

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE



DIREZIONE PROGETTAZIONE

S.O. IDRAULICA

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA

LINEA PISA – COLLESALVETTI - VADA

Collegamento dell'Interporto di Guasticce con la linea Pisa-Vada ed interconnessione della linea Pisa-Vada con la linea Firenze-Pisa

Interconnessione della linea Pisa – Vada con la linea Firenze-Pisa

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idrologica e idraulica - Fosso Torale e Fosso Zambrigiana

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

N F 0 Q 0 2 F 1 1 R I I D 0 0 0 2 0 0 1 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione definitiva	C. Cesali 	Luglio 2023	F. Cabas 	Luglio 2023	D. Gambino 	Luglio 2023	F. Cabas Luglio 2023

File: NF0Q02F11RIID0002001A

n. Elab.:

INDICE

1. PREMESSA	4
1.1 RIFERIMENTI NORMATIVI.....	5
2. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO.....	7
3. STUDIO IDROLOGICO.....	9
3.1 DATI IDROLOGICI ESISTENTI DISPONIBILI	9
3.2 FOSSO TORALE: DETERMINAZIONE DELL'IDROGRAMMA DI PIENA DI PROGETTO.....	17
4. STUDIO IDRAULICO.....	20
4.1 PERICOLOSITÀ IDRAULICA NELL'AREA DI INTERVENTO	20
4.2 DATI DI BASE	27
4.3 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO NUMERICO BIDIMENSIONALE	28
4.3.1 MODELLAZIONE BIDIMENSIONALE	28
4.3.2 GEOMETRIA DEL MODELLO	30
4.3.3 SCABREZZE.....	32
4.3.4 CONDIZIONI AL CONTORNO	33
4.3.5 SCENARI SIMULATI.....	33
4.4 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	34
4.4.1 SCENARIO ANTE OPERAM	34
4.4.2 SCENARIO POST OPERAM.....	35
4.5 VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO DI PROGETTO	39
5. VALUTAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA DELLE OPERE IN PROGETTO	40
6. BIBLIOGRAFIA	41

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA PISA – COLLESALVETTI - VADA Collegamento dell'Interporto di Guasticce con la linea Pisa-Vada ed interconnessione della linea Pisa-Vada con la linea Firenze-Pisa Interconnessione della linea Pisa – Vada con la linea Firenze-Pisa PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
	RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA	COMMESSA NF0Q	LOTTO 02 F 11	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1 – Inquadramento territoriale dell'area di intervento (indicazione dell'area di studio di cui alla presente relazione).	7
Fig. 2 – Principali interferenze idrauliche nel tratto da progr. 0+550 a progr. 1+550.	8
Fig. 3 – Principali bacini e interbacini di riferimento (fonte: Studio idrologico e idraulico a supporto del Regolamento urbanistico” del Comune di Cascina - Pisa).	10
Fig. 4 – Costruzione del modello idrologico del Fosso Torale in HEC HMS.	18
Fig. 5 – Fosso Torale: idrogramma di piena di progetto (Tr = 200 anni).	19
Fig. 6 – Pericolosità idraulica nell'area di intervento (PGRA – Appennino Settentrionale).	21
Fig. 7 – Rilievo 3D e sezioni batimetriche dell'alveo dei corsi d'acqua oggetto di studio.	27
Fig. 8 – Modello numerico 2D del Fosso Torale: estensione del dominio di calcolo e condizioni al contorno.	31
Fig. 9 – Modello numerico 2D: implementazione delle opere di attraversamento in InfoWorks ICM.	32
Fig. 10 – Modello numerico 2D, Fosso Torale: aree potenzialmente inondabili, Tr200, ante operam.	34
Fig. 11 – Stralcio della planimetria di progetto nell'area di studio.	36
Fig. 12 – Stralcio del prospetto del viadotto VI05 in corrispondenza dell'attraversamento dei fossi Torale e Zambrigliana.	37
Fig. 13 – Modello numerico 2D, Fosso Torale: aree potenzialmente inondabili, Tr200, post operam.	38
Fig. 14 – Prospetto del viadotto VI05 con livelli idrici di riferimento (Tr200) e riprofilature dell'alveo in progetto.	39

INDICE DELLE TABELLE

Tab. 1 – Modello idrologico del Fosso Torale: caratteristiche dei tratti fluviali.	18
Tab. 2 – Classi di pericolosità idraulica (P.G.R.A. - Distretto Idrografico dell'Appennino Settentrionale).	20
Tab. 3 – Viadotto VI05: verifica del franco idraulico di progetto.	39

1. **PREMESSA**

Il presente elaborato è parte integrante del Progetto di Fattibilità Tecnico Economica riguardante i due collegamenti ferroviari di seguito elencati:

- a. Collegamento dell'Interporto di Guasticce alla linea Pisa-Vada (via Collesalvetti)
- b. Bretella di collegamento tra la linea Collesalvetti-Vada e la linea Firenze-Pisa (by pass di Pisa)

Tali interventi si collocano nel più ampio perimetro dell'Accordo per la realizzazione dei collegamenti ferroviari del porto di Livorno con il corridoio TEN-T Scandinavo – Mediterraneo” sottoscritto da Regione Toscana, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Rete Ferroviaria Italiana Spa, Autorità di Sistema Portuale del mar Tirreno Settentrionale e Interporto Toscano Amerigo Vespucci Spa in data 23 Aprile 2018.

Oggetto dell'Accordo sono gli interventi per il potenziamento dei raccordi ferroviari per il trasporto merci del Porto di Livorno quali:

- 1) la Progettazione esecutiva e la realizzazione del collegamento porto-interporto di Livorno tramite scavalco ferroviario;
- 2) il Progetto di fattibilità tecnica ed economica del collegamento ferroviario fra l'interporto di Guasticce, la linea Pisa-Collesalvetti-Vada e la linea Pisa-Firenze tramite bypass di Pisa, valutando più alternative progettuali, nel quadro del Contratto di Programma RFI-MIT 2017-2021 parte Investimenti;
- 3) l'intervento di adeguamento a sagoma della linea ferroviaria Prato-Bologna, volta a consentire ai porti del sistema “Livorno- Piombino” di raggiungere le aree logistiche, produttive e di consumo del Centro Nord-Italia, i valichi del Brennero e del Gottardo ed i mercati dell'Europa Centro Orientale, con particolare riferimento al traffico container high cube e autostrada viaggiante;
- 4) l'upgrade dei collegamenti ferroviari con il porto di Piombino.

Il presente studio si riferisce all'intervento di cui al precedente punto 2, e nello specifico al punto b) anzidetto, ossia al tratto denominato “Bypass di Pisa”, che si stacca dalla Pisa – Collesalvetti – Vada, nella zona a Nord della località il Faldo e, bypassando la stazione e l'abitato di Pisa, si riconnette alla Pisa – Firenze in prossimità della stazione di Navacchio.

Da un punto di vista idrologico-idraulico, la tratta ferroviaria in progetto (By Pass di Pisa) si sviluppa in una area caratterizzata dalla presenza dello *Scolmatore del Fiume Arno* e da una fitta rete di canali, molti dei quali a scolo meccanizzato, che recapitano in esso a gravità o tramite impianti idrovori.

	LINEA PISA – COLLESALVETTI - VADA Collegamento dell'Interporto di Guasticce con la linea Pisa-Vada ed interconnessione della linea Pisa-Vada con la linea Firenze-Pisa Interconnessione della linea Pisa – Vada con la linea Firenze-Pisa PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
	RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA	COMMESSA NF0Q	LOTTO 02 F 11	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A

Alla progressiva 1+150, il By Pass di Pisa interferisce con due canali con sviluppo adiacente, *Fosso Torale e Fosso Zambrigliana*.

Nella presente relazione è descritto in dettaglio lo studio idrologico condotto ai fini della determinazione delle portate di riferimento ai fini della verifica di compatibilità idraulica dell'opera di attraversamento prevista, ossia il viadotto denominato VI05.

Nello specifico, lo studio idrologico sviluppato considera come riferimento generale lo “*Studio idrologico e idraulico a supporto del Regolamento urbanistico*” del Comune di Cascina (Pisa).

Determinate le portate di progetto (tempo di ritorno di 200 anni), si è proceduto all'implementazione di un modello numerico bidimensionale, 2D (in regime di moto vario), finalizzato alla simulazione del comportamento *ante operam* e *post operam* dei corsi d'acqua attraversati e alla verifica di compatibilità idraulica della nuova opera di attraversamento, nel rispetto di quanto indicato nelle normative nazionali di riferimento (i.e. NTC2018) nonché nel *PIANO DI GESTIONE DEL RISCHIO ALLUVIONI* redatto dall'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale (Il ciclo di pianificazione, approvato e adottato con delibera della Conferenza Istituzionale Permanente (CIP) n. 26 del 20 dicembre 2021).

1.1 Riferimenti normativi

I principali riferimenti normativi per il presente progetto sono rappresentati dai seguenti strumenti di pianificazione:

- *Regio Decreto del 08/05/1904, n.368*
- *Regio Decreto del 25/07/1904 n.523*
- *Legge n. 183/1989, “Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo”*
- *D.M. del 14 febbraio 1997 “Direttive tecniche per l'individuazione e perimetrazione da parte delle Regioni a rischio idraulico”*
- *D.L. n. 180/1998 (Decreto Sarno)*
- *Legge n. 365/2000 “Conversione in legge, con modificazioni, del decreto legge 12 ottobre 2000, n. 279, recante interventi urgenti per le aree a rischio idrogeologico molto elevato ed in materia di protezione civile” (Legge Soverato)*
- *Direttiva Quadro Acque 2000/60/CE*
- *D.Lgs. n. 152/2006 “Norma in materia ambientale”*

- *L.R. Toscana n. 20/2006, “Norme per la tutela delle acque dall’inquinamento”*
- *DPGR Toscana 8 settembre 2008, n. 46/R, “Regolamento di attuazione della Legge Regionale 31 maggio 2006 - Norme per la tutela delle acque dall’inquinamento”*
- *D.Lgs. n. 49/2010 “Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi alluvioni”*
- *Piano Stralcio per l’Assetto Idrogeologico (P.S.A.I.) - Rischio Alluvioni - dell’ex Autorità di Bacino del Fiume Arno e relative Norme Tecniche di Attuazione*
- *Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (P.G.R.A.) del Distretto Idrografico dell’Appennino Settentrionale (Il ciclo di pianificazione, agg. Dicembre 2021) e relative Norme di Disciplina di Piano (Giugno 2015)*
- *Nuove Norme Tecniche delle Costruzioni (NTC2018)*
- *Circolare del 21 gennaio 2019, n.7 del C.S.LL.PP., esplicativa delle NTC 2018*
- *Manuale di Progettazione delle opere ferroviarie (RFI, 2020)*
- *Piano Operativo Comune di Arezzo e relative Norme Tecniche di Attuazione (DCC n.134/2021)*
- *Piano di tutela delle acque anno 2017 della Regione Toscana*
- *Legge regionale 24 luglio 2018, n. 41 “Disposizioni in materia di rischio di alluvioni e di tutela dei corsi d’acqua in attuazione del decreto legislativo 23 febbraio 2010, n. 49 (Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni)”*

2. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

La “nuova” tratta ferroviaria denominata “Bypass di Pisa” si stacca dalla linea Pisa – Collesalvetti – Vada, nella zona a Nord della località il Faldo e, bypassando la stazione e l’abitato di Pisa, si riconnette alla Pisa – Firenze in prossimità della stazione di Navacchio.

In corrispondenza delle progressive 0+550.00, 1+150.00, 1+550.00, la linea ferroviaria in progetto interferisce con alcuni canali appartenenti/afferenti al bacino del Fosso Torale; in particolare, alla progr. 0+550.00, il Fossetto delle Sedici; alla progr. 1+150.00, il Fosso Torale stesso in adiacenza al Fosso Zambrigiana; alla progr. 1+550.00, il Fosso della Mattinga (affluente in destra idraulica del Fosso Zambrigiana).

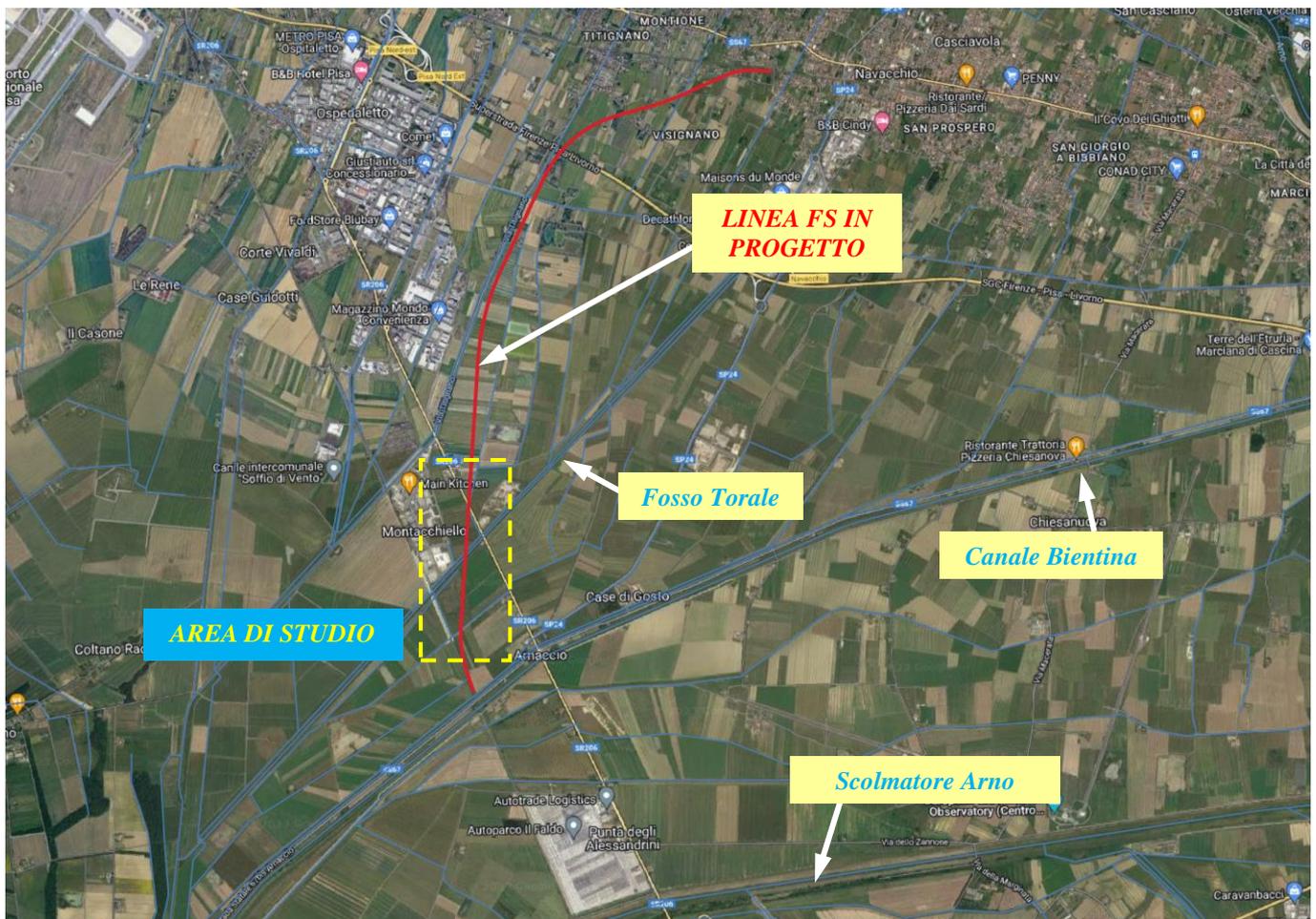


Fig. 1 – Inquadramento territoriale dell’area di intervento (indicazione dell’area di studio di cui alla presente relazione).

