

Regione Toscana - Giunta Regionale

Direzione Mobilità, infrastrutture e trasporto pubblico locale

Settore Viabilità regionale ambiti Arezzo, Siena e Grosseto. Programmazione risanamento acustico

Direttore: Ing. Enrico Becattini

Dirigente: Ing. Sandra Grani

Provincia di Grosseto Comune di Civitella Paganico

SR 64 del Cipressino

Intervento 1 - Stralcio 4 - Intervento di adeguamento in sede del ponte sul
Lanzo e sistemazione idraulica del torrente in adiacenza al ponte

RESPONSABILE UNICO DEL PROGETTO

Ing. Sandra Grani

SUPPORTO AMMINISTRATIVO AL RUP:

Dott.ssa Daniela Germani

Dott. Luca Arrigucci

PROGETTAZIONE STRUTTURALE:

Dott. Ing. Domenico Mazzilli

Dott. Ing. Luca Stocchi

ASPETTI GEOLOGICI e GEOTECNICI:

Geol. Riccardo Martelli

PROGETTAZIONE IDRAULICA:

Ing. Giacomo Gazzini (Hydrogeo Ingegneria s.r.l.)

ASPETTI PAESAGGISTICI:

Ing. Giacomo Gazzini (Hydrogeo Ingegneria s.r.l.)

C.S.P.:

Ing. Giacomo Gazzini (Hydrogeo Ingegneria s.r.l.)

PROGETTISTA:

Dott. Ing. Domenico Mazzilli

CONSULENTI:

Dott. Ing. Luca Stocchi

e

HYDROGEO
INGEGNERIA



Via Aretina 167/B - 50136 Firenze
Tel 055 6587050 - P.IVA 05142000487
e-mail: info@studiohydrogeo.it - pec: info@pec.hydrogeoingegneria.com

PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO-ECONOMICA

PFTE_B_ELABORATI SPECIALISTICI

V001

B- ELABORATI SPECIALISTICI

RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA

TAVOLA

B.01.01

SCALA

FORMATO

DATA Giugno 2025

Indice generale

1. PREMESSA	4
2. AREA D'INDAGINE E QUADRO CONOSCITIVO	5
2.1 CORSI D'ACQUA OGGETTO DI STUDIO E RILIEVI TOPOGRAFICI	7
3. APPROCCIO METODOLOGICO	9
3.1 MODELLAZIONE ANALITICA	9
4. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO	10
4.1 CODIFICA DEI BACINI	11
4.2 INPUT PLUVIOMETRICI	12
4.3 PARAMETRI IDROLOGICI	15
4.4 RISULTATI DELLA MODELLISTICA IDROLOGICA	15
5. IMPLEMENTAZIONE MODELLO IDRAULICO	18
5.1 MODELLAZIONE ANALITICA	18
5.1.1 Caratterizzazione geometrica dei corsi d'acqua e dell'area di studio	18
5.1.2 Condizioni al contorno	19
5.1.3 Parametri del modello idraulico	20
5.2 MODELLAZIONE DEGLI INTERVENTI DI PROGETTO	21
5.3 MODELLAZIONE DELLA CANTIERIZZAZIONE	22
5.4 RISULTATI DELLA MODELLAZIONE IDRAULICA	23
5.4.1 Risultati stato attuale	24
5.4.2 Risultati stato progetto	26
5.4.3 Risultati stato progetto cantiere	28
5.5 VERIFICA INTERFERENZE CON IL PONTE FERROVIARIO	30
6. CONCLUSIONI	32
APPENDICE A: MODELLISTICA IDROLOGICO-IDRAULICA	33
A.1 MODELLISTICA IDROLOGICA	34
A.1.1 Regime pluviometrico – Studio Regionale LSPP	34
A.1.2 Calcolo della pioggia di progetto su un bacino idrografico	34
A.1.3 Calcolo degli idrogrammi di progetto	34
A.2 MODELLISTICA IDRAULICA	38
APPENDICE B: TABULATO DEI RISULTATI	39
B.1 TABULATO DEI RISULTATI	40
B.1.1 Stato attuale	40
B.1.2 Stato progetto	41
B.1.3 Stato progetto cantiere	41
APPENDICE C: LIBRETTO SEZIONI CON LIVELLI MASSIMI	42

Indice delle tabelle

Tabella 2-1 Coordinate Gauss Boaga (EPSG 3003) per individuazione del ponte oggetto di indagine.....	5
Tabella 4-1: Codifiche dei bacini e sottobacini oggetto di analisi idrologica	12
Tabella 4-2: Altezze di pioggia lorda (mm) per eventi con tempo di ritorno TR 30 anni e durate di pioggia variabili [0.5-6h]	14
Tabella 4-3: Altezze di pioggia lorda (mm) per eventi con tempo di ritorno TR 200 anni e durate di pioggia variabili [0.5-6h]	14
Tabella 4-4: Tabella di riepilogo dei parametri idrologici utilizzati nella modellazione afflussi-deflussi di Nash e nel modello di infiltrazione a soglia.	15
Tabella 4-5: Elenco dei bacini e degli input idrologici alla modellazione idraulica analitica	16
Tabella 4-6: Portate massime [mc/s] TR 30 anni in input al modello idraulico analitico	16
Tabella 4-7: Portate massime [mc/s] TR 200 anni in input al modello idraulico analitico	17
Tabella 5-1 Livelli massimi F. Ombrone GR Studio Paris	19
Tabella 5-2: Valori del coefficiente di Manning associati alle sezioni fluviali	20
Tabella 5-3 Livelli massimi attesi [m slm] per eventi con durata 4.5 h e tempi di ritorno 30,200 anni sulle sezioni di indagine del ponte per le tre geometrie.....	24
Tabella 5-4 Viste da valle del ponte ferroviario	30
Tabella 5-5 Immagine di Google Earth del ponte ferroviario visto da valle	30
Tabella 5-6 Livelli massimi attesi [m slm] per eventi con durata 4.5 h e tempo di ritorno 200 anni sulla sezione corrispondente al ponte ferroviario per le tre geometrie	31
Tabella 6-1 Franchi di sicurezza in corrispondenza del ponte oggetto di studio	32

Indice delle figure

Figura 2-1: Inquadramento geografico del comune di Civitella Paganico	5
Figura 2-2 Inquadramento dell'area di intervento e reticolo idrografico ai sensi della L.R. n. 79/2012 nelle pertinenze dell'area di intervento	5
Figura 2-3 Inquadramento dell'area oggetto di studio all'interno della CTR.....	6
Figura 2-4 Planimetria delle tracce delle sezioni oggetto di rilievo allo stato attuale.....	7
Figura 2-5 Sezione rilevata a monte del ponte in esame	7
Figura 2-6 Sezione rilevata a valle del ponte in esame.....	8
Figura 2-7 Scansione laser 2D a monte del ponte in esame.....	8
Figura 2-8 Scansione laser 2D a valle del ponte in esame	8
Figura 5-1 Geometria del modello idraulico implementato per il caso di studio	18
Figura 5-2 Tracce delle sezioni rilevate in corrispondenza del ponte sull'asta fluviale del Torrente Lanzo, aggiunte al modello idraulico dello Studio Idrologico Idraulico di supporto al Piano Strutturale Intercomunale dei Comuni di Civitella Paganico, Cinigiano e Campagnatico (HEC-RAS)	19
Figura 5-3 Stato di Progetto: Sezione tipologica degli interventi di consolidamento della pila centrale e sistemazione idraulica delle sponde del T.Lanzo nel tratto di adiacenza al ponte	21
Figura 5-4 Modellazione su HEC-RAS delle tre Obstructions rappresentative: Scogliera in destra idraulica (rosso) e allargamenti della fondazione a destra (rosa) e sinistra (giallo) della pila centrale del ponte.....	22
Figura 5-5 Prospetto ingombro del ponteggio per i lavori di consolidamento del ponte sul T.Lanzo	22
Figura 5-6 Sezione ingombro del ponteggio per i lavori di consolidamento del ponte sul T.Lanzo.....	23
Figura 5-7 Modellazione su HEC-RAS del ponteggio, inserito come elemento Bridge e della scogliera in destra idraulica come elemento Obstruction	23
Figura 5-8: Risultati in termini di tiranti idrici nella sezione 00301PB25 di filo monte del ponte su T.Lanzo allo Stato Attuale (evento TR200 anni d=4.5h).....	24
Figura 5-9 Risultati in termini di tiranti idrici nella sezione 23.5 BR U del ponte su T.Lanzo allo Stato Attuale (evento TR200 anni d=4.5h)	24
Figura 5-10 Risultati in termini di tiranti idrici nella sezione 00301PC25 del ponte su T.Lanzo allo Stato Attuale (evento TR200 anni d=4.5h)	25
Figura 5-11 Risultati in termini di tiranti idrici nel profilo longitudinale del reach LANZO contenente il ponte in esame allo Stato Attuale (evento TR200 anni d=4.5h).....	25
Figura 5-12: Risultati in termini di tiranti idrici nella sezione 00301PB25 di filo monte del ponte su T.Lanzo	26
Figura 5-13 Risultati in termini di tiranti idrici nella sezione 23.5 BR U del ponte su T.Lanzo.....	26
Figura 5-14: Risultati in termini di tiranti idrici nella sezione 00301PC25 di filo monte del ponte su T.Lanzo	27
Figura 5-15 Risultati in termini di tiranti idrici nel profilo longitudinale del reach LANZO contenente il ponte in esame allo Stato Progetto (evento TR200 anni d=4.5h).....	27
Figura 5-16: Risultati in termini di tiranti idrici nella sezione 00301PB25 di filo monte del ponte su T.Lanzo	28
Figura 5-17 Risultati in termini di tiranti idrici nella sezione 23.5 BR U del ponte su T.Lanzo.....	28
Figura 5-18: Risultati in termini di tiranti idrici nella sezione 00301PC25 di filo monte del ponte su T.Lanzo	29

Figura 5-19 Risultati in termini di tiranti idrici nel profilo longitudinale del reach LANZO contenente il ponte in esame allo Stato Progetto Cantiere (evento TR200 anni $d=4.5h$)	29
Figura 5-20 Individuazione del ponte ferroviario rispetto al ponte oggetto di studio	31
Figura 5-21 Verifica interferenze con ponte ferroviario nel tratto a monte del ponte in esame (riquadrate in rosso la zona relativa al ponte ferroviario)	31

1. PREMESSA

La presente relazione si pone lo scopo di descrivere le analisi idrauliche relative al ponte, situato lungo la SRT 64 Cipressino in provincia di Grosseto in attraversamento del Torrente Lanzo all'altezza della Stazione ferroviaria di Civitella Paganico, in località Paganico, frazione del comune di Civitella Paganico.

Lo studio si propone di individuare il massimo livello che si instaura in alveo in corrispondenza del ponte all'occorrenza di eventi meteorici con tempi di ritorno pari a 30 e 200 anni, a seguito degli interventi di consolidamento del ponte e della sistemazione idraulica del Torrente Lanzo nel tratto in adiacenza allo stesso.

Ai fini della redazione del presente studio, è stato considerato come riferimento lo Studio Idrologico Idraulico di supporto al Piano Strutturale Intercomunale dei Comuni di Civitella Paganico, Cinigiano e Campagnatico, finalizzato all'aggiornamento delle mappe di pericolosità idraulica sul reticolo minore afferente al territorio dei Comuni di Civitella Paganico e Cinigiano, su affidamento del Comune di Civitella Paganico con Determinazione n. 30 del 20.12.2018 e del Comune di Cinigiano con Determinazione n. 5 del 09.04.2019. Da questo sono stati esclusi i contributi di non interesse ai fini dell'analisi idraulica del ponte sul Torrente Lanzo.

Il lavoro si articola nelle seguenti fasi operative:

- individuazione e caratterizzazione dell'ambito fisico oggetto di studio: raccolta ed analisi dei dati disponibili, caratterizzazione topografica dei corsi d'acqua;
- modellazione idrologica;
- modellazione idraulica.

2. AREA D'INDAGINE E QUADRO CONOSCITIVO

Nel presente capitolo sono descritti gli ambiti di indagine ed i dati raccolti a supporto delle analisi di cui al presente elaborato.

Il ponte oggetto di indagine è individuabile dalle coordinate nel sistema Gauss-Boaga riportate nella seguente Tabella.

