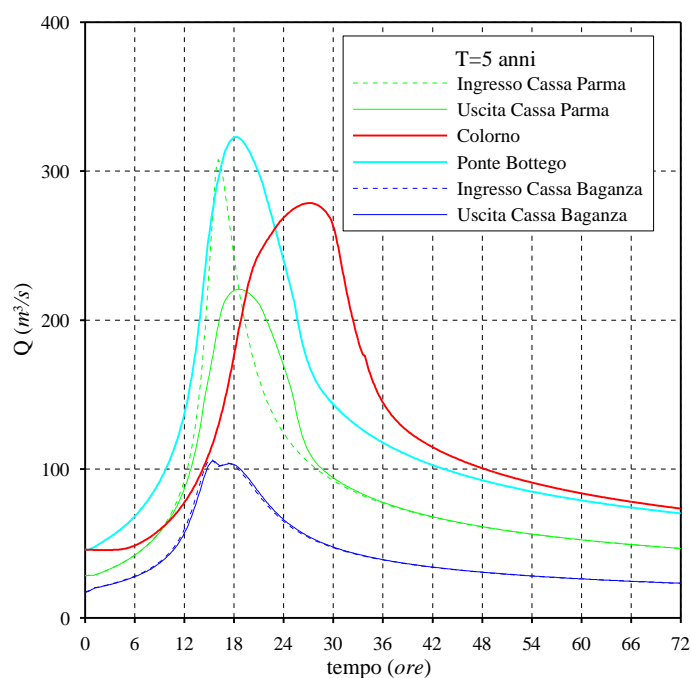


Figura E.31 – Risultati della simulazione per $T=5$ anni nella combinazione denominata “5_Datt_fasate” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

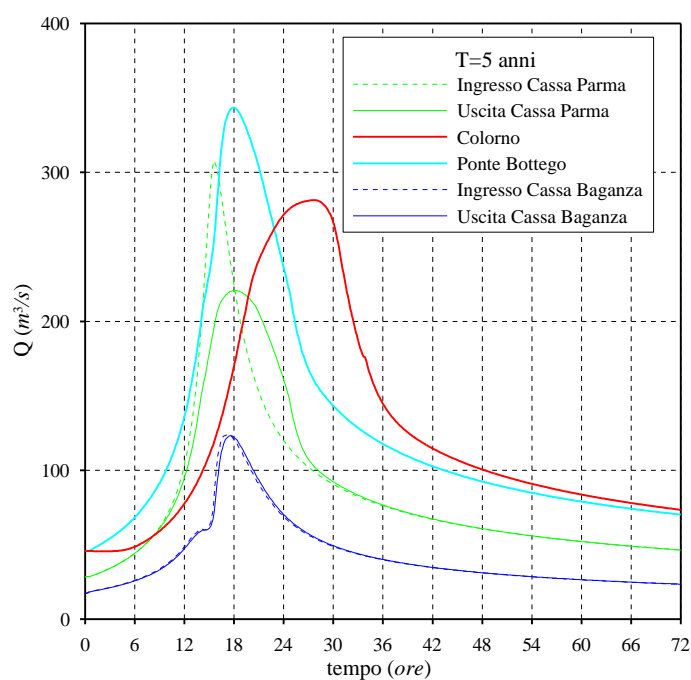


Figura E.32 – Risultati della simulazione per $T=5$ anni nella combinazione denominata “5_Datt_prima” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

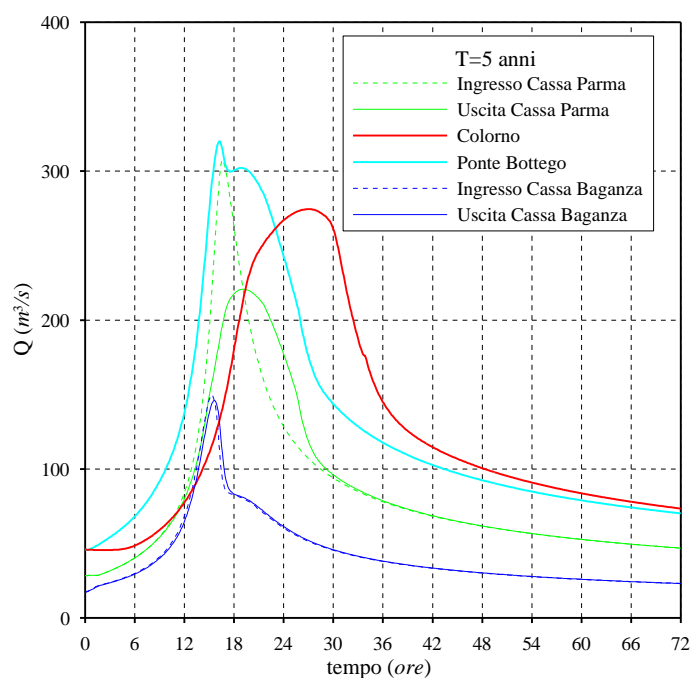


Figura E.33 – Risultati della simulazione per T=5 anni nella combinazione denominata “5_Datt_dopo” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