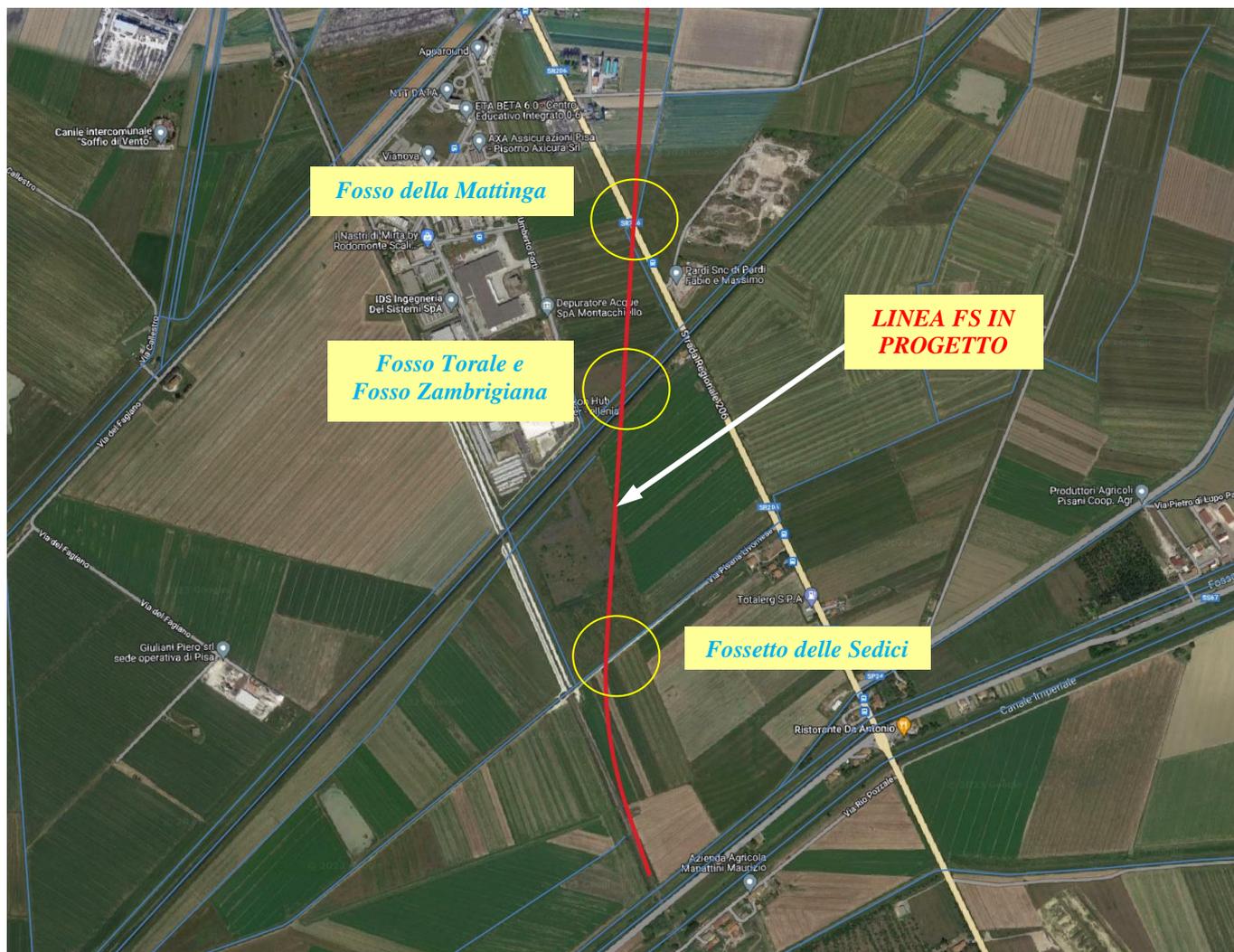


Fig. 2 – Principali interferenze idrauliche nel tratto da progr. 0+550 a progr. 1+550.

Si è proceduto pertanto alla determinazione delle relative portate di riferimento ai fini della verifica idraulica delle corrispondenti opere di attraversamento in progetto.

	LINEA PISA – COLLESALVETTI - VADA Collegamento dell'Interporto di Guasticce con la linea Pisa-Vada ed interconnessione della linea Pisa-Vada con la linea Firenze-Pisa Interconnessione della linea Pisa – Vada con la linea Firenze-Pisa PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
	RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA	COMMESSA NF0Q	LOTTO 02 F 11	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A

3. STUDIO IDROLOGICO

3.1 Dati idrologici esistenti disponibili

Come premesso, lo studio idrologico sviluppato considera come riferimento generale lo “*Studio idrologico e idraulico a supporto del Regolamento urbanistico*” del Comune di Cascina (Pisa).

Il territorio comunale è delimitato a nord dal corso del fiume Arno e a sud dal Canale Scolmatore dell'Arno, definendo una geometria a ventaglio che si apre verso l'area costiera della pianura di Pisa. All'interno della porzione di territorio delineata da queste due importanti direttrici fluviali (Arno e Scolmatore) si sviluppa una fitta rete di canali artificiali responsabile delle maggiori criticità idrauliche del territorio cascianese. L'area oggetto di intervento è caratterizzata da un reticolo idraulico che si articola in canali, fossi e fosse campestri, in parte tra loro comunicanti. I canali rientrano nel bacino di bonifica dell'Arnaccio. Il sistema a “scolo naturale” (o di “acque alte”) smaltisce le acque meteoriche che provengono da zone morfologicamente più alte (zone di collina e dei Monti Pisani per il settore a Nord dell'Arno e le acque della piana di Cascina per la parte a Sud dell'Arno). Il sistema a “scolo meccanico” (o di “acque basse”) smaltisce, attraverso un prosciugamento per esaurimento meccanico con sollevamento all'impianto idrovoro, le acque meteoriche che ristagnano nelle parti del territorio morfologicamente più depresse, comprese le acque di falda che, localmente, sgorgano direttamente dal terreno. Sia le acque a scolo naturale che quelle a scolo meccanico vengono immesse (le prime per deflusso naturale, le seconde per sollevamento meccanico) in canali ricettori, posti ad una quota intermedia tra il sistema di “acque alte” e quello di “acque basse”, detti appunto di “acque medie”.

Le principali interferenze individuate nel capitolo precedente, oggetto di studio nell'ambito del presente elaborato, appartengono al reticolo idraulico appena descritto.

L'analisi idrologica è stata elaborata utilizzando i risultati della modellistica idrologica dello studio di riferimento.

Nella figura seguente, sono riportati i sottobacini e gli interbacini analizzati nello studio del Comune di Cascina.

Nello specifico, il bacino del Fossetto delle Sedici è quello con identificativo “16”; quello del Fosso della Mattinga/Zambrigiana, con identificativo “17”; il bacino del Fosso Torale, alla sezione di chiusura in corrispondenza del nuovo attraversamento, è costituito invece dalla somma dei sottobacini con identificativo 1, 2, 3, 4.

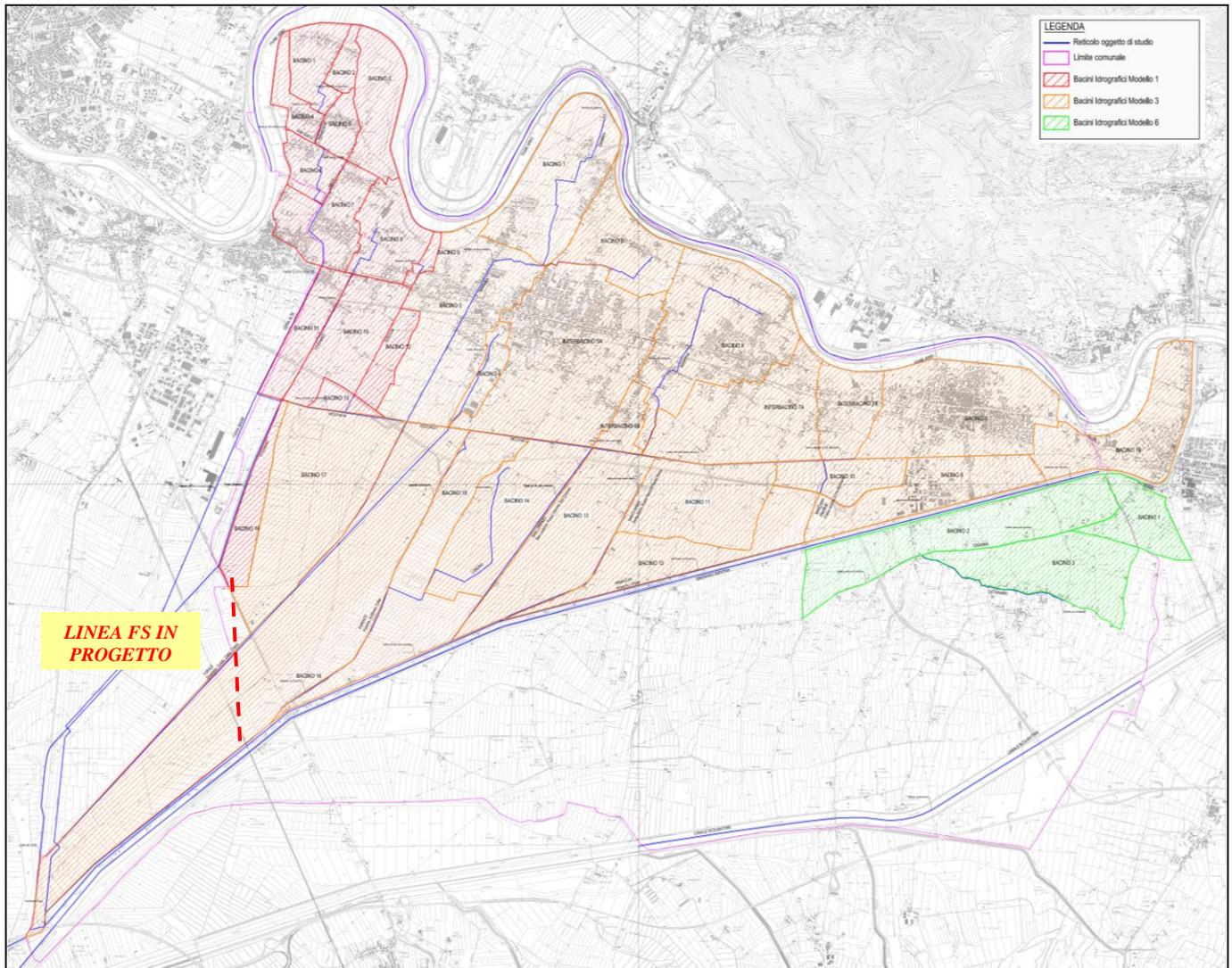


Fig. 3 – Principali bacini e interbacini di riferimento (fonte: Studio idrologico e idraulico a supporto del Regolamento urbanistico” del Comune di Cascina - Pisa).

Nelle figure seguenti, per i sottobacini di riferimento individuati, si riportano i parametri geomorfologici e pluviometrici nonché i corrispondenti idrogrammi di piena, per differenti durate critiche e differenti tempi di ritorno.

Fossetto delle Sedici

Bacino 16

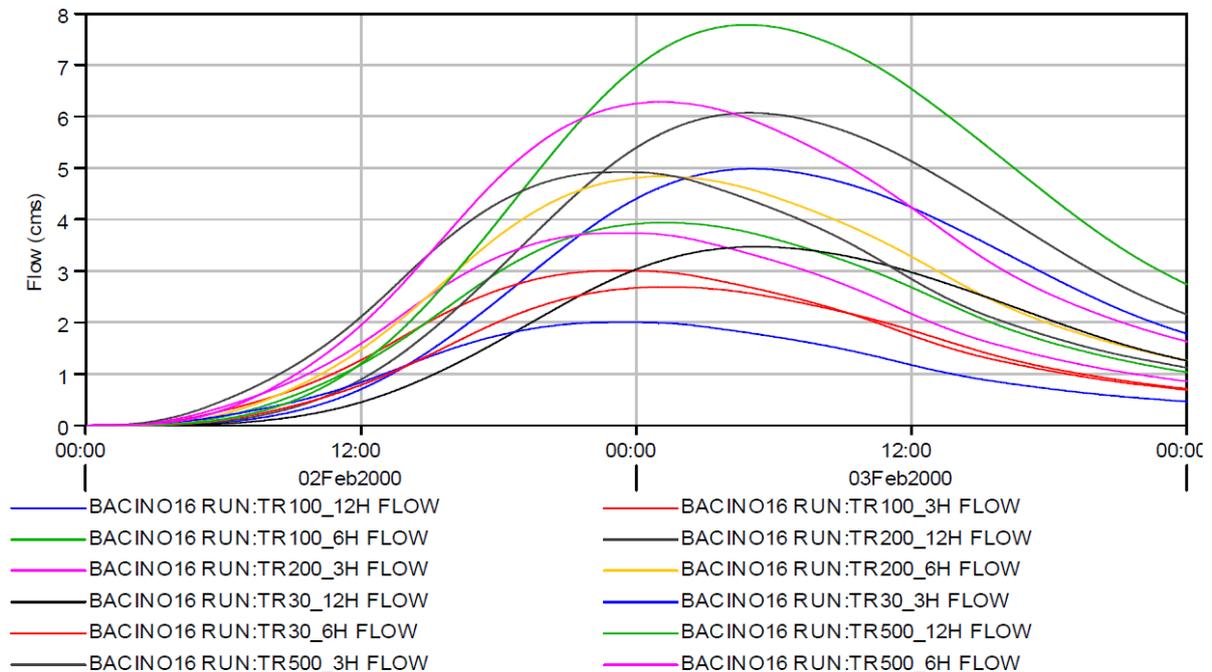
Parametri geomorfologici:

A	Hmax	Hmin	H	L	CN	tc
[kmq]	[m slm]	[m slm]	[m slm]	[km]	[-]	[h]
5.78	2.20	1.70	0.50	7.10	87	35.83