	Est	Nord
Coordinate Gauss-Boaga (EPSG 3003)	1687328.861	4757010.660

Tabella 2-1 Coordinate Gauss Boaga (EPSG 3003) per individuazione del ponte oggetto di indagine

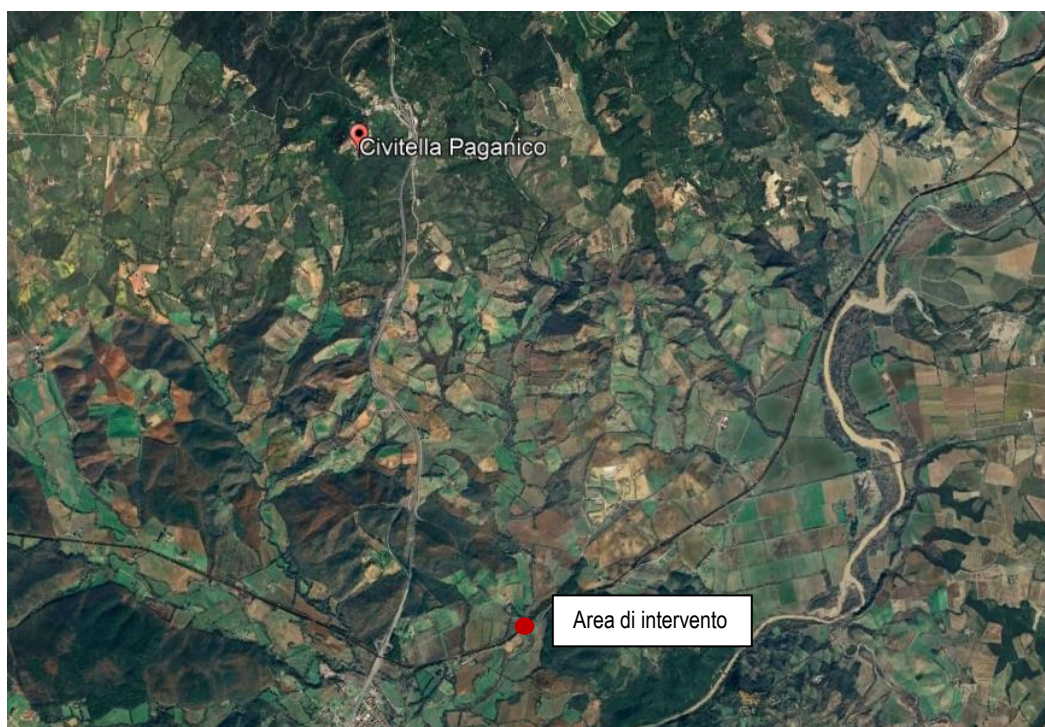


Figura 2-1: Inquadramento geografico del comune di Civitella Paganico

Il sito in esame è localizzato sulla SP64 "Cipressino" tra il Km 3+049 e 3+107, circa 2Km a NE dall'abitato cittadino di Civitella Paganico, alla quota altimetrica di 74.4 m s.l.m.. Il sito si trova in un settore semi pianeggiante, le variazioni di pendenza più significative sono da ricondurre agli argini naturali del Torrente Lanzo, che scorre al di sotto del ponte oggetto di studio.



Figura 2-2 Inquadramento dell'area di intervento e reticolo idrografico ai sensi della L.R. n. 79/2012 nelle pertinenze dell'area di intervento

L'area è individuata nella carta tecnica CTR in scala 1:10000 della Regione Toscana e ricade all'interno della sezione 319080.



Figura 2-3 Inquadramento dell'area oggetto di studio all'interno della CTR

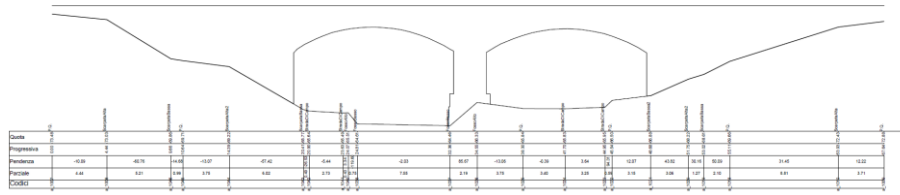


Figura 2-6 Sezione rilevata a valle del ponte in esame

Si riportano di seguito anche le scansioni laser 2D del ponte.

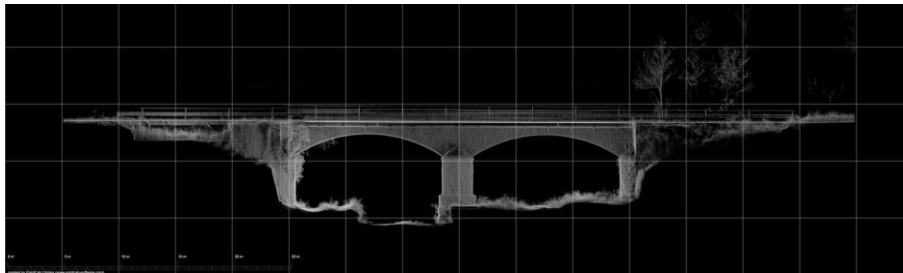


Figura 2-7 Scansione laser 2D a monte del ponte in esame

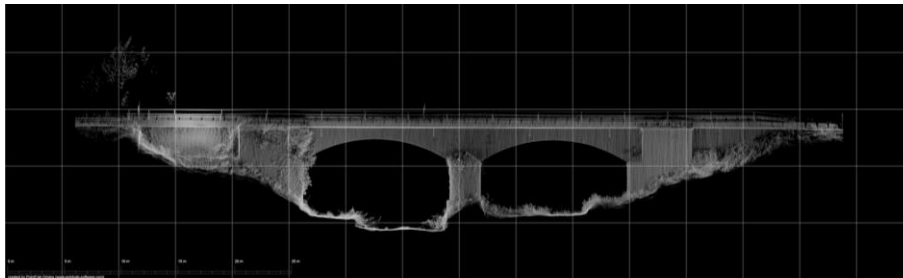


Figura 2-8 Scansione laser 2D a valle del ponte in esame

In *Allegato* si riporta la Tavola IDR.A.02.04_Modello_Idraulico_Planimetria_rC, Planimetria del Modello idraulico completo dello Studio Idrologico Idraulico di supporto al Piano Strutturale Intercomunale dei Comuni di Civitella Paganico, Cinigiano e Campagnatico.

Il tratto indagato nell'ambito della presente analisi è costituito da una estensione totale pari a circa 11 km, dovuta ai tratti di circa 9 km del Torrente Lanzo e 2 km del Fosso Colle.

3. APPROCCIO METODOLOGICO

Lo schema metodologico adottato si basa essenzialmente su criteri analitici che, partendo dagli eventi di precipitazione, conducono alla definizione delle aree soggette ad inondazione attraverso la simulazione dei fenomeni di formazione e propagazione dell'onda di piena.

Le sollecitazioni idrologiche al sistema, costituite in generale da eventi caratterizzati da intensità di pioggia variabili nel tempo e nello spazio e dalle "condizioni iniziali" del bacino idrografico, sono state ricavate prendendo a riferimento, come detto in precedenza; lo Studio Idrologico Idraulico di supporto al Piano Strutturale Intercomunale dei Comuni di Civitella Paganico, Cinigiano e Campagnatico

La propagazione dei deflussi di piena così generati avviene tramite modelli idraulici, in grado di fornire in ogni sezione dell'asta fluviale l'idrogramma di piena in transito ed il massimo battente idraulico atteso.

La tipologia di modello idraulico adottata è di tipo monodimensionale in moto vario, per la modellazione idraulica in alveo. Gli alvei dei corsi d'acqua vengono modellati attraverso l'inserimento delle sezioni trasversali, ricostruite a partire dai rilievi topografici eseguiti per lo Studio Idrologico Idraulico di supporto al Piano Strutturale Intercomunale dei Comuni di Civitella Paganico, Cinigiano e Campagnatico e comprensive di tutte quelle strutture che interferiscono con il deflusso di piena, a cui sono state inserite le due sezioni di interesse a filo monte e filo valle del ponte oggetto di esame mostrate al paragrafo 2.12.1

3.1 MODELLAZIONE ANALITICA

L'approccio modellistico per la caratterizzazione della pericolosità idraulica di tipo "analitico" prevede una modellazione idraulica 1D con input idrologici derivanti dall'analisi idrologica e dati geometrici derivanti da rilievo topografico e/o rilievo Lidar. L'input idrologico è caratterizzato da idrogrammi di piena rappresentati da immissioni puntuali e distribuite lungo l'asta fluviale analizzata. Tale approccio modellistico, in cui viene studiata in dettaglio la propagazione dell'onda di piena lungo il reticolo fluviale è definito "*Modellazione Analitica*".

A tal fine, nello Studio Idrologico Idraulico di supporto al Piano Strutturale Intercomunale dei Comuni di Civitella Paganico, Cinigiano e Campagnatico sono stati implementati 3 modelli idraulici distinti:

Il primo (denominato **Modello A**) ricomprende:

- L'asta principale del Torrente Gretano, da monte del ponte sulla S.P. n.21 del Terzo alla confluenza in Ombrone Grossetano, ed un suo affluente in destra idraulica in loc. Le Pianacce;
- l'asta principale del Torrente Lanzo, dalla loc. Molino di Sotto alla confluenza in Ombrone Grossetano e del suo affluente, Fosso Colle;
- il Fosso delle Lupaie ed i suoi principali affluenti, Fosso Fogna e Fosso Rigo.

Sono stati inoltre sviluppati altri due modelli idraulici analitici di dettaglio che ricomprendono:

- **Modello B:** l'asta principale del Torrente Lanzo ed il suo affluente in destra idrografica, Fosso Martineta, in loc. Podere San Lorenzo;
- **Modello C:** l'asta principale del Fosso Vallanzo, da monte della confluenza del Fossetto fino all'immissione nel Fiume Orcia.

Tra questi, per il presente studio, è stato implementato il solo **Modello A**, contenente le aste di interesse del Torrente Lanzo e del Fosso Colle, escludendo gli altri.

Gli scenari simulati riguardano eventi con tempi di ritorno pari a 30 e 200 anni. Le durate di pioggia simulate 0,5, 1,5, 3,0, 4,5 e 6 ore, risultanti dalla modellistica idrologica, sono le durate critiche che massimizzano le portate di piena ed i volumi dei bacini dei corsi d'acqua principali e dei reticoli minori, nonché la loro mutua interazione.

4. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO

I modelli idrologici utilizzati consentono la determinazione dei contributi idrologici al reticolo idraulico oggetto di studio e sono composti da un modello di infiltrazione, per il calcolo delle perdite idrologiche, e da un modello afflussi-deflussi per la trasformazione degli input pluviometrici, depurati dalle perdite succitate, in idrogrammi sollecitanti il reticolo idraulico.

Date le caratteristiche morfologiche ed idrologiche del territorio in esame, sono stati utilizzati i seguenti modelli idrologici:

- Metodo dell'Infiltrazione a Soglia: per la stima delle perdite idrologiche (calcolo delle piogge nette);
- Modello di Nash a parametri concentrati: per la stima degli idrogrammi di piena.

Il modello di infiltrazione asintotico a soglia richiede la stima di due parametri:

- I_a (mm), volume unitario di perdita iniziale che il terreno assorbe durante i primi istanti di precipitazione;
- K_s (mm/h), coefficiente di infiltrazione a saturazione.

La stima di tali parametri deriva dall'analisi delle carte dell'uso del suolo e della geologia.

Il modello di trasformazione afflussi-deflussi di Nash schematizza i bacini idrografici in una serie di serbatoi lineari disposti in serie e che dipende dai seguenti parametri:

- n (-), numero di serbatoi lineari che rappresentano il bacino nella schematizzazione del modello di Nash;
- k (h), tempo caratteristico che rappresenta il tempo di svuotamento del serbatoio.

Tali parametri sono stati ottenuti mediante

Tali parametri geomorfologici permettono di rappresentare lo sviluppo della rete idrografica mediante una descrizione gerarchica e possono essere calcolati ordinando il reticolo idrografico secondo il metodo di gerarchizzazione e classificazione geomorfologica di Horton e Strahler.

Per i dettagli sulla modellistica idrologica si rimanda all'

Appendice A: Modellistica idrologico-idraulica.

A valle della parametrizzazione idrologica sono state determinate le piogge insistenti su ogni bacino (piogge lorde, non depurate dalle perdite), come riportato al Paragrafo 4.2

Osservando sperimentalmente le piogge intense è possibile affermare che, all'interno di una certa area, l'intensità di precipitazione durante l'evento piovoso varia da punto a punto, anche in maniera sensibile, e questa variazione è tanto maggiore quanto maggiore è l'estensione dell'area considerata. Per questo alla precipitazione lorda, calcolata rispetto alla sezione di calcolo, è stato applicato un coefficiente di ragguaglio dipendente dall'area del bacino e dalla durata dell'evento, in linea con la trattazione riportata nella Regionalizzazione delle Portate di Piena della Regione Toscana, secondo la seguente formulazione:

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

dove t è la durata dell'evento, A è l'area del bacino sotteso e α , β , γ sono parametri dipendenti dal bacino considerato.

