



COMMISSARIO DI GOVERNO

EX LEGGE 116/2014

REGIONE TOSCANA
DIREZIONE DIFESA DEL SUOLO E PROTEZIONE CIVILE
SETTORE GENIO CIVILE VALDARNO SUPERIORE

CASSE DI ESPANSIONE DI FIGLINE LOTTO PRULLI

ACCORDO DI PROGRAMMA D.M. N. 550 DEL 25/11/2015

PROGETTO DEFINITIVO

DIRIGENTE RESPONSABILE DEL CONTRATTO

Ing. Leandro RADICCHI

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO

Ing. Enzo DI CARLO

UFFICIO DI PROGETTAZIONE

PROGETTISTI

Ing. Francesca BARZAGLI

Ing. Lorenzo BECHI

Ing. Fabio MARTELLI

Ing. Andrea NAVARRIA

Ing. Marie-Claire NTIBARIKURE

Geol. Andrea SALVADORI

Geol. Francesco VANNINI

COLLABORATORI ALLA PROGETTAZIONE

Geol. Andrea ADESSI

Geom. Roberto BIGAZZI

Geom. Vincenzo DE MARCO

Geom. Marco LIUTI

Ing. Vincenzo VERZINO

COORDINATORE PER LA SICUREZZA
IN FASE DI PROGETTAZIONE
Geom. Antonello MAZZOLIN

ADEMPIMENTI AMMINISTRATIVI

Dott.ssa Roberta Paola BIGIARINI

Dott.ssa Ivana D'ANGELO

Dott.ssa Maddalena Turchi

CODICE PROGETTO

PROGETTO FI D 1007

OGGETTO ELABORATO

RELAZIONE IDROLOGICO E IDRAULICA

FILE PD_D_PR_01_R_R01DOC

ELAB. PD_D_PR_01_R_R01

emissione	revisione	scala	data
R00			Novembre 2018
R01	Conferenza dei Servizi		Dicembre 2018

ELABORATO

D_PR_01

Firenze - Via San Gallo, 34/A - 50129 - Tel. 055/4622711

INDICE

1	PREMESSA.....	3
2	QUADRO CONOSCITIVO	4
2.1	L'AREA DI STUDIO	4
2.2	GLI STUDI ESISTENTI	7
2.3	GLI ATTI DI PIANIFICAZIONE	8
2.4	I DATI DI BASE	9
3	APPROCCIO METODOLOGICO	10
4	ANALISI IDROLOGICA.....	13
4.1	ANALISI GEOMORFOLOGICA.....	14
4.2	IL MODELLO IDROLOGICO GENERALE	17
4.3	IL MODELLO IDROLOGICO DEL BORRO S. CIPRIANO.....	24
4.3.1	<i>Il modello di rifiuto del terreno SCS-Curve Number</i>	<i>24</i>
4.3.2	<i>Il modello dell'idrogramma unitario di Clark.....</i>	<i>28</i>
4.4	IL MODELLO IDROLOGICO PER IL RETICOLO DI PIANURA.....	29
4.5	APPLICAZIONE DEI MODELLI IDROLOGICI	30
5	MODELLISTICA IDRAULICA.....	42
5.1	IL MODELLO IDRAULICO DI MOTO VARIO HEC-RAS 4.1	42
5.2	IL MODELLO IDRAULICO DI MOTO VARIO BIDIMENSIONALE HEC-RAS 5.0	46
5.3	LA DIGA DI BILANCINO SUL FIUME SIEVE	48
5.3.1	<i>Descrizione.....</i>	<i>48</i>
5.3.2	<i>Il Piano di laminazione 2018.....</i>	<i>52</i>
5.3.3	<i>Stima degli effetti di laminazione della diga.....</i>	<i>54</i>
5.4	VERIFICHE IDRAULICHE NELLO STATO ATTUALE	66
5.4.1	<i>Aree di potenziale esondazione e connessioni idrauliche</i>	<i>72</i>
5.4.2	<i>Taratura del fiume nel tratto di Incisa Valdarno.....</i>	<i>74</i>
5.4.3	<i>Analisi di sensitiva rispetto al coefficiente medio di resistenza al moto.....</i>	<i>79</i>
5.5	ANALISI DEI RISULTATI DELLO STATO ATTUALE	80
5.6	VERIFICHE IDRAULICHE CON MODELLO IDRAULICO BIDIMENSIONALE.....	85
5.7	DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI	87
5.8	VERIFICHE IDRAULICHE NELLO STATO DI PROGETTO	90

5.8.1	Curve d'invaso della cassa di espansione.....	91
5.8.2	Opera di presa e di scarico.....	94
5.8.3	Connessioni idrauliche e sfioratori di sicurezza.....	95
5.9	CRITERI GENERALI DELLA PROGETTAZIONE IDRAULICA	95
5.10	ANALISI DEI RISULTATI DELLO STATO DI PROGETTO	97
5.11	VERIFICA DI SCENARI IDROLOGICI PARTICOLARI	115
5.12	VERIFICHE IDRAULICHE SENZA LA CASSA LECCIO.....	118
5.13	BENEFICI ATTESI A SCALA TERRITORIALE	119
6	STIMA DEL POTENZIALE INTERRIMENTO DELLA CASSA A SEGUITO DELL'INVASO	124
7	VERIFICA DELLE CONNESSIONI IDRAULICHE DEI SETTORI DI CASSA ...	125
8	DIMENSIONAMENTO DEI CANALI ESTERNI ALLA CASSA E DELLE OPERE DI PRESIDIO	128
9	DIMENSIONAMENTO DEL RETICOLO INTERNO ALLA CASSA	141
10	VERIFICA DELLE OPERE DI SCARICO	147
11	VERIFICA E DIMENSIONAMENTO DEL BORRO RICA VO	148
12	DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE SUL TORRENTE CHIESIMONE	153
13	VERIFICA DEL BORRO GAGLIANELLA.....	157
14	VERIFICA DEL TORRENTE PONTEROSSO	158
15	VERIFICA DEL BORRO MORIANO.....	160
16	RISCHIO RESIDUO	161
16.1	INTERVENTI IN CORRISPONDENZA DI ALCUNI ATTRAVERSAMENTI FERROVIARI	162
16.2	INTERVENTI TEMPORANEI DI GESTIONE DEL RISCHIO	162
16.3	ALLAGABILITÀ RESIDUA DA INTERMITTENZA DI SCOLO DEL RETICOLO SECONDARIO.....	164
17	CONCLUSIONI	177

1 PREMESSA

La presente relazione idraulica illustra la metodologia utilizzata e i risultati ottenuti per il dimensionamento idraulico della cassa di espansione di Prulli lungo il fiume Arno nel Comune di Reggello. Tale cassa costituisce uno dei principali interventi strutturali previsti dal Piano di Bacino del Fiume Arno per la riduzione del rischio idraulico nella città di Firenze.

Pertanto, riportando quanto espresso nella Relazione generale, gli obiettivi generali del progetto sono:

1. laminare i picchi di piena del fiume Arno per ridurre a valori inferiori a 3400 m³/s la portata duecentennale nella tratto che attraversa la città di Firenze. Per portate superiori infatti ha inizio il sormonto delle spallette d'argine in corrispondenza della Biblioteca Nazionale;
2. raggiungere la capacità d'invaso della cassa di espansione definita dal Piano di Bacino, compatibilmente con le caratteristiche del territorio;
3. definire gli interventi di messa in sicurezza e mitigazione del rischio derivante dal fiume Arno nelle aree contermini all'intervento, nelle quali sono presenti aree intensamente urbanizzate, la linea ferroviaria lenta, la linea ferroviaria Alta Velocità, l'autostrada A1 e la viabilità regionale e comunale.

Il presente studio idrologico-idraulico è articolato nelle fasi generali di seguito descritte:

FASE 1 – Definizione del quadro conoscitivo

FASE 2 – Analisi idrologica

FASE 3 – Modellistica idraulica

FASE 4 – Analisi dei risultati

FASE 5 – Dimensionamento di interventi delle opere idrauliche

2 QUADRO CONOSCITIVO

2.1 L'AREA DI STUDIO

Il sistema idrografico il cui regime idrologico e idraulico influisce sulle modalità di formazione, propagazione e laminazione delle piene a monte di Firenze si estende su una estesa porzione del bacino del fiume Arno, avendo preliminarmente verificato, sulla base degli studi esistenti:

1. che gli interventi previsti dal piano di Bacino si estendono dalla diga di Levane fino a Rignano sull'Arno;
2. che in tale tratto le aree attraversate dal fiume sono soggette ad inondazione, sia direttamente dall'alveo del fiume che dai tratti di rigurgito dei suoi affluenti;
3. che le portate critiche per la città di Firenze si generano dalla sovrapposizione dei picchi di piena dei fiumi Arno e Sieve.

Pertanto l'area di studio oggetto del presente lavoro corrisponde alla pianura alluvionale del fiume Arno, dallo sbarramento della diga di Levane nel Comune di Montevarchi fino al ponte di Rosano nel Comune di Pontassieve, a valle della confluenza del fiume Sieve. In questo territorio il fiume scorre per una lunghezza complessiva di circa 41 Km e riceve l'apporto di un interbacino di circa 1630 Km².

La diga di Levane chiude un bacino idrografico prevalentemente montano di circa 2087 Km² e costituisce un elemento di discontinuità idraulica insieme alla diga di La Penna, poco più a monte. Attualmente l'opera ha esclusive finalità idroelettriche e la limitata capacità di laminazione dipende dalle modalità di gestione dei rilasci da parte dell'Ente proprietario (Enel) in funzione delle condizioni stagionali.

A valle della diga si apre la pianura alluvionale del Valdarno dove il fiume attraversa gli abitati di Montevarchi, S. Giovanni Valdarno, Terranuova Bracciolini, Figline Valdarno e Incisa sull'Arno. In questo tratto il fiume risulta quasi completamente delimitato da argini a protezione degli abitati e delle infrastrutture viarie e ferroviarie presenti oltre le sue sponde. Gli interbacini tributari risultano numerosi e con morfologia quasi completante montana, ma di modeste estensioni. A Incisa il bacino raggiunge i 2735 Km². Superato l'abitato di Incisa il

fiume attraversa una stretta gola, oltre la quale si apre una più ampia valle dove si trovano il centro abitato di Leccio e l'area industriale di Pian dell'Isola. In questo tratto il fiume è privo di strutture arginali significative e le aree contermini risultano soggette a livelli di pericolosità molto elevati. La pianura si chiude all'altezza di Rignano sull'Arno dove il bacino complessivo è pari a 2800 Km².

Proseguendo verso valle, il fiume scorre incassato fino all'abitato di Pontassieve dove riceve le acque del fiume Sieve drenante in un bacino imbrifero di circa 837 Km², estensione confrontabile con quello del corso d'acqua principale. Tale condizione caratterizza fortemente le modalità di formazione delle piene più temibili per la città di Firenze, che principalmente hanno origine quando la distribuzione spaziale delle piogge determina che gli idrogrammi di piena dei fiumi Arno e Sieve siano in fase, come testimoniato anche dati idrometrici disponibili e le testimonianze storiche. Sull'argomento un proverbio locale cita "Arno non mesce se Sieve non cresce". L'area di studio si chiude poco a valle in corrispondenza dell'idrometro di Rosano che costituisce la sezione di chiusura di un bacino complessivo di 3717 Km².

Per i successivi 12 km il fiume continua a scorrere incassato fino all'altezza della località Girone, oltre la quale si apre la vasta pianura dell'area metropolitana fiorentina.

Per i motivi sopra esposti è stato oggetto di studio anche il bacino del fiume Sieve e l'influenza del piano di laminazione della diga di Bilancino sulle portate di piena dei fiumi Sieve e Arno.

La cassa di espansione Prulli si colloca nella pianura fluviale in destra del fiume Arno tra l'abitato di Matassino e l'uscita autostradale Reggello-Incisa nella direzione del corso d'acqua e fino al rilevato autostradale in direzione trasversale. Soltanto nella porzione più a nord l'area industriale di Pian della Rugginosa occupa una parte della pianura tra l'autostrada e il viadotto della linea ferroviaria Alta Velocità.

L'ampia golena ha una superficie di circa 168 ha e risulta prevalentemente pianeggiante con quote medie che variano da monte verso valle da 122.7 m s.l.m. a 118.5 m s.l.m.. A circa metà della sua lunghezza è attraversata dal torrente Chiesimone il cui bacino, prevalentemente montano, misura 21 Km². A monte e a valle di quest'ultimo le zone collinari sono drenate da piccoli fossi che, attraversate la ferrovia e l'autostrada, solcano la pianura fluviale fino al fiume Arno.

Da un punto di vista della opere di regimazione idraulica si rileva la presenza lungo la sponda del fiume, sebbene non in froldo, dell'argine di epoca della bonifica leopoldina. Questo, di altezza compresa tra i 3 e 4 m, si estende dalla confluenza del torrente Resco fino alla località Borratino dove degrada fino al piano campagna. In corrispondenza del torrente Chiesimone l'argine svolta nel tratto di rigurgito soltanto sul lato destro di quest'ultimo e fino al ponte della ferrovia, mentre il lato sinistro ne è completamente sprovvisto.

In corrispondenza dei fossi sopra citati, l'argine è attraversato da tombini privi di chiaviche o sistemi di limitazione del rigurgito delle piene del fiume.

Passando alla sponda sinistra del fiume Arno, il tratto oggetto di intervento si estende dalla sponda sinistra del torrente Ponterosso fino all'abitato di Incisa per una lunghezza complessiva di 4 Km. In questo tratto è presente l'argine della bonifica leopoldina fino all'altezza del sottopasso di via Garibaldi, da dove viene sostituito dal rilevato della linea ferroviaria lenta. L'argine ha un'altezza compresa tra 3 e 4 m.

Da monte verso valle, i principali affluenti del fiume sono, il torrente Ponterosso, il borro Gaglianella, il borro Moriano e il borro Bagnoli, tutti con scarico libero nel corso d'acqua principale. I primi sono dotati di argini o muri d'argine nel tratto di rigurgito del corso d'acqua principale, mentre l'ultimo è tombato per i 550 m finali.

Sono inoltre presenti altri vari borri con bacini collinari che, al contrario dei precedenti, sottoattraversano l'argine del fiume Arno con tombini privi di organi di regolazione. I principali sono i borri Lagaccioni, Fornaci e Tagliafuno.

Per quanto riguarda l'alveo del fiume, questo si presenta rettilineo per tutto il tratto di intervento fino alle due anse a monte della stretta di Incisa. Il fondo, con pendenza media del 2 ‰, è inciso tanto che le forme di fondo rimangono quasi ovunque sommerse anche nel periodo di magra, situazione completamente diversa da quella del tratto a monte del ponte di Matassino. Fa eccezione un breve tratto tra le confluenze del torrente Chiesimone e il borro Gaglianella dove i sedimenti formano un'isola che, deviando la corrente verso la sponda destra, ne ha provocato l'erosione. Si rimanda alla Relazione geologica per una più approfondita analisi della dinamica d'alveo. In generale le sponde risultano coperte da vegetazione riparia arbustiva ed arborea e caratterizzate in modo diffuso da processi di instabilità, la cui origine è da ricercare nell'abbassamento del fondo alveo secondo le modalità esposte nella Relazione geologica e nella Carta geomorfologica. Per arrestare la

conseguente erosione regressiva lungo gli affluenti, sono state realizzate delle soglie alle confluenze dei torrenti Ponterosso e Chiesimone e dei borri Gaglianella e Moriano. A monte delle soglie, i predetti corsi d'acqua hanno pendenze medie del fondo comprese tra il 5 ‰ e 8 ‰. Gli alvei degli affluenti principali non presentano particolari criticità di stabilità delle sponde, fatta eccezione per il fondo e le sponde del borro Moriano a valle della soglia di fondo (ubicata in corrispondenza del ponte della ferrovia) fino alla confluenza.

Lungo il fiume Arno, da monte verso valle, si incontrano: l'attraversamento su sei pile in alveo della bretella ferroviaria tra la linea veloce e quella lenta, il ponte ferroviario della linea lenta con due pile in alveo a monte di Incisa, il ponte della SRT 69 a due arcate in alveo e sei in gola, tre traverse poste obliquamente alla direzione di flusso in corrispondenza dell'abitato di Incisa. Lungo gli affluenti principali nei tratti di intervento sono presenti vari attraversamenti della viabilità principale (autostrada, strada regionale 69), secondaria (via G. di Vittorio in loc. Lagaccioni, strada comunale di Pian di Rona), di servizio (via Garibaldi) e delle linee ferroviarie (linea lenta e bretella di collegamento con la linea veloce).

2.2 GLI STUDI ESISTENTI

Le analisi condotte in precedenti studi nell'area di interesse sono stati la base di partenza per l'implementazione della modellistica idrologica e idraulica del progetto. In particolare la definizione del modello geometrico dello scenario di progetto ha fatto riferimento al livello progettuale di maggior dettaglio disponibile per le casse di espansione Restone, Pizziconi, e Leccio. Gli studi e progetti consultati sono:

- Sintesi del Progetto di Piano di Bacino Stralcio Rischio Idraulico (Autorità di Bacino, 1996);
- Perimetrazione delle aree a rischio sull'asta principale del fiume Arno e sugli affluenti nel tratto di rigurgito (Autorità di Bacino, 1999);
- Progetto di Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (Autorità di Bacino, 2002);
- Piano di Gestione del Rischio di Alluvione (Autorità di Distretto Appennino settentrionale, 2015);
- Progetto esecutivo I lotto cassa Pizziconi (Comune di Figline Valdarno, 2009)
- Progetto esecutivo II lotto cassa Pizziconi (Commissario regionale, 2016);

- Progetto esecutivo I lotto cassa Restone (Commissario di Governo, 2016);
- Progetto definitivo II lotto cassa Restone (Commissario di Governo, in corso);
- Progetto preliminare Casse Prulli e Leccio (Comune di Figline Valdarno, 2011);
- Progetto esecutivo – Casse di espansione di Figline lotto Leccio e lotto Prulli I stralcio (Commissario di Governo, 2016);
- Progetto definitivo Cassa Leccio (Commissario di Governo, in corso);
- “Valutazione di aspetti idrologici e idraulici inerenti al progetto di sopralzo della diga di Levane” (Regione Toscana, Università di Firenze, 2018)
- Autostrada A1 – Ampliamento alla terza corsia nel tratto Incisa Valdarno – Progetto definitivo - Relazione idrologico-idraulica (Autostrade, 2018);
- “Variante in riva destra d’Arno alla Strada Regionale n. 69 – lotto 3” – progetto esecutivo (Regione Toscana, 2018);
- Progetto esecutivo “Variante esterna all’abitato di Figline Valdarno sulla S.R. 69, lotto III, ponte torrente Gagliana – Rotatoria zona stadio” (Comune di Figline e Incisa Valdarno, 2017);
- Studi idrologico-idraulici a supporto dei Piani Strutturali dei Comuni di Figline e Incisa Valdarno, San Giovanni Valdarno, Montevarchi, Terranuova Bracciolini;
- Studio su modello fisico dell’officiosità idraulica del fiume Arno in prossimità dell’abitato di Incisa Valdarno (Università di Firenze, 2001).

2.3 GLI ATTI DI PIANIFICAZIONE

Con il Piano di Bacino Stralcio Rischio Idraulico (1999) è stata sancita la destinazione a cassa di espansione per l’area oggetto di intervento. I successivi atti di pianificazione territoriale e locale hanno recepito tale previsione, definendo norme d’uso finalizzate alla salvaguardia delle condizioni di fattibilità dell’intervento.

La Relazione illustrativa del presente progetto, a cui si rimanda per una più approfondita trattazione, riporta e sintetizza la documentazione relativa al Piano di Bacino, al Piano di Gestione del Rischio di Alluvione, al Piano Territoriale di Coordinamento della Città Metropolitana di Firenze, ai Piani strutturali e Regolamenti urbanistici del Comune di Figline e Incisa Valdarno e del Comune di Reggello, oltre agli altri vincoli presenti nell’area.

2.4 I DATI DI BASE

L'analisi delle attuali condizioni idrauliche del territorio e la definizione del progetto si è basata sui seguenti dati acquisiti dagli Enti competenti alla loro divulgazione:

1. cartografia Tecnica Regionale C.T.R. 1:10.000 e 1:2.000 (Regione Toscana);
2. modello digitale del terreno a celle 10x10 m derivato dalla fotogrammetria in scala 1:10.000 (Regione Toscana);
3. rilievo topografico (HERA anno 2015 per Regione Toscana) delle aree oggetto di intervento e di quelle limitrofe per una estensione complessiva di 270 ha, sia in destra che in sinistra del fiume Arno, compreso il rilievo batimetrico con tecnologia multi-beam del fondo alveo del fiume Arno. I dati hanno permesso l'implementazione di un modello tridimensionale del terreno da cui è stato possibile estrarre le sezioni necessarie alla progettazione. Inoltre sono state rilevate le opere presenti lungo i corsi d'acqua e sul territorio;
4. rilievo Laser-scanning (Regione Toscana e Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio) e modello digitale del terreno (Lidar) che ne è derivato a celle di dimensioni 1x1 m (aggiornamento 2011);
5. sezioni fluviali del fiume Arno eseguite dal Provveditorato alle Opere Pubbliche per la Toscana (1999-2001) di cui sono state utilizzate quelle relative ai tratti non oggetto di rilievo di cui al punto 3;
6. studi e modellazioni idrauliche a supporto dei Piani Strutturali e Regolamenti Urbanistici dei Comuni di Montevarchi, San Giovanni Valdarno, Terranuova Bracciolini, Figline e Incisa Valdarno, Reggello;
7. reticolo idrografico della Regione Toscana approvato con D.C.R. 101/2016, D.G.R.T. 1357/2017 e D.G.R.T. 899/2018;
8. curve di possibilità pluviometrica della Regione Toscana – aggiornamento 2014 [9];
9. Carta dell'uso e della copertura dei suoli - "Uso e copertura del suolo 2007-2013" (Regione Toscana);
10. Carta geologica regionale - "Continuum Geologico - aggiornamento del 15/11/2013" (Regione Toscana);
11. progetti e studi elencati al § 2.2.

3 APPROCCIO METODOLOGICO

Il Piano stralcio relativo alla riduzione del rischio idraulico del bacino del fiume Arno (D.P.C.M. 5.11.1999) prevede il potenziamento della capacità di laminazione delle aree fluviali lungo il fiume Arno nel Valdarno Superiore attraverso la realizzazione di cinque casse di esondazione controllata denominate Restone, Pizziconi, Prulli, Leccio e Burchio. Il volume massimo invasabile previsto dal Piano era di circa 35.3 Mm³, di cui 16 Mm³ nelle casse Restone e Pizziconi, 6.5 Mm³ nella cassa Prulli, 12 Mm³ nella cassa Leccio e 0.8 Mm³ nella cassa Burchio.

Il Piano di Bacino inoltre prevede, a monte delle cinque casse di espansione, il sovrалzo delle dighe di Levane e La Penna, di proprietà Enel, con un incremento della capacità di laminazione di 10 Mm³ per Levane e fino a 25 Mm³ per La Penna.

Nel Piano di il Gestione del Rischio di Alluvione del Distretto Idrografico Appennino Settentrionale all'intervento di sovrалzo della diga di La Penna è stato attribuita una priorità bassa per le problematiche ambientali connesse allo smaltimento dei faghi e per l'eccessivo costo di adeguamento delle opere. Pertanto nelle valutazioni idrauliche del presente progetto non ne è stato tenuto conto.

Obiettivo primario del sistema costituito dalle citate casse di espansione è quello di ridurre le massime portate del fiume Arno che attraversano la città di Firenze affinché possano essere contenute in alveo. La **cassa di espansione Prulli**, oggetto del presente progetto, costituisce uno degli elementi di detto sistema e la **sua efficacia in termini di riduzione delle portate va inquadrata e progettata nell'ambito della capacità complessiva del sistema**. In altri termini la capacità di laminare le piena a monte di Firenze risulta tanto più alta quanto più le singole opere saranno coordinate tra loro nella gestione, ponendosi come obiettivo non tanto di massimizzare l'efficienza delle singole casse, quanto di massimizzare l'efficacia di laminazione a valle della confluenza del fiume Sieve.

In tale ottica le verifiche idrauliche effettuate per il dimensionamento delle opere idrauliche della cassa Prulli, oggetto del presente progetto, hanno tenuto conto degli effetti a regime dell'intero sistema di casse di espansione, cioè ipotizzando quest'ultime tutte completamente realizzate.

I risultati ottenuti forniscono pertanto un quadro della capacità del sistema complessivo nel ridurre le portate in arrivo Firenze rispetto alla scenario ante-operas.

In ottemperanza alla prescrizione B-1.5-d) del decreto regionale n. 15323 del 24/10/2017 conclusivo del procedimento di verifica di assoggettabilità ambientale, è stato valutato anche il caso in cui le casse Leccio e Burchio, in stato di progettazione meno avanzato, non siano state completate.

Pertanto gli scenari a cui si farà riferimento sono:

- Stato attuale: stato antecedente alla realizzazione di qualsiasi opera prevista dal Piano di Bacino e progettazioni conseguenti;
- Stato di progetto con tutte le casse previste dal Piano di Bacino realizzate;
- Stato di progetto con completate soltanto le casse Pizziconi, Restone e Prulli.

Lo schema metodologico scelto per le verifiche idrauliche è direttamente mutuato da quello utilizzato dall'Autorità di Bacino del Fiume Arno per la definizione delle aree a pericolosità idraulica del Piano di Gestione del Rischio di Alluvione.

Esso consiste in un approccio idrologico-idraulico basato su una modello idraulico dei fenomeni di propagazione e laminazione delle onde di piena cimentato da idrogrammi idrologici dei vari sottobacini che l'asta principale incontra lungo il suo percorso.

La **propagazione dei deflussi di piena** e la valutazione dei **fenomeni di laminazione** lungo l'asta fluviale considerata avviene tramite un modello idraulico di moto vario a fondo fisso, più avanti descritto, in grado di fornire in ogni sezione dell'asta fluviale l'idrogramma di piena in transito e i volumi eventualmente esondati o invasati nelle casse di espansione.

Da evidenziare che l'analisi svolta ipotizza che i fenomeni di esondazione si manifestino esclusivamente per tracimazione delle portate di piena sopra la quota di massimo contenimento, escludendo pertanto i fenomeni di collasso arginale.

La modellistica idraulica è stata sviluppata contemporaneamente per l'asta principale del fiume Arno e per alcuni suoi affluenti nel tratto di rigurgito, in modo tale da poter valutare anche i volumi di piena esondabili dal reticolo secondario. Essendo infatti la laminazione dell'onda di piena del fiume Arno dipendente anche dalle caratteristiche delle opere idrauliche presenti lungo gli affluenti nel tratto di rigurgito, nasce l'esigenza di una simulazione simultanei dei vari corsi d'acqua.

Le **sollecitazioni idrologiche** al sistema sono costituite da idrogrammi di piena dei singoli sottobacini afferenti all'asta del fiume Arno, tenendo conto che i contributi di piena degli affluenti sono valutati adottando la stessa durata di pioggia e un coefficiente di ragguaglio areale tale da garantire la coerenza tra l'altezza di pioggia stimata sull'intero bacino a monte di ciascuna sezione e la sommatoria di quelle stimate singolarmente per ciascun sottobacino afferente.

E' stato scelto di studiare eventi con **tempo di ritorno pari a 30, 100 e 200 anni con durata di pioggia di 12, 18, 24 e 36 ore** (eventi significativi per il tratto in oggetto, come si evince dai precedenti studi). Ogni combinazione fra durata di pioggia ed evento meteorico definisce uno scenario idrologico di dimensionamento o verifica per i quali si è proceduto ad individuare gli input al modello idraulico costituiti dall' "idrogramma di piena in testa" e dai contributi laterali al modello.

Questi sono stati acquisiti da precedenti studi o sono stati stimati con un modello idrologico, di seguito descritto, basato sul metodo di regionalizzazione delle portate di piena.

4 ANALISI IDROLOGICA

La stima degli idrogrammi per il dimensionamento e la verifica delle opere idrauliche in progetto è stata impostata in funzione dei dati disponibili e dell'accuratezza degli stessi.

Lo studio redatto dall'Università di Firenze per la Regione Toscana nel 2018 [37] ha aggiornato, rispetto a quelli definiti per la redazione del Piano di Assetto Idrogeologico, gli idrogrammi di piena in uscita dalla diga di Levane. L'aggiornamento ha riguardato la simulazione con un modello in moto vario bidimensionale il fiume Arno tra la confluenza del Canale Maestro della Chiana e la diga. I dati di sollecitazione idrologica di detto modello sono stati forniti dall'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale avendo quest'ultima aggiornato le analisi idrologiche (curve di possibilità pluviometrica del 2014) e le modellazioni idrauliche del tratto casentino del fiume Arno e del Canale Maestro della Chiana.

Considerato che tali dati tengono conto dei fenomeni idrologico-idraulici a monte della diga, è stato deciso di acquisire l'idrogramma nella sezione immediatamente a valle della diga di Levane (sezione 904) e di implementare la modellazione idrologica ed idraulica del tratto a valle.

Per i contributi dei singoli bacini che il fiume riceve tra la diga e Rosano è stata condotta una specifica analisi esclusivamente idrologica, piuttosto che idrologico-idraulica, avendo ritenuto che la tipologia montana e collinare dei bacini, la naturalità dei corsi d'acqua e l'assenza di strutture arginali, fatta eccezione per i tratti terminali rigurgitati dal fiume Arno, giustificassero tale scelta.

In generale l'analisi idrologica è stata condotta attraverso una preliminare analisi geomorfologica e idrografica del reticolo e dei relativi sottobacini. Le grandezze ricavate sono state utilizzate nel modello di piena a parametri concentrati, basato sull'idrogramma unitario istantaneo di Nash, i cui parametri sono stati stimati attraverso metodi di regionalizzazione. La stima delle portate è eseguita con il metodo indiretto, ipotizzando cioè che il tempo di ritorno dei deflussi di piena sia lo stesso degli eventi meteorici utilizzati in ingresso al modello. Quest'ultimi sono stati ricavati dalle curve di possibilità pluviometrica delle stazioni pluviometriche della Regione Toscana aggiornate ai dati del 2012. Il modello è

stato cimentato per vari tempi di ritorno con ietogrammi sintetici di varia durata, ciascuno ad intensità costante.

In ragione delle loro peculiarità morfologiche, alle quali mal si adatta il modello idrologico sopra indicato, per il borro San Cipriano ed il reticolo di pianura sono stati condotte specifiche valutazioni per la stima degli idrogrammi di piena.

Si precisa che nella presente fase di progettazione:

1. è stato tenuto conto il contributo della diga di Bilancino alla laminazione delle onde di piena del fiume Sieve a seguito dell'approvazione da parte della Regione Toscana del Piano di laminazione che ha definito le modalità di gestione dell'opera ai fini della difesa del territorio;
2. non sono stati valutati gli effetti del sovrizzo della diga di Levane in quanto è ancora in corso la progettazione definitiva che definirà le modalità di gestione delle nuove opere di regolazione;

4.1 ANALISI GEOMORFOLOGICA

Per tutti i sottobacini del fiume Arno compresi tra la diga di Levane e l'idrometro di Rosano è stata eseguita un'analisi geomorfologica sulla base del reticolo idrografico della Regione Toscana, approvato con D.C.R. 10/02/2015, e del modello digitale del terreno cluster 10x10 m.

Tutti i rami del reticolo e le corrispondenti aree drenate sono stati gerarchizzati secondo il metodo Horton-Strahler (elaborati PD_D_PR_05__T_R00 e PD_D_PR_06__T_R00). Per i bacini con ordine di Strahler maggiore o uguale a 3 sono stati quindi calcolati il numero delle aste fluviali, la lunghezza e l'area relativi ad ogni ordine gerarchico, nonché i rapporti di biforcazione (R_b), di lunghezza (R_l) e di area (R_a) attraverso regressione logaritmica. Sono stati inoltre determinati l'area del bacino (A) e la lunghezza media cumulata del reticolo (L_{mc}), calcolata come cumulata delle lunghezze medie per i vari ordini gerarchici [10].

I parametri morfologici R_b , R_l e R_a sopra elencati possono essere calcolati, una volta ordinato il reticolo idrografico e le aree afferenti secondo Strahler, sulla base delle regressioni delle seguenti note relazioni:

$$N_u = R_b^{\omega-u}$$

$$\overline{L}_u = \overline{L}_1 R_l^{u-1}$$

$$\overline{A}_u = \overline{A}_1 R_a^{u-1}$$

dove:

ω = ordine massimo del reticolo;

N_u = numero delle aste di ordine u ;

\overline{L}_u = lunghezza media delle aste di ordine u ;

\overline{A}_u = area media sottesa da aste di ordine u .

In analogia alle scelte fatte nello studio di regionalizzazione delle portate della Regione Toscana, le regressioni sono state eseguite secondo le seguenti specifiche:

1. nel calcolo di R_b l'ordine massimo considerato è $\omega-1$;
2. R_l è stato calcolato considerando le lunghezze medie di ciascun ordine gerarchico;
3. per la stima di R_a è stato considerato al più il quinto ordine gerarchico.

Soltanto per i bacini di ordine 3 l'ordine massimo considerato per il calcolo di R_b è ω

A titolo di esempio si riportano le regressioni eseguite per il torrente Chiesimone.

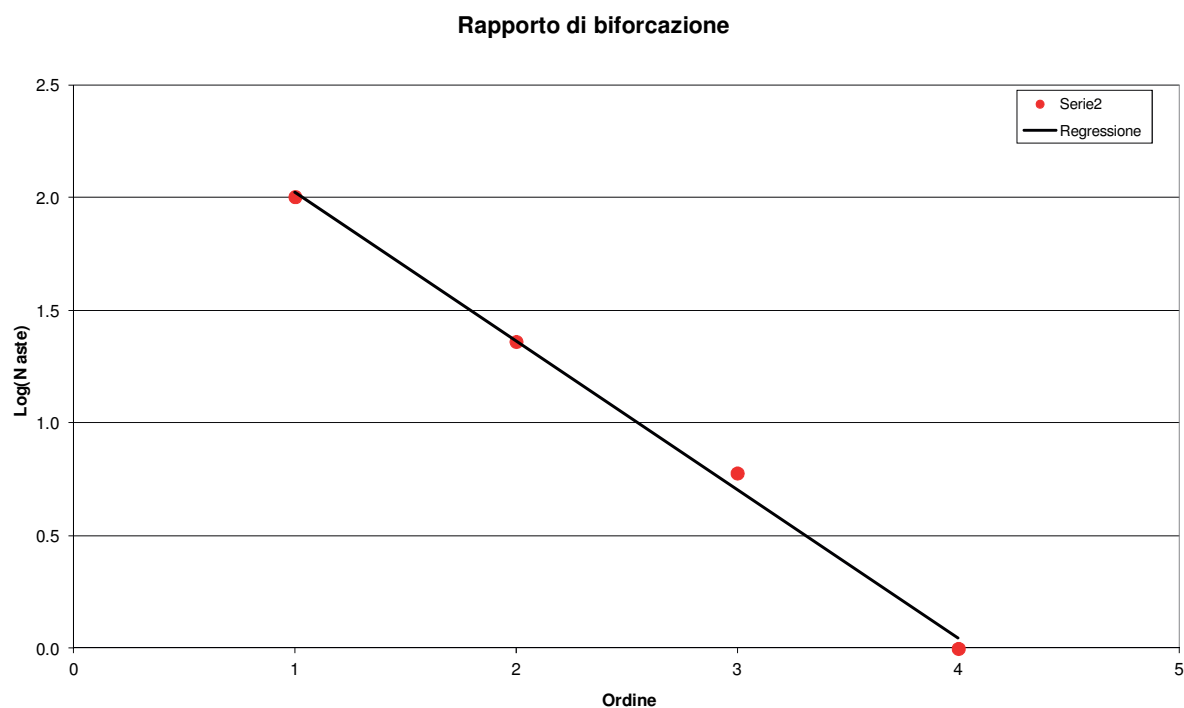


Fig. 4.1: Rapporto di biforcazione del torrente Chiesimone alla confluenza

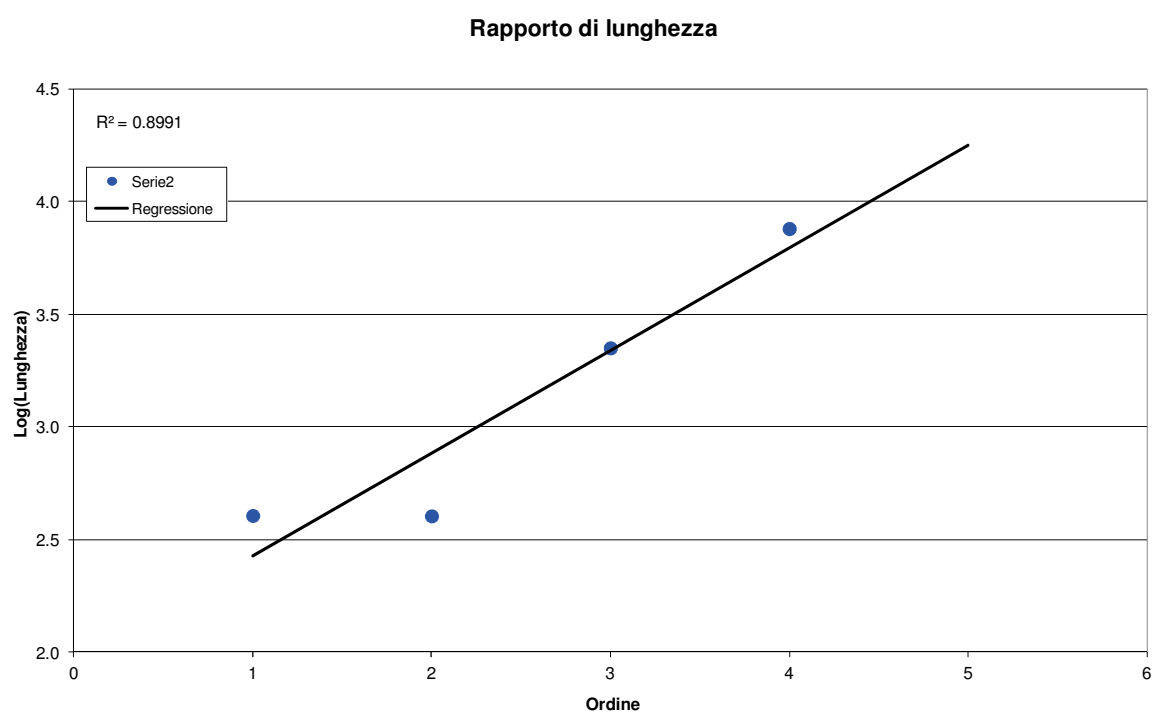


Fig. 4.2: Rapporto di lunghezza del torrente Chiesimone alla confluenza

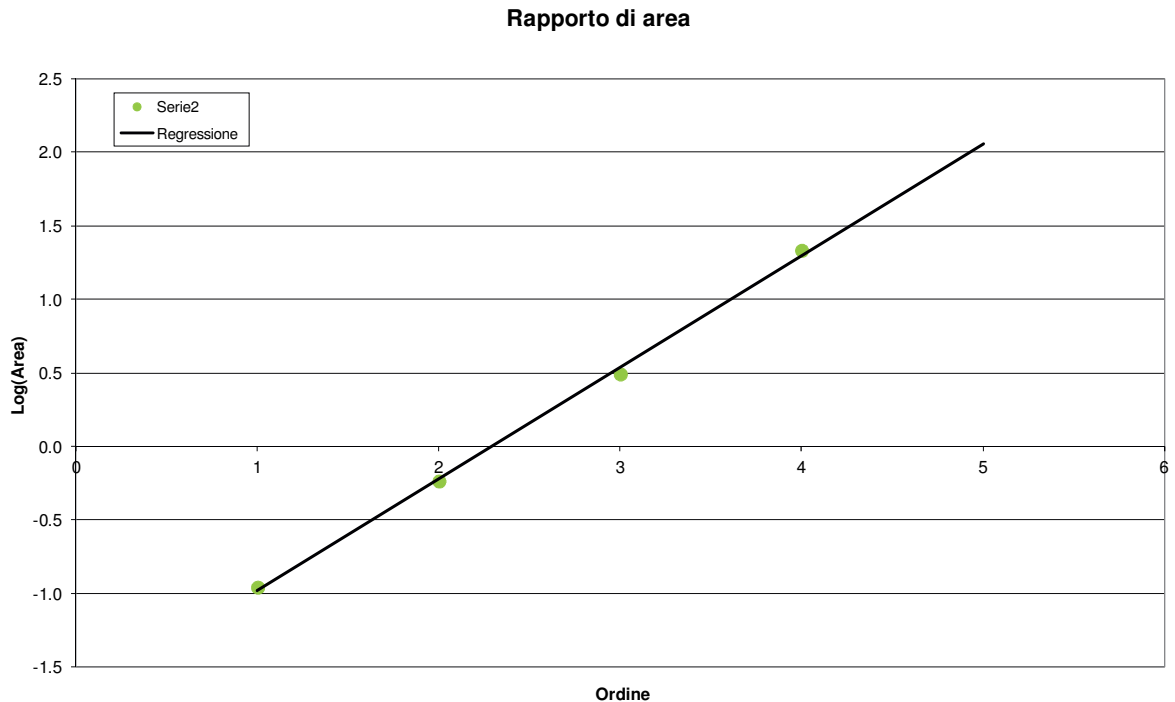


Fig. 4.3: Rapporto di area del torrente Chiesimone alla confluenza

4.2 IL MODELLO IDROLOGICO GENERALE

A seguito della preliminare analisi geomorfologica e idrografica del bacino e del reticolo idrografico di cui al precedente paragrafo, è stata condotta l'analisi idrologica per la stima degli idrogrammi di piena. Questi sono stati stimati attraverso il modello di piena concettuale a parametri concentrati, basato sull'idrogramma istantaneo unitario di Nash, di cui riportiamo di seguito le linee principali.

L'input meteorico è rappresentato da uno "ietogramma sintetico" la cui intensità viene stimata a partire dalle curve di possibilità climatica elaborate dalla Regione Toscana (aggiornate con dati al 2012), con regionalizzazione dei dati e adattamento alla TCEV.

Le curve di possibilità pluviometrica sono fornite per ogni tempo di ritorno in formato raster a celle 1000x1000 m, per ciascuna delle quali le altezze di pioggia sono espresse dalla seguente formula:

$$h=at^n$$

dove a e n sono i parametri, t [h] la durata dell'evento, h [mm] l'altezza di pioggia.

A seguito di ricampionamento a dimensioni delle celle di 100x100 m, l'altezza di pioggia media sul bacino è calcolata come media delle altezze di pioggia di tutte le celle contenute nel bacino.

Il modello è strutturato in modo da ricercare, per un dato tempo di ritorno, i valori critici della durata e dell'intensità costante di pioggia che massimizzano la portata di piena. In alternativa è possibile definire ietogrammi costanti di qualsiasi durata.

L'input pluviometrico è stato ragguagliato al bacino attraverso il metodo del coefficiente di ragguaglio areale K_r . Questo è espresso dalla seguente formula come definita nello studio di "Regionalizzazione delle portate di piena in Toscana" [7]:

$$K_r = 1 - \exp(-\alpha t^\beta) + \exp(-\alpha t^\beta - \gamma A)$$

dove α , β e γ sono i parametri della formula, t [h] è la durata della precipitazione e A [km²] è l'area del bacino.

Per la Regione Toscana sono stati stimati i seguenti valori dei parametri:

$$\alpha = 0.036 a \qquad \beta = 0.25 \qquad \gamma = 0.01$$

dove a è il parametro della curva di possibilità pluviometrica espresso nella forma trinomia:

$$h = at^n Tr^m$$

dove a , n e m sono i parametri, t [h] la durata dell'evento, Tr [anni] il tempo di ritorno e h [mm] l'altezza di pioggia. I parametri a e n differiscono da quelli della formulazione binomia sopra citata e pertanto sono calcolati con regressione sul campione generato dalla formula binomia al variare di t (1-3-6-9-12-15-18-24-36-48-72 ore) e Tr (2-5-10-20-30-50-100-150-200-500 anni).

Il metodo per studiare la risposta idrologica in termini di deflussi è quello basato sul cosiddetto *idrogramma istantaneo unitario* (*Instantaneous Unit Hydrograph, IUH*), vale a dire l'idrogramma di piena causato da un evento impulsivo di pioggia di volume unitario e durata tendente a zero. Infatti, con le ipotesi di linearità e stazionarietà della risposta, l'idrogramma di piena può essere calcolato tramite la convoluzione fra idrogramma efficace e IUH:

$$Q(t) = \int_0^t U(\tau) p(t - \tau) d\tau$$

dove:

$Q(t)$ è la portata defluente;

$p(t) = A i(t)$ con A area del bacino e $i(t)$ intensità di pioggia netta ragguagliata sul bacino;

$U(t)$ = idrogramma unitario per cui $\int_0^{\infty} U(t) dt = 1$

Il momento di primo ordine dell'IUH rispetto all'origine (baricentro) è definito dalla

$$Tl = \int_0^{\infty} U(t) t dt = 1$$

dove Tl viene detto tempo di ritardo.

Il modello di formazione dell'onda di piena adottato è quello dell'idrogramma unitario di tipo $I(n,k)$ introdotto da Nash e caratterizzato dal parametro di *forma* (n) e da quello di *scala* (k).

$$U(t) = \frac{1}{k\Gamma(n)} \left(\frac{t}{k}\right)^{(n-1)} e^{-\left(\frac{t}{k}\right)} \quad [4]$$

In questo schema il tempo di ritardo è dato dal prodotto $n \cdot k$.

I parametri n , k e Tl dell'idrogramma unitario di Nash possono essere ricavati sulla base delle caratteristiche geomorfologiche del reticolo idrografico, mediante le seguenti espressioni:

$$n = 3.29 (Rb/Ra)^{0.78} Rl^{0.07}$$

$$k = 0.7 [Ra/(Rb Rl)]^{0.48} L/\nu$$

$$Tl = 2.3 \left(\frac{Rb}{Ra} \right)^{0.3} Rl^{-0.41} \frac{L}{\nu}$$

dove, oltre ai simboli noti, ν è il fattore cinematico legato alla velocità della piena (“media spazio-temporale di scorrimento dell'acqua o di propagazione dell'onda di piena”), L è la lunghezza dell'asta principale, Rb , Rl e Ra sono rispettivamente i rapporti di biforcazione, di lunghezza e di area del bacino considerato.

Lo studio di regionalizzazione della Regione Toscana [7], attraverso la taratura sistematica dei dati relativi ad eventi registrati nei 42 bacini strumentati dal Servizio Idrografico, ha fornito una relazione fra i valori di Tl [ore] ed i parametri morfologici:

$$Tl = 0.42 \left(\frac{Rb}{Ra} \right)^{0.3} Rl^{-0.41} \frac{Lmc}{A^{0.075}}$$

dove, oltre ai simboli noti, Lmc è la lunghezza media cumulata del reticolo.

Per il reticolo idrografico non sufficientemente sviluppato da poter definire parametri geomorfologici attendibili (ordine di Horton-Strahler inferiore a 3), è adottata la seguente metodologia:

1. il parametro n [] di Nash è posto uguale al valore medio relativo ai bacini di ordine ≥ 3 e area ≤ 6 Km² di cui sia calcolabile detto parametro secondo la formulazione sopra riportata;
2. per il tempo di ritardo caratteristico Tl [ore] è ipotizzata una formulazione

$$Tl = a \cdot A^b$$

con a e b parametri da tarare ed A area del bacino [Km²]

3. a e b sono stimati attraverso la regressione di potenza delle coppie ($A;Tl$) relative ai bacini di ordine ≥ 3 e area ≤ 6 Km² di cui sia calcolabile detto parametro secondo la formulazione sopra riportata;
4. il parametro k [h] è determinato dal rapporto Tl/n .

Inoltre nei casi di bacini estremamente piccoli o impluvi, l'uno di seguito all'altro, la stima dei parametri di calcolo è eseguita secondo la seguente metodologia:

1. è stimata l'area media dei bacini o impluvi con reticolo cartografato (0.41 Km²);
2. per tener conto del reticolo non cartografato è definita l'area caratteristica di tali bacini come il 50% dell'area media di cui al punto precedente (0.2 Km²);
3. i bacini limitrofi sono accorpati in un unico interbacino a cui è assegnato il codice BAC seguito da un numero progressivo da monte verso valle;
4. il parametro n [] di Nash è posto uguale al valore medio relativo ai bacini di ordine ≥ 3 e area ≤ 6 Km² di cui sia calcolabile detto parametro secondo la formulazione sopra riportata;
5. per il tempo di ritardo caratteristico Tl [ore] è ipotizzata una formulazione

$$Tl = a \cdot A^b$$

con a e b parametri da tarare ed A area del bacino [Km²]

6. a e b sono stimati attraverso la regressione di potenza delle coppie ($A;Tl$) relative ai bacini di ordine ≥ 3 e area ≤ 6 Km² di cui sia calcolabile detto parametro secondo la formulazione sopra riportata;
7. il parametro k [sec] è determinato dal rapporto Tl/n .
8. la portata di ciascun bacino BAC è calcolata con riferimento alla somma delle aree dei bacini che lo compongono.

Il modello di infiltrazione adottato richiede la stima di due parametri: la perdita iniziale è schematizzata introducendo un *volume unitario di perdita iniziale* (indicato con I_a) che assorbe completamente la precipitazione durante i primi momenti dell'evento (dall'istante iniziale dell'evento $t=0$ sino all'istante $t=t_a$), mentre la perdita durante l'evento viene schematizzata con una *infiltrazione costante a saturazione* (indicata con K_s):

$$I_a(t) = I_a(0) + \int_0^{t_a} (P(\tau) - K_s) d\tau$$

se $t < t_a$

$$P_n(t) = 0$$

$$I_a(t) = I_a$$

se $t \geq t_a$

$$P_n(t) = P(t) - K_s$$

dove:

$P(t)$ intensità di precipitazione ragguagliata sul bacino [mm/h];

$P_n(t)$ intensità di precipitazione netta sul bacino [mm/h];

$I_a(t)$ perdita iniziale all'istante t dell'evento [mm];

$I_a=I_a(t_a)$ volume di perdita iniziale per unità di area [mm];

K_s =velocità di infiltrazione a saturazione [mm/h].

I parametri utilizzati per il calcolo delle portate di piena risultano, in sostanza, i seguenti:

- I_a volume unitario di perdita iniziale [mm];
- K_s velocità di infiltrazione a saturazione [mm/h];
- n parametro di forma dell'idrogramma di Nash [-];
- k parametro di scala dell'idrogramma di Nash [h].

Nello studio di regionalizzazione, i valori di I_a e K_s sono tarati e calcolati in funzione della litologia dei bacini, resi indipendenti dalle dimensioni del bacino idrografico. In particolare I_a è correlato alla percentuale di superficie boscata del bacino idrografico secondo la relazione:

$$I_a = 3.3 + 22P_{ab} \quad (P_{ab} = \text{percentuale di superficie boscata del bacino})$$

mentre K_s dipende dalle caratteristiche litologiche secondo le seguenti attribuzioni definite nell'ambito della "Regionalizzazione delle portate di piena in Toscana" [7]:

Formazione litologica		
Descrizione di Regionalizzazione delle Portate di Piena in Toscana	Codifica Carta Geologica Regionale	Ks medio [mm/h]
Sabbie di spiaggia e dune costiere recenti + Laguna di Orbetello (Gr)		3.1
Depositi alluvionali, di colmata e palustri, terreni torbosi	b, e2b	0
Travertini, calcari detritico-organogeni	f1a, f1b	7.75
Depositi fluviali, lacustri e marini, terrazzati	e2a, bna, bnb	0
Conglomerati poligenici con intercalazioni di sabbie ed argille, breccie sedimentarie poligeniche	VILa, VILg	0.775
Depositi argillosi di origine fluvio-lacustre o marina, con intercalazioni di argille, ghiaie ed altri materiali	VILh	0
Depositi sabbiosi di origine fluvio-lacustre o marina, con intercalazioni di argille, ghiaie ed altri materiali arenarie poco cementate, "panchina", dune antiche, molasse	PLIs, VILb, VILe	2.325
Marne, argilliti, argilloscisti	STO2, APA, FAA, FIU, VILc, ACC, AVR, ACCa, AVP, PSC, SIL, BMSb, SILb, BAP, BAPci, BAPct, BGN, FAL4a, MVV, PIE, CTG, MACc, VIC, VIC4, MMA, STO1, STO7	0
Arenarie quarzo-feldspatiche, spesso turbiditiche, con intercalazioni di marne ed argilliti	SEN, CEV, SUV, PTFb, MACb, SIL1, VIC3, PTF, FAL1, MAC, CDP, AQR1, FMA1, FMA3, FMA4, FMA5, FMA7, FMA8, FAL2, FAL4, FAL5, CDP1, CDP2, TCG1, MOH, FMA3a, FIUb,	1.55
Scisti siltosi, marne, argilliti ed arenarie spesso turbiditiche	SILa, CCL, MAI, FAL3a, FAL3c, FMA3b, FMA8a, AQR2, AQR3	0
Alternanze di calcari, calcareniti, calcari marnosi e marne spesso gradate, brecciole calcaree	BMS, MOV, MLL, STO4a, BMSa, STO3, STO4, ACCb	4.65
Calcari massicci o grossolanamente stratificati con rare intercalazioni		7.75
Calcari ben stratificati con intercalazioni, calcari litografici, calcari selciferi, subordinatamente calcareniti, calcari marnosi		7.75
Calcari stratificati nodulari, calcari marnosi con intercalazioni marnose		0
Calcari cavernosi, anidriti, dolomie e calcari dolomitici		3.875
Diaspri, radiolariti e scisti silicei	DSD	3.875
Scisti metamorfici, filladi, anageniti		0
Rocce ignee intrusive acide, graniti, granodioriti, quarzomonzoniti, apliti, rocce filoniane		0
Rocce ignee effusive acide	bm	0
Rocce ofiolitiche	pm	0
Gessi, anidriti con intercalate argille, marne, sabbie (formazione Gessoso-sofifera)		0
Complesso caotico + Complesso indifferenziato	FMA3qa, FMA7cs, FMA8bd, FMA9b, FALa, MACa, VICol	0

Tab. 4.1: Velocità media di infiltrazione a saturazione in funzione delle caratteristiche litologiche

4.3 IL MODELLO IDROLOGICO DEL BORRO S. CIPRIANO

Per il bacino del borro San Cipriano è stato utilizzato un modello semi-distribuito implementato con il software HEC-HMS [24, 25]. Esso è costituito dal modello di infiltrazione SCS Curve Number per la stima delle perdite idrologiche, che dipende da CN (Curve Number), parametro adimensionale stimato in funzione delle caratteristiche geopedologiche del bacino e dall'uso del suolo dello stesso. Per ciascun sottobacino in cui è suddiviso il bacino del borro, il modello di formazione dell'onda di piena utilizzato è quello dell'idrogramma unitario di Clark, un modello di trasformazione lineare che rappresenta esplicitamente i processi fisici della traslazione e della laminazione del deflusso superficiale.

La diversa metodologia di calcolo degli input idrologici nasce dall'esigenza di valutare gli effetti di interventi antropici realizzati all'interno del bacino idrografico; il reticolo idrografico e la risposta idrologica dello stesso sono infatti fortemente caratterizzati dalle modifiche morfologiche dell'ex bacino minerario di Santa Barbara.

4.3.1 IL MODELLO DI RIFIUTO DEL TERRENO SCS-CURVE NUMBER

Per il calcolo delle perdite di bacino è stato adottato il metodo del Curve Number, modello di rifiuto del terreno sviluppato dal Soil Conservation Service degli Stati Uniti.

Si tratta di un modello empirico che stima la predisposizione dei suoli a contribuire ai deflussi di piena mediante l'analisi di tre fattori: le caratteristiche di permeabilità dei terreni superficiali e degli strati geologici immediatamente sottostanti, l'uso del suolo e la copertura vegetale, lo stato di imbibimento del terreno all'inizio della sollecitazione meteorica.

La relazione fondamentale per la stima della precipitazione efficace è la seguente:

$$\begin{cases} P_{eff} = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} & P \geq I_a \\ P_{eff} = 0 & P < I_a \end{cases}$$

dove P_{eff} è la precipitazione efficace cumulata al tempo t , P è la precipitazione totale cumulata allo stesso istante, I_a è la perdita iniziale ed S è il fattore di ritenzione potenziale, ovvero il massimo volume specifico di acqua che il terreno può trattenere in condizioni di saturazione.

Con l'introduzione di I_a si vuol tenere conto di quel complesso di fenomeni, quali l'intercettazione da parte della vegetazione e l'accumulo nelle depressioni superficiali del terreno, che ritardano il verificarsi del deflusso superficiale.

I due parametri I_a ed S si dovranno determinare mediante operazioni di taratura del modello. Dall'analisi dei risultati ottenuti dall' SCS in numerosi piccoli bacini sperimentali americani, è stata proposta una relazione empirica che lega i 2 parametri:

$$I_a = cS$$

con c posto generalmente pari a 0.2 (variabile fra 0.1 e 0.3).

In questo modo è possibile definire il deflusso netto in funzione dell'afflusso meteorico, una volta fissato il valore di S .

Il parametro S dipende dalla possibilità di infiltrazione dell'acqua in condizioni di terreno già saturato, dall'insieme delle condizioni del suolo (uso, trattamento della superficie, drenaggio) e dal contenuto di umidità iniziale dello stesso (AMC, Antecedent Moisture Condition).

L'effetto di tutti questi fenomeni viene rappresentato globalmente introducendo un parametro adimensionale, il Curve Number (CN), legato ad S tramite la relazione:

$$S = S_0 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right)$$

dove S_0 è una costante di scala dimensionale, che riflette l'unità di misura adottata.

Nel sistema metrico, $S_0 = 254$ mm.

Il parametro CN è un numero adimensionale che varia da 100, per corpi idrici, a circa 30, per suoli permeabili con elevati tassi di infiltrazione, che dipende, innanzitutto, dalle caratteristiche idrologiche del suolo (struttura, tessitura e permeabilità).

Per identificare il tipo idrologico di suolo bisogna analizzare le caratteristiche geopedologiche del bacino. L'SCS ha classificato il suolo in quattro gruppi:

- Gruppo A: suoli aventi scarsa potenzialità di deflusso. Comprende sabbie profonde con scarsissimo limo e argilla, ghiaie profonde molto permeabili. Capacità di infiltrazione molto elevata (valore di infiltrazione a saturazione maggiore di 7.6 mm/h).
- Gruppo B: suoli aventi moderata potenzialità di deflusso. Comprende la maggior parte dei suoli sabbiosi meno profondi che nel gruppo A e con maggiore aliquota di argilla e limo. Elevate capacità di infiltrazione anche in condizioni di saturazione (valore di infiltrazione a saturazione maggiore di 3.8 mm/h e minore di 7.6 mm/h).

- Gruppo C: suoli aventi potenzialità di deflusso moderatamente alta. Suoli contenenti considerevoli quantità di argilla e colloidali. Scarsa capacità di infiltrazione. (valore di infiltrazione a saturazione maggiore di 1.27 mm/h e minore di 3.8 mm/h)
- Gruppo D: suoli con potenzialità di deflusso molto elevata. Argille con elevata capacità di rigonfiamento, suoli sottili con orizzonti pressoché impermeabili in vicinanza della superficie. Scarsa capacità di infiltrazione a saturazione (valore di infiltrazione a saturazione minore di 1.27 mm/h).

Una volta individuato il tipo idrologico di suolo, per determinare il CN occorre analizzare la tipologia di uso del suolo stesso.

Nelle tabelle seguenti si riportano i valori caratteristici del parametro CN, che si ottengono per combinazione delle caratteristiche idrologiche del suolo, secondo i 4 tipi idrologici A-B-C-D a permeabilità decrescente, e delle caratteristiche di uso prevalente del suolo stesso.

Per quanto riguarda l'influenza dello stato di imbibimento del suolo all'inizio dell'evento meteorico, l'SCS individua tre classi caratterizzate da differenti condizioni iniziali (*AMC*, *Antecedent Moisture Condition*) a seconda del valore assunto dall'altezza di pioggia caduta nei cinque giorni precedenti l'evento meteorico:

AMC I: potenziale di scorrimento superficiale minimo. Suolo asciutto.

AMC II: potenziale di scorrimento medio. Suolo mediamente umido.

AMC III: potenziale di scorrimento massimo. Suolo saturo.

I valori di CN ricavati dalle tabelle 4.2 e 4.3 si riferiscono a condizioni di saturazione del terreno medie (*AMC II*). I valori corrispondenza alle altre condizioni di saturazione possono essere ricavati dalle seguenti relazioni:

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2.3 - 0.013CN_{II}}$$
$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0.43 + 0.0057CN_{II}}$$

I parametri richiesti dal modello distribuito SCS Curve Number sono il valore dell'indice CN per ogni interbacino in cui è stato discretizzato il bacino, e le condizioni iniziali, ovvero le

perdite iniziali espresse come rapporto con la ritenzione potenziale (I_a/S , *initial abstraction ratio*, in genere posto pari a 0.2), da specificare per ogni sottobacino.

TIPO DI COPERTURA			TIPO DI SUOLO			
Uso del suolo	Trattamento o pratica	Condizione idrologica	A	B	C	D
Maggesi	a solchi dritti	-	77	86	91	94
Colture a solchi	a solchi dritti	cattiva	72	81	88	91
	a solchi dritti	buona	67	78	85	89
	a reggipoggio	cattiva	70	79	84	88
	a reggipoggio	buona	65	75	82	86
	a re. e terrazze	cattiva	66	74	80	82
	a re. e terrazze	buona	62	71	78	81
Grani piccoli	a solchi dritti	cattiva	65	76	84	88
	a solchi dritti	buona	63	75	83	87
	a reggipoggio	cattiva	63	74	82	85
	a reggipoggio	buona	61	73	81	84
	a re. e terrazze	cattiva	61	72	79	82
	a re. e terrazze	buona	59	70	78	81
Legumi seminati folti o prati in rotazione	a solchi dritti	cattiva	66	77	85	89
	a solchi dritti	buona	58	72	81	85
	a reggipoggio	cattiva	64	75	83	85
	a reggipoggio	buona	55	69	78	83
	a re. e terrazze	cattiva	63	73	80	83
	a re. e terrazze	buona	51	67	76	80
Pascoli	-	cattiva	68	79	86	89
	-	discreta	49	69	79	84
	-	buona	39	61	74	80
	a reggipoggio	cattiva	47	67	81	88
	a reggipoggio	discreta	25	59	75	83
	a reggipoggio	buona	6	35	70	79
Prati	-	buona	30	58	71	78
Boschi	-	cattiva	45	66	77	83
	-	discreta	36	60	73	79
	-	buona	25	55	70	77
Aziende agricole	-	-	59	74	82	86
Strade sterrate	-	-	72	82	87	89
Strade pavimentate	-	-	74	84	90	92

Tab. 4.2: Valori del parametro CN per diverse combinazioni di suolo e copertura (SCS,1986)

TIPO DI COPERTURA		TIPO DI SUOLO			
		A	B	C	D
Aree residenziali					
Area media dei lotti:	Area impermeabile (%)				
1/8 acro o meno	65	77	85	90	92
1/4 acro	38	61	75	83	87
1/3 acro	30	57	72	81	86
1/2 acro	25	54	70	80	85
1 acro	20	51	68	79	84
Parcheggi pavimentati, tetti, viali d'accesso		98	98	98	98
Strade urbane ed extraurbane					
Pavimentate, a dorso di mulo e con fognatura		98	98	98	98
in ghiaia		76	85	89	91
sterrate		72	82	87	89
Aree commerciali e professionali (impermeabili per l'85%)		89	92	94	95
Distretti industriali (impermeabili per il 72%)		81	88	91	93
Spazi aperti, prati, parchi, campi da golf, cimiteri					
in buone condizioni: copertura erbosa sul 75% o più		39	61	74	80
in discrete condizioni: copertura erbosa sul 50-75%		49	69	79	84

Tab. 4.3: Valori del parametro CN per diverse combinazioni di suolo e copertura (SCS,1986)

4.3.2 IL MODELLO DELL'IDROGRAMMA UNITARIO DI CLARK

Per la modellazione della trasformazione afflussi-deflussi, è stato utilizzato il metodo dell'idrogramma unitario di Clark, un modello di trasformazione lineare che rappresenta esplicitamente i processi fisici della traslazione e della laminazione del deflusso superficiale.

Il modello si basa sullo schema di invaso lineare. In particolare si avvale dell'equazione di continuità:

$$\frac{dS_t}{dt} = I_t - O_t$$

in cui S_t rappresenta il volume d'acqua accumulato al tempo t e I_t ed O_t rispettivamente l'afflusso ed il deflusso nello stesso istante, e dell'equazione dell'invaso lineare:

$$S_t = RO_t$$

dove R è la costante di invaso.

L'effetto della traslazione viene valutato, invece, calcolando il tempo di ritardo per ogni singolo interbacino.