Parametri pluviometrici:

Stazione	Codice	A	N	M
Asciano	530	31.572	0.259	0.205
Coltano	1830	29.665	0.256	0.201
Pisa (fac. Agraria)	540	32.289	0.256	0.212
S. Giovanni alla Vena	1790	27.278	0.269	0.19

Idrogrammi di piena:



Fosso della Mattinga/Zambrigliana

Bacino 17

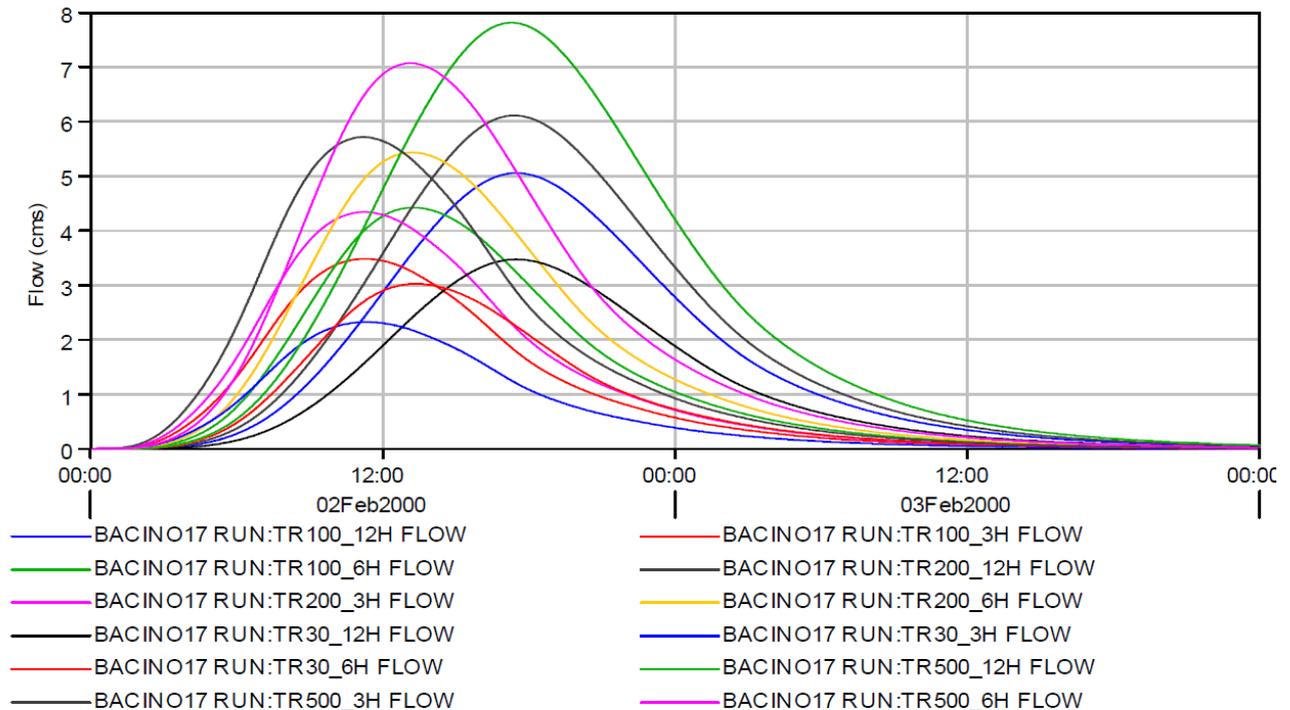
Parametri geomorfologici:

A [kmq]	Hmax [m slm]	Hmin [m slm]	H [m slm]	L [km]	CN [-]	tc [h]
2.68	2.30	1.30	1.00	3.98	81	15.64

Parametri pluviometrici:

Stazione	Codice	A	N	M
Asciano	530	31.572	0.259	0.205
Coltano	1830	29.665	0.256	0.201
Pisa (fac. Agraria)	540	32.289	0.256	0.212
S. Giovanni alla Vena	1790	27.278	0.269	0.19

Idrogrammi di piena:



Fosso Torale

Bacino 1

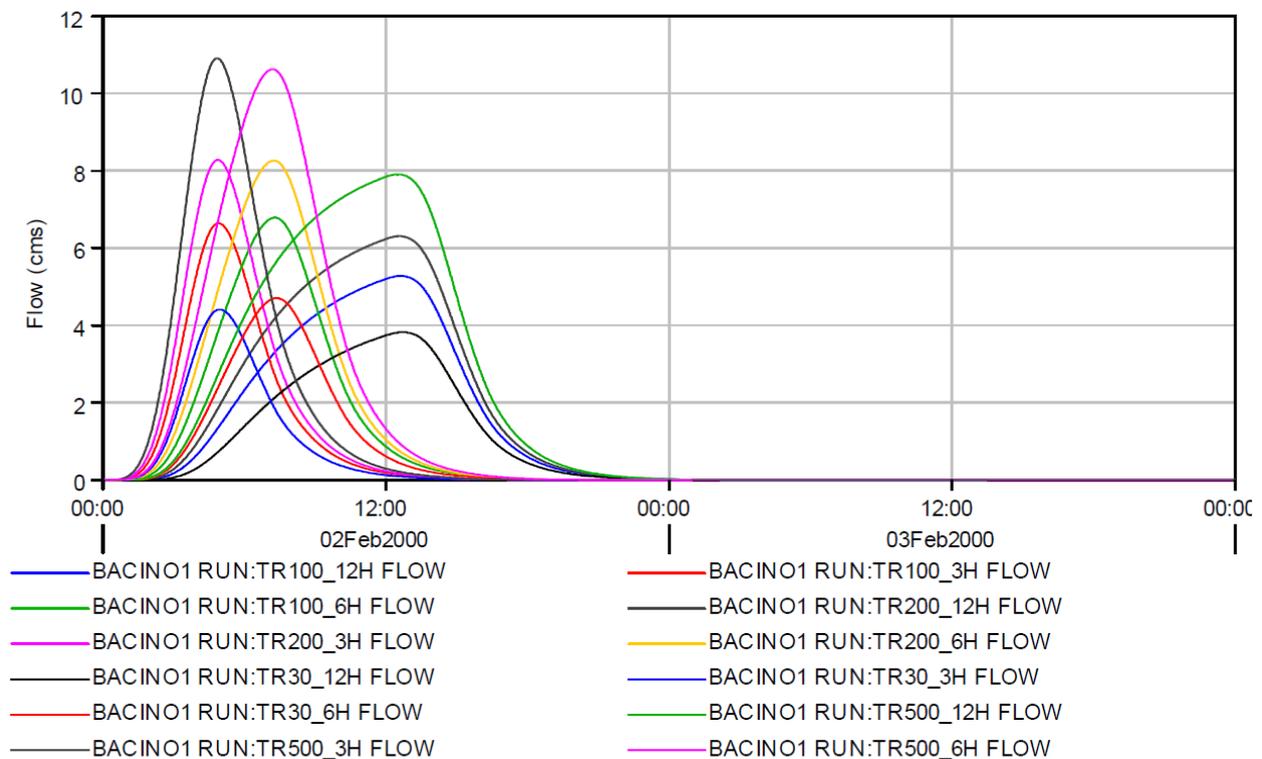
Parametri geomorfologici:

A	Hmax	Hmin	H	L	CN	tc
[kmq]	[m slm]	[m slm]	[m slm]	[km]	[-]	[h]
35.65	9.80	1.20	8.60	13.60	84	18.88

Parametri pluviometrici:

Stazione	Codice	A	N	M
Asciano	530	31.572	0.259	0.205
Coltano	1830	29.665	0.256	0.201
Pisa (fac. Agraria)	540	32.289	0.256	0.212
S. Giovanni alla Vena	1790	27.278	0.269	0.19

Idrogrammi di piena:



Bacino 2

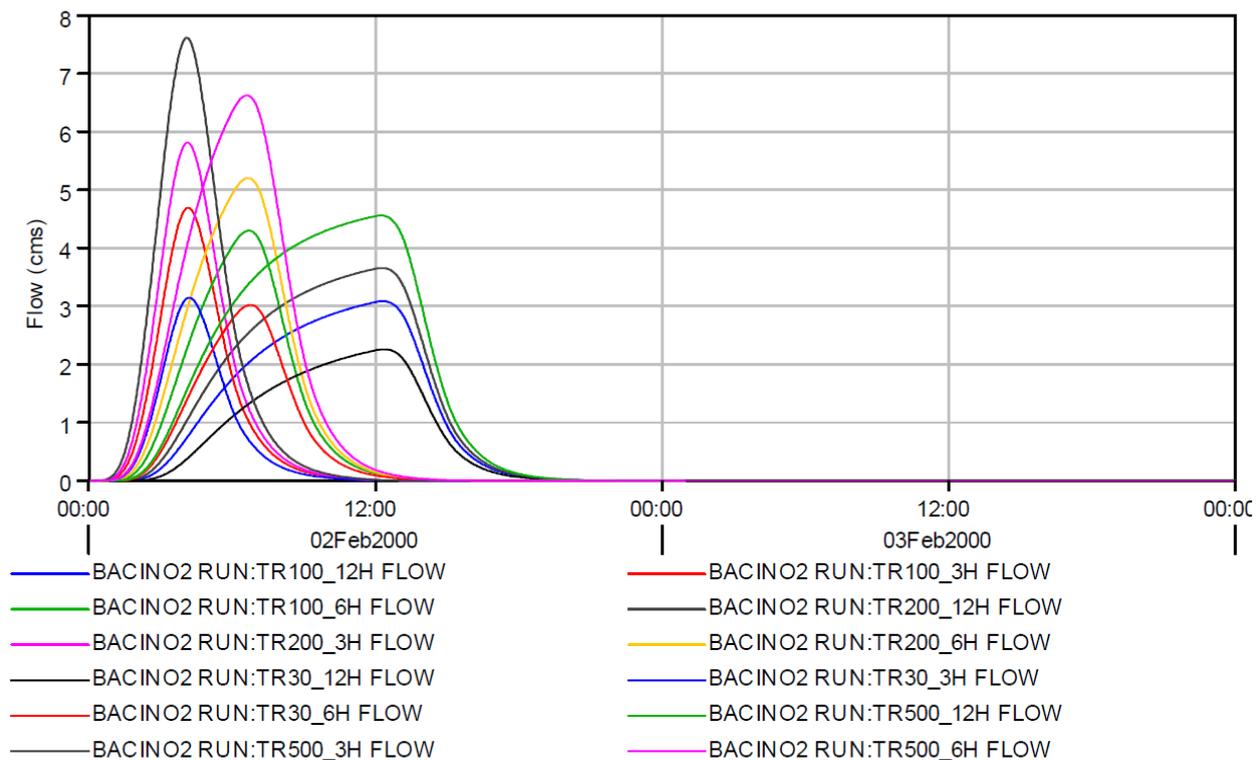
Parametri geomorfologici:

A	Hmax	Hmin	H	L	CN	tc
[kmq]	[m slm]	[m slm]	[m slm]	[km]	[-]	[h]
1.09	9.80	4.00	5.80	1.50	79	3.33

Parametri pluviometrici:

Stazione	Codice	A	N	M
Asciano	530	31.572	0.259	0.205
Coltano	1830	29.665	0.256	0.201
Pisa (fac. Agraria)	540	32.289	0.256	0.212
S. Giovanni alla Vena	1790	27.278	0.269	0.19

Idrogrammi di piena:



Bacino 3

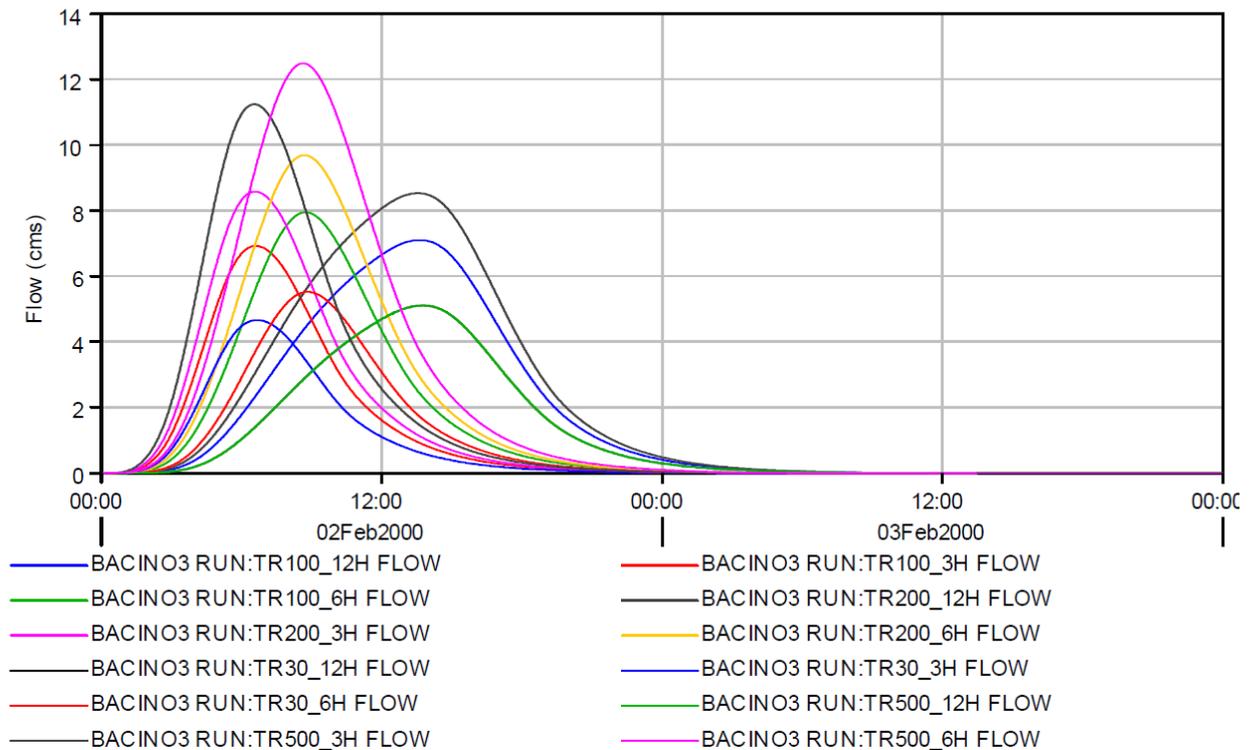
Parametri geomorfologici:

A	Hmax	Hmin	H	L	CN	tc
[kmq]	[m slm]	[m slm]	[m slm]	[km]	[-]	[h]
2.44	9.10	4.00	5.10	5.20	82	7.78

Parametri pluviometrici:

Stazione	Codice	A	N	M
Asciano	530	31.572	0.259	0.205
Coltano	1830	29.665	0.256	0.201
Pisa (fac. Agraria)	540	32.289	0.256	0.212
S. Giovanni alla Vena	1790	27.278	0.269	0.19