Il coefficiente di ragguaglio dipende quindi dallo scenario idrologico considerato.

Nello specifico, nel modello analitico completo dello Studio Idrologico Idraulico di supporto al Piano Strutturale Intercomunale dei Comuni di Civitella Paganico, Cinigiano e Campagnatico, le simulazioni idrauliche hanno mirato, in linea generale, a massimizzare gli effetti a livello di bacino, per cui per ciascun bacino imbrifero principale (Torrente Gretano, Torrente Lanzo, sistema Fogna-Rigo-Lupaie, Torrente Vallanzo) gli input pluviometrici sono stati stimati impiegando un K_r calcolato su un areale pari all'estensione dell'intero bacino idrografico di appartenenza. Fanno eccezione alcuni contributi relativi ad affluenti/sottobacini minori (Torrente Lanzo in loc. Podere san Lorenzo, Fosso Pianacce, Fosso Martineta, Fosso Colle) per i quali, a favore di sicurezza, è stato invece impiegato un K_r determinato sull'area del bacino del singolo contributo (Tabella 4-5), in modo tale da massimizzare gli effetti di allagabilità degli stessi.

Le piogge nette sono state stimate a partire dai parametri I_a e K_s calcolati per ciascun sottobacino. A partire da tali input pluviometrici, sono stati stimati gli idrogrammi di piena con il modello di trasformazione afflussi deflussi di Nash.

4.1 CODIFICA DEI BACINI

I bacini afferenti all'area dello Studio Idrologico Idraulico di supporto al Piano Strutturale Intercomunale dei Comuni di Civitella Paganico, Cinigiano e Campagnatico sono stati suddivisi in sottobacini e studiati dal punto di vista idrologico tenendo conto dei tratti fluviali simulati idraulicamente e della presenza di contributi laterali al reticolo di interesse. Per ogni sottobacino è stato quindi determinato un input idrologico di natura puntuale o distribuita a seconda delle caratteristiche del bacino analizzato.

Sulla base di questo sono stati individuati bacini e sottobacini identificati da un codice di 4 caratteri, nel modo seguente:

- le prime due cifre rappresentano il codice del bacino di appartenenza;
- le ultime due cifre rappresentano l'eventuale presenza di sottobacini.

Nella tabella sottostante si riporta l'elenco dei bacini oggetto di analisi idrologica nel precedente studio (riportati in *Allegato alla Tavola IDR.A.02.01_Modello_Idrologico_Gerarchizzazione_rC*) riquadrando in rosso quelli di interesse per la presente analisi:

Nome	Codice	Area
GRETANO TOTALE	1000	104.4
GRETANO IDROMETRO	1001	32.9
GRETANO PIANACCE	1002	71.1
AFFLUENTE PIANACCE	1003	0.3
GRETANO PAGANICO	1004	103.3
ORSA	1005	8.1
MANDRIONE	1006	7.6
RINGHIERE	1007	11.7
GRETANESSA	1008	30.7
LANZO TOTALE	2000	60.7
LANZO SAN LORENZO	2001	41.4
AFFLUENTE SAN LORENZO	2002	0.4
COLLE	2003	1.7
LANZO MOLINO DI SOTTO	2004	47.1
VALLANZO TOTALE	3000	7.6
VALLANZO SANTA RITA	3001	4.4
FOSSETTO	3002	2.5
LUPAIE TOTALE	4000	38.4
FOGNA	4001	23.3
RIGO MERCATALE	4002	6.8
RIGO TOTALE	4003	30.3
LUPAIE PALUDE	4004	8.0
CARPINELLE	4005	15.8
LUPAIE IMPAGLIATURA	4006	4.6

Tabella 4-1: Codifiche dei bacini e sottobacini oggetto di analisi idrologica

4.2 INPUT PLUVIOMETRICI

Gli eventi meteorici studiati fanno riferimento a tempi di ritorno di 30 e 200 anni. Come durate di pioggia si è scelto di studiare un set di durate dell'evento meteorico sintetico a cavallo della "durata critica" (durata che massimizza la portata al colmo) di ciascun contributo idrologico.

L'aggiornamento dell'analisi di frequenza regionale delle precipitazioni estreme fino all'anno 2012, elaborata nell'ambito dell'Accordo di collaborazione tra Regione Toscana e Università di Firenze di cui alla DGRT 1133/2012 e pubblicata da parte della Regione Toscana, costituisce la base dati aggiornata su cui implementare le analisi idrologiche.

I risultati di tale studio hanno portato alla determinazione delle curve segnalatrici di possibilità pluviometrica (LSPP), cioè della relazione che lega l'altezza di precipitazione alla durata dell'evento meteorico che l'ha generata, per un assegnato tempo di ritorno.

La LSPP è comunemente descritta da una legge di potenza del tipo:

$$h(t) = a t^n$$

con: h = altezza di pioggia [mm]; t = durata [ore], a e n parametri caratteristici per i tempi di ritorno considerati.

In Tabella 4-2 e Tabella 4-3 sono riportate le altezze di pioggia lorda (in mm) calcolate secondo la metodologia individuata dalla Regione Toscana. Per ogni tempo di ritorno considerato sono riportate le altezze di pioggia al variare della durata dell'evento meteorico considerato, su ogni bacino/sottobacino oggetto del precedente studio individuato secondo la codifica descritta al paragrafo precedente.

Riquadrati in rosso i valori per i bacini di interesse per il presente studio.

Si rimanda all'

Appendice A: Modellistica idrologico-idraulica per maggiori dettagli sulla procedura di regionalizzazione.

Nome	Codice	Tr030_0050	Tr030_0150	Tr030_0300	Tr030_0450	Tr030_0600
GRETANO TOTALE	1000	50.0	66.4	79.5	88.3	95.2
GRETANO IDROMETRO	1001	49.8	67.5	81.8	91.6	99.2
GRETANO PIANACCE	1002	50.1	67.2	80.9	90.2	97.5
AFFLUENTE PIANACCE	1003	52.0	64.2	73.3	79.3	83.8
GRETANO PAGANICO	1004	50.0	66.4	79.6	88.4	95.3
ORSA	1005	50.2	68.0	82.5	92.3	100.0
MANDRIONE	1006	50.0	67.4	81.4	90.9	98.3
RINGHIERE	1007	50.5	67.0	80.0	88.8	95.7
GRETANESSA	1008	49.7	64.9	76.8	84.8	91.0
LANZO TOTALE	2000	48.7	64.0	76.0	84.1	90.3
LANZO SAN LORENZO	2001	48.5	64.8	77.8	86.5	93.4
AFFLUENTE SAN LORENZO	2002	48.4	64.1	76.6	85.1	91.6
COLLE	2003	50.1	62.3	71.4	77.4	81.9
LANZO MOLINO DI SOTTO	2004	48.5	64.6	77.4	86.1	92.8
VALLANZO TOTALE	3000	46.0	58.6	68.2	74.6	79.5
VALLANZO SANTA RITA	3001	46.1	58.7	68.4	74.8	79.7
FOSSETTO	3002	45.8	58.4	68.1	74.5	79.4
LUPAIE TOTALE	4000	49.0	64.4	76.6	84.8	91.1
FOGNA	4001	49.4	64.8	77.1	85.3	91.7
RIGO MERCATALE	4002	48.8	64.0	76.0	84.0	90.3
RIGO TOTALE	4003	49.2	64.6	76.8	85.0	91.3
LUPAIE PALUDE	4004	47.9	63.4	75.7	84.0	90.4
CARPINELLE	4005	48.5	65.2	78.7	87.8	94.9
LUPAIE IMPAGLIATURA	4006	47.9	63.5	75.8	84.1	90.6

Tabella 4-2: Altezze di pioggia lorda (mm) per eventi con tempo di ritorno TR 30 anni e durate di pioggia variabili [0.5-6h].

Nome	Codice	Tr200_0050	Tr200_0150	Tr200_0300	Tr200_0450	Tr200_0600
GRETANO TOTALE	1000	65.6	93.0	116.0	132.1	144.8
GRETANO IDROMETRO	1001	66.2	96.3	122.0	140.1	154.6
GRETANO PIANACCE	1002	66.1	95.0	119.4	136.5	150.1
AFFLUENTE PIANACCE	1003	64.0	81.7	95.4	104.5	111.4
GRETANO PAGANICO	1004	65.6	93.1	116.2	132.4	145.2
ORSA	1005	66.8	97.1	123.0	141.2	155.8
MANDRIONE	1006	66.5	96.2	121.4	139.1	153.1
RINGHIERE	1007	66.2	93.6	116.6	132.6	145.3
GRETANESSA	1008	64.5	89.5	110.2	124.5	135.8
LANZO TOTALE	2000	63.6	88.9	109.9	124.5	136.1
LANZO SAN LORENZO	2001	64.5	92.4	116.0	132.4	145.5
AFFLUENTE SAN LORENZO	2002	64.4	91.5	114.3	130.2	142.7
COLLE	2003	61.6	79.3	92.9	102.0	108.9
LANZO MOLINO DI SOTTO	2004	64.3	91.8	115.0	131.1	143.9
VALLANZO TOTALE	3000	56.5	74.6	88.8	98.4	105.8
VALLANZO SANTA RITA	3001	56.7	74.8	89.0	98.6	106.0
FOSSETTO	3002	56.3	74.4	88.6	98.2	105.6
LUPAIE TOTALE	4000	64.0	89.6	110.9	125.8	137.5
FOGNA	4001	64.1	89.6	110.8	125.5	137.1
RIGO MERCATALE	4002	63.7	89.0	110.1	124.7	136.2
RIGO TOTALE	4003	64.0	89.4	110.5	125.1	136.7
LUPAIE PALUDE	4004	63.7	90.3	112.7	128.3	140.6
CARPINELLE	4005	64.4	92.9	117.1	134.1	147.6
LUPAIE IMPAGLIATURA	4006	63.7	90.6	113.1	128.8	141.2

Tabella 4-3: Altezze di pioggia lorda (mm) per eventi con tempo di ritorno TR 200 anni e durate di pioggia variabili [0.5-6h].

4.3 PARAMETRI IDROLOGICI

Per tutti i sottobacini oggetto di analisi idrologica è stata effettuata una classificazione geomorfologica del reticolo fluviale secondo il criterio di Horton-Strahler (in Allegato la *Tavola IDR.A.02.01_Modello_Idrologico_Gerarchizzazione_rC*) e sono stati ottenuti i parametri geomorfologici k ed n .

Per la stima delle perdite è stato adottato il metodo di infiltrazione asintotico a soglia. Il parametro la (mm), su ogni bacino, è stato determinato in funzione della percentuale di area boscata presente nel bacino considerato (derivata dall'Uso e Copertura del Suolo, riferimento in Allegato la *Tavola IDR.A.02.03_Modello_Idrologico_Aree_Boscate_rC*).

Il parametro K_s (mm/h) è stato determinato a partire dalla Carta Geologica Regionale assegnando ad ogni formazione geologica un coefficiente di infiltrazione (riferimento in Allegato la *Tavola IDR.A.02.02_Modello_Idrologico_Coefficiente_Infiltrazione_rC*) e calcolando un coefficiente medio per ogni bacino.

I risultati delle parametrizzazioni appena descritte sono riportati in Tabella 4-4, evidenziando i valori per i bacini di interesse per il presente studio.

Nome	Codice	Area	la	K_s	n	k
GRETANO TOTALE	1000	104.4	14.887	1.840	3.096	1.052
GRETANO IDROMETRO	1001	32.9	20.144	3.066	3.008	0.727
GRETANO PIANACCE	1002	71.1	15.727	2.253	3.086	1.115
AFFLUENTE PIANACCE	1003	0.3	18.746	0.000	2.535	0.113
GRETANO PAGANICO	1004	103.3	14.969	1.860	3.010	1.283
ORSA	1005	8.1	8.970	2.216	2.690	0.663
MANDRIONE	1006	7.6	11.962	2.026	2.876	0.380
RINGHIERE	1007	11.7	16.215	1.862	3.034	0.575
GRETANESSA	1008	30.7	13.361	1.038	3.020	0.692
LANZO TOTALE	2000	60.7	18.299	2.472	3.129	1.647
LANZO SAN LORENZO	2001	41.4	22.504	2.140	3.067	1.012
AFFLUENTE SAN LORENZO	2002	0.4	10.295	1.764	3.067	0.090
COLLE	2003	1.7	11.487	0.518	2.358	0.245
LANZO MOLINO DI SOTTO	2004	47.1	21.087	2.121	3.097	1.170
VALLANZO TOTALE	3000	7.6	4.664	0.183	2.817	0.406
VALLANZO SANTA RITA	3001	4.4	4.655	0.240	2.875	0.316
FOSSETTO	3002	2.5	4.262	0.141	1.724	0.313
LUPAIE TOTALE	4000	38.4	17.566	1.237	3.041	0.814
FOGNA	4001	23.3	19.615	2.060	3.102	0.860
RIGO MERCATALE	4002	6.8	18.787	1.245	2.810	0.405
RIGO TOTALE	4003	30.3	19.313	1.861	3.087	0.895
LUPAIE PALUDE	4004	8.0	11.104	1.186	2.958	0.396
CARPINELLE	4005	15.8	21.516	2.676	2.996	0.546
LUPAIE IMPAGLIATURA	4006	4.6	11.069	1.300	2.872	0.270

Tabella 4-4: Tabella di riepilogo dei parametri idrologici utilizzati nella modellazione afflussi-deflussi di Nash e nel modello di infiltrazione a soglia.