Nota l'area di ogni sottobacino, il modello calcola, per ogni intervallo di tempo, il volume d'acqua in ingresso nell'invaso lineare come prodotto fra tale area e la precipitazione efficace. Gli afflussi così calcolati vengono inseriti nel modello di invaso lineare ad ottenere un idrogramma dei deflussi.

Il modello richiede la stima di altri due parametri: il tempo di ritardo, t_c , e la costante di invaso, R , entrambi da definire per ogni sottobacino.

Per maggiori dettagli sul modello di calcolo e sulle equazioni utilizzate si rimanda ai manuali del programma HEC-HMS.

4.4 IL MODELLO IDROLOGICO PER IL RETICOLO DI PIANURA

I modelli idrologici precedentemente descritti non risultano adatti per reticoli di “acque basse” e aree di pianura. Pertanto è stato valutato più idoneo l’utilizzo del seguente metodo di calcolo.

La portata in funzione del tempo di ritorno e della durata dell’evento di pioggia è calcolata attraverso la formula razionale

$$Q = K \cdot \frac{A \cdot \frac{h}{d}}{3.6}$$

dove Q è la portata [mc/s], K è il coefficiente di afflusso [-], A è l’area del bacino [Kmq], h (dipendente dal tempo di ritorno) è l’altezza di pioggia ragguagliata [mm], d è la durata meteorica [ore].

Il coefficiente K è la media ponderata sulle aree in funzione dell’uso del suolo secondo le seguenti assunzioni:

$K = 0.5$ per terreni agricoli di pianura

$K = 0.8$ per piccole aree urbane residenziali con aree a verde

$K = 0.9$ per aree urbane impermeabili

L’altezza di pioggia è stimata dalle curve di possibilità pluviometrica e ragguagliata secondo la funzione $K_r = 1 - \exp(-\alpha t^\beta) + \exp(-\alpha t^\beta - \gamma A)$ precedentemente descritta.

E’ inoltre stato ipotizzato che la durata critica coincida con il tempo di corrivazione valutato a partire dalla formula di Ongaro:

$$t_c = 0.18 \cdot (A \cdot L)^{1/3}$$

dove, oltre ai simboli precedentemente specificati, t_c è il tempo di corrivazione [giorni], L è la lunghezza dell'asta principale [Km].

Per $d \leq t_c$ gli idrogrammi sintetici sono stati assunti di forma triangolare con tempo di picco pari a d e durata complessiva pari a $2d$.

Per $d > t_c$ gli idrogrammi hanno forma trapezia con ramo a portata crescente di durata t_c , ramo a portata costante di durata $d - t_c$ e ramo a portata decrescente di durata t_c .

A titolo di esempio si riportano gli idrogrammi del sottobacino *Prulli 2B* per il tempo di ritorno 200 anni.

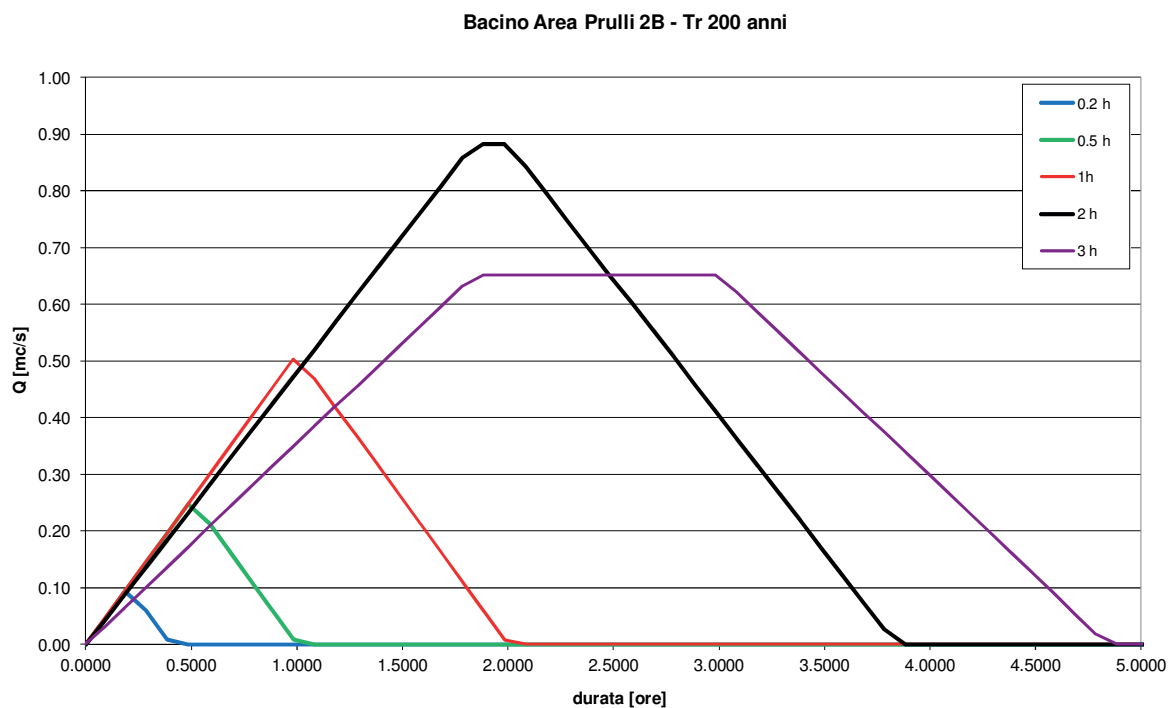


Fig. 4.4: idrogrammi del bacino Prulli 2B

4.5 APPLICAZIONE DEI MODELLI IDROLOGICI

Si premette che gli idrogrammi utilizzati per cimentare la sezione di monte del modello idraulico del fiume Arno (sez. 904) corrispondono a quelli stimati nell'ambito della redazione dello studio "Valutazione di aspetti idrologici e idraulici inerenti al progetto di sopralzo

della diga di Levane” [37] per le durate di 9, 12, 18 e 24 ore, e a quelli del Piano di Assetto Idrogeologico per la durata 36 ore. Le portate massime relative a ciascun scenario idrologico sono riportati nella seguente tabella.

	Durata [ore]			
Tr [anni]	12 h	18 h	24 h	36 h
200	2213	2122	1941	1594
100	1955	1826	1660	1375
30	1718	1606	1421	1078
10	1380	1242	1084	-

Tab. 4.4: portate di picco sez. 904 del fiume Arno

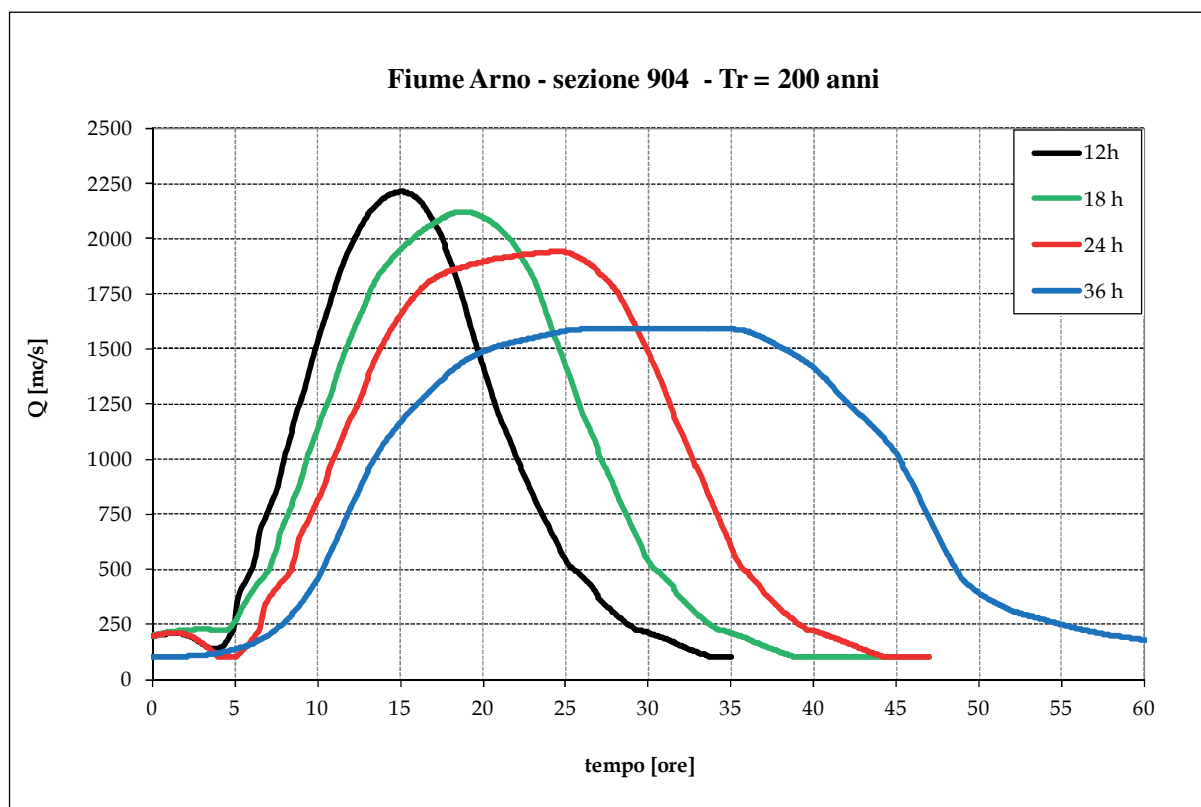


Fig. 4.5: idrogrammi sezione 904 per Tr 200 anni

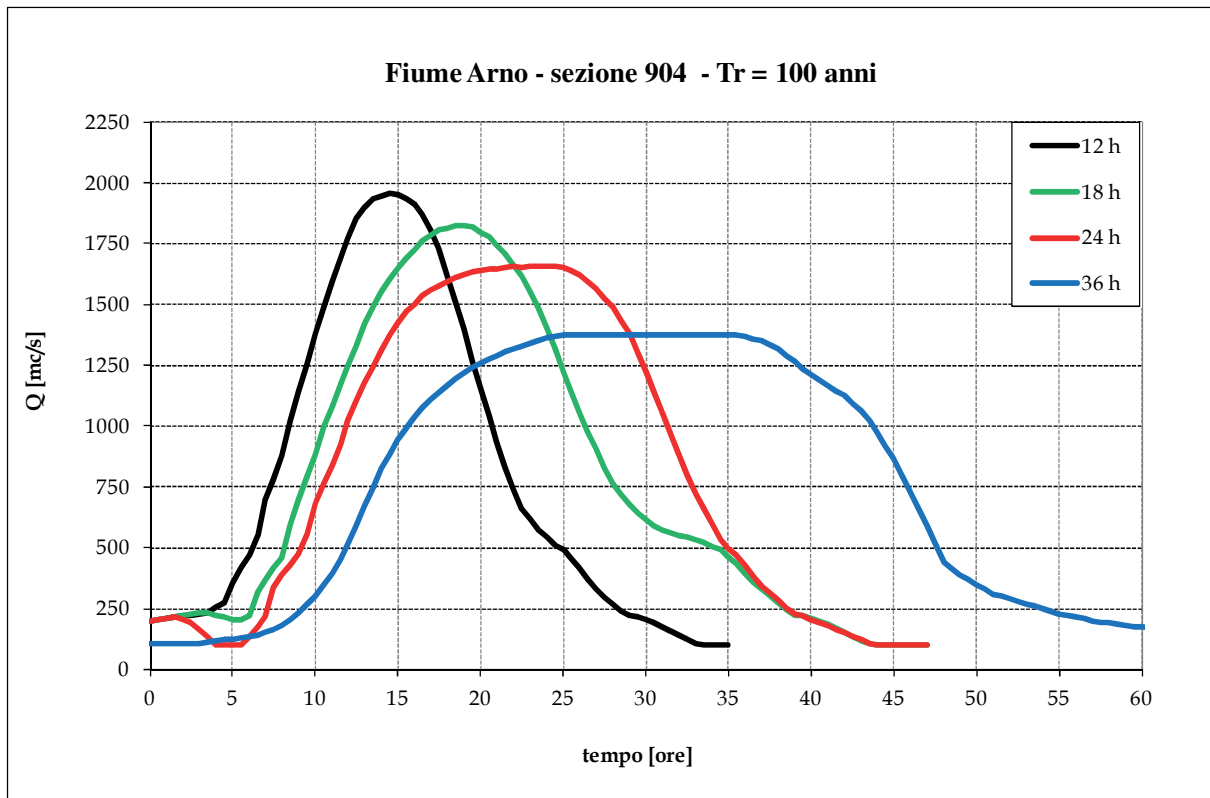


Fig. 4.6: idrogrammi sezione 904 per Tr 100 anni

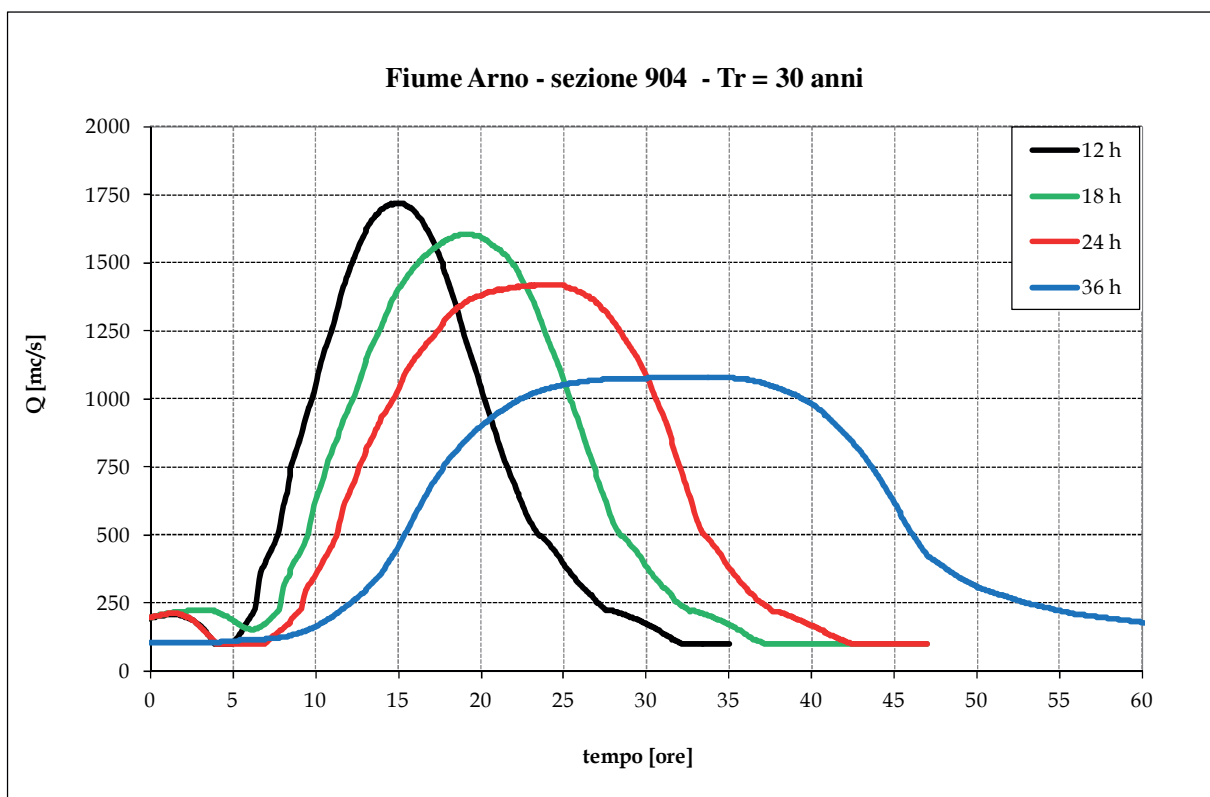


Fig. 4.7: idrogrammi sezione 904 per Tr 30 anni

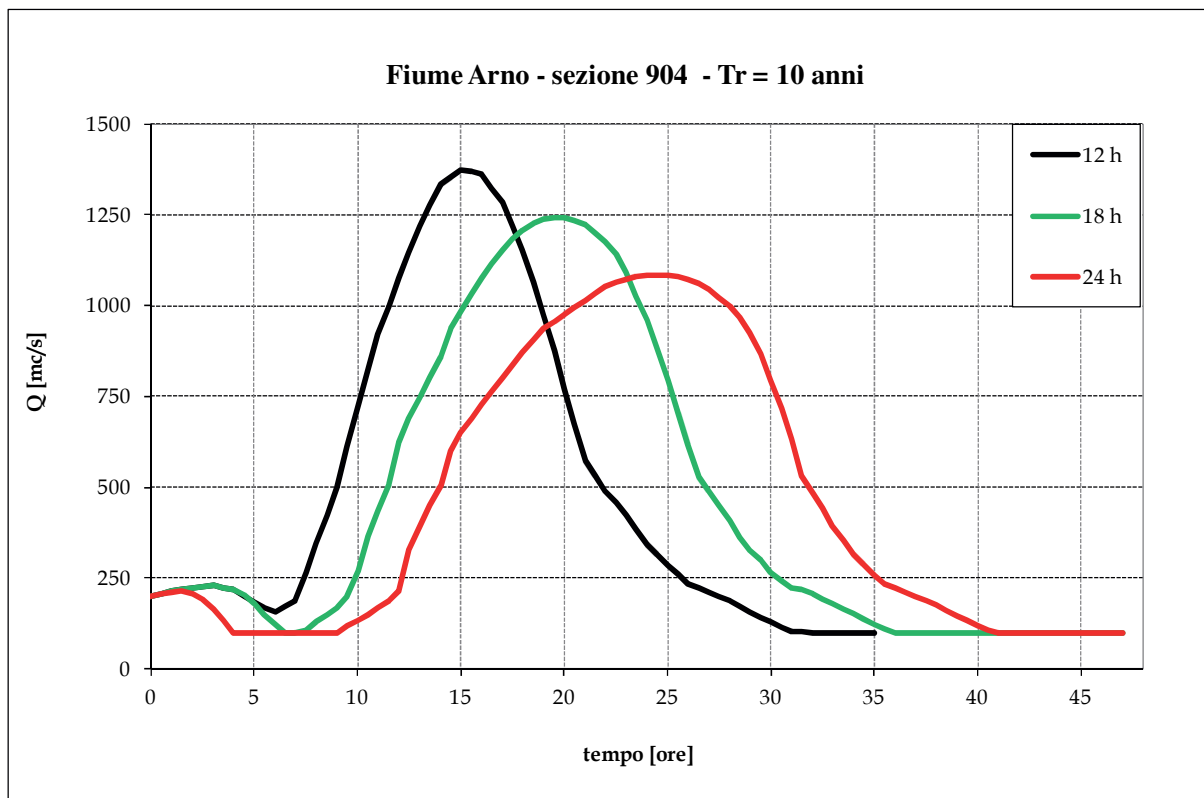


Fig. 4.8: idrogrammi sezione 904 per Tr 10 anni

Al contrario, negli elaborati PD_D_PR_05A_T_R00, PD_D_PR_05B_T_R00 e PD_D_PR_06_T_R00 sono rappresentati i bacini per i quali è stata condotta l'analisi idrologica per lo scenario attuale e per quello di progetto.

Ai fini della caratterizzazione del regime di piena del fiume Arno è stato ritenuto che i bacini a tergo delle strutture arginali, attuali e di progetto, non contribuiscano alla piena del fiume in ragione dell'intermittenza di scolo a cui sono soggetti quando i livelli del fiume sono alti. Tali bacini sono invece stati analizzati per la valutazione del rischio residuo (vedi § 16) e, in alcuni casi, per il dimensionamento delle opere idrauliche lungo il reticolo secondario.

N.	Nome	Modellazione	N.	Nome	Modellazione
1	Arno a monte Levane	- da studio UNIFI [34] per 12, 18, 24 h - da PGRA per 36 h	29	Ricavo	Nash
2	Caprenne	Nash	30	Bagnoli	Nash
3	bac1	Nash	31	Luppiano	Nash
4	Sciupate	Nash	32	Campane	Nash
5	bac2	Nash	33	Bac18	Nash
6	Ambra	Nash	34	Cetina	Nash
7	Tasso	Nash	35	Bac19	Nash
8	bac3	Nash	36	Burchio	Nash
9	Dogana	Nash	37	Bac20	Nash
10	Giglio	Nash	38	Selceto	Nash
11	Spedaluzzo	Nash	39	Tornia	Nash
12	Ciuffenna	Nash	40	Leccio	Nash
13	Quercio	Nash	41	Bac21	Nash
14	bac4	Nash	42	Bac22	Nash
15	Fрати	Nash	43	Ischieto	Nash
16	Madonna	Nash	44	Bac23	Nash
17	Ville	Nash	45	Marnia	Nash
18	Riofi	Nash	46	Bona	Nash
19	Vacchereccia	Nash	47	Ricciofani	Nash
20	San Cipriano	Clark	48	Ciliana	Nash
21	Faella	Nash	49	Vicano di Sant'Ellero	Nash
22	Cesto	Nash	50	bac24	Nash
23	Resco	Nash	51	Vicano di Pelago	Nash
24	Podere Colmate	Nash	52	bac25	Nash
25	Ponterosso	Nash	53	Sieve	Nash
26	Gaglianella	Nash	54	bac26	Nash
27	Chiesimone	Nash	55	Castiglionchio	Nash
28	Moriano	Nash	56	bac27	Nash

Tab. 4.5: Bacini della modellazione del fiume Arno nello stato attuale
Nash: modello di cui al §4.2 – Clark: modello di cui al § 4.3
Durate di simulazione: 12-18-24-36 ore

N.	Nome	Modellazione	N.	Nome	Modellazione
1	Sieve a Bilancino	Nash	30	Rimaggio di Vicchio	Nash
2	bacS1	Nash	31	Muccione	Nash
3	Ribottino	Nash	32	Cistio	Nash
4	Bucciano	Nash	33	Baldracca	Nash
5	bacS2	Nash	34	bacS8	Nash
6	Anguidola	Nash	35	Arsella	Nash
7	Rimotoso	Nash	36	Botena	Nash
8	Carza	Nash	37	bacS9	Nash
9	Levisone	Nash	38	Riconi	Nash
10	bacS3	Nash	39	bacS10	Nash
11	Cardetole	Nash	40	Delle Matricole	Nash
12	bacS4	Nash	41	Rimaggio di Dicomano	Nash
13	Bagnone	Nash	42	Bricciana	Nash
14	Bosso	Nash	43	San Godenzo	Nash
15	Donnino	Nash	44	bacS11	Nash
16	Faltona	Nash	45	Moscia	Nash
17	Fontegianni	Nash	46	bacS12	Nash
18	Le Cale	Nash	47	Pietramara	Nash
19	bacS5	Nash	48	bacS13	Nash
20	Fistona	Nash	49	Uscioli	Nash
21	Rabatta	Nash	50	bacS14	Nash
22	Strulla	Nash	51	Rufina	Nash
23	bacS6	Nash	52	Argomenna	Nash
24	Corolla	Nash	53	bacS15	Nash
25	Elsa	Nash	54	Falgano	Nash
26	Fonteviva	Nash	55	Falchetto	Nash
27	San Quirico	Nash	56	bacS16	Nash
28	Pesciola	Nash	57	Macinaie	Nash
29	bacS7	Nash	58	bacS17	Nash

Tab. 4.6: Bacini della modellazione del fiume Sieve nello stato attuale

Nash: modello di cui al §4.2

Durate di simulazione: 12-18-24-36 ore

N.	Nome	Modellazione	N.	Nome	Modellazione
1	Arno a monte Levane	- da studio UNIFI [34] per 12, 18, 24 h - da PGRA per 36 h	34	Cassa Prulli 2	precipitazione
2	Caprenne	Nash	35	Moriano	Nash
3	bac1	Nash	36	Ricavo	Nash
4	Sciupate	Nash	37	Cassa Prulli 3	precipitazione
5	bac2	Nash	38	Bagnoli	Nash
6	Ambra	Nash	39	Luppiano	Nash
7	Tasso	Nash	40	Campane	Nash
8	bac3	Nash	41	Bac18	Nash
9	Dogana	Nash	42	Cetina	Nash
10	Giglio	Nash	43	Bac19	Nash
11	Spedaluzzo	Nash	44	Burchio	Nash
12	Ciuffenna	Nash	45	Bac20	Nash
13	Quercio	Nash	46	Selceto	Nash
14	bac4	Nash	47	Tornia	Nash
15	Fрати	Nash	48	Leccio	Nash
16	Madonna	Nash	49	Cassa Leccio 0	precipitazione
17	Ville	Nash	50	Cassa Leccio 1	precipitazione
18	Riofi	Nash	51	Cassa Leccio 2	precipitazione
19	Vacchereccia	Nash	52	Cassa Leccio 3	precipitazione
20	San Cipriano	Clark	53	Ischieto	Nash
21	Cassa Restone	precipitazione	54	Bac23	Nash
22	Cassa Pizziconi 1	precipitazione	55	Marnia	Nash
23	Case Nuove	Nash	56	Bona	Nash
24	Volpaie	Nash	57	Ricciofani	Nash
25	Faella	Nash	58	Ciliana	Nash
26	Cassa Pizziconi 2	precipitazione	59	Vicano di Sant'Ellero	Nash
27	Cesto	Nash	60	bac24	Nash
28	Resco	Nash	61	Vicano di Pelago	Nash
29	Cassa Prulli 0	precipitazione	62	bac25	Nash
30	Ponterosso	Nash	63	Sieve	Nash
31	Gaglianella	Nash	64	bac26	Nash
32	Cassa Prulli 1	precipitazione	65	Castiglionchio	Nash
33	Chiesimone	Nash	66	bac27	Nash

Tab. 4.7: Bacini della modellazione del fiume Arno nello stato di progetto
 Nash: modello di cui al §4.2 – Clark: modello di cui al § 4.3 – precipitazione: solo modello di precipitazione
 Durate di simulazione: 12-18-24-36 ore

N.	Nome	Modellazione
1	bac 12 basse	Nash
2	Podere Colmate	Nash
3	Gaglianella basse	Nash
4	bac13A basse	Nash
5	bac13B basse	Nash
6	bac14 basse	Nash
7	Lagaccioni basse	Nash
8	Tagliafunne basse	Nash
9	Borro della Fornacina basse	Nash
10	bac15 basse	Nash
11	bac16 basse	Nash
12	Ricavo	Nash
13	Bagnoli	Nash
14	bac17 basse	Nash

Tab. 4.8: Bacini utilizzati per la stima del rischio residuo per intermittenza di scolo.

Nash: modello di cui al §4.2

Durate di simulazione: 18-24-36 ore

N.	Nome	Modellazione
1	bac 12 basse	Nash
2	Podere Colmate	Nash
3	Prulli 0	Ongaro
4	Ponterosso	Nash
5	Gaglianella basse	Nash
6	Gaglianella	Nash
7	bac13A basse	Nash
8	bac13B basse	Nash
9	bac14 basse	Nash
10	Lagaccioni basse	Nash
11	Tagliafunne basse	Nash
12	Borro della Fornacina basse	Nash
13	Prulli 1	Ongaro
14	bac15 basse	Nash
15	Prulli 2A	Ongaro
16	Prulli 2B	Ongaro
17	bac16 basse	Nash
18	Ricavo	Nash
19	Prulli 3	Nash
20	Bagnoli	Nash
21	bac17 basse	Nash

Tab. 4.9: Bacini utilizzati per il dimensionamento delle opere sul reticolo secondario

Nash: modello di cui al §4.2 – Ongaro: modello di cui al § 4.4

Durate di simulazione: 0.2-0.5-1-2-3-4.25 ore

L'analisi idrologica si basa sulle seguenti ipotesi:

1. eventi meteorici sintetici ad intensità costante;
2. durata degli eventi meteorici uguale per tutti i sottobacini;
3. altezza di pioggia calcolata un funzione delle curve di possibilità pluviometrica di ciascun bacino;
2. isofrequenza fra evento meteorico e portata in alveo (tempo di ritorno dell'evento di pioggia uguale al tempo di ritorno dell'idrogramma di piena).

In questa sede sono state considerate durate di pioggia pari a **12, 18, 24 e 36 ore** e tempo di ritorno di **30, 100 e 200 anni**. Per ognuna delle combinazioni fra tempo di ritorno e durata di pioggia si ottengono gli idrogrammi dei contributi laterali all'asta principale del fiume Arno. Per specifiche valutazioni inerenti la modifica della frequenza di allagamento delle aree interessate dalla realizzazione della cassa di espansione (vedi § 5.6), è stato valutato anche lo scenari con tempo di ritorno **10 anni e durata 18 ore**.

Considerato che obiettivo dell'analisi è la determinazione dei contributi dei vari affluenti alla formazione delle piena del fiume Arno, e non delle portate critiche dei singoli tributari, all'altezza di pioggia stimata è stato applicato il coefficiente di ragguaglio areale calcolato con l'area del bacino del fiume Arno in corrispondenza dell'opera di presa della cassa Prulli (2683 Km²). E' stato comunque verificato che il coefficiente rimane costante per ogni valore di area maggiore a quella del bacino chiuso alla diga di Levane (2087 Km²), avendo raggiunto il valore asintotico.

Inoltre, per il dimensionamento delle opere idrauliche sul reticolo secondario, sono stati valutati per **Tr 10, 30 e 200 anni** gli idrogrammi relativi alle durate di pioggia di **0.2 - 0.5 - 1 - 2 - 3 - 4.25 ore**. In questi casi, dovendo verificare le massime portate del singolo corso d'acqua, il coefficiente di ragguaglio areale è stato calcolato con riferimento all'area del singolo bacino.

Come anticipato precedentemente, le sollecitazioni pluviometriche sono stata stimate dalle curve di possibilità climatica elaborate dalla Regione Toscana (aggiornate con dati al 2012).

Fatta eccezione per il torrente S. Ciprino e per le aree di pianura interne alle cassa, che sono stati modellati come sarà descritto in seguito, per tutti gli altri bacini le stime idrologiche sono state condotte con il modello dell'idrogramma unitario istantaneo di Nash precedentemente descritto.

Sulla base delle relazioni tra le grandezze e i parametri morfologici e idrologici di cui ai paragrafi precedenti, sono stati stimati per i vari bacini considerati il tempo di ritardo caratteristico Tl e i parametri n e k .

Per il reticolo idrografico non sufficientemente sviluppato da poter definire parametri geomorfologici attendibili (ordine di Horton-Strahler inferiore a 3), il parametro n di Nash e il tempo di ritardo Tl , stimati con la metodologia descritta al paragrafo 4.2, sono rispettivamente $n = 2.636$ e $Tl = 0.479 \cdot A^{0.6025}$. Conseguentemente k è stimato come Tl/n .

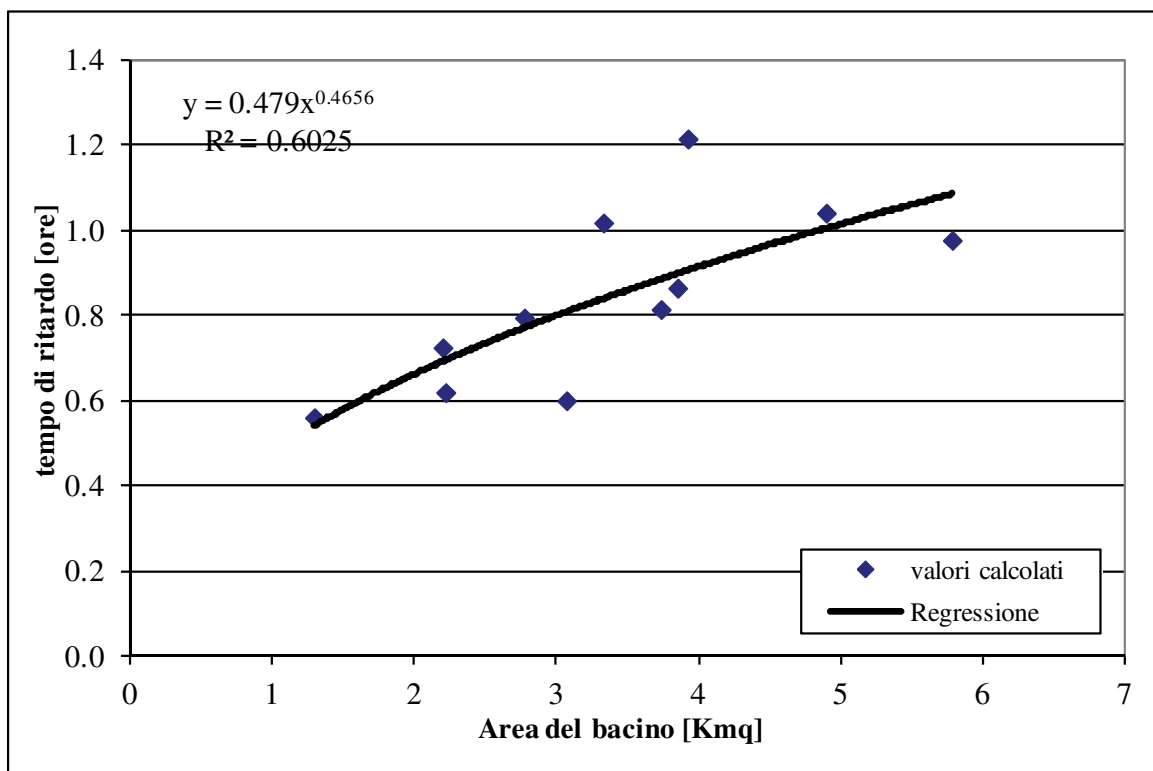


Fig. 4.9: formula di regressione dei tempi di ritardo

Per il modello infiltrazione, basato sulla perdita unitaria iniziale I_a [mm] e sulla velocità di infiltrazione K_s [mm/h], i relativi valori sono stati stimati tramite le procedure di regionalizzazione precedentemente descritte e facendo riferimento ai database della Carta

dell'uso e della copertura dei suoli e della Carta geologica regionale (classi litologiche) della Regione Toscana.

Per quanto riguarda il borro di San Cipriano sono stati acquisiti i risultati dello studio a supporto del Regolamento Urbanistico del Comune di Figline ed Incisa Valdarno, determinati con il software HMS della U.S. Army Corps of Engineering secondo il seguente schema di calcolo semi-distribuito.

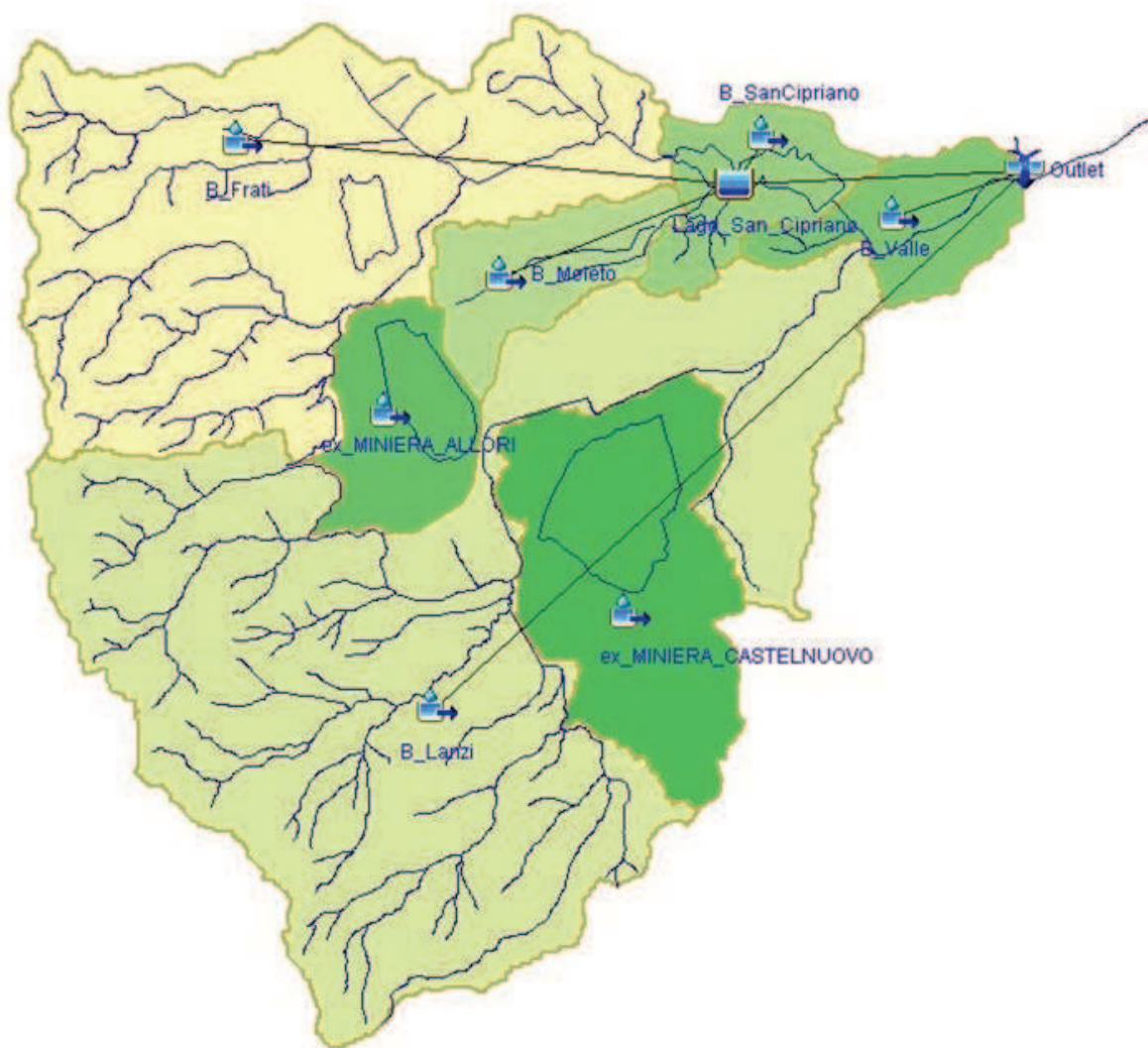


Fig. 4.10: bacino del torrente San Cipriano

Per il modello di infiltrazione secondo il metodo SCS-CN precedentemente descritto, è stato fatto riferimento ai database della Carta dell'Uso e della Copertura dei Suoli e della Carta Geologica Regionale (classi litologiche) della Regione Toscana.

Per ciascun sottobacino della schematizzazione semi-distribuita, i parametri R e t_c del modello di formazione dei deflussi secondo lo schema di Clark sono stati calibrati implementando i modelli idrologici dei singoli sottobacini nelle loro condizioni naturali, prima della realizzazione degli invasi artificiali, ed imponendo l'uguaglianza degli idrogrammi con quelli stimati dal modello di Regionalizzazione delle Piene del Toscana (Al.To.) [7]. Definiti i parametri, le attuali condizioni del bacino sono state simulate inserendo nel modello le modifiche al reticolo, il lago e i bacini artificiali conseguenti all'attività estrattiva. Le caratteristiche delle opere di scarico del lago artificiale sono stati acquisiti da Enel, gestore delle opere.

Ai fini della modellazione del fiume Arno e delle casse di espansione nello stato di progetto per le durate 12, 18, 24 e 36 ore, è stato valutato di non utilizzare alcun modello idrologico per le aree interne alle casse di espansione, bensì di considerare che tutta la precipitazione ragguagliata venga invasata nel volume utile delle cassa insieme alle acqua sfiorate dalle opere di presa.

Al contrario, per il dimensionamento di specifiche opere sul reticolo interno alla cassa Prulli, la stima delle portate per le durate da 0.2 a 4 ore è stata effettuata secondo la metodologia descritta al § 4.4.

Nell'elaborato PD_D_PR_02__R_R00 “ Allegato alla Relazione idrologico-idraulica - Sollecitazioni idrologiche” sono riportati i dati di input ed output delle analisi sopra descritte.

5 MODELLISTICA IDRAULICA

Definiti gli eventi di verifica e la metodologica da utilizzarsi per la schematizzazione dei processi di propagazione e laminazione dell'onda di piena, si è proceduto all'implementazione della modellistica idraulica dei fiumi Arno, dei suoi affluenti e delle relative aree di esondazione.

In analogia con la metodologia utilizzata nella redazione del Piano di Gestione del Rischio da Alluvione, si è optato per una schematizzazione quasi-bidimensionale dei processi di propagazione dell'idrogramma di piena, del tipo proposto da Cunge: ad un modello idraulico non stazionario è associata una rappresentazione “a celle d'accumulo” delle aree potenzialmente esondabili (in seguito APE) adiacenti al corso d'acqua, idraulicamente connesse ad esso e fra di loro.

Lo studio idraulico eseguito nell'ambito della progettazione definitiva ed esecutiva della cassa di espansione Pizziconi I lotto ha dato evidenza che la dinamica di fondo mobile e il trasporto solido influenzano scarsamente il regime idraulico del fiume Arno. E' stato pertanto ritenuto non necessario per il presente livello di progettazione eseguire ulteriori approfondimenti.

Il modello idraulico è stato sviluppato attraverso il software Hec Ras 4.1, di cui si riportano di seguito una breve descrizione [22, 23]. Inoltre, ai fini di determinare con maggiore precisione il limite delle esondazioni nelle aree sede della cassa di espansione, è stato implementato un modello in moto vario bidimensionale con il software Hec Ras 5.0 [27].

Nei successivi paragrafi sono presentati i dettagli delle scelte progettuali fatte e del set di dati utilizzati nella modellistica idraulica.

5.1 IL MODELLO IDRAULICO DI MOTO VARIO HEC-RAS 4.1

Le simulazioni idrauliche in moto vario sono state condotte sulla base della discretizzazione numerica delle equazioni di moto, che fornisce i livelli idrici in ciascuna sezione di calcolo tenendo conto delle eventuali transizioni tra corrente veloce e corrente lenta.

Il modello matematico di moto vario unidimensionale a fondo fisso risolve, in forma numerica, le equazioni di continuità e del moto per una corrente liquida in condizioni non stazionarie. Assumendo la gradualità spazio-temporale del fenomeno, la perdita di carico effettivo sono stimate con una delle equazione di moto uniforme disponibili (Manning o Gauckler-Strickler). Per includere nel modello gli effetti dissipativi indotti da variazioni di sezione, quali allargamenti o restringimenti, sono valutate le perdite di carico localizzate attraverso i coefficienti di contrazione ed espansione.

Al modello unidimensionale, capace di rappresentare adeguatamente il moto in alveo e in aree golenale di limitata dimensione, è accoppiato un sistema di celle d'invaso secondo lo schema di Cunge: il modello matematico di moto vario simula i processi di trasferimento e laminazione in alveo; l'accumulo dei volumi di esondazione nelle aree golenali più ampie o arginate viene invece studiato attraverso la definizione di celle caratterizzate da una propria legge d'invaso, che scambiano volumi d'acqua tra loro e con il corso d'acqua attraverso dei collegamenti idraulici schematizzati come soglie sfioranti libere o rigurgitate. Le celle di accumulo sono definite sulla base delle caratteristiche morfologiche del territorio in modo che lo schema di stramazzo in parete grossa delle suddette soglie sfioranti possa essere considerato valido. Con riferimento alla modellazione delle strutture arginali, il programma permette di tener in conto della variazione geometrica nel tempo delle stessi in occasione di eventi di rottura (breach).

Il fenomeno di invaso avviene in modo sincrono, cioè viene trascurato il tempo reale di propagazione sul terreno dei volumi esondati. Le modalità di riempimento sono regolate dalle caratteristiche degli sfioratori di collegamento tra le celle che, in funzione della quota, della lunghezza e del coefficiente di efflusso, influenzano la velocità di riempimento della cella successiva. Sono comunque trascurati gli effetti di non stazionarietà e bidimensionalità connessi al fenomeno di propagazione del fronte d'inondazione.

Per quelle aree golenali in cui, per le ridotte dimensioni trasversali, per la morfologia del piano campagna e per l'assenza di arginature, non appare adeguata una modellazione con celle di accumulo, è possibile definire, all'interno di ciascuna sezione idraulica, un'area attiva e una inattiva: la prima contribuyente al deflusso, la seconda preposta all'accumulo temporaneo di volumi d'acqua. Il modello matematico di moto vario utilizza nell'equazione

di continuità l'area totale e nell'equazione del moto la sola area attiva, con l'accorgimento di non considerare come perimetro bagnato la superficie di contatto tra i due tipi di area.

In corrispondenza dei ponti e per livelli idrici inferiori all'intradosso, il programma permette il calcolo con il metodo del bilancio energetico e con il teorema della quantità di moto. Il primo, basato sulla risoluzione delle suddette equazioni di continuità e del moto, sottrae nel calcolo dell'area liquida delle sezioni del ponte le parti occupate dalla struttura, ed aggiunge, nella determinazione del perimetro bagnato, le superficie del ponte in contatto con l'acqua.

Il teorema della quantità di moto, particolarmente appropriato in presenza di pile, applica l'equazione di conservazione della quantità di moto.

Nel caso di livelli idrometrici che superino le quote di intradosso o di estradosso dei ponti, le simulazione idrauliche dei ponti possono essere effettuati con il bilancio energetico o usando le equazioni di deflusso, libero o rigurgitato, per luce a battente e/o per luci sfioranti.

Per la simulazione delle condotte (opere di altezza limitata rispetto ai livelli idrometri attesi alla sezione di ingresso) il programma Hec-Ras calcola l'energia necessaria a monte per avere una determinata portata attraverso l'opera, sia nei casi in cui la sezione di controllo si trovi all'ingresso (*inlet control*), sia quando detta sezione è posta all'uscita (*outlet control*).

Nel primo caso le equazioni adottate sono quelle emerse dai test di laboratorio effettuati dal NBS (1961) e BPR degli Stati Uniti, distinguendo i casi di imbocco sommerso e imbocco non sommerso. Nel secondo caso l'equazione di Bernoulli è applicata al fine di compiere un bilancio energetico fra le sezioni di imbocco e di uscita.

Tra le condizioni di inlet e outlet control è in generale quella che possiede il carico di monte più alto a determinare il tipo di moto all'interno della condotta per una data condizione di valle. Se, durante l'elaborazione, la domanda energetica del funzionamento in inlet control risulta maggiore di quella di outlet control, il programma valuta se le condizioni di controllo in ingresso possono effettivamente persistere attraverso il condotto senza porlo in pressione. Infatti, se questo funziona completamente in pressione, il programma adotta necessariamente il metodo di outlet control.

Il funzionamento idraulico di soglie e briglie in alveo è tenuto in conto attraverso l'adozione della legge di stramazzo in parete grossa, con coefficiente di efflusso definito dall'utente e variabile in funzione del grado di rigurgito secondo il seguente coefficiente correttivo.

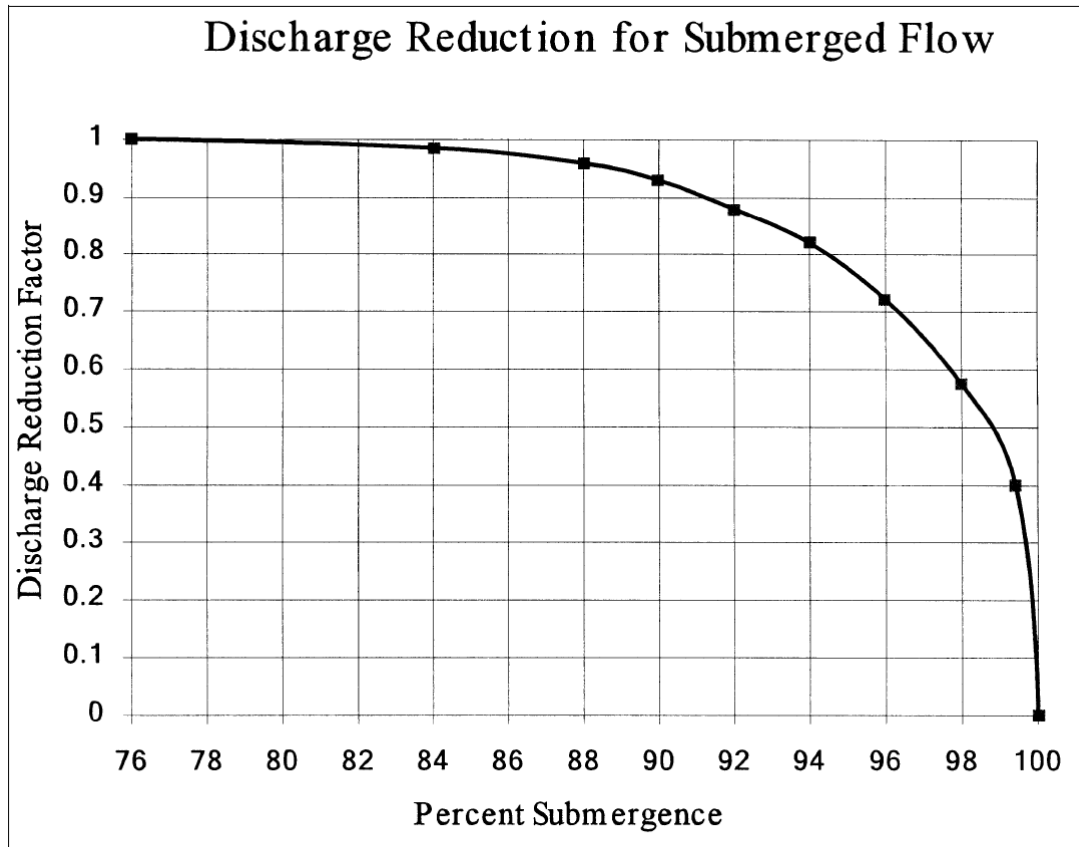


Fig. 5.1: coefficiente di riduzione del coefficiente di efflusso per stramazzi in parete grossa rigurgitati

Relativamente alle opere di regolazione mobili, quali ad esempio le paratoie piane previste nel presente progetto, il programma utilizza l'equazione di stramazzo in parete grossa qualora il carico idrico a monte della paratia sia inferiore alla luce della stessa. Per carichi superiori del 25 % della luce viene utilizzata l'equazione di luce a battente libera o rigurgitata. Nella fase transitoria si ha un graduale transizione tra le due formule.

Relativamente all'equazione di luce battente libero o rigurgita, la prima è utilizzata fino ad un rapporto tra carico di valle e carico di monte inferiore al 67%, la seconda per un rapporto superiore all'80%; tra i due valori si ha un graduale transizione tra le due formule.

Per la risoluzione del sistema di equazioni è necessario conoscere le condizioni al contorno sia a monte che a valle. Le prime sono imposte attraverso un idrogramma di

livelli/portate. Le seconde possono invece essere costituite da un idrogramma dei livelli/portate o da una scala di deflusso.

Per maggiori dettagli sul modello di calcolo e sulle equazioni utilizzate si rimanda ai manuali del programma Hec-Ras.

5.2 IL MODELLO IDRAULICO DI MOTO VARIO BIDIMENSIONALE HEC-RAS 5.0

Per una più dettagliata modellazione degli allagamenti allo stato attuale nell'area interessata dalla realizzazione della cassa di espansione risulta necessaria l'introduzione di modelli bidimensionali, per la corretta rappresentazione del flusso idrico in direzione ortogonale rispetto a quella dell'alveo.

In particolare, le equazioni che descrivono il moto bidimensionale nel software sono quelle di De Saint Venant (DSV), dette anche shallow water equations (SWE), derivate a partire dalla formulazione completa di Navier Stokes.

Le equazioni si ottengono imponendo la conservazione della massa (equazione di continuità) e della quantità di moto nelle due direzioni principali x e y all'interno di un generico volume di controllo. Il software HEC-RAS 5.0 e versioni successive permette la modellazione bidimensionale del flusso idrico sia utilizzando le equazioni complete di De Saint Venant, sia il modello semplificato diffusivo; oltre alla modellazione bidimensionale dell'intero dominio di studio, è possibile eseguire simulazioni integrando un modello monodimensionale 1D, ad esempio per l'alveo inciso, e un modello bidimensionale 2D per le aree golenali e di esondazione.

La risoluzione prevede l'applicazione delle equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto per ogni cella in cui si è suddiviso il dominio, utilizzando generalmente metodi numerici alle differenze finite o a volume finito. Al termine della procedura di calcolo, sono da verificare la convergenza e la stabilità della soluzione, riferendosi ad esempio al criterio di Courant.

In alcuni casi la complessità della trattazione porta all'introduzione di alcune semplificazioni alle equazioni di de Saint Venant tralasciando i termini inerziali relativi alle accelerazioni locali e convettive: questa semplificazione riconduce all'analisi del modello diffusivo, a vantaggio di un minore onere computazionale e di una maggiore stabilità della soluzione.

Dato che nel modello diffusivo la variazione del pelo libero risulta bilanciata soltanto dalla resistenza in alveo, il suo utilizzo è consigliabile soprattutto in analisi che presentano variazioni di portata gradualmente e piccole pendenze del terreno, in cui i termini legati alle accelerazioni locali e convettive sono meno influenti sul risultato finale.

Nel Dominio 2D occorre creare una mesh computazionale definendo la massima dimensione delle celle e assegnando le condizioni al contorno e i valori di resistenza al moto secondo. Le celle possono avere sia elementi rettangolari o quadrati (celle strutturate) sia elementi triangolari o quadrilateri con dimensioni diverse (celle non strutturate); in generale, HEC-RAS non permette la creazione di una cella con più di otto lati. In alcuni casi, come in presenza di ostacoli o di elevate pendenze del terreno, è possibile infittire manualmente la mesh iniziale, in modo da giungere a soluzioni numeriche più precise. Inoltre l'inserimento di "break line" in corrispondenza di linee di discontinuità (es. rilevati, cigli di sponda, ecc.) permette di ottimizzare l'orientamento delle celle con conseguente ottimizzazione computazionale.

Per le mesh 2D possono essere utilizzate le stesse condizioni al contorno già segnalate per il modello monodimensionale: variazione della portata in funzione del tempo (Flow Hydrograph), variazione del livello idrico in funzione del tempo (Stage Hydrograph), altezza di moto uniforme (Normal Depth) oppure scala di deflusso (Rating Curve). Ciascuna mesh inoltre necessita della definizione di condizioni iniziali in termini di livello idrico che può essere non costante sull'intero dominio.

I metodi numerici di risoluzione utilizzabili nel software sono quindi il modello diffusivo (che può utilizzare sia mesh strutturate che non strutturate e modello di risoluzione alle differenze finite o al volume finito) e il metodo DSV completo, che utilizza mesh di qualsiasi tipo e metodo di risoluzione al volume finito.

Sia il metodo alle differenze finite che al volume finito utilizzano lo schema risolutivo semi-implicito generalizzato di Crank-Nicholson; il vantaggio di questo tipo di formulazione riguarda l'ottima flessibilità del modello alle differenze finite, garantita dalla possibilità di variare il fattore di stabilità/accuratezza Theta fra i valori 0.6 e 1.

In una simulazione di moto vario, comunque, il parametro più significativo da considerare è l'intervallo computazionale ΔT , che deve essere scelto con accuratezza in modo da non influenzare negativamente l'esito delle analisi.

Generalmente questo valore viene valutato basandosi sul criterio di Courant, esprimibile nel modo seguente:

$C=V\Delta T/\Delta X \leq 1$ nel modello DSV e $C=V\Delta T/\Delta X \leq 2$ nel modello diffusivo

dove V è la velocità massima dell'acqua valutata nei nodi della mesh e ΔX la dimensione media delle celle.

Per maggiori dettagli sul modello di calcolo e sulle equazioni utilizzate si rimanda ai manuali del programma Hec-Ras.

5.3 LA DIGA DI BILANCINO SUL FIUME SIEVE

Prima di passare alla descrizione delle simulazioni idrauliche eseguite, occorre presentare le caratteristiche dell'invaso di Bilancino sul fiume Sieve e la stima degli effetti di laminazione che l'invaso produce sulle piene in conseguenza dell'attuazione del Piano di laminazione [44] approvato dalla Regione Toscana con decreto n. 14777/2018.

Come anticipato in precedenza, il fiume Sieve un elemento di notevole importanza per la formazione delle piene del fiume Arno a Firenze: con un bacino di estensione di circa 837 Km², prevalentemente montano e sostanzialmente privo di significative aree di laminazione lungo il basso corso (Val di Sieve), confluisce nel fiume Arno presso Pontassieve, pochi chilometri a monte di Firenze. Le caratteristiche idrografiche e idrologiche del bacino, nonché la sua particolare ubicazione, comportano che piene particolarmente significative nel tratto fiorentino possano generarsi solo dalla sovrapposizione dei picchi di portata di Arno e Sieve.

Ciò considerato, è stato ritenuto utile implementare uno specifico modello idraulico del fiume Sieve tra l'invaso di Bilancino e la confluenza che tenesse conto degli effetti di laminazione di quest'ultimo. Il sopra citato Piano di laminazione della diga garantisce infatti circa 10 Mm³ di vasca per la laminazione delle piene al di sotto della quota di massima regolazione, oltre circa 15 Mm³ tra quest'ultima e la quota di massimo vaso.

5.3.1 DESCRIZIONE

Lo sbarramento della diga è ubicato nell'alto corso del fiume Sieve e sottende un bacino imbrifero di circa 150 Km².

I dati caratteristici della diga sono di seguito riportati:

Dati generali

Quota coronamento	259.0 m slm
Quota massimo invaso	254.5 m slm
Volume massimo invaso	$84 \cdot 10^6$ mc
Superficie massimo invaso	6.8 Km ²
Quota massima regolazione	252.0 m slm
Volume massima regolazione	$69 \cdot 10^6$ mc
Superficie massima regolazione	4.9 Km ²
Volume per laminazione piene (sopra la quota di massima regolazione)	$15 \cdot 10^6$ mc

Soglia fissa

Lunghezza	75 m
Quota	252.0 m slm
Portata massima (h=254.5 m slm)	650 mc/s

Paratia a ventola

Lunghezza	12 m
Quota base	249.0 m slm
Altezza	3 mc/s
Portata massima (h=254.5 m slm)	288 mc/s

Scarichi di fondo

Numero elementi	2
Larghezza (cad)	2.8 m
Altezza (cad)	4.2 m
Portata massima (h=254.5 m slm)	260 mc/s



Fig. 5.2: soglia fissa della diga di Bilancino



Fig. 5.3: paratoia a ventola della diga di Bilancino

La legge d'invaso che correla la quota H e il volume invasato V è rappresentata dal grafico e dalla tabella di seguito riportati:

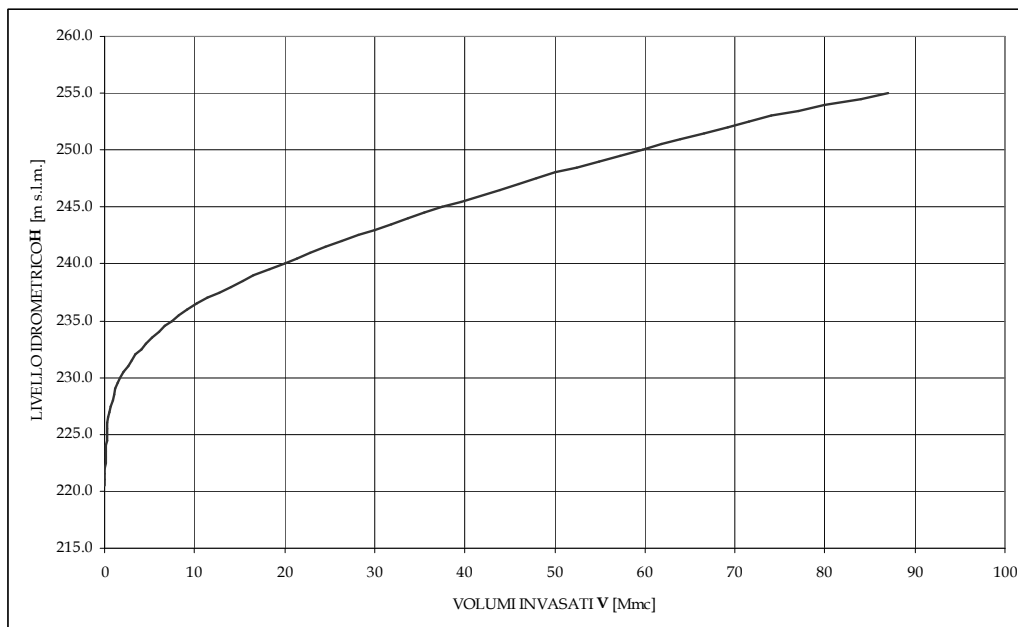


Fig. 5.4: curva d'invaso della diga di Bilancino

VOLUME [mc]	QUOTA [m s.l.m.]
37.428.000	245,0
39.571.000	245,5
43.857.000	246,5
46.000.000	247,0
48.000.000	247,5
50.000.000	248,0
52.428.500	248,5
54.857.000	249,0
57.285.500	249,5
59.714.000	250,0
61.857.000	250,5
64.000.000	251,0
66.571.000	251,5
69.142.000	252,0
71.571.000	252,5
74.000.000	253,0
77.000.000	253,5
80.000.000	254,0
84.000.000	254,5
87.000.000	255,0

Tab. 5.1: curva d'invaso della diga di Bilancino

5.3.2 IL PIANO DI LAMINAZIONE 2018

L'invaso di Bilancino è stato realizzato con obiettivi di multifunzionalità: risorsa idropotabile, laminazione delle piene, sostegno al minimo deflusso vitale, approvvigionamento per l'attività agricola, ricreativo. La definizione del Piano di laminazione ha dovuto affrontare la necessità di contemperare i vari obiettivi, addivenendo alla formulazione di gestione statica, che prevede il mantenimento del livello di vaso a 250 m s.l.m.m. per il periodo Ottobre-Gennaio e a 251 m s.l.m.m. per il periodo Febbraio-Marzo.

Quanto appena prospettato risulta il miglior compromesso possibile tra gli obiettivi "contrapposti" di laminazione delle piene e utilizzo idropotabile dell'invaso (e quindi disponibilità di volumi idrici). In tal modo, nel periodo statisticamente più critico in termini di afflussi meteorici (Ottobre-Gennaio) si mantiene un volume di laminazione aggiuntivo di 10 Mmc, mentre nel periodo che solitamente presenta picchi di precipitazioni inferiori a quelli autunnali (Febbraio-Marzo) si mantiene comunque un volume di laminazione aggiuntivo di 5M mc. Inoltre, in quest'ultimo periodo, in previsione di eventi meteorici particolarmente intensi è possibile una gestione dinamica d'emergenza attraverso lo svaso preventivo per reperire ulteriori volumi utili alla laminazione.

La portata massima esitabile tale da non creare criticità lungo l'asta del fiume Sieve è di 75 mc/s. Con un preavviso di almeno 12-24 ore, sufficientemente attendibile per eventi critici alla scala dei bacini dei fiumi Sieve e Arno, è possibile incrementare il volume di laminazione di ulteriori 3.24÷6-48 Mmc.

Nell'ipotesi di laminazione statica, si devono prevedere le seguenti fasi:

- All'inizio della stagione meteo autunnale (1 ottobre) la paratoia a ventola viene alla quota 250 m s.l.m., in modo che l'invaso non possa superare tale livello di riempimento. Se l'invaso si dovesse trovare a quota superiore il Gestore dovrà provvedere ai necessari svassi controllati (attraverso la paratoia a ventola e lo scarico di esaurimento) per riportarsi nelle condizioni di cui sopra. Dati disponibili dal 2003 ad oggi, al 1 ottobre, dopo lo sfruttamento estivo, la quota d'invaso è sempre stata rilevata molto inferiore (tra 246.0 e 248.5 m s.l.m.) a 250 m slm. Tale quota è stata raggiunta sempre dopo la conclusione del mese di ottobre e spesso anche dopo il mese di Novembre.

- Il primo febbraio il Gestore provvederà a innalzare la paratoia per mantenere un livello di invaso non superiore a 251 m s.l.m. fino al 31 marzo.
- Per entrambi i casi sopra elencati, in previsione di un evento di piena significativo, con emissione di allerta arancione o rossa, il Gestore provvederà ad innalzare la paratoia a ventola fino alla quota di 252 m s.l.m. per poter avere a disposizione il volume di laminazione rispettivamente di 10 Mmc (tra ottobre e gennaio) e 5 Mmc (tra febbraio e marzo). Le manovre della paratoia a ventola sono effettuate nei tempi previsti dal protocollo operativo che verrà redatto dalla Regione Toscana.
- Nel periodo primavera-estate (con invaso alla quota di massima regolazione 252 m s.l.m.) o quando ritenuto opportuno dall'Autorità Idraulica competente, si può ipotizzare uno scenario di uso **dinamico** qualora si dovesse presentare, un evento tale da richiedere un consistente volume per la laminazione (probabilità piuttosto bassa).