Idrogrammi di piena:



Bacino 4

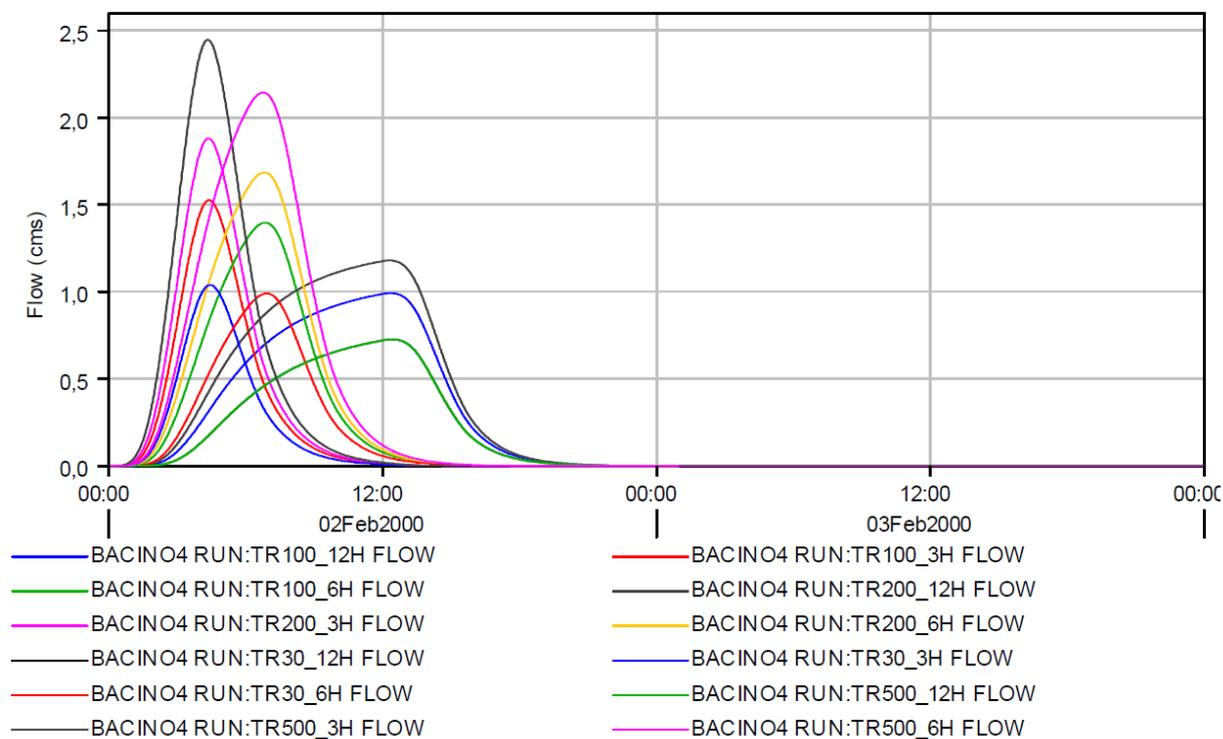
Parametri geomorfologici:

A [kmq]	Hmax [m slm]	Hmin [m slm]	H [m slm]	L [km]	CN [-]	tc [h]
0.30	4.80	3.00	1.80	1.30	82	3.86

Parametri pluviometrici:

Stazione	Codice	A	N	M
Asciano	530	31.572	0.259	0.205
Coltano	1830	29.665	0.256	0.201
Pisa (fac. Agraria)	540	32.289	0.256	0.212
S. Giovanni alla Vena	1790	27.278	0.269	0.19

Idrogrammi di piena:



	LINEA PISA – COLLESALVETTI - VADA Collegamento dell'Interporto di Guasticce con la linea Pisa-Vada ed interconnessione della linea Pisa-Vada con la linea Firenze-Pisa Interconnessione della linea Pisa – Vada con la linea Firenze-Pisa PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
	RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA	COMMESSA NF0Q	LOTTO 02 F 11	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A

In particolare, in via cautelativa, sono considerati gli idrogrammi associati alla durata critica che ne massimizza il colmo di piena.

Con riferimento al Fosso Torale, si è proceduto all'implementazione di un modello idrologico Hec HMS ai fini della determinazione dell'idrogramma di piena di progetto in corrispondenza della nuova sezione di attraversamento, tramite combinazione dei contributi dei sottobacini afferenti (1, 2, 3, 4).

3.2 Fosso Torale: determinazione dell'idrogramma di piena di progetto

Come anzidetto, è stato costruito il modello idrologico del Fosso Torale sulla base dei sottobacini afferenti individuati nello studio idrologico di riferimento. A tale scopo, è stato impiegato il software HEC HMS (versione 4.9), sviluppato dall'U.S. Army Corps of Engineers.

Ogni sottobacino è schematizzato attraverso l'opzione "*Source creation tool*" all'interno del quale sono inseriti i dati relativi a: "*flow method*" (nel caso specifico, "*Discharge gage*") e idrogramma di piena (associato alla durata critica che ne massimizza il picco).

Nella figura seguente, si riporta il modello idrologico così costruito.

Nel dettaglio, il modello idrologico HEC-HMS sviluppato si compone di:

- 4 sottobacini
- 3 nodi idrologici
- 3 tronchi fluviali principali (che collegano i nodi idrologici)

Il primo nodo idrologico (J_1+2) rappresenta la confluenza del canale Zambria (bacino 1) nel fosso della Mariana (bacino 2 = sottobacino del fosso della Mariana a monte della confluenza dello Zambria).

Nel secondo nodo idrologico (J_3) confluiscono l'asta fluviale del fosso della Mariana, dalla confluenza dello Zambria fino all'attraversamento di via Fosso Vecchio, e il sottobacino (3) corrispondente/afferente.

Il terzo nodo idrologico (J_3+4) rappresenta la confluenza del fosso della Mariana nel Fosso Torale (che a monte sottende il bacino 4 afferente all'omonimo canale diversivo).

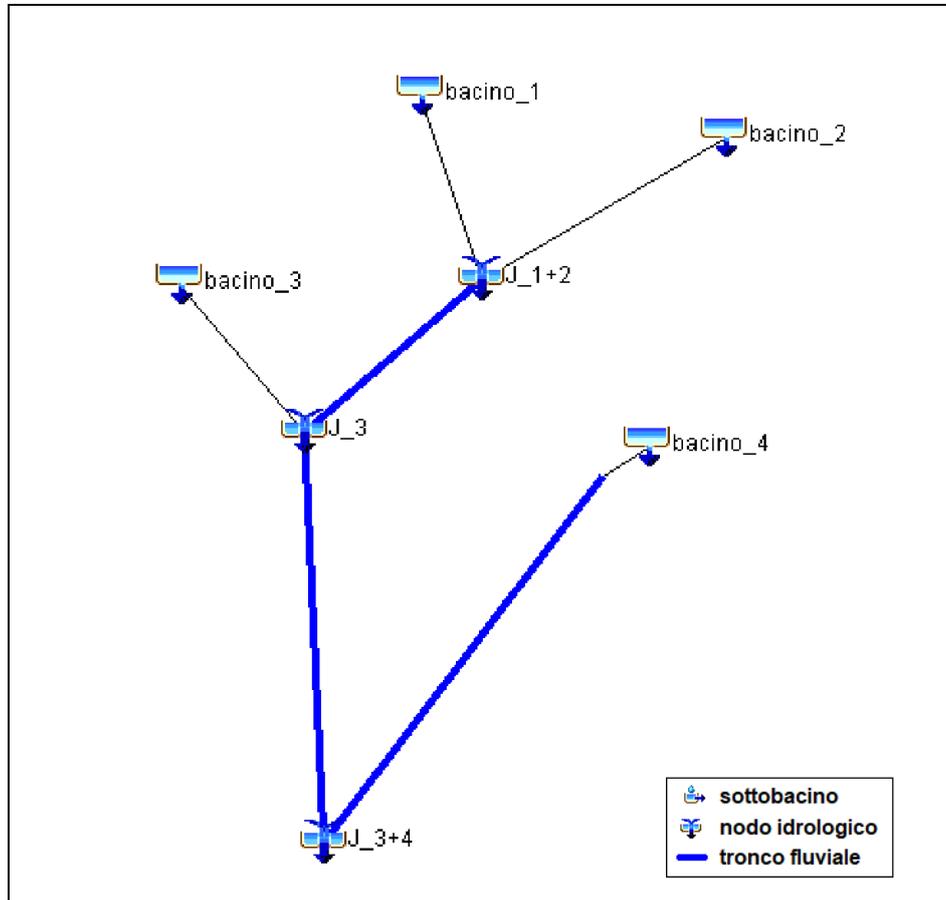


Fig. 4 – Costruzione del modello idrologico del Fosso Torale in HEC HMS.

Lungo i tronchi fluviali principali presenti nella schematizzazione di bacino, per la propagazione delle piene si è fatto riferimento al metodo del “tempo di ritardo” (*lag time*), stimato attraverso la relazione L/v con v = velocità media della corrente in alveo, assunta pari a 1 m/s (valore scelto a seguito di analisi di sensibilità). Nelle tabelle seguenti, si riportano i valori del tempo di ritardo adottati per ognuno dei sottobacini in esame, nonché per ognuno dei tratti fluviali considerati.

Tratto fluviale	Lunghezza (km)	Lag time (minuti)
Tra nodo J_1+2 e nodo J_3 (Fosso della Mariana)	2,73	45,5
Tra J_3 e J_3+4 (Fosso della Mariana)	2,43	40,5
Fosso Torale (bacino 4 – J_3+4)	2,67	44,5

Tab. 1 – Modello idrologico del Fosso Torale: caratteristiche dei tratti fluviali.

Nella figura seguente, si riporta l'idrogramma di piena di riferimento/progetto ($Tr = 200$ anni) per il Fosso Torale, risultante dal modello idrologico sopra descritto, da applicare insieme agli idrogrammi relativi ai bacini 16 e 17 al modello idraulico 2D sviluppato di seguito illustrato.

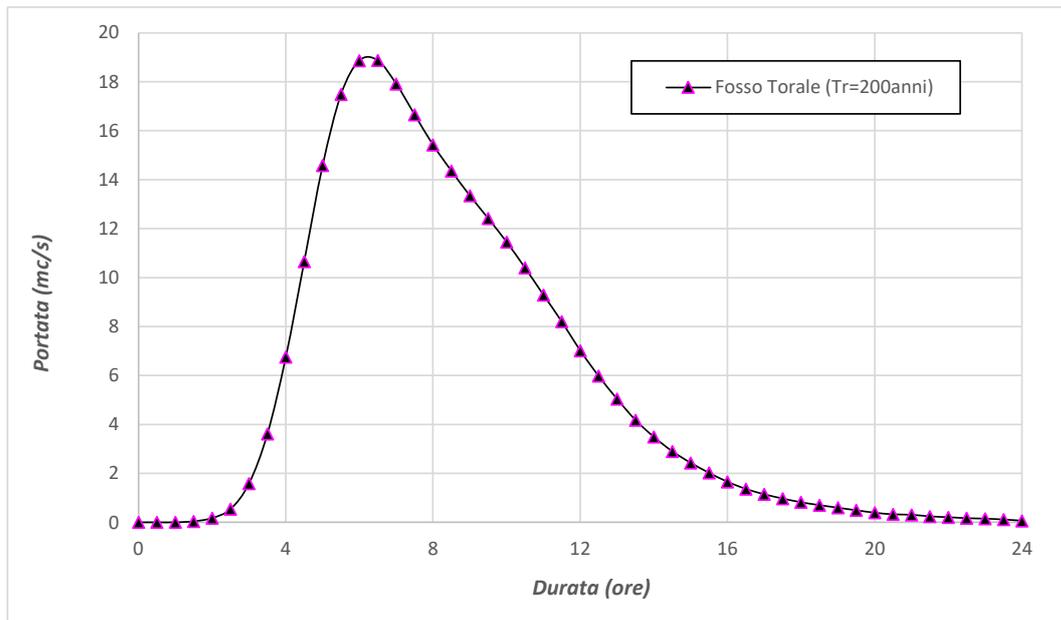


Fig. 5 – Fosso Torale: idrogramma di piena di progetto ($Tr = 200$ anni).

4. STUDIO IDRAULICO

4.1 Pericolosità idraulica nell'area di intervento

Il quadro conoscitivo di riferimento per la caratterizzazione idrologica-idraulica dei corsi d'acqua attraversati, nell'area di intervento e nel territorio di competenza dell'Autorità di Bacino distrettuale dell'Appennino Settentrionale, è attualmente riportato nel PIANO DI GESTIONE DEL RISCHIO ALLUVIONI – P.G.R.A., approvato e adottato con delibera della Conferenza Istituzionale Permanente (CIP) n. 26 del 20 dicembre 2021.

A tal proposito, con riferimento al P.G.R.A., sono individuate **3 classi di pericolosità idraulica** (P3 – elevata probabilità, P2 – media probabilità, P1 – scarsa probabilità). La classe di pericolosità P3 (Scenario C - elevata probabilità di alluvioni) fa riferimento ad un evento caratterizzato da una probabilità di accadimento $T_r \leq 30$ anni. La classe di pericolosità P2 (Scenario B - media probabilità di alluvioni) fa riferimento ad un evento caratterizzato da una probabilità di accadimento $T_r \in 30 - 200$ anni. La classe di pericolosità P1 (Scenario A - scarsa probabilità di alluvioni) fa riferimento ad un evento di piena raro, caratterizzato da un tempo di ritorno $T_r > 200$ anni. Di seguito, una tabella riepilogativa delle classi di pericolosità idraulica adottate.

T_r (anni)	Pericolosità idraulica
≤ 30	<i>P3 (elevata)</i>
30-200	<i>P2 (media)</i>
>200	<i>P1 (bassa)</i>

Tab. 2 – Classi di pericolosità idraulica (P.G.R.A. - Distretto Idrografico dell'Appennino Settentrionale).

Come illustrato nella figura sottostante, l'area di intervento ricade in aree a pericolosità P3 – elevata (per la maggior parte) e P2 - media, come da PGRA.

Si è operato quindi in conformità alle Norme di Disciplina di Piano del PGRA sviluppando uno studio di compatibilità idraulica (relativo alle opere previste in corrispondenza delle interferenze trattate nella presente relazione) in cui si è dimostrata la coerenza degli interventi in progetto con quanto proposto dalla pianificazione di bacino vigente ed in particolare che gli “*interventi previsti rispettino il vincolo di non aumentare il livello di pericolosità e di rischio esistente e di non precludere la possibilità di eliminare o ridurre le condizioni di pericolosità e rischio mediante azioni future*”, nonché in ottemperanza delle

prescrizioni in materia di compatibilità idraulica (i.e. franco idraulico e/o grado di riempimento minimo/massimo rispetto alla piena di progetto con tempo di ritorno di 200 anni) riportate nelle NTC2018 (Capitolo 5) e nella relativa circolare esplicativa n.7/2019 ed in accordo al Manuale di Progettazione Ferroviaria (MdP RFI).