4.4 RISULTATI DELLA MODELLISTICA IDROLOGICA

Per ognuna delle altezze di pioggia calcolate (caratterizzate da un tempo di ritorno e una durata dell'evento meteorico), opportunamente ragguagliate e depurate delle perdite idrologiche così come argomentato ai paragrafi precedenti, si sono determinati gli idrogrammi di piena su ciascuno bacino/interbacino di interesse utilizzato nella modellistica idraulica di tipo analitico.

Nella Tabella 4-5 si riporta l'elenco degli input idrologici (evidenziati anche in *Tavola IDR.A.02.04_Modello_Idraulico_Planimetria_rC*, per la localizzazione planimetrica delle sole immissioni puntuali), suddivisi per bacini e corsi d'acqua, utilizzati nella modellistica idraulica analitica. La tabella riporta il modello idraulico, i corsi d'acqua di riferimento, il tipo di immissione (CM identifica le condizioni al contorno di monte, CP i contributi puntuali inseriti lungo l'asta fluviale e CD i contributi distribuiti), il codice dell'immissione (codice alfanumerico in cui la prima cifra specifica la tipologia di contributo, bacino (B) o l'interbacino (I), e le altre 4 cifre rimandano alla codifica richiamata in Tabella 4-1), una descrizione sintetica, la/e sezione/i sollecitate e l'areale di riferimento utilizzato nel calcolo del coefficiente di ragguaglio KR.

Si ricorda tuttavia che tutti gli Allegati riguardano lo Studio Idrologico Idraulico di supporto al Piano Strutturale Intercomunale dei Comuni di Civitella Paganico, Cinigiano e Campagnatico, modello da cui sono state eliminate le aste fluviali di non interesse per il presente studio e dunque anche i relativi contributi.

I risultati dell'analisi idrologica sono sintetizzati in Tabella 4-6 e Tabella 4-7, in cui si riportano i valori di portata di picco stimati per gli scenari di evento su cui è stato cimentato il modello idraulico analitico e si evidenziano con un riquadro rosso i valori di interesse per la presente analisi.

MODELLO ANALITICO	CORSO D'ACQUA	TIPO IMMISSIONE	CODICE IMMISSIONE	DESCRIZIONE IMMISSIONE	SEZIONE	Area per stima Kr
MOD. A	GRETANO-PIANACCE	CM	B1001	Torrente Gretano - Idrometro	01356__19	Gretano totale (A=104.4 kmq)
		CP	B1005	Fosso dell'Orsa	01076__19	Gretano totale (A=104.4 kmq)
		CP	B1006	Fosso Mandrione	00857__19	Gretano totale (A=104.4 kmq)
		CP	B1007	Fosso Delle Ringhiere	00628__10	Gretano totale (A=104.4 kmq)
		CM	B1003	Fosso Pianacce	00052__19	Pianacce (A= 0.3 kmq)
		CP	B1008	Torrente Gretanessa	00240__10	Gretano totale (A=104.4 kmq)
		CD	I1004	Torrente Gretano - Interbacino	01328__19 - 00225PB19	Gretano totale (A=104.4 kmq)
	LANZO-COLLE	CM	B2004	Torrente Lanzo - Molino di Sotto	00913__10	Lanzo totale (A=60.7 kmq)
		CD	I2000	Torrente Lanzo - Interbacino	00877__10 - 00029__10	Lanzo totale (A=60.7 kmq)
		CM	B2003	Fosso Colle	00189__10	Colle (A=1.7 kmq)
	FOGNA-RIGO-LUPAIE	CM	B4005	Fosso delle Carpinelle	00676__10	Lupaie totale (A=38.4 kmq)
		CD	I4001	Fosso Fogna - Interbacino	00618__10 - 00001__10	Lupaie totale (A=38.4 kmq)
		CM	B4002	Fosso Rigo	00289__10	Lupaie totale (A=38.4 kmq)
		CM	B4006	Fosso delle Lupaie - Impagliatora	00236__10	Lupaie totale (A=38.4 kmq)
		CD	I4004	Fosso delle Lupaie - Interbacino	00202__10 - 00047__10	Lupaie totale (A=38.4 kmq)
MOD. B	LANZO SAN LORENZO-MARTINETA	CM	B2001	Torrente Lanzo - Podere San Lorenzo	01297__19	Lanzo S.Lorenzo (A=41.4 kmq)
		CM	B2002	Fosso Martineta	00078__19	Martineta (A=0.4 kmq)
MOD. C	VALLANZO	CM	B3001	Fosso Vallanzo - Santa Rita	00105__19	Vallanzo totale (A=7.6 kmq)
		CP	B3002	Il Fossetto	00070__19	Vallanzo totale (A=7.6 kmq)
		CD	I3000	Fosso Vallanzo - Interbacino	00061PB19 - 00008__10	Vallanzo totale (A=7.6 kmq)

Tabella 4-5: Elenco dei bacini e degli input idrologici alla modellazione idraulica analitica

CODICE IMMISSIONE	Tr030_0050	Tr030_0150	Tr030_0300	Tr030_0450	Tr030_0600
B1001	37.8	79.4	99.0	97.0	86.7
B1005	22.8	34.0	35.0	30.1	25.1
B1006	30.7	44.2	38.1	29.4	23.7
B1007	25.5	43.4	47.8	42.5	35.8
B1003	6.0	3.4	2.0	1.4	1.1
B1008	65.0	104.6	117.9	109.1	94.8
I1004	56.9	94.5	114.2	115.2	107.4
B2004	43.1	80.5	103.5	110.6	109.2
I2000	18.0	29.3	34.6	35.9	35.2
B2003	22.3	18.5	11.2	8.0	6.3
B4005	37.6	63.1	68.4	60.0	49.9
I4001	21.7	32.4	36.7	35.3	31.6
B4002	27.9	40.6	37.0	29.1	23.4
B4006	35.6	38.9	26.8	19.7	15.8
I4004	19.8	25.1	20.7	15.8	12.7
B2001	48.7	87.7	109.9	114.5	109.8
B2002	8.1	4.1	2.4	1.7	1.4
B3001	40.6	39.4	26.6	19.5	15.5
B3002	33.0	24.6	15.0	10.9	8.7
I3000	16.6	17.7	13.1	9.7	7.8

Tabella 4-6: Portate massime [mc/s] TR 30 anni in input al modello idraulico analitico

CODICE IMMISSIONE	Tr200_0050	Tr200_0150	Tr200_0300	Tr200_0450	Tr200_0600
B1001	74.5	146.0	180.0	174.4	155.8
B1005	33.6	52.7	55.9	49.1	41.9
B1006	47.3	69.0	59.7	47.4	39.3
B1007	41.3	70.2	76.8	68.0	57.9
B1003	7.9	4.4	2.6	1.9	1.5
B1008	98.1	160.5	181.8	168.2	147.1
I1004	87.7	149.7	185.0	188.2	176.5
B2004	78.6	143.6	186.9	201.0	198.6
I2000	25.0	46.2	57.2	61.3	61.5
B2003	28.8	23.9	14.6	10.6	8.5
B4005	66.1	109.5	116.6	101.1	84.9
I4001	32.8	0.0	58.0	55.4	49.4
B4002	43.9	63.4	56.3	44.5	36.5
B4006	51.8	57.9	40.8	31.1	25.5
I4004	28.9	0.0	31.7	24.7	20.4
B2001	88.3	156.8	198.2	206.3	197.2
B2002	11.2	6.0	3.7	2.7	2.2
B3001	51.0	50.7	34.7	25.8	20.8
B3002	41.2	31.5	19.5	14.5	11.7
I3000	20.8	22.8	17.1	12.9	10.4

Tabella 4-7: Portate massime [mc/s] TR 200 anni in input al modello idraulico analitico

5. IMPLEMENTAZIONE MODELLO IDRAULICO

Il software utilizzato per la modellazione idraulica è HEC-RAS 5.0.7 distribuito da US Army Corps of Engineers. Il modello permette di effettuare analisi idrauliche monodimensionali.

Per ulteriori dettagli si rimanda all'Appendice A.2.

5.1 MODELLAZIONE ANALITICA

Il modello idraulico implementato è un modello monodimensionale (1D) in moto vario senza possibilità di sfioro, ovvero considerando che i volumi di piena rimangono contenuti in alveo, che ricomprende l'asta principale del Torrente Lanzo e del suo affluente, Fosso Colle.

L'asta del Lanzo oggetto di modellazione si estende dalla loc. Molino di Sotto alla confluenza in Ombrone Grossetano, per circa 9 km. Con esso viene studiato il Fosso Colle, suo affluente in destra idraulica, per un tratto di circa 2 km.

Per maggiore chiarezza si riporta in Figura 2-1 la geometria adottata per la modellazione.

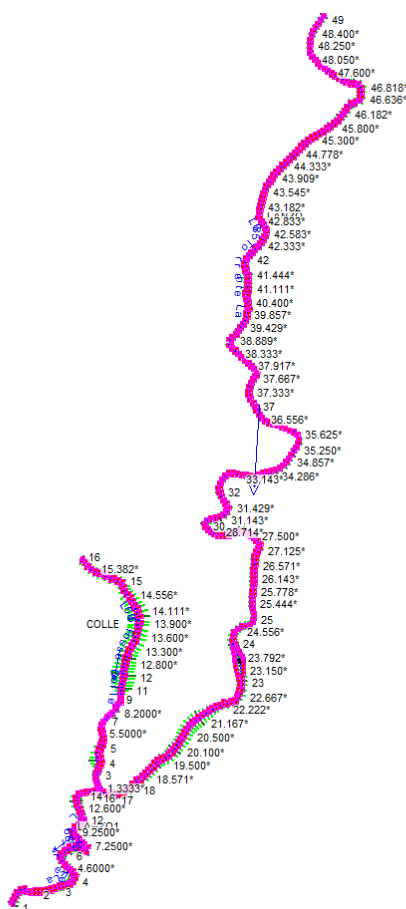


Figura 5-1 Geometria del modello idraulico implementato per il caso di studio

5.1.1 CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA DEI CORSI D'ACQUA E DELL'AREA DI STUDIO

La caratterizzazione geometrica dei corsi d'acqua studiati è stata ricavata a partire dai rilievi effettuati nel 2019 a cui è stato integrato il rilievo delle 2 sezioni a valle e a monte del ponte oggetto di studio

Le sezioni fluviali utilizzate nella modellazione monodimensionale sono individuate attraverso un codice alfanumerico che contiene al proprio interno le seguenti informazioni:

(Esempio: sezione 01542PB03)

- 5 caratteri (Esempio: 00320) identificativo del codice della sezione, in questo caso è la 320.
- 2 caratteri (Esempio: PB) identificativo delle opere idrauliche; se non presenti si utilizzano i caratteri: __
- 2 caratteri (Esempio: 19) identificativo dell'anno del rilievo topografico.

Si mostrano nella Figura 5-2 le sezioni integrate su HEC-RAS al modello idraulico dello Studio Idrologico Idraulico di supporto al Piano Strutturale Intercomunale dei Comuni di Civitella Paganico, Cinigiano e Campagnatico:

- Il ponte oggetto di studio
- Le tracce delle due sezioni rilevate a filo monte e filo valle del ponte (evidenziate in rosso)
- Le sezioni interpolate fra le sezioni suddette e quelle adiacenti del precedente studio

Le sezioni risultano individuate in figura dal codice assegnato dal software.