A seguito di evento e di conseguente utilizzo, in tutto o in parte, dell'ulteriore volume di laminazione previsto (circa 10 Mmc, corrispondenti alla differenza di quota tra 250 m e 252 m, ovvero circa 5 Mmc, corrispondenti alla differenza di quota tra 251 m e 252 m,) e per garantire la disponibilità dell'ulteriore volume di laminazione previsto anche in occasione del possibile susseguirsi di più eventi meteorologici significativi nel bacino di alimentazione dell'invaso, il Gestore, in accordo con l'Autorità idraulica competente e con il Centro Funzionale Regionale, dovrà predisporre un adeguato **piano di svaso**, compatibile con la massima portata transitabile in sicurezza nell'alveo di valle, per recuperare i volumi di laminazione utilizzati e riportarsi alla quota indicata a seconda del periodo dell'anno in cui ci si viene a trovare. Il Piano di svaso da predisporre dovrà tener conto del ripristino del volume di laminazione ulteriore in due diverse situazioni:

- nell'arco di 1 giorno, nel caso sia previsto a breve distanza temporale un altro evento meteorologico significativo che possa "impegnare" nuovamente il volume di laminazione previsto;
- nell'arco di un intervallo di tempo ritenuto congruo dall'Autorità Idraulica e dal Centro Funzionale Regionale, nel caso le previsioni meteorologiche non prevedano a breve un

nuovo evento meteorologico significativo che possa “impegnare” nuovamente il volume di laminazione previsto.

Il piano di svasso dovrà far parte del protocollo operativo già in precedenza richiamato che verrà predisposto da Regione Toscana.

Periodo	Modalità	Volume recuperato per la laminazione [M mc]	Volume totale a disposizione per la laminazione [M mc]
1 ottobre – 31 gennaio	<u>Laminazione statica:</u> Mantenimento livello alla quota 250 m s.l.m.m.	~ 10	~ 25
1 febbraio – 31 marzo	<u>Laminazione statica:</u> Mantenimento livello alla quota 251 m s.l.m.m.	~ 5	~ 20
1 aprile – 1 ottobre	<u>Laminazione dinamica:</u> svaso preventivo di 128 m ³ /s da iniziare 6 ore prima dell’inizio dell’evento se livello di invaso pari a 252 m s.l.m.m.	~ 3	~ 18

Tab. 5.2: schema riassuntivo di gestione della diga di Bilancino

5.3.3 STIMA DEGLI EFFETTI DI LAMINAZIONE DELLA DIGA

L’effetto della laminazione dipende dalla differenza fra gli afflussi e i deflussi ed è rappresentabile attraverso la legge di conservazione della massa per passi temporali discreti

$$\Delta V = (Q_i - Q_u) \Delta t$$

dove ΔV è il volume accumulato nel serbatoio nell’intervallo di tempo Δt , Q_i e Q_u rispettivamente la portata in ingresso e quella in uscita.

La portata in ingresso è valutata attraverso l’idrogramma alla sezione di chiusura prima della costruzione dell’opera; quella in uscita attraverso la legge di stramazzo libero

$$Q = \mu L h \sqrt{2gh}$$

dove h rappresenta il carico sulla soglia di stramazzo, μ il coefficiente di deflusso e L la larghezza della soglia. Il carico sulle soglie è determinato utilizzando la legge d'invaso.

Per la soglia fissa con profilo Scimeni-Creager è stato utilizzato un coefficiente di efflusso pari a 0.47; per la paratoia a ventola 0.4 [38, 40]. In entrambi i casi lo stramazzo non può essere rigurgitato in considerazione della quota e dimensione del canale fuggatore.

Le equazioni citate sono state usate in un procedimento di calcolo iterativo assumendo Δt di 5 minuti, intervallo di tempo le portate possono essere considerate costanti.

La laminazione dell'idrogramma di piena dipende dalla quota iniziale di invaso e dalla legge di asservimento della paratoia mobile per le quali è stato fatto riferimento agli scenari previsti dal Piano di laminazione precedentemente descritto. Le simulazioni sono state eseguite per tutte le combinazioni di tempo di ritorno (30, 100, 200 anni), durata dell'evento meteorico (12, 18, 24, 36 ore) e quota iniziale d'invaso (250, 251, 252 m s.l.m.).

Gli idrogrammi in ingresso sono stati valutati secondo la metodologia descritta al § 4. Si ricorda che, poiché l'analisi è finalizzata alla valutazione delle piene nell'abitato di Firenze, il coefficiente di ragguaglio areale utilizzato è calcolato in funzione dell'area dell'intero bacino del fiume Arno a monte.

Gli effetti dell'invaso sulle portate sono valutati a partire dalle seguenti ipotesi:

- non vengono considerate successioni d'eventi; ogni evento di piena è analizzato in forma isolata, indipendentemente, cioè, da eventi precedenti o seguenti;
- non si è tenuto conto della gestione degli scarichi di fondo, che si presume vengano utilizzati per accelerare la fase di svasso del bacino quando ormai le portate sfiorate sono sufficientemente basse;
- la paratoia a ventola è posizionata alla quota di 252.0 m s.l.m. all'inizio dell'evento meteorico;
- l'invaso ha un comportamento statico e il carico cinetico a monte delle soglie di stramazzo è trascurabile.

Le simulazioni idrauliche descritte nei successivi paragrafi fanno riferimento agli scenari con quota iniziale d'invaso di 250.0 m s.l.m.. Tale scelta non è stata ritenuta poco cautelativa per le seguenti considerazioni:

1. statisticamente il periodo nel quale maggiore è la probabilità che manifestino eventi meteorici critici per il bacino del fiume Arno (intensi e di lunga durata) è tra inizio novembre e fine febbraio; per tale arco temporale il piano di laminazione prescrive di mantenere il livello d'invaso a 250.0 m s.l.m.;

2. inoltre, considerato che gli eventi meteorici intensi e di lunga durata su bacini di estese dimensioni sono più facilmente prevedibili, anche grazie alle misure in continuo delle stazioni idrometriche e pluviometriche presenti nel bacino del fiume Arno a monte di Firenze che tarano e aggiornano il modello previsionale regionale, previsioni di piena sufficientemente attendibili sono generalmente disponibili con almeno 12 ore di anticipo. In tale intervallo di tempo è possibile attuare una gestione dinamica d'emergenza dell'invaso attraverso lo svaso preventivo per reperire ulteriori volumi utili alla laminazione sotto quota 250.0 m s.l.m.;
3. in funzione dei dati previsionali e dell'evolversi dell'evento di piena, è possibile una gestione ottimizzata della paratoia a ventola, ad esempio mantenendo costante il livello iniziale d'invaso fino al momento, successivo all'inizio dell'evento meteorico, in cui le portate scariche determinano condizioni critiche a valle. Ciò permetterebbe di preservare volume di laminazione all'inizio dell'evento da impegnare nelle fasi successive;
4. nel periodo estivo il rilascio delle acque per uso idropotabile (almeno circa 0.6 mc/s) comporta un progressivo abbassamento dei livelli. A fine stagione sono sempre state raggiunte quote tra 246.0 e 248.5 m s.l.m..

Si riportano di seguito i risultati delle simulazioni riferiti allo scenario con quota iniziale d'invaso a 250 m s.l.m., dove Q_i e Q_u [mc/s] sono le portate in ingresso e uscita. Dalla loro analisi si evince che, oltre ad una riduzione della portata massima, risultano molto rilevanti l'incremento della durata in cui gli scarichi della diga sono nulli e la riduzione di quella in cui la portata rimane al suo massimo valore.

Il massimo livello raggiunto è di 252.77 m s.l.m. (Tr 200 anni - durata 36 ore), a cui corrisponde un volume di laminazione dinamico di circa 4 Mmc, oltre quello statico (sotto quota 252.0 m s.l.m.) di circa 10 Mmc.

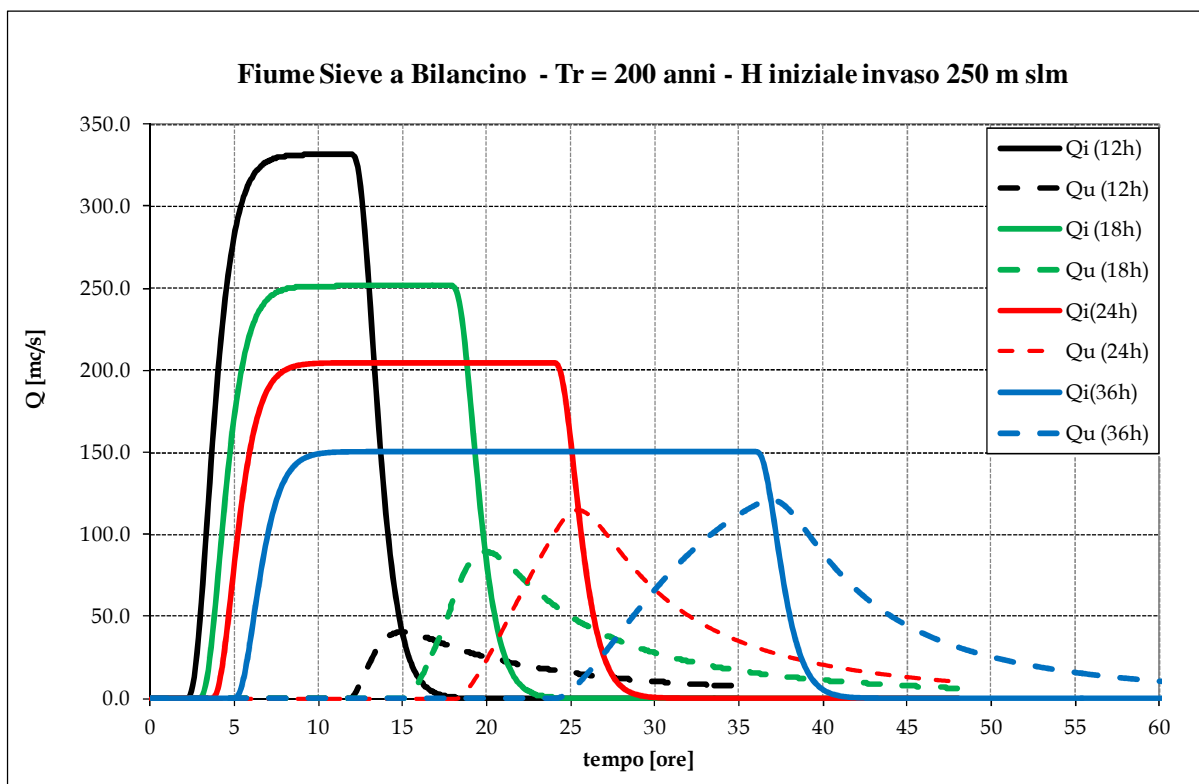


Fig. 5.5a: laminazione della diga di Bilancino per Tr 200 anni e quota iniziale d'invaso 250 m slm

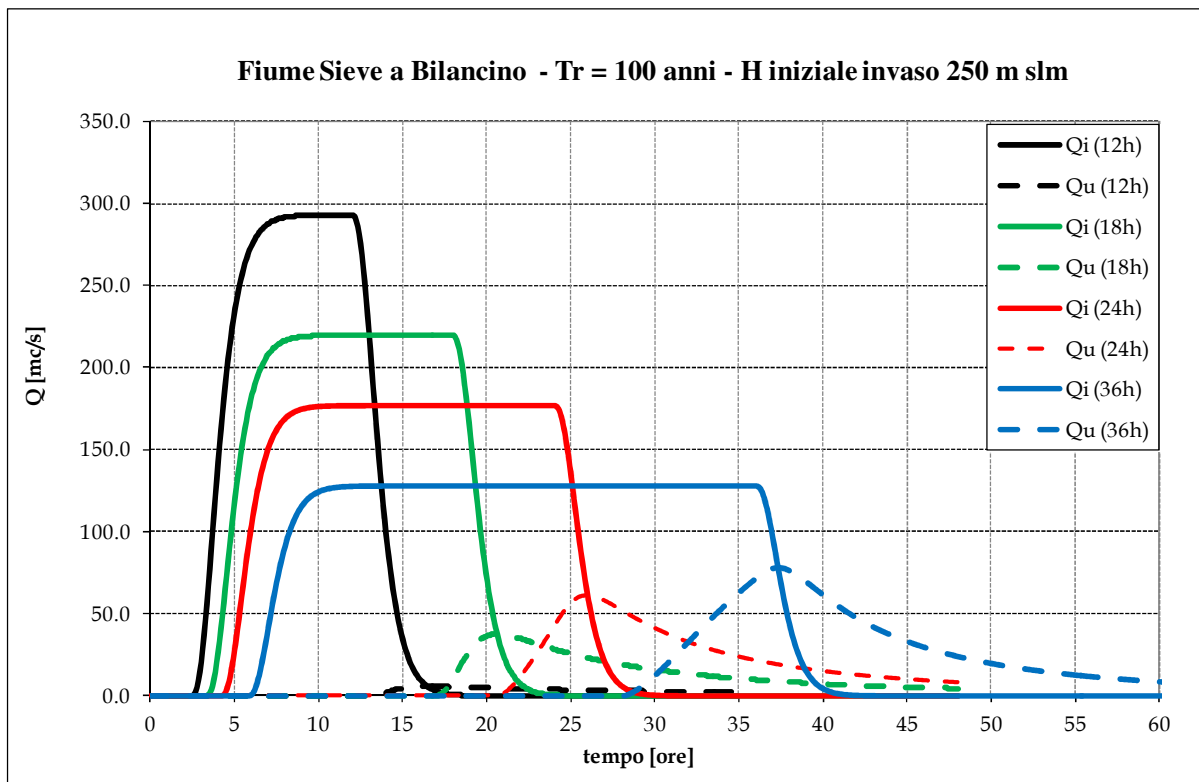


Fig. 5.5b: laminazione della diga di Bilancino per Tr 100 anni e quota iniziale d'invaso 250 m slm

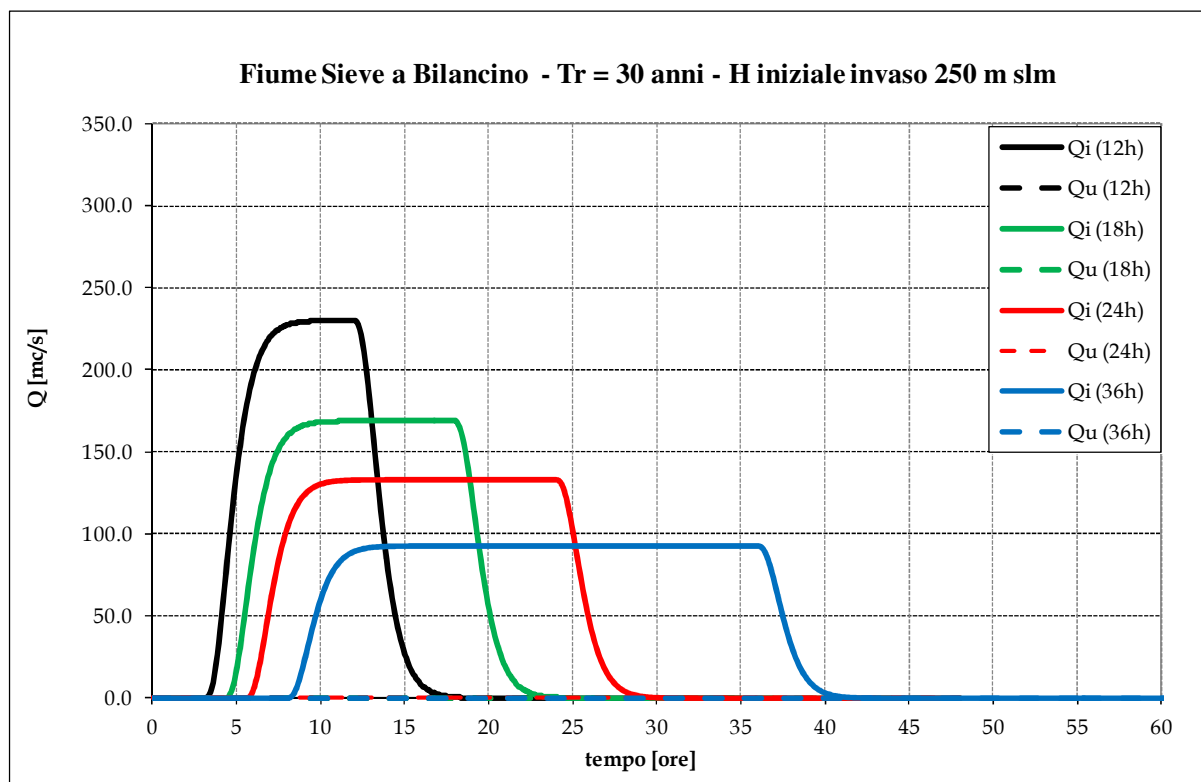


Fig. 5.5c: laminazione della diga di Bilancino per Tr 30 anni e quota iniziale d'invaso 250 m slm

Al variare della quota iniziale d'invaso si hanno i seguenti risultati, dove:

H = quota iniziale d'invaso [m s.l.m.]

Q = portata in ingresso alla diga [mc/s]

Q_{lam} = portata massima laminata dalla diga [mc/s]

$DQ = Q - Q_{lam}$ [mc/s]

Evento	H m slm	Q	Q_{lam}	DQ
Tr200 - 12h	250	331	41	290
Tr200 - 12h	251	331	155	176
Tr200 - 12h	252	331	242	89
Tr200 - 18h	250	251	90	161
Tr200 - 18h	251	251	177	74
Tr200 - 18h	252	251	221	30
Tr200 - 24h	250	204	115	89
Tr200 - 24h	251	204	172	32
Tr200 - 24h	252	204	194	10
Tr200 - 36h	250	150	121	29
Tr200 - 36h	251	150	143	7
Tr200 - 36h	252	150	149	1

Tab. 5.3: Portate massime (Tr 200 anni) in ingresso e uscita da Bilancino al variare della quota iniziale d'invaso

Anticipando i risultati delle verifiche idrauliche descritte nei successivi paragrafi, le tabelle e le figure seguenti sintetizzano gli effetti della diga di Bilancino sul regime di piena del fiume Sieve alla confluenza.

Evento	Q	Q _{lam}	DQ
Tr200 - 12h	1320	1180	140
Tr200 - 18h	1183	964	219
Tr200 - 24h	970	783	187
Tr200 - 36h	693	625	68
Tr100 - 12h	1166	1043	123
Tr100 - 18h	1015	840	175
Tr100 - 24h	829	668	161
Tr100 - 36h	580	480	100
Tr30 - 12h	924	788	136
Tr30 - 18h	760	619	141
Tr30 - 24h	601	478	123
Tr30 - 36h	397	314	83

Tab. 5.4: Portate massime del F. Sieve alla confluenza con quota iniziale d'invaso di Bilancino a 250 m slm

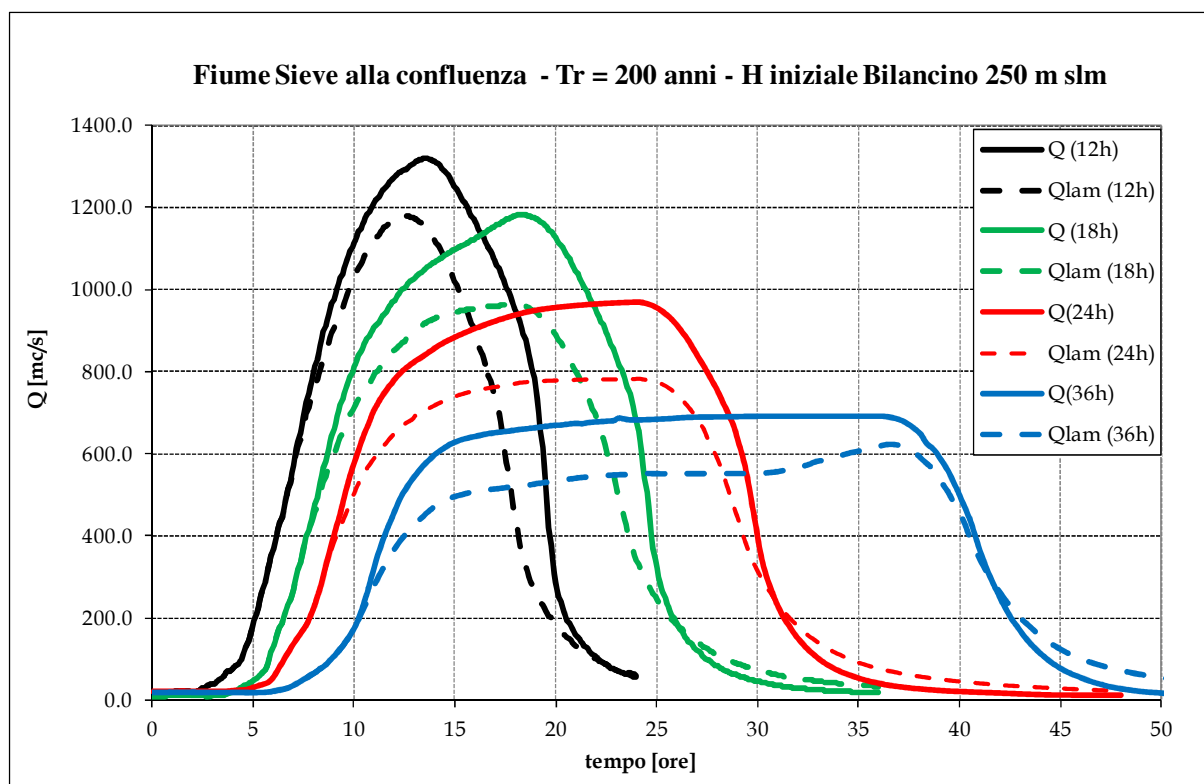


Fig. 5.6a: effetti della diga di Bilancino (quota iniziale d'invaso 250 m slm) alla confluenza del fiume Sieve per Tr 200 anni

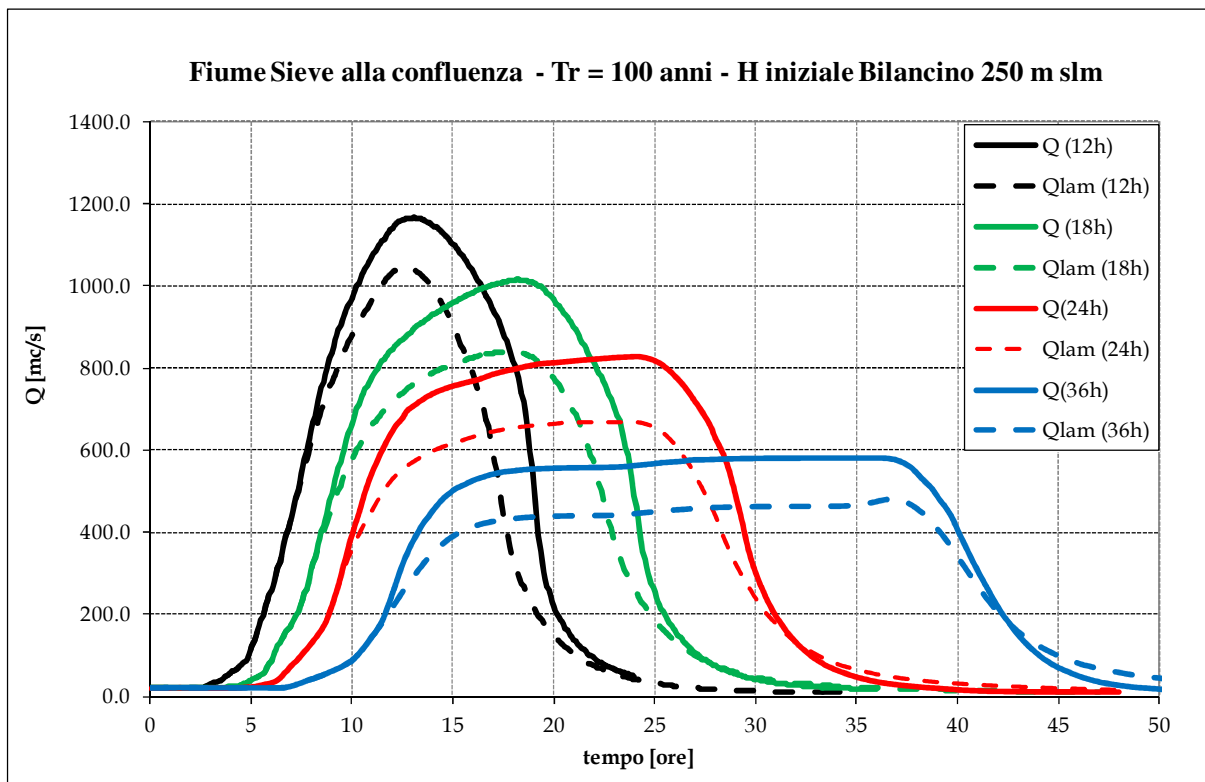


Fig. 5.6b: effetti della diga di Bilancino (quota iniziale d'invaso 250 m slm) alla confluenza del fiume Sieve per Tr 100 anni

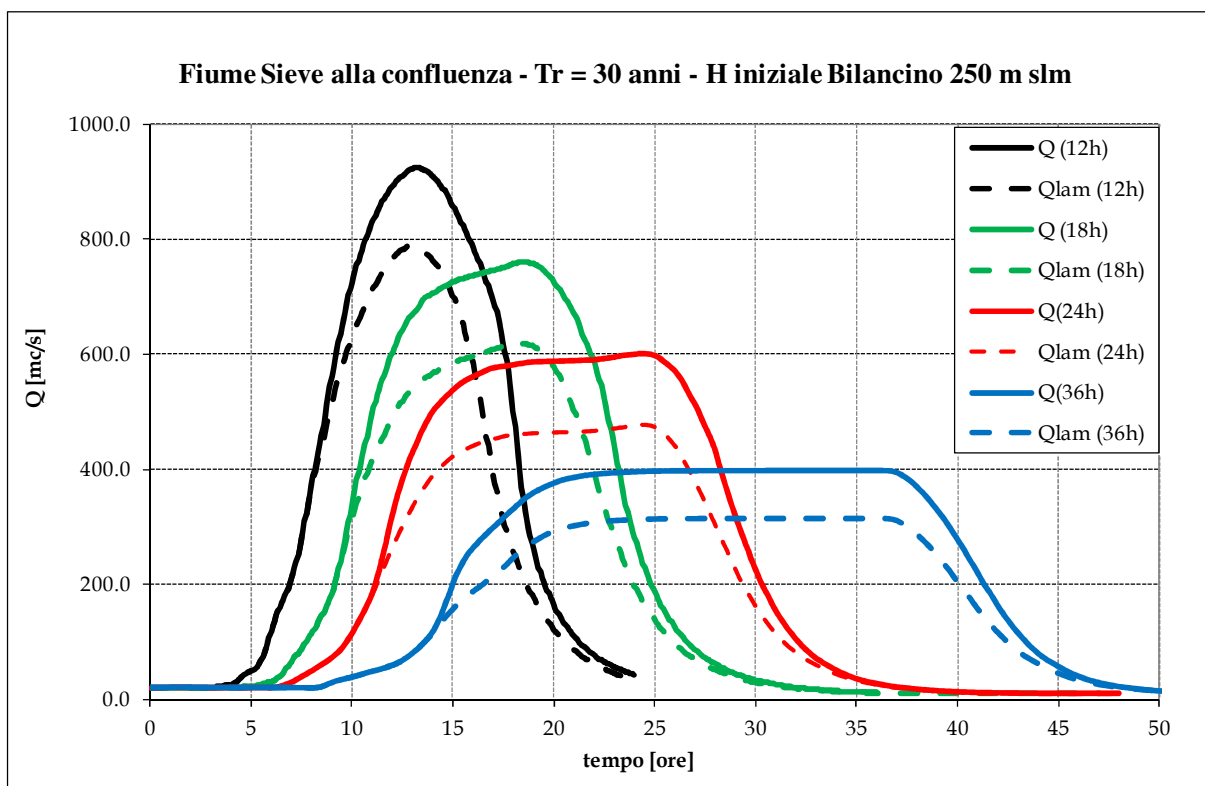


Fig. 5.6c: effetti della diga di Bilancino (quota iniziale d'invaso 250 m slm) alla confluenza del fiume Sieve per Tr 30 anni

Dai grafici sopra riportati si rileva che le portate massime degli affluenti del fiume Sieve a valle della diga si sovrappongono temporalmente con il periodo in cui il volume di laminazione statica sotto quota 252.0 m s.l.m. non è saturo e la diga non rilascia scarichi. Questi, tenuto conto anche che il tempo impiegato per percorrere tutta l'asta del fiume è di circa 4÷5 ore, contribuiscono alla formazione dell'idrogramma alla confluenza soltanto in coda di piena. Soltanto per l'evento duecentennale di durata 36 ore, che presenta il massimo volume, la durata particolarmente lunga dell'evento permette che gli scarichi della diga siano in parte in fase con le portate massime degli affluenti del fiume Sieve.

Per il tempo di ritorno duecentennale la riduzione della portata varia tra 219 mc/s (durata 18 ore) e 68 mc/s (durata 36 ore).

Gli risultati stimati alla confluenza del fiume Sieve al variare della quota iniziale dell'invaso di Bilancino sono mostrati nelle figure e tabelle seguenti.

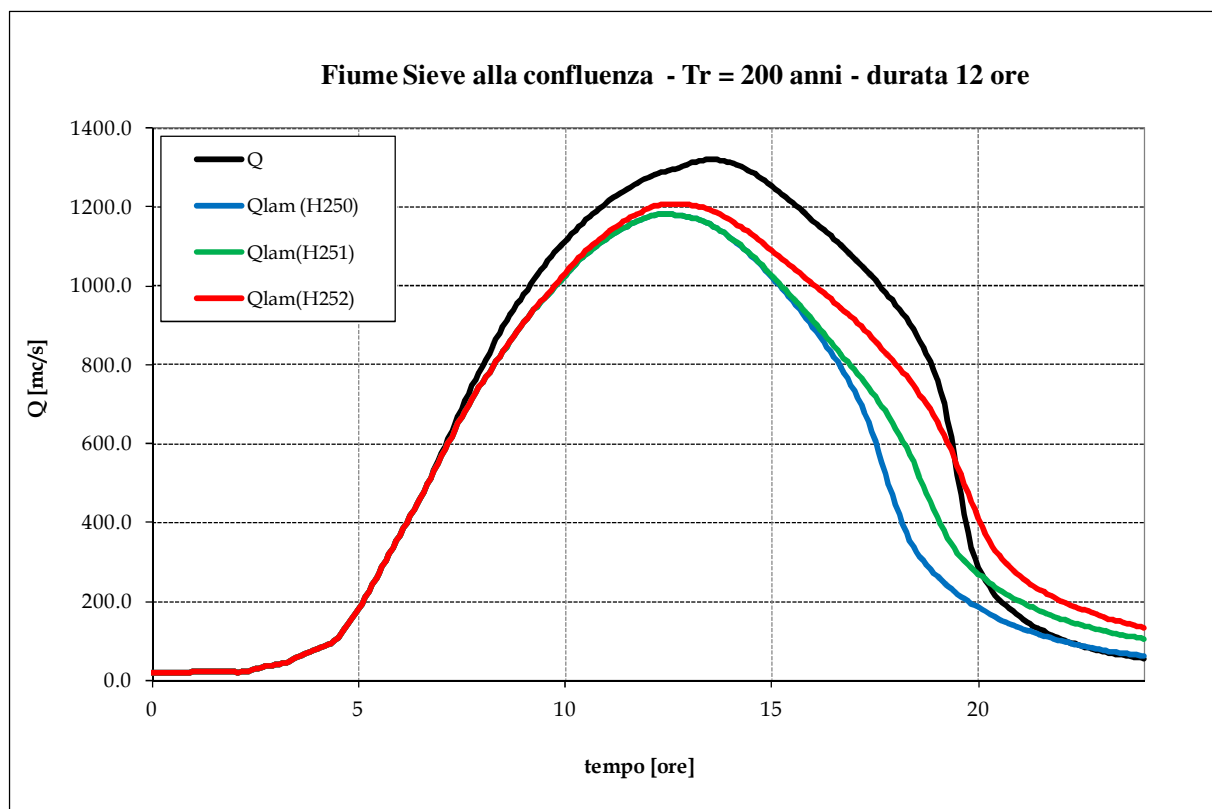


Fig. 5.7a: effetti della diga di Bilancino (al variare della quota iniziale d'invaso) alla confluenza del fiume Sieve per Tr 200 anni e durata 12 ore

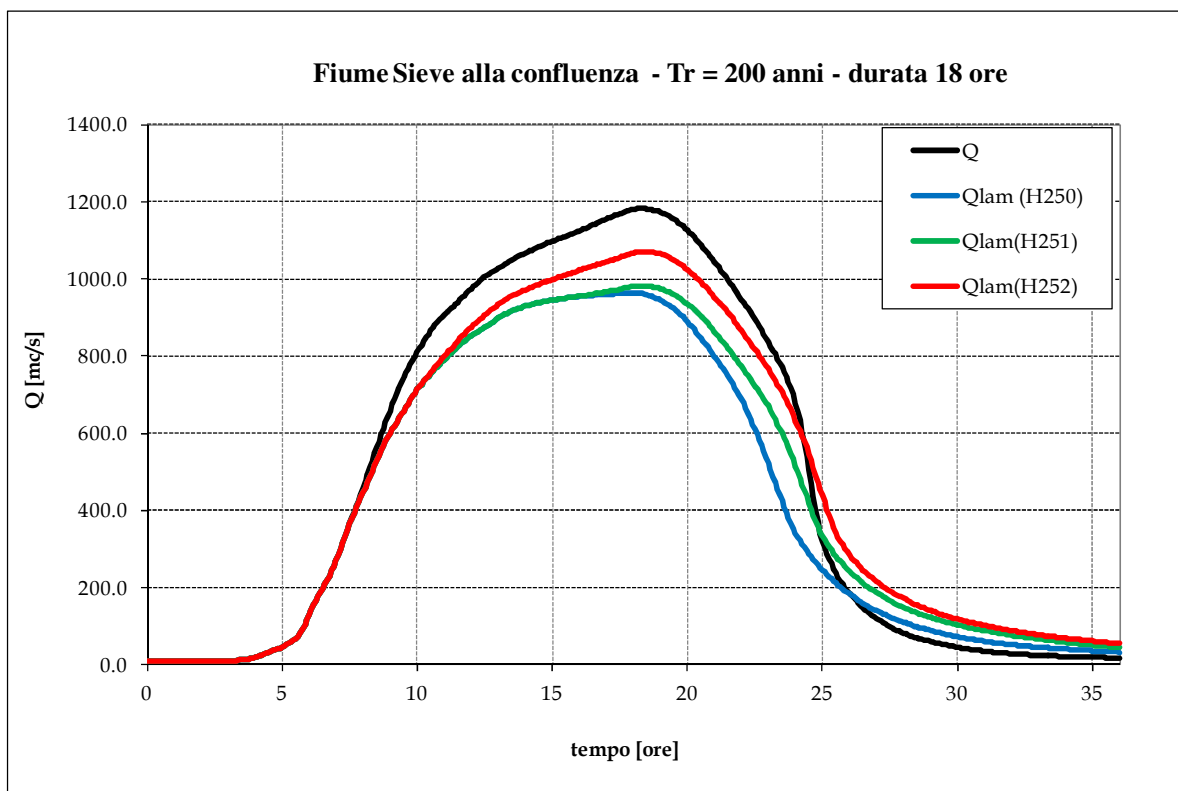


Fig. 5.7b: effetti della diga di Bilancino (al variare della quota iniziale d'invaso) alla confluenza del fiume Sieve per Tr 200 anni e durata 18 ore

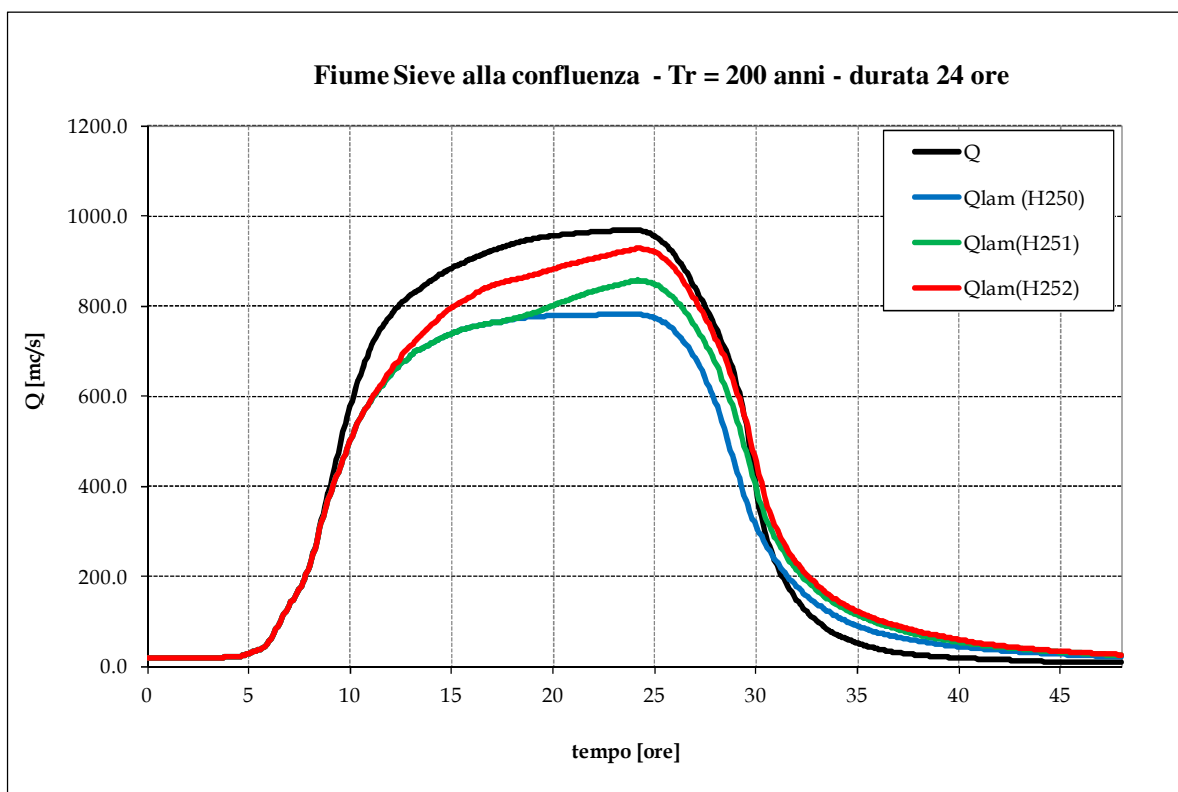


Fig. 5.7c: effetti della diga di Bilancino (al variare della quota iniziale d'invaso) alla confluenza del fiume Sieve per Tr 200 anni e durata 24 ore

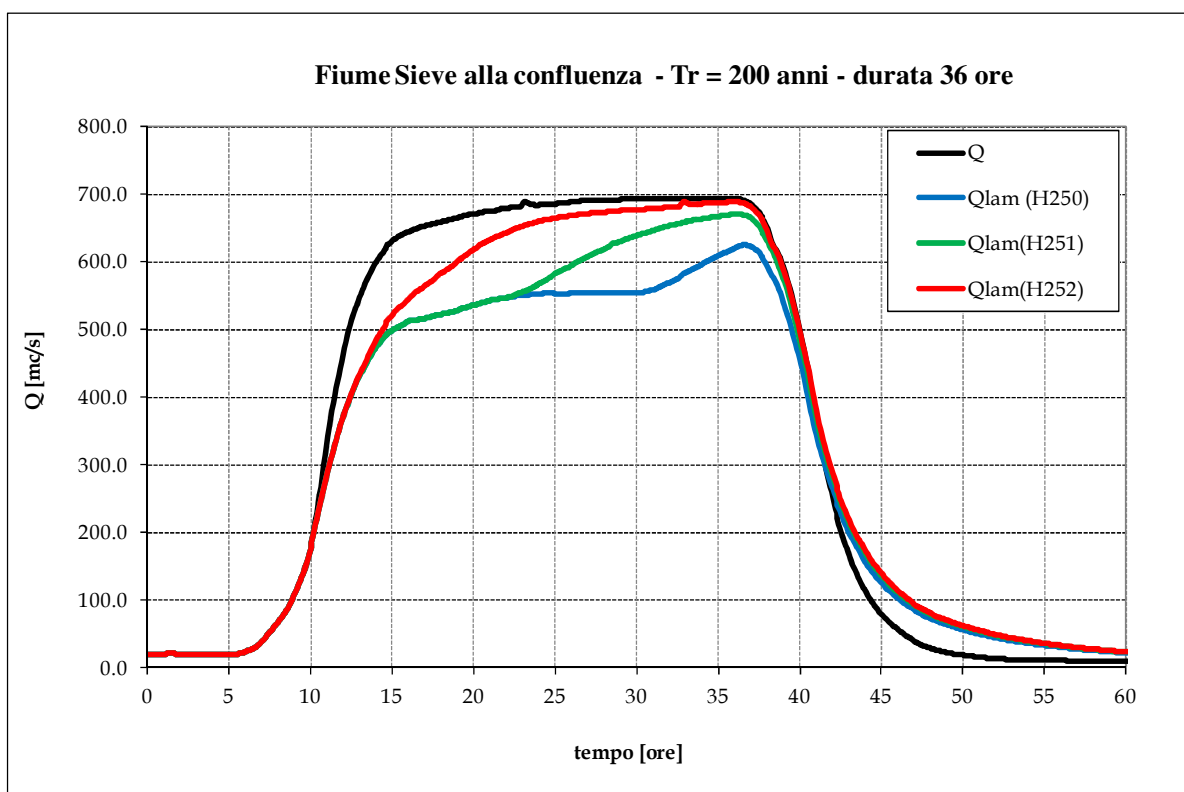


Fig. 5.7d: effetti della diga di Bilancino (al variare della quota iniziale d'invaso) alla confluenza del fiume Sieve per Tr 200 anni e durata 36 ore

Evento	Q	H m slm	Qlam	DQ
Tr200 - 12h	1320	250	1180	140
Tr200 - 12h	1320	251	1180	140
Tr200 - 12h	1320	252	1206	114
Tr200 - 18h	1183	250	964	219
Tr200 - 18h	1183	251	983	200
Tr200 - 18h	1183	252	1072	111
Tr200 - 24h	970	250	783	187
Tr200 - 24h	970	251	858	112
Tr200 - 24h	970	252	928	42
Tr200 - 36h	693	250	625	68
Tr200 - 36h	693	251	670	23
Tr200 - 36h	693	252	688	5

Tab. 5.5: Portate massime (Tr 200 anni) del fiume Sieve alla confluenza al variare della quota iniziale d'invaso della diga di Bilancino

I grafici e dati sopra riportati riferiti al tempo di ritorno di 200 anni mostrano che gli effetti della diga rispetto all'ante operam risultano tanto maggiori quanto minore è la durata dell'evento e il volume di piena. Risulta inoltre che per la durata di 12 ore la laminazione è poco influenzata dalla volume statico iniziale disponibile, in quanto il volume di piena, il

minore tra quelli degli eventi considerati, è completamente contenuto nella diga o produce battenti minimi sulla soglia di scarico.

Come era attendibile, i benefici maggiori corrispondono ai casi di maggiore disponibilità di volume statico di laminazione nella diga di Bilancino.

Come sintetizzato dalle figure e dalla tabella seguenti, la riduzione delle portate del fiume Sieve da parte della diga di Bilancino si riflette sulle portate del fiume Arno a valle della confluenza (sez. 687 del fiume Arno).

Evento	Q	H m slm	Q _{lam}	DQ
Tr200 - 12h	3587	250	3383	204
Tr200 - 12h	3587	252	3420	167
Tr200 - 18h	3766	250	3515	251
Tr200 - 18h	3766	252	3633	133

Tab. 5.6: Portate massime (Tr 200 anni) del fiume Arno a valle della confluenza del fiume Sieve

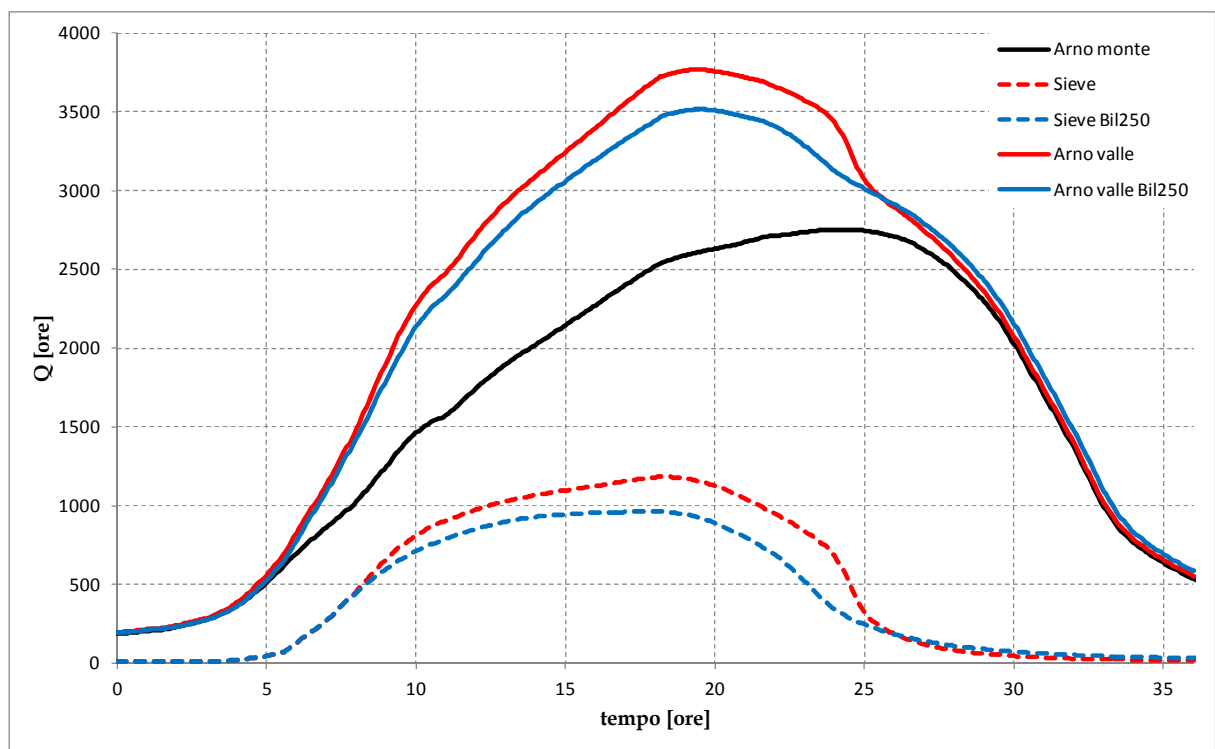


Fig. 5.8a: effetti della diga di Bilancino sul fiume Arno (evento Tr 200 anni e durata 18 ore)
Bil250: idrogrammi laminati dalla diga con invaso iniziale a 250 m s.l.m.

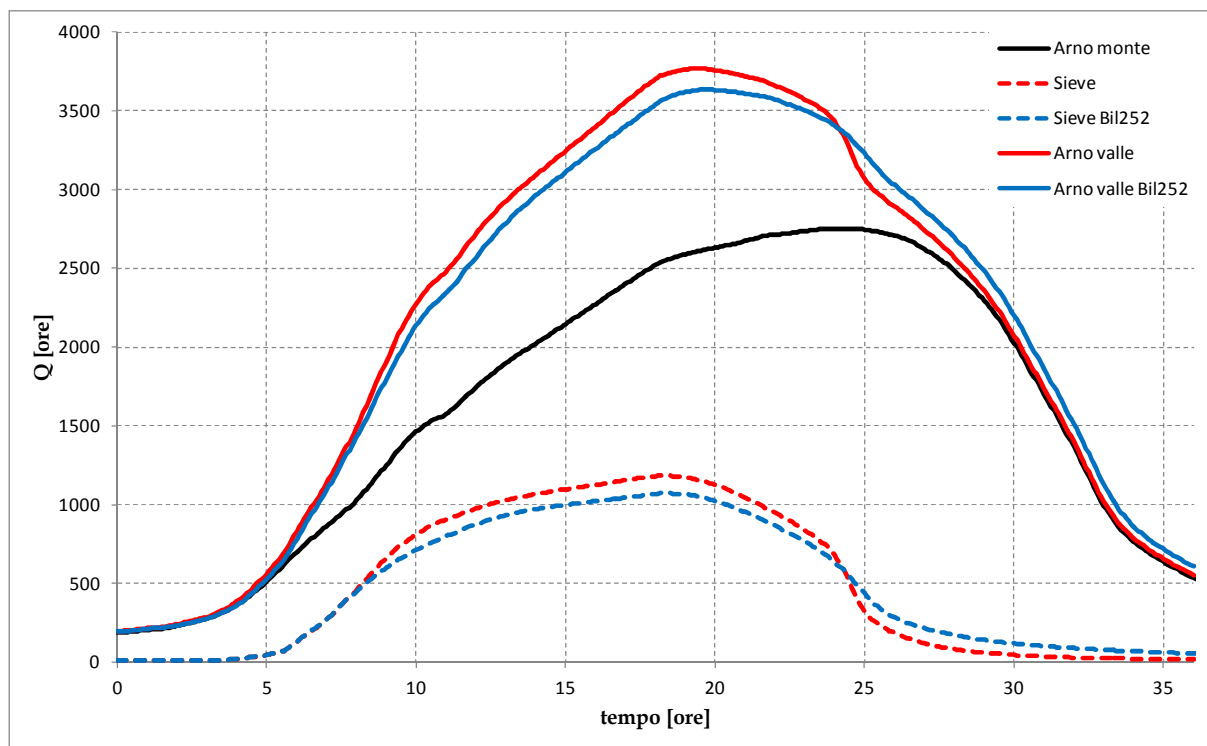


Fig. 5.8b: effetti della diga di Bilancino sul fiume Arno (evento Tr 200 anni e durata 18 ore)
Bil252: idrogrammi laminati dalla diga con invaso iniziale a 252 m s.l.m.

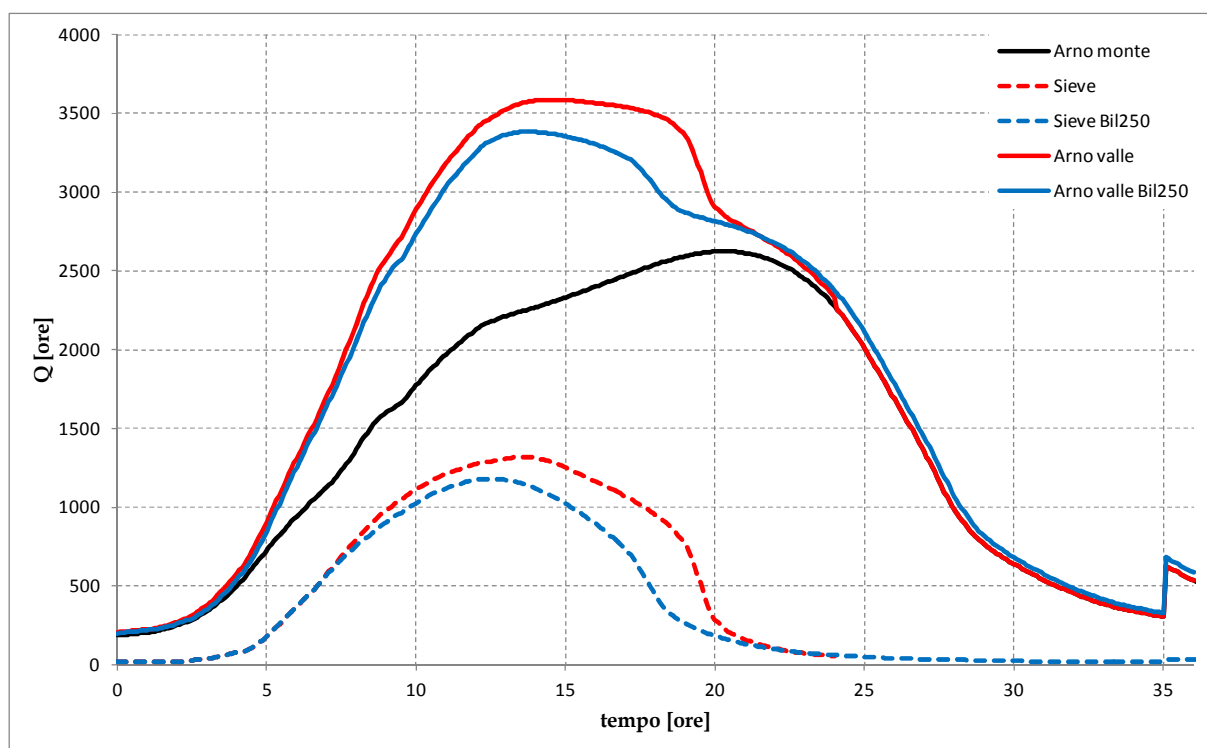


Fig. 5.8c: effetti della diga di Bilancino sul fiume Arno (evento Tr 200 anni e durata 12 ore)
Bil250: idrogrammi laminati dalla diga con invaso iniziale a 250 m s.l.m.

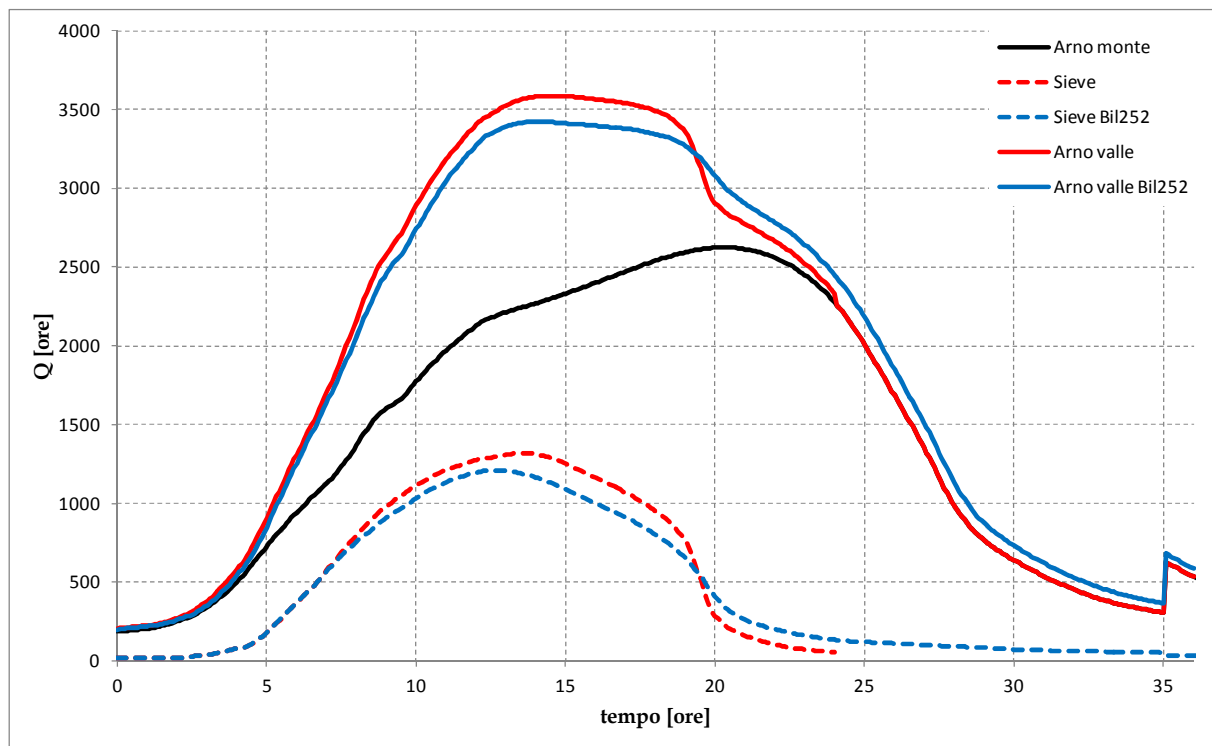


Fig. 5.8d: effetti della diga di Bilancino sul fiume Arno (evento Tr 200 anni e durata 12 ore)
Bil252: idrogrammi laminati dalla diga con invaso iniziale a 252 m s.l.m.

5.4 VERIFICHE IDRAULICHE NELLO STATO ATTUALE

Il modello idraulico utilizzato per la verifica del regime di piena del sistema idrografico dell'area di interesse è costituito dai seguenti tronchi fluviali:

1. fiume Arno tra la diga di Levane e l'idrometro di Rosano (41.3 Km);
2. torrente Ambra tra l'abitato di Levane e la confluenza (3.7 Km);
3. borro del Giglio dalla loc. Podere La Loggia alla confluenza (2.1 Km);
4. torrente Ciuffenna dal Podere Paperina alla confluenza (1.6 Km);
5. borro del Quercio dal Podere Costa al Pie alla confluenza (1.7 Km);
6. borro dei Frati dal cimitero di S. Giovanni Valdarno alla confluenza (0.9 Km);
7. borro delle Ville dalla località Madrigale alla confluenza (0.85 Km);
8. borro Riofi dalla località Baglioni alla confluenza (1.15 Km);
9. torrente S. Cipriano dalla loc. Cetinale alla confluenza (1.8 Km);
10. torrente Faella dalla strada comunale degli Urbinesi alla confluenza (0.84 Km);
11. torrente Cesto dalla località Il Molinuzzo alla confluenza (0.9 Km);
12. torrente Resco dall'abitato di Matassino alla confluenza (0.84 Km);

13. torrente Ponterosso dalla località Istieto alla confluenza (1.5 Km);
14. borro Gaglianella o Fracassi dalla località Gaglianella alla confluenza (1.4 Km);
15. torrente Chiesimone dalla località Podere Cappuccio alla confluenza (1.95 Km);
16. borro Moriano o Focardo dalla località Massa d'Incisa alla confluenza (0.55 Km);
17. fosso del Burchio dalla località Burchio alla confluenza (1.1 Km);
18. fosso del Selceto da monte della linea ferroviaria alla confluenza (0.6 Km);
19. fosso Tornia dalla SRT 69 alla confluenza (0.42 Km);
20. fosso di Leccio dalla località La Colombaia alla confluenza (0.8 Km);
21. fiume Sieve dall'idrometro di Bilancino, a valle dell'omonima diga, alla confluenza (46 Km).

Per gli altri corsi tributari del fiume Arno che non sono stati modellati, è stato verificato che: le sponde e le opere di contenimento sono in grado di contenere i livelli di piena del fiume Arno, o le prospicienti aree inondabili sono di modesta estensione. I dati topografici sono stati acquisiti dagli studi redatti a supporto dei Piani Strutturali comunali o dal modello digitale del terreno a celle 1x1 m.

I corsi d'acqua sono descritti attraverso sezioni fluviali che rappresentano i punti di calcolo della discretizzazione spaziale della modellistica idraulica. A tal fine sono state acquisite le sezioni topografiche rilevate dal Provveditorato alle Opere Pubbliche per la Toscana nel periodo 1999-2001 (Arno), dalla Provincia di Firenze nel 2006 (Sieve) e quelle disponibili presso gli altri Enti. Nell'ambito del presente lavoro sono inoltre state rilevate le sezioni dei corsi d'acqua nel tratto in cui sono previsti gli interventi di sistemazione idraulica. Nella tabella seguente sono indicate le fonti dei dati utilizzati.

Corso d'acqua	Sezione	Fonte	Anno di rilievo
Arno	da 904 a 834 e 832, 831, 829, 827, 825, 823, 818	Provveditorato OOPP	2000
Arno	833, 831.2, 831.1, 830, 828, 826, 824, 817, 815 e da 822.1 a 819	Comune di Figline e Incisa - Progetto Pizziconi	2009
Arno	816 e da 814 a 802	Comune di Figline e Incisa - Progetto Restone	2013
Arno	da 801 a 775	Regione Toscana -Progetto Prulli	2015
Arno	da 774 a 747	Provveditorato OOPP	2000
Arno	da 746 a 726 e 724.1, 723, 722, 721, 720	Regione Toscana -Progetto Prulli	2015
Arno	da 719 a 672	Provveditorato OOPP	2000
Ambra		Comune di Montevarchi	
Giglio		Comune di Montevarchi	
Ciuffenna		Comune di Terranuova Bracciolini	
Quercio		S. Giovanni Valdarno	
Fрати		Comune di San Giovanni	
Ville		Comune di San Giovanni	
Riofi		Comune di San Giovanni	
San Cipriano		Comune di San Giovanni	
Faella		Comune di Figline e Incisa - Progetto Pizziconi	2009
Cesto		Comune di Figline e Incisa - Progetto Restone	2009
Resco		Comune di Figline e Incisa - Progetto Pizziconi	2009
Ponterosso	da 77 a 33	Comune di Figline e Incisa	2012
Ponterosso	da 31.9 a 1	Comune di Figline e Incisa - Progetto Restone	2012
Gaglianella	da 27 a 14	Hydrogeo	2012
Gaglianella	da 13 a 1	Hydrogeo	2013
Chiesimone	da 100 a 88	Ing. Furia	2015
Chiesimone	da 39 a 1	Regione Toscana -Progetto Prulli	2015
Moriano		Regione Toscana -Progetto Prulli	2015
Burchio	da 39 a 27	Hydrogeo	2013
Burchio	da 276 a 1	Hydrogeo	2009
Selceto		Regione Toscana -Progetto	2015
Tornia		Leccio	2015
Leccio		Regione Toscana -Progetto	2015
Sieve		Provincia Firenze	2006

Tab. 5.7: Rilievi delle sezioni idrauliche disponibili

Gli elaborati “Elementi della modellazione idraulica – Stato attuale” (PD_PR_D_07A_T_R00 e PD_PR_D_07B_T_R00) sono state riportate le tracce delle sezioni

utilizzate con il relativo codice numerico. Tutte le sezioni dei corsi d'acqua lungo i quali il presente progetto prevede degli interventi sono riportate nell'elaborato PD_D_PR_03__R_R01, dove sono indicati anche i valori dei coefficienti di Manning utilizzati e i livelli idrometrici calcolati.

Le simulazioni condotte si basano sull'ipotesi di trascurare i fenomeni di:

- collasso delle strutture di contenimento (argini, sponde, muri, ecc.);
- ostruzione temporanea delle sezioni fluviali dovute al trasporto di materiale flottante;
- modifica della forma e dimensioni delle sezioni fluviali per dinamica d'alveo (erosione, trasporto e deposito di materiale solido).

Come coefficienti di resistenza al moto nell'alveo inciso e nelle aree golenali sono stati utilizzati i valori stimati nell'ambito di precedenti studi o sulla base dei valori di letteratura [10, 23]. Resta inteso che tali valori tengono implicitamente conto anche delle perdite energetiche dovute al materiale flottante, all'erosione, al trasporto e deposito di materiale solido. Essi inoltre sono considerati per ciascuna sezione costanti al variare delle portate e dei livelli in alveo.

In sintesi:

1. per l'alveo inciso del fiume Arno è stato assunto lo stesso coefficiente utilizzato nell'ambito degli studi a supporto del PAI e del PGRA (coefficiente di Manning $0.04 \text{ s/m}^{1/3}$);
2. nel tratto del fiume Arno compreso tra il ponte della SRT 69 di Incisa e la briglia all'altezza del cimitero di Incisa, è stato utilizzato un coefficiente di Manning di $0.035 \text{ s/m}^{1/3}$ per l'alveo inciso, in coerenza con i risultati del modello fisico dell'Università di Firenze [18] e della taratura descritta nel successivo paragrafo;
3. per le aree golenali del fiume Arno che partecipano al deflusso, il coefficiente medio di resistenza al moto è stato posto uguale a $0.05 \text{ s/m}^{1/3}$;
4. per l'alveo del borro Moriano e del torrente Chiesimone è stato utilizzato un coefficiente di Manning di $0.035 \text{ s/m}^{1/3}$;
5. per l'alveo del borro Gaglianella e del torrente Ponterosso è stato utilizzato un coefficiente di Manning di $0.033 \text{ s/m}^{1/3}$;

6. per l'alveo del fiume Arno è stato utilizzato un coefficiente medio di resistenza al moto di $0.04 \text{ s/m}^{1/3}$, mentre per le aree golenali che partecipano al deflussi di $0.05 \text{ s/m}^{1/3}$;
7. per tutti gli altri corsi d'acqua di cui al precedente elenco sono stati lasciati invariati i coefficienti medi di resistenza al moto definiti nell'ambito degli studi e progetti da cui sono stati acquisiti.

I coefficienti di contrazione ed espansione, necessari per la valutazione delle perdite di carico indotte da variazioni di sezione, allargamenti o restringimenti, sono stati imposti pari rispettivamente a 0.1 e 0.3 per modeste variazioni e uguali rispettivamente a 0.3 e 0.5 per variazioni più marcate secondo le indicazioni di letteratura.

Al coefficiente di efflusso da utilizzare nella formula di stramazzo in parete grosso per briglia, traverse e salti di fondo trasversale ai corsi d'acqua è stato attribuito un valore tra 0.325 e 0.38 in funzione della forma e della condizioni locali, secondo le indicazioni di letteratura.

Per la stessa tipologia di opere, ma posizionate in modo obliquo rispetto al corso d'acqua, è stato scelto un coefficiente di 0.52 per tener conto dell'inclinazione rispetto alla direzione di flusso principale della corrente di piena. Il valore è stato stimato sulla base dello studio su modello fisico dell'Università di Firenze del tratto di Incisa [18] e della taratura di cui al successivo paragrafo.