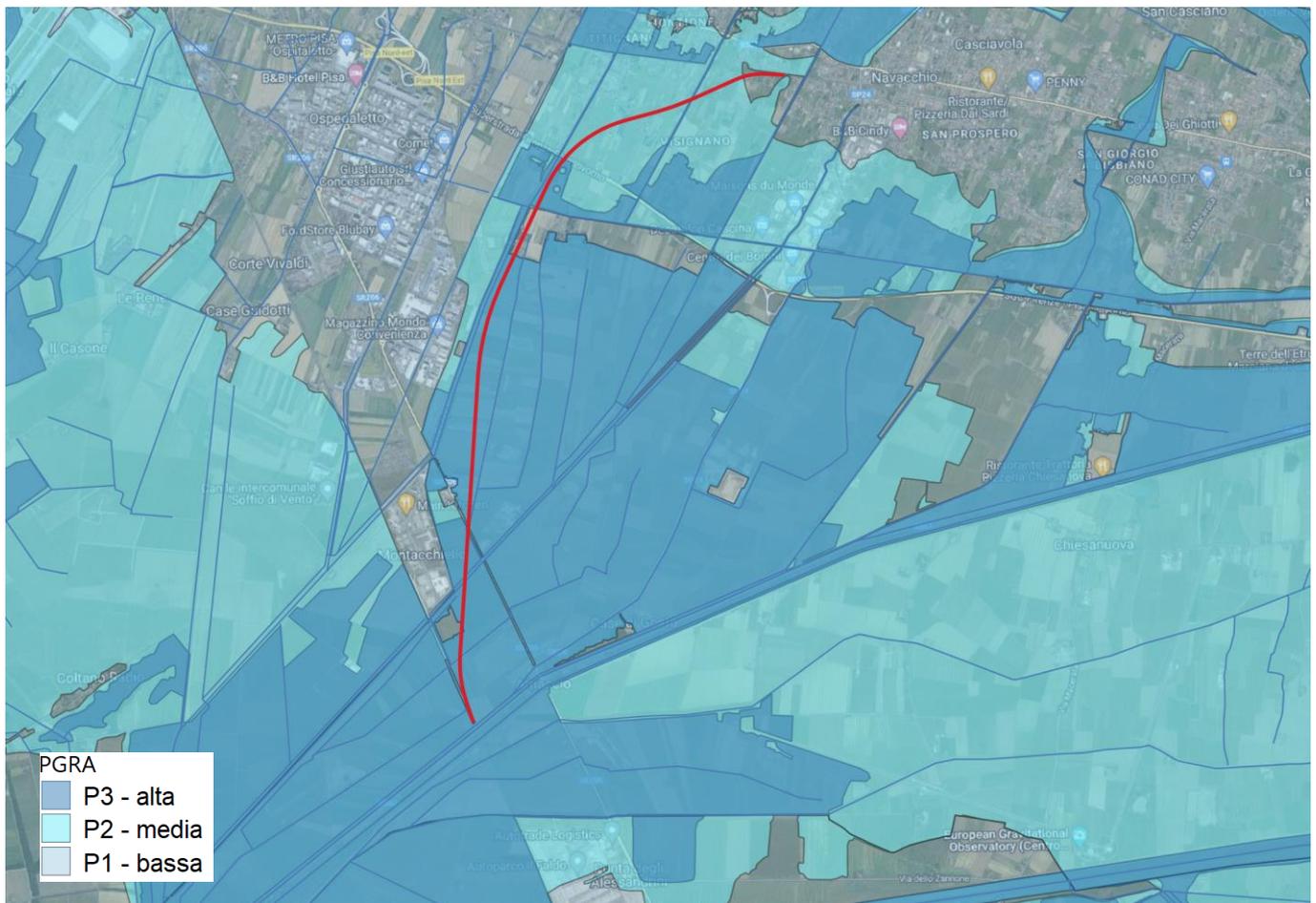


Fig. 6 – Pericolosità idraulica nell'area di intervento (PGRA – Appennino Settentrionale).

In sintesi, con riferimento al **MdP RFI**, le opere idrauliche principali di attraversamento devono essere verificate per eventi di massima piena caratterizzati da un tempo di ritorno di **200 anni**. Relativamente ai requisiti idraulici nei confronti dei livelli di massima piena, si specifica quanto segue:

- ✓ il franco idraulico tra la quota di intradosso del manufatto ed il livello idrico corrispondente alla piena di progetto ($Tr = 200$ anni) non deve essere inferiore a 1.50 m nella sezione immediatamente a monte dell'attraversamento;

	LINEA PISA – COLLESALVETTI - VADA Collegamento dell'Interporto di Guasticce con la linea Pisa-Vada ed interconnessione della linea Pisa-Vada con la linea Firenze-Pisa Interconnessione della linea Pisa – Vada con la linea Firenze-Pisa PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
	RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA	COMMESSA NF0Q	LOTTO 02 F 11	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A

- ✓ il franco minimo tra la quota di intradosso del manufatto e la quota di carico idraulico totale ($T_r = 200$ anni) deve essere almeno pari a 50 cm.

Inoltre, nel caso di rilevati vulnerabili per esondazione di corsi d'acqua, *“dovrà essere garantito un franco non inferiore a 1 m tra la quota della piattaforma ferroviaria (piano di regolamento) e la massima altezza raggiungibile dalla quota di massima piena di progetto; le scarpate dovranno essere protette da apposite opere di difesa progettate sulla base dei parametri indicati nei piani di bacino o negli studi idraulici di progetto.”*

Relativamente alle opere di attraversamento secondarie, si specifica quanto segue:

- Le tipologie ammesse sono:
 - tombini circolari in c.a. con diametro minimo 1.5 m;
 - tombini scatolari in c.a. con dimensione minima 2 m;
- Sono ammessi fino a due tombini affiancati.
- In nessun caso saranno ammessi attraversamenti con opere a sifone.
- La pendenza longitudinale del fondo dell'opera non dovrà essere inferiore al 2‰ e ciò al fine di impedire la sedimentazione di eventuale materiale solido trasportato.
- La sezione di deflusso complessiva del tombino dovrà consentire lo smaltimento della portata massima di piena con un grado di riempimento non superiore al 70% della sezione totale.
- Dovranno essere previsti gli opportuni accorgimenti per evitare, in corrispondenza delle fondazioni del manufatto, fenomeni di scalzamento o erosione

In merito alla sistemazione idraulica di torrenti e fossi esistenti prescrive inoltre:

- La sistemazione idraulica dei torrenti naturali esistenti potrà comportare, sulla base della morfologia locale e della tipologia della linea ferroviaria, la deviazione dell'asta incisa ovvero opere di raccordo a monte ed a valle dello scatolare di attraversamento.
- Le deviazioni e le opere di raccordo dovranno essere realizzate in modo da garantire la stabilità dell'alveo e la sicurezza della infrastruttura ferroviaria nei confronti di fenomeni di esondazione e/o di erosione; quindi la forma delle sezioni, i valori di pendenza dell'alveo e delle sponde, il progetto dei salti e delle opere di rivestimento e stabilizzazione, la tipologia delle opere e i materiali utilizzati dovranno essere compatibili con le caratteristiche morfologiche del corso d'acqua e la sua tendenza evolutiva.

- I raccordi a monte ed a valle degli scatolari dovranno essere dimensionati in modo tale da consentire comunque il deflusso a superficie libera senza fenomeni di rigurgito.
- Qualora il dislivello tra la quota di fondo del tombino e la quota di fondo fosso, in corrispondenza della sezione di imbocco, sia di particolare rilievo ($\Delta H > 20\%$ dell'altezza dello scatolare), si dovranno prevedere a monte del tombino uno o più salti di fondo di appropriata altezza

Con riferimento alle **Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC2018)**, l'opera di attraversamento fluviale deve rispondere ai seguenti requisiti:

“..... Deve in ogni caso essere definita una piena di progetto caratterizzata da un tempo di ritorno T_r pari a 200 anni ($T_r=200$).....Il manufatto non dovrà interessare con spalle, pile e rilevati la sezione del corso d'acqua interessata dalla piena di progetto e, se arginata, i corpi arginali. Qualora fosse necessario realizzare pile in alveo, la luce netta minima tra pile contigue, o fra pila e spalla del ponte, non deve essere inferiore a 40 m misurati ortogonalmente al filone principale della corrente. Nel caso di pile e/o spalle in alveo, cura particolare è da dedicare al problema delle escavazioni in corrispondenza delle fondazioni e alla protezione delle fondazioni delle pile e delle spalle tenuto anche conto del materiale galleggiante che il corso d'acqua può trasportare. In tali situazioni, una stima anche speditiva dello scalzamento è da sviluppare fin dai primi livelli di progettazione. Il franco idraulico, definito come la distanza fra la quota liquida di progetto immediatamente a monte del ponte e l'intradosso delle strutture, è da assumersi non inferiore a 1,50 m, e comunque dovrà essere scelto tenendo conto di considerazioni e previsioni sul trasporto solido di fondo e sul trasporto di materiale galleggiante, garantendo una adeguata distanza fra l'intradosso delle strutture e il fondo alveo. Quando l'intradosso delle strutture non sia costituito da un'unica linea orizzontale tra gli appoggi, il franco idraulico deve essere assicurato per una ampiezza centrale di 2/3 della luce, e comunque non inferiore a 40 m.”

Nella relativa **circolare applicativa n.7 del 21 gennaio 2019**, si asserisce inoltre:

“Quando, per caratteristiche del territorio e del corso d'acqua, si possa verificare nella sezione oggetto dell'attraversamento il transito di tronchi di rilevanti dimensioni, in aggiunta alla prescrizione di un franco normale minimo di 1,50 m, è da raccomandare che il dislivello tra fondo e sottotrave sia indicativamente non inferiore a 6-7 m. Nel caso di corsi di acqua arginati, la quota di sottotrave sarà comunque non

	LINEA PISA – COLLESALVETTI - VADA Collegamento dell'Interporto di Guasticce con la linea Pisa-Vada ed interconnessione della linea Pisa-Vada con la linea Firenze-Pisa Interconnessione della linea Pisa – Vada con la linea Firenze-Pisa PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
	RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA	COMMESSA NF0Q	LOTTO 02 F 11	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A

inferiore alla quota della sommità arginale per l'intera luce. Per tutti gli attraversamenti è opportuno che sia garantito il transito dei mezzi di manutenzione delle sponde e/o delle arginature.”

“..... Restano esclusi dal punto 5.1.2.3 della Norma i tombini, intendendosi per tombino un manufatto totalmente rivestito in sezione, eventualmente suddiviso in più canne, in grado di condurre complessivamente portate fino a 50 m³/s. L'evento da assumere a base del progetto di un tombino ha comunque tempo di ritorno uguale a quello da assumere per i ponti. La scelta dei materiali deve garantire la resistenza anche ai fenomeni di abrasione e urto causati dai materiali trasportati dalla corrente. Oltre a quanto previsto per gli attraversamenti dalla Norma, nella Relazione idraulica è opportuno siano considerati anche i seguenti aspetti:

- *è da sconsigliare il frazionamento della portata fra più canne, tranne nei casi in cui questo sia fatto per facilitare le procedure di manutenzione, predisponendo allo scopo luci panconabili all'imbocco e allo sbocco e accessi per i mezzi d'opera;*
- *sono da evitare andamenti planimetrici non rettilinei e disallineamenti altimetrici del fondo rispetto alla pendenza naturale del corso d'acqua;*
- *per sezioni di area maggiore a 1,5 m² e da garantire la praticabilità del manufatto;*
- *nel caso di funzionamento a superficie libera, il tirante idrico non dovrà superare i 2/3 dell'altezza della sezione, garantendo comunque un franco minimo di 0,50 m;*
- *il calcolo idraulico e da sviluppare prendendo in considerazione le condizioni che si realizzano nel tratto del corso d'acqua a valle del tombino;*
- *nel caso sia da temersi l'ostruzione anche parziale del manufatto da parte dei detriti galleggianti trasportati dalla corrente, è da disporre immediatamente a monte una varice presidiata da una griglia che consenta il passaggio di elementi caratterizzati da dimensioni non superiori alla metà della larghezza del tombino; in alternativa il tombino e da dimensionare assumendo che la sezione efficace ai fini del deflusso delle acque sia ridotta almeno alla metà di quella effettiva. E in ogni caso da garantire l'accesso in alveo ai mezzi necessari per le operazioni di manutenzione ordinaria o straordinaria da svolgere dopo gli eventi di piena;*

- *i tratti del corso d'acqua immediatamente prospicienti l'imbocco e lo sbocco del manufatto devono essere protetti da fenomeni di scalzamento e/o erosione, e opportune soluzioni tecniche sono da adottare per evitare i fenomeni di sifonamento.”*

Con riferimento alle **Norme di Disciplina di Piano del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale (2015):**

Art. 7. Aree a pericolosità da alluvione elevata (P3) –Norme.

“1. Nelle aree P3 per le finalità di cui all'art. 1 sono consentiti gli interventi che, contestualmente, non aggravino la funzionalità idraulica, siano realizzati in condizioni di gestione del rischio idraulico e non incrementino le condizioni di rischio per le aree contermini con riferimento agli obiettivi di cui all'art. 1 comma 4, fatto salvo quanto previsto ai commi seguenti del presente articolo e al successivo art8.

2. Nelle aree P3 per le finalità di cui all'art. 1 sono consentiti, previo parere favorevole dell'Autorità di bacino in merito alla compatibilità degli stessi con il raggiungimento degli obiettivi di PGRA:

.....

- c) interventi di ampliamento e ristrutturazione delle opere pubbliche o di interesse pubblico esistenti, riferite ai servizi essenziali, e della rete infrastrutturale primaria, nonché degli impianti di cui all'allegato VIII alla parte seconda del decreto legislativo n. 152/2006 dichiarati di interesse pubblico, purché siano realizzati in condizioni di gestione del rischio, da raggiungersi anche mediante sistemi di difesa alla scala locale e piani di protezione civile collegati alla pianificazione di protezione civile comunale e sovra-comunale, senza aumento di rischio per le aree contermini, rispettando le condizioni di trasparenza idraulica; tali interventi non devono precludere la possibilità di attenuare o eliminare le cause che determinano le condizioni di rischio;*

.....”