Figura 5-2 Tracce delle sezioni rilevate in corrispondenza del ponte sull'asta fluviale del Torrente Lanzo, aggiunte al modello idraulico dello Studio Idrologico Idraulico di supporto al Piano Strutturale Intercomunale dei Comuni di Civitella Paganico, Cinigiano e Campagnatico (HEC-RAS)

5.1.2 CONDIZIONI AL CONTORNO

Le condizioni al contorno del modello idraulico sono rappresentate da:

- Sollecitazioni idrologiche in testa ad ogni tratto simulato idraulicamente;
- Immissioni idrologiche puntuali in corrispondenza delle confluenze con corsi d'acqua non oggetto di simulazione idraulica;
- Immissioni idrologiche distribuite, nel caso di contributo derivante da un interbacino che non presenta un reticolo idrografico di riferimento;
- Idrogramma dei livelli alla foce, assunti costanti per tutta la durata delle simulazioni e pari al massimo livello atteso sul F. Ombrone Grossetano, secondo lo studio "Verifica idrologica e idraulica del bacino del fiume Ombrone, ricostruzione degli eventi di piena del 29 ottobre e 4 dicembre 2004, individuazione dei tratti critici e degli interventi prioritari" redatto dal Prof. Ing. Enio Paris (di seguito "Studio Paris").

In particolare, sono stati mutuati dallo studio succitato, i livelli idrometrici massimi sul Fiume Ombrone GR attesi nel tratto interessato delle confluenze dei corsi d'acqua oggetto di studio per l'evento sintetico TR=30 anni e per l'evento reale del 29 ottobre 2004 (associabile ad un evento sintetico con TR=15-20 anni), così come riportato nella tabella seguente.

Sezione	Descrizione	Hmax TR30 [m s.l.m.]	Hmax evento 29/10/2004 [m s.l.m.]
Om0200	Ombrone GR monte Lanzo	56.65	56.07
Om0198	Ombrone GR monte Gretano	56.46	55.98
Om0197	Ombrone GR tra Gretano e Lupaie	56.28	55.67
Om2195	Ombrone GR monte Lupaie	55.80	55.63

Tabella 5-1 Livelli massimi F. Ombrone GR Studio Paris

Nel caso specifico del nostro studio, sono stati utilizzati i valori di Hmax evidenziati dal riquadro rosso, come condizione al contorno costante, rispettivamente per gli eventi duecentennali e trentennali, sulle sezioni di valle di T. Lanzo.

La codifica delle immissioni e delle sollecitazioni idrologiche è riportata in Tavola IDR.A.02.04_Modello_Idraulico_Planimetria_rC per quanto riguarda i punti di immissione puntuali. Per l'estensione delle immissioni distribuite si fa riferimento a quanto riportato in Tabella 4-5, in cui per ogni immissione sono riportate la sezione di monte e quella di valle lungo cui la portata è distribuita.

In Tabella 4-6 e Tabella 4-7 sono riportati i massimi valori di portata Q_{max} [mc/s] associati agli idrogrammi impiegati come condizioni di monte alle aste fluviali o come immissioni puntuali e distribuite per i diversi tempi di ritorno (30 e 200 anni) e per le diverse durate di pioggia: 0.5, 1.5, 3.0, 4.5 e 6.0 ore.

5.1.3 PARAMETRI DEL MODELLO IDRAULICO

Per ciò che attiene ai coefficienti di scabrezza da associare alle singole sezioni fluviali, attraverso il confronto con i parametri riportati in letteratura ed il supporto dei sopralluoghi effettuati, è stato possibile associare ad ogni corso d'acqua, il coefficiente di scabrezza, secondo Manning, più appropriato. Per ciascun corso d'acqua si è utilizzato un coefficiente di Manning [$s/m^{1/3}$] secondo quanto riportato in Tabella 5-2. Nello specifico abbiamo evidenziato in rosso i valori dei coefficienti di Manning dei corsi d'acqua oggetto di studio

Corso d'acqua	Da sezione	A sezione	n [$s/m^{1/3}$]
Torrente Gretano	01356__19	00001__10	0.035
Fosso Pianacce	00052__19	00005__19	0.035
Torrente Lanzo	00913__10	00003__10	0.035
	01331__19	01242PB19	0.040
Fosso Martineta	00078__19	00004__19	0.040
Fosso Colle	00189__10	00000__10	0.040
Fosso Fogna	00676__10	00001__10	0.040
Fosso Rigo	00289__10	00010__10	0.035
Fosso delle Lupaie	00236__10	00014__19	0.035
Fosso Vallanzo	00105__19	00008__10	0.040

Tabella 5-2: Valori del coefficiente di Manning associati alle sezioni fluviali

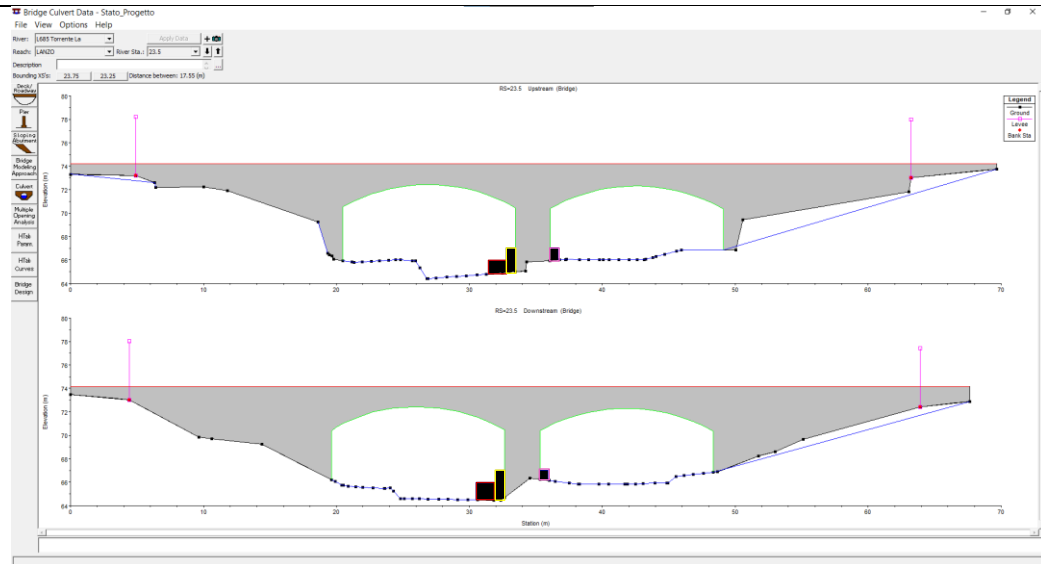


Figura 5-4 Modellazione su HEC-RAS delle tre Obstructions rappresentative: Scogliera in destra idraulica (rosso) e allargamenti della fondazione a destra (rosa) e sinistra (giallo) della pila centrale del ponte.

5.3 MODELLAZIONE DELLA CANTIERIZZAZIONE

Per poter realizzare gli interventi di consolidamento sull'impalcato sarà necessario la realizzazione di due ponteggi lungo i prospetti sia di monte che di valle.

È stata, dunque, implementata un'ulteriore geometria, con lo scopo di simulare, oltre allo Stato Attuale e allo Stato di Progetto, anche quello transitorio della cantierizzazione. Tale configurazione prevede infatti ingombri significativi, in quanto comporta una riduzione della sezione idraulicamente utile.

Si riportano in Figura 5-5 e Figura 5-6 le dimensioni, rispetto al ponte allo Stato Attuale, dell'ingombro dovuto al ponteggio rispettivamente in prospetto ed in pianta.

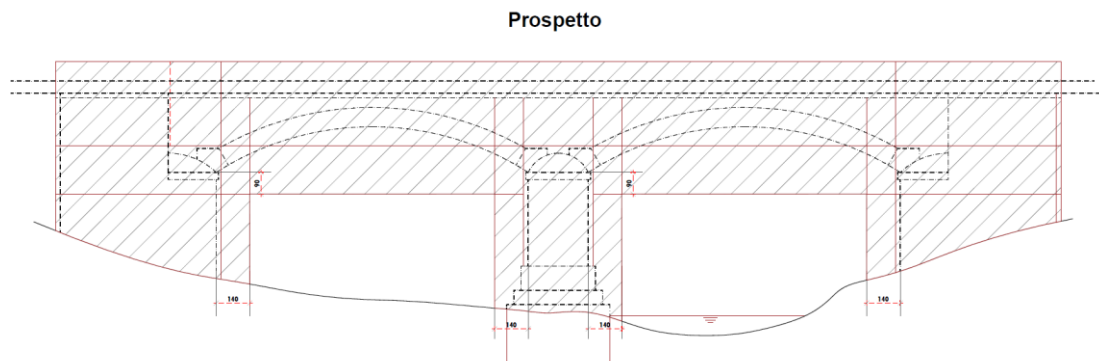


Figura 5-5 Prospetto ingombro del ponteggio per i lavori di consolidamento del ponte sul T.Lanzo

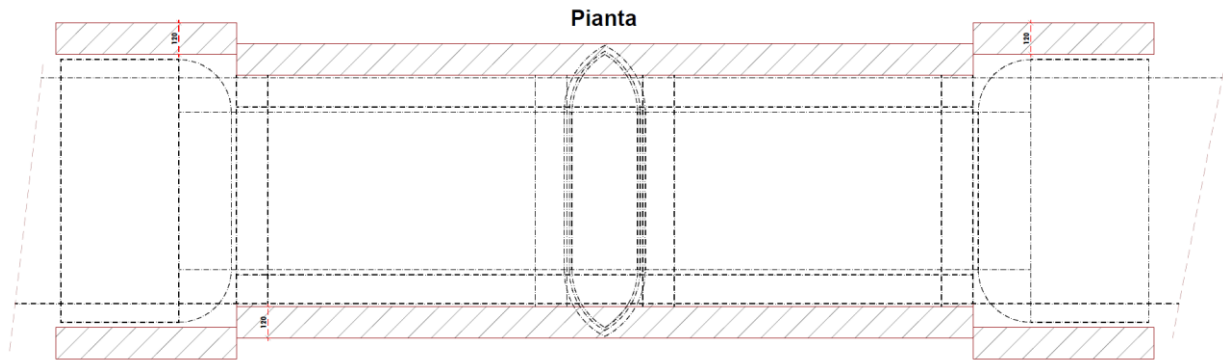


Figura 5-6 Sezione ingombro del ponteggio per i lavori di consolidamento del ponte sul T.Lanzo

A favore di sicurezza, l'ingombro del ponteggio è stato modellato come una struttura piena e non come una struttura reticolare.

È inoltre stato inserito un elemento **Obstruction** per la rappresentazione dell'ingombro dovuto alla scogliera intasata di cls con massi ciclopici in destra idraulica, come fatto per lo Stato di Progetto.

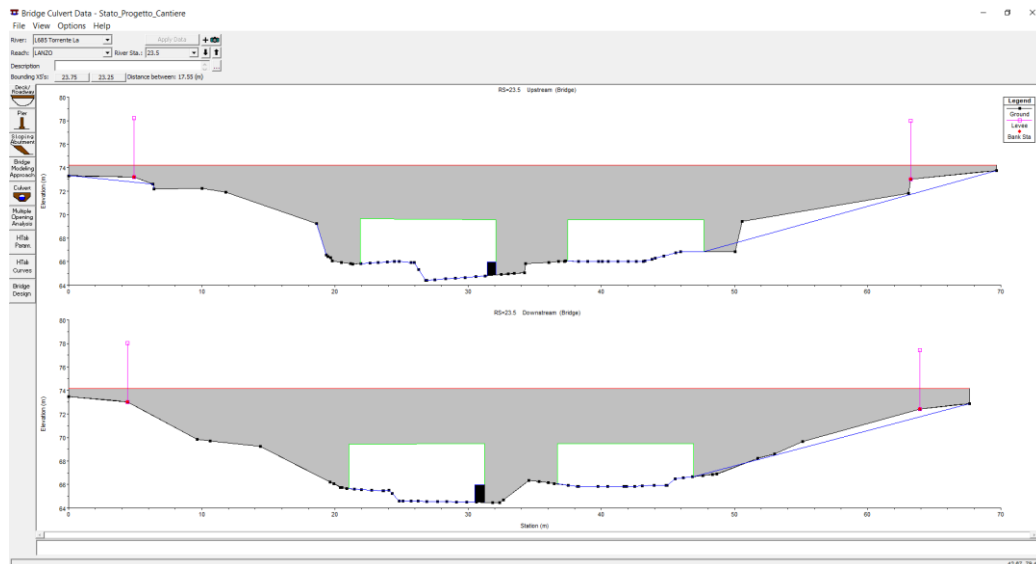


Figura 5-7 Modellazione su HEC-RAS del ponteggio, inserito come elemento Bridge e della scogliera in destra idraulica come elemento Obstruction

5.4 RISULTATI DELLA MODELLAZIONE IDRAULICA

L'implementazione della modellistica idraulica sopra descritta fornisce, per i tempi di ritorno 30 anni e 200 anni, i massimi livelli attesi risultanti dalle simulazioni idrauliche svolte sulle varie durate di pioggia (0.5, 1.5, 3.0, 4.5 e 6 ore) nelle sezioni di filo monte e di filo valle del ponte.