La condizione al contorno di valle è stata imposta nella sezione 672 come scala di deflusso calcolata a partire dai dati della modellazione idraulica, condotta dal Genio Civile Valdarno Superiore, del tratto del fiume Arno tra gli idrometri di Rosano e Brucianesi, successivamente acquisita a supporto del PGRA.

E' stato inoltre verificato che la sezione di valle del modello risulta sufficientemente distante dall'area di interesse affinché anche modeste approssimazioni nella stima della scala di deflusso (es. cappio di piena con differenze massime tra il ramo crescente e quello decrescente di circa 10 cm per pari portata) siano influenti sul calcolo dei livelli in corrispondenza della zona di intervento.

h [m slm]	Q [mc/s]	h [m slm]	Q [mc/s]	h [m slm]	Q [mc/s]	h [m slm]	Q [mc/s]
73.03	187.50	75.91	978.66	79.62	2461.78	81.01	3411.69
73.05	189.32	76.32	1110.36	79.82	2577.31	81.09	3467.91
73.07	191.57	76.73	1240.59	79.97	2664.69	81.16	3514.62
73.14	200.93	77.13	1371.32	80.1	2750.06	81.22	3560.77
73.22	212.18	77.49	1499.56	80.21	2824.09	81.3	3610.23
73.4	244.53	77.82	1627.40	80.31	2897.38	81.36	3659.99
73.57	280.65	78.12	1748.20	80.43	2984.98	81.43	3704.83
73.81	343.70	78.39	1868.12	80.54	3073.32	81.49	3748.82
74.06	408.73	78.66	1987.32	80.62	3123.24	81.53	3779.39
74.42	504.90	78.91	2106.18	80.68	3170.84	81.57	3808.98
74.76	604.41	79.16	2226.35	80.79	3261.19	81.59	3817.89
75.13	725.00	79.4	2346.41	80.92	3353.35	81.6	3826.14
75.5	846.45						

Tab. 5.8: Scala di deflusso sez. 672

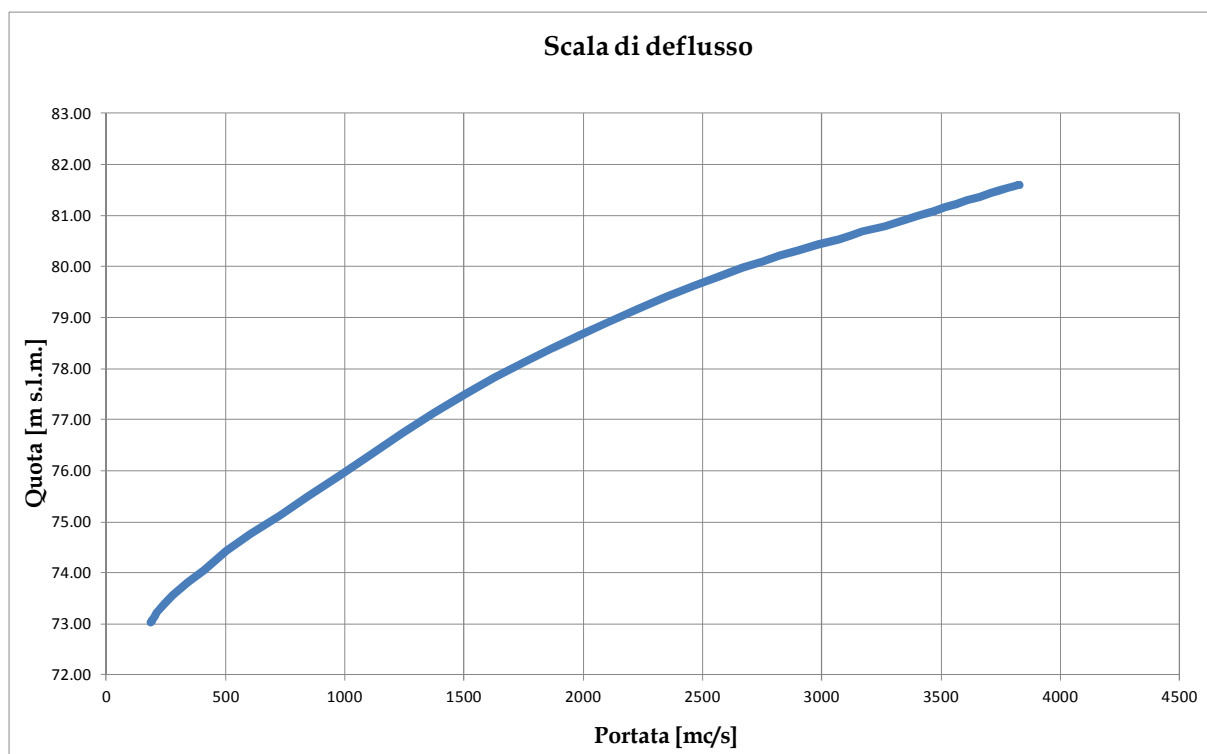


Fig. 5.9: Scala di deflusso sez. 672

Il modello geometrico è stato cimentato con le immissioni idrologiche, per i tempi ritorno e le durate di cui ai precedenti paragrafi. Si ricorda che nella gestione della diga di Bilancino è stata considerato un livello iniziale d'invaso di 250 m s.l.m. per i motivi esposti al paragrafo 5.3.3.

Si precisa che le simulazioni idrauliche sono state condotte nell'ipotesi che tutti i contributi idrologici, determinati secondo quanto descritto in precedenza, affluiscano nel fiume Arno o nei tratti rigurgitati dei suoi tributari modellati idraulicamente (vedi § 5), trascurando pertanto le eventuali esondazioni che possano avvenire a monte.

Come anticipato al § 4.3, in analogia agli studi redatti per il PGRA si considera una completa separazione tra il reticolo idraulico delle *“acque alta”*, che sfocia liberamente nel fiume Arno, e quello delle *“acque basse”*, la cui possibilità di sbocco è condizionato all'attraversamento di una arginatura. Pertanto, considerato che proprio durante gli eventi di piena del fiume Arno le *“acque basse”* saranno soggette ad intermittenza di scolo, il loro deflusso non contribuisce alla formazione della piena stessa.

5.4.1 AREE DI POTENZIALE ESONDAZIONE E CONNESSIONI IDRAULICHE

La caratterizzazione della capacità di invaso statico delle aree contermini al corso d'acqua, dette Aree di Potenziale Esondazione (APE), è stata preceduta da un'attenta analisi delle caratteristiche e delle opere del territorio su base cartografica e attraverso sopralluoghi diretti.

Fatto salvo il caso in cui tali aree siano d'ampiezza confrontabile con quella dell'alveo attivo, e non protette da strutture idrauliche di contenimento, situazione che permette di assumere in ogni istante come quota d'inondazione quella idrometrica in alveo, il problema è quello di simulare la potenziale esondazione in aree arginate, al fine di valutare i volumi esondati e la laminazione dell'onda di piena per effetto di tali esondazioni.

A livello operativo si è proceduto come segue:

- A) le aree strettamente adiacenti al corso d'acqua in tratti non arginati, ove è prevalente il fenomeno di propagazione, sono state simulate insieme all'alveo inciso attraverso l'utilizzo delle sezioni topografiche; ad esse è stato attribuito un adeguato coefficiente di resistenza al moto;
- B) le aree non arginate lungo fiume, ma dove la presenza di argini o opere trasversali rende prevalente il fenomeno di accumulo dei volumi di piena e la velocità della corrente può essere giustificatamente considerata prossima a zero, sono state caratterizzate come aree inattive per la propagazione dei deflussi;

C) la caratterizzazione geometrica delle aree di esondazione delimitate da strutture arginali o rilevati è stata condotta secondo i seguenti criteri:

- individuazione delle aree di potenziale esondazione: tale operazione è stata eseguita integrando le aree già individuate nell'ambito della redazione del PAI con le evidenze del territorio, la cartografia in scala 1:2.000, il rilievo LIDAR e i rilievi topografici più recenti;
- caratterizzazione morfologica delle aree di potenziale esondazione: in tale fase si è proceduto alla definizione delle leggi d'invaso volumi-quote d'inondazione $V=V(H)$ prendendo come base cartografica il rilievo LIDAR;
- definizione delle connessioni idrauliche: sulla base di quanto ottenuto nelle fasi precedenti e dell'analisi dettagliata delle caratteristiche morfologiche, infrastrutturali e idrauliche del territorio sono state definite le connessioni idrauliche tra l'alveo principale e le celle di potenziale esondazione, e tra le stesse celle.

La quota di sfioro per le connessioni idrauliche alveo/cella è definita come la quota di sommità dell'argine ricavata dalle sezioni rilevate o dai rilievi disponibili. Per le connessioni cella/cella tale quota è identificata attraverso la definizione del profilo di contenimento fra le celle.

Per gli sfioratori cella/cella, la lunghezza della soglia è stata fissata in generale pari alla lunghezza del tratto di contatto con un massimo di 100 m, salvo casi particolari rappresentati da sottopassi, tombinature e zone ristrette in cui viene assunta la larghezza effettiva della luce.

Negli elaborati PD_D_PR_07A__T_R00 e PD_D_PR_07B__T_R00 sono individuati i perimetri delle aree di potenziale esondazione e sono simbolicamente indicate le connessioni cella/cella.

Il coefficiente di efflusso per il calcolo delle portate delle connessioni idrauliche alveo/cella e cella/cella sono stati impostati secondo la seguente tabella:

Tipologia		Coeff. efflusso
Rilevati arginali o opere idrauliche in c.a.	alveo/cella	0.23
Rilevati stradali, ferroviari, ecc.		0.23
Cigli di sponda non arginati		0.12
Rilevati stradali, ferroviari, ecc.	cella/cella	0.23
Limiti morfologici naturali		0.12

Tab. 5.9: Coefficienti di efflusso per le connessioni idrauliche laterali

5.4.2 TARATURA DEL FIUME NEL TRATTO DI INCISA VALDARNO

Presso l'abitato di Incisa il fiume Arno assume caratteristiche peculiare dovute alla presenza di una curva molto accentuata, di tre traverse poste obliquamente rispetto alla direzione della corrente, di muraglioni d'argine, di tre ponti e di ruderi in alveo di un vecchio ponte. In tale condizione altamente antropizzata e con elementi per i quali la modellazione monodimensionale sembra non rappresentare in modo completamente adeguato il reale regime delle piene, viene in aiuto lo "Studio su modello fisico dell'officiosità idraulica del fiume Arno in prossimità dell'abitato di Incisa Valdarno" [18] redatto dall'Università di Firenze.



Fig. 5.10: Modello fisico del fiume Arno a Incisa

Dai risultati si rileva che il regime di piena risente in maniera particolare dell'accentuata curva presso il centro abitato: le simulazioni hanno messo in evidenza un dislivello piezometrico dell'ordine di un metro al vero tra interno ed esterno curva. In effetti la corrente è forzatamente costretta a cambiare direzione, imbattendosi ortogonalmente al muro del lungarno incisano e convertendo l'energia cinetica in potenziale. Tale configurazione comporta l'origine di moti vorticosi.

In merito all'influenza delle traverse sul profilo idraulico, per le portate di interesse del presente studio risultano abbondantemente sommerse e la loro presenza è scarsamente avvertita dal pelo libero.

Altri punti idraulicamente interessanti sono le zone presso le pile dei ponti dove è osservabile il classico rigurgito a monte che permette il transito a maggiore velocità delle portate che attraversano il restringimento di sezione dei ponti.

Essendo stato realizzato a fondo mobile, il modello fisico ha evidenziato la notevole influenza del rudere a valle del ponte della SRT 69. Il rudere provoca, durante il normale deflusso di portate non di piena, un evidente fenomeno di separazione della corrente con la creazione di una duna di sabbia di forma ellissoidale che si espande verso valle fino alla traversa.

La mobilitazione della duna è apprezzabile superficialmente con il passaggio di portate superiori a 1750 mc/s, quando la parte che normalmente emerge viene asportata ; si ha invece il coinvolgimento delle masse più al fondo per portate di piena superiori ai 2000 mc/s. La duna si disperde a valle, allocandosi in particolari zone di accumulo: una piccola parte si deposita presso le pile del ponte comunale (stimabile nel 4-5 %); una notevole quantità invece viene trattenuta dalla traversa che convoglia le acque al vecchio mulino (15-20%); una parte residuale infine prosegue verso valle, raggiungendo la sezione di sbocco (5-10%).

In merito al rischio di esondazione, con il passaggio invece di 1750 mc/s si rilevano i primi fenomeni esondativi. L'allagamento riguarda la zona del campo sportivo e la strada che porta al vecchio mulino. Inoltre lo sbocco del fosso delle Campane, che passa sotto la piazza del Municipio, inizia ad essere rigurgitato provocando le criticità già rilevate durante eventi di piena. Con 2000 mc/s la situazione si aggrava: tra il ponte ferroviario e quello

statale si ha, in sinistra idraulica, una piccola esondazione; a destra si ha l'allagamento della zona dove è presente una attività di recupero inerti; peggiora la situazione al vecchio mulino e evidente diventa l'esondazione presso la piazza municipale; anche nell'area verde dei giardini, in un tratto lievemente depresso, si hanno le acque molto prossime all'esondazione.

Il passaggio ad una portata di 2250 mc/s comporta l'allagamento di una vasta zona del centro abitato di Incisa. Essa copre il campo sportivo principale, gli edificati attigui, e alcune abitazioni prossime al secondo campo sportivo. Nelle altre zone citate si ha l'accentuazione del fenomeno esondativo in generale.

Il passaggio infine di una portata pari a 2500 mc/s costituisce una situazione di grave calamità, con vaste zone del centro abitato raggiunte dalle acque. Tale situazione dovrebbe simulare quanto accaduto nell'alluvione del 1966, con le debite differenze dovute alla mutata situazione geomorfologica dell'alveo e del centro abitato stesso.

Dallo studio sono stati ricavati i livelli misurati in varie sezioni del fiume per varie portate, dati che nell'ambito del presente studio sono stati utilizzati per la calibrazione del coefficiente medio di resistenza al moto, congiuntamente alla stima del coefficiente di efflusso delle traverse e ai coefficienti di contrazione ed espansione in corrispondenza dei ponti.

A tal fine è stato implementato un modello matematico con il software Hec-Ras 4.1 nella stessa configurazione geometrica del modello fisico e con analoghe condizioni al contorno per la ricerca dei parametri più idonei a simulare i livelli misurati.

Dai vari confronti eseguiti la migliore calibrazione è stata ottenuta con la combinazione del coefficiente medio di resistenza al moto pari a $0.35 \text{ s/m}^{1/3}$, del coefficiente di efflusso in parete grossa di 0.52, dei coefficienti di contrazione ed espansione dei ponti rispettivamente di 0.1 e 0.3 (gli stessi valori erano stati impostati anche per le altre sezioni fluviali).

L'adeguatezza della taratura del modello è stata prioritariamente verificata in relazione ai livelli e alla cadente piezometrica a monte del ponte ferroviario, dando meno peso ai risultati nel tratto di valle dove la componente bidimensionale del moto e condizioni di turbolenza assumono maggiore rilevanza. Tale scelta inoltre appare giustificata nell'ottica di rappresentare nel modo più adeguato le condizioni di deflusso nel tratto di monte dove sono previste l'opera di presa della cassa e le arginature a difesa della ferrovia e degli abitati.

Dall'analisi dei profili sotto riportati si nota che il modello sovrastima leggermente le misure disponibili per 2500 mc/s e sottostima leggermente quelle relative a 2000 mc/s. Pertanto, nel campo di valori di portata di piena di interesse nel tratto in oggetto, compreso proprio tra le portate sopra dette, si ritiene adeguata la taratura. Per valori di portata inferiori a 2000 mc/s, probabilmente dovuto all'aumento della scabrezza relativa dell'alveo con il diminuire dei livelli idrici, il modello sembra leggermente sottostimare i livelli di piena.

Il valore del coefficiente di efflusso conferma quello stimato in studi precedenti con analoga metodologia per la traversa di S. Rosa a Firenze sulla base del modello fisico dell'Università di Bologna del 1972. Esso può apparire sovrastimato rispetto ai valori comunemente utilizzati, anche se in realtà deve essere letto alla luce della configurazione geometrica delle traverse e della loro schematizzazione nel modello matematico. Esse infatti nella realtà si presentano oblique alla direzione della corrente e quindi l'intero loro coronamento è attraversato da una data portata in modo progressivo da monte verso valle e non nel medesimo istante. Al contrario nel modello matematico ciascuna traversa è schematizzata attraverso la proiezione della quota di coronamento su una singola sezione perpendicolare alla direzione della corrente, configurazione che prefigura una riduzione della sezione di deflusso rispetto alla situazione reale. Il maggior carico energetico richiesto per superare la soglia così rappresentata viene quindi compensato adottando un più alto coefficiente di efflusso.

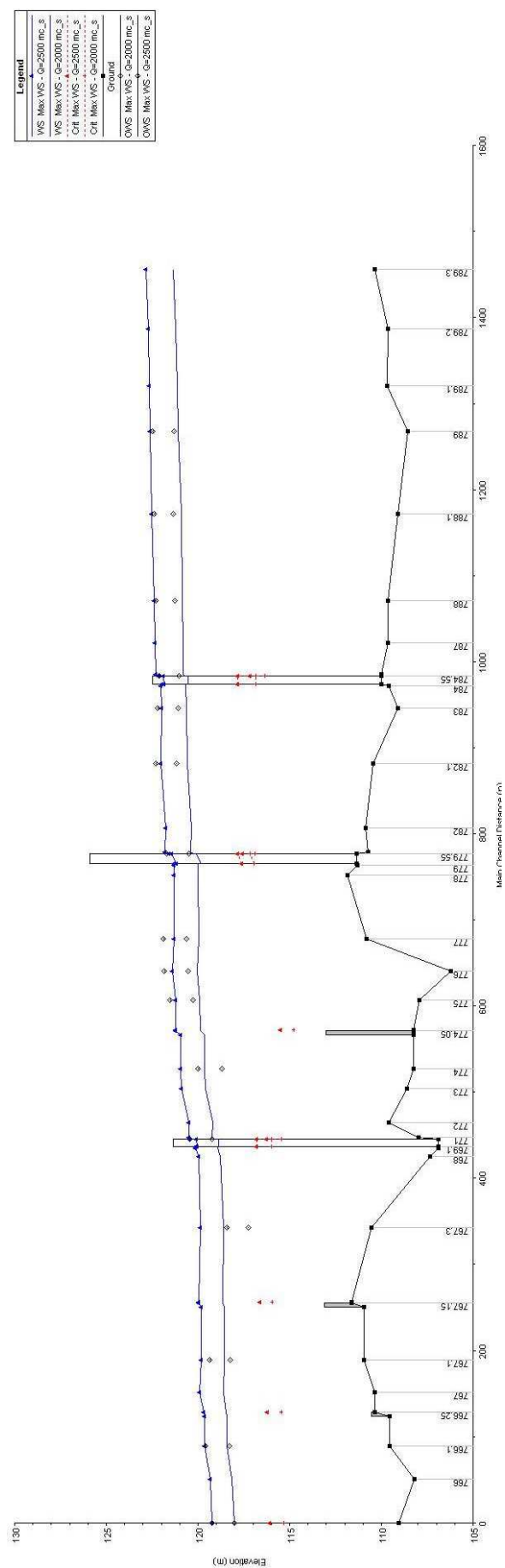


Fig. 5.11: profili di taratura per $Q = 2500$ mc/s e $Q = 2000$ mc/s

5.4.3 ANALISI DI SENSITIVA RISPETTO AL COEFFICIENTE MEDIO DI RESISTENZA AL MOTO

La valutazione dei parametri idraulici di modellazione, in assenza di dati di misura con i quali tararli, costituisce un parametro di stima per il quale si ritiene utile fornire alcune considerazioni.

A tal fine è stata condotta una analisi di sensitività del modello rispetto al coefficiente medio di resistenza al moto dell'alveo del fiume Arno con il quale sono eseguite simulazioni utilizzando i valori 0.035 e 0.042 s/m^{1/3} nella formulazione di Manning (il valore assunto in progetto è $n = 0.04$ s/m^{1/3}).

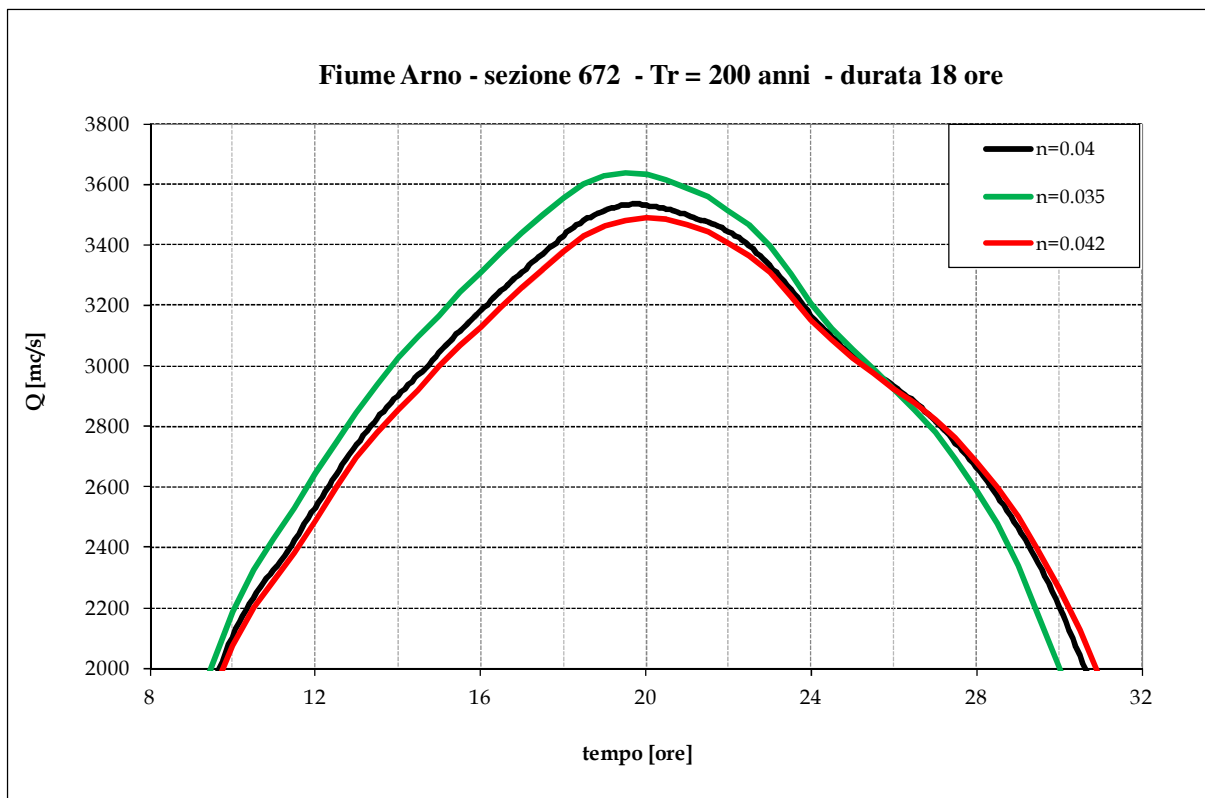
Nel primo caso, a parità di portata e limitatamente al tratto della cassa di espansione, sono stati registrati livelli più bassi tra i 30 e i 45 cm. Nel secondo caso, precisando che nel tratto di Incisa è stata lasciato il valore di taratura di cui al § 5.4.2, i livelli aumentano di circa 15÷20 cm.

Relativamente alla variazione degli idrogrammi, si rileva che con il coefficiente più basso la laminazione a monte della cassa Restone diminuisce per portate superiori a 2400 mc/s. La differenza massima di portata intorno ai 2600 mc/s ammonta a circa 90 mc/s; al picco circa 50 mc/s. Nel caso di coefficiente più alto invece si rileva una riduzione della portata di circa 30 mc/s per valori superiori a 2100 mc/s.

A valle dell'abitato di Incisa e fino alla confluenza con il fiume Sieve si rileva che idrogramma di piena relativo il coefficiente $n = 0.035$ s/m^{1/3} si presenta in anticipo di circa 1 ora e con un picco di 20 mc/s superiore rispetto allo scenario con coefficiente $n = 0.04$ s/m^{1/3}. Nell'altro caso ($n = 0.042$ s/m^{1/3}) la portata massima rimane pressoché invariata e si registra un ritardo dell'onda di piena di circa 30 minuti.

Infine, alla stazione idrometrica di Rosano, le variazioni indotte nella celerità dell'onda di piena determinano un diverso fasamento con l'idrogramma del fiume Sieve: rispetto allo scenario iniziale ($n = 0.040$ s/m^{1/3}), la riduzione del coefficiente di Manning ($n = 0.035$ s/m^{1/3}) comporta un aumento del picco di piena di 100 mc/s; l'incremento ($n = 0.042$ s/m^{1/3}) al contrario produce una maggiore laminazione di circa 50 mc/s.

La dotazione di paratoie mobili presso le opere di presa garantisce una adeguata flessibilità di gestione tale da poter fronteggiare condizioni idrauliche diversi da quelle assunte nel presente progetto.



5.5 ANALISI DEI RISULTATI DELLO STATO ATTUALE

Le simulazioni idrauliche condotte hanno confermato l'alto livello di pericolosità idraulica che caratterizza l'area dove sono previsti gli interventi del presente progetto.

Prima di esporre i risultati delle simulazioni, appare utile presentare un aspetto significativo del regime del fiume Arno nel tratto studiato: tra la confluenza del torrente Resco e la prima traversa di Incisa la corrente si presenta sempre in condizioni di moto sub-critico: per la massima portata duecentennale il numero di Froude è compreso tra 0.14 e 0.34 e velocità media della corrente è di 2.3 m/s. A monte della ferrovia di Incisa le velocità variano tra 1.3 e 2.8 m/s, mentre a valle aumentano tra 2.3 e 3.2 mm/s.

Sempre nel tratto a monte dei ponti di Incisa, in considerazione delle basse pendenza d'alveo, appare evidente un cappio di piena tipico di corsi d'acqua di pianura. Si riporta a titolo di esempio il cappio di piena dell'idrogramma duecentennale nella sezione 799 dove, a parità di portata, la differenza massima di livello tra i due rami dell'idrogramma è di circa 0.85 m.

Al contrario nel tratto di Incisa non si rileva il cappio di piena a causa dell'aumento della pendenza a partire dall'ingresso nella così detta "stretta di Incisa".

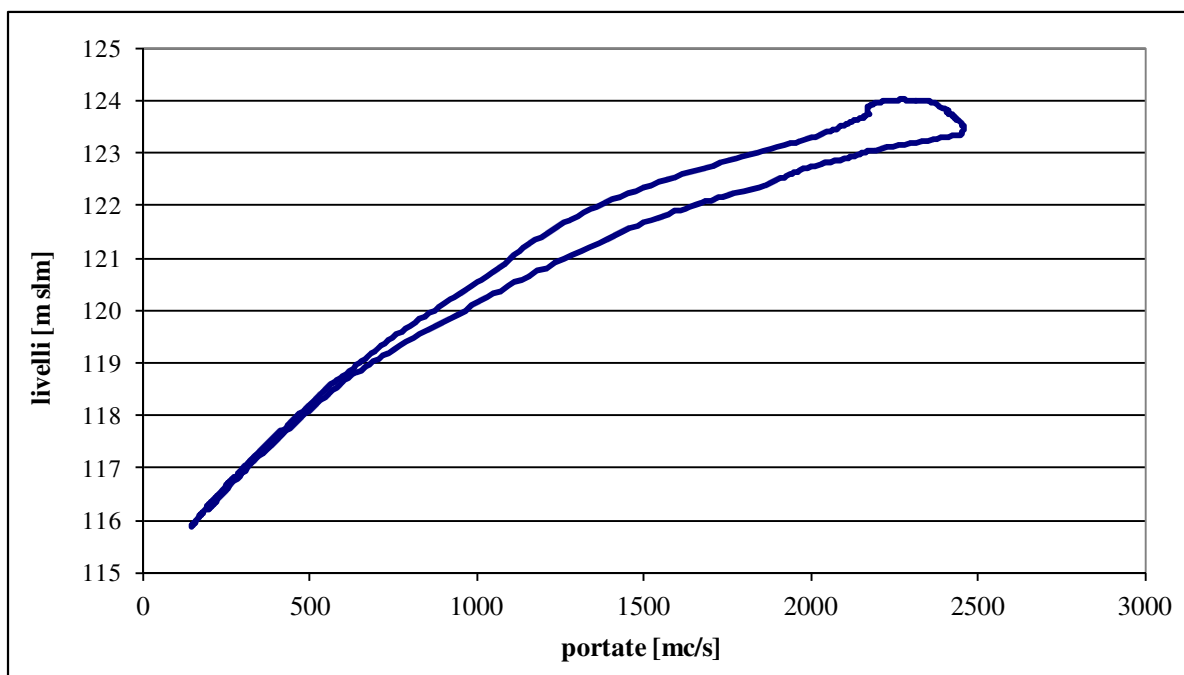


Fig. 5.12: Cappio di piena sez. 799

Relativamente all'evento trentennale le seguenti figure mostrano il confronto tra gli idrogrammi a monte (sez. 804) e a valle (sez. 774) delle aree di intervento per le durate di pioggia di 12, 18, 24 e 36 ore.

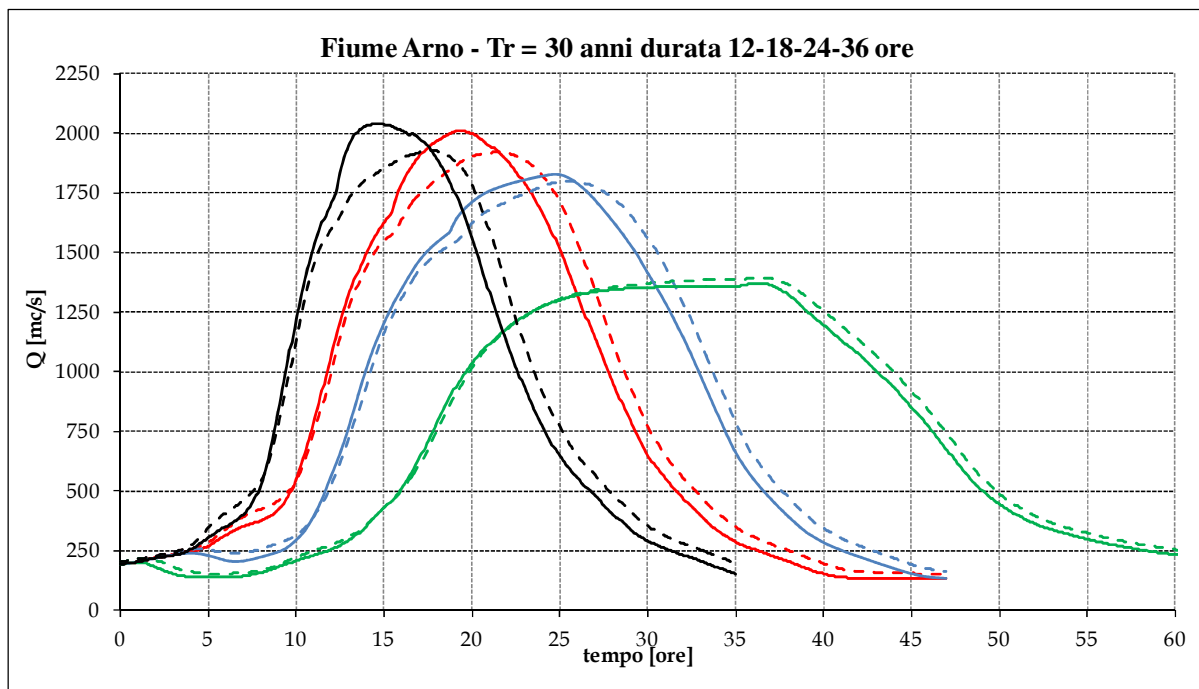


Fig. 5.13

Nero: durata 12 ore; rosso: durata 18 ore; azzurro: durata 24 ore; verde: durata 36 ore
 Linea continua: sezione 804
 Linea puntinata: sezione 774

Dalle simulazioni idrauliche si rileva che:

1. per il tratto studiato le portate e i livelli nell'alveo del fiume Arno sono massimi per gli eventi di durata 12 e 18 ore;
2. a monte della confluenza con il torrente Ponterosso la portata massima è di 2040 mc/s e completamente contenuta in alveo;
3. le aree golenali in destra idraulica a sud del torrente Chiesimone risultano allagabili principalmente per l'assenza dell'argine sinistro lungo il torrente Chiesimone che, rigurgitato dai livelli del fiume Arno, riversa le acque lungo tutta la pianura golenale fino al borro Colmate (o Monicoro);
4. alle esondazioni di cui al punto precedente si aggiungono quelle dagli scarichi del reticolo di drenaggio che attraversano l'argine del fiume Arno con tombini privi di valvole antiriflusso;
5. più a monte, l'assenza dell'argine dove sorgeva l'ex draga Tamburini comporta l'allagamento di parte dell'abitato di Matassino;
6. anche a nord del torrente Chiesimone le cause di allagamento della golena destra sono analoghe a quelle dei punti 3 e 4. Infatti, oltre al fatto che gli scarichi del reticolo minore sono privi di paratoie o clapet, presso la loc. Borratino termina l'argine e le acque si espandono con livelli tali da "risalire" nella pianura alluvionale verso il torrente Chiesimone. Anche l'area industriale di Pian della Rugginosa è parzialmente interessata con battenti massimi di circa 80 cm;
7. l'area tra il torrente Ponterosso e il borro Gaglianella risulta allagabile per sormonto arginale immediatamente a monte della ferrovia; nell'area urbana i battenti variano fino al massimo di 1.3 m;
8. a nord del borro Gaglianella l'area industriale di Lagaccioni subisce l'allagamento dai tombini non presidiati dei borri Lagaccioni, Tagliafune e Fornacina e degli altri fossi di scarico, nonché dai sottopassi ferroviari; i battenti variano fino al massimo di 1.45 m;
9. procedendo verso valle, tutta la golena tra il fiume e la ferrovia risulta allagabile, nonché la zona dei campi sportivi di Incisa;
10. a Incisa la portata massima è di 1925 mc/s, minore di quella di cui al punto 1, pur ricevendo il fiume i contributi di un interbacino di 52 Km²;
11. all'idrometro di Rosano, dopo la confluenza del fiume Sieve, la portata massima è di 2440 mc/s;

Relativamente agli eventi **centennale e duecentennale** si rileva che:

1. per il tratto studiato la durata dell'evento meteorico che massimizza le portate e i livelli nell'alveo del fiume Arno è quella di 18 ore per il tempo di ritorno di 200 anni. Per quello di 100 anni la durata critica è di 12 ore a monte della confluenza con il torrente Ponterosso e 18 ore a valle, sebbene le differenze tra i due scenari siano modeste;
2. l'intero sistema idrografico entra in crisi: le esondazioni si presentano diffuse e copiose per sormonto arginale sia in destra che in sinistra idrografica del fiume Arno e dei suoi affluenti. Anche in questi casi le acque di piena del corso d'acqua maggiore risalgono lungo gli alvei dei suoi tributari;
3. a monte della confluenza con il torrente Ponterosso la portata massima (Tr 200 anni) è di 2730 mc/s, tenendo conto che nel tratto a monte si verificano sormonti delle arginature;
4. a Incisa la portata massima (Tr 200 anni) è di 2810 mc/s, ricordando che rispetto al punto precedente il fiume riceve i contributi di un interbacino di 52 Km²;
5. all'idrometro di Rosano, a valle della confluenza del fiume Sieve, la portata massima è 3530 mc/s (Tr 200 anni);
6. oltre ai centri urbani di Matassino, Figline, Lagaccioni, Pian della Rugginosa e Incisa, tutta la viabilità risulta inagibile e la ferrovia lenta sormontata;
7. nelle aree di cui al punto precedente i battenti dell'evento duecentennale sono tra 1.2 e 2.8 m superiori rispetto a quelli del tempo di ritorno trentennale;
8. nell'istante di massimo invaso, tutte le aree in destra idraulica (dal t. Resco a Incisa) laminano circa 6.5 Mmc, quelle in sinistra (dal t. Ponterosso a Incisa) 2.8 Mmc (Tr 200 anni);
9. gli effetti del piano di laminazione della diga di Bilancino sul regime di piena del fiume Arno e Sieve sono stati presentati nei precedenti paragrafi.

Le seguenti figure mostrano il confronto tra gli idrogrammi a monte (sez. 804) e a valle (sez. 774) delle aree di intervento per le durate di pioggia di 12, 18, 24 e 36 ore.

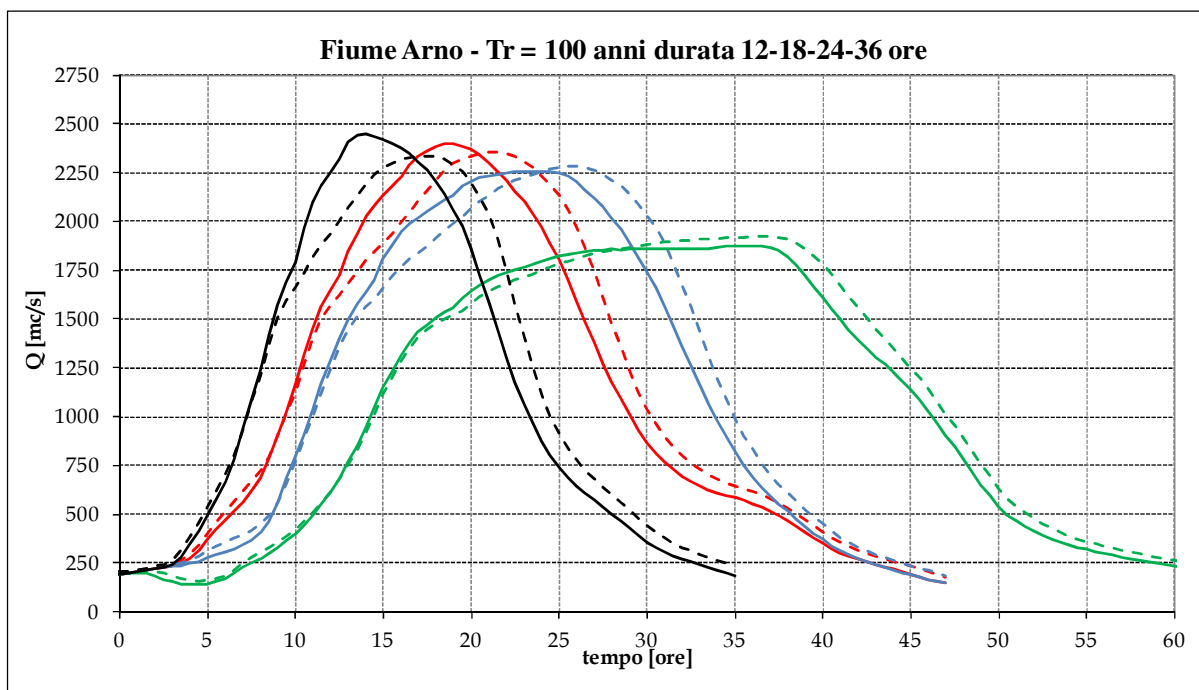


Fig. 5.14

Nero: durata 12 ore; rosso: durata 18 ore; azzurro: durata 24 ore; verde: durata 36 ore
 Linea continua: sezione 804
 Linea puntinata: sezione 774

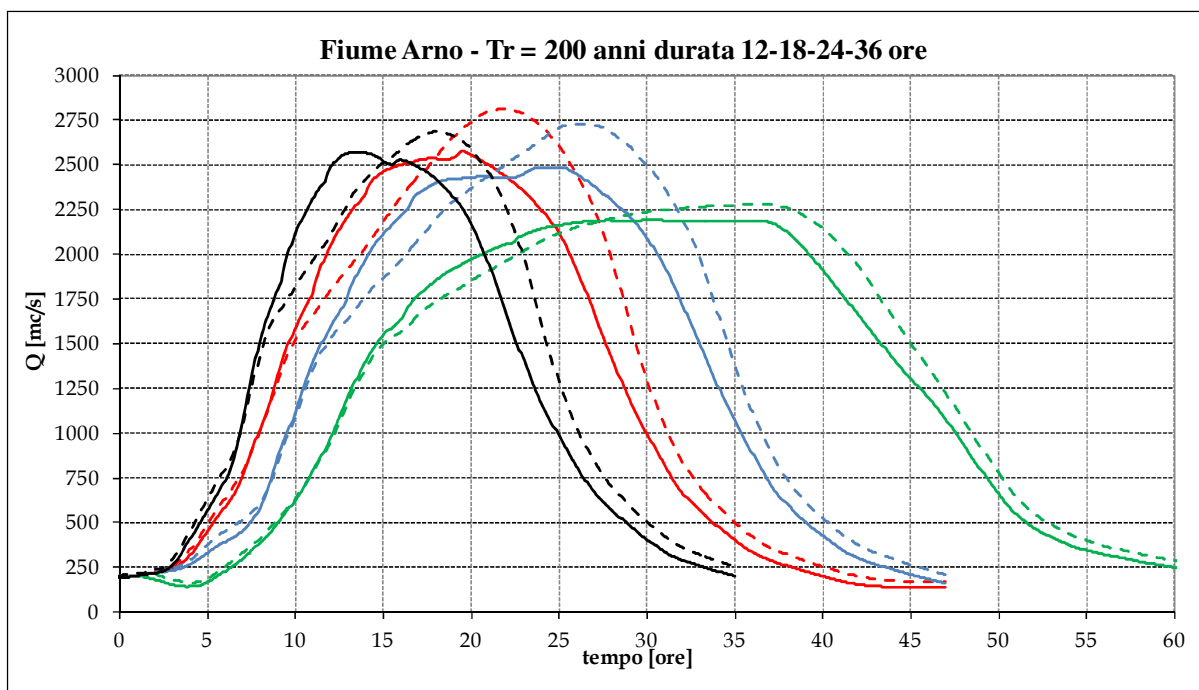


Fig. 5.15

Nero: durata 12 ore; rosso: durata 18 ore; azzurro: durata 24 ore; verde: durata 36 ore
 Linea continua: sezione 804
 Linea puntinata: sezione 774

L'elaborato PD_D_PR_08__T_R00 mostra l'estensione delle aree allagabili del fiume Arno correlate ai risultati delle simulazioni sopra descritte. Dette aree non comprendono, per i motivi esposti al §16, quelle dovute alle portate critiche degli affluenti del corso d'acqua principale. Soltanto per torrente Chiesimone e il borro Ricavo sono state valutate le aree allagabili per le loro portate critiche utilizzando il modello bidimensionale di cui al paragrafo successivo. Inoltre per gli affluenti principali (Ponterosso, Gaglianella, Chiesimone, Moriano, Ricavo) sono state condotte le verifiche dello stato attuale con le modalità e i risultati descritti nei successivi § 11 e seguenti.

5.6 VERIFICHE IDRAULICHE CON MODELLO IDRAULICO BIDIMENSIONALE

Al fine di perimetrare in modo più dettagliato le aree attualmente soggette ad allagabilità che rimarranno interne alla cassa di espansione Prulli (l'indennizzo per limitazione del diritto di proprietà è indennizzata in funzione della variazione di frequenza di allagamento tra stato attuale e di progetto), è stato implementato uno specifico modello idraulico in cui l'area golenale destra tra la confluenza del borro Colmate (o Monicoro) e il ponte di Incisa (vedi figura seguente) è modellata con in moto vario bidimensionale.

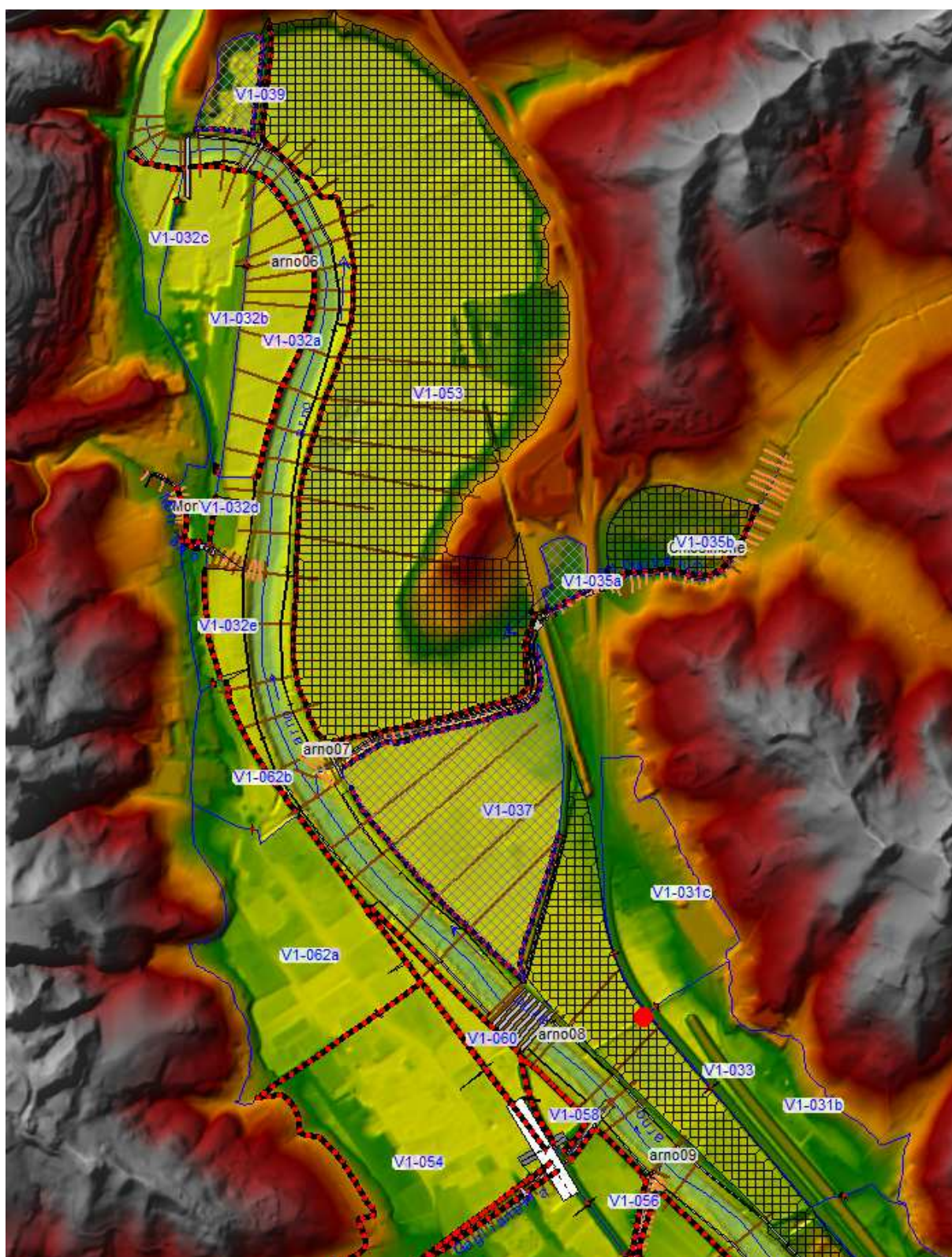


Fig. 5.16: dominio di calcolo del modello bidimensionale del fiume Arno e del torrente Chiesimone

L'analisi idraulica è stato condotta utilizzando le equazioni di De Saint Venant (modello completo) con metodo al volume finito; l'analisi eseguita è mista 1D/2D, monodimensionale

per l'alveo e le porzioni non interessate dalla cassa di espansione e bidimensionale per le aree inondabili in destra del fiume Arno. Il modello digitale del terreno utilizzato per l'analisi 2D è il Lidar (modello digitale ad alta definizione della Regione Toscana ottenuto con tecnologia laser scanning da aeromobile) con celle di dimensioni 1x1 m.

Il coefficiente di resistenza al moto nella formulazione di Manning per le aree di pianura con uso agricolo è stato scelto pari a $0.06 \text{ s/m}^{1/3}$. I parametri idraulici della parte monodimensionale del modello sono gli stessi già esplicitati nei paragrafi precedenti.

Come condizioni al contorno (livelli e portate) si sono utilizzate quelle estratte, per gli stessi scenari di sollecitazione idrologica, dal modello completo 1D precedentemente descritto. Gli scenari idrologici simulati sono:

- tempo ritorno 10 anni – durata di pioggia 18 ore (critica per il fiume Arno)
- tempo ritorno 10 anni – durata di pioggia 0.5 ore (critica per il torrente Chiesimone e borro di Ricavo)
- tempo ritorno 30 anni – durata di pioggia 18 ore

Le simulazioni hanno confermato, dettagliandoli per ogni singola cella di calcolo, i risultati delle modellazioni monodimensionali. Gli elaborati PD_D_PR_09A_T_R00 e PD_D_PR_09B_T_R00 mostrano gli inviluppi delle esondazioni rispettivamente per i tempi di ritorno di 10 e 30 anni.

Si evidenzia che per quest'ultimo caso le esondazioni del fiume Arno interessano la totalità della superficie destinata alla realizzazione dell'intervento.

5.7 DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI

Sulla base delle numerose simulazioni idrauliche eseguite al variare degli scenari di progetto, si è giunti alla definizione dello stato di progetto finale dettagliatamente descritto nella Relazione generale e nella Relazione tecnica. Le opere sono state dimensionate con lo scopo di coniugare l'efficacia nella laminazione delle piene con i costi di realizzazione, di raggiungere gli obiettivi prefissati dal Piano di Bacino del Fiume Arno, di realizzare opere accessibili, funzionali e facilmente mantenibili, di diminuzione degli impatti ambientali.

Sinteticamente il progetto prevede:

Opere della cassa di espansione

La cassa di espansione, di superficie interna complessiva di 134 ha, si estende parallelamente al fiume Arno in destra idrografica ed è costituita da 3 settori delimitati da argini perimetrali in terra o muri d'argine in calcestruzzo. Il settore più a sud si estende dalla confluenza del borro Colmate (o Monicoro) alla bretella ferroviaria; il successivo settore è delimitato a nord dal torrente Chiesimone; il settore di valle termina in corrispondenza del ponte ferroviario di Incisa. La quota di coronamento arginale è di 125.85 m s.l.m..

L'invaso delle acque è garantito dall'opera di presa, posta nella parte più a monte del settore sud, che è costituita da 11 luci (una come riserva in caso di emergenza) di larghezza 5 m ciascuna dotate di paratoia piana alta 3.8 m. La soglia di ingresso delle acque, posta a 121.4 m s.l.m., costituisce il piano di chiusura delle paratoie che, in fase di esercizio, possono essere alzate fino a 125.2 m s.l.m..

Sul torrente Chiesimone è prevista l'opera di connessione che provvede al trasferimento delle acque d'invaso tra i moduli posti a sud e nord dello stesso torrente. L'opera è costituita da una soglia di 46 m posta a quota 120.0 m s.l.m., non è dotata di organi di regolazione, sovrappassa il torrente Chiesimone con 2 scatolari di dimensioni 5.5x4.65 m ciascuno. Longitudinalmente al corso d'acqua questi hanno una lunghezza complessiva di 120 m.

Affinché le portate di massima piena del torrente Chiesimone possano transitare a pelo libero negli scatolari, è stato necessario prevedere la riprofilatura del corso d'acqua abbassandone la quota di scorrimento per un tratto di 250 m a monte dell'attuale salto di fondo. Pertanto, a partire da circa 330 m a monte della confluenza, una rampa di altezza complessiva di 2 m e pendenza del 10% raccorda il nuovo profilo d'alveo tra le quote 116.1 m s.l.m. e 114.1 m s.l.m. A valle dello sbocco di quest'ultima è prevista una modesta rettifica del corso d'acqua sia per evitare tratti in curva soggetti ad erosione, sia per realizzare lungo le sponde anche intermedie necessarie per la manutenzione.

La cassa è dotata di quattro opere di scarico, di cui tre di dimensioni 2x2 m ed una di 2x3 m. Esse sono dotate di una paratoia piana manovrabile in condizioni di sicurezza dalla sommità arginale e in remoto dalla casa di guardia dell'opera di presa.

Di analoga tipologia e dotazione impiantistica, le sei opere di presidio lungo le arginature impediscono che le acque invase nella cassa di espansione fuoriscano dal reticolo secondario drenante le aree a tergo delle arginature.

La sicurezza ultima rispetto al sormonto arginale da parte delle acque invase è rappresentato da due soglie di lunghezza 50 m, poste a quota inferiore (125.1 m s.l.m.) rispetto alla sommità arginale (125.85 m s.l.m.) in modo che gli eventuali volumi d'invaso in eccesso stramazino a fiume.

Ai fini del potenziamento della capacità d'invaso, è previsto l'abbassamento di parte del fondo cassa per una profondità media di 1.5 m e un volume di circa 0.97 Mmc.

Arginature accessorie

Oltre alle opere che costituiscono la cassa di espansione, è necessario per la gestione dell'evento di piena e la messa in sicurezza dei territori limitrofi il potenziamento delle arginature esistenti e la realizzazione di nuove lungo il fiume Arno e i tratti rigurgitati dei torrenti Chiesimone e Ponterosso e dei borri Moriano e Gaglianella. In particolare sono previsti interventi sui seguenti tratti:

- adeguamento e nuova realizzazione dell'argine tra la confluenza del torrente Resco e la cassa di espansione in destra idraulica del fiume Arno;
- potenziamento degli argini sinistri lungo il fiume Arno tra la confluenza del torrente Ponterosso e l'intersezione con la linea ferroviaria lenta;
- realizzazione di nuova arginatura tra quest'ultima e il centro di Incisa Valdarno in sinistra idraulica;
- potenziamento e nuova realizzazione di arginature lungo i torrenti Chiesimone fino alla strada comunale di Pian di Rona
- adeguamento del muro d'argine sinistro del torrente Ponterosso fino al ponte di via Roma;
- adeguamento delle arginature del borro Gaglianella fino al ponte della SP 56 e riprofilatura delle sponde a valle della ferrovia;
- chiusura idraulica del borro Moriano (o Focardo) fino a monte della SRT 69.

Infine, con lo scopo di valorizzare la funzione idraulica delle aree golenali, queste, sia in destra che in sinistra idraulica, saranno in parte abbassate tramite l'escavazione di 154'000 mc.

Altre casse di espansione

Le casse di espansione Pizziconi, Restone e Leccio e gli interventi correlati sul reticolo secondario sono state modellati riprendendo le caratteristiche geometriche e dimensionali dai rispettivi progetti approvati. Soltanto per la cassa Burchio è stato deciso, secondo gli indirizzi della Conferenza dei Servizi sul progetto preliminare, di considerarla come area di laminazione non attrezzata, cioè priva di arginature lato fiume e opere di presa e restituzione.

Interventi di altri soggetti attuatori

Nella definizione dello scenario di progetto sono stati tenuti in conto anche alcuni interventi puntuali che concorrono, insieme a quelli del presente progetto, alla messa in sicurezza locale del territorio. Essi, da eseguirsi a cura del soggetto gestore dell'infrastruttura ferroviaria, sono l'adeguamento dei parapetti dei ponti ferroviari sul torrente Ponterosso, sul Borro Gaglianella e sul borro Moriano.

5.8 VERIFICHE IDRAULICHE NELLO STATO DI PROGETTO

Il modello idraulico utilizzato per il dimensionamento e la verifica delle opere in progetto coincide con quello implementato per lo scenario "stato attuale", fatta eccezione per:

1. le aree di potenziale esondazione e le connessioni idrauliche rappresentative delle nuove strutture della cassa Prulli (capacità d'invaso, opera di presa, scarichi, opera di connessione idraulica);
2. l'adeguamento alla quota di progetto delle strutture arginali della cassa Prulli;
3. l'adeguamento alla quota di progetto delle strutture arginali accessorie lungo il fiume Arno e il reticolo secondario;
4. la modifica del profilo dell'alveo del torrente Chiesimone;
5. il rifacimento del ponte stradale sul torrente Chiesimone a monte della ferrovia;

6. il rifacimento del ponte della strada comunale di Pian di Rona (da realizzare da parte della Regione Toscana);
7. la risagomatura delle sponde del torrente Gaglianella a valle della ferrovia;
8. tutti gli interventi previsti nei progetti delle casse di espansione Pizziconi I e II lotto, Restone e Leccio.

Si precisa che per le casse Restone e Leccio le opere di presa, diversamente da quanto previsto nei relativi progetti preliminari, hanno paratoie alte rispettivamente 3.5 e 3.8 m. Ciò è risultato necessario nell'ottica di migliorare l'efficienza del sistema a scala di bacino.

Per quanto riguarda la cassa Leccio si specifica che, a seguito degli approfondimenti rispetto al progetto preliminare, le simulazioni idrauliche del presente progetto hanno tenuto conto della necessità di rialzare il ponte di Pian dell'Isola, intervento di cui è in corso la progettazione esecutiva.

Inoltre si precisa che le soglie di scarico della cassa Pizziconi nel torrente Faella sono state schematizzate alla quota definita da una variante in corso d'opera, che ne previsto l'abbassamento fino a 124.75 m s.l.m. almeno per il periodo transitorio necessario al completamento dell'opera di presa (Pizziconi lotto II). Con l'avanzamento della progettazione dell'intero sistema di laminazione del Valdarno Superiore dovrà essere verificato se tale modifica sia da confermare o ricalibrare.

Nell'elaborato PD_D_PR_10__T_R00 sono rappresentati gli elementi della modellazione idraulica di progetto aggiornati rispetto allo stato attuale.

Il modello è stato cimentato con gli stessi scenari idrologici e sotto le stesse ipotesi dello scenario "stato attuale", avendo avuto cura di non inserire i contributi idrologici dei bacini che sono diventati "*acque basse*" (nella definizione precedentemente esposta) con l'introduzione di nuove arginature.

5.8.1 CURVE D'INVASO DELLA CASSA DI ESPANSIONE

La capacità della cassa di espansione è stata valutata in analogia a quanto descritto per lo scenario "stato attuale", tenendo in considerazione il tracciato delle nuove arginature perimetrali e la suddivisione dell'area tra i tre settori. Le curve d'invaso sono riportate nelle seguenti figure e tabelle.

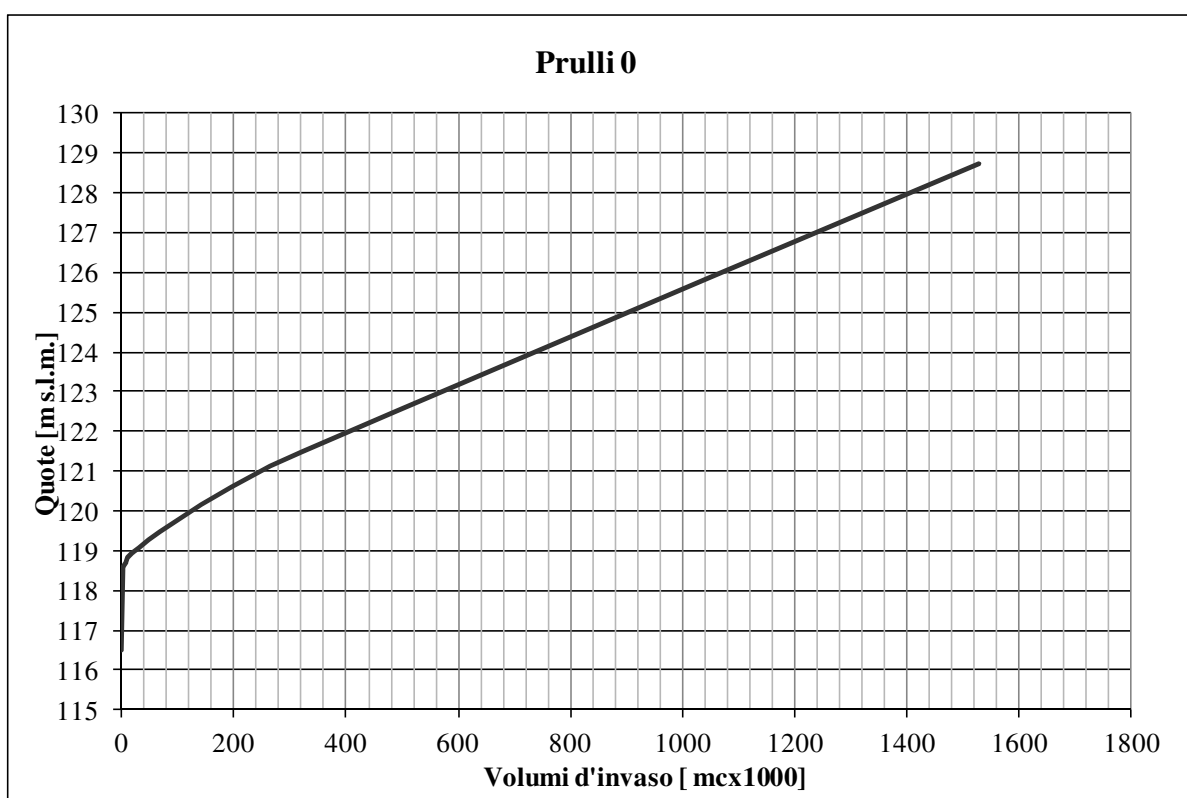


Fig. 5.17: Curva d'invaso del modulo Prulli 0 della cassa d'espansione

m slm	mc x 1000
116.5	0
118.5	1
118.58	2.82
118.71	6.68
118.83	12.18
118.95	19.38
119.09	29.47
119.29	46.72
119.49	67.34
120.15	140.61
120.6	196.37
121.11	264.26
121.48	321.74
122.49	486.57
125.87	1048.45
128.74	1527.57

Tab. 5.10: Curva d'invaso del modulo Prulli 0 della cassa d'espansione

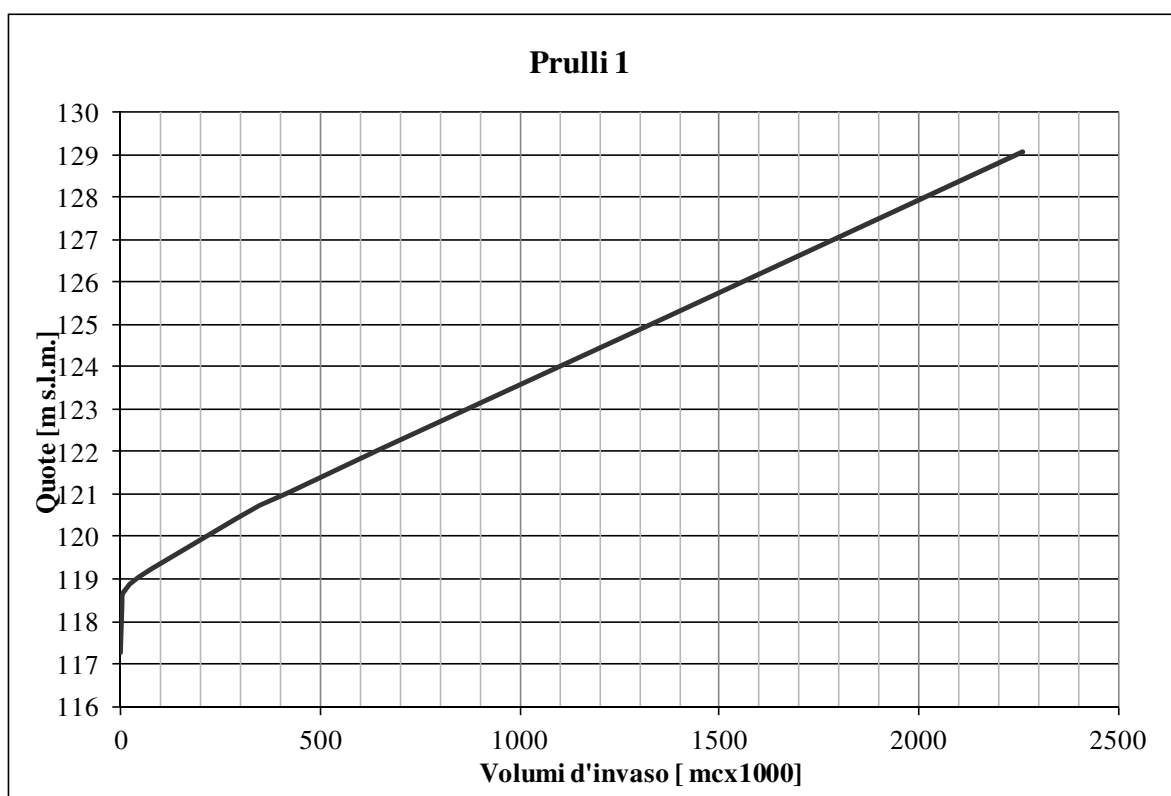


Fig. 5.18: Curva d'invaso del modulo Prulli 1 della cassa d'espansione

m slm	mc x 1000
117.25	0
118.43	1.47
118.48	1.61
118.53	1.92
118.6	3.13
118.68	5.61
118.75	9.38
118.89	20.97
119.04	41.53
119.23	73.37
120.42	289.37
120.72	347.55
121.04	417.81
122.06	649.34
125.19	1369.24
129.05	2260.16

Tab. 5.11: Curva d'invaso del modulo Prulli 1 della cassa d'espansione

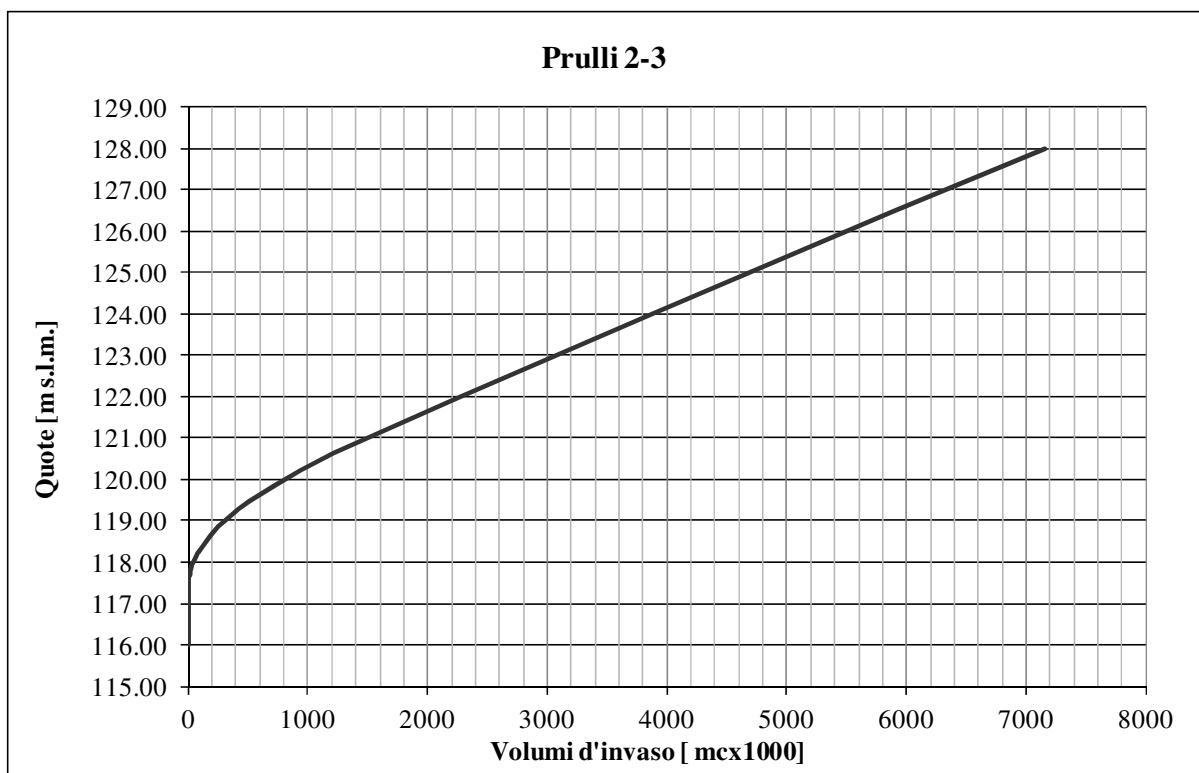


Fig. 5.19: Curva d'invaso del modulo Prulli 2-3 della cassa d'espansione

mc x 1000	m slm	mc x 1000	m slm
0.0	116.00	510.5	119.48
1.8	117.389	717.1	119.87
3.2	117.471	945.9	120.23
5.0	117.544	1221.1	120.63
7.6	117.614	2246.6	121.97
11.9	117.704	3868.9	124.01
17.1	117.783	5888.6	126.47
30.8	117.929	7152.4	128.00
50.2	118.069		
76.8	118.214		
117.1	118.388		
190.4	118.651		
255.7	118.852		
334.0	119.066		
422.3	119.282		

Tab. 5.12: Curva d'invaso del modulo Prulli 2-3 della cassa d'espansione

5.8.2 OPERA DI PRESA E DI SCARICO

I calcoli idraulici per l'opera di presa e quelle di scarico, dotate di paratoie piane di regolazione, sono eseguiti facendo riferimento alle note equazioni di efflusso con luce a

battente libera o rigurgita, o di stramazzo in parete grossa libero o rigurgito in funzione dei livelli calcolati nel fiume Arno e nella cassa. In particolare l'equazione di stramazzo è utilizzato quando la paratoia non intercetta la corrente in ingresso alla cassa.