Art. 8 –Aree a pericolosità da alluvione elevata (P3) –Indirizzi per gli strumenti di governo del territorio

1. Fermo quanto previsto all'art. 7e all'art. 13 comma 9, nelle aree P3 per le finalità di cui all'art. 1 le Regioni, le Province e i Comuni, nell'ambito dei propri strumenti di governo del territorio si attengono ai seguenti indirizzi:

- a) non dovranno essere previste opere pubbliche e di interesse pubblico riferite a servizi essenziali;*
- b) non dovranno essere previste nuove aree destinate alla realizzazione di impianti di cui all'allegato VIII alla parte seconda del decreto legislativo n. 152/2006;*

	LINEA PISA – COLLESALVETTI - VADA Collegamento dell'Interporto di Guasticce con la linea Pisa-Vada ed interconnessione della linea Pisa-Vada con la linea Firenze-Pisa Interconnessione della linea Pisa – Vada con la linea Firenze-Pisa PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
	RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA	COMMESSA NF0Q	LOTTO 02 F 11	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A

c) dovranno essere privilegiate le trasformazioni urbanistiche tese al recupero della funzionalità idraulica, con particolare riguardo alle aree di contesto fluviale;

.....”

Art. 9 – Aree a pericolosità da alluvione media (P 2) – Norme

“.....

2. Nelle aree P2 per le finalità di cui all'art. 1 sono consentiti, previo parere favorevole dell'Autorità di bacino in merito alla compatibilità degli stessi con il raggiungimento degli obiettivi di PGRA:

.....

d) nuovi interventi relativi alle opere pubbliche o di interesse pubblico riferite ai servizi essenziali e alla rete infrastrutturale primaria, purché siano realizzate in condizioni di gestione del rischio idraulico, da raggiungersi anche mediante sistemi di difesa alla scala locale e piani di protezione civile che dovranno essere collegati alla pianificazione di protezione civile comunale e sovra-comunale, senza aumento di rischio per le aree contermini, rispettando le condizioni di trasparenza idraulica.

.....”

Art. 11 – Aree a pericolosità da alluvione bassa (P1) – Indirizzi per gli strumenti di governo del territorio

“1. Per le finalità di cui all'art.1 le previsioni nelle aree P1 dovranno essere disciplinate garantendo il rispetto di criteri di gestione e non incremento del rischio sia per le opere stesse che per le aree contermini.”

Si è proceduto quindi all'implementazione del modello idraulico, numerico, bidimensionale del Fosso Torale (compresi i contributi di Fossetto delle Sedici, Fosso Zambrigiana/Mattinga), finalizzato alla simulazione della propagazione dell'onda di piena associata ad un tempo di ritorno di progetto di **200 anni**, propedeutica alla verifica di compatibilità idraulica delle nuove opere di attraversamento e del tracciato ferroviario di progetto nel suo complesso.

4.2 Dati di base

I dati topografici a disposizione per l'implementazione del modello numerico 2D sono i seguenti:

- sezioni trasversali dell'alveo e rilievo delle opere di attraversamento esistenti su Fosso Torale, Fosso Zambriggiana/Mattinga e Fossetto delle Sedici, ottenute da apposita campagna topografica (2022/23) condotta da Italferr;
- rilievo laseraltimetrico (LiDAR), risoluzione 1m x1m, fornito dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, ovvero dalla Regione Toscana;
- rilievo laseraltimetrico (LiDAR), risoluzione 50 punti a m², realizzato da ITALFERR (2022).

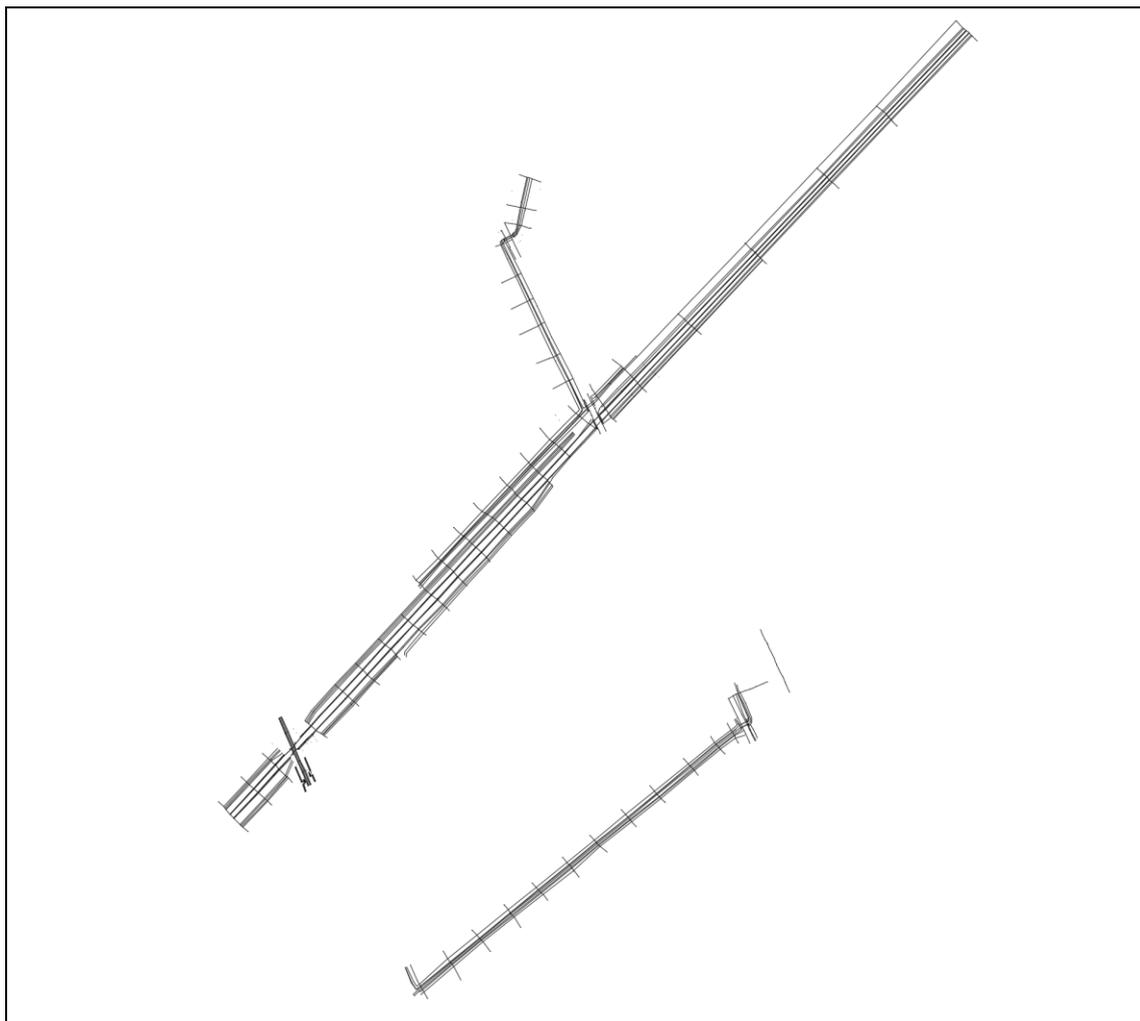


Fig. 7 – Rilievo 3D e sezioni batimetriche dell'alveo dei corsi d'acqua oggetto di studio.

	LINEA PISA – COLLESALVETTI - VADA Collegamento dell'Interporto di Guasticce con la linea Pisa-Vada ed interconnessione della linea Pisa-Vada con la linea Firenze-Pisa Interconnessione della linea Pisa – Vada con la linea Firenze-Pisa PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
	RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA	COMMESSA NF0Q	LOTTO 02 F 11	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A

Il confronto tra le diverse informazioni topografiche ed in particolare tra le sezioni trasversali ottenute dal rilievo topografico e il rilievo LiDAR ha evidenziato un'ottima corrispondenza sia per quanto riguarda le aree golenali ed esterne all'ambito fluviale che per l'alveo inciso.

Questo ha permesso, nell'implementazione del modello idraulico, di utilizzare le due informazioni topografiche in maniera complementare.

4.3 Implementazione del modello numerico bidimensionale

Come anticipato, per la valutazione della compatibilità idraulica della linea ferroviaria in progetto e delle nuove opere di attraversamento, si è proceduto all'implementazione di un modello numerico bidimensionale in regime di moto vario dei corsi d'acqua di interesse finalizzato alla determinazione *i)* delle aree potenzialmente inondabili e *ii)* dei livelli idrici in corrispondenza dei nuovi viadotti, sia nella configurazione *attuale* che *post operam* (o di progetto).

Il codice di calcolo utilizzato è *InfoWorks ICM 9.0*, sviluppato dalla software house Innovyze con sede a Wallingford nel Regno Unito (UK).

4.3.1 Modellazione bidimensionale

La modellazione bidimensionale di un corso d'acqua permette di rappresentare con accuratezza la propagazione delle onde di piena nell'asta fluviale e nelle aree ripariali attigue con la riuscendo a modellare il comportamento della corrente in prossimità di bruschi restringimenti/allargamenti e forti curvature; è possibile inoltre rappresentare con un elevato grado di dettaglio la propagazione del moto in prossimità di attraversamenti o di eventuali interferenze presenti lungo lo sviluppo del tratto fluviale verso valle. Allo stesso tempo la rappresentazione in termini bidimensionali del campo di velocità consente di analizzare l'evoluzione degli allagamenti indotti dal propagarsi delle onde di piena all'interno dell'area esaminata. Il software impiegato è in grado di contenere all'interno dello stesso modello numerico elementi di tipo bidimensionale e monodimensionale. Il modello numerico utilizzato risolve le equazioni in condizioni di moto vario. Per valutare il campo di moto, il modello numerico implementato in InfoWorks ICM è basato sulla procedura proposta da *Alcrudo and Mullet-Marti (2005), Urban inundation models based upon the Shallow Water Equations*. La rappresentazione bidimensionale del moto si basa sulla

risoluzione delle shallow water equations (o SWE). Le ipotesi alla base per la soluzione delle SWE sono che il flusso sia orizzontale e che la variazione della velocità nella verticale rispetto alla direzione del moto sia trascurabile. Inoltre, le equazioni sono sviluppate accettando a priori l'ipotesi di idrostaticità del gradiente delle pressioni lungo la direzione verticale. La formulazione delle SWE utilizzate nel software InfoWorks ICM è riassunta di seguito:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = q_{1D}$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = S_{0,x} - S_{f,x} + q_{1D}u_{1d}$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(hv^2 + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial x} = S_{0,y} - S_{f,y} + q_{1D}v_{1d}$$

I termini citati rappresentano rispettivamente: h , il tirante idrico della corrente; u e v , rispettivamente le componenti della velocità lungo le direzioni x e y ; t , il tempo; g , l'accelerazione di gravità; $S_{0,x}, S_{0,y}$ le componenti dovute alle tensioni tangenziali al fondo, rispettivamente in direzione x e y ; $S_{f,x}, S_{f,y}$, le componenti dovute alla pendenza del fondo, rispettivamente in direzione x e y ; q_{1D} , la portata immessa per unità di superficie; u_{1d} e v_{1d} , le componenti di velocità relative alla portata immessa rispettivamente in direzione x e y . Il contributo degli effetti turbolenti viene considerato limitatamente alla turbolenza localizzata alla parete (wall friction), mentre gli effetti turbolenti legati alle fluttuazioni di velocità nelle regioni più interne del fluido vengono trascurate. In genere si ingloba quest'ultimo effetto dissipativo nel termine che rappresenta la dissipazione localizzazione alla parete. La formulazione conservativa delle SWE è essenziale al fine di preservare la massa e la quantità di moto. Questo tipo di formulazione permette di rappresentare le discontinuità nel flusso e i cambiamenti tra moto gradualmente e rapidamente vario (*gradually varied flow* e *rapidly varied flow*). Le SWE, applicate in forma conservativa, sono discretizzate usando lo schema esplicito di primo ordine ai volumi finiti. Gli schemi ai volumi finiti utilizzano volumi di controllo per rappresentare le aree di interesse. Il dominio di calcolo è suddiviso in forme geometriche in grado di interpretare le caratteristiche peculiari del campo di moto stesso sulle quali vengono integrate le SWE. Lo schema che risolve le SWE è basato sullo schema numerico di Gudonov con i flussi numerici attraverso i contorni dei volumi di controllo calcolati. La metodologia secondo i volumi finiti è considerata essere vantaggiosa in termini di flessibilità della

	LINEA PISA – COLLESALVETTI - VADA Collegamento dell'Interporto di Guasticce con la linea Pisa-Vada ed interconnessione della linea Pisa-Vada con la linea Firenze-Pisa Interconnessione della linea Pisa – Vada con la linea Firenze-Pisa PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
	RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA	COMMESSA NF0Q	LOTTO 02 F 11	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A

geometria e semplicità concettuale. Per ciascun elemento di calcolo il timestep richiesto è calcolato utilizzando le condizioni di Courant-Friedrichs-Lewy al fine di raggiungere la stabilità numerica. La formulazione della condizione di Courant-Friedrichs-Lewy è la seguente:

$$c \frac{\Delta x}{\Delta t} \leq 1$$

dove: c è il numero di Courant (il valore di default è 0.95). Inoltre, InfoWorks ICM utilizza mesh non strutturate per rappresentare il dominio di calcolo bidimensionale.

4.3.2 Geometria del modello

Le caratteristiche geometriche dell'area di interesse (in seguito definita dominio di calcolo) sono riportate all'interno del modello idraulico tramite una discretizzazione del territorio attraverso elementi generalmente poligonali, nota come mesh. La mesh di calcolo possiede una risoluzione variabile spazialmente tale per cui l'andamento piano altimetrico del territorio è riprodotto con un livello di accuratezza adeguato a rappresentare il corso d'acqua, alvei e golene, sia i canali secondari e le aree ripariali potenzialmente allagabili.

In particolare, è stato modellato/simulato il Fosso Torale per un tratto di lunghezza totale pari a circa 1.5 km. Nella figura seguente è riportata l'estensione del dominio di calcolo (superficie = 180 ha circa). La geometria del modello è stata implementata utilizzando i dati LIDAR disponibili per l'area in esame e da rilievo topografico, precedentemente descritti. In particolare:

- per la modellazione dell'alveo inciso si è fatto riferimento a sezioni di rilievo topografico;
- le caratteristiche topografiche della rete di calcolo 2D sono state desunte dal modello digitale del terreno ricostruito sulla base dei rilievi Lidar, verificando la congruenza tra i rilievi celerimetrici disponibili ed il DTM medesimo.

La rete di calcolo bidimensionale interessa sia l'alveo inciso sia le aree golenali di espansione esterne; questa è stata definita utilizzando le opzioni di discretizzazione automatica del dominio di calcolo presenti in InfoWorks ICM, definendo opportune aree di infittimento della maglia in corrispondenza di elementi morfologicamente ed idraulicamente significativi, quali strade, corsi d'acqua, rilevati, etc.

La mesh di calcolo è costituita da circa 510000 elementi. La creazione della mesh è stata sviluppata in modo tale che le dimensioni massime degli elementi non fossero superiori a valori di 25 m² e che le dimensioni minime non fossero inferiori ad un area di 2 m².



Fig. 8 – Modello numerico 2D del Fosso Torale: estensione del dominio di calcolo e condizioni al contorno.