Tra le diverse durate analizzate, quella di 4.5 ore è risultata la più critica, si riportano i corrispondenti risultati in termini di tiranti idrici nelle sezioni fluviali di interesse per le tre geometrie implementate: Stato Attuale, Stato Progetto e Stato Cantierizzazione.

In

Tabella 5-3 i valori dei livelli massimi attesi nelle sezioni, filo monte (00301PB25) e filo valle (00301PC25) del ponte, per le tre geometrie implementate ed i due tempi di ritorno 30, 200 anni alla durata di pioggia critica di 4.5 ore.

	Stato Attuale		Stato Progetto		Stato Cantierizzazione	
Tempo di ritorno [anni]	30	200	30	200	30	200
Livello massimo atteso [m s.l.m.] (Sez. di Monte – 00301PB25)	67.48	68.34	67.47	68.37	67.74	68.85
Livello massimo atteso [m s.l.m.] (Sez. di Valle – 00301PC25)	66.97	67.89	67	67.78	66.97	67.89

Tabella 5-3 Livelli massimi attesi [m s.l.m.] per eventi con durata 4.5 h e tempi di ritorno 30,200 anni sulle sezioni di indagine del ponte per le tre geometrie

5.4.1 RISULTATI STATO ATTUALE

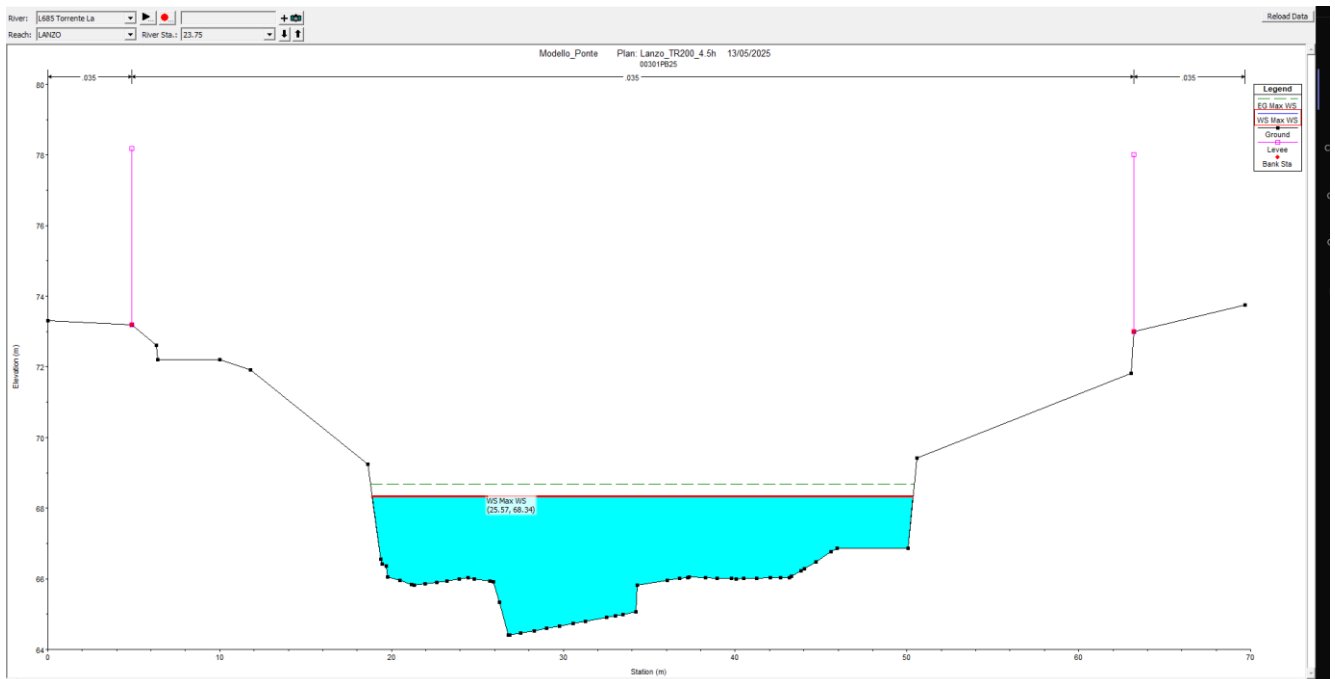


Figura 5-8: Risultati in termini di tiranti idrici nella sezione 00301PB25 di filo monte del ponte su T.Lanzo allo Stato Attuale (evento TR200 anni d=4.5h)

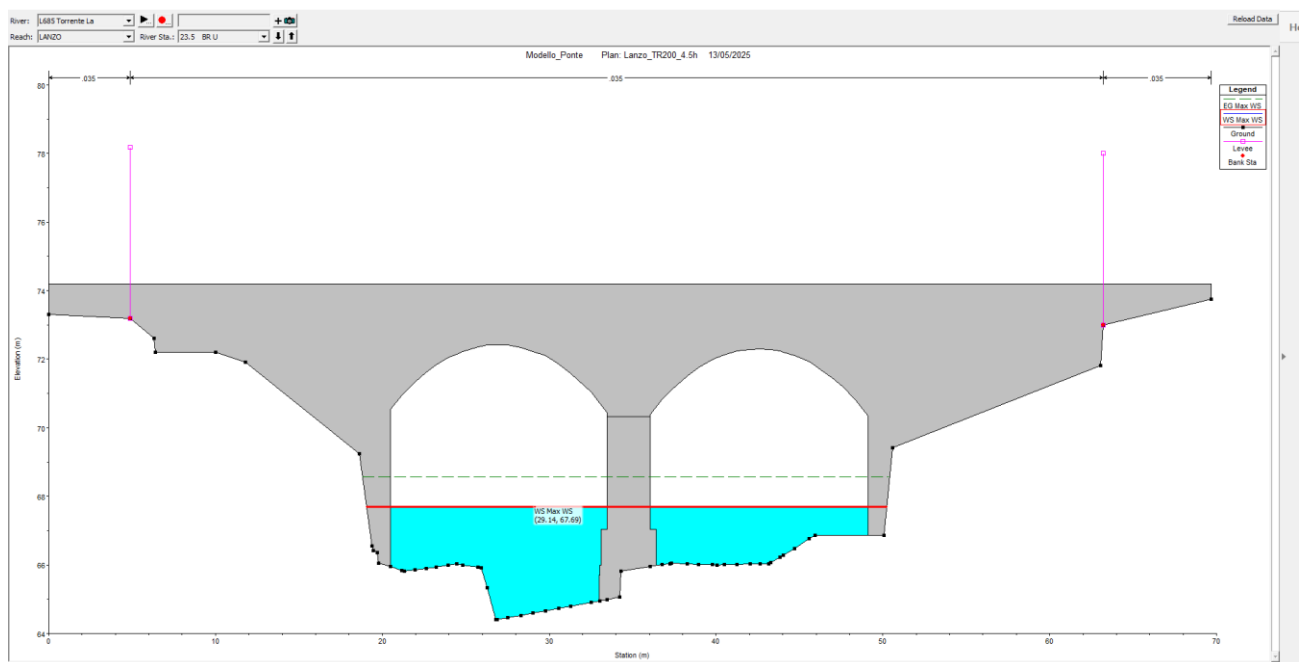


Figura 5-9 Risultati in termini di tiranti idrici nella sezione 23.5 BR U del ponte su T.Lanzo allo Stato Attuale (evento TR200 anni d=4.5h)

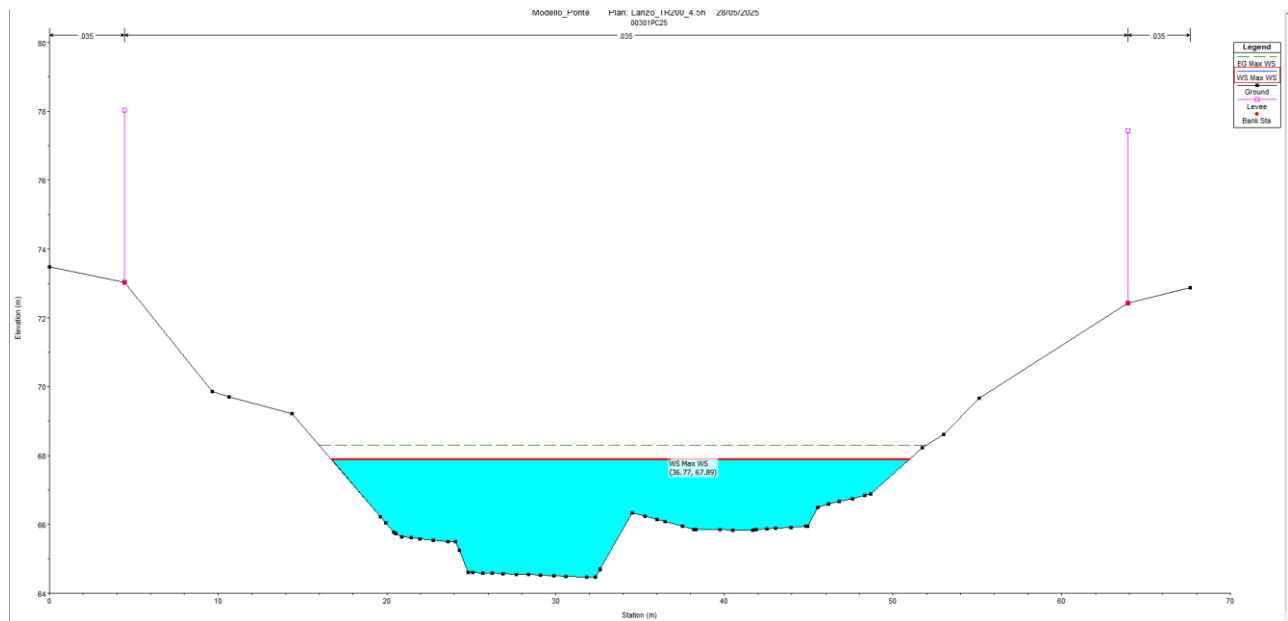


Figura 5-10 Risultati in termini di tiranti idrici nella sezione 00301PC25 del ponte su T.Lanzo allo Stato Attuale (evento TR200 anni d=4.5h)

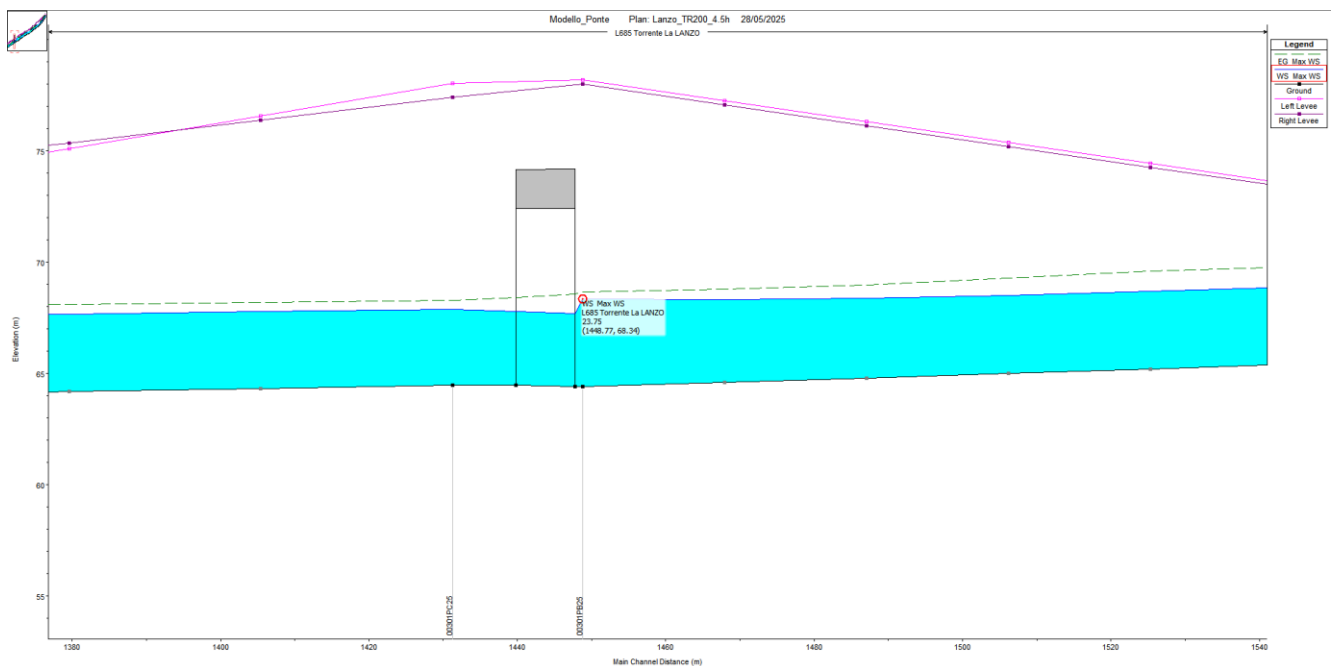


Figura 5-11 Risultati in termini di tiranti idrici nel profilo longitudinale del reach LANZO contenente il ponte in esame allo Stato Attuale (evento TR200 anni d=4.5h)