I coefficienti di efflusso utilizzati sono 0.6 per luce a battente libera, 0.8 per luce a battente rigurgitata, 0.38 per stramazzo libero. Nel caso di stramazzo rigurgitato il coefficiente viene calcolato in funzione del grado di rigurgito, come descritto nei paragrafi precedenti.

Nella condizione iniziale le paratoie dell'opera di presa sono state ipotizzate chiuse, mentre quelle degli scarichi aperte. Come velocità di apertura è stato assunto in entrambi i casi 0.4 m/min.

5.8.3 CONNESSIONI IDRAULICHE E SFIORATORI DI SICUREZZA

La connessione idraulica tra i settori Prulli 0 e Prulli 1 della cassa in corrispondenza della bretella ferroviaria sono stato simulati come tombini idraulici (culvert) secondo la metodologia riportata al § 5.1.

Gli sfioratori di sicurezza e l'opera di connessione tra i moduli Prulli 1 e Prulli 2 hanno un funzionamento a stramazzo in parete grossa per il quale è stato scelto un coefficiente di efflusso non rigurgitato pari a 0.325. In funzione del grado di rigurgito tale coefficiente è adeguato come descritto precedentemente.

5.9 CRITERI GENERALI DELLA PROGETTAZIONE IDRAULICA

Per il raggiungimento degli obiettivi generali del progetto esposti al § 1 la progettazione idraulica delle opere è stata guidata dai seguenti criteri:

- a) la laminazione delle piene fino alla portata obiettivo di 3400 mc/s per la città di Firenze è raggiungibile attraverso una gestione coordinata dell'intero sistema di casse del Valdarno, trascurando la finalità di massimizzare l'efficienza delle singole opere a favore di una maggiore efficienza del sistema nello sfasare le piene dei fiumi Arno e Sieve;
- b) la massima flessibilità di esercizio delle opere è garantita da organi mobili di regolazione delle opere di presa;

- c) l'ottimizzazione del sistema, con particolari riferimento alla gestione delle paratoie, è mirata ad ottenere la massima riduzione delle portate sul fiume Arno a valle della confluenza del fiume Sieve;
- d) le simulazioni idrauliche sono condotte ipotizzando di conoscere i livelli idrometrici misurati presso le stazioni di misura disponibili e di poter prevedere con un relativo anticipo le portate attese. In tal senso la gestione delle opere di presa non può che basarsi su un robusto e affidabile sistema di monitoraggio e preannuncio idro-pluviometrico che, accoppiato alla modellazione idraulica, permetta di ottimizzare, per ogni evento di piena reale, le modalità di funzionamento delle paratoie nell'ambito di protocollo generale da definirsi prima dell'entrata in esercizio delle casce. Sull'argomento si rimanda alle conclusioni del § 17;
- e) la definizione delle modalità di gestione delle paratoie delle quattro casce è ottimizzata per ciascun scenario idrologico analizzato;
- f) le saracinesche delle opere di presidio delle casce (per l'immissione del reticolo secondario) rimangono aperte fino al momento dell'inizio dell'invaso dalle opere di presa;
- g) le opere di scarico delle casce e le opere di presidio lungo le arginature fluviali rimangono aperte finché la loro quota di scorrimento non è raggiunta dai livelli in alveo del fiume Arno;
- h) raggiunto il massimo invasore le opere di presa vengono chiuse per evitare l'inversione di flusso verso il fiume durante il ramo decrescente dell'indrogramma;
- i) le opere di scarico delle casce ed le opere di presa vengono riaperte quando all'idrometro di Rosano la portata è inferiore a 1700 mc/s;
- j) per fronteggiare il caso di una successione di picchi di piena, le opere di scarico sono dimensionate affinché la durata di svasso sia sufficientemente breve;
- k) in generale le opere idrauliche sono dimensionate con riferimento al livello idrico duecentennale più franco di sicurezza di 70 cm;
- l) la messa in sicurezza locale dalle piene del fiume Arno è affidata a interventi di difesa passiva (argini), verificando in ogni caso il non aggravio del rischio delle aree contermini, anche in relazione all'allagabilità residua per intermittenza di scolo del reticolo secondario;
- m) in relazione alla fattibilità tecnica, al contesto territoriale, agli impatti previsti e ad un'analisi costi/benefici, le criticità la cui risoluzione è stata valutata eccessivamente

onerosa rispetto al rischio da esse determinato sono affrontate con interventi temporanei di gestione del rischio.

In merito al **franco di sicurezza**, assunto pari a 70 cm, sia per gli argini di cassa che per quelli fluviali, si precisa che lo stesso è più che sufficiente a contenere il carico energetico totale. E' stato inoltre tenuto conto che è in corso di progettazione l'intervento di potenziamento della diga di Levane che permetterà la laminazione di almeno 10 Mm³ e la riduzione dei picchi di piena nel tratto a valle dove si colloca la cassa Prulli [37].

Infine la dotazione di uno sfioratore di sicurezza per ciascun modulo della cassa e delle paratoie manovrabili, anche da remoto, dell'opera di presa e delle opere di scarico permette di limitare a qualsiasi valore prefissato il massimo livello in cassa.

5.10 ANALISI DEI RISULTATI DELLO STATO DI PROGETTO

Le opere in progetto consentono un miglioramento della capacità di laminazione delle piene del fiume Arno e una mitigazione delle condizioni di pericolosità delle aree limitrofe. Queste infatti risultano non più allagabili dal fiume Arno fino al tempo di ritorno di 200 anni, con un franco di 70cm, fatta eccezione per situazioni puntuali che verranno specificate in seguito. Permane un rischio residuo per tempi di ritorno più alti e per intermittenza di scolo del reticolo secondario, per il quale si rimanda al successivo § 16 e seguenti.

Rispetto allo stato attuale la cassa modifica le modalità di invaso della pianura alluvionale, ritardando l'inizio della laminazione ed andando ad agire sui picchi di piena invece che nella fase crescente dell'onda.

Nella tabella 5.13 e nelle figure 5.20 e 5.21 sono messe a confronto le portate al colmo e gli idrogrammi dello stato attuale e di progetto immediatamente a valle del sistema di casse (sez. 731). Lo stesso per la tabella 5.14 e le figure 5.22 e 5.23, ma con riferimento alla sezione 672 a Pontassieve, dopo la confluenza del fiume Sieve.

Tr	durata	Stato attuale	Stato progetto	Diff.
[anni]	[ore]	[mc/s]	[mc/s]	[mc/s]
30	12	1902	1636	266
30	18	1905	1641	265
30	24	1796	1580	216
30	36	1409	1373	36
200	12	2623	2565	59
200	18	2750	2648	101
200	24	2701	2522	179
200	36	2328	2157	171

Tab. 5.13: Portate massime a valle del sistema di casce (sez. 731)

Tr	durata	Stato attuale	Stato progetto	Diff.
[anni]	[ore]	[mc/s]	[mc/s]	[mc/s]
30	12	2444	2458	-14
30	18	2441	2327	113
30	24	2299	2125	175
30	36	1769	1734	35
200	12	3389	3347	42
200	18	3533	3239	294
200	24	3481	3153	328
200	36	3039	2724	315

Tab. 5.14: Portate massime all'idrometro di Rosano (sez. 672)

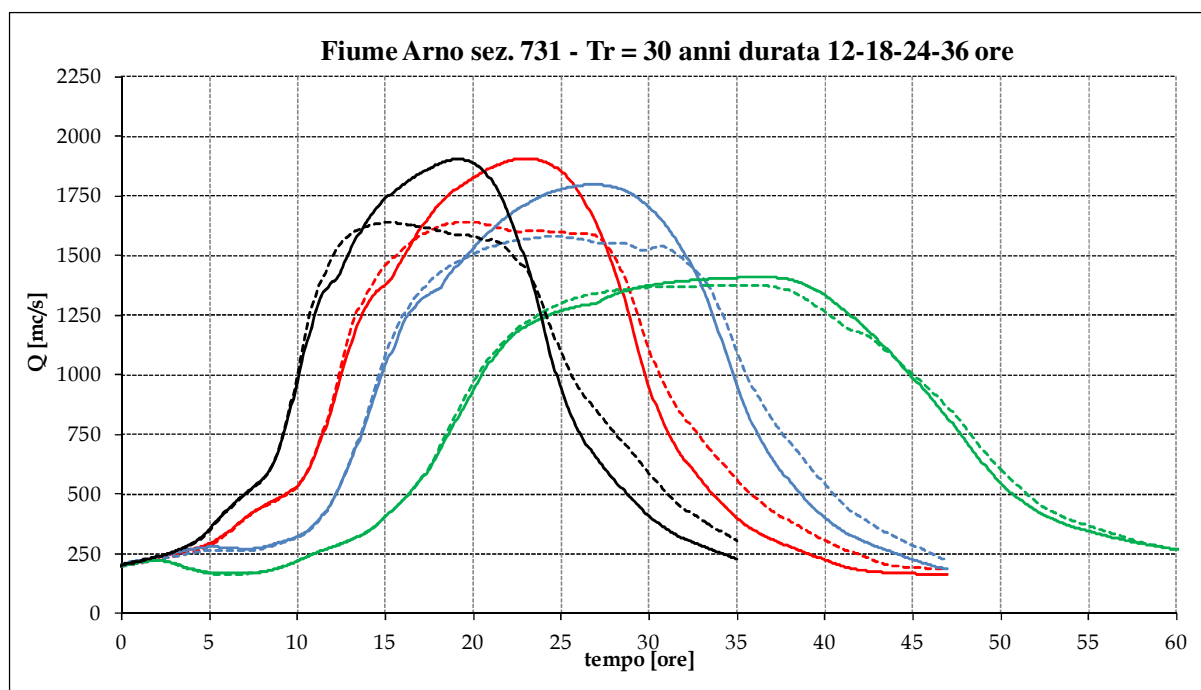


Fig. 5.20

Nero: durata 12 ore ; Rosso: durata 18 ore; azzurro: durata 24 ore; verde: 36 ore

Linea continua: stato attuale

Linea tratteggiata: stato di progetto

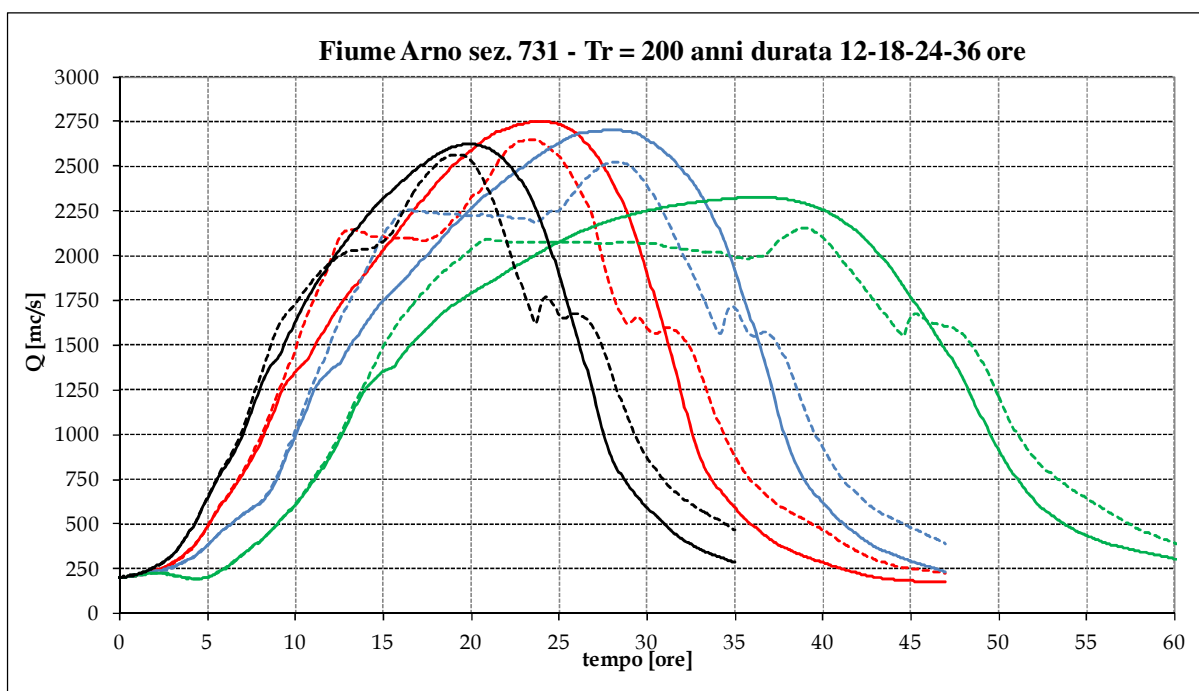


Fig. 5.21

Nero: durata 12 ore; Rosso: durata 18 ore; azzurro: durata 24 ore; verde: 36 ore

Linea continua: stato attuale

Linea tratteggiata: stato di progetto

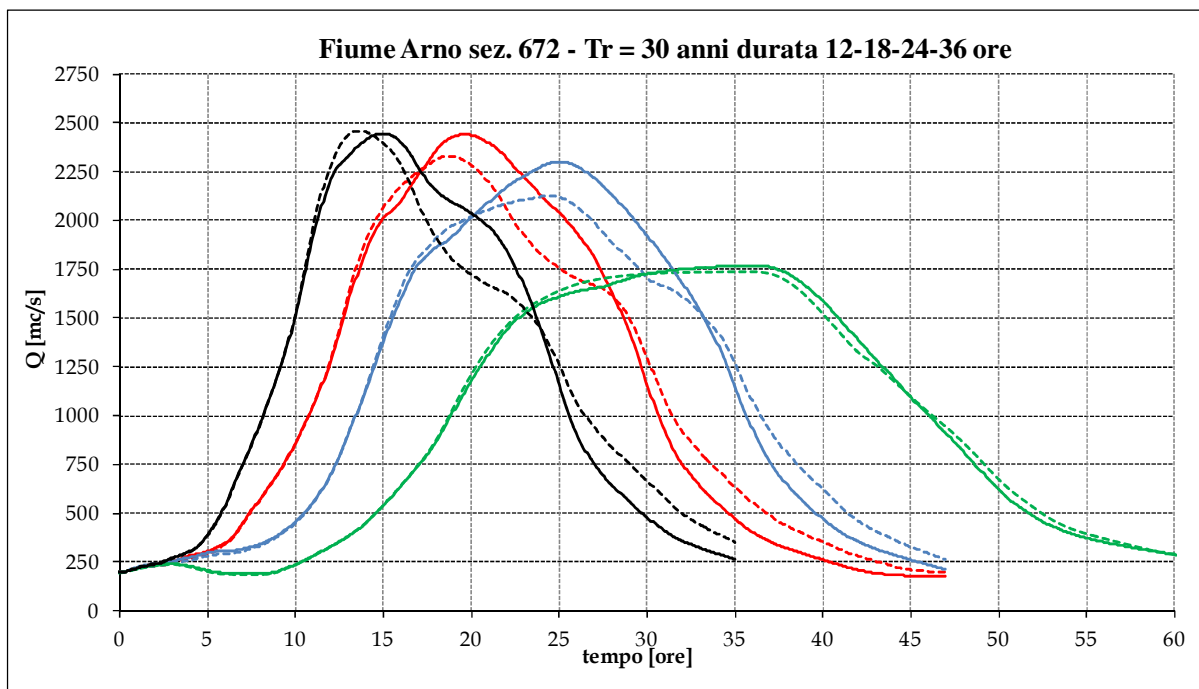


Fig. 5.22

Nero: durata 12 ore; Rosso: durata 18 ore; azzurro: durata 24 ore; verde: 36 ore

Linea continua: stato attuale

Linea tratteggiata: stato di progetto

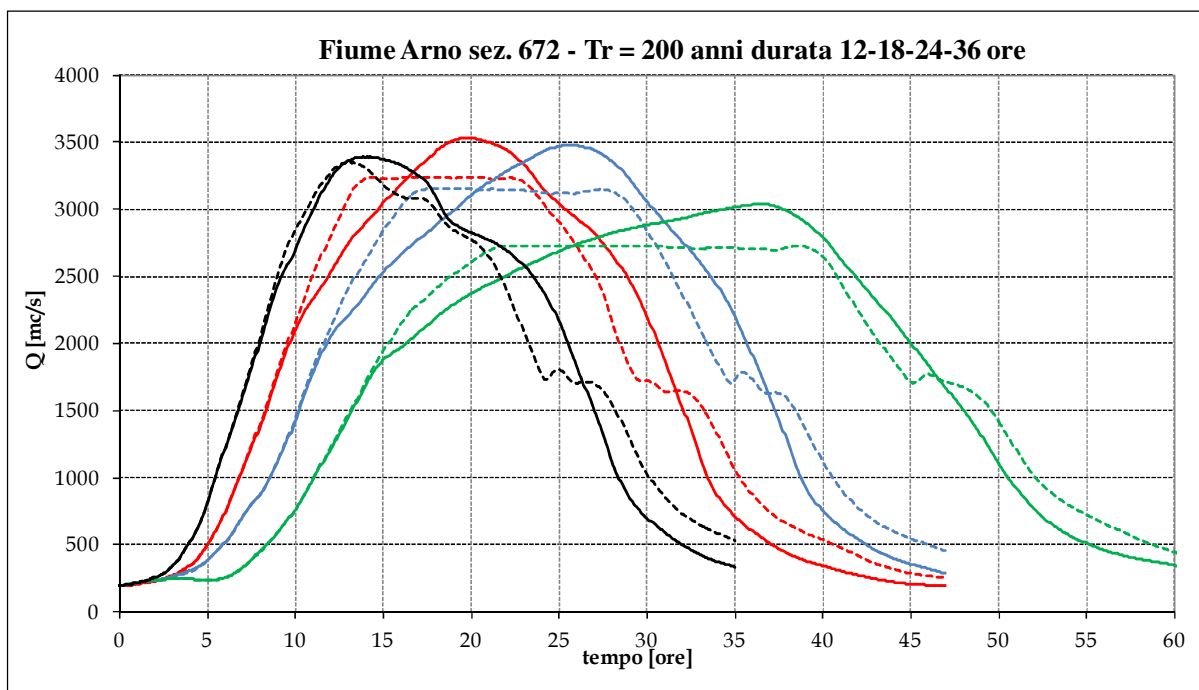


Fig. 5.23

Nero: durata 12 ore; Rosso: durata 18 ore; azzurro: durata 24 ore; verde: 36 ore

Linea continua: stato attuale

Linea tratteggiata: stato di progetto

Nelle successive tabelle sono riportati i volumi invasati e i livelli nelle casse di espansione nello stato di progetto per i vari scenari idrologici studiati.

Tr	durata	Restone	Pizziconi1	Pizziconi2	Prulli	Leccio	Burchio	Totale
[anni]	[ore]	[Mmc]						
30	12	3.89	0.37	0.66	3.35	4.49	0.10	12.86
30	18	3.89	0.36	0.69	4.46	4.74	0.10	14.24
30	24	3.57	0.27	0.26	4.19	4.08	0.03	12.41
30	36	0.34	0.04	0.05	1.36	1.68	0.00	3.47
200	12	5.64	1.63	2.40	6.88	7.96	0.52	25.03
200	18	5.72	1.78	2.47	7.17	8.22	0.55	25.92
200	24	5.46	1.52	2.35	6.72	7.82	0.50	24.38
200	36	4.56	0.85	2.02	5.74	6.58	0.35	20.10

Tab. 5.15: Volumi massimi invasati nel sistema di casse

Tr	durata	Restone	Pizziconi1	Pizziconi2	Prulli	Leccio	Burchio
[anni]	[ore]	[m slm]					
30	12	128.00	125.47	122.65	122.85	111.44	112.30
30	18	127.99	125.44	122.72	122.94	111.62	112.31
30	24	127.68	125.18	121.32	122.71	111.16	111.69
30	36	123.01	124.09	120.37	120.48	110.91	108.00
200	12	129.66	127.31	127.31	124.93	113.94	114.91
200	18	129.73	127.5	127.5	125.12	114.13	115.11
200	24	129.48	127.19	127.18	124.8	113.83	114.8
200	36	128.63	126.35	126.34	123.99	112.94	113.86

Tab. 5.16: Livelli idrici massimi invasati nel sistema di casse

Per gli eventi più significativi (Tr 200 anni e durate 12 e 18 ore) i successi grafici rappresentano il confronto tra le portate a monte e a valle delle opere di presa delle quattro casse di espansione, nonché la portata sfiorata, i livelli idrici in ciascuna cassa e quelli in alveo in corrispondenza delle opere di presa. I dati fanno riferimento alle modalità di gestione delle paratoie delle opere di presa definite secondo i criteri di progetto esposti al precedente paragrafo 5.9, con inizio dell'invaso al raggiungimento dei livelli in alveo indicati nella seguente tabella.

		Soglia opera di presa m slm]			
		Restone	Pizziconi	Prulli	Leccio
		126.30	124.50	121.40	110.60
Tr	durata	Livello idrici inizio apertura [m slm]			
[anni]	[ore]	Restone	Pizziconi	Prulli	Leccio
30	12	126.30	124.50	121.40	110.60
30	18	126.30	124.50	121.40	110.60
30	24	126.30	124.50	121.40	110.60
30	36	-	-	121.40	110.60
200	12	126.30	124.50	121.40	110.60
200	18	128.85	126.50	123.80	112.90
200	24	128.30	126.30	124.10	113.20
200	36	128.20	126.10	123.70	112.85

Tab. 5.17 Livelli idrici di inizio invaso del sistema di casse

La gestione delle paratoie è stata ottimizzata per ciascun scenario con l'obiettivo di minimizzare la portata al colmo a valle della confluenza del fiume Sieve. Il tal modo, a discapito dell'efficienza delle singole casse di espansione, è stata invece massimizzata l'efficacia dell'intero sistema di interventi. Per il raggiungimento dell'obiettivo posto, particolarmente importante è riuscire a laminare le portate del fiume Arno che entrano in

fase con quelle massime del fiume Sieve, motivo per il quale la portata massima invasata dalle casse può non avvenire in corrispondenza del picco di portata (vedi a esempio la Fig. 5.21).

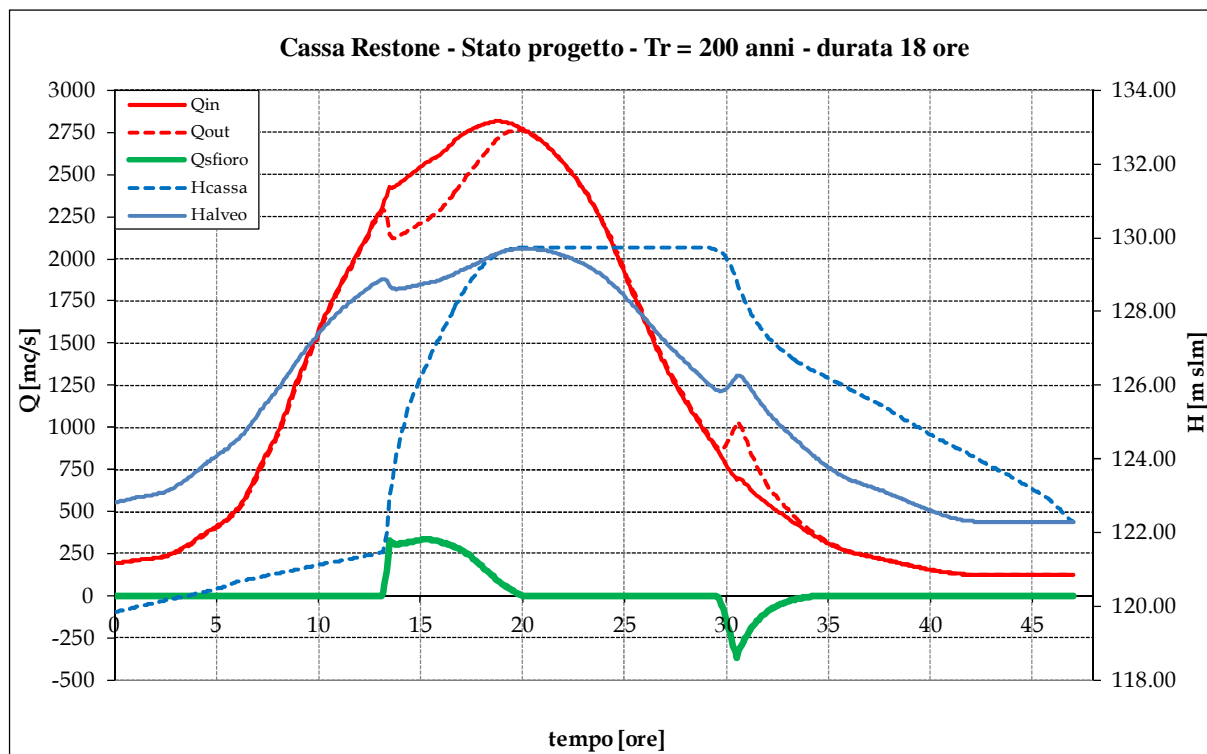


Fig. 5.24: Funzionamento idraulico dell'opera di presa di Restone per Tr 200 anni e durata 18 ore

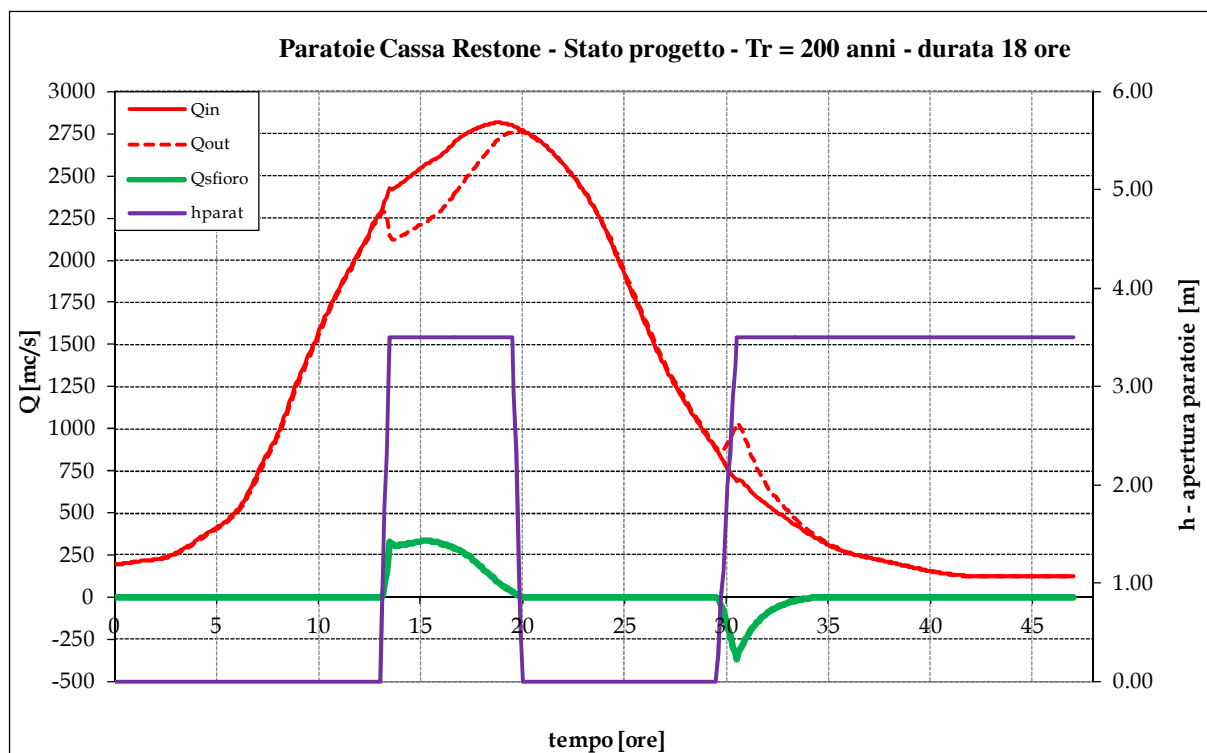


Fig. 5.25: Apertura delle paratoie dell'opera di presa di Restone per Tr 200 anni e durata 18 ore

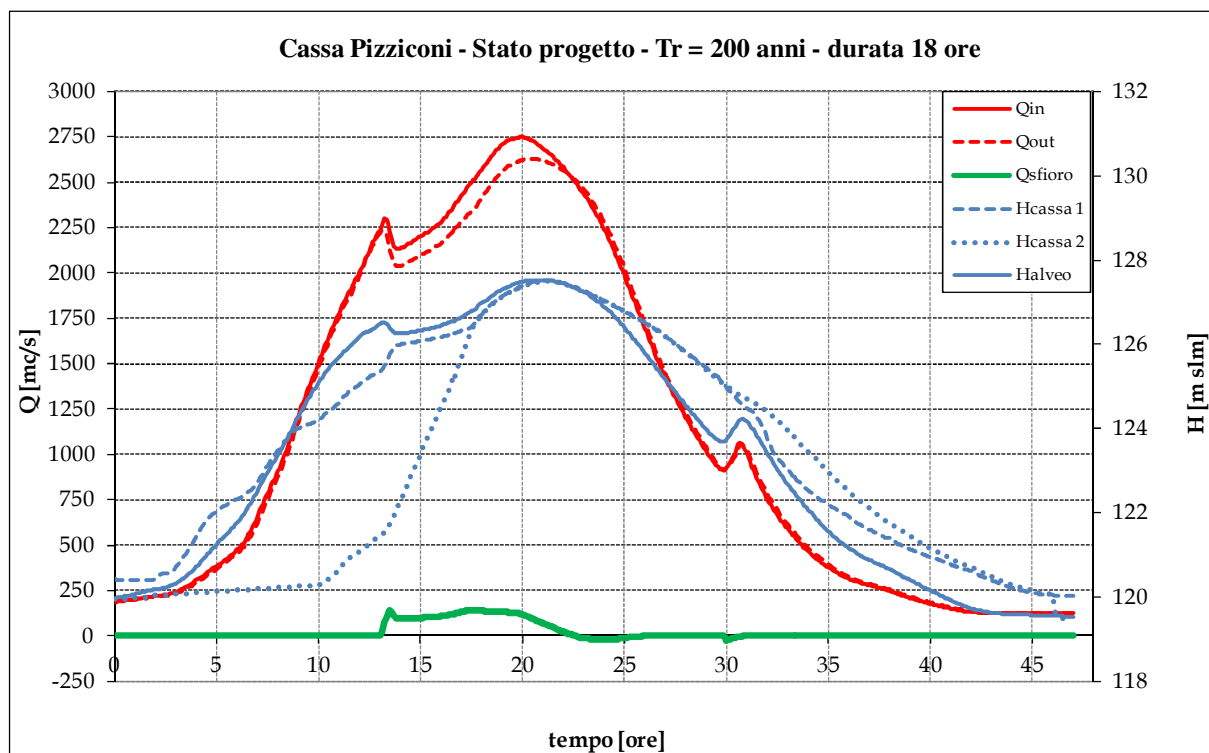


Fig. 5.26: Funzionamento idraulico dell'opera di presa di Pizziconi per Tr 200 anni e durata 18 ore

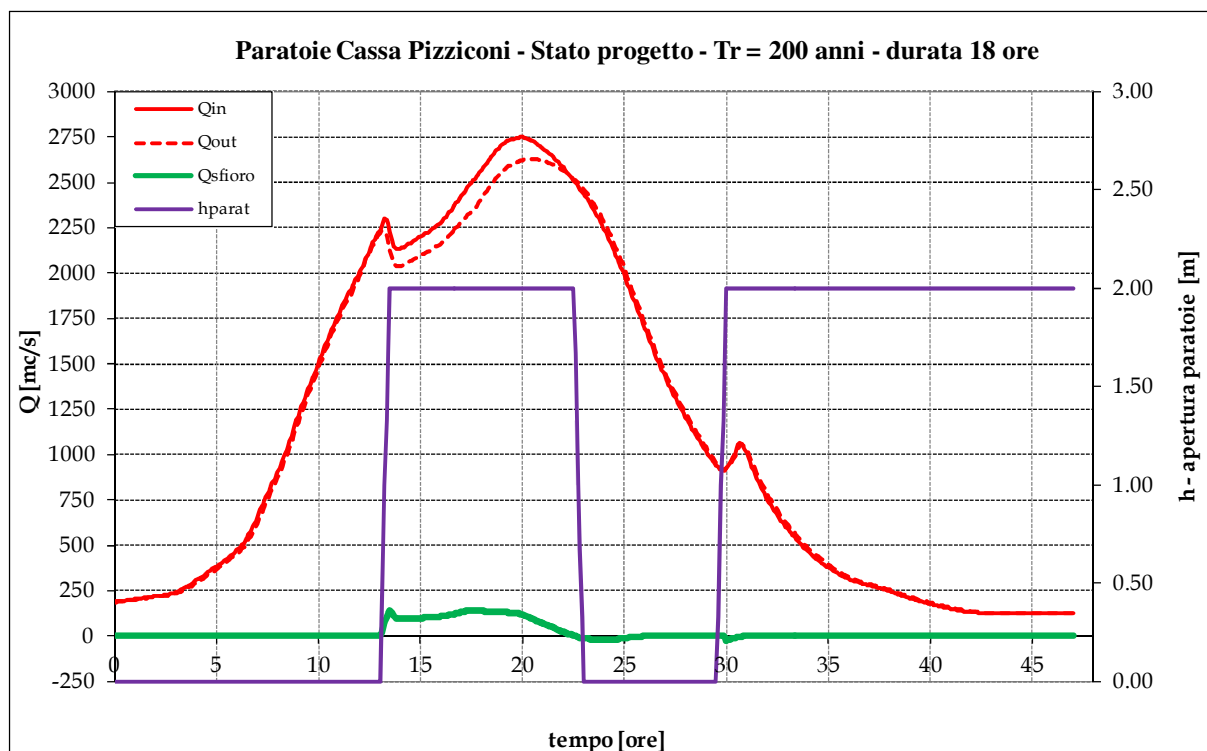


Fig. 5.27: Apertura delle paratoie dell'opera di presa di Pizziconi per Tr 200 anni e durata 18 ore

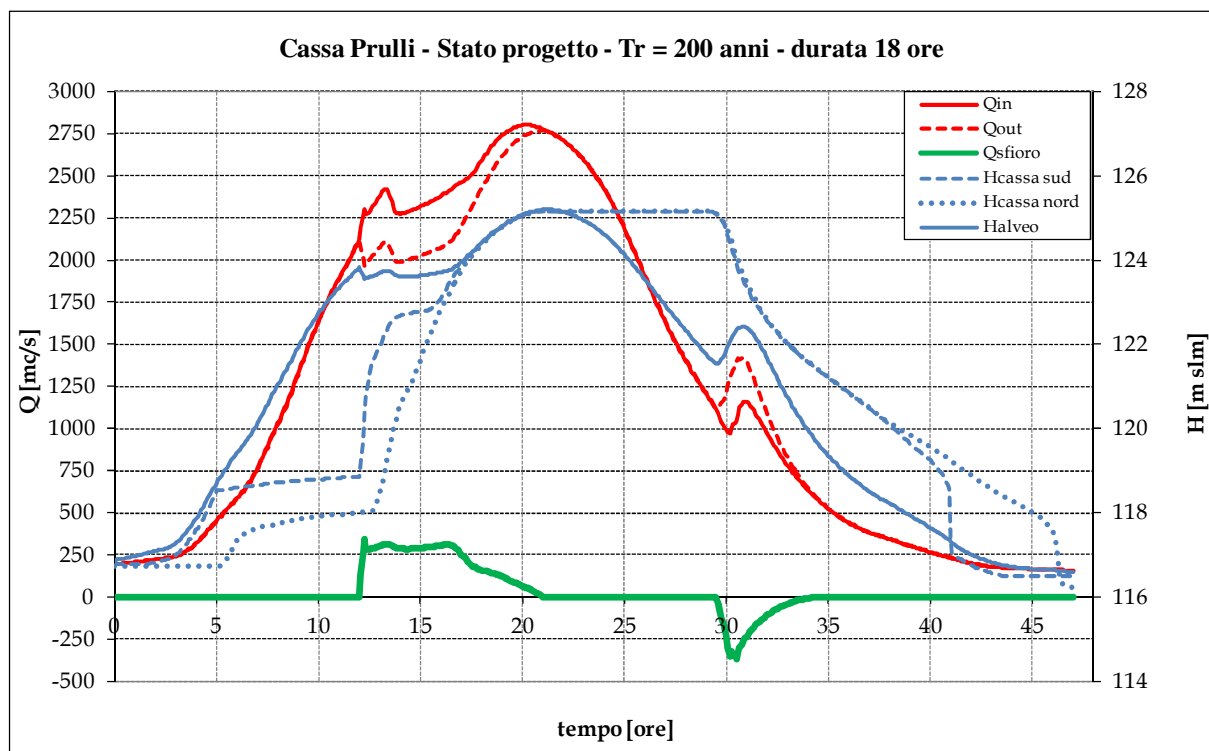


Fig. 5.28: Funzionamento idraulico dell'opera di presa di Prulli per Tr 200 anni e durata 18 ore

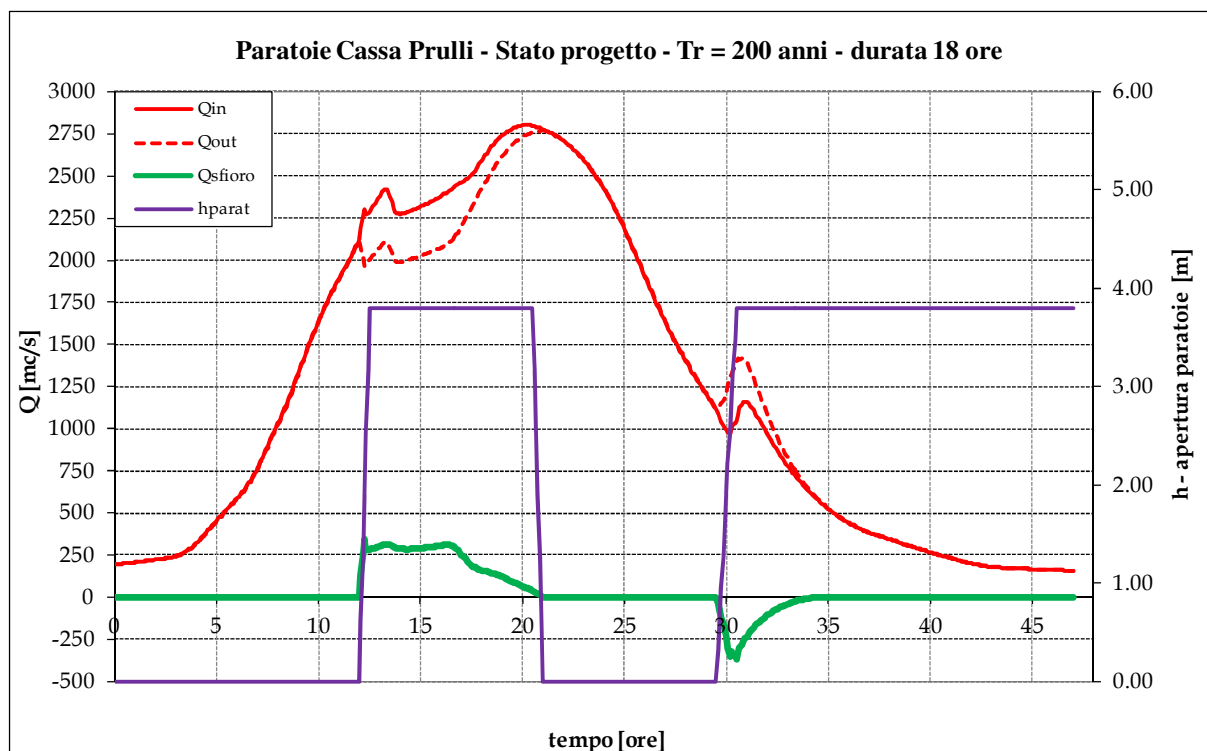


Fig. 5.29: Apertura delle paratoie dell'opera di presa di Prulli per Tr 200 anni e durata 18 ore

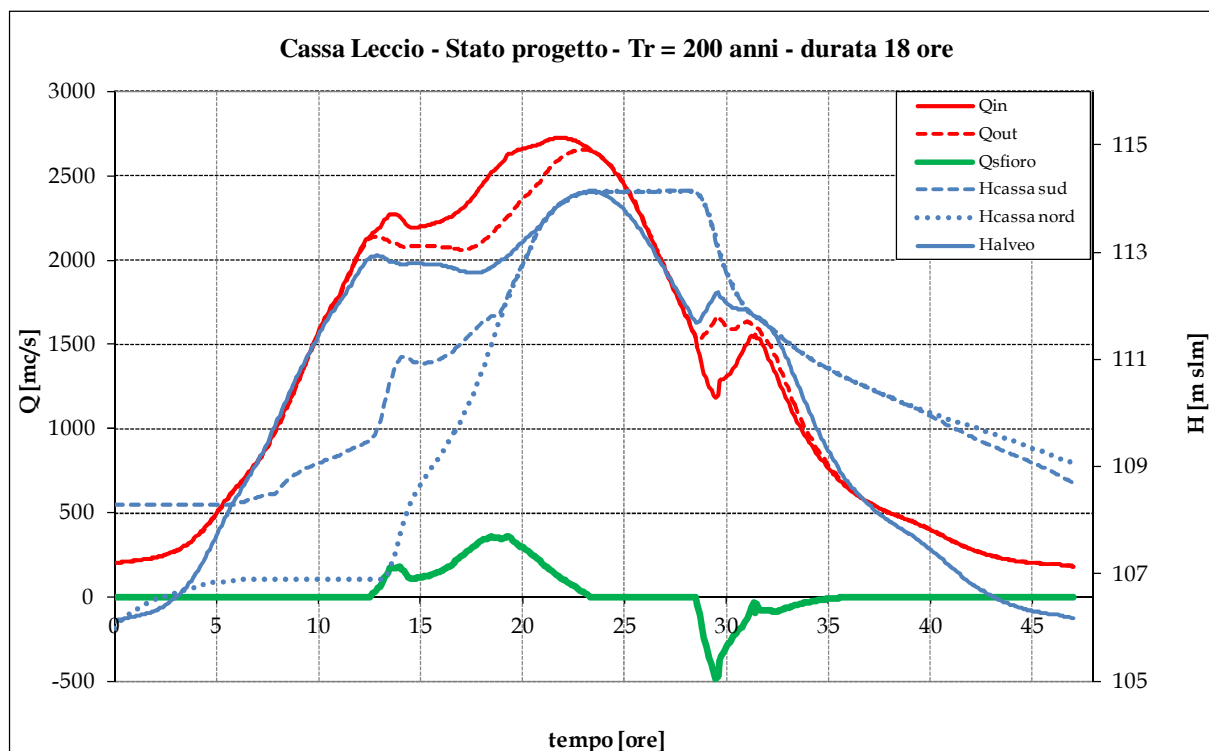


Fig. 5.30: Funzionamento idraulico dell'opera di presa di Leccio per Tr 200 anni e durata 18 ore

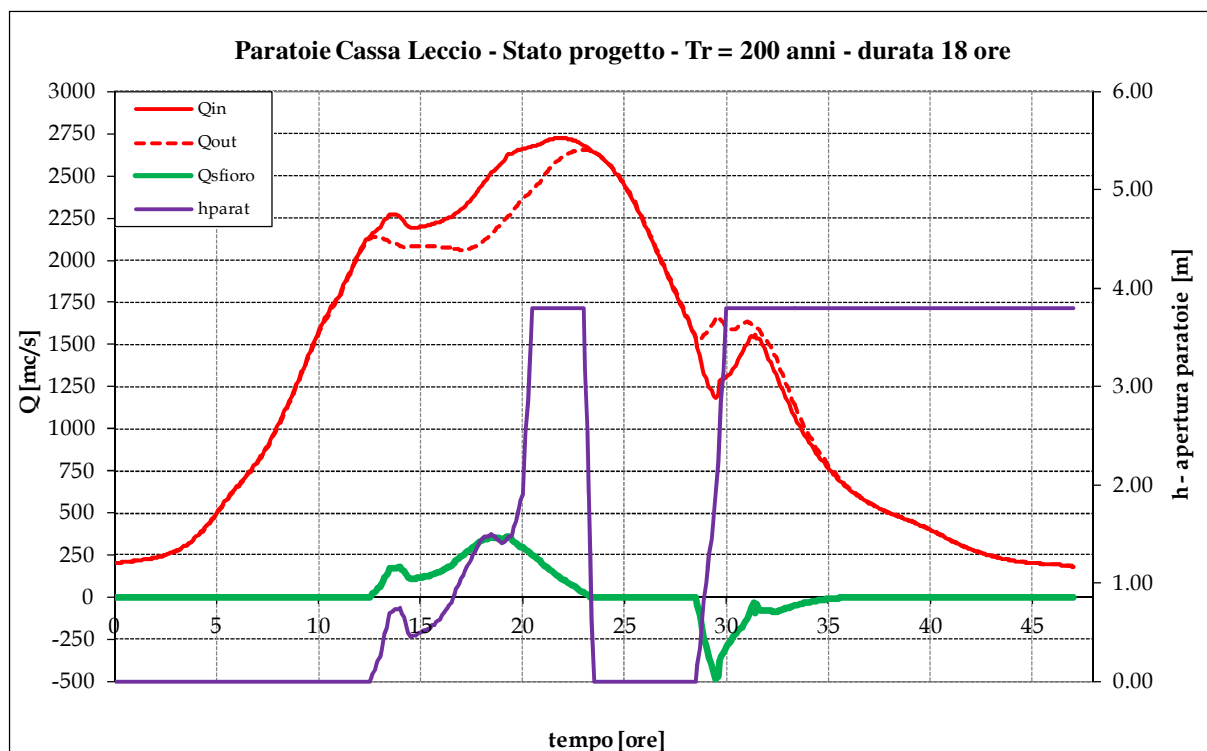


Fig. 5.31: Apertura delle paratoie dell'opera di presa di Leccio per Tr 200 anni e durata 18 ore

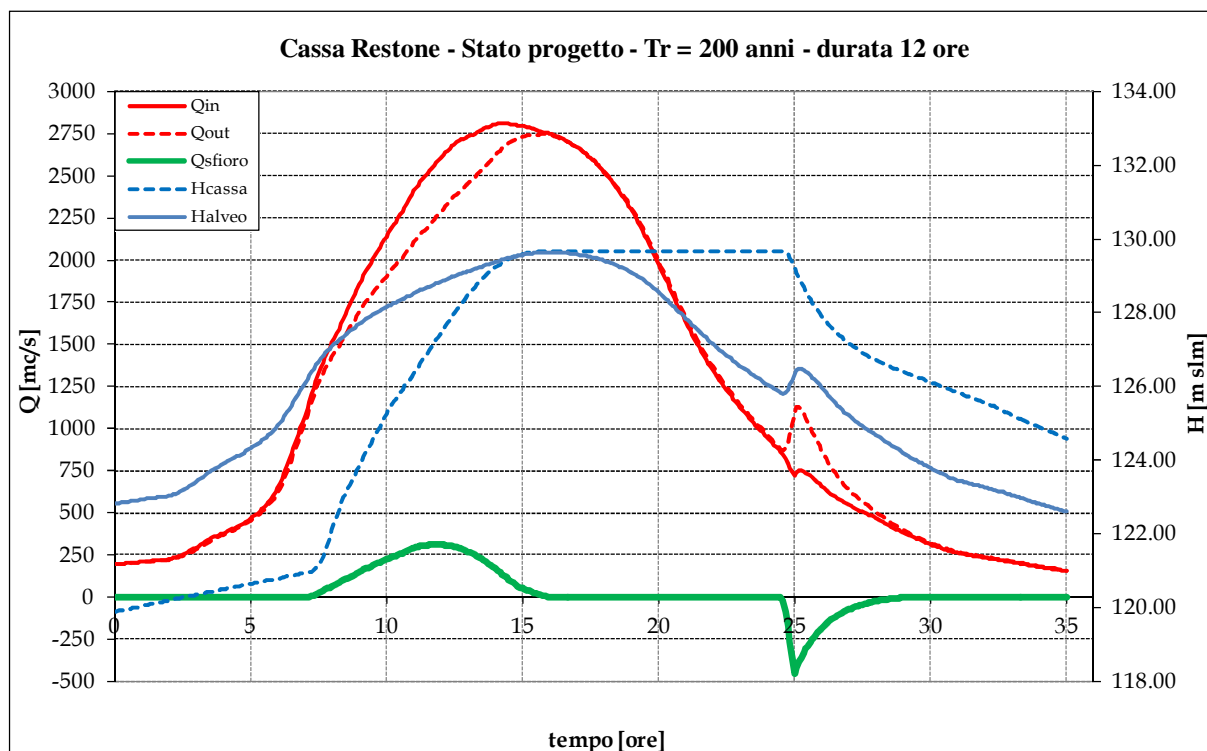


Fig. 5.32: Funzionamento idraulico dell'opera di presa di Restone per Tr 200 anni e durata 12 ore

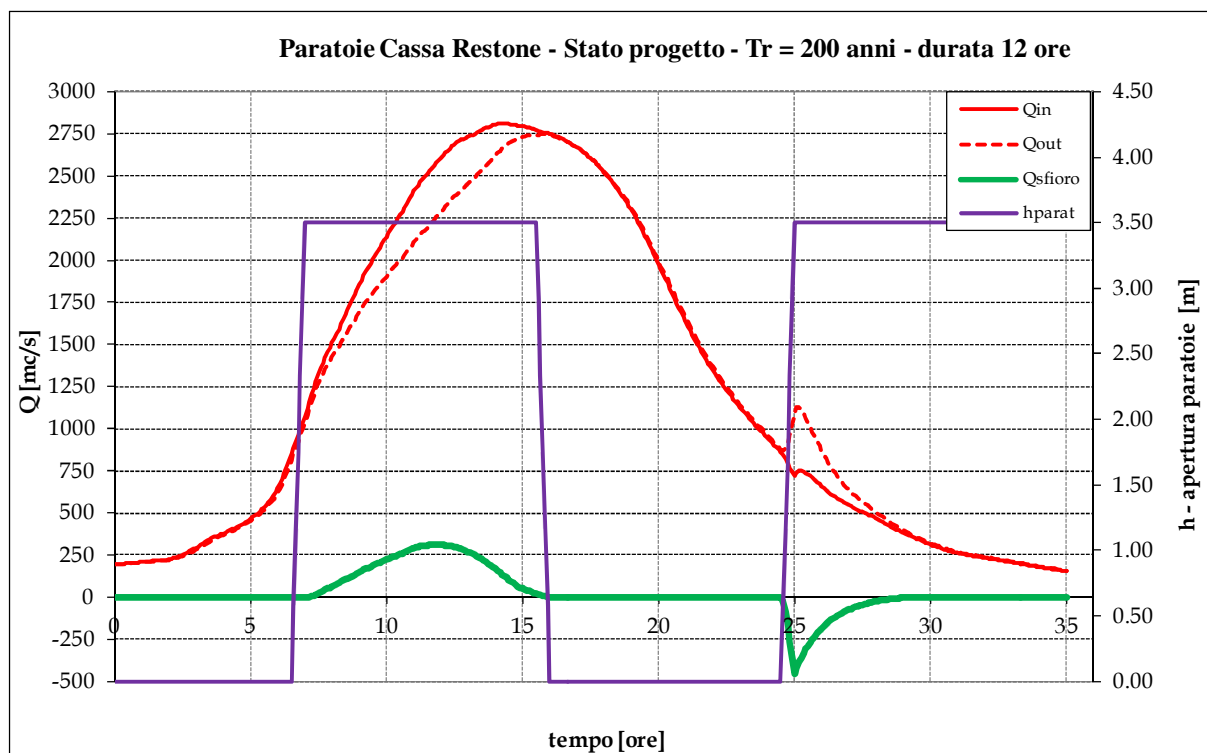


Fig. 5.33: Apertura delle paratoie dell'opera di presa di Restone per Tr 30 anni e durata 18 ore

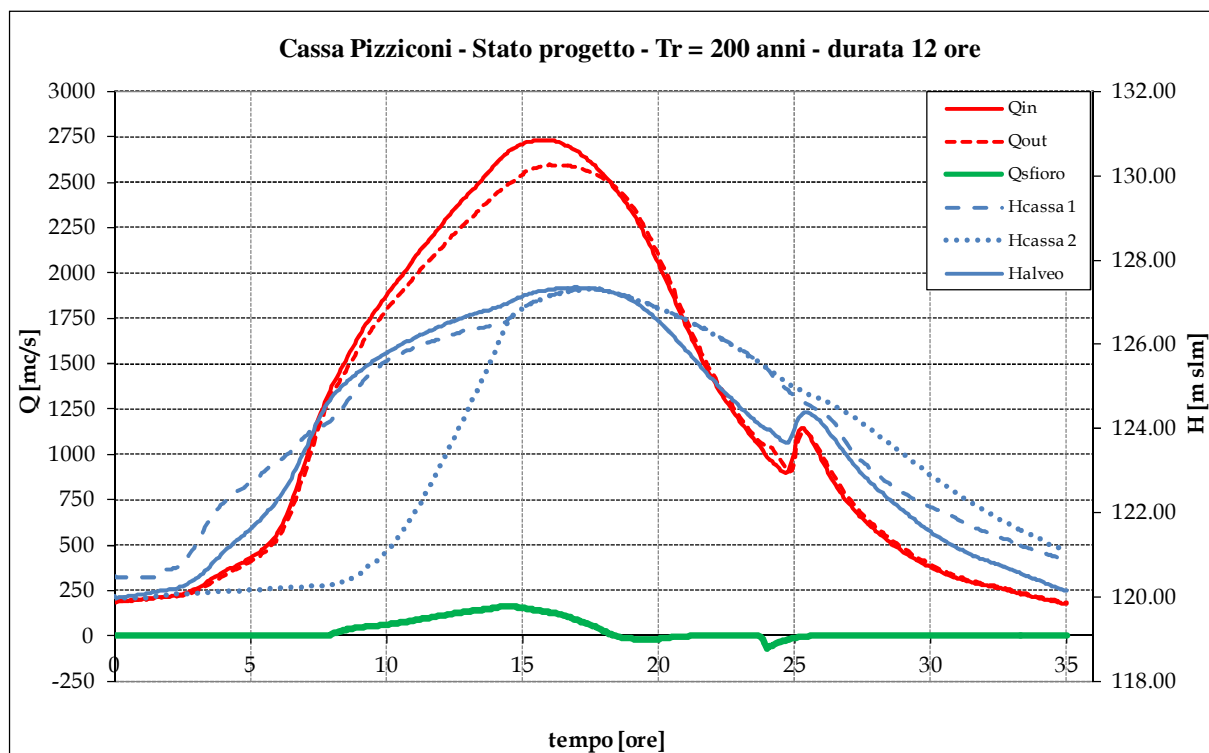


Fig. 5.34: Funzionamento idraulico dell'opera di presa di Pizziconi per Tr 200 anni e durata 12 ore

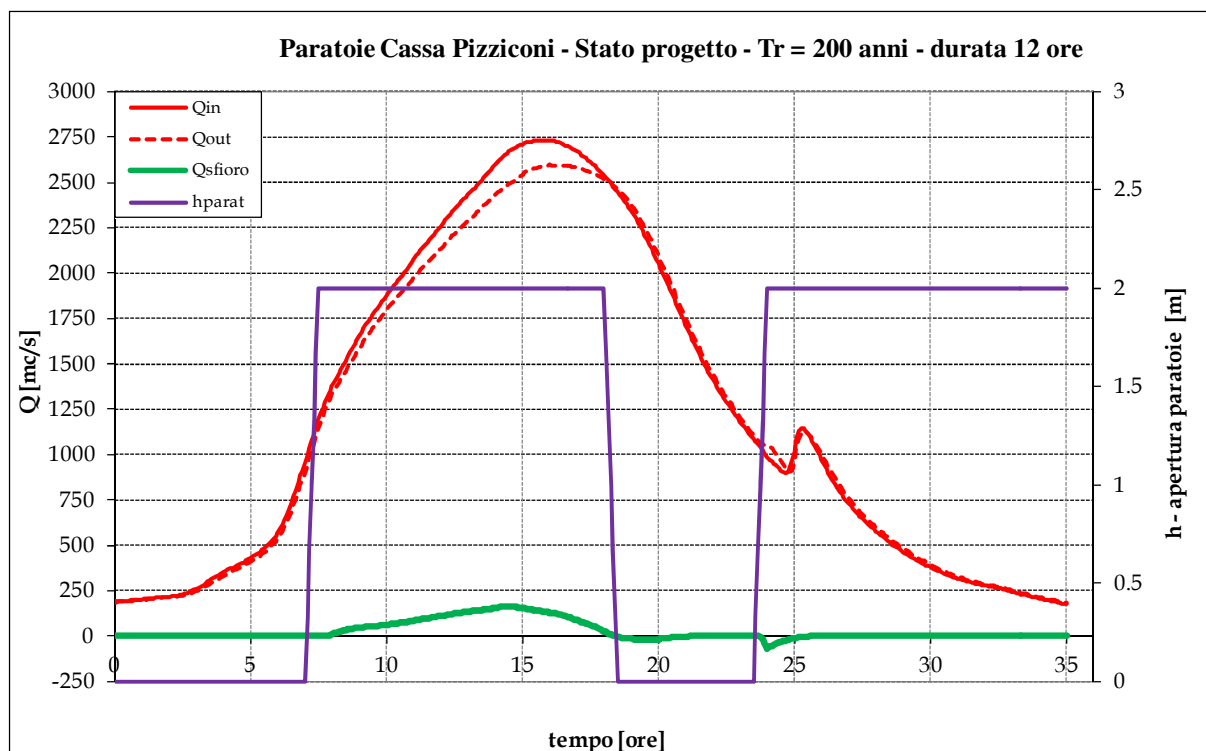


Fig. 5.35: Apertura delle paratoie dell'opera di presa di Pizziconi per Tr 200 anni e durata 12 ore

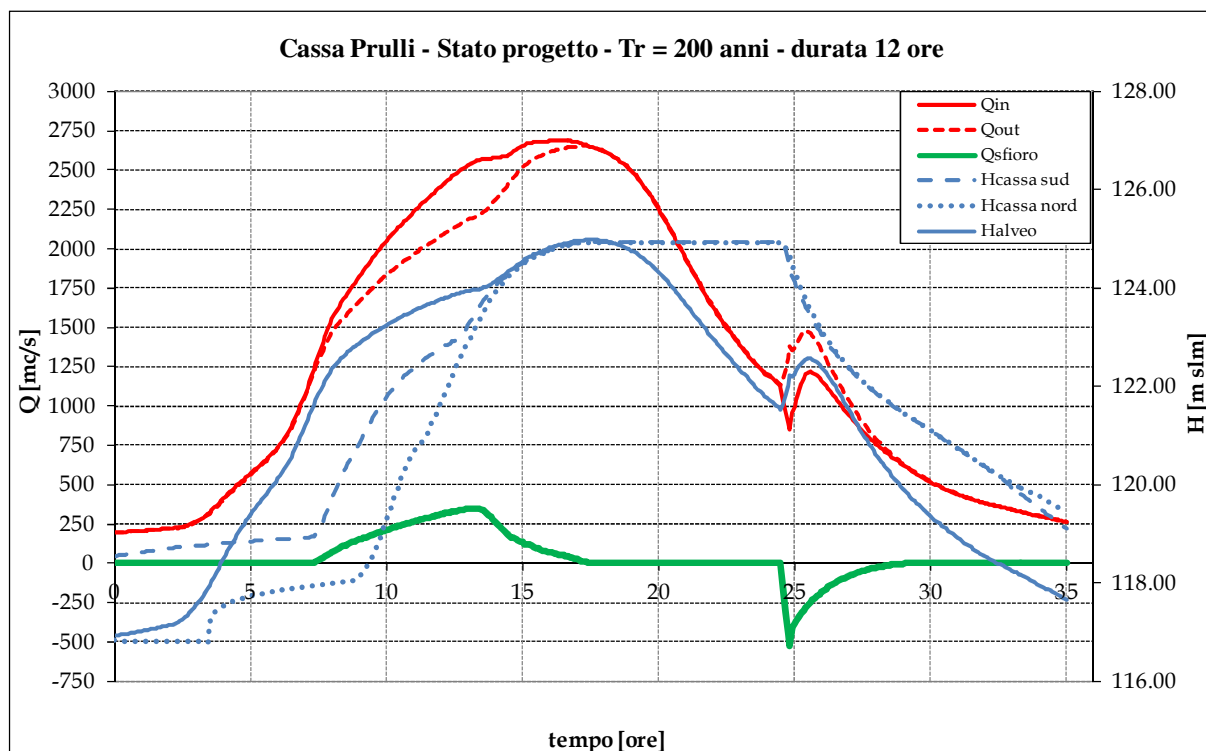


Fig. 5.36: Funzionamento idraulico dell'opera di presa di Prulli per Tr 200 anni e durata 12 ore

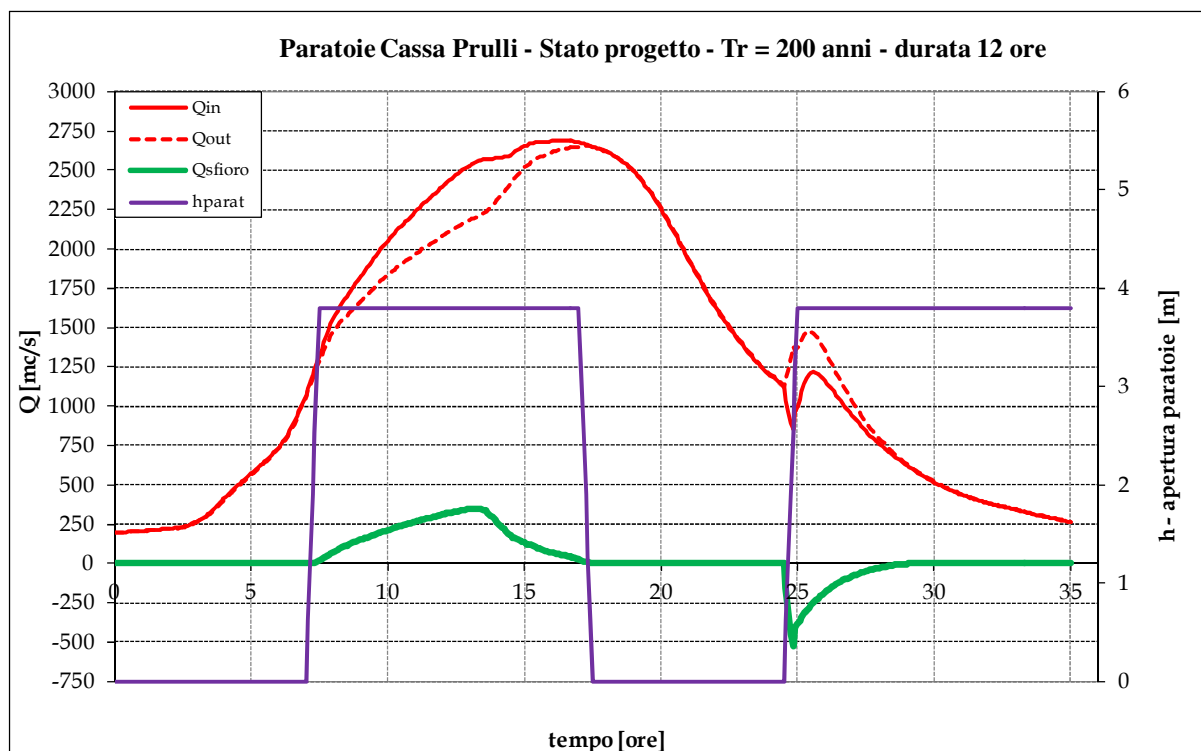


Fig. 5.37: Apertura delle paratoie dell'opera di presa di Prulli per Tr 200 anni e durata 12 ore

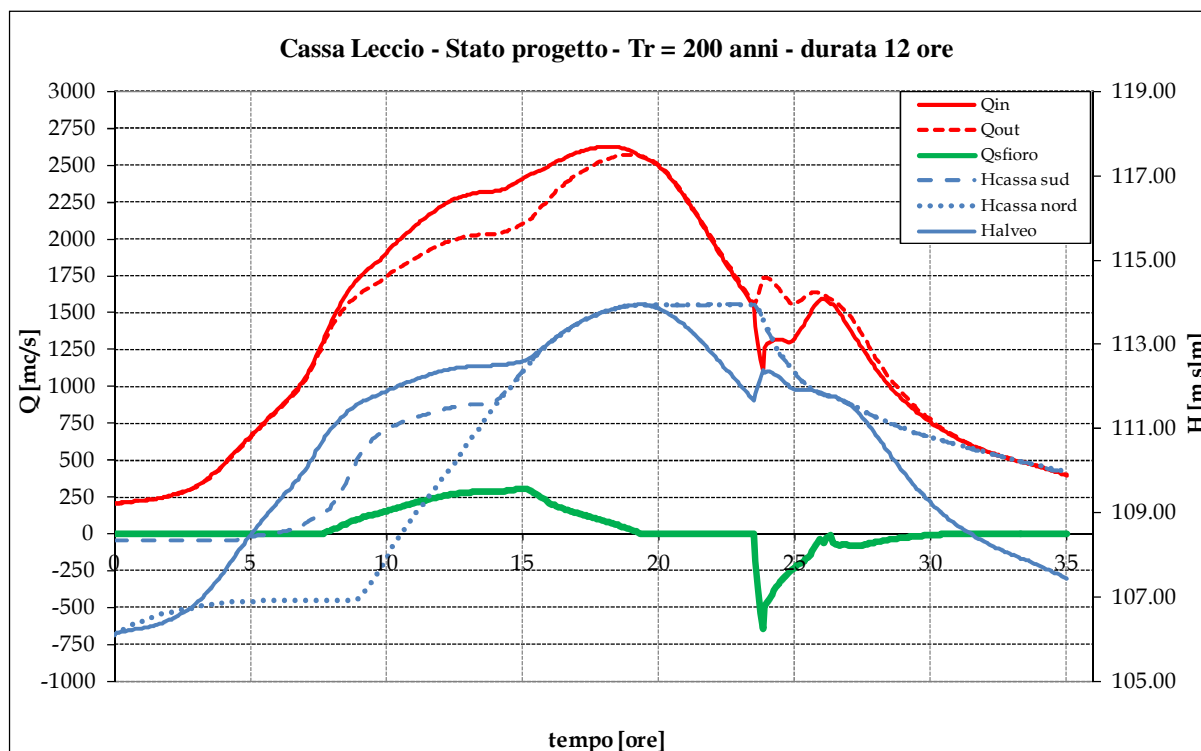


Fig. 5.38: Funzionamento idraulico dell'opera di presa di Leccio per Tr 200 anni e durata 12 ore

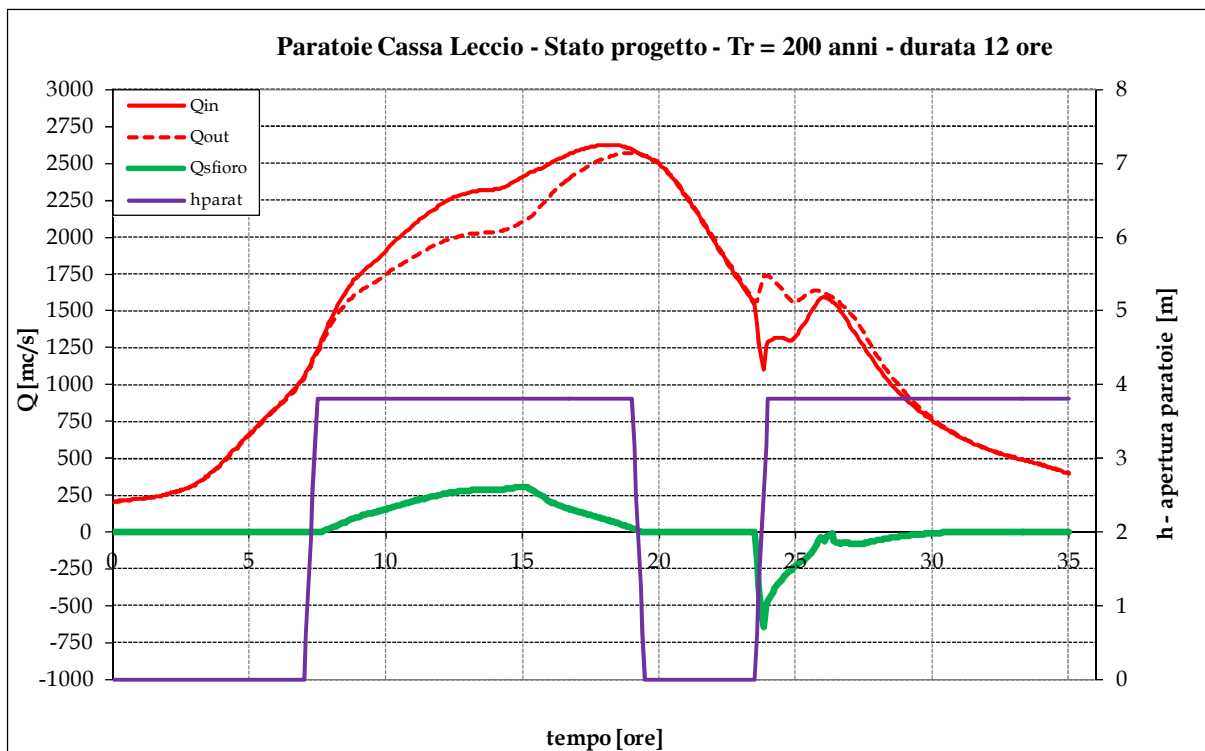


Fig. 5.39: Apertura delle paratoie dell'opera di presa di Leccio per Tr 30 anni e durata 18 ore

Relativamente alle modalità di svasso della cassa Prulli è stato verificato che, terminata la fase più intensa di piena, il tempo necessario a ripristinare le condizioni ante-evento dipende dalla velocità di riduzione dei livelli idrici del fiume Arno. Si ricorda che è stato assunto che lo svasso inizi dal momento in cui le portate all'idrometro di Rosano sono inferiori a 1700 mc/s. Il tempo di svasso della cassa Prulli è compreso tra le 12 e le 18 dalla riapertura degli scarichi e dell'opera di presa.