In ragione della loro elevazione, i viadotti in progetto sono stati implementati nel modello 2D inserendo soltanto le pile (senza impalcati), tramite opportuni poligoni vuoti. Con poligoni vuoti sono stati implementati anche i nuovi rilevati (ingombro). Le opere di attraversamento esistenti sono state invece implementate tramite appositi elementi disponibili nel software di calcolo (InfoWorks ICM 9.0). Nello specifico, la riproduzione di un ponte è ottenuta mediante due tipologie di “linea”: 1) Struttura lineare 2D Base (per rappresentare la sezione d’alveo di attraversamento); 2) Struttura lineare – Ponte 2D (per rappresentare l’impalcato e le luci). Mediante la prima linea, viene estratta dal DTM di base la sezione d’alveo in corrispondenza del ponte/viadotto; tramite la seconda linea, viene definita la struttura (impalcato, campate/pile) dell’opera di attraversamento.

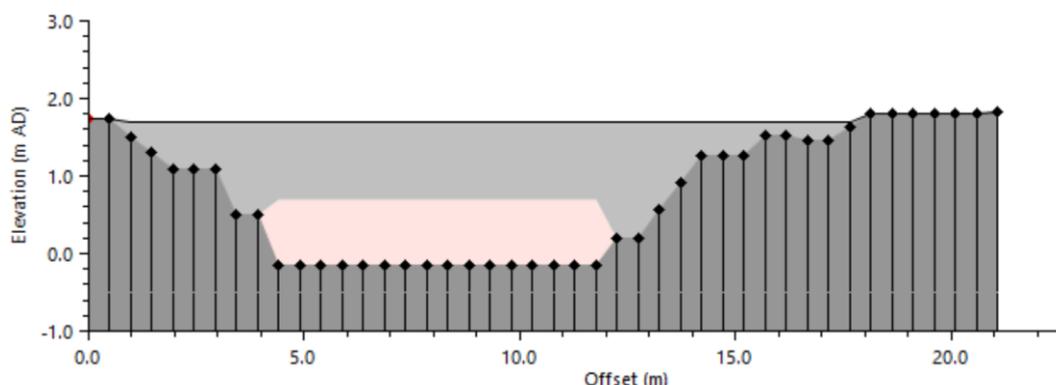


Fig. 9 – Modello numerico 2D: implementazione delle opere di attraversamento in InfoWorks ICM.

Canalizzazioni e riprofilature degli alvei sono state direttamente implementate nel DTM di base.

4.3.3 Scabrezze

I coefficienti di scabrezza n di Manning sono stati fissati tramite calibrazione idraulica dei modelli stessi partendo da valori di letteratura. In particolare, in accordo anche alle analisi effettuate nell’ambito degli studi di riferimento condotti dal Comune di Cascina, per l’alveo e le golene è stato assunto $n = 0.04$ (s/ m^{1/3}); il coefficiente di scabrezza per le aree esterne, potenzialmente inondabili, è stato assegnato pari a $n = 0.06$ (s/ m^{1/3}).

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA PISA – COLLESALVETTI - VADA Collegamento dell'Interporto di Guasticce con la linea Pisa-Vada ed interconnessione della linea Pisa-Vada con la linea Firenze-Pisa Interconnessione della linea Pisa – Vada con la linea Firenze-Pisa PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
	RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA	COMMESSA NF0Q	LOTTO 02 F 11	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A

4.3.4 Condizioni al contorno

Gli idrogrammi di riferimento sono quelli ricavati nello studio idrologico, sopra descritto.

Per quanto riguarda la condizione al contorno di valle, è stato imposto un livello idrico di moto uniforme (*Normal Depth*), in ragione della sufficiente estensione del modello a valle dell'intervento in progetto. In generale, tale condizione è stata imposta lungo tutto il perimetro del dominio di calcolo.

4.3.5 Scenari simulati

Al fine di verificare la compatibilità idraulica delle opere di attraversamento in progetto (come da Manuale di Progettazione Ferroviaria RFI, NTC2018 e Disciplina di Piano - PGRA) e di confrontare i risultati ottenuti (in termini di aree potenzialmente inondabili) con le aree di pericolosità idraulica (i.e. $P2$, $Tr 200$) definite nell'ambito del P.G.R.A. (2021), sono stati simulati i seguenti scenari riferiti alle configurazioni geometriche:

- *ante operam – $Tr = 200$ anni*: si intende la geometria ottenuta dal modello del terreno nello stato di fatto;
- *post operam – $Tr = 200$ anni*: si intende la geometria ottenuta dall'inserimento delle opere in progetto che possono modificare l'attuale espansione delle piene, nonché di interventi di risoluzione di eventuali criticità di natura idraulica.

4.4 Risultati delle simulazioni numeriche bidimensionali

4.4.1 Scenario ante operam

Nella figura seguente sono riportati i risultati, in termini di aree potenzialmente inondabili, della simulazione numerica dell'onda di piena dei corsi d'acqua oggetto di studio (tra le progr. 0+550 e 1+550 circa) per un tempo di ritorno di 200 anni, nello scenario *ante operam*.

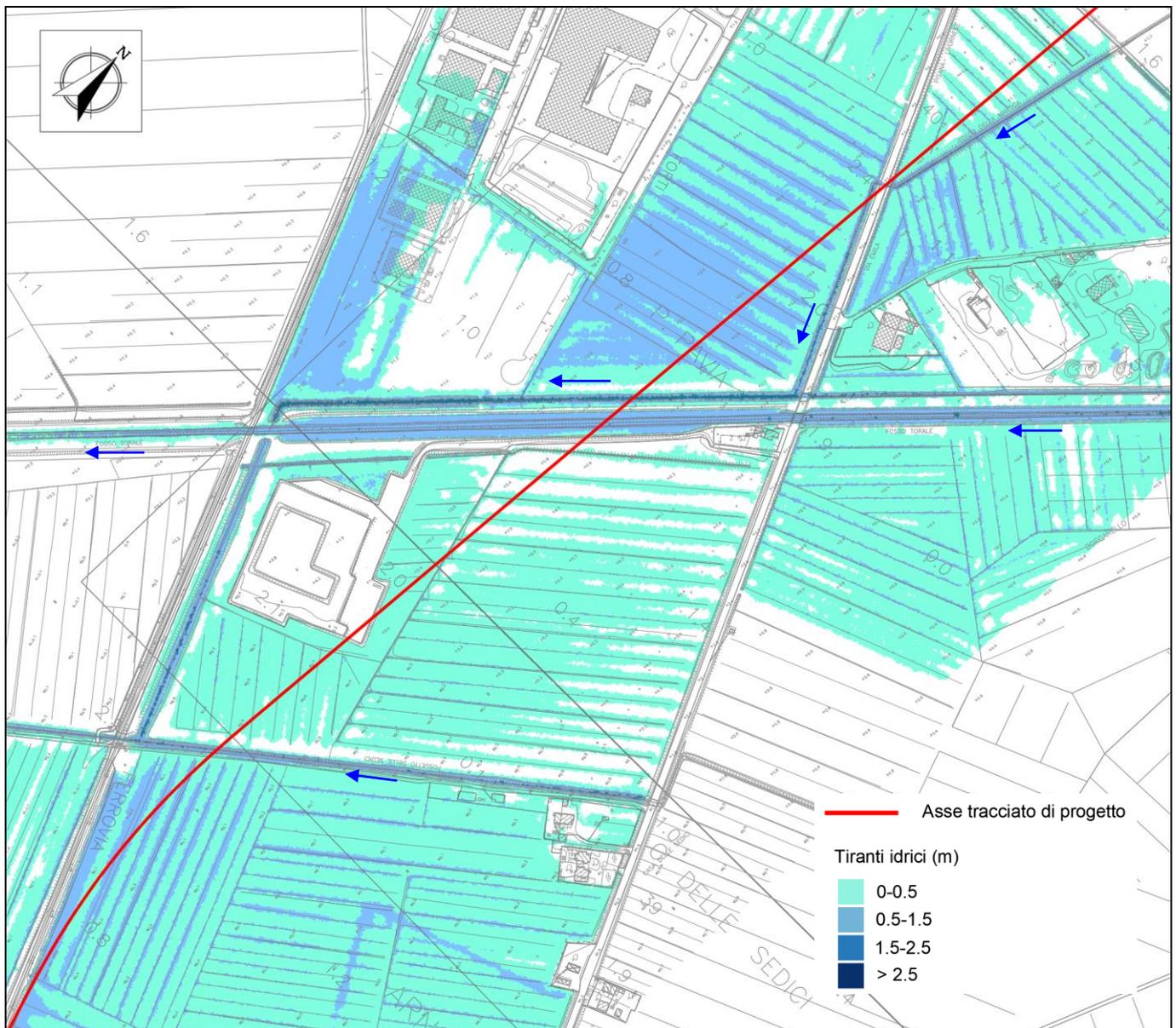


Fig. 10 – Modello numerico 2D, Fosso Torale: aree potenzialmente inondabili, Tr200, ante operam.

	LINEA PISA – COLLESALVETTI - VADA Collegamento dell'Interporto di Guasticce con la linea Pisa-Vada ed interconnessione della linea Pisa-Vada con la linea Firenze-Pisa Interconnessione della linea Pisa – Vada con la linea Firenze-Pisa PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
	RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA	COMMESSA NF0Q	LOTTO 02 F 11	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A

Si osservano esondazioni diffuse, a conferma dello scenario di pericolosità idraulica riportato nella pianificazione di bacino vigente.

4.4.2 Scenario post operam

Sulla base dello scenario di esondazione constatato allo stato attuale (ante operam), si è proceduto quindi alla definizione delle opere in progetto. Nello specifico, in generale lungo i rilevati di allaccio alla linea esistente nonché di approccio ai viadotti sono stati predisposti opportuni fornici di trasparenza idraulica.

Nel tratto da progr. 0+550 a 1+550 circa, si prevedono i seguenti interventi:

- a) nuovo viadotto VI05 di scavalco del Fosso Torale e del Fosso Zambrigliana
- b) sistemazione e riprofilatura dell'alveo dei fossi Torale e Zambrigliana secondo manufatti a U in massi/pietrame cementati in corrispondenza del viadotto VI05 (rif. NF0Q02F12PZID0002004)
- c) deviazione del Fossetto delle Sedici (in relazione al nuovo sedime della viabilità NV11 di accesso al piazzale PT05)
- d) tombino scatolare 3m x 2m sul Fossetto delle Sedici
- e) deviazioni locali del Fosso della Mattinga (a monte e a valle della strada SR206) per interferenza con le pile del viadotto VI05

Di seguito, lo stralcio della planimetria di progetto, con indicati gli interventi sopra descritti. Si riporta anche il prospetto del viadotto VI05 in corrispondenza dei fossi Torale e Zambrigliana.

Implementati tali interventi nel modello 2D, si è proceduto alla simulazione numerica bidimensionale della propagazione delle piene nello scenario post operam.

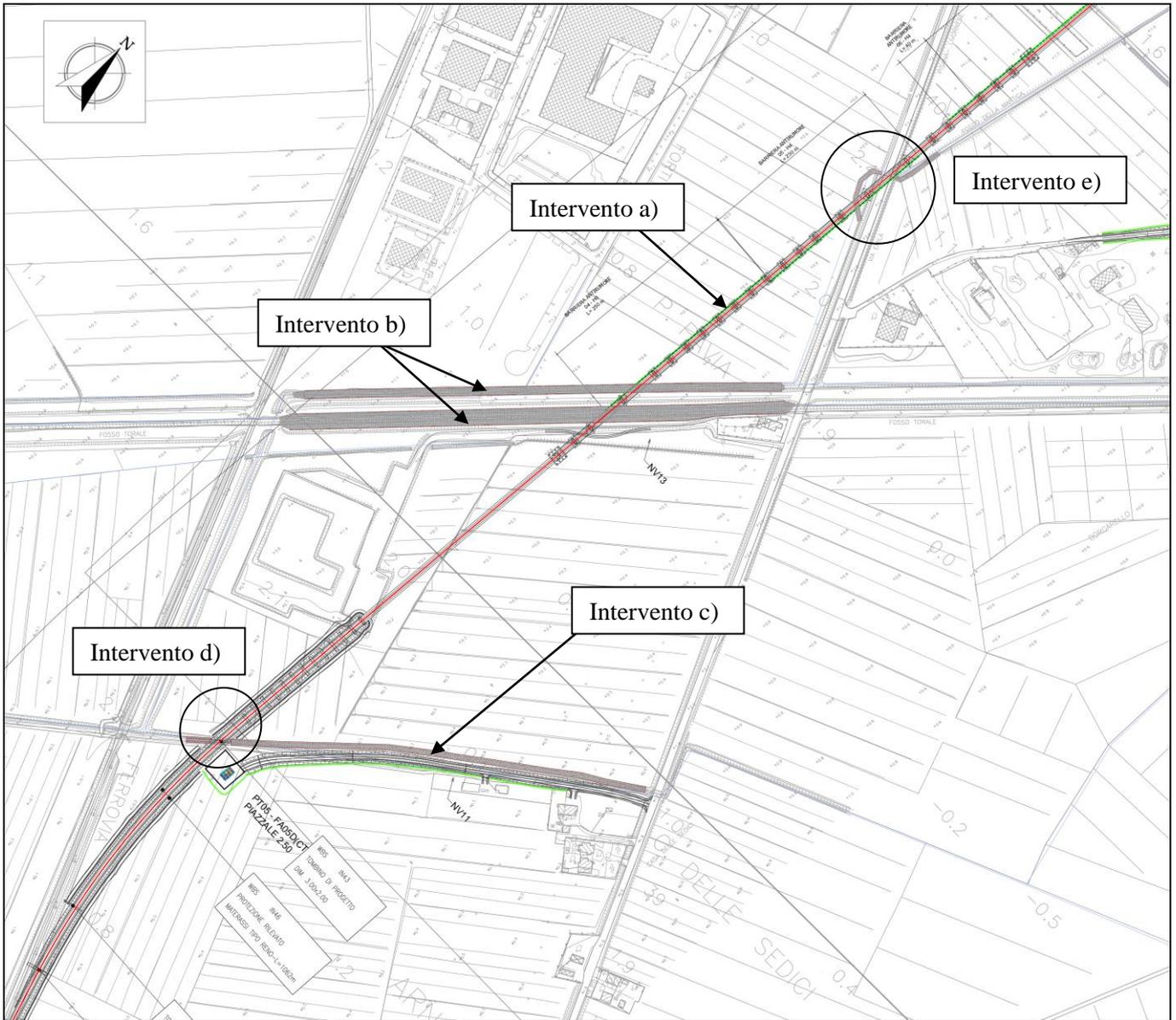


Fig. 11 – Stralcio della planimetria di progetto nell'area di studio.