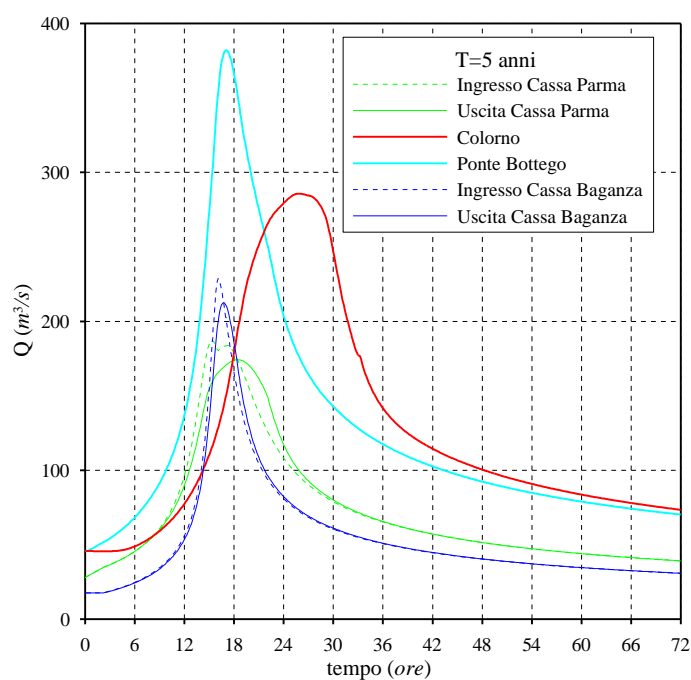


Figura E.34 – Risultati della simulazione per T=5 anni nella combinazione denominata “5_Nuo_fasate” in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

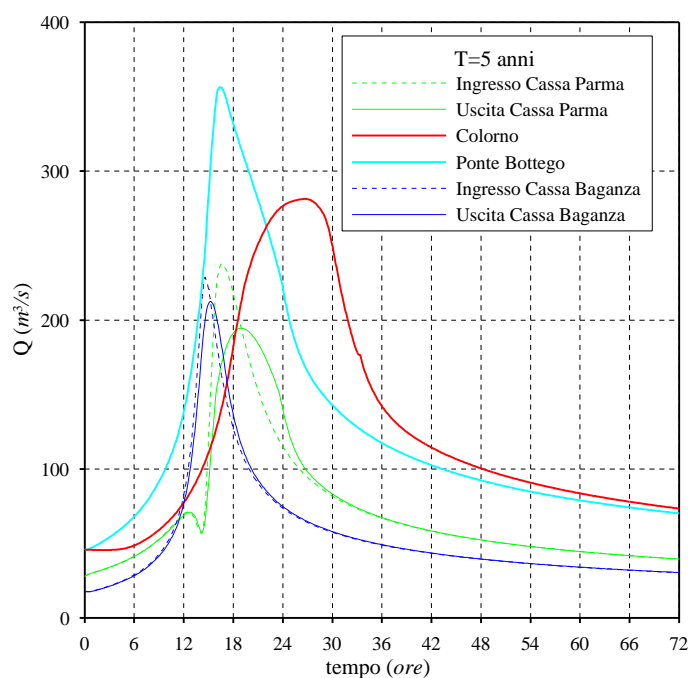


Figura E.35 – Risultati della simulazione per $T=5$ anni nella combinazione denominata "5_Nuo_prima" in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.

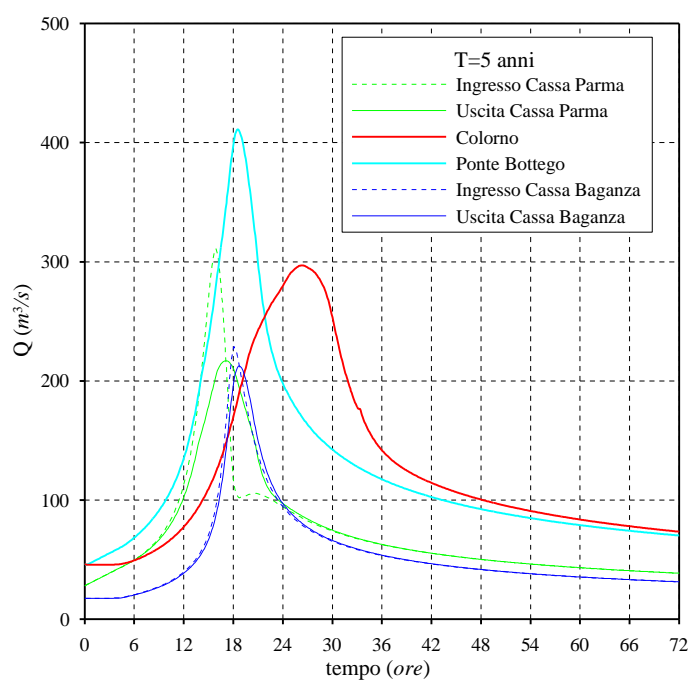


Figura E.36 – Risultati della simulazione per $T=5$ anni nella combinazione denominata "5_Nuo_dopo" in presenza delle casse di espansione sui torrenti Parma e Baganza.