Le durate indicate sono riferite al settore di cassa di maggior capacità (Prulli 2), mentre per gli altri settori il completo svasso termina qualche ora prima.

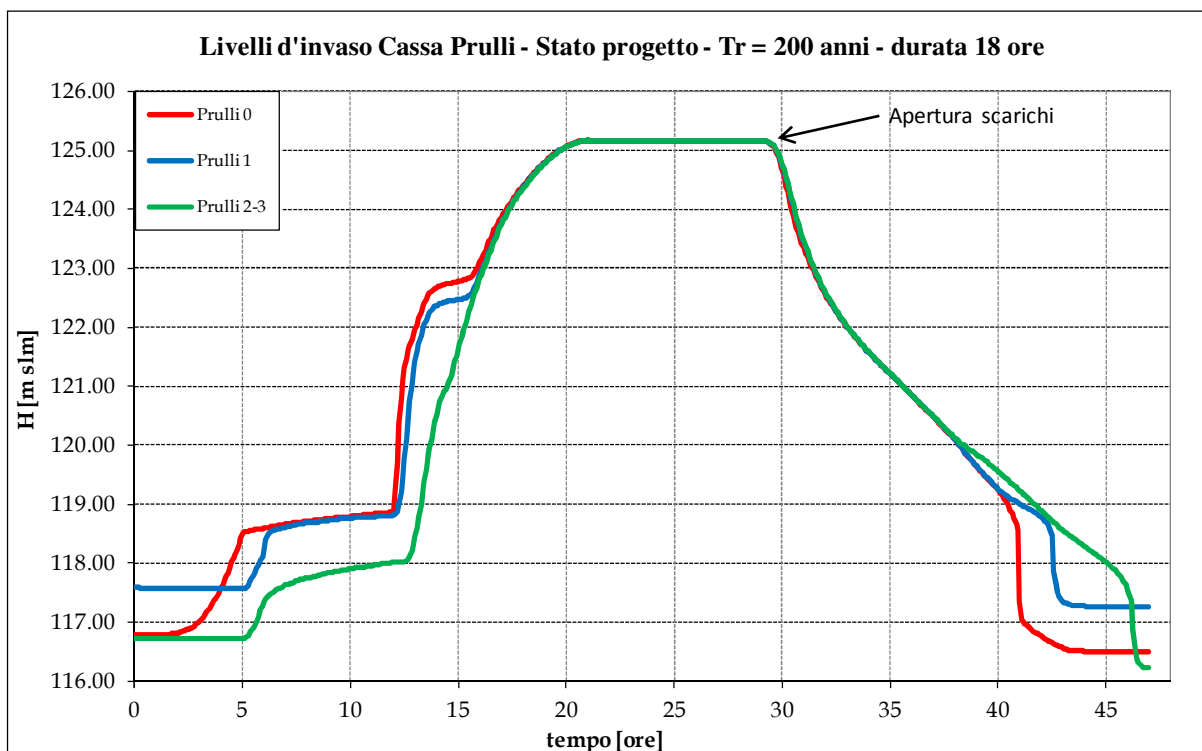


Fig. 5.40: Tempi di svasso della cassa Prulli per Tr = 200 anni e durata 18 ore

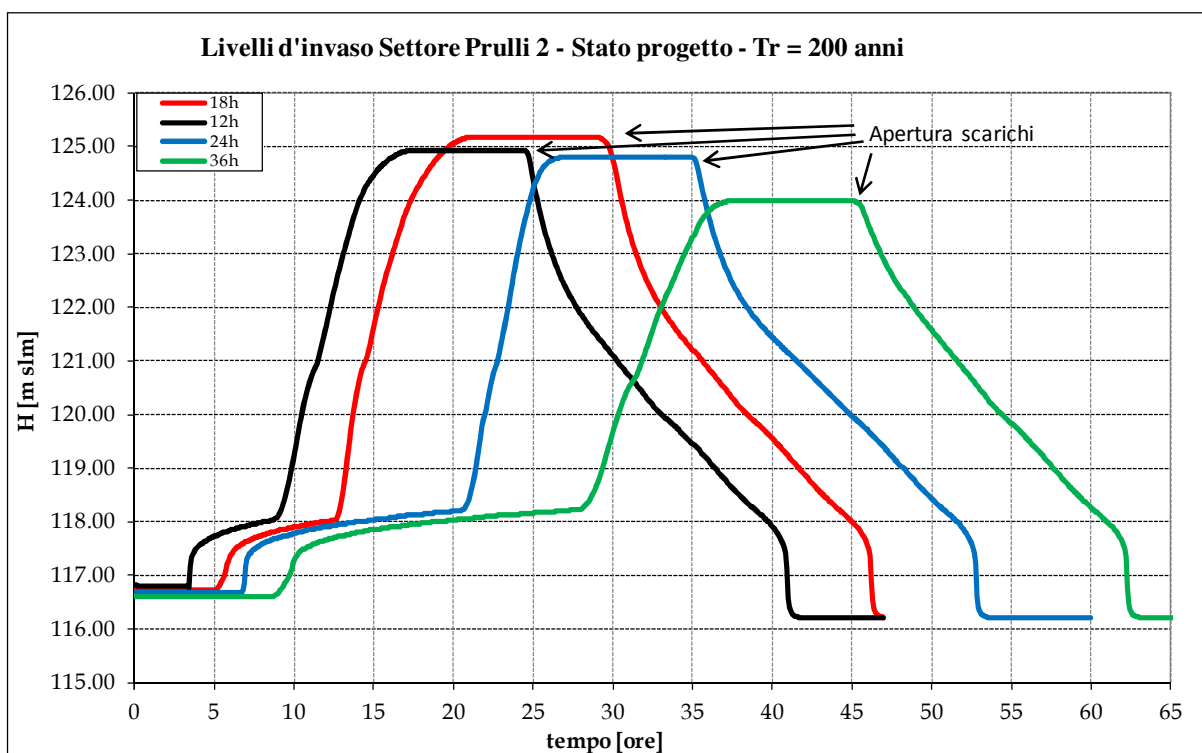
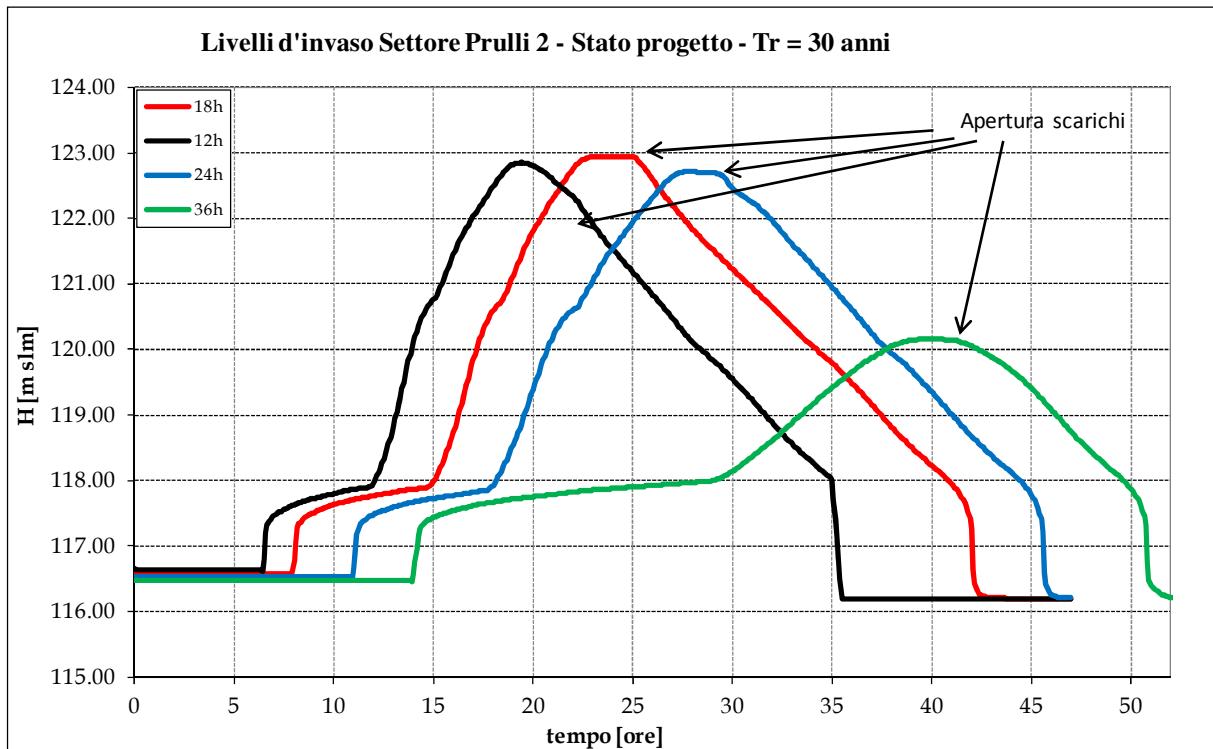


Fig. 5.41: Tempi di svasso della cassa Prulli per Tr = 200 anni

Fig. 5.42: Tempi di svasso della cassa Prulli per $Tr = 30$ anni

Il confronto dei risultati delle verifiche idrauliche dello stato attuale e di progetto dimostra la capacità del sistema di ridurre i picchi di piena con conseguente beneficio per i territori posti a valle. Esso però mette in evidenza anche il fatto che, per il tempo di ritorno 200 anni, le nuove arginature lungo fiume (quelle di cassa e quelle complementari) determinano un aumento dei livelli in alveo a monte della confluenza del torrente Chiesimone fino all'opera di presa della cassa Restone. Infatti, se da un lato la laminazione delle casse riduce le portate, dall'altro lato le arginature confinano tali portate in una sezione idraulica meno ampia, fattore che, nel tratto indicato, prevale rispetto al primo.

Nel tratto dal ponte di Matassino all'opera di presa di Prulli l'incremento dei livelli è di circa 60 cm; a monte (fino all'opera di presa di Restone) e a valle (fino al borro Moriano), la differenza diminuisce fino ad annullarsi. A valle del borro Moriano si ha un progressivo abbassamento dei livelli in alveo fino a raggiungere i 40 cm presso i ponti di Incisa.

Al contrario, per il tempo di ritorno trentennale si rileva un abbassamento del profilo tra 35 e 45 cm per effetto della significativa riduzione di picchi di piena prodotta dalle casse.

Relativamente al **tempo di ritorno trentennale** si rileva che:

1. per il tratto studiato le portate e i livelli nell'alveo del fiume Arno sono massimi per gli eventi di durata 12 e 18 ore (12 ore a monte della cassa Prulli);

2. a valle del sistema di casce (sez. 731) la portata massima è di circa 1640 mc/s con una riduzione rispetto allo stato attuale di circa 266 mc/s; per tutta la durata degli idrogrammi corrispondenti ai vari scenari idrologici la laminazione è massima, avendo considerato le paratoie delle casce alla massima apertura fin dall'istante in cui i livelli in alveo raggiungono la quote delle soglie di sfioro;
3. a valle della confluenza del fiume Sieve la portata massima è di 2440 mc/s che, seppur minore rispetto allo stato attuale per gli scenari di 18, 24 e 36 ore, vede un modesto incremento (circa 14 mc/s) per la durata di 12 ore. Ciò è da imputare al rilevante apporto del fiume Sieve per la sua durata critica e all'impossibilità di provvedere ad una maggiore laminazione del sistema di cassa sul fiume Arno (le portate massime del fiume Arno si sovrappongono alla fase ascendente della piena del fiume Arno quando battenti sulle soglie di sfioro sono modesti). Si precisa comunque che la portata di 2440 mc/s non produce esondazioni nella città di Firenze;
4. il volume complessivo invasabile nelle casce è pari 12.86 Mmc e 14.24 Mmc rispettivamente per le durate 12 e 18 ore;
5. il volume sottratto alla laminazione in conseguenza degli interventi di messa in sicurezza locale (Matassino, Figline, Lagaccioni, Incisa, Pian dell'Isola, Rignano) è di 2.5 Mmc;

Relativamente al **tempo di ritorno duecentennale** si rileva che:

1. per il tratto studiato le portate e i livelli nell'alveo del fiume Arno sono massimi per l'evento di durata 18 ore;
2. a valle del sistema di casce (sez. 731) la portata massima è di circa 2648 mc/s con una riduzione rispetto allo stato attuale di circa 101 mc/s; come si evince dalla Figura 5.20, la portate sfiorate sono massime per la parte ascendente dell'idrogramma che si sovrappone ai colmi del fiume Sieve a discapito della laminazione del picco di piena; ciò garantisce lo sfasamento dei due corsi d'acqua con maggiori benefici a valle della confluenza;
3. a valle di questa la portata massima è di 3347 mc/s corrispondente alla durata dell'evento di 12 ore. In tale scenario la riduzione del colmo risulta modesta (circa 42 mc/s) in quanto l'onda di piena del fiume Sieve, la cui durata critica è proprio

12 ore, anticipa in modo significativo quella del fiume Arno, tanto che le casse di espansione non possono laminare a sufficienza il ramo ascendente dell'idrogramma a causa dei modesti livelli idrici;

4. per le durate di 18, 24 e 36 ore gli idrogrammi dei fiumi Arno e Sieve risultano maggiormente in fase e il sistema di casse risulta più efficiente: la riduzione di portata a valle della confluenza varia tra 294 e 328 mc/s;
5. il volume complessivo invasabile nelle casse è pari 25.0 Mmc e 25.9 Mmc rispettivamente per le durate 12 e 18 ore;
6. tali volumi permettono una riduzione della portata massima circa 750-800 mc/s rispetto al caso in cui le aree di cassa sia completamente escluse dalla dinamica fluviale;
7. il volume sottratto alla laminazione in conseguenza degli interventi di messa in sicurezza locale (Matassino, Figline, Lagaccioni, Incisa, Pian dell'Isola, Rignano) è di 8.3 Mmc.

Dall'analisi delle simulazione idrauliche eseguite si rileva che il sistema di laminazione è caratterizzato da una buona resilienza prestazionale per la sua capacità di fronteggiare un ampio spettro di sollecitazioni. A conferma di ciò si veda anche il paragrafo 5.12 relativo a particolari scenari idrologici.

Le opere idrauliche di progetto, dimensionate per il tempo di ritorno di 200 anni più un franco idraulico di 70 cm, sono in grado di contenere nell'alveo del fiume Arno in alveo fino a circa 2950 mc/s.

In corrispondenza della sezione 776 il livello calcolato è pari a 122.00 m s.l.m., oltre al quale va tenuto conto dell'aumento indotto dalla presenza della stretta curva che fa incrementare l'energia potenziale a discapito di quella cinetica, come indicato al precedente § 5.4.2. Per tale motivo la quota di coronamento del nuovo muro d'argine è stata posta a 123.0 m s.l.m.

Tra i criteri di progettazione del presente progetto, quello di garantire il franco di 70 cm rispetto al livello idrico duecentennale ha trovato un limite in corrispondenza dell'ammorsamento degli argini alle spalle dei ponti di seguito elencati:

1. Ponte ferroviario di Incisa: l'impalcato del ponte è interessato dal massimo livello di piena; le spalle, dotate di parapetto, hanno franco ridotto.
2. Ponte ferroviario sul torrente Ponterosso: si rileva un funzionamento in pressione con franco quasi nullo rispetto al piano ferro;
3. Ponte ferroviario (linea lenta lato est) sul borro Gaglianella: la porzione di ponte della linea proveniente da Incisa (lato monte) risulta sormontabile; per la parte della bretella ferroviaria (lato valle) il sormonto è evitato soltanto dal ballast;
4. Ponte di via G. Di Vittorio sul torrente Gaglianella: si rileva il sormonto con battenti modesti;
5. Ponte della SRT 69 sul borro Moriano (o Focardo): si rileva il sormonto con battenti modesti;
6. Ponte ferroviario sul borro Moriano: il ponte sarebbe sormontato in assenza dell'adeguamento e prolungamento dei parapetti da eseguirsi da parte del soggetto gestore;
7. Ponte di via Garibaldi sul borro Moriano: si rileva il sormonto con battenti modesti.

Per la risoluzione delle criticità di cui ai punti 2, 3, 6 e 7 si rimanda ai § 16.1. Per i punti 1, 4 e 5 si veda il § 16.2 e gli interventi previsti negli elaborati PD_H_PR_05A_T_R00 e PD_H_PR_05B_T_R00.

L'elaborato PP_D_PR_10_T_R00 mostra le aree allagabili dello stato di progetto determinate dalle esondazioni del fiume Arno, che sostanzialmente si limitano alle casce di espansione. Esse sono state perimetrate dando per attuati gli interventi di risoluzione delle criticità di cui ai precedenti punti.

5.11 VERIFICA DI SCENARI IDROLOGICI PARTICOLARI

La resilienza prestazionale del sistema di laminazione lungo il fiume Arno a monte della città di Firenze è stata verificata anche per particolari scenari idrologici particolarmente gravosi. In particolare:

1. la capacità di invaso statico della diga di Bilancino è nulla e la quota iniziale di invaso è pari a 252 m s.l.m.;
2. le onde di piena dei fiumi Arno e Sieve sono in fase tale da massimizzare la portata a valle della confluenza. Tale condizione corrisponde a postipare di 3 ore l'idrogramma del fiume Sieve rispetto a quello del fiume Arno non laminato dalle casce.

Nel primo caso la portata massima duecentennale nello stato di progetto è di circa 3370 mc/s. Come nei casi precedenti, per la durata di 12 ore l'efficacia del sistema di laminazione è modesto per i motivi sopra esposti.

Evento	Q	Q _{lam}	DQ
Tr200 - 12h	3429	3374	55
Tr200 - 18h	3660	3364	296

Tab. 5.18 Portate del F. Arno a valle della confluenza del F. Sieve con quota iniziale di invaso di Bilancino a 252 m s.l.m.

Q = portata massima stato attuale - Q_{lam} = portata massima stato di progetto - DQ = riduzione del picco di piena [mc/s]

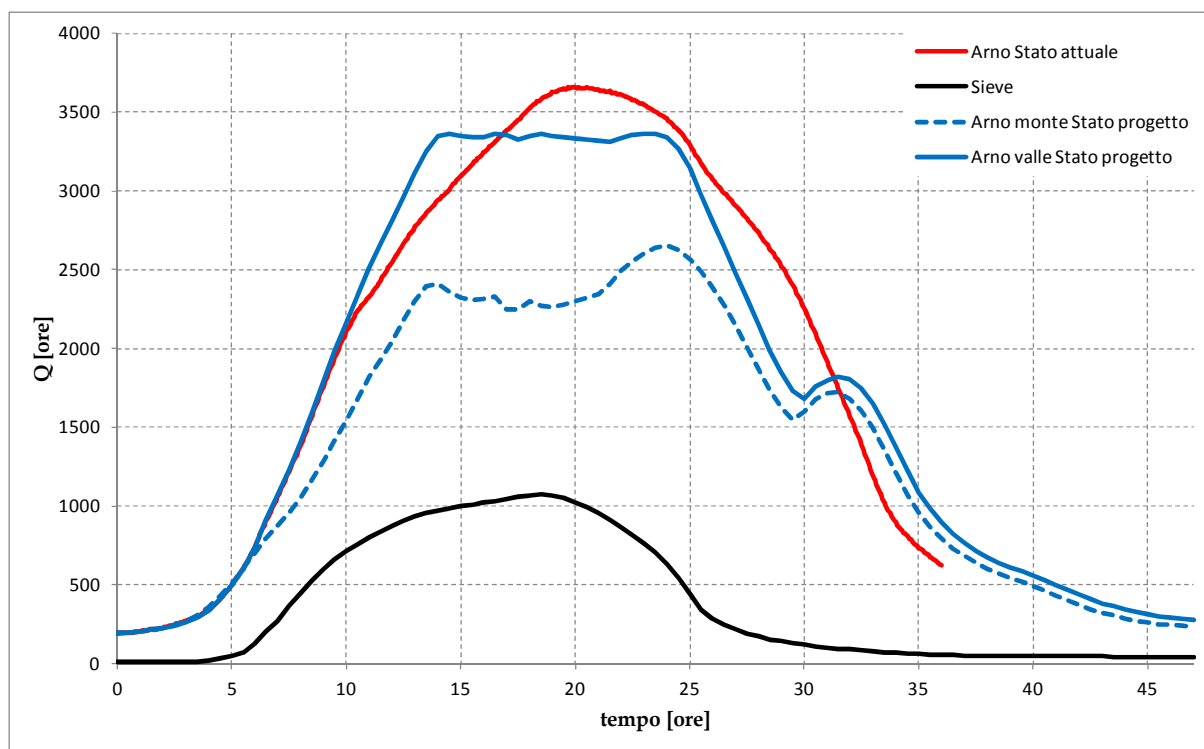


Fig. 5.43: Idrogrammi alla confluenza dei fiumi Arno e Sieve per Tr 200 anni, durata 18 ore, quota d'invaso iniziale di Bilancino di 252 m s.l.m.

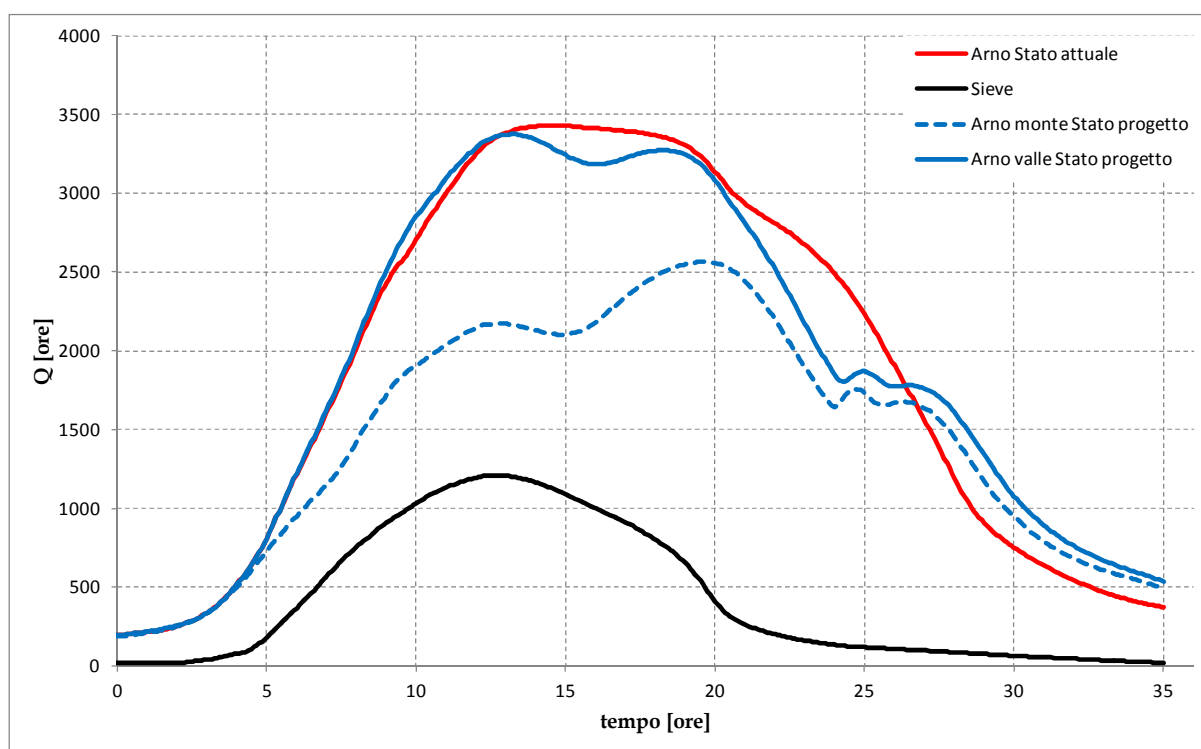


Fig. 5.44: Idrogrammi alla confluenza dei fiumi Arno e Sieve per Tr 200 anni, durata 12 ore, quota d'invaso iniziale di Bilancino di 252 m s.l.m.

Nel secondo caso si rileva preliminarmente che per gli eventi di durata 18 ore, la condizione di sovrapposizione dei picchi di piena dei fiumi Arno e Sieve non richiede alcun ritardo degli idrogrammi e pertanto risulta già verificata con gli scenari precedentemente analizzati.

Per la durata di 12 ore, al contrario dei casi di pari durata precedentemente analizzati, la messa in fase degli idrogrammi dei due corsi d'acqua comporta che il periodo in cui massima è la capacità di laminazione del sistema "casse" coincide con quello in cui è massimo l'apporto del fiume Sieve. Il sistema pertanto risulta tanto più efficace quanto più pericoloso è lo scenario di verifica in termini di sovrapposizione dei picchi di piene dei fiumi Arno e Sieve. La portata massima a valle della confluenza è pari a 3310 mc/s.

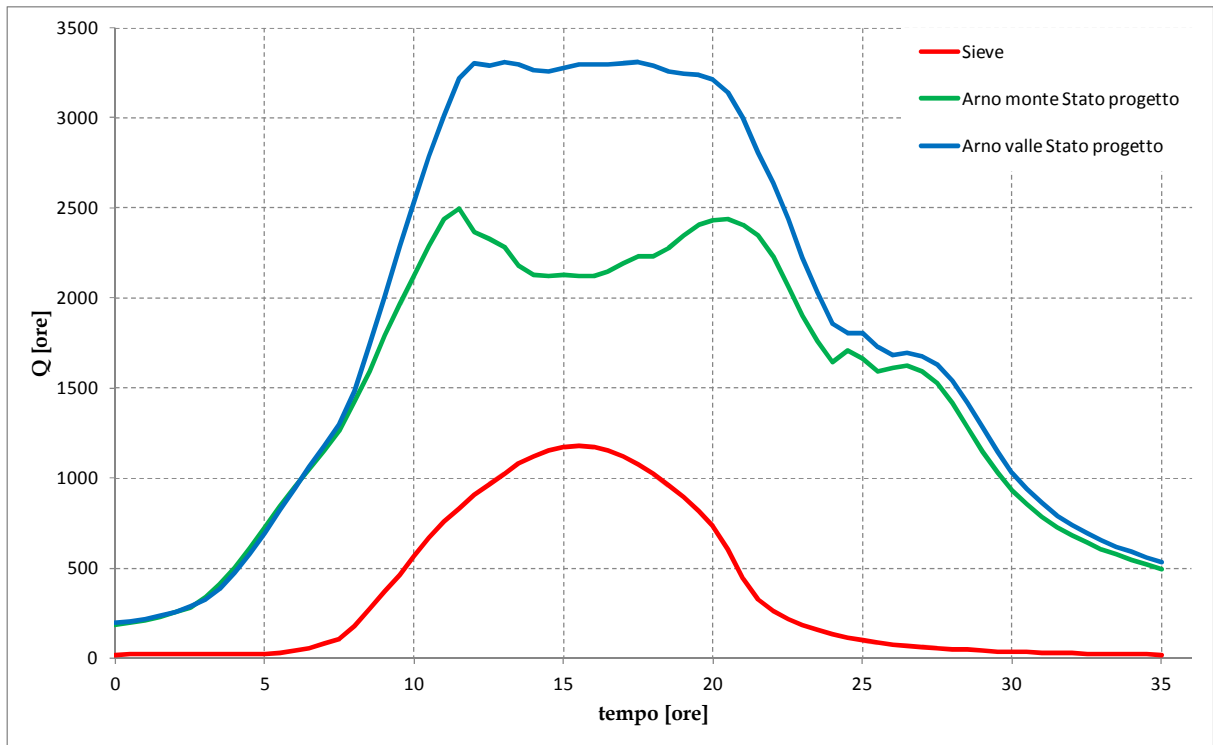


Fig. 5.45: Idrogrammi alla confluenza dei fiumi Arno e Sieve per Tr 200 anni, durata 12 ore, Sieve ritardato di 3 ore, quota d'invaso iniziale di Bilancino di 250 m s.l.m.

A sintesi delle valutazioni sull'efficacia e sulla resilienza prestazionale del sistema di casse di espansione a monte della città di Firenze, si può affermare che **per tutti gli scenari idrologici analizzati nel paragrafo 5.10 e per quelli particolari di cui al presente paragrafo la portata massima di progetto alla stazione idrometrica di Nave a Rosano, a valle della confluenza del fiume Sieve, è sempre inferiore a 3400 mc/s.**

5.12 VERIFICHE IDRAULICHE SENZA LA CASSA LECCIO

Considerato che lo stato di attuazione della cassa Leccio risulta meno avanzato rispetto a quello delle altre casse di espansione e ai fini dell'ottemperanza della prescrizione B.1.5.c del decreto regionale n. 15323/2017, è stata valutata la capacità di laminazione del sistema senza la cassa Leccio. I risultati per gli eventi maggiormente critici (tempo di ritorno 200 anni e durate 12 e 18 ore) sono sintetizzati di seguito.

Tr	durata	Stato attuale	Stato progetto	Diff.
[anni]	[ore]	[mc/s]	[mc/s]	[mc/s]
200	12	3389	3435	-46
200	18	3533	3451	82

Tab. 5.19: Portate massime alla sezione 672 – Stato di progetto senza la cassa Leccio

Per la durata 18 ore la capacità d’invaso delle casse di espansione, oltre a compensare i volumi sottratti alla laminazione dagli interventi di difesa locale, è un grado di ridurre la portata a valle della confluenza del fiume Sieve di 82 mc/s.

Richiamato il fatto che per la durata di 12 ore i picchi di piena del fiume Sieve si sommano alle portate del ramo crescente dell’idrogramma del fiume Arno, per tale scenario l’assenza della cassa Leccio riduce ulteriormente rispetto al caso di “sistema completo” la capacità di minimizzare le portate a valle della confluenza del fiume Sieve.

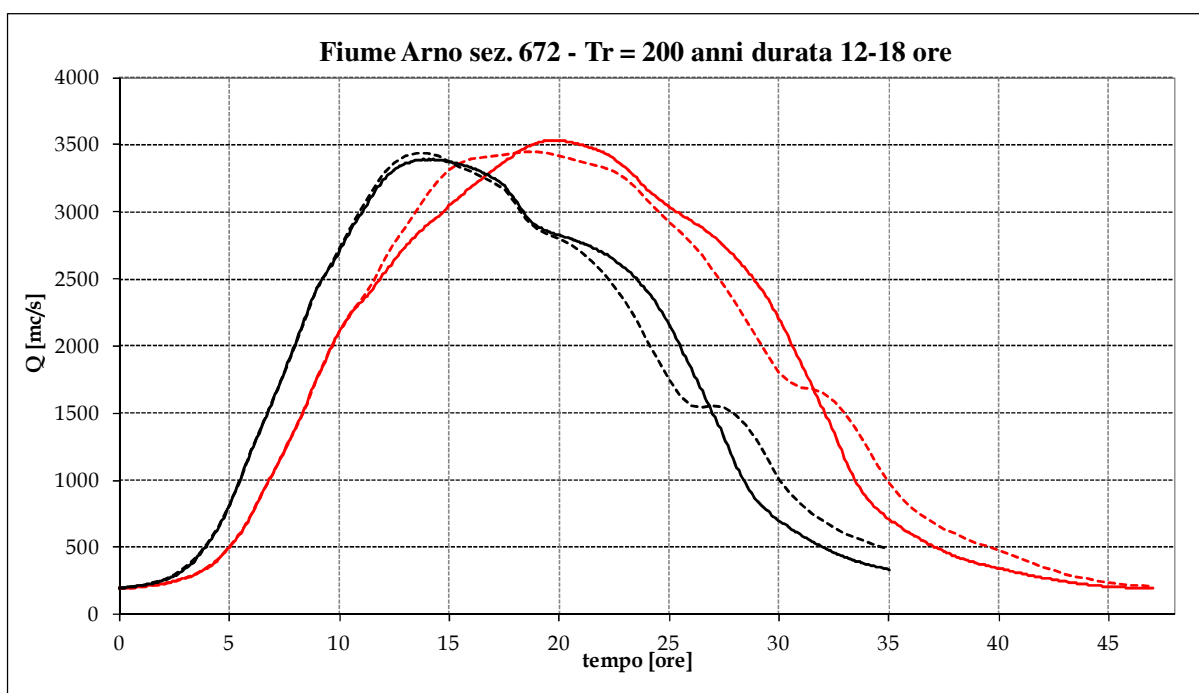


Fig. 5.46

Nero: durata 12 ore; Rosso: durata 18 ore

Linea continua: stato attuale

Linea tratteggiata: stato di progetto

5.13 BENEFICI ATTESI A SCALA TERRITORIALE

Ai fini di valutare gli effetti del sistema di casse di espansione del Valdarno a scala di bacino, con particolare riferimento alla città di Firenze, sono state aggiornate le simulazioni idrauliche del tratto del fiume Arno e relativi affluenti tra l'idrometro di Rosano e quello di Brucianesi.

Il modello idraulico è stato acquisito dall'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale, già utilizzato per la redazione del Piano di Gestione del Rischio da Alluvione e aggiornando le immissioni idrologiche con le curve di possibilità pluviometrica 2012 della

Regione Toscana. La metodologia di stima degli idrogrammi è la stessa descritta al § 4.2 e anche in questo caso non è stato tenuto conto degli afflussi delle acque basse soggette ad intermittenza di scolo durante gli eventi di piena del fiume principale. Gli scenari analizzati fanno riferimento alle durate di pioggia di 12, 18, 24 e 36 ore per i tempi di ritorno 30 e 200 anni e assumono come condizioni al contorno di monte del fiume Arno gli idrogrammi allo stato attuale e di progetto precedente descritti per il tratto fluviale di monte. Si ricorda che in tutti gli scenari è stato tenuto conto del piano di laminazione della diga di Bilancino con quota iniziale di invaso a 250 m s.l.m..

I risultati delle simulazioni sono rappresentati negli elaborati PD_D_PR_14A÷B_T_R01, nonché sono riportati in forma tabellare nell'elaborato PD_D_PR_03__T_R01. Gli stessi sono sintetizzati nella seguente tabella.

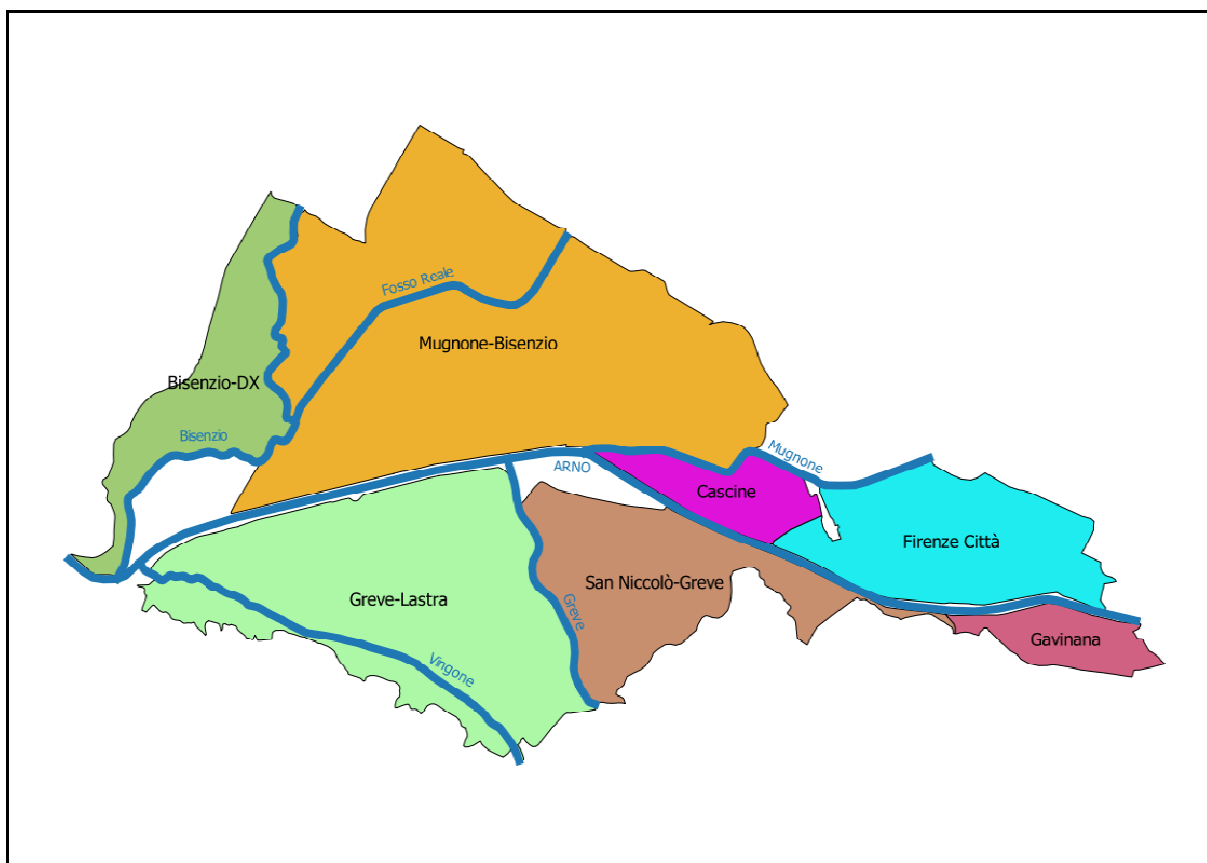


Fig. 5.47: Planimetria delle Zone di valutazione dei benefici idraulici

Zona	V [mc] per Tr = 200 anni		
	Stato attuale	Stato di progetto	DV
Gavinana	3,564,576	2,723,256	841,320
Firenze città	1,371,204	146,016	1,225,188
Cascine	5,456,448	4,689,504	766,944
San Niccolò-Greve	-	-	-
Greve-Lastra	23,938,812	22,220,928	1,717,884
Mugnone-Bisenzio	14,441,472	13,240,764	1,200,708
Bisenzio-DX	27,314,316	26,178,516	1,135,800
Totale	76,086,828	69,198,984	6,887,844

Tab. 5.20: Volumi esondati del F. Arno nell'area metropolitana di Firenze

Per il tempo di ritorno duecentennale le esondazioni nell'area metropolitana diminuiscono di circa 7 Mmc, di cui quasi 2 Mmc nel centro della città di Firenze. Soltanto 146.000 mc continuano ad interessare il centro storico di Firenze urbana a monte del ponte alla Vittoria, oltre il quale il Parco delle Cascine continua ad essere allagabile.

Le opere di progetto comportano le seguenti modifiche sul regime di piena del fiume Arno:

1. la durata critica del tratto esaminato, che per lo stato attuale è di 18 ore, passa a 12 ore in conseguenza della maggiore efficacia del sistema di cassa per la durata più lunga;
2. per lo scenario di durata 12 ore, all'altezza della località San Jacopo al Girone, appena a monte del centro urbano di Firenze, la portata di picco, incrementata rispetto a quella valutata all'idrometro di Nave a Rosano (3346 mc/s alla sez. 675) per i contributi degli interbacini, è pari a 3414 mc/s; per lo scenario di durata 18 ore la portata massima da Nave a Rosano a San Jacopo al Girone passa da 3233 mc/s a 3337 mc/s;
3. nel confronto tra gli scenari critici dello stato attuale (18 ore) e di progetto (12 ore), la durata per cui le portate sono superiori a 3400 mc/s è circa 1 ora nel primo caso, e 5.5 ore nel secondo caso; oltre alla riduzione della durata delle potenziali esondazioni, il picco di piena si riduce da 3570 a 3414 mc/s;

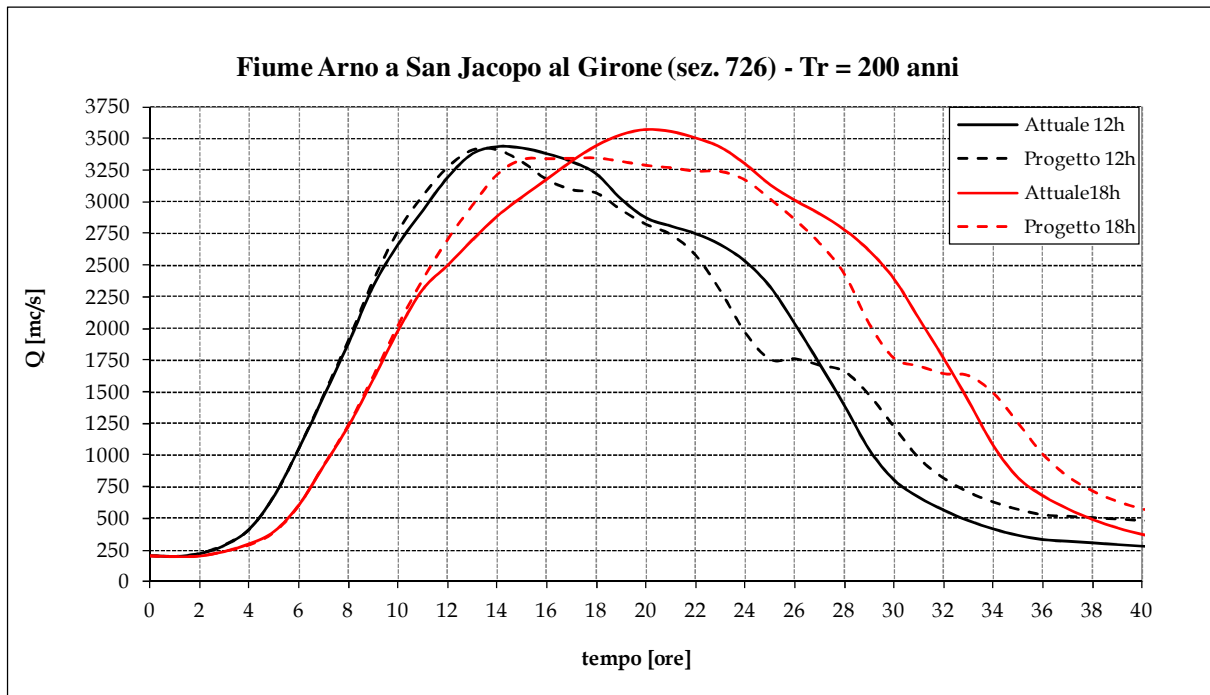


Fig. 5.48: Idrogrammi a San Jacopo al Girone per Tr 200 anni

4. proseguendo verso valle le aree interessate dalle esondazioni sono limitate in destra da via Generale Dalla Chiesa (SR 69) a monte di Largo Alcide De Gasperi, in sinistra riguardano l'abitato di Nave a Rovezzano a monte di via Marco Polo;
5. lungo il Lungarno delle Grazie permane il rischio di sormonto con battenti modesti compresi tra 0 e 30 cm;
6. a valle della confluenza del torrente Mugnone i volumi esondabili, pur rimanendo elevati, diminuiscono di circa 4 Mmc; i battenti di esondazione risultano massimi per l'evento di durata di 24 ore;
7. per effetto dell'intensa laminazione nel tratto precedente gli idrogrammi a valle di Ponte a Signa rimangono pressoché inalterati rispetto allo stato attuale con una portata massima di circa 2800 mc/s;
8. i battenti di esondazione risultano massimi per

Si ritiene necessario sottolineare che, sebbene i livelli del fiume Arno siano contenuti in alveo lungo quasi tutto il tratto cittadino, permangono le criticità per il drenaggio delle aree poste a tergo delle opere di difesa e per l'area metropolitana a valle del viadotto dell'Indiano. Al riguardo si ricorda che, oltre al sistema di casce di espansione oggetto del presente documento, gli atti di pianificazione territoriale e i programmi di intervento regionali prevedono ulteriori interventi strutturali per la riduzione del rischio idraulico a monte di

Firenze: il rialzamento della diga di Levane lungo il fiume Arno e il sistema di laminazione lungo il fiume Sieve.

6 STIMA DEL POTENZIALE INTERRIMENTO DELLA CASSA A SEGUITO DELL'INVASO

L'obiettivo è la stima dell'interrimento della cassa di espansione con riferimento all'evento con tempo di ritorno 200 anni. Considerato che l'opera è in derivazione e che la soglia di ingresso è posta molti metri sopra il fondo alveo, verrà considerato soltanto il trasporto solido in sospensione tramite il valore di concentrazione misurato. Dai dati di monitoraggio della stazione di Arpat denominata "Arno presa Figline Matassino" (cod. MAS-106) è stata individuato il massimo valore misurato di concentrazione di solidi sospesi, pari a 668 mg/l.

Dall'analisi idrologico-idraulica è stato stimato che il massimo volume d'acqua contenibile nella cassa è pari a 7.0 Mmc e pertanto, considerato un peso specifico di 1500 Kg/mc, il volume dei sedimenti corrisponde a 3117 mc. Ipotizzando in via del tutto cautelativa che tutto il materiale si depositi nell'arco di tempo in cui la cassa è chiusa e le acque sono ferme, l'interrimento del fondo cassa corrisponderebbe a circa 2 mm sui 134 ha di estensione complessiva. In realtà il materiale in sospensione nella parte superiore dei battenti in alveo, quelli cioè superiori alla soglia di ingresso in cassa, è prevalentemente costituito da limi ed argille la cui velocità di sedimentazione, piuttosto bassa, potrebbe non essere sufficiente perché tutto il materiale possa depositarsi nelle 6.5 ore in cui le acque restano ferme (cassa chiusa).

7 VERIFICA DELLE CONNESSIONI IDRAULICHE DEI SETTORI DI CASSA

Gli interventi previsti sul torrente Chiesimone consistono nella realizzazione di arginature che impediscono l'invaso delle sue acque nella cassa e una connessione tra i settori della stessa. Sono state valutate soluzioni alternative alla connessione idraulica quali:

1. includere il torrente all'interno della cassa
2. rendere indipendenti i due settori

La soluzione n. 1 è stata scartata in quanto comporterebbe una notevole inefficienza idraulica del sistema. Infatti lo sbocco del torrente dovrebbe essere regolato (con paratoie o con una bocca tarata dotata di clapet antiriflusso) affinché le acque del fiume Arno non entrino in cassa durante la fase crescente della piena; tale condizione infatti minerebbe l'intera impostazione di progetto di preservare le aree di pianura per la laminazione dei picchi di piena. Se da un lato tale regolazione preserverebbe il volume di invaso dalle acque del fiume, dall'altro impedirebbe lo scarico delle portate del torrente che in ugual modo esonderebbe nella cassa. A titolo di esempio, per un evento duecentennale di durata di pioggia pari a 24 ore, il volume che potrebbe entrare in cassa dal torrente Chiesimone dal momento di chiusura dello sbocco (quando i livelli del fiume Arno raggiungono il piano campagna) e l'apertura dell'opera di presa è pari a $800'000 \text{ m}^3$, il cui invaso sottrae capacità di laminazione durante il picco di piena del fiume Arno.

Prevedere arginature di altezza inferiore a quelle di cassa lungo il torrente Chiesimone per ritardare l'esondazione nella stessa comporterebbe un considerevole pregiudizio al trasferimento da sud a nord delle portate invase dall'opera di presa, particolarmente grave soprattutto per i tempi di ritorno più bassi e se si considera che la maggior parte del volume di invaso si concentra nella parte nord della cassa. Inoltre ciò determinerebbe un rigurgito dell'opera di presa con conseguente diminuzione delle portate sfiorate e dell'efficienza.

In ogni caso sarebbe comunque necessario realizzare un'opera d'arte alla confluenza del torrente Chiesimone.

Con la soluzione n. 2, oltre a dover eseguire un'ulteriore opera di presa con un costo dello stesso ordine di grandezza dell'opera di connessione (seppur di dimensioni inferiori si

considerino i costi delle opere di regolazione e di quelle accessorie per la gestione), la capacità complessiva della cassa si ridurrebbe di almeno 840'000 m³, pari alla differenza tra i livelli idrici del fiume Arno nelle sezioni dove sarebbero previste le due opere di presa (~ 1.1 m) per la superficie del settore nord. La stima è fatta per difetto trascurando la perdita di carico aggiuntiva dovuto alla laminazione dell'opera di presa di monte.

Inoltre la gestione della cassa durante l'evento di piena risulterebbe più complessa e i costi di manutenzione, soprattutto delle opere elettromeccaniche, sarebbero maggiori.

Pertanto è stata scelta la soluzione rappresentata negli elaborati PD_E_PR_17A_T_R00 e seguenti con una soglia di forma trapezia, larghezza alla base di 46.6 m e al coronamento arginale di 64.6 m.

Andando a variare la larghezza dell'opera, fermo restando che per esigenze connesse al deflusso del torrente Chiesimone nei tombini al di sotto della soglia non è possibile variare significativamente la quota della stessa, sono stati confrontati i risultati in termini di trasparenza idraulica. Gli scenari analizzati sono relativi ad una diminuzione e un incremento della larghezza di 10 m.

In tutti i casi l'uguaglianza dei livelli nei settori a monte e a valle della connessione avviene nello stesso momento e la larghezza della soglia risulta influente sulle modalità d'invaso dell'opera di presa.

Fermo restando l'approssimazione di considerare la soglia come uno stramazzone in parete grossa e rimandando ai successivi livelli progettuali gli approfondimenti sul tipo di moto, è stata ritenuta adeguata una larghezza della soglia alla base pari a 46.6 m.

Per quanto riguarda la connessione sotto la bretella ferroviaria, costituita da un sottovia del rilevato (larghezza 12 m) e da una campata e mezzo del viadotto (larghezza complessiva 36 m), le simulazioni hanno evidenziato che, nell'istante in cui la portata massima in ingresso dall'opera di presa è di 310 mc/s, la connessione è in grado di far defluire verso valle 270 mc/s. La differenza viene invasata nel settore di monte della cassa.

E' stato inoltre verificato che per gli scenari idrologici più severi i livelli in ingresso all'opera di presa sono rigurgitati soltanto per effetto dell'innalzamento dei livelli nel modulo a nord del torrente Chiesimone, che presenta la maggior capacità d'invaso, ed esaurimento del volume disponibile. Detti livelli rigurgitano in serie l'opera di connessione,

le connessioni sotto la bretella ferrovia ed infine l'opera di presa, uniformando i livelli d'invaso di tutti i moduli.

Alle luce di ciò si ritiene che l'attraversamento sotto la bretella non determini di per sé un rigurgito dell'opera di presa e che sia idraulicamente trasparente, come dimostrato anche dalla simulazione idraulica effettuata allargando 10 m la connessione: le portate invase dall'opera di presa rimangono invariate.

8 DIMENSIONAMENTO DEI CANALI ESTERNI ALLA CASSA E DELLE OPERE DI PRESIDIO

Le opere di presidio sono opere ubicate lungo gli argini della cassa o lungo gli argini accessori che, dotate di paratoia, permettono l'attraversamento degli argini da parte dei deflussi dei bacini di acque basse quando la cassa è vuota o il fiume Arno non li rigurgita, o impediscono che le acque invase in casse o in transito nel fiume Arno allaghino le aree a tergo delle arginature. E' previsto che i deflussi del reticolo minore interrotto dagli argini di cassa siano collettati in canali esterni alla cassa e convogliati presso le opere di presidio. Il dimensionamento dei canali e delle opere di presidio è stato eseguito con riferimento alla portata idrologica critica duecentennale, salvo i casi di seguito specificati per i quali sono state fatte specifiche valutazioni sulla laminazione della portata idrologica. I bacini afferenti ai canali e alle opere di presidio sono rappresentati nell'elaborato PD_D_PR_06__T_R00.

Tutti i canali di seguito trattati presentano forma trapezia con scarpate a pendenza 1:1, salvo diversa indicazione indicata nei successivi punti. Ove non diversamente specificato le verifiche idrauliche sono state condotte nell'ipotesi di moto uniforme utilizzando un coefficiente medio di resistenza al moto nella formulazione di Manning di $0.025 \text{ s/m}^{1/3}$ per i canali e $0.015 \text{ s/m}^{1/3}$ per le opere di presidio in calcestruzzo armato.

Per esigenze di manutenzione le dimensioni minime degli scatolari sono state fissate a 2x2 m.

Opera di presidio PRPS1

Cautelativamente la portata di progetto è pari 29.9 mc/s stimata come somma delle portate idrologiche di durata critica di 0.5 ore del bacino *Podere Colmate* (14 mc/s), del bacino *bac12basse* (12.4 mc/s) e della portata che attraversa il tombino autostradale OP2087 (3.5 mc/s). Quest'ultima rappresenta la quota parte della portata del bacino *bac13basse*, valutata proporzionale all'area.

Si rimanda ai risultati della simulazione idraulica, descritta nel successivo punto, per la stima dell'effettiva portata che può raggiungere l'opera di presidio considerando le reali dimensioni dei tombini autostradali e la laminazione che gli stessi producono sul picco di piena.

La pendenza del fondo considerata è di 0.045, pari a quella del tratto di canale esistente a monte. Il tombino idraulico ha dimensioni di 2x2 m con quota di imbocco a 120.60 m s.l.m.. La massima portata smaltibile è di 52 mc/s.

Canale di gronda del bacino *bac12basse*

Il canale riceve i deflussi del bacino *bac12basse*, il cui reticolo si sviluppa tra la collina di Matassino e l'argine del fiume Arno attraverso i tombini autostradali che determinano la laminazione dei picchi di piena. Al fine di valutare tale effetto è stato implementato un modello idraulico semplificato che, tenendo conto delle quote del terreno e del volume d'invaso a monte dell'autostrada (le curve d'invaso sono state ricavate dal modello digitale del terreno Lidar) e delle dimensioni dei tombini autostradali (ripresi dal progetto definitivo della 3a corsia autostradale). Le sezioni del borro Colmate, corpo idrico ricettore del canale in progetto, sono state rilevate nell'ambito del presente lavoro.

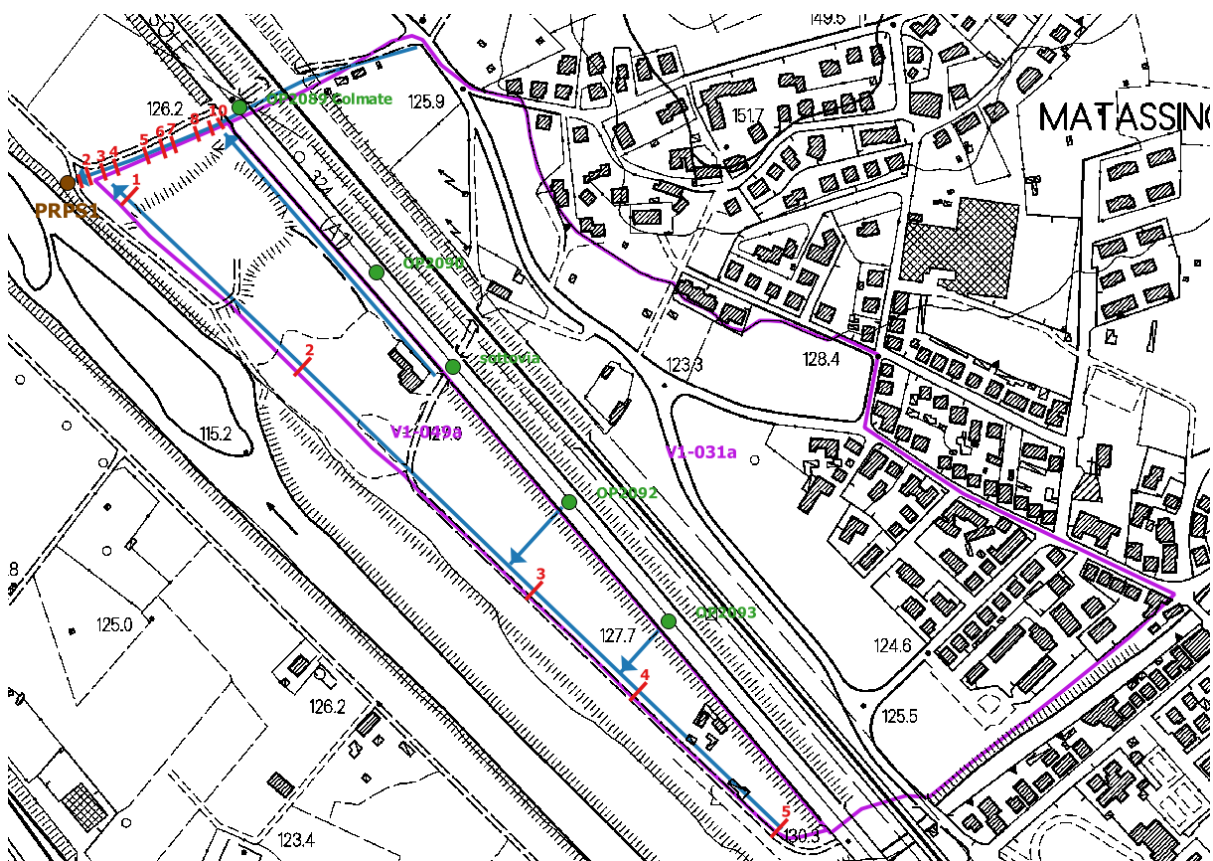


Fig. 8.1 – Dimensionamento del canale di gronda del bacino *bac12basse*

Il modello è stato cimentato con le portate critiche (durata 0.5 ore) del bacino *bac12basse* (attribuito alla *storage area* con cui è schematizzato il terreno a monte dei tombini OP2090,

OP2092 e OP2093), del borro Colmate e del bacino drenato dal tombino OP2087 che, secondo l'impostazione descritta nel successivo punto, vengono recapitata nel borro Colmate a valle dell'autostrada.