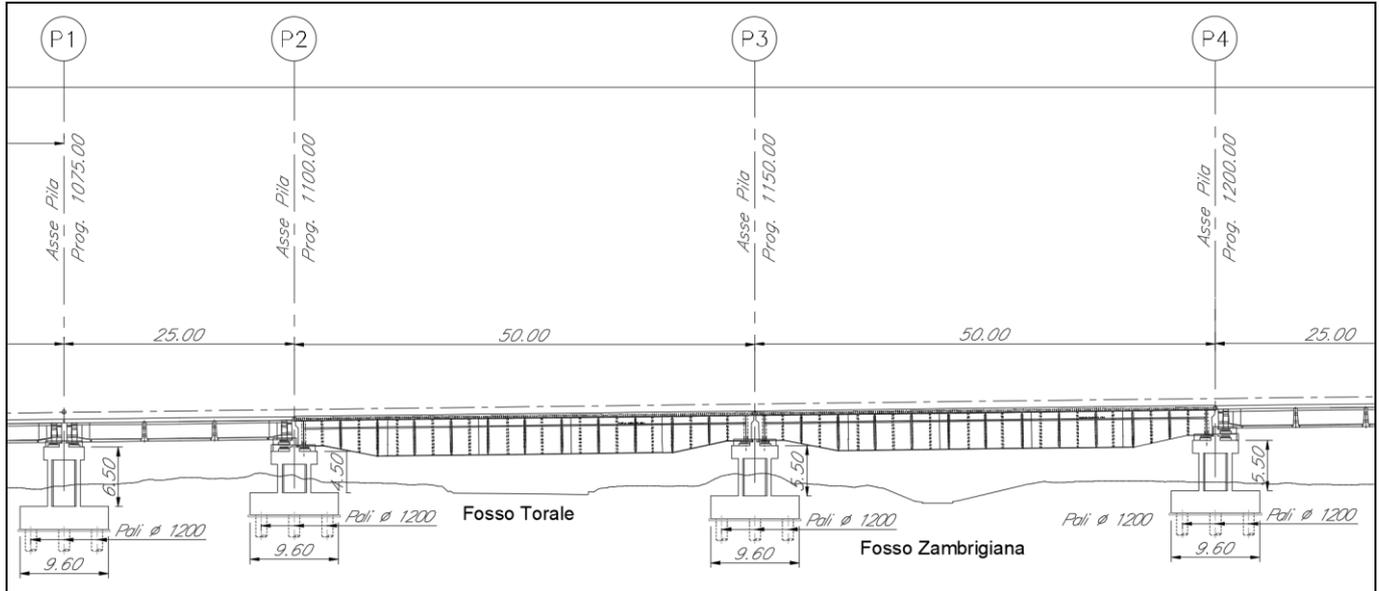


Fig. 12 – Stralcio del prospetto del viadotto VI05 in corrispondenza dell'attraversamento dei fossi Torale e Zambrigliana.

Come mostrato nella figura seguente, non si osservano variazioni significative, in termini di livelli idrici ed estensione, delle aree potenzialmente inondabili, nel tratto di studio, tra le due configurazioni, ante operam e post operam (o al limite, piccoli incrementi da un lato contestuali a piccole riduzioni dall'altro, tanto da bilanciarsi, comunque in aree già a pericolosità idraulica elevata e con tiranti idrici su p.c. molto modesti).

La viabilità NV11 e il piazzale annesso (PT05) non sono soggetti ad allagamento; il relativo profilo altimetrico e/o quota di calpestio sono superiori ai livelli idrici che si attestano nelle aree limitrofe, con un franco idraulico di circa 1m (rispetto alla quota di piano stradale).

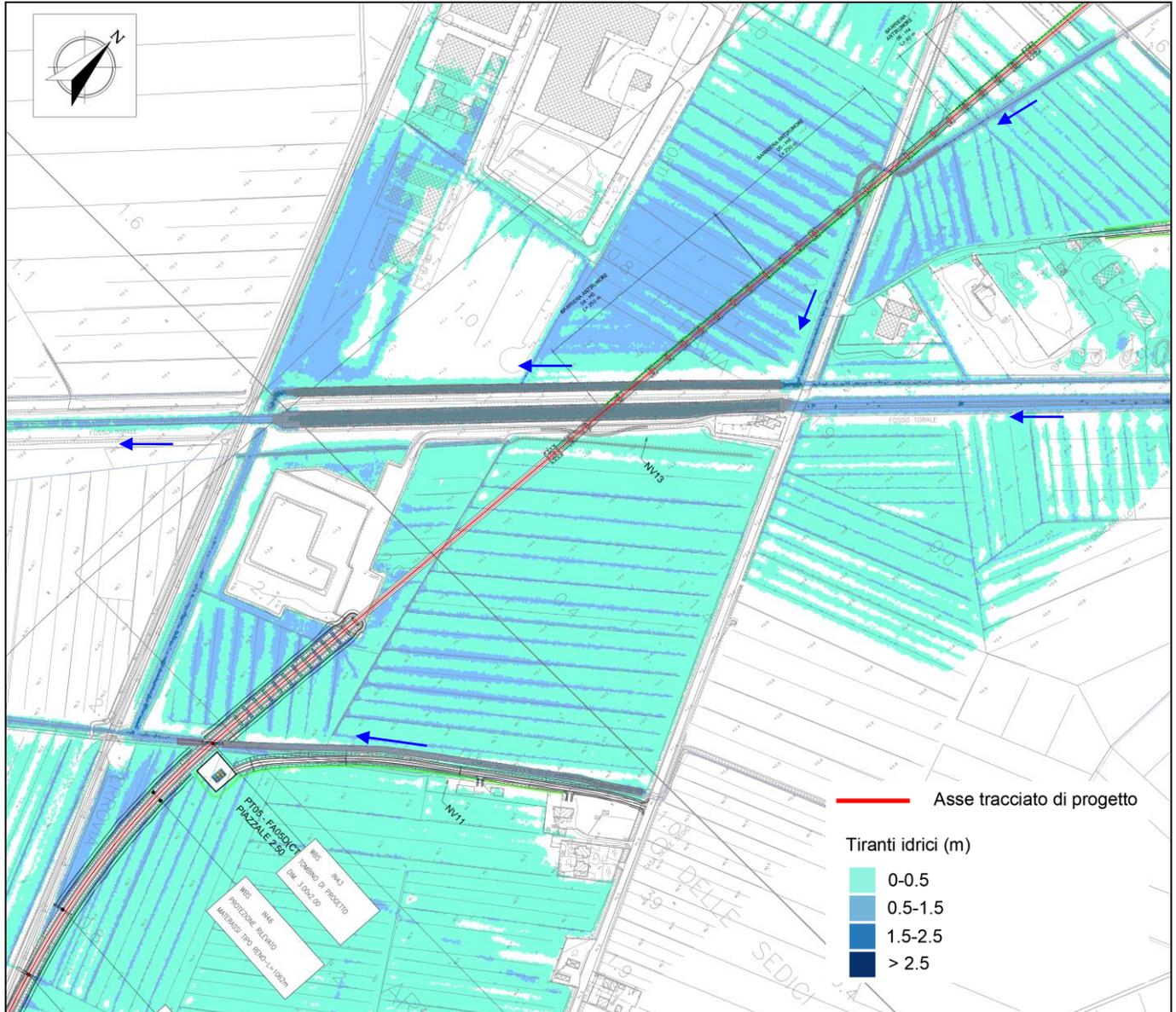


Fig. 13 – Modello numerico 2D, Fosso Torale: aree potenzialmente inondabili, Tr200, post operam.

4.5 Verifica del franco idraulico di progetto

La verifica del franco idraulico di progetto eseguita secondo le normative vigenti (i.e. NTC2018 e MdP RFI 2020) dimostra la compatibilità idraulica del nuovo viadotto VI05 sui fossi Torale e Zambrigiana, come riportato nelle tabelle seguenti.

Quota impalcato [m slm]	Livello di piena [m slm]	Carico totale [m slm]	Franco minimo sul livello idrico [m]	Franco minimo sul carico totale [m]	Verifica
+3.80	+1.30	+1.35	+2.50 (> 1.50 m)	+2.45 (> 0.50 m)	OK

Tab. 3 – Viadotto VI05: verifica del franco idraulico di progetto.

La scansione delle pile assegnata al viadotto VI05 (campate con luce da 50 m) è tale per cui, a seguito anche delle opere di riprofilatura in progetto, le medesime pile non interessano l'alveo dei due corsi d'acqua attraversati.

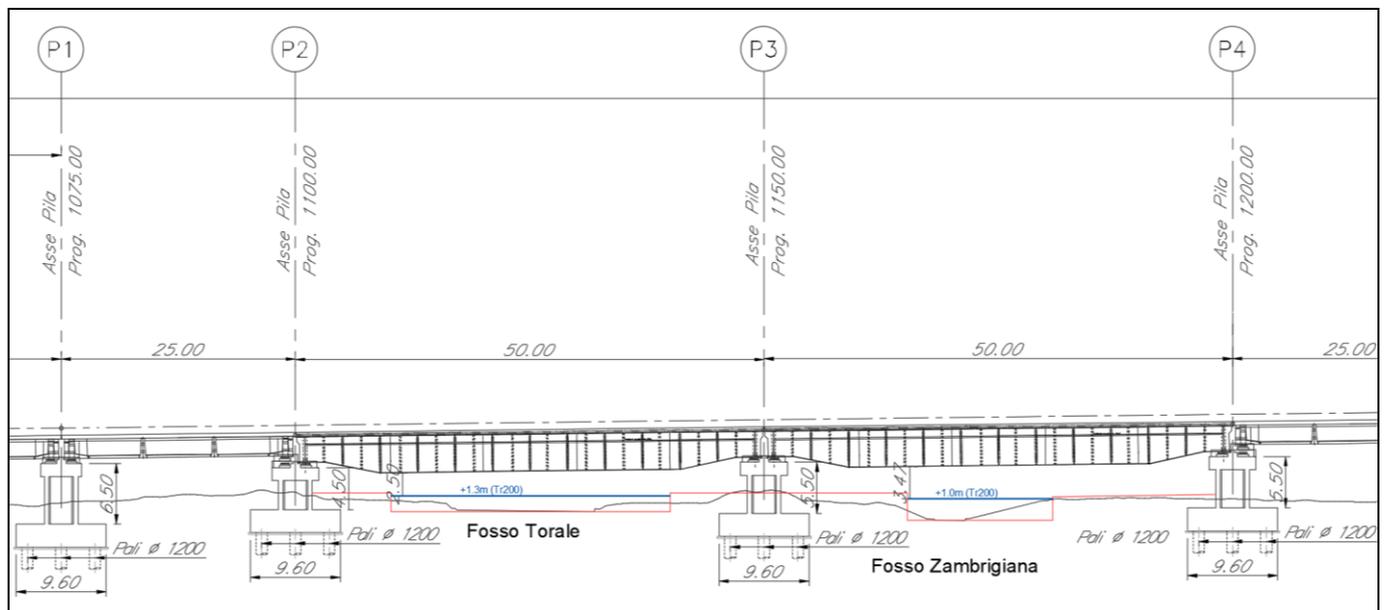


Fig. 14 – Prospetto del viadotto VI05 con livelli idrici di riferimento (Tr200) e riprofilature dell'alveo in progetto.

Con riferimento al tombino scatolare 3m x 2m previsto sul Fossetto delle Sedici, rispetto alle simulazioni bidimensionali condotte, risulta idraulicamente verificato con un grado di riempimento pari al 65%.

	LINEA PISA – COLLESALVETTI - VADA Collegamento dell'Interporto di Guasticce con la linea Pisa-Vada ed interconnessione della linea Pisa-Vada con la linea Firenze-Pisa Interconnessione della linea Pisa – Vada con la linea Firenze-Pisa PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
	RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA	COMMESSA NF0Q	LOTTO 02 F 11	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A

5. VALUTAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA DELLE OPERE IN PROGETTO

Lo studio di compatibilità idraulica è stato redatto secondo quanto previsto dalla Disciplina di Piano del PGRA, nonché dalle normative nazionali di riferimento.

Nello specifico, il viadotto VI05 è caratterizzato da luci e franchi nel rispetto della normativa vigente. E' rispettato infatti il franco minimo di 1,5 metri nei confronti del livello idrico corrispondente alla piena di progetto (Tr200), e pile/spalle/rilevati non interessano l'alveo (a seguito della riprofilatura in progetto) dei corsi d'acqua attraversati.

Il confronto tra i risultati in termini di aree potenzialmente inondabili, livelli idrici e velocità, ottenuti nelle simulazioni numeriche bidimensionali effettuate, non ha evidenziato differenze significative tra le configurazioni ante operam e post operam.

E' rispettata anche la prescrizione di 1 m di franco tra piano di regolamento e livello idrico di progetto ($Tr = 200$ anni) per rilevati ferroviari interessati dalle esondazioni, riportata nel Manuale di Progettazione Ferroviaria (MdP RFI).

Le opere in progetto inoltre *“rispettano il vincolo di non aumentare il livello di pericolosità e di rischio esistente”*.

Pertanto, è dimostrata la compatibilità idraulica delle opere di attraversamento (nel tratto ferroviario 0+550.00 – 1+550.00, i.e. VI05), dell'infrastruttura ferroviaria, nonché delle opere annesse (i.e. fabbricati, viabilità, in particolare la NV11 di accesso al piazzale PT05, con almeno 1 metro di franco tra livelli idrici Tr200 nelle aree adiacenti allagabili e piano stradale,...), in termini sia di franco di sicurezza sia di possibile interferenza con le aree potenzialmente inondabili.

	LINEA PISA – COLLESALVETTI - VADA Collegamento dell'Interporto di Guasticce con la linea Pisa-Vada ed interconnessione della linea Pisa-Vada con la linea Firenze-Pisa Interconnessione della linea Pisa – Vada con la linea Firenze-Pisa PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
	RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA	COMMESSA NF0Q	LOTTO 02 F 11	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A

6. BIBLIOGRAFIA

Da Deppo L., Datei C., Fognature, Edizioni Libreria Cortina, Padova, 2005.

Da Deppo L., Datei C., Salandin P., Sistemazione dei corsi d'acqua, Edizioni Libreria Cortina, Padova, 2004.

Ferro V., *La sistemazione dei bacini idrografici*, McGraw-Hill, Milano, 2006.

Ghetti A., *Idraulica*, Edizioni Libreria Cortina, Padova, 1996.

Lo Bosco D., Leonardi G., Scopelliti F., *Il dimensionamento delle opere idrauliche a difesa del corpo stradale*, Quaderno di Dipartimento - Serie Didattica, Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria, 2002.

Maione U., *Appunti di idrologia 3. Le piene fluviali*, La Goliardica Pavese, 1977

Marani M., *Processi e modelli dell'Idrometeorologia*, Dispense, 2005.

Ven Te Chow, *Open-channel hydraulics*, McGraw-Hill Book Company, USA, 1959.