5.4.2 RISULTATI STATO PROGETTO

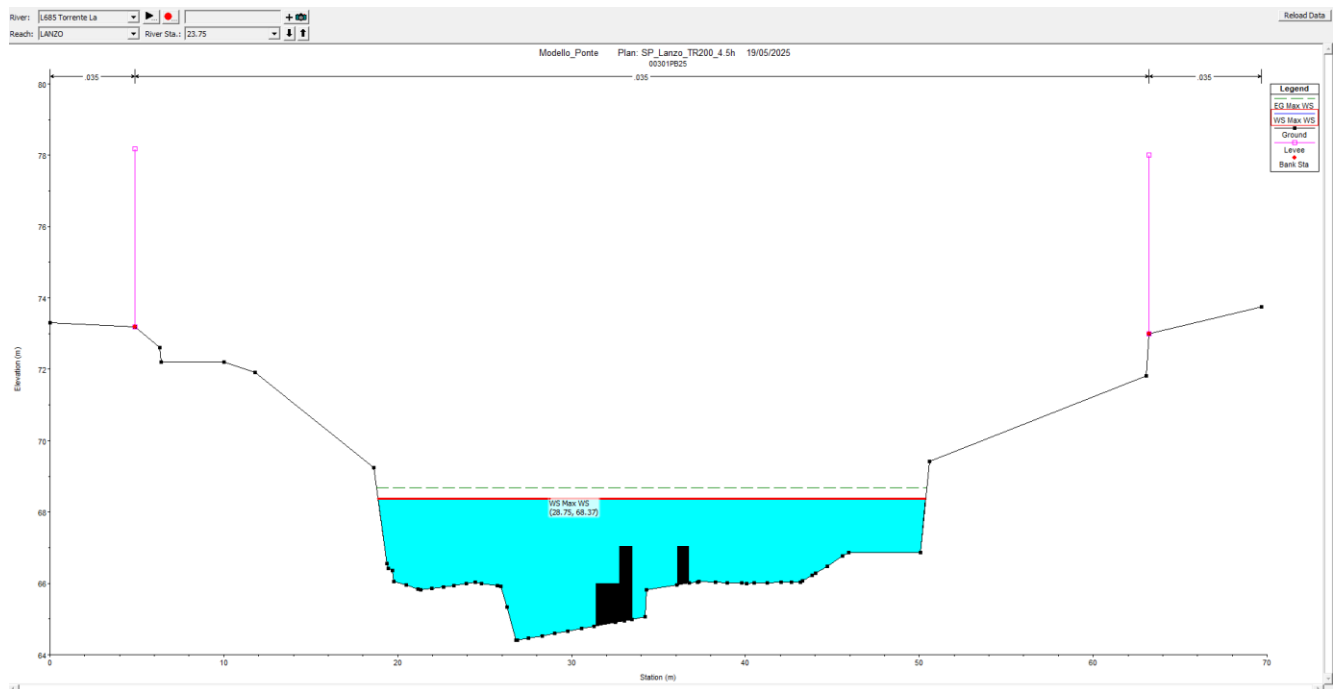


Figura 5-12: Risultati in termini di tiranti idrici nella sezione 00301PB25 di filo monte del ponte su T.Lanzo allo Stato Progetto (evento TR200 anni d=4.5h)

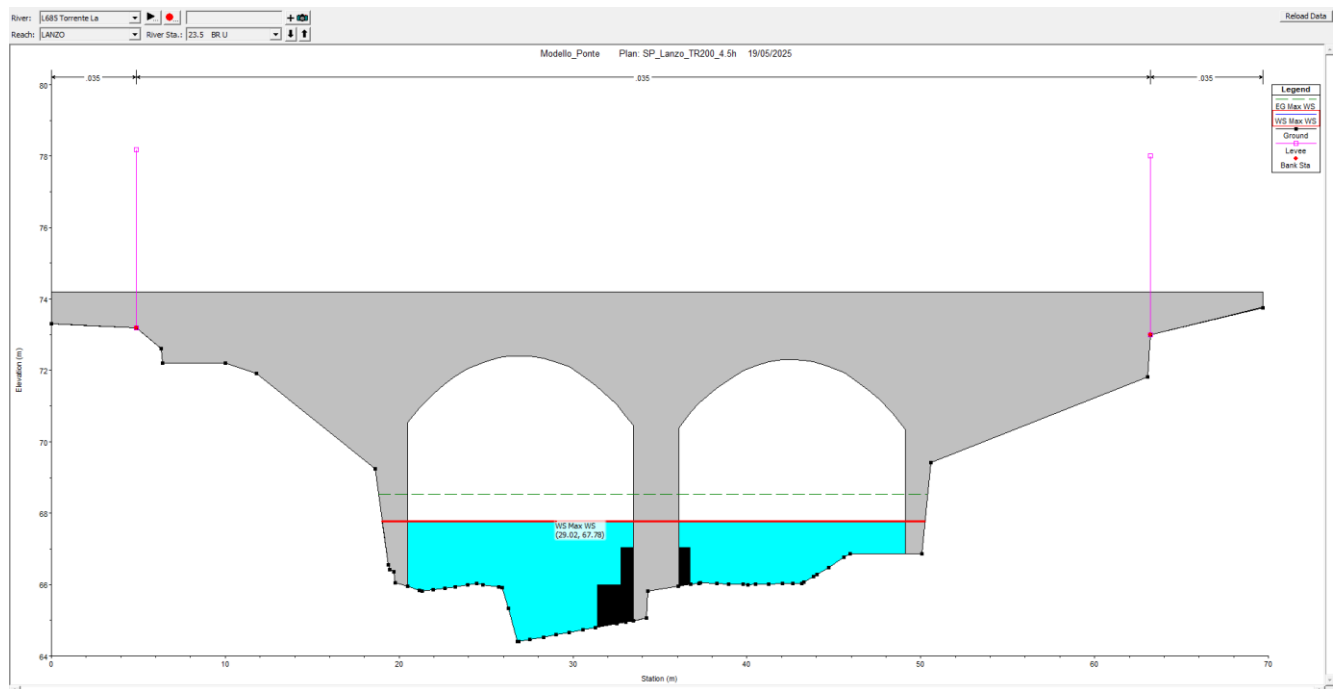


Figura 5-13 Risultati in termini di tiranti idrici nella sezione 23.5 BR U del ponte su T.Lanzo allo Stato Progetto (evento TR200 anni d=4.5h)

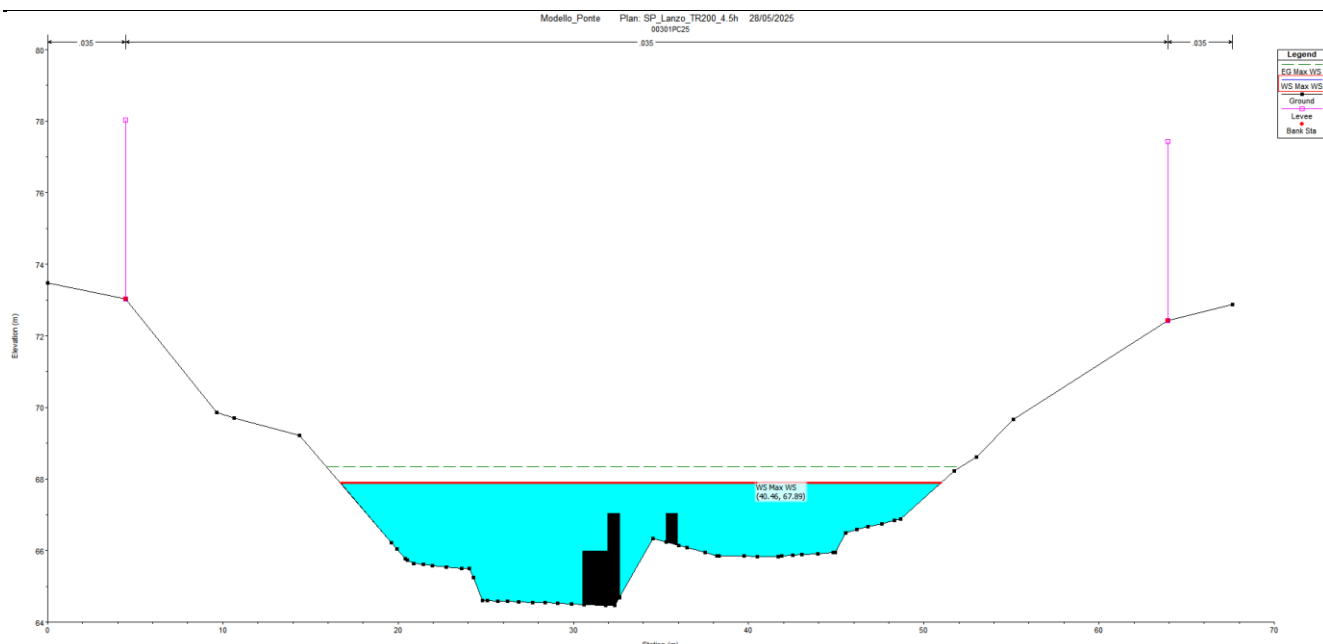


Figura 5-14: Risultati in termini di tiranti idrici nella sezione 00301PC25 di filo monte del ponte su T.Lanzo allo Stato Progetto (evento TR200 anni d=4.5h)

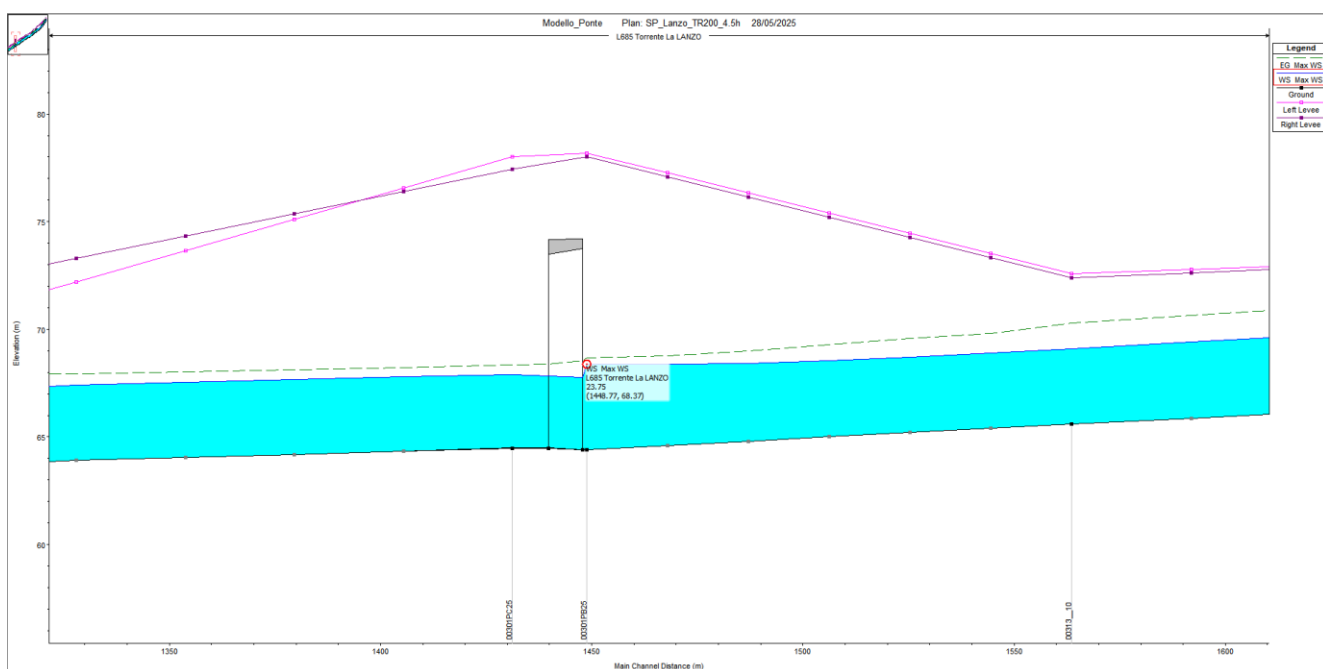


Figura 5-15 Risultati in termini di tiranti idrici nel profilo longitudinale del reach LANZO contenente il ponte in esame allo Stato Progetto (evento TR200 anni d=4.5h)