A fronte di una portata idrologica critica per il tempo di ritorno duecentennale di 29.9 mc/s, la portata laminata dai tombini autostradali che raggiunge l'opera di presidio PRPS1 ammonta a 10.7 mc/s.

Il canale di progetto al piede dell'argine è interessato lungo il suo sviluppo di circa 850 m da un incremento di portata da 0.1 a 1.3 mc/s. Con sponde inclinate 2:3, larghezza del fondo di 1 m e pendenza di 0.0015, i battenti variano da monte verso valle da 0.4 m a 1.4 m, risentendo in ogni caso del rigurgito del borro Colmate. Il profilo del fondo varia da 122.2 m s.l.m. a 120.9 m s.l.m..

Si precisa che i deflussi del tombino OP2090 (2.8 mc/s) vengono convogliati nel borro Colmate in adiacenza al piede del rilevato autostradale. Inoltre l'insufficienza idraulica dei tombini, compreso quello del borro Colmate, produce allagamenti a monte dell'autostrada (fino a 123 m s.l.m.) che comunque non interessano la strada comunale. Il conseguente transito di portata (3 mc/s) attraverso il sottovia dovranno essere canalizzato in modo analogo a quello dell'opera OP2090.

I canale a valle dei tombini autostradali e il canale di gronda, dimensionati per il tempo di ritorno duecentennale, hanno dimensioni maggiori di quelli attuali con conseguente miglioramento del deflusso.

I risultati delle simulazioni idrauliche sono riportati nell'elaborato PD_D_PR_03__R_R01.

Opera di presidio PRPS2

L'opera provvede all'immissione dentro la cassa dei deflussi dei bacini di acque basse che generati nel bacino *bac13Abasse*. Il corrispondente reticolo di drenaggio attraversa la ferrovia e l'autostrada con dei tombini che, in condizioni di moto vario, limitano l'effettiva portata che può raggiungere l'opera di presidio. Al fine di valutare tale effetto è stato implementato un modello idraulico semplificato che, tenendo conto delle quote del terreno e del volume d'invaso a monte dell'autostrada (le curve d'invaso sono state ricavate dal modello digitale del terreno Lidar) e delle dimensioni dei tombini e dei sottovia autostradali (acquisiti dal progetto definitivo della 3a corsia autostradale).

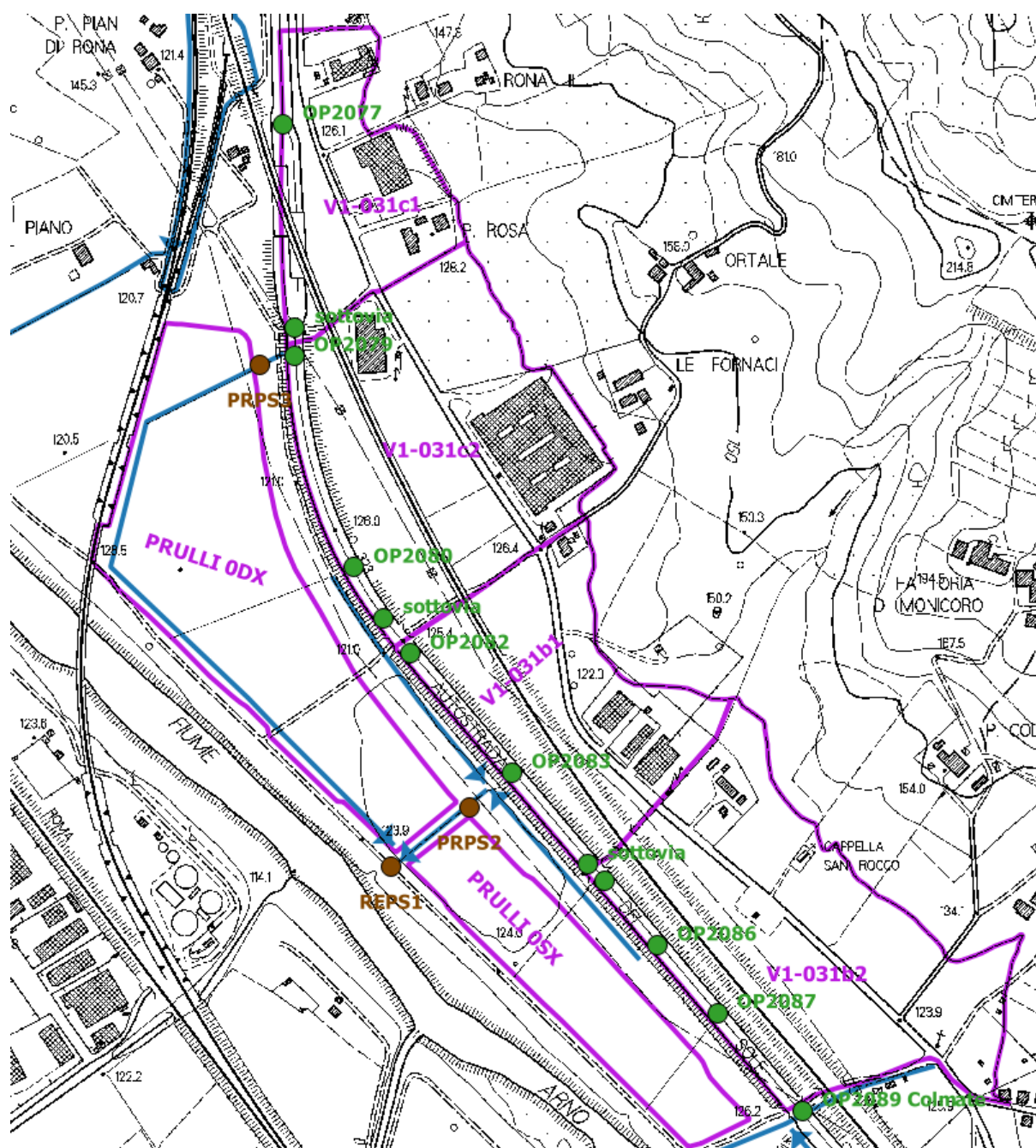


Fig. 8.2: modello idraulico per il dimensionamento delle opere di presidio PRPS2 - PRPS3

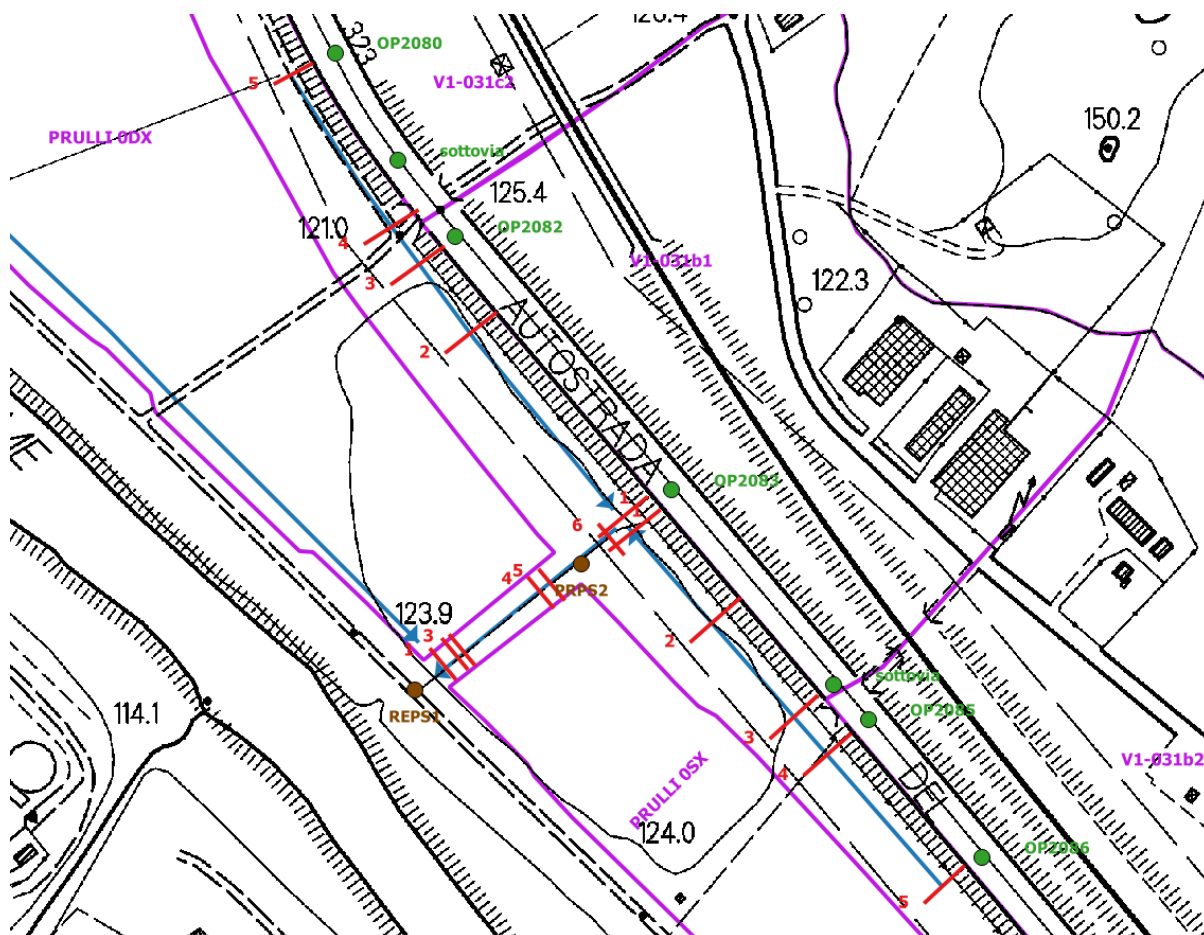


Fig. 8.3: sezioni del modello idraulico dell'opera di presidio PRPS2

Il modello è stato cimentato con la portata critica (durata 0.5 ore) del bacino *bac13Abase*, attribuendo a ciascuna *storage area* con cui è schematizzato il terreno la portata dello specifico bacino afferente in modo proporzionale all'area.

A fronte di una portata idrologica critica per il tempo di ritorno duecentennale di 24 mc/s, la portata laminata a valle dei tombini autostradali, trascurando quelli ferroviari, è pari a 15.8 mc/s, di cui 3.6 mc/s convogliate nel borro Colmate dal tombino OP2087 e 5.2 mc/s recapitate all'opera di presidio PRPS3 dal tombino OP2079 e dal vicino sottovia. Si assume che vadano all'opera PRPS2 i deflussi che escono dai tombini autostradali OP2080-2082-2083-2085-2086 per una portata totale pari a circa 7.0 mc/sec.

Avendo assunto una pendenza del fondo dell'opera di 0.011, pari a quella del canale che la collega con l'opera REPS1, e una larghezza di 2 m, l'altezza d'acqua nello scatolare è di 0.83 m. Quindi è stato scelto uno scatolare di dimensioni 2x2 m con quota di imbocco a 117,75 m s.l.m.. Quota sbocco 117,30 m s.l.m..

I canali adduttori sono anch'essi dimensionati con le portate ottenute dal modello sopra descritto. Sono stati calcolati due tronconi di canale: il primo che scorre da nord verso l'opera di presidio che riceve le acque del tombino autostradale OP 2080 (lunghezza 125 m) e poi le acque del tombino OP2082 (ulteriori 210 m) e quello che, scorrendo da sud verso l'opera di presidio, riceve le acque dei tombini autostradali OP2085 e OP2086 lungo 280 m. Le portate di calcolo sono rispettivamente 0.93 mc/s (da OP2080 a OP2082), 2.268 mc/s (da OP2083 a PRPS2) e 1.24 mc/s (da OP2085 a OP2086) e 3.54 (da OP2086 a OP2085). Le acque che defluiscono attraverso il tombino OP2083 ($Q = 1.54$ mc/sec) finiscono direttamente nell'opera di presidio.

I canali di progetto, con larghezza del fondo di 1 m, hanno pendenza rispettivamente di 0.003 tra OP2080 e OP2082, 0.006 tra OP2082 e PRPS2, 0.004 tra OP2086 e OP2085, 0.014 tra OP2085 e PRPS2. i battenti variano tra 0.68 m e 1.5 m in una sezione trapezia con fondo largo 1 m; , le altezze d'acqua sono rispettivamente 0.43 m (OP2080), 0.94 m (OP2080+OP2082) e 1.03 m (OP2085+OP2086). La profondità massima è di 1.5 m.

Si precisa che le area a monte dell'autostrada e i sottovia risultano allagati con battenti che comunque non interessano la strada comunale.

Inoltre il canale di gronda a valle dell'autostrada è dimensionato per il tempo di ritorno duecentennale, ben superiore alla capacità di deflusso degli attuali fossi.

I risultati delle simulazioni idrauliche sono riportati nell'elaborato PD_D_PR_03__R_R01.

Opera di presidio PRPS3

L'opera provvede all'immissione dentro la cassa di parte dei deflussi generati in parte del bacino *bac13Abasse* e afferenti al tombino autostradale OP2079. Al fine di valutare la massima portata smaltibile da parte di quest'ultimo, tenendo conto delle quote del terreno e del volume d'invaso a monte dell'autostrada, è stato fatto riferimento al modello idraulico descritto nei punti precedenti che ha fornito un valore di 5.2 mc/s.

Assumendo la pendenza del fondo dell'opera di 0.036 e una larghezza di 2 m, si ottiene un'altezza d'acqua pari a 0,45 m. Quindi è necessario una scatolare di dimensioni 2x2 m con quota di imbocco a 119.70 m s.l.m.. e quota di sbocco a 118,50 m s.l.m.

Opera di presidio PRPS4

All'opera di presidio PRPS4 afferiscono i deflusso del bacino *bac13Bbasse*, la cui portata duecentennale idrologica è pari a 10.1 mc/s relativa ad una durata critica di 0.5 ore.

A monte della bretella ferroviaria il canale che drena il bacino ha geometria trapezia in calcestruzzo, larghezza del fondo e in testa rispettivamente di 0.6 m e 1.2 m, altezza massima 0,5 m. Per una pendenza media di 0.007 (tratto parallelo alla ferrovia), la portata massima transitabile è pari a 1.1 mc/s. Ipotizzando che i deflussi di piena dell'area a valle della bretella siano completamente convogliati all'opera di presidio (2.0 mc/s stimati proporzionalmente rispetto alla superficie complessiva del bacino *bac13Bbasse*), la portata di progetto è pari a 3.1 mc/s.

Definendo una pendenza del fondo del tombino di 0.004, avendo considerato la quota del canale a monte e la quota di fondo scavo all'interno della cassa, e una larghezza di 2 m, si ottiene un'altezza d'acqua pari a 0,67 m. Il tombino idraulico ha dimensioni di 2.0x2.0 m con quota di imbocco a 118 m s.l.m.. Quota sbocco 117,80 m s.l.m..

Ad ogni buon conto, qualora venisse considerata l'intera portata idrologica, il battente massimo sarebbe di 1.65 m.

Opera di presidio PRPN1

Considerate le ridotte dimensioni del bacino afferente, si prevede un tombino di dimensioni 1x1 m con quota di imbocco 118.25 m s.l.m., quota di sbocco 117.80 m s.l.m., pendenza 0.01.

Opera OPPN2

L'opera di presidio, dotata di paratoia, è integrata nel muro d'argine OPPN2 che sottoattraversa il viadotto ferroviario Borratino. Il progetto prevede la realizzazione di un canale al piede del nuovo argine di cassa che, raccolte le acque drenate dal sistema di fossi esistente, le convoglia all'opera di presidio e successivamente nel borro Ricavo. Il bacino di riferimento è *bac16basse* di cui è stata stimata la portata critica idrologica complessiva, pari a 17.5 mc/s. Questa è stata suddivisa tra i vari sottobacini, proporzionalmente all'area, i deflussi di ciascuno dei quali afferiscono ad un diverso tombino autostradale o ad uno specifico recapito. In particolare sono state individuati 5 sottobacini imbriferi dei tombini OP2069, OP2071, OP2072, OP2073, un sottobacino a nord-est del stazione di servizio e il bacino di pianura a valle dell'autostrada.

Ai fine di dimensionare il canale di raccolta e l'opera di presidio per un portata di progetto che realisticamente li possa raggiungere nell'arco della brevissima durata dei picchi di piena (la durata critica dell'evento è 0.5 ore), è stata valutata la capacità di deflusso dei canali che attraversano l'area industriale. E' invece stata trascurata la possibile laminazione dei picchi di piena da parte dei tombini autostradali per mancanza di effettive aree di laminazione a monte.

Innanzitutto va considerato che attualmente le portate che attraversano il tombino OP2069 sono direttamente convogliate nel borro Ricavo attraverso un canale a cielo aperto e una tubazione. La massima portata smaltibile dal canale, calcolata in moto uniforme, è pari a 0.2 mc/s. Si ritiene comunque auspicabile che, nell'ambito dei lavori di realizzazione della terza corsia autostradale il canale possa essere adeguato; per tale motivo verrà considerata tutta la portata idrologica, pari a 2.4 mc/s.

La tubazione che parte dal tombino OP2071 termina in corrispondenza degli edifici industriali in un canale a cielo aperto, la cui portata smaltibile, calcolata in moto uniforme sulla base delle caratteristiche geometriche rilevate, non supera 1 mc/s.

Non è nota la destinazione dei deflussi del tombino OP2072 e pertanto, cautelativamente, si ipotizza che tutta la portata idrologica (1.4 mc/s) raggiunga il canale al piede dell'argine di cassa.

Dalla somma delle portate sopra stimate si ricava che la portata da considerare per il dimensionamento del canale è pari a 2.4 mc/s (OP2071+OP2072), quella all'opera di presidio ammonta a 4.8 mc/s (OP2069+OP2071+OP2072).

In queste condizioni di portata, con una pendenza di 0.008 si prevede uno scatolare dell'opera di presidio di dimensioni 2x2 con un battente di 0.73 m. Quota imbocco 117,90 m s.l.m. e quota sbocco 117,65 m s.l.m..

I canali adduttori sono anch'essi dimensionati con le portate ottenute dal modello sopra descritto. Per il canale che dall'impianto idrovoro va verso l'opera OPPN2 di lunghezza complessiva di circa 370 m, imponendo quindi una larghezza del fondo del canale di 1.2 m, ed una pendenza di 0.002, il battente idrico è di 0.73 m.

Il canale che collega il tombino autostradale OP2069 con l'opera OPPN2 nel tratto terminale può assumere una pendenza minima di 0.001 (da p.c. 118.2 m slm a 117.9 m slm di imbocco di OPPN2 per 236 m) che, per un canale trapezio con fondo largo 1.2 m, permetto lo smaltimento della portata di progetto (2.4 mc/s) con un battente di 0.88 m.

Oltre alla capacità dei deflusso delle opere sopra dimensionate, va considerato che l'impianto idrovoro previsto presso l'area industriale Pian della Rugginosa garantisce una ulteriore portata massima di 1.5 mc/s (vedi Relazione tecnica).

Opera di presidio PRPN2

Partendo dalle considerazioni per l'opera OPPN2 si ipotizza quanto segue. Nell'opera di presidio confluiscono le seguenti portate: a valle del tombino OP2073, il canale a cielo aperto esistente ha una capacità massima di deflusso di 1 mc/s e riversa le portate superiori nell'area industriale posta a nord; inoltre si ipotizza che, per conformazione orografica, il canale che discende la collina dell'area di servizio riesca a recapitare nel nuovo canale di progetto l'intera portata idrologica (2.1 mc/s).

Dalla somma delle portate sopra stimate si ricava che la portata da considerare per il dimensionamento dell'opera di presidio ammonta non supera i 3.1 mc/s.

In queste condizioni di portata, con una pendenza di 0,005 si prevede uno scatolare dell'opera di presidio di dimensioni 2x2 m con un battente di 0,62 m. Le quote di imbocco e sbocco sono rispettivamente di 118 m s.l.m. e 117,75 m s.l.m..

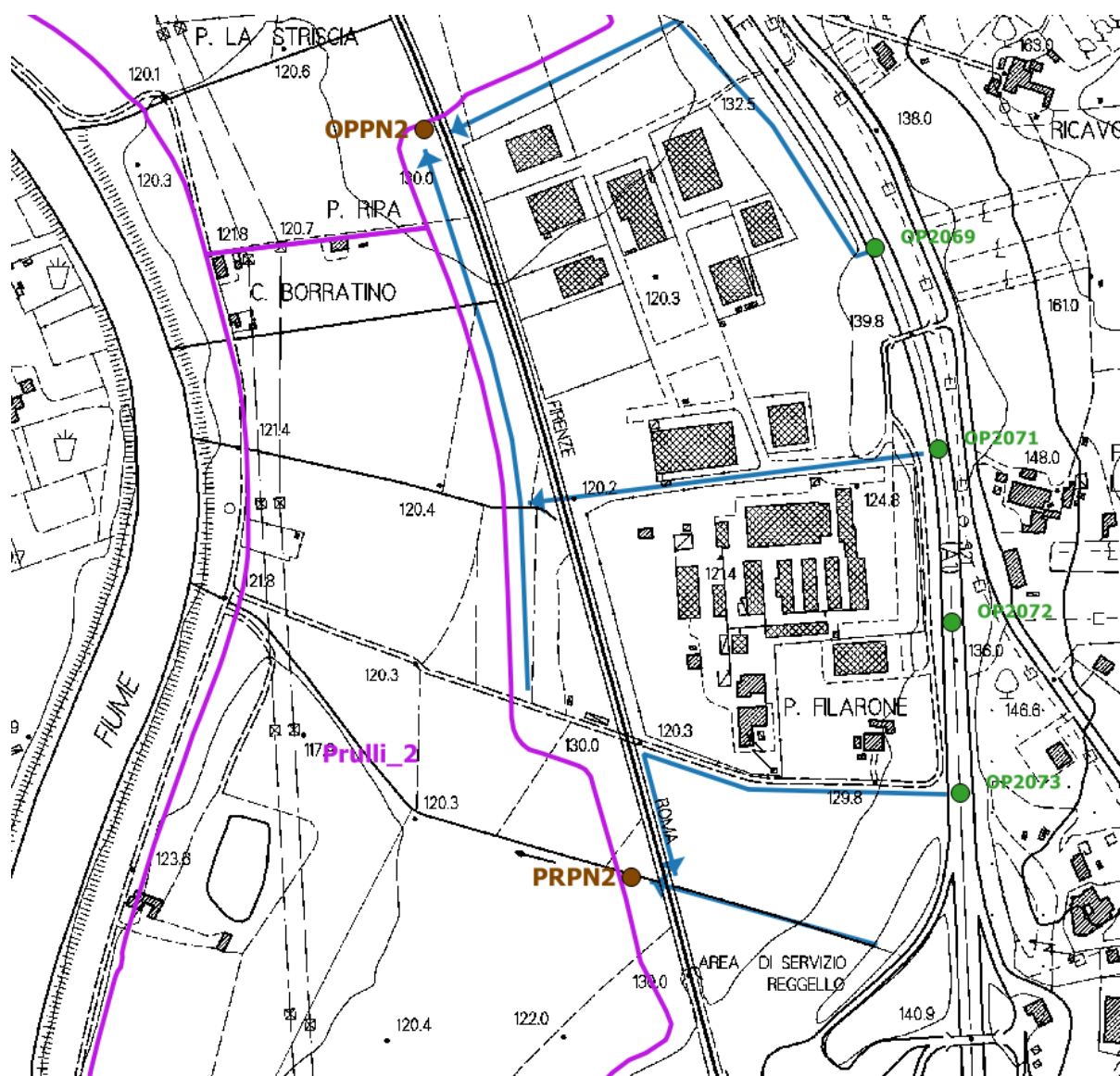


Fig. 8.4: dimensionamento opera di presidio di OPPN2e PRPN2

Il canale che adduce le portate generate nel bacino afferente al tombino 2073 all'opera PRPN2 è anch'esso dimensionato per la portata massima transitabile (1 mc/s) nel canale tra il tombino e il viadotto ferroviario. Per una lunghezza complessiva di circa 150 m, imponendo quindi una larghezza del fondo del canale di 1 m, ed una pendenza di 0.005 (da 118.75 a 118.00 m s.l.m.), si ottiene un battente idrico pari a 0.50 m.

Ipotizzando non adeguato il canale a valle del tombino OP2069 (ricadente nell'area di intervento della 3a corsia autostradale per il tratto di monte) e la tubazione a valle del tombino OP2072 (non nota), le portate che il sistema di drenaggio teoricamente potrebbe non riesce a far defluire, provocandone l'espansione nell'area industriale, compresi gli afflussi

che direttamente vi piovono, determinano un volume di allagamento di 15.900 mc nella parte nord e di 10.800 mc nella parte sud che, su superfici rispettivamente di 16.2 ha e 10.6 ha, generano battenti medi di 10 cm.

Opera di presidio PRPN3

L'opera è ubicata in corrispondenza dell'alveo del borro Ricavo e presenta un tombino quadrato con lato 2.5 m, di area superiore a quella del tombino circolare autostradale 2067 presente a monte (diametro 2.5 m). Inoltre, ancora a monte di quest'ultimo, il tombino della strada comunale Pian di Rona, di diametro di 1.5 m, limita la portata defluente verso valle. Si rimanda al § 11 per la presentazione delle verifiche idrauliche eseguite per il borro Ricavo.

Il tombino si raccorda in continuità con quello di monte attraverso un pozzetto con quota di scarico a 118.50 m s.l.m.. Prosegue con una pendenza di 0.005, pari a quella di progetto del borro Ricavo dopo la riprofilatura, e sbocca in cassa dopo 54 m a quota 118.22 m s.l.m.

Opera di presidio PRSX1

L'opera è ubicata al margine dell'area di scavo ASX1 tra l'argine del fiume Arno, il borro Gaglianella, il rilevato ferroviario e il torrente Ponterosso. A monte della ferrovia i deflussi sono scaricati nel borro attraverso un tombino esistente e pertanto, rispetto al bacino *Gaglianella basse*, l'area drenata dal tombino in oggetto è pari a 3.6 ha. Stimando la portata di progetto in modo proporzionale all'effettiva superficie drenata rispetto ai valori relativi al bacino *Gaglianella basse*, questa risulta pari a 1.1 mc/s.

Considerando una pendenza del fondo di 0.01, il tombino idraulico ha dimensioni di 1x1 m con quota di imbocco a 119.0 m s.l.m.. La massima portata smaltibile è di 3.8 mc/s.

Opera di presidio PRSX2

Il bacino di competenza dell'opera è la porzione a sud del tombamento del borro Lagaccioni del bacino *bac14basse*. La portata di progetto di 15.4 mc/s è stata stimata proporzionalmente all'area (65% dell'intero bacino) con riferimento alla durata critica di 0.5 ore. L'area drenata, prevalentemente urbana, è dotata di un sistema fognario misto, per cui si presume che l'attuale scarico nel fiume Arno funzioni da troppo pieno.

La pendenza del fondo considerata è di 0.033, pari a quella del tratto di canale esistente a monte. A fronte di un battente idraulico di 0.9 m, il tombino ha dimensioni di 2x2 m con quota di imbocco a 118.5 m s.l.m..

Opera di presidio PRSX3

L'opera è posizionata sul fosso Lagaccioni e scarica il deflusso del fosso che è tombato per un tratto di circa 600 m con uno scatolare di luce 0,8 (base) m x 1,70 (altezza) m.

La portata di progetto di 7.8 mc/s è quella idrologica del bacino *Lagaccioni basse*. Fissata la pendenza del fondo dello scatolare a 0.01, la quota di imbocco a 118.2 m s.l.m. e fissata la larghezza di 2 m necessaria per la manutenzione meccanizzata, si ottiene un battente di circa 0.83 m. Si opta quindi per uno scatolare di dimensioni 2 x 2 m sia per raccordarsi con il tombamento esistente a monte, sia per garantire le dimensioni minime di accesso con un mezzo per la manutenzione.

Si rileva ad ogni buon conto che la portata idrologica di progetto non è contenuta nell'alveo del tratto a monte dell'esistente tombamento.

Opera di presidio PRSX4

Il bacino di competenza dell'opera è la porzione a nord del tombamento del borro Lagaccioni del bacino *bac14basse*. La portata di progetto di 8.3 mc/s è stata stimata proporzionalmente all'area (35% dell'intero bacino) con riferimento alla durata critica di 0.5 ore. L'area drenata, prevalentemente urbana, è dotata di un sistema fognario misto, per cui si presume che l'attuale scarico nel fiume Arno funzioni da troppo pieno.

La pendenza del fondo considerata è di 0.035, pari a quella del tratto di canale esistente a monte; la quota di imbocco è 118.7 m s.l.m.. Fissata una larghezza del tombamento di 2.0 m si ha un'altezza d'acqua di 0.55 m circa e quindi si utilizza uno scatolare di dimensioni 2 m x 2 m al fine di garantire la manutenzione meccanizzata dell'opera.

Opera di presidio PRSX5

L'opera è posizionata allo foce dell'ex alveo tombato del borro Tagliafune, oggi presumibilmente utilizzato come scarico di troppo pieno del sistema fognario misto. Attualmente il borro Tagliafune è stato deviato verso nord per immettersi nel borro Fornacina all'altezza di via Brodolini.

Il dimensionamento è stato definito considerando almeno pari area rispetto a quello esistente a monte (dimensioni 1 m (base) x 3.3 m (altezza)); la nuova opera di progetto ha una luce di 2 x 2 m, pendenza di 0.01 e quota di imbocco di 116.65 m s.l.m. in continuità con

il tombamento di monte. Le dimensioni sono tali da garantire anche la manutenzione meccanizzata dell'opera.

Opera di presidio PRSX6

L'opera è posizionata sul borro Fornacina e permette lo scarico del deflusso dei bacini *Tagliafune basse* e *Fornacina basse* corrispondente a 27.9 mc/s per il tempo di ritorno 200 anni e durata critica di 0.5 ore.

Fissata la pendenza del fondo dello scatolare a 0.048 e fissata la larghezza di 2 m si ottiene un battente di circa 1.20 m; si opta quindi per uno scatolare di dimensioni 2 x 2 m per garantire la manutenzione meccanizzata e per raccordarsi in continuità con l'attraversamento ferroviario di monte di dimensioni 1.9x3.2 m. La quota di imbocco è a 117.5 m s.l.m..

Si rileva ad ogni buon conto che la portata idrologica di progetto non è contenuta nell'alveo del tratto a monte dell'attraversamento ferroviario, né nei tombamenti dei borri Fornacina (scatolare di luce 2,5m x 1,25m) e Tagliafune (tubo circolare di diametro 1,20 m).

9 DIMENSIONAMENTO DEL RETICOLO INTERNO ALLA CASSA

Tutti i canali di seguito trattati presentano forma trapezia con scarpate a pendenza 1:1, salvo i casi specificatamente indicati in seguito. Le verifiche idrauliche sono state condotte nell'ipotesi di moto uniforme utilizzando un coefficiente medio di resistenza al moto nella formulazione di Manning di $0.025 \text{ s/m}^{1/3}$. Relativamente al borro Ricavo si rimanda al successivo § 11.

La portata di progetto è quella critica per il tempo di ritorno 10 anni calcolata come illustrato nei § 4.4 e 8, sommando alle portate critiche in ingresso dalle opere di presidio quelle generate all'interno dei settori di cassa per pari durata. Per i canali che ricevono soltanto le acque interne, la durata critica considerata è quella relativa al settore di volta in volta considerato.

Per la codifica si faccia riferimento alle seguenti figure.

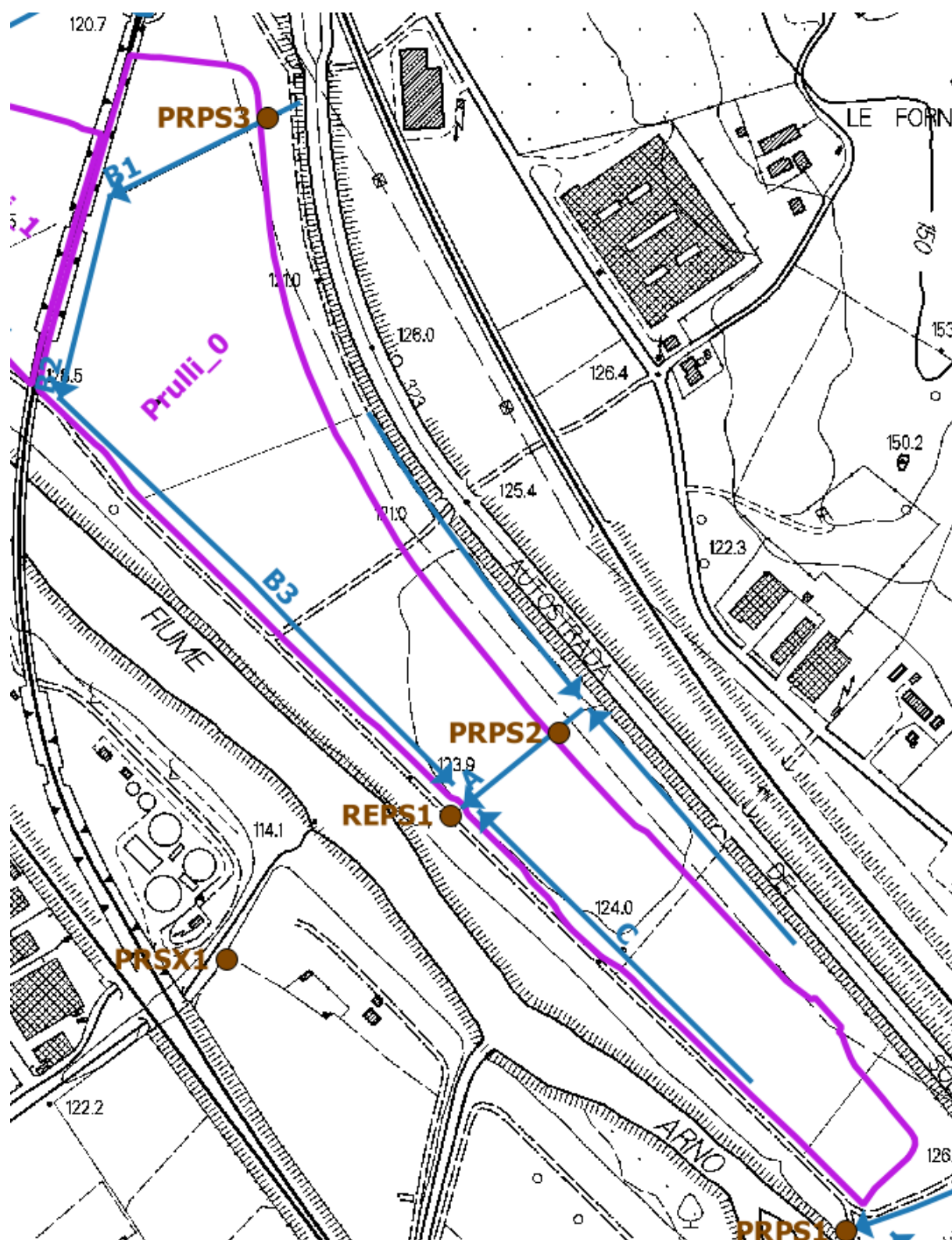


Fig. 9.1: Canali interni al settore Prulli 0

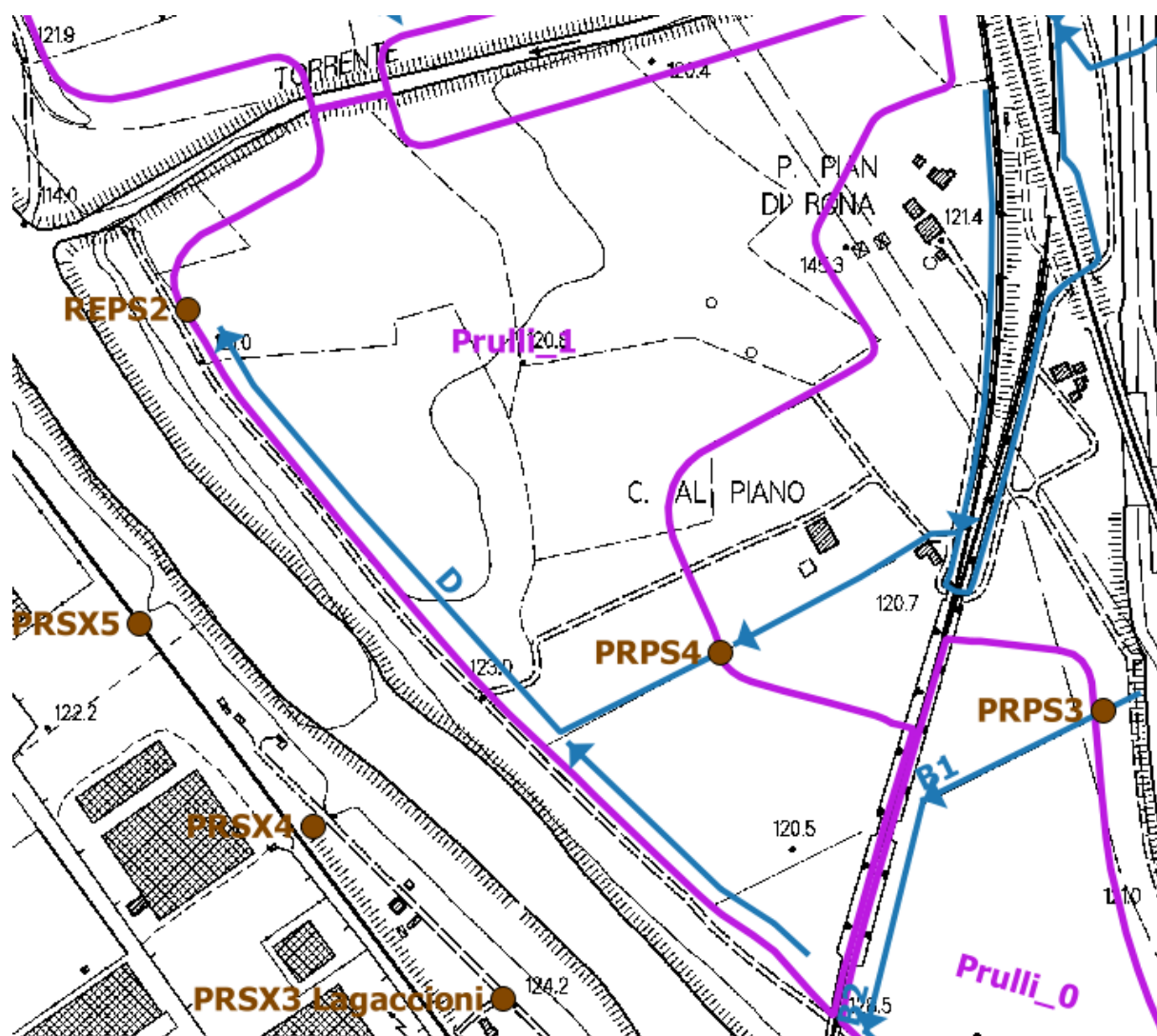


Fig. 9.2: Canali interni al settore Prulli 1

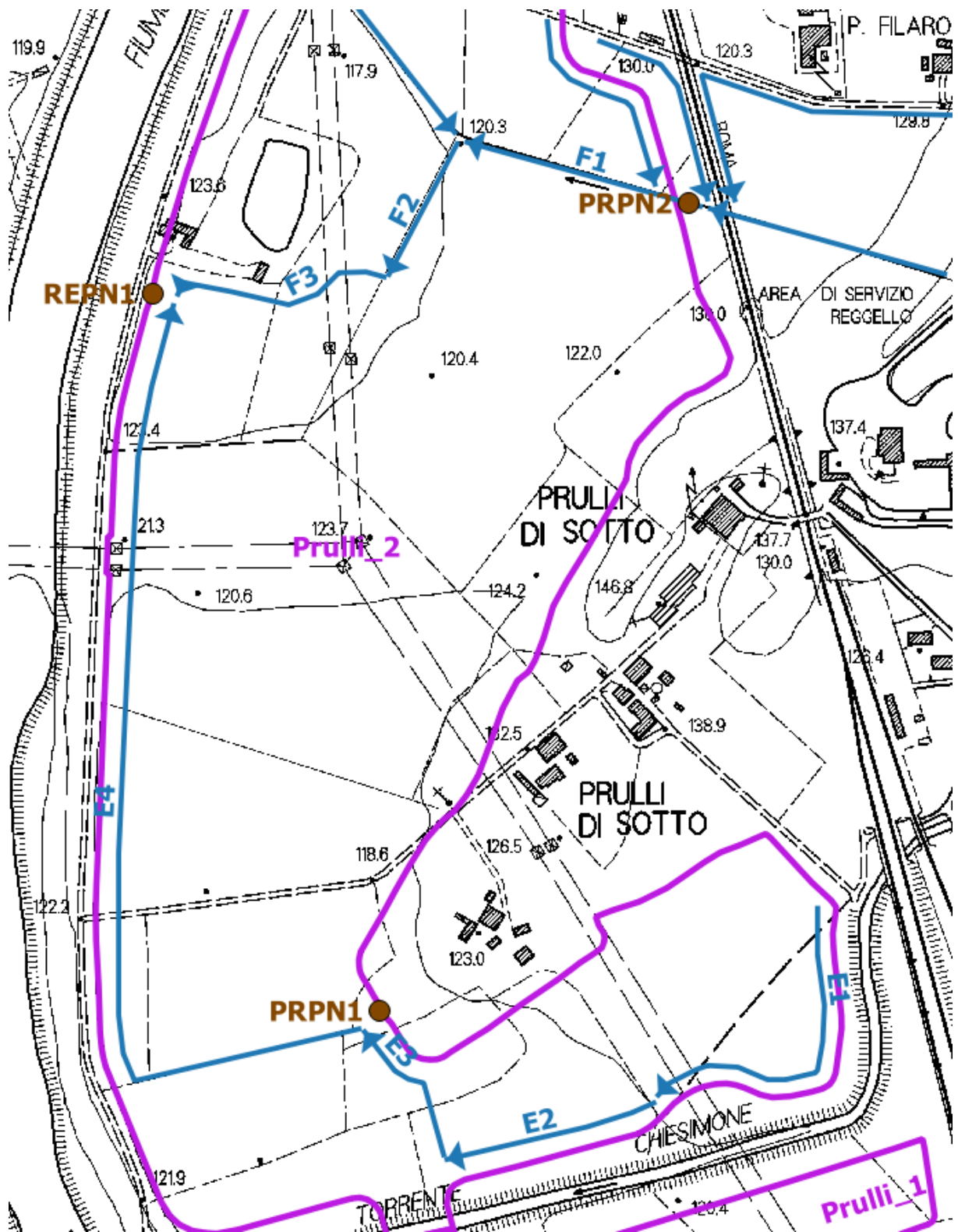


Fig. 9.3: Canali interni al settore Prulli 2

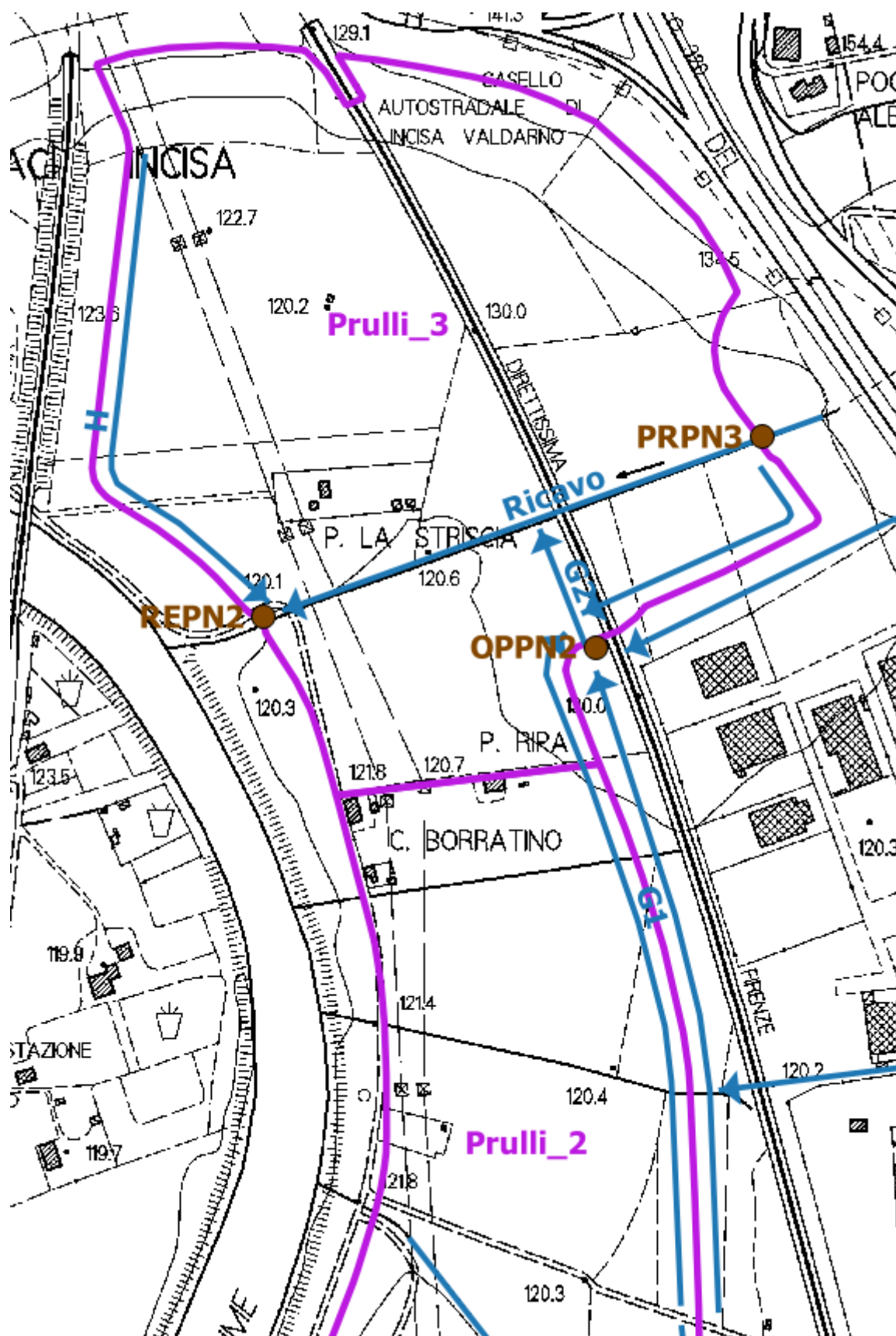


Fig. 9.4: Canali interni al settore Prulli 3

Cod.	Lungh.	Quota inizio canale	Quota fine canale	Profondità inizio canale	Profondità fine canale	Pend. Fondo	Largh. Fondo	Pendenza sponde	Tr progetto	Durata progetto	Portata progetto	Battente
	[m]	[m slm]	[m slm]	[m]	[m]	[-]	[m]	[-]	[anni]	[ore]	[mc/s]	[m]
A	80	117.31	116.50	1.20	1.70	0.0100	1	1:1	10	0.5	4.05	1.00
B1	134	118.50	118.20	1.10	1.15	0.0022	1	1:1	10	0.5	3.00	1.10
B2	179	118.20	117.80	1.15	1.10	0.0022	1	1:1	10	0.5	3.00	1.10
B3	520	117.80	116.50	1.10	1.10	0.0025	1	1:1	10	0.5	3.00	1.07
C	302	118.35	116.50	0.50	0.50	0.0061	1	1:1	10	0.5	0.10	0.13
D	536	117.83	117.25	1.10	1.10	0.0011	1.5	1:1	10	0.5	2.44	1.04
E1	315	121.10	118.65	0.50	0.50	0.0078	0.5	1:1	10	4.25	0.12	0.19
E2	199	118.30	117.90	0.50	0.50	0.0020	0.5	1:1	10	4.25	0.17	0.34
E3	153	117.90	117.80	0.50	0.50	0.0007	0.5	1:1	10	4.25	0.17	0.45
E4	738	117.80	116.20	0.50	1.00	0.0022	0.5	1:1	10	4.25	0.84	0.73
F1	196	117.35	117.00	1.00	1.00	0.0018	1	1:1	10	0.5	2.17	0.99
F2	145	117.00	116.70	1.00	1.10	0.0021	1	1:1	10	0.5	2.20	0.97
F3	222	116.70	116.20	1.10	1.00	0.0023	1	1:1	10	0.5	2.21	0.95
G1	590	119.00	117.65	0.50	0.50	0.0023	1	1:1	10	2	0.31	0.33
G2	101	117.65	117.40	1.00	1.00	0.0025	1	2:3	10	0.5	3.38	1.01
H1	270	118.00	117.73	0.50	1.27	0.0010	1	1:1	10	3	0.69	0.64
H2	165	117.73	117.57	1.27	1.44	0.0010	1	1:1	10	3	0.69	0.64

Tab. 9.1: dimensionamento canali di drenaggio interni

10 VERIFICA DELLE OPERE DI SCARICO

I quattro scarichi della cassa di espansione sono stati dimensionati in funzione delle esigenze di svaso nello scenario duecentennale di durata 18 ore del fiume Arno, utilizzando la modellazione idraulica di cui al § 5.8. I tempi di svaso sono presentati nel § 5.10.

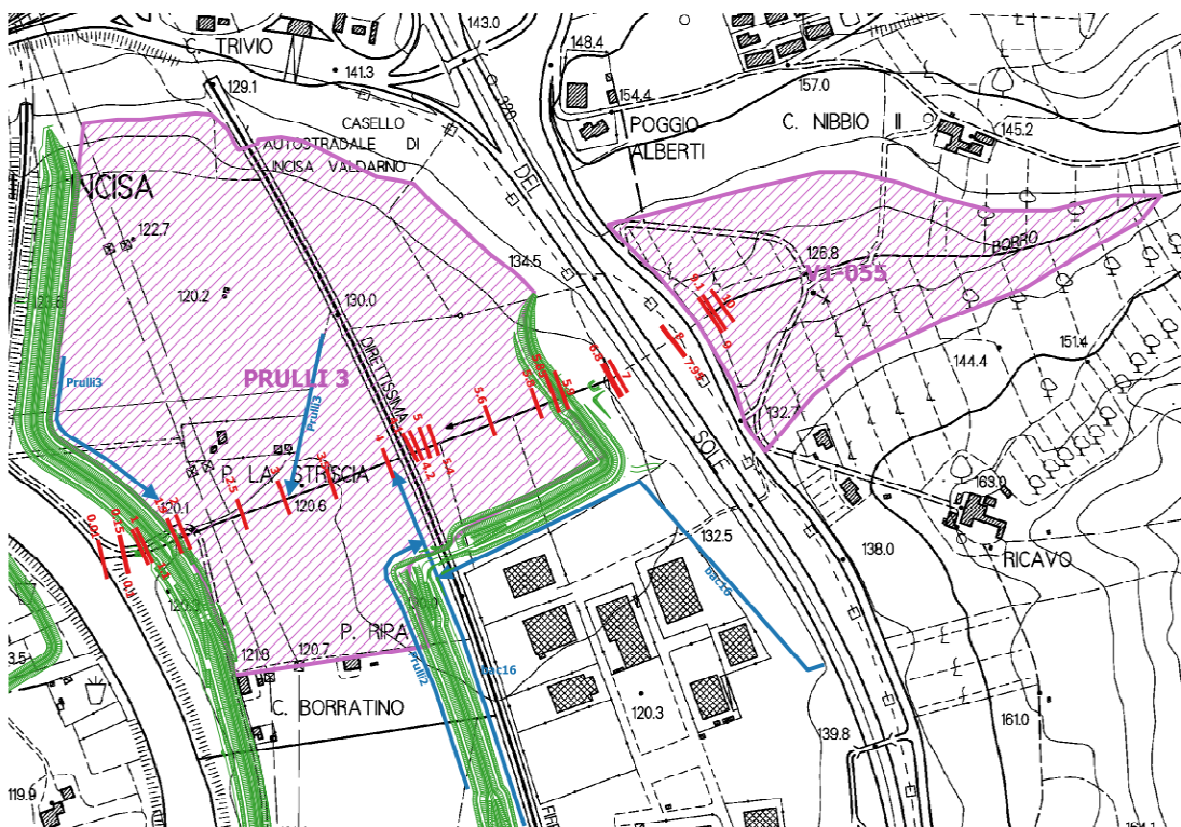
E' stato inoltre verificato che l'officiosità idraulica delle opere permettesse lo scarico del bacino afferente, pur garantendo le dimensioni minime necessarie alla manutenzione meccanizzata dei tombini.

La portata di verifica con tempo di ritorno 10 anni è calcolata come illustrato nei § 4.4, 8 e 9, sommando alle portate critiche in ingresso dalle opere di presidio quelle generate all'interno dei settori di cassa per pari durata. Per gli scarichi che ricevono soltanto le acque interne, la durata critica considerata è quella relativa settore di volta in volta considerato. Le verifiche sono state condotte nella condizione di moto uniforme, utilizzando un coefficiente medio di resistenza al moto nella formulazione di Manning di $0.015 \text{ s/m}^{1/3}$ ed ipotizzando scarico libero.

Relativamente allo scarico REPN2 alla foce del borro Ricavo si rimanda al successivo § 11.

Opera	Tr [anni]	D [ore]	Q [mc/s]	Larg. [m]	Altez. [m]	Quota scorrimento [m slm]	Pendenza [-]	Battente [m]
REPS1	10	0.5	6.5	2.0	2.0	116.50	0.01	0.82
REPS2	10	0.5	2.4	2.0	2.0	117.25	0.01	0.41
REPN1	10	0.5	2.3	2.0	2.0	116.20	0.01	0.4
REPN2	10	0.5	13.4	2.0	3.0	116.00	0.5	2.16

Tab. 10.1: verifiche delle opere di scarico per le portate dei rispettivi bacini afferenti



4. opera di scarico REPN2 di dimensioni 2x3 m con quota di imbocco a 116.0 m s.l.m. e pendenza 0.5%;
5. riprofilatura del fondo e delle sponde del borro Ricavo: a partire dall'opera di scarico REPN2 la pendenza di progetto è pari a 0.5% fino all'opera PRPN3. Il raccordo tra questa e lo sbocco del tombino autostradale è realizzato con un pozzettone che presenta un salto di fondo di 2 m. Le sezioni presentano scarpate con pendenza 2:3 e larghezza del fondo di 3 e 2.5 m rispettivamente a monte e a valle del viadotto Borratino.
6. la riprofilatura di progetto è stata definita ponendo come obiettivo il contenimento in alveo della portata decennale di progetto, condizione che costituisce un miglioramento rispetto alle condizioni attuali. Per portate superiori le esondazioni sono comunque contenute nella cassa di espansione.

Il modello è stato cimentato con gli idrogrammi definiti al § 4.5 per quanto riguarda i bacini *Ricavo*, *Prulli 2B* e *Prulli 3* (aree di cassa), mentre il contributo del bacino *bac16basse* (area industriale Pian di Rona) per gli scenari di durata critica è stato definito al precedente § 8. I bacini sono rappresentati negli elaborati PD_D_PR_06__T_R00.

Gli scenari idrologi analizzati nello stato attuale sono quelli con tempo di ritorno 10 e 30 anni con durata critica 0.5 ore, mentre per lo stato di progetto sono relativi ai tempi di ritorno 10, 30 e 200 anni con durate 0.5 ore e 18 ore.

Q (Tr 10 - 0.5h) [mc/s]	Q (Tr 30 - 0.5h) [mc/s]	Q (Tr 200 - 0.5h) [mc/s]	Q (Tr 200 - 18h) [mc/s]
10.8	14.5	20.7	2.1

Tab. 11.1: Portate del borro Ricavo

Q (Tr 10 - 0.5h) [mc/s]	Q (Tr 30 - 0.5h) [mc/s]	Q (Tr 200 - 0.5h) [mc/s]	Q (Tr 200 - 18h) [mc/s]
4	4	5	-

Tab. 11.2: Portate del bacino bac16basse

Q (Tr 10 - 0.5h) [mc/s]	Q (Tr 30 - 0.5h) [mc/s]	Q (Tr 200 - 0.5h) [mc/s]	Q (Tr 200 - 18h) [mc/s]
0.11	0.14	0.25	-

Tab. 11.3: Portate di Prulli2B

Q (Tr 10 - 0.5h) [mc/s]	Q (Tr 30 - 0.5h) [mc/s]	Q (Tr 200 - 0.5h) [mc/s]	Q (Tr 200 - 18h) [mc/s]
0.15	0.21	0.36	-

Tab. 11.4: Portate di Prulli3

Per gli scenari di durata 0.5 ore, critica per il borro di Ricavo, le simulazioni idrauliche sono state eseguite in assenza di invaso della cassa da parte del fiume Arno.

I risultati delle verifiche dello stato attuale mostrano che il tombino della strada comunale ha un funzionamento a bocca tarata e in pressione a partire da 4 mc/s, che risulta inferiore alla portata decennale pari a 10.8 mc/s. A valle dell'autostrada la portata decennale laminata è pari a 7.2 mc/s che comunque determina esondazioni in destra idraulica tra l'autostrada e il viadotto ferroviario, a valle del quale la portata è pari a 3.5 mc/s.

Analoga situazione si verifica per il tempo di ritorno trentennale dove, aumentando l'invaso e la laminazione a monte della strada comunale, la portata a valle dell'autostrada è pressoché analoga a quella del caso precedente. A monte dei tombini stradali il livello raggiunge 125.26 m s.l.m. e 126.14 m s.l.m. rispettivamente per i tempi di ritorno 10 e 30 anni.

Nello stato di progetto il nuovo assetto del reticolo di drenaggio esterno alla cassa comporta in generale un aumento delle portate a valle del viadotto ferroviaria dove si hanno le nuove immissioni del bacini *Prulli 2B* e *bac16basse*. Inoltre incrementa la superficie del bacino a nord del corso d'acqua che nello stato attuale scaricava parzialmente i deflussi direttamente nel fiume Arno. Per il tempo di ritorno di 10 anni le portate del tratto a valle del viadotto ferroviario aumentano a 11 mc/s, pur rimanendo i livelli contenuti nell'alveo riprofilato. A monte del viadotto il profilo idraulico si abbassa rispetto a quello dello stato attuale in conseguenza della riprofilatura. Stessa situazione si presenta per i tempi di ritorno di 30 e 200 anni, dove la bocca tarata costituita dal tombino stradale di monte lamina le portate quasi allo stesso valore della portata decennale. Per 200 anni di tempo di ritorno il

massimo livello a monte della strada di Pian di Rona è di 127.2 m s.l.m., almeno 5.4 m più basso del piano stradale. Per i tempi di ritorno 10 e 30 anni i livelli sono pressoché analoghi a quelli dello stato attuale (125.19 e 126.10 m s.l.m.).

Infine è stata verificata la condizione di invaso della cassa per il tempo di ritorno 200 anni e durata 18 ore (caso critico per il fiume Arno), a cui corrisponde un livello a monte della strada comunale uguale a quello in cassa (125.10 m s.l.m.) nel caso in cui la paratoia dell'opera di presidio PRPN3 rimanga aperta. Tale livello è comunque inferiore a quello relativo alla portata critica decennale del borro.

Qualora invece la paratoia venga chiusa dal momento di apertura dell'opera di presa della cassa, i deflussi del borro verrebbero contenuti a monte comportando un invaso fino a 126.22 m s.l.m., analogo a quello dello scenario trentennale critico del borro.

I risultati delle simulazioni idrauliche sono riportati nell'elaborato PD_D_PR_03__R_R01.

12 DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE SUL TORRENTE CHIESIMONE

Il torrente Chiesimone è attraversato, al di sopra le proprie sponde, dall'opera di connessione che connette i settori Prulli 2 e Prulli 3 della cassa, i cui argini impediscono qualsiasi esondazione del torrente. I deflussi pertanto sottoattraversano l'opera di connessione attraverso 2 scatolari di dimensioni 5.5x4.65 m ciascuno.

Il dimensionamento delle opere è stato eseguito implementando un modello idraulico, successivamente inserito nel modello generale del fiume Arno, imponendo come scelta di progetto quella di evitare il funzionamento in pressione dell'attraversamento per la portata critica duecentennale del torrente riferita all'evento di durata 3 ore.

Q (Tr 10 anni) [mc/s]	Q (Tr 30 anni) [mc/s]	Q (Tr 100 anni) [mc/s]	Q (Tr 200 anni) [mc/s]
79	110	151	175

Tab. 12.1: Portate critiche (durata evento meteoriche 3 ore) del torrente Chiesimone

Coniugando tale scelta con la necessità di limitare la quota di scorrimento della sovrastante soglia di connessione della cassa, si rende necessario una sistemazione generale del tratto terminale del corso d'acqua attraverso: l'abbassamento del fondo alveo di circa 2 per circa 260 m con il contestuale spostamento verso monte del salto di fondo esistente e la riprofilatura delle scarpate a valle dell'opera di connessione.

Come condizione al contorno nella modellazione in moto permanente è stata utilizzata l'altezza di moto uniforme per una pendenza del fondo di 1‰.

Rispetto ai parametri di modellazione descritti nel § 5.3, il coefficiente medio di resistenza al moto secondo Manning è stato posto uguale a $0.025 \text{ s/m}^{1/3}$ in corrispondenza dell'opera di connessione e uguale a $0.03 \text{ s/m}^{1/3}$ nel tratto a valle.

In corrispondenza della sezione di ingresso nell'opera di connessione il livello duecentennale è pari a 118.56 m s.l.m.. Pertanto l'intradosso è stato posto ad una quota superiore.

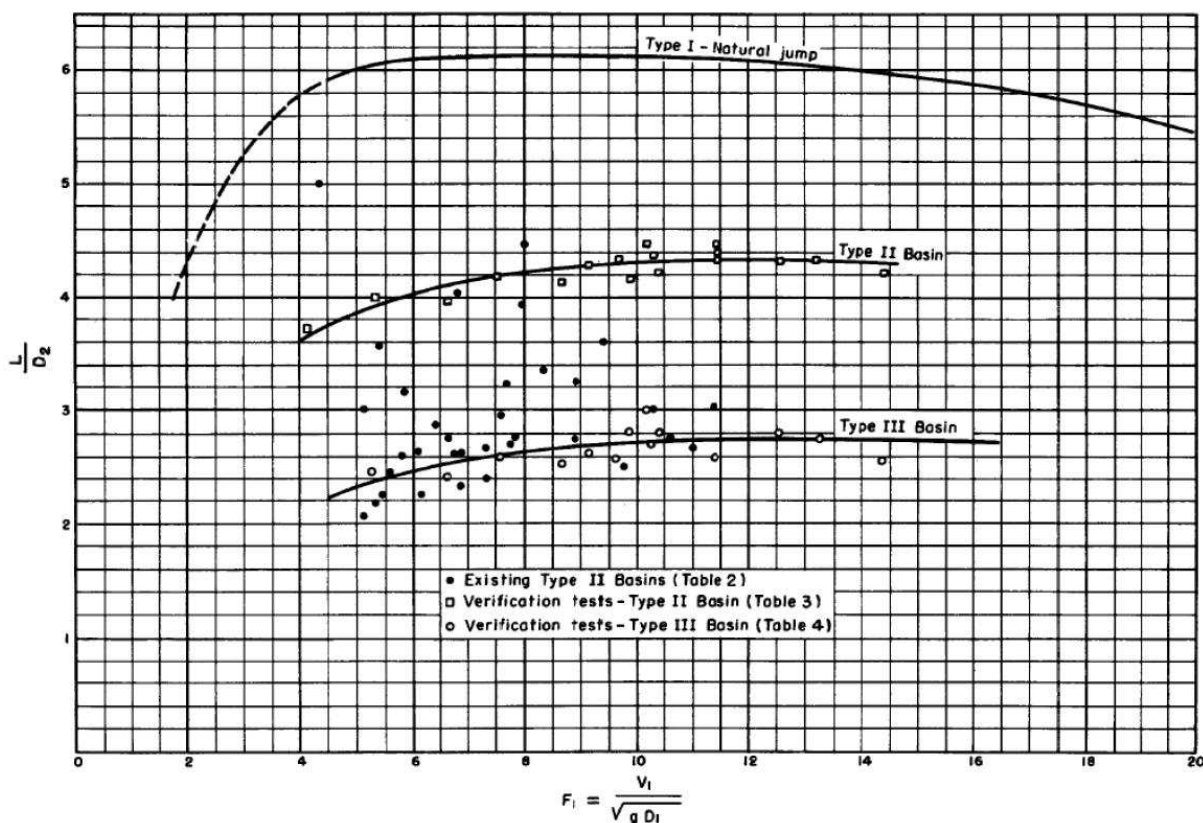
Sul testa del salto di fondo (sez. 7.9) si instaura una corrente critica che passa a veloce lungo la rampa con pendenza del 10%, al piede della quale si verifica un risalto idraulico. La

modellazione eseguita, attraverso l'uguaglianza delle spinte totale, individua la sezione dove ha inizio il risalto, ma non definisce la distanza alla quale si raggiunge l'altezza coniugata con moto rapidamente variato. Al fine di verificare che il risalto idraulico sia esaurito prima dell'ingresso negli scatolari della connessione idraulica, è stato fatto riferimento a varie formulazioni sperimentali, verificando la più cautelativa.

Tempo di ritorno	T_r	[anni]	500	200	100	30
Portata	Q	[mc/s]	207	175	151	110
Altezza idrica al piede rampa	y_1	[m]	3.00	2.31	2.01	1.50
Larghezza specchio liquido al piede rampa	b_1	[m]	12.97	9.42	9.42	9.42
N. Froude al piede rampa	F_1	[-]	1.68	1.69	1.79	2.02
Altezza idrica coniugata	y_2	[m]	5.60	5.06	4.72	4.03
Larghezza specchio liquido coniugato	b_2	[m]	19.38	18.13	17.12	15.03
Tipologia del risalto			ondulato	ondulato	debole	debole
Differenza altezze coniugate	$y_2 - y_1$	[m]	2.60	2.75	2.71	2.53
Lunghezza del risalto U.S.B.R	$L_r = \lambda y_2$	[m]	28.00	25.30	23.60	20.15
Lunghezza del risalto U.S.B.R	$L_r = y_1 * 220 \tanh((F_1 - 1)/22)$	[m]	20.39	15.93	15.87	15.29
Lunghezza del risalto Bradley Peterka 1954	$L_r = 6 (y_2 - y_1)$	[m]	15.60	16.50	16.26	15.18
Lunghezza del risalto	$L_r = \eta (y_2 - y_1)$	[m]	19.76	20.90	20.60	18.22
Altezza idrica di valle	y_v	[m]	5.7	5.11	4.78	4.09
Stabilità del risalto			annegato	annegato	annegato	annegato

Tab. 12.2: Lunghezza del risalto idraulico

dove λ e η sono stimati attraverso le seguenti relazioni:

Fig. 12.1: valore di λ in funzione del N. di Froude

F_1	η
2	7.6
3	7.2
5	7
10	6.6
15	6.2
20	5.7

Tab. 12.3: valori di η in funzione del N. di Froude

Il tratto d'alveo tra il piede della rampa e la connessione idraulica è stato previsto di 30 m di lunghezza.

Rilevato dalle modellazioni idrauliche che il ponte stradale (sez. 20.5) a monte di quello ferroviario risulta insufficiente già per tempo di ritorno di 30 anni e che per portate superiori viene sormontato, la scelta di demolire e ricostruire il ponte comporta la definizione del livello idrico di progetto che, sulla base delle modellazione idraulica della portata

duecentennale, è pari a 124.4 m s.l.m., avendo ipotizzato una luce di 11 m. Pertanto l'intradosso del ponte è da porsi ad una quota non inferiore a 125.9 m s.l.m. avendo considerato 1.5 m di franco come da Norme Tecniche delle Costruzioni. La sezione idraulica è da riprofilare uniformandola al tratto di monte con larghezza del fondo di circa 4.8 m e scarpate con pendenza 2:3.

Come evidenziato nell'analisi dei risultati della modellazione idraulica dello stato attuale, il torrente Chiesimone è soggetto ad esondazione nel tratto a monte della linea ferroviaria. Le arginature della cassa di espansione si raccordano con la scarpata di valle del rilevato ferroviario e pertanto non garantiscono la sicurezza anche del tratto a monte, lungo il quale corre la viabilità per raggiungere l'opera di connessione. Considerato che per esigenze di sicurezza nella gestione della cassa di espansione durante gli eventi di piena è necessario garantire in qualsiasi condizione l'accesso alle opere, è stato deciso di prolungare la chiusura idraulica verso monte, così come descritto nella Relazione tecnica del progetto.

La modellazione idraulica ha evidenziato che a monte della ferrovia i livelli dovuti al rigurgito del fiume Arno sono inferiori rispetto a quelli corrispondenti ad eventi critici del bacino del torrente Chiesimone, sulla base dei quali è stata definita la quota di progetto delle opere.

Per confronto, la geometria dello scenario attuale del torrente Chiesimone e delle sue aree di esondazione, già utilizzata nel modello generale del fiume Arno, è stata cimentata con gli idrogrammi critici del torrente Chiesimone utilizzando il modello di moto vario.

Dal confronto tra i livelli dello stato attuale e di progetto si evince che, a seguito degli interventi sopra richiamati, la portata duecentennale è completamente contenuta a valle del nuovo ponte della strada comunale di Pian di Rona. A monte dello stesso gli interventi garantiscono una riduzione dei battenti fino a 1.4 m a valle della sezione 94. A monte permane la possibilità di sormonto (battente massimo 30 cm) dell'argine destro che ricade in proprietà privata.

Tutti i risultati delle modellazioni sono riportati nell'allegato PP_D_PR_03__R_R01.

13 VERIFICA DEL BORRO GAGLIANELLA

Il modello geometrico del borro Gaglianella, già utilizzato nella modellazione generale del fiume Arno, è stato cimentato con le portate di picco caratteristiche del proprio bacino per i tempi di ritorno 30, 100 e 200 anni. La durata critica, sulla base dell'analisi idrologica descritta nei precedenti paragrafi, è pari a 1 ora.

Q (Tr 30 anni) [mc/s]	Q (Tr 30 anni) [mc/s]	Q (Tr 100 anni) [mc/s]	Q (Tr 200 anni) [mc/s]
31.5	43.1	56.2	64.0

Tab. 13.1: Portate critiche (durata evento meteoriche 1 ore) del borro Gaglianella

Le simulazioni sono state condotte con un modello di moto permanente e imponendo come condizione al contorno di valle il livello di moto uniforme (pendenza 6‰), avendo ipotizzato che il fiume Arno nel quale sfocia il borro non sia in regime di piena.

Si precisa che non è stata considerata la laminazione della cassa di espansione in linea a monte della loc. Gagliana.

Nello scenario di stato attuale si rilevano esondazioni in destra idraulica a monte del ponte ferroviario a partire dal tempo di ritorno 30 anni. Ciò è dovuto all'assenza della chiusura dell'argine al rilevato ferroviario. Negli altri tratti del corso d'acqua, almeno fino a monte del ponte di via L. Conti, i livelli sono contenuti fino al tempo di ritorno 500 anni, fatta eccezione per il rigurgito immediatamente a monte del ponte di via Roma, sia in destra che in sinistra idraulica.

Nello scenario di progetto sono stati considerati gli interventi di adeguamento arginale fino alla quota di progetto 125.60 m s.l.m. per il contenimento del rigurgito del fiume Arno, compreso la chiusura dell'argine destro sul rilevato ferroviario. Nel tratto a valle della ferrovia è stato tenuto conto della riprofilatura delle sponde per garantire la stabilità della scarpata e una pista di servizio per la manutenzione. I risultati delle simulazioni idrauliche dimostrano che a valle del ponte di via L. Conti le opere di progetto, pur non considerando il contributo alla laminazione della cassa di espansione nel tratto a monte, riescono a contenere la portata duecentennale.

I risultati delle modellazioni sono riportati nell'allegato PD_D_PR_03__R_R01.

14 VERIFICA DEL TORRENTE PONTEROSSO

Le opere idrauliche dimensionate per contenere il rigurgito del fiume Arno lungo il torrente Ponterosso sono state verificate anche nei confronti delle portate critiche del bacino di competenza di quest'ultimo.

Le simulazioni sono state condotte in analogia a quanto fatto per il borro Gaglianella, considerando cioè le geometrie dell'alveo dello stato attuale e di progetto della modellazione generale del fiume Arno e utilizzando le seguenti portate relative alla durata critica di 1.5 ore.

Q (Tr 10 anni) [mc/s]	Q (Tr 30 anni) [mc/s]	Q (Tr 100 anni) [mc/s]	Q (Tr 200 anni) [mc/s]
66.2	94.0	126.6	145.8

Tab. 14.1: Portate critiche (durata evento meteoriche 2 ore) del torrente Ponterosso

Le simulazioni sono state condotte con un modello di moto permanente e imponendo come condizione al contorno di valle il livello di moto uniforme (pendenza 6‰), avendo ipotizzato che il fiume Arno nel quale sfocia il torrente non sia in regime di piena.

Si precisa che non è stata considerata la laminazione della cassa di espansione in derivazione a monte del ponte di via N. Copernico.

Nello scenario di stato attuale le esondazioni iniziano a partire da tempi di ritorno superiori a 30 anni, sia in destra che in sinistra idraulica, fatta eccezione per la sponda sinistra a monte del ponte di via Roma (SRT 69) che viene sormontata per tempi di ritorno inferiori.

Nello scenario di progetto le simulazioni condotte evidenziano che a valle del ponte di via Roma le opere di progetto, pur non considerando il contributo alla laminazione della cassa di espansione nel tratto a monte, riescono a contenere la portata duecentennale. Si precisa che, oltre agli interventi previsti nel presente progetto in sponda sinistra del torrente, è stato tenuto conto anche delle opere previste in destra nell'ambito del progetto della cassa di espansione Restone.

Permangono le criticità a monte del ponte di via Roma, per la risoluzione delle quali il Comune di Figline e Incisa Valdarno è Ente attuatore sulla base di un Accordo di Programma con la Regione Toscana.

I risultati delle modellazioni sono riportati nell'allegato PD_D_PR_03__R_R01.

15 VERIFICA DEL BORRO MORIANO

Il borro di Moriano è caratterizzato dalle seguenti portate di piena corrispondenti alla durata critica di 2 ore.

Q (Tr 30 anni) [mc/s]	Q (Tr 100 anni) [mc/s]	Q (Tr 200 anni) [mc/s]
49.5	68.2	79.2

Tab. 15.1: Portate critiche (durata evento meteoriche 2 ore) del borro Moriano

Sulla base di simulazioni idrauliche condotte con un'impostazione analoga a quella descritta per il borro Gaglianella, si dimostra che tali portate sono contenute nell'alveo del corso d'acqua già nello scenario di stato attuale.

Si evidenzia ad ogni modo che la ridotta larghezza della sezione 10 comporta il passaggio in corrente critica, un moto di corrente veloce nel tratto a valle e un risalto idraulico prima del ponte della SRT 69.

I risultati delle modellazioni sono riportati nell'allegato PD_D_PR_03__R_R01.

16 RISCHIO RESIDUO

A seguito della realizzazione degli interventi in oggetto, permane sul territorio un rischio residuo derivante dai seguenti fattori:

1. collasso o malfunzionamento delle opere idrauliche di contenimento (dipende dalla corretta progettazione, esecuzione e manutenzione delle opere);
2. portate di piena superiori a quelle di progetto (la probabilità che si verifichi eventi di intensità superiore a quella di progetto non è mai nulla. Il riferimento normativo vigente è il tempo di ritorno duecentennale, assunto come socialmente sostenibile in un'ottica di costi-benefici);
3. eventi di piena critici nel reticolo non oggetto di intervento (le condizioni di criticità del reticolo secondario sono state valutate nell'ambito dei Piani Strutturali e Regolamenti Urbanistici dei Comuni di Reggello e Figline e Incisa Valdarno. Gli eventuali interventi necessari non sono oggetto della presente progettazione che si è concentrata sulla riduzione del rischio derivante dal fiume Arno);
4. criticità puntuali dovute alla quota di alcuni ponti ferroviari che non garantisce la sicurezza dell'opera o il franco idraulico;
5. criticità puntuali per le quali è stato ritenuto che gli interventi fossero troppo onerosi rispetto a gestire l'evento di piena del fiume Arno con interventi temporanei;
6. intermittenza di scolo del reticolo secondario durante gli eventi di piena del fiume Arno.

Fatta salva la correttezza della progettazione ed esecuzione delle opere in merito a quanto indicato al punto 1, per i motivi sopra esposti e considerato che il punto 3 esula dagli obiettivi del progetto, nei successivi paragrafi verranno esposte le valutazioni effettuate riguardo al rischio residuo di cui ai punti 4, 5 e 6.

Per quanto riguarda il punto 2 si ricorda che le opere idrauliche sono state dimensionate sulla base del tempo di ritorno duecentennale oltre 70 cm di franco (sufficiente a contenere il carico totale) e che la massima portata contenibile in alveo è pari a circa 2950 mc/s. Inoltre la cassa di espansione è dotata di sfioratore di sicurezza tale da prevenire il sormonto delle arginature.

16.1 INTERVENTI IN CORRISPONDENZA DI ALCUNI ATTRAVERSAMENTI FERROVIARI

Relativamente al precedente punto 4, le condizioni di criticità sono state espresse al precedente § 5.10.

Per contenere nell'alveo dei corsi d'acqua minori i livelli di piena ed evitare il sormonto della ferroviaria, risulta necessario l'adeguamento dei parapetti dei ponti sul torrente Ponterosso, sul Borro Gaglianella e sul borro Moriano (ferroviario e stradale), da realizzarsi a cura di RFI in quanto ente gestore delle opere. Nell'ottica di sicurezza e funzionalità delle opere è inoltre necessario valutare la sottospinta dei ponti con funzionamento in pressione per verificare e prevenire la condizione di sollevamento in riferimento alle caratteristiche dimensionali e costruttive dei singoli ponti.

Si precisa che l'elaborato PD_D_PR_11__T_R00 "Planimetria delle aree inondabili dal F. Arno – Stato di progetto" è stato redatto tenendo conto dei sopra citati interventi.

16.2 INTERVENTI TEMPORANEI DI GESTIONE DEL RISCHIO

Tutte le opere previste nel presente progetto garantiscono il contenimento nel fiume Arno e nei tratti rigurgitati dei suoi affluenti delle portate stimate per il tempo di ritorno duecentennale, con franco minimo di 70 cm (soltanto il lungo il borro Moriano non è garantito il franco per le considerazioni di seguito esposte). Si precisa però che la messa in sicurezza per tale tempo di ritorno del territorio contermina agli interventi, salvo quanto specificato al precedente paragrafo, passa attraverso la gestione di condizioni puntuali di rischio da attuarsi nell'ambito delle procedure del Servizio di Piena (R.D. 2669/19937) e di Protezione Civile.

Infatti le modellazioni idrauliche del fiume Arno nello stato di progetto hanno evidenziato il possibile sormonto del ponte di via G. di Vittorio sul borro Gaglianella e quello della strada regionale SRT 69 sul borro Moriano. La valutazione dell'opportunità o meno di demolire e ricostruire gli attraversamenti si è basata su una valutazione della fattibilità tecnica in relazione al contesto territoriale e su un'analisi speditiva costi/benefici, che ha portato a ritenere troppo oneroso sotto gli aspetti tecnici, economici e sociali provvedere alla ricostruzione dei ponti a fronte di battenti di sormonto estremamente modesti. E' stato pertanto deciso di affrontare tale criticità con interventi temporanei che garantiscano il confinamento delle acque in prossimità del ponte, senza che queste si espandano nelle aree

adiacenti. A tale scopo il progetto prevede la dotazione dei soggetti competenti all'attuazione del piano di evacuazione e gestione del rischio, da redigere nell'ambito del progetto definitivo, di barriere mobili gonfiabili ad acqua e relativa attrezzatura per l'installazione.

In particolare, in occasione di eventi particolarmente gravosi e monitorata dal soggetto competente la possibilità di sormonto dei due ponti, prima che ciò possa accadere dovranno essere posizionate le barriere mobili di contenimento. Per il ponte di via Di Vittorio le barriere sono poste trasversalmente su entrambi i lati del ponte, serrandole ai muri appositamente previsti nel presente progetto (elaborato PD_H_PR_05A_T_R01) in continuità con le arginature. In tal modo le acque rimarranno confinate esclusivamente sopra l'impalcato del ponte; per il collegamento tra Figline e Incisa rimane comunque transitabile il ponte della SRT 69. Per il ponte sul borro Moriano (SRT69) si prevede l'installazione delle barriere sui lati di monte e di valle a chiudere sulle opere di progetto, in modo che la viabilità rimanga sempre percorribile (elaborato PD_H_PR_05B_T_R01).

Analoga valutazione costi/benefici è stata effettuata in relazione alla definizione degli interventi lungo il Borro Moriano, dove sono presenti opere private e, oltre al ponte della SRT 69 sopra citato, altri due ponti (ferrovia e via Garibaldi). Per quanto riguarda il tratto a valle della SRT 69 fino a via Garibaldi, la geometria e le quote dei due attraversamenti (ferrovia e via Garibaldi) risultano compatibili con la realizzazione delle nuove opere di chiusura idraulica fino al livello duecentennale, escluso franco. In alternativa sarebbe stato necessario demolire e ricostruire i ponti con rilevanti difficoltà di rispetto dei vincoli della livelletta ferroviaria e con costi rilevanti. Si segnala pertanto che, ai fini della pianificazione di interventi di protezione civile, le opere di difesa dalle piene e i ponti lungo il borro Moriano a valle della SRT 69 sono privi di franco sul livello idrico duecentennale. Lo stesso per quanto riguarda l'opera prevista in sponda destra a monte del ponte.

Relativamente alla sponda sinistra è stato verificato che i muri esistenti vengono sormontati per un fronte di circa 170 m con una battente massimo di 50 cm. Le acque esondate interessano gli adiacenti fabbricati, la strada regionale e poi si propagano verso la ferrovia, la sottostazione elettrica ed Incisa. Detti muri sono stati realizzati dai privati confinanti e il loro rialzamento richiederebbe, sulla base delle verifiche strutturali di prima approssimazione, il loro rifacimento completo.

Considerate le difficoltà tecnico-amministrative ad intervenire sui muri privati, i costi rilevanti e la bassa probabilità di accadimento del sormonto, è stato ritenuto idoneo confinare

le acque ad ovest della strada regionale attraverso il posizionamento da parte del sistema di Protezione Civile di barriere gonfiabili temporanee di lunghezza 100 m a partire dal ponte della SRT 69 (vedi elaborato PD_H_PR_05B_T_R01). Rimarrebbero allagati gli edifici tra il borro e la SRT 69 per i quali va definito, nell'ambito del Piano di Protezione Civile Comunale, un piano di evacuazione.

Resta da definire, possibilmente attraverso la sottoscrizione di apposita convenzione con RFI, le modalità di gestione con interventi temporanei e/o non strutturali della criticità legata al ponte ferroviario di Incisa e al franco ridotto in corrispondenza delle sue spalle (vedi § 5.10).

16.3 ALLAGABILITÀ RESIDUA DA INTERMITTENZA DI SCOLO DEL RETICOLO SECONDARIO

Gli scenari idrologici di progetto prevedono che l'evento meteorico abbia durata costante su tutto il bacino del fiume Arno e tale assunzione porta alla necessità di stimare il volume dei deflussi del reticolo secondario che, durante il passare delle piene del fiume, non può essere scaricare nel fiume o nella cassa di espansione.

Tale stima è stata fatta per eventi meteorici di durata 18, 24 e 36 ore relativamente ai tempi di ritorno di 30 e 200 anni con ragguaglio areale delle altezze di pioggia riferita all'intero bacino del fiume Arno. I corrispondenti idrogrammi sono stati stimati secondo gli schemi riportati nel § 4 e seguenti.

Le aree investigate corrispondono alle zone *Matassino, Monicoro, Pian di Rona, Pian della Rugginosa, I Ferrioli, Lagaccioni, Incisa*.

Matassino

I bacini di riferimento corrispondono ai codici *bac12 basse* e *Podere Colmate* dell'elaborato PD_D_PR_06_T_R00. La definizione delle aree di potenziale allagabilità è eseguita attraverso il bilancio degli ingressi, degli scarichi e dei volumi di accumulo che, attraverso la curva d'invaso dell'area di interesse, si traducono in battenti idrici. Dette curve sono state determinate dal rilievo Lidar della Regione Toscana (cluster 1x1 m).

Si assume l'ipotesi che il sistema di drenaggio è impedito nell'attraversare l'opera di presidio PRPS1 lungo l'argine del fiume Arno quando i livelli di piena di quest'ultimo superano la quota minima del piano campagna (~ 122.2 m s.l.m.). In tale condizione

L'affluente non può più incrementare il proprio carico piezometrico per superare quello del ricettore se non andando ad allagare le aree circostanti. L'opera di presidio, dotata di paratoia, impedisce la fuoriuscita delle acque del fiume Arno.

L'elaborato PD_D_PR_12__T_R00 riporta le aree allagabili per intermittenza di scolo del reticolo secondario riferite ai volumi e livelli idrici riportati nella seguente tabella. Per il tempo di ritorno di 200 anni di durata 36 ore il battente massimo sulla strada comunale di Pian di Rona è di 45 cm. Rispetto agli attuali livelli di allagabilità dal fiume Arno, i battenti diminuiscono di almeno 1.4 m. Con il termine "almeno" si fa riferimento al fatto che, come esplicitato al § 4.5, le simulazione idrologico-idrauliche del fiume Arno non tengono conto dei contributi dei bacini soggetti ad intermittenza di scolo.

Tr [anni]	200			30		
durata [ore]	18	24	36	18	24	36
V [mc]	67896	82314	110484	20232	25686	0
H [m slm]	123.12	123.25	123.45	122.43	122.59	-

Tab. 16.1: valori di allagabilità residua nell'area Matassino

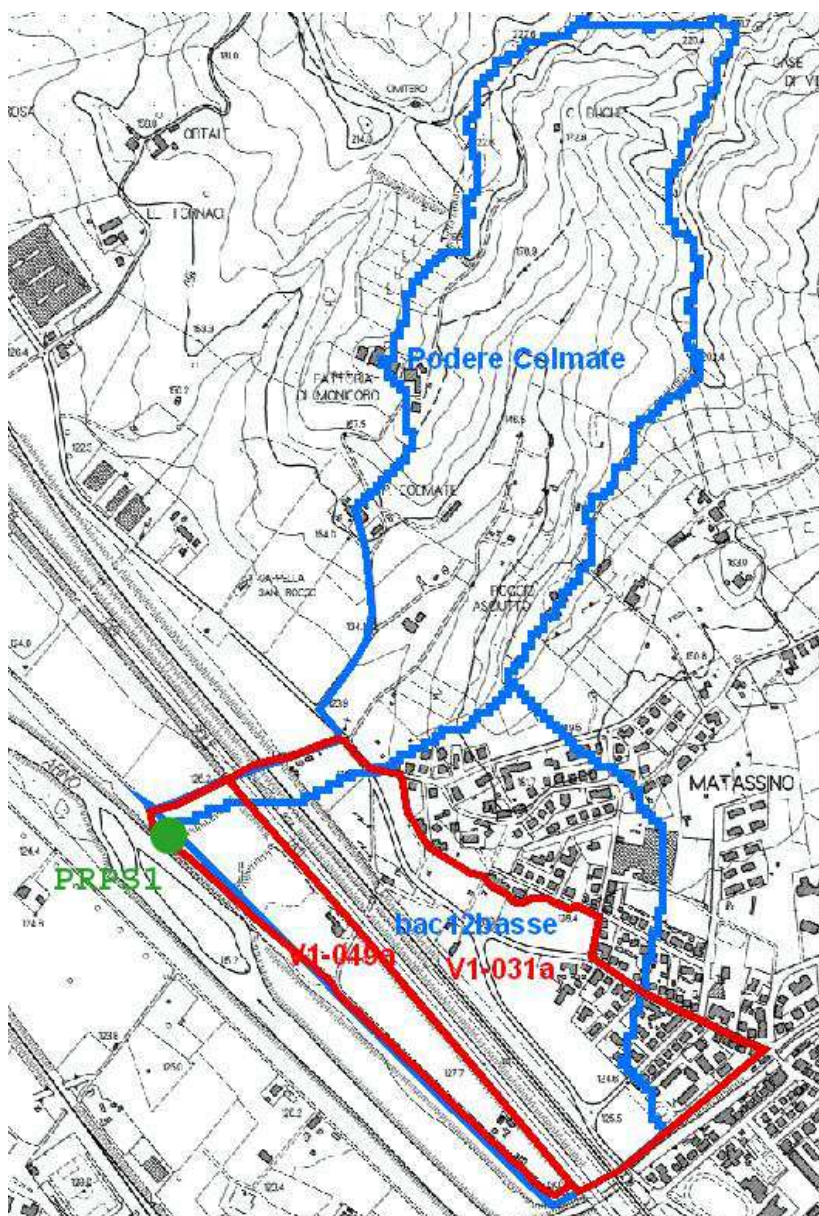


Fig. 16.1: area e bacini relativi all'area Matassino

Monicoro

Il bacino di riferimento corrisponde al codice *bac13Abasse* dell'elaborato PD_D_PR_06__T_R00. La definizione delle aree di potenziale allagabilità è eseguita attraverso il bilancio degli ingressi, degli scarichi e dei volumi di accumulo che, attraverso la curva d'invaso dell'area di interesse, si traducono in battenti idrici. Dette curve sono state determinate dal rilievo Lidar della Regione Toscana (cluster 1x1 m).

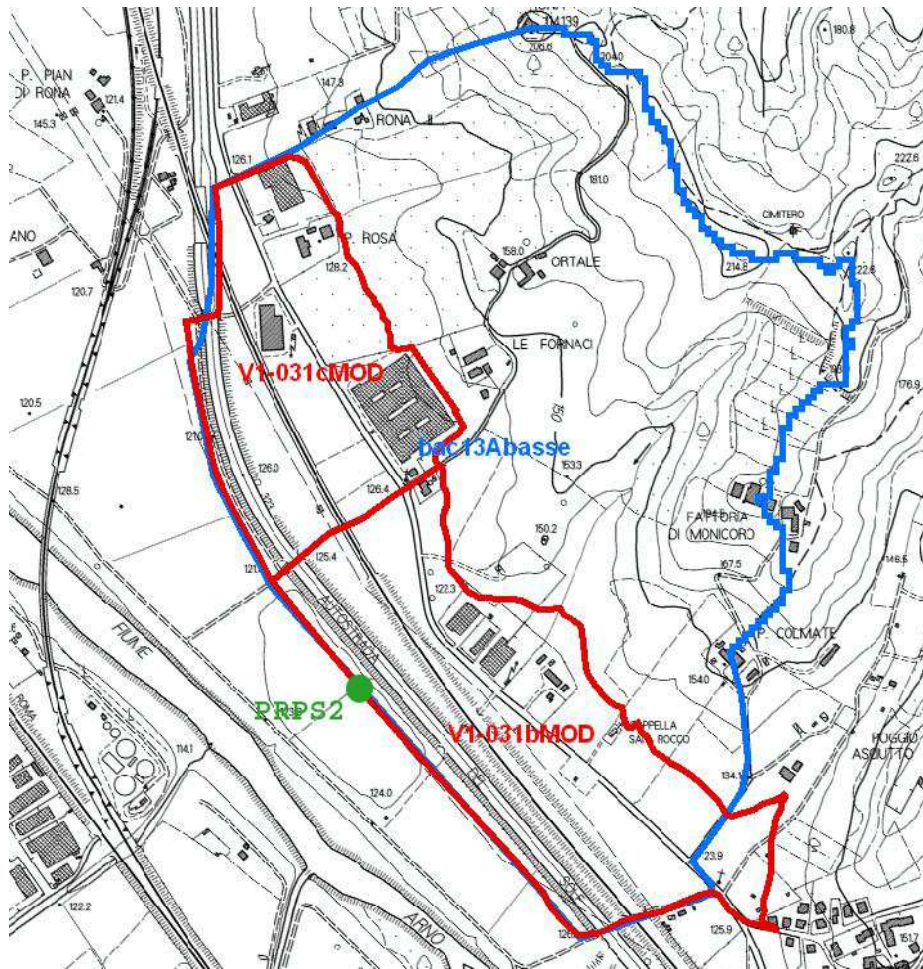


Fig. 16.2: area e bacini relativi all'area Monicoro

Si assume l'ipotesi che il sistema di drenaggio è impedito nell'attraversare l'opera di presidio PRPS2 lungo l'argine della cassa di espansione dal momento in cui l'opera di presa inizia ad invadere. L'opera di presidio, dotata di paratoia, impedisce la fuoriuscita delle acque invase.

L'elaborato PD_D_PR_12_T_R00 riporta le aree allagabili per intermittenza di scolo del reticolo secondario riferite ai volumi e livelli idrici riportati nella seguente tabella. Per i tempi di ritorno di 30 e 200 anni i battenti diminuiscono rispettivamente di almeno 0.75 m e 2.2 m rispetto agli attuali livelli di allagabilità dal fiume Arno. Con il termine "almeno" si fa riferimento al fatto che, come esplicitato al § 4.5, le simulazione idrologico-idrauliche del fiume Arno non tengono conto dei contributi dei bacini soggetti ad intermittenza di scolo.

La strada comunale di Pian di Rona è non risulta allagabile.

Tr [anni]	200			30		
durata [ore]	18	24	36	18	24	36
V [mc]	47481	47076	59565	28365	40251	46887
H [m slm]	121.50	121.49	121.69	121.10	121.36	121.49

Tab. 16.2: valori di allagabilità residua nell'area Monicoro

Pian di Rona

Il bacino di riferimento corrisponde al codice *bac13Bbasse* dell'elaborato PD_D_PR_06__T_R00. La definizione delle aree di potenziale allagabilità è eseguita attraverso il bilancio degli ingressi, degli scarichi e dei volumi di accumulo che, attraverso la curva d'invaso dell'area di interesse, si traducono in battenti idrici. Dette curve sono state determinate dal rilievo Lidar della Regione Toscana (cluster 1x1 m).

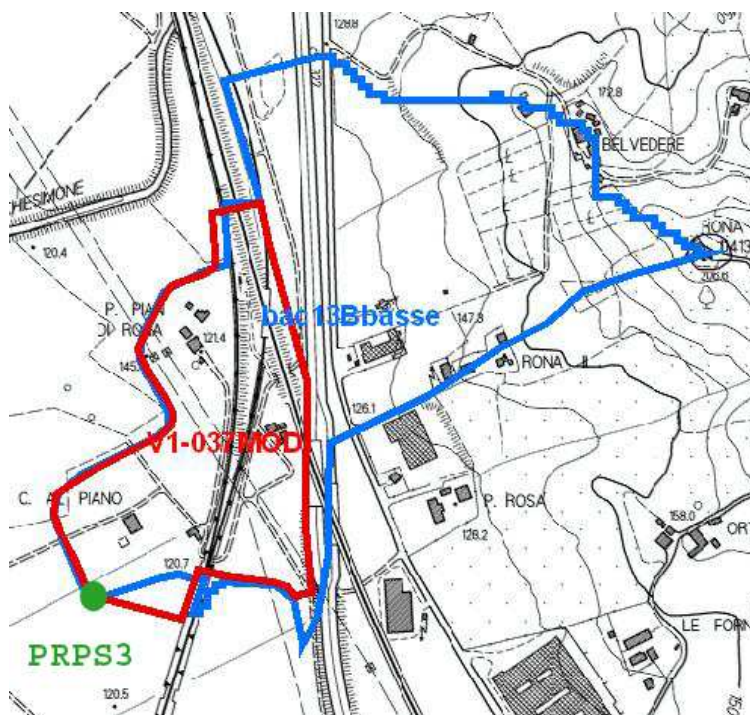


Fig. 16.3: area e bacini relativi all'area Pian di Rona

Si assume l'ipotesi che il sistema di drenaggio è impedito nell'attraversare l'opera di presidio PRPS3 lungo l'argine della cassa di espansione dal momento in cui l'opera di presa inizia ad invasare. L'opera di presidio, dotata di paratoia, impedisce la fuoriuscita delle acque invase.

L'elaborato PD_D_PR_12__T_R00 riporta le aree allagabili per intermittenza di scolo del reticolo secondario riferite ai volumi e livelli idrici riportati nella seguente tabella. Per il

tempo di ritorno di 200 anni di durata 36 ore il battente massimo è di 80 cm. Rispetto agli attuali livelli di allagabilità dal fiume Arno, i battenti diminuiscono di almeno 2.7 m per il tempo di ritorno duecentennale e di 1.4 m per quello trentennale. Con il termine “almeno” si fa riferimento al fatto che, come esplicitato al § 4.5, le simulazione idrologico-idrauliche del fiume Arno non tengono conto dei contributi dei bacini soggetti ad intermittenza di scolo.

Tr [anni]	200			30		
durata [ore]	18	24	36	18	24	36
V [mc]	14052	14010	18123	8358	12348	14385
H [m slm]	120.81	120.80	120.92	120.59	120.76	120.81

Tab. 16.3: valori di allagabilità residua nell'area Pian di Rona

Pian della Rugginosa

Il bacino di riferimento corrisponde al codice *bac16Bbasse* dell'elaborato PD_D_PR_06__T_R00. La definizione delle aree di potenziale allagabilità è eseguita attraverso il bilancio degli ingressi, degli scarichi e dei volumi di accumulo che, attraverso la curva d'invaso dell'area di interesse, si traducono in battenti idrici. Dette curve sono state determinate dal rilievo Lidar della Regione Toscana (cluster 1x1 m).

Si assume l'ipotesi che il sistema di drenaggio è impedito nell'attraversare l'opera di presidio OPPN2 lungo l'argine della cassa di espansione dal momento in cui i deflussi che attraversano l'opera di connessione iniziano ad invasare nella cassa. L'opera di presidio, dotata di paratoia, impedisce la fuoriuscita delle acque invase.

In conseguenza della necessità di garantire l'accesso all'argine di cassa anche durante il suo invaso per esigenze di sorveglianza delle opere e per eseguire eventuali interventi di emergenza, è previsto l'utilizzo di una pompa idrovora da 1.2 mc/s di portata e circa 9 m di prevalenza. Questa, nel periodo in cui l'ingresso in cassa del deflusso del bacino *bac16basse* sia impedito dai livelli di invaso, impedirà che il conseguente ristagno interessi la viabilità necessaria a raggiungere l'argine di cassa.

Tr [anni]	200			30		
durata [ore]	18	24	36	18	24	36
V [mc]	5910	1752	0	0	0	0
H [m slm]	119.61	119.36	-	-	-	-

Tab. 16.4: valori di allagabilità residua nell'area Pian della Rugginosa

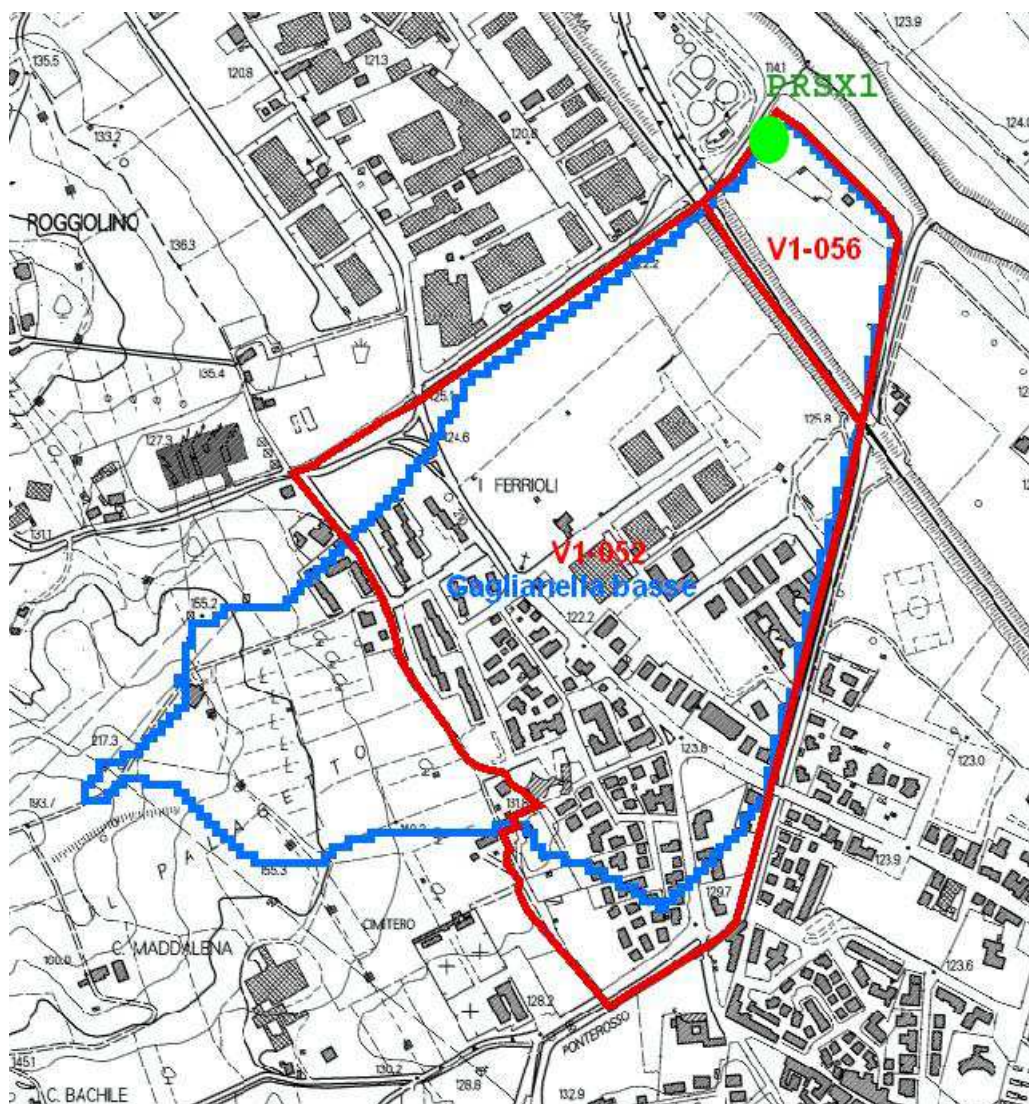


Fig. 16.5: area e bacini relativi all'area I Ferrioli

Si assume l'ipotesi che il sistema di drenaggio è impedito nell'attraversare l'opera di presidio PRSX1 lungo l'argine del fiume Arno quando i livelli di piena di quest'ultimo superano la quota minima del piano campagna (~ 121.35 m s.l.m.). In tale condizione l'affluente non può più incrementare il proprio carico piezometrico per superare quello del ricettore se non andando ad allagare le aree circostanti. L'opera di presidio, dotata di paratoia, impedisce la fuoriuscita delle acque del fiume Arno.

L'elaborato P_D_PPR_12_T_R00 riporta le aree allagabili per intermittenza di scolo del reticolo secondario riferite ai volumi e livelli idrici riportati nella seguente tabella. L'area urbana non è soggetta a pericolo di allagamento. Rispetto agli attuali livelli di allagabilità duecentennale dal fiume Arno, i battenti diminuiscono di almeno 2.2 - 2.7 m in funzione del

tempo di ritorno. Con il termine “almeno” si fa riferimento al fatto che, come esplicitato al § 4.5, le simulazione idrologico-idrauliche del fiume Arno non tengono conto dei contributi dei bacini soggetti ad intermittenza di scolo.

Tr [anni]	200			30		
durata [ore]	18	24	36	18	24	36
V [mc]	43470	54252	69804	15282	20610	23472
H [m s.l.m.]	121.43	121.55	121.70	120.87	121.05	121.12

Tab. 16.5: valori di allagabilità residua nell'area Ferrioli

Lagaccioni

I bacini di riferimento corrispondono ai codici *bac14 basse*, *Lagaccioni basse*, *Tagliafune basse*, *Fornacina basse* e *bac15 basse* dell'elaborato PD_D_PR_06__T_R00. La definizione delle aree di potenziale allagabilità è eseguita attraverso le simulazioni dei borri Lagaccioni, Tagliafune e Fornacina secondo lo schema di moto vario quasi bidimensionale esposto al § 5 e seguenti.

A tal fine sono state acquisite le sezioni topografiche rilevate per la redazione del Piano Strutturale (deposito 2017) del Comune di Figline e Incisa Valdarno del 2015.

Nell'elaborato “Elementi della modellazione idraulica - Stato di progetto” (PD_PR_D_10__T_R00) sono state riportate le tracce delle sezioni utilizzate con il relativo codice numerico, mentre le sezioni sono riportate nell'elaborato PD_D_PR_03__R_R01 con i livelli idrometrici calcolati.

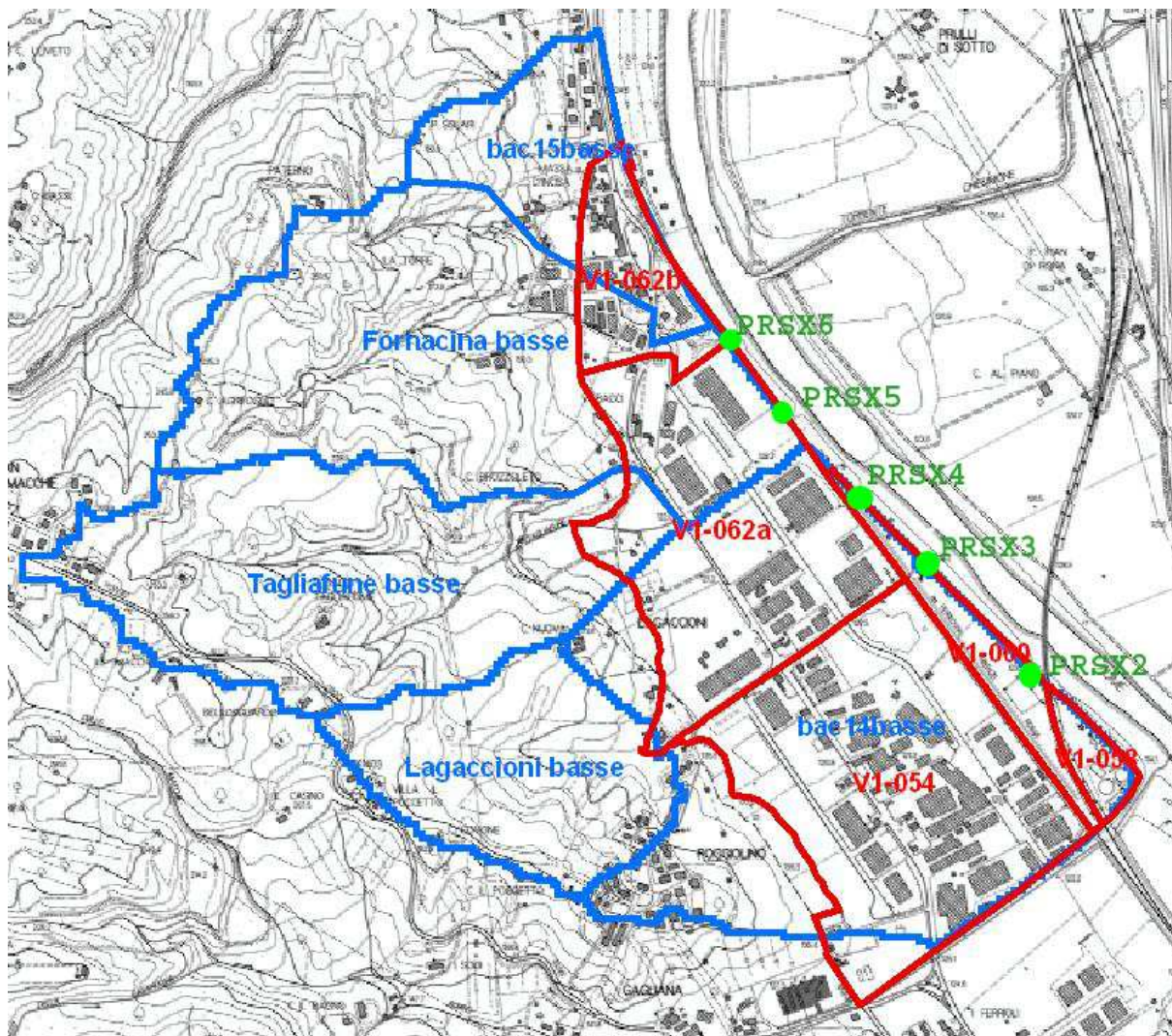


Fig. 16.6: area e bacini relativi all'area Lagaccioni

I coefficienti utilizzati nella modellazione sono $0.03 \text{ s/m}^{1/3}$ di Manning per la resistenza media al moto negli alveo, 0.1 e 0.3 come coefficienti di contrazione ed espansione per modeste variazioni di sezione 0.3 e 0.5 per variazioni più brusche, 0.12 come coefficiente di efflusso nella formula di stramazzo in parete grassa con cui sono simulate le connessione tra le aree di potenziale esondazione. Quest'ultime sono discretizzate con una curva d'invaso ricavata dal rilievo Lidar 1x1 m.

Come condizione al contorno di valle è stato assunto l'idrogramma dei livelli di progetto del fiume Arno che condiziona l'apertura e la chiusura delle paratoie delle opere di presidio PRSX2, PRSX3, PRSX4, PRSX5, PRSX6.

E' assunta l'ipotesi che gli afflussi dei bacini "bac14basse" e "bac15_basse", afferenti al sistema fognario, non possano essere sfiorate con i propri scolmatori nei corpi idrici superficiali in piena. In altri termini il sistema fognario può ricevere liberamente le portate di

detti bacini finché il livello del fiume Arno alle sezioni 799.01 e 798, ove si presume siano localizzati gli scolmatori, non raggiungono 119.6 m s.l.m. (1 metro inferiore a quella media del piano campagna), quota oltre la quale è stato considerato che gli afflussi ristagnano totalmente nell'area di Lagaccioni.

Gli elaborati PD_D_PR_03__T_R01 e PD_D_PR_12__T_R00 riportano rispettivamente i risultati delle simulazioni e le aree allagabili per intermittenza di scolo del reticolo secondario. La sintesi dei volumi e dei livelli idrici sono riportati nella seguente tabella.

Per il borro Lagaccioni si rileva che la quota d'imbocco del tombamento è tale da contenere il rigurgito del fiume. Pertanto, nell'ipotesi che lo stesso sia stagno, non si avrebbe intermittenza di scolo per il bacino “Lagaccioni basse”.

Per il tempo di ritorno di 200 anni di durata 36 ore il battente massimo nell'area urbana 0.75 m. Rispetto agli attuali livelli di piena del fiume Arno, i battenti diminuiscono di almeno 2.25 m. Con il termine “almeno” si fa riferimento al fatto che, come esplicitato al § 4.5, le simulazione idrologico-idrauliche del fiume Arno non tengono conto dei contributi dei bacini soggetti ad intermittenza di scolo.

Tr [anni]	200			30		
durata [ore]	18	24	36	18	24	36
V [mc]	163070	187780	227050	36520	45000	41560
H [m slm]	121.32	121.38	121.48	120.86	120.92	120.95

Tab. 16.6: valori di allagabilità residua nell'area Lagaccioni

Incisa

I bacini di riferimento corrispondono ai codici *Bagnoli*, e *bac17 basse* dell'elaborato PD_D_PR_06__T_R00. La definizione delle aree di potenziale allagabilità è eseguita attraverso le simulazioni del fosso Bagnoli in analogia a quanto descritto nel paragrafo precedente. Le sezioni del corso d'acqua sono quelle utilizzate per la redazione del Piano Strutturale (deposito 2017) del Comune di Figline e Incisa Valdarno del 2015.

Nell'elaborato “Elementi della modellazione idraulica – Stato di progetto” (PD_PR_D_10__T_R00) sono state riportate le tracce delle sezioni utilizzate con il relativo codice numerico, mentre le sezioni e i risultati numerici sono riportate nell'elaborato PP_D_PR_03__R_R01; l'elaborato PP_D_PR_12__T_R00 mostra le aree allagabili ipotizzando che gli afflussi del bacino “*bac17basse*”, afferenti al sistema fognario, non possano essere

sfiorate con scolmatori nei corpi idrici superficiali in piena. In altri termini il sistema fognario può ricevere liberamente le portate di detto bacino finché il livello del fiume Arno presso il ponte della SR 69 non raggiunge 118.0 m s.l.m. (1 metro inferiore a quella media del piano campagna), quota oltre la quale è stato considerato che gli afflussi ristagnano totalmente nell'abitato di Incisa. Si rileva inoltre che la quota d'imbocco del tombamento del borro è tale da contenere il rigurgito del fiume. Pertanto, nell'ipotesi che lo stesso sia stagno, non si avrebbe intermittenza di scolo per il bacino "Bagnoli".

La sintesi dei volumi e dei livelli idrici sono riportati nella seguente tabella.

Per il tempo di ritorno di 200 anni di durata 36 ore il battente massimo nell'area di via Olimpia è di 1.2 m. Rispetto agli attuali livelli di allagabilità dal fiume Arno, i battenti diminuiscono di circa 0.6 m per l'evento trentennale e 2.6 m per quello duecentennale.

Tr [anni]	200			30		
durata [ore]	18	24	36	18	24	36
V [mc]	41440	49750	67390	14250	19450	22580
H [m slm]	119.72	119.82	120.03	119.23	119.35	119.42

Tab. 16.7: valori di allagabilità residua nell'area Incisa

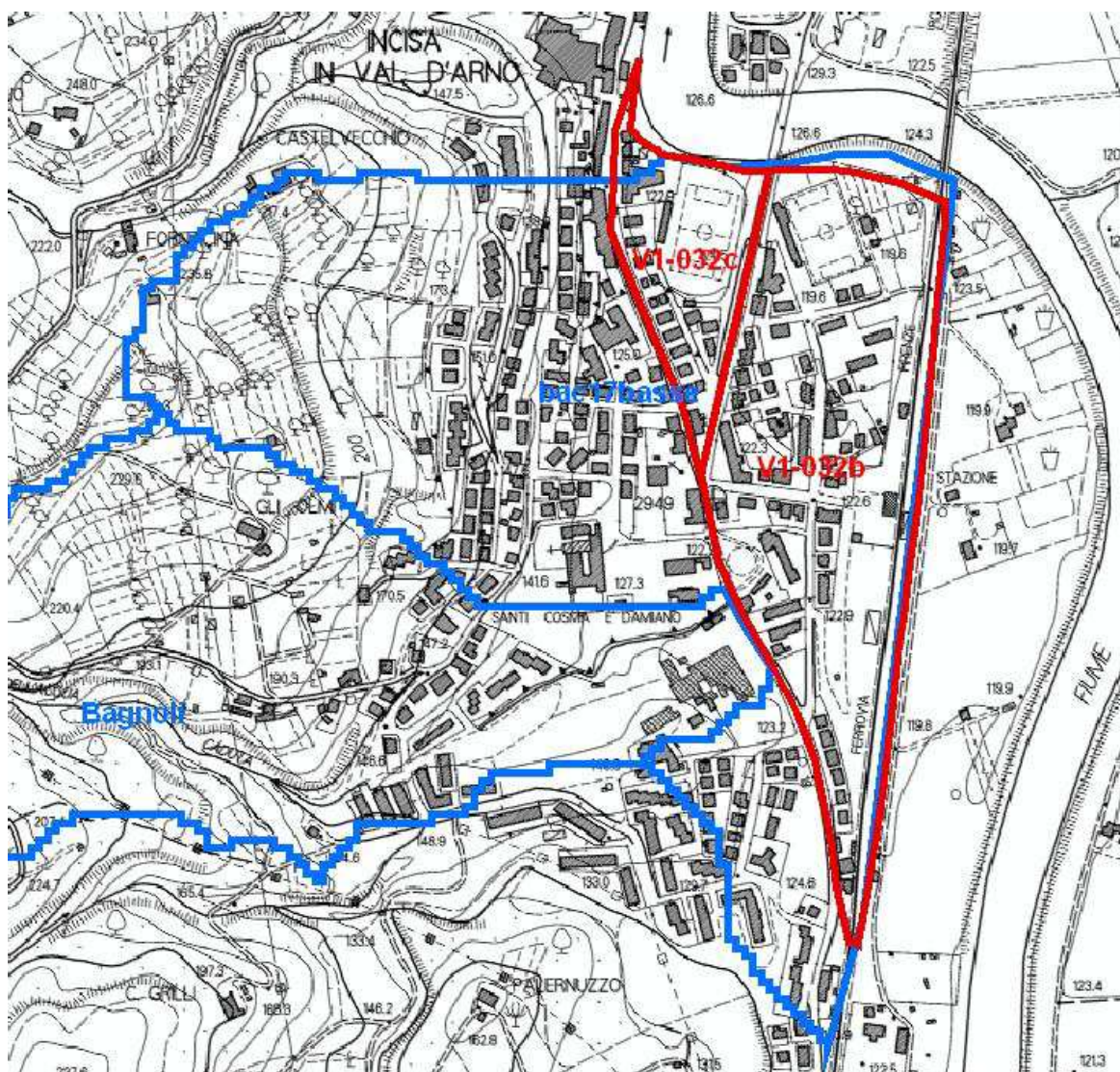


Fig. 16.7: area e bacini relativi all'area Incisa

17 CONCLUSIONI

Gli studi idraulici hanno dimostrato la capacità di laminazione delle opere in progetto per la riduzione del rischio a scala locale e territoriale. Hanno inoltre messo in evidenza che, con riferimento al tempo di ritorno duecentennale, le nuove arginature (quelle di cassa e quelle complementari) produrrebbero un aumento della pericolosità lungo il fiume Arno e i suoi affluenti a monte della confluenza del torrente Chiesimone, se non si fosse previsto il rialzamento degli argini sinistri e destri; l'aumento dei livelli si registra fino all'opera di presa della cassa Pizziconi. Se sulla sponda sinistra gli argini di detta cassa e le chiusure idrauliche nel tratto di rigurgito del torrente Resco completate, il progetto delle opere in destra (cassa d'espansione Restone, adeguamento dell'argine di Figline e di quello destro del torrente Ponterosso nel tratto di rigurgito) sono in corso di redazione. Soltanto l'adeguamento degli argini lungo il torrente Cesto è in corso di esecuzione. Data per scontata la necessità di coordinare le analisi idrauliche del presente progetto con quello della cassa Restone, risulta anche indispensabile definire, nelle successive fasi attuative, un cronoprogramma congiunto delle singole fasi esecutive affinché non si determini un temporaneo aggravio del rischio. Ad ogni buon conto si dà atto che per il tempo di ritorno trentennale, il profilo idrico dello stato di progetto è sempre inferiore a quello attuale.

Le modellazioni idrauliche condotte hanno fatto riferimento a scenari meteorologici teorici, ma gli organi mobili di regolazione dell'opera di presa possono permettere una efficace laminazione delle piene anche per eventi reali, la cui variabilità è imprevedibile a lungo termine. Nel breve e brevissimo termine, al contrario, i sistemi di monitoraggio e previsione pluviometrica ed idrometrica della Regione Toscana costituiscono un fondamentale elemento per definire le più opportune modalità di gestione delle casse in fase di evento: nel quadro di un protocollo generale di gestione delle paratoie, da redigere prima dell'entrata in esercizio della cassa, le manovre delle stesse dovranno essere fatte in funzione delle misure idrometriche in corso d'evento e delle loro previsioni. In tal senso appare fondamentale l'accoppiamento dei modelli idrologici previsionali e di quello idraulico del fiume Arno e delle casse d'espansione.

Si ritiene inoltre necessaria l'installazione di alcuni idrometri lungo il fiume Sieve e presso le casse d'espansione. Infatti, se nel bacino del fiume Arno le misure delle stazioni

idrometriche di Subbiano, Ponte della Ferrovia sul Canale Maestro della Chiana, La Penna e Levane (scarichi delle dighe), Montevarchi, Incisa e Rosano permettono un monitoraggio sufficiente della formazione e propagazione della piena nel tratto di interesse, lungo il fiume Sieve, il cui idrogramma atteso alla foce è elemento fondamentale da considerare nella gestione delle casce, gli idrometri di Bilancino e Fornacina dovrebbero essere integrati con quelli di Borgo San Lorenzo e Dicomano. Infine l'installazione di strumenti di misura presso le opere di presa e all'interno delle casce permetteranno di monitorare le portate defluite a valle e la capacità residua d'invaso.

In altri termini: fissata una portata limite all'idrometro di Rosano come valore massimo da far transitare verso Firenze, con un robusto sistema di monitoraggio idrometrico dei fiumi Arno e Sieve e un affidabile modello previsionale devono essere stimati con un anticipo di almeno qualche ora gli scenari idrologici attesi: quello sul bacino del fiume Arno e quello sul fiume Sieve. In merito all'anticipo necessario, va tenuto conto che mediamente l'onda di piena impiega circa 2.5 ore a percorrere il tratto tra la cassa Restone (quella più a monte) e l'idrometro di Rosano e 1 ora tra la cassa Leccio (quella più a valle) e lo stesso idrometro. Pertanto gli effetti delle manovre delle casce di espansione potranno essere verificati a Rosano soltanto dopo detti intervalli temporali.

Qualora le portate previste a Rosano superino il valore limite, il modello idraulico del fiume e delle casce di espansione, cimentato con gli scenari idrologici previsti, ovvero un modello di funzionamento delle casce più speditivo, definisce le modalità di manovra delle paratoie e le portate da sfiorare, tenendo conto del limite di portata fissato a Rosano, della celerità dell'onda di piena e della capacità d'invaso delle casce in relazione ai volumi di piena previsti.

Bibliografia

- [1] **Lotti**, Progetto pilota per la sistemazione del bacino dell'Arno, Regione Toscana, Firenze, 1978.
- [2] **Autorità di Bacino del Fiume Arno**, Piano di Bacino del Fiume Arno, Rischio idraulico, Sintesi del Progetto di Piano Stralcio, 5, luglio 1996.
- [3] **Autorità di Bacino del F. Arno**, Perimetrazione delle aree a rischio sull'asta principale del fiume Arno e sugli affluenti nel tratto di rigurgito, Firenze, 1999.
- [4] **Autorità di Bacino del Fiume Arno**, Linee guida per la progettazione delle casce di laminazione, 2000.
- [5] **Autorità di Bacino del Fiume Arno**, Progetto di Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI), Firenze, Maggio 2002.
- [6] **Autorità di Distretto Appennino Settentrionale**, Piano di Gestione del Rischio di Alluvione, Firenze, 2015.
- [7] **PIN-Centro Studi Ingegneria Prato**, Regionalizzazione delle portate di piena in Toscana, Regione Toscana, 1998.
- [8] **PIN-Centro Studi Ingegneria Prato**, Aggiornamento e sviluppo del sistema di regionalizzazione delle portate di piena in Toscana, Regione Toscana, 2003.
- [9] **Caporali e al.**, Analisi di frequenza regionale di precipitazioni estreme, Regione Toscana, 2014
- [10] **Chow V.T.**, Open Channel Hydraulics, McGraw Hill, New York, 1959.
- [11] **Marchi - Rubatta**, Meccanica dei fluidi - Principi e applicazioni idrauliche, UTET, 1981.
- [12] **Rossi e Salvi**, Manuale dell'Ingegnere Civile, Zanichelli, 1996.
- [13] **Maione**, Le piene fluviali, La Goliardica Pavese, Pavia, 1995.
- [14] **Da Deppo, Datei, Saladin**, Sistemazione dei corsi d'acqua, Libreria Cortina, Padova, 2000.
- [15] **Giugni**, Il progetto delle opere idrauliche a servizio delle casce di espansione, Atti del corso di aggiornamento 2-6 ottobre 2000 del Politecnico di Milano, 2000.
- [16] **Maione e Al.**, Idrogrammi sintetici per il progetto di opere di difesa idraulica del territorio, Atti del XXVII convegno di idraulica e costruzioni idrauliche, Genova 2000.
- [17] **Maione e Al.**, Una metodologia di stima indiretta degli idrogrammi sintetici per il progetto di opere di difesa idraulica del territorio", Atti del corso di aggiornamento 2-6 ottobre 2000 del Politecnico di Milano, 2000.

- [18] **Castelli, Ginanni e al.**, Studio su modello fisico dell'officiosità idraulica del fiume Arno in prossimità dell'abitato di Incisa Valdarno, Università degli Studi di Firenze per Provveditorato Regionale alle OO.PP. per la Toscana, 2001.
- [19] **Paris**, Rischio idraulico: interventi per la protezione del territorio - Le casse di espansione, CISM, 2004.
- [20] **Artina e Al.**, Studio su modello fisico del comportamento di un culvert e di uno sfioratore laterale quali opere di scarico e di presa di una cassa di espansione, L'Acqua 1/2004.
- [21] **Le scale di risalita per la tutela del patrimonio ittico**, Enrico Pini Prato, 2008.
- [22] **Hydrologic Engineering Center**, HEC-RAS: River Analysis System, User's Manual, Version 4.1, U.S. Army Corps of Engineering, 2001.
- [23] **Hydrologic Engineering Center**, HEC-RAS: River Analysis System , Hydraulic Reference Manual, Version 4.1, U.S. Army Corps of Engineering, 2001.
- [24] **Hydrologic Engineering Center**, HEC-HMS: Hydrologic Modelling System, User's Manual, Version 4.2, U.S. Army Corps of Engineering, 2016.
- [25] **Hydrologic Engineering Center**, HEC-HMS: Hydrologic Modelling System, Technical Reference Manual, U.S. Army Corps of Engineering, 2000.
- [26] **Hydrologic Engineering Center**, HEC-RAS: River Analysis System, User's Manual, Version 5.0, U.S. Army Corps of Engineering, 2016.
- [27] **Hydrologic Engineering Center**, HEC-RAS: River Analysis System, 2D Modeling User's Manual, Version 5.0, U.S. Army Corps of Engineering, 2016.
- [28] **Hydrologic Engineering Center**, HEC-RAS: River Analysis System , Hydraulic Reference Manual, Version 5.0, U.S. Army Corps of Engineering, 2016.
- [29] **Progetto preliminare I stralcio III lotto Cassa Restone**, Comune di Figline e Incisa Valdarno, 2009.
- [30] **Progetto esecutivo I stralcio I lotto Cassa di espansione Pizziconi e sistemazione del reticolo idraulico di pertinenza**, Comune di Figline Valdarno, 2009.
- [31] **Progetto preliminare II stralcio Casse di espansione Prulli e Leccio**, Comune di Figline Valdarno, 2011.
- [32] **Progetto esecutivo I stralcio II lotto Cassa Pizziconi**, Commissario ex D.L. 91/2014, 2016.
- [33] **Progetto esecutivo Casse di espansione di Figline lotto Leccio e lotto Prulli I stralcio**, Commissario di Governo, 2016.

- [34] **Progetto esecutivo Cassa d'espansione Restone e sistemazione del reticolo idraulico di pertinenza I stralcio**, Commissario di Governo, 2016.
- [35] **Studio per gli effetti sulla laminazione delle piene del sovrizzo della diga di Levane**, Provincia di Arezzo, 2009.
- [36] **Progetto per la riduzione del rischio idraulico. Sopralzo della diga di Levane ai fini di laminazione**, Enel, 2015.
- [37] **Valutazione di aspetti idrologici e idraulici inerenti al progetto di sopralzo della diga di Levane**, Università di Firenze, 2018.
- [38] **Serbatoio di Bilancino sul fiume Sieve - Progetto esecutivo - Relazione idrologica**, Consorzio per le risorse idriche Schema 23, 1982.
- [39] **Studio del rischio idraulico nel bacino del torrente Carza e valutazione degli effetti dell'invaso di Bilancino sulle piene del fiume Sieve**, Tesi Benvenuti A., 1997.
- [40] **Studio sulla gestione dell'invaso di Bilancino ai fini della laminazione delle piene**, Paris, Montefusco, 1999.
- [41] **Valutazione del rischio idraulico del fiume Sieve a Rufina: effetti dell'invaso di Bilancino e delle casce di espansione**, Tesi Martelli F., 2001.
- [42] **Modellazione idrologico idraulica del bacino del fiume, di supporto alle verifiche di area vasta di cui al Piano di Bacino del fiume Arno - Stralcio Rischio Idraulico - da realizzarsi sul tratto compreso tra la diga di Bilancino e lo sbocco in Arno**, Provincia di Firenze, 2007.
- [43] **Casse di espansione sul fiume Sieve in loc. Scopeti nei Comuni di Pontassieve e Rufina - Progetto preliminare**, Comune di Rufina,
- [44] **Piano di laminazione per l'invaso di Bilancino**, Regione Toscana, 2018.