5.4.3 RISULTATI STATO PROGETTO CANTIERE

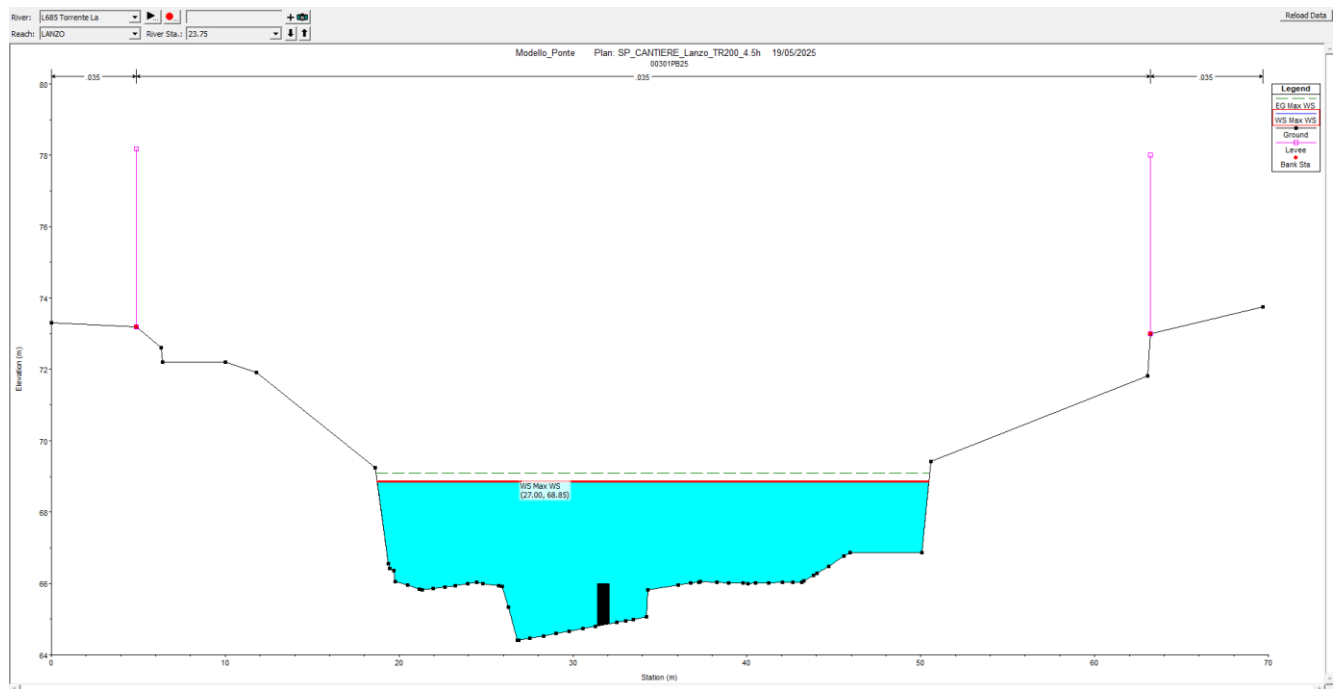


Figura 5-16: Risultati in termini di tiranti idrici nella sezione 00301PB25 di filo monte del ponte su T.Lanzo allo Stato Progetto Cantiere (evento TR200 anni d=4.5h)

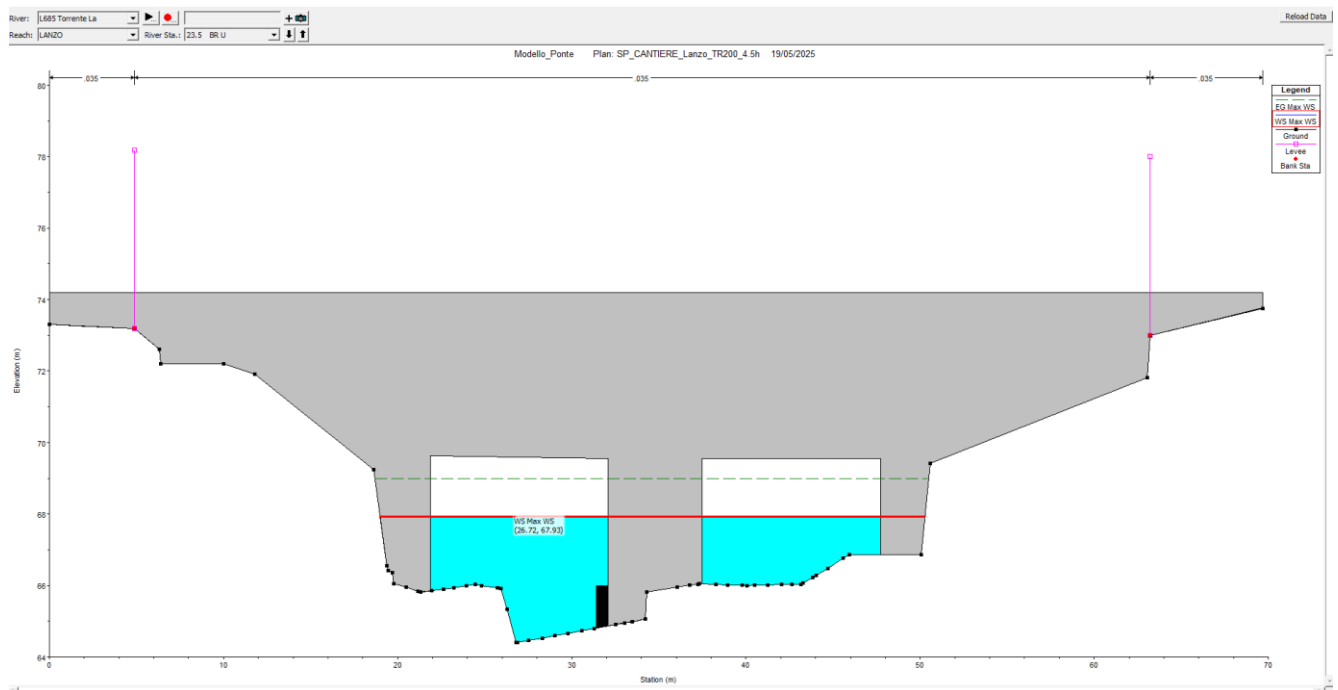


Figura 5-17 Risultati in termini di tiranti idrici nella sezione 23.5 BR U del ponte su T.Lanzo allo Stato Progetto Cantiere (evento TR200 anni d=4.5h)

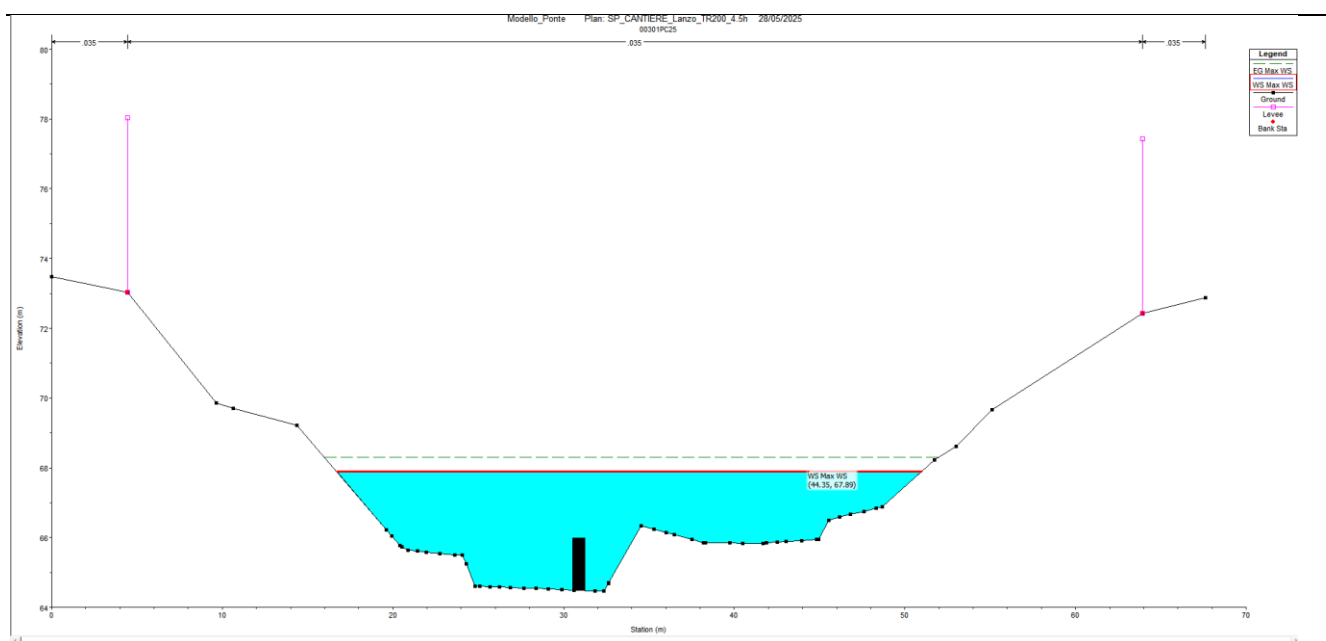


Figura 5-18: Risultati in termini di tiranti idrici nella sezione 00301PC25 di filo monte del ponte su T.Lanzo allo Stato Progetto Cantiere (evento TR200 anni d=4.5h)

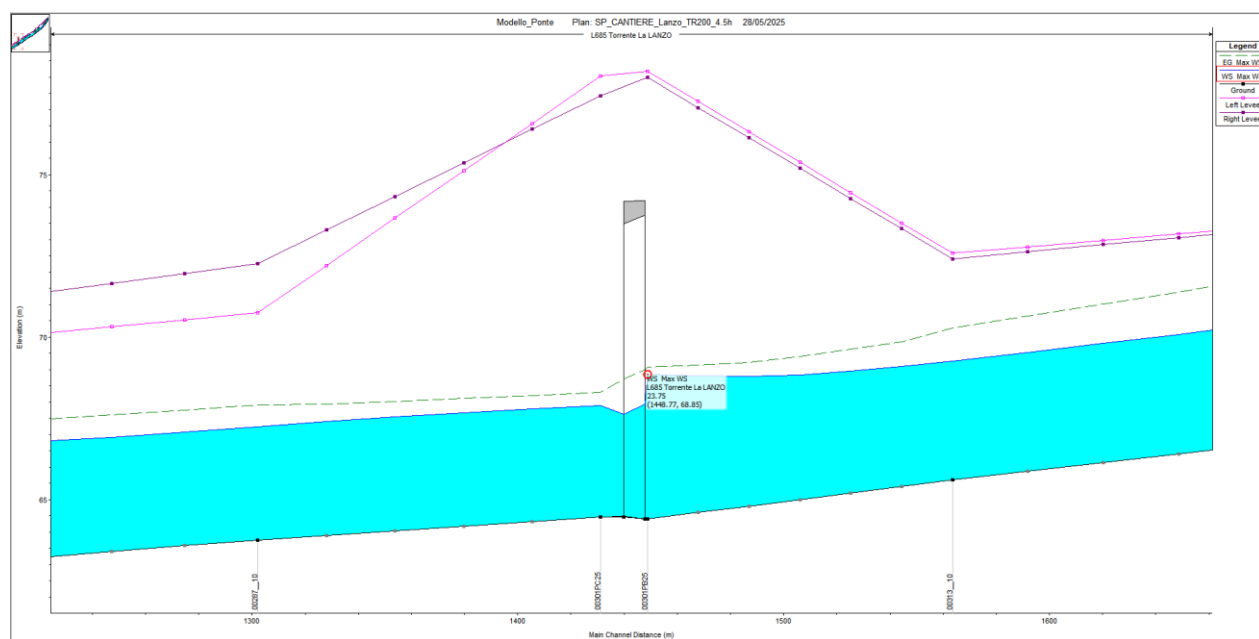


Figura 5-19 Risultati in termini di tiranti idrici nel profilo longitudinale del reach LANZO contenente il ponte in esame allo Stato Progetto Cantiere (evento TR200 anni d=4.5h)

5.5 VERIFICA INTERFERENZE CON IL PONTE FERROVIARIO

La presenza di un ponte ferroviario in corrispondenza della sezione 23.833, a monte del ponte in analisi (Figura 5-20), rende necessaria la verifica di eventuali interferenze con gli interventi previsti.



Tabella 5-4 Viste da valle del ponte ferroviario



Tabella 5-5 Immagine di Google Earth del ponte ferroviario visto da valle



Figura 5-20 Individuazione del ponte ferroviario rispetto al ponte oggetto di studio

Dal confronto tra i valori dei tiranti idrici alla sezione 23.833 nello Stato Attuale, Stato di Progetto e stato transitorio di cantierizzazione, nelle condizioni più critiche analizzate (evento con tempo di ritorno pari a 200 anni e durata della pioggia di 4.5 ore), riportati in Tabella 5-6, risulta un incremento di 4 cm allo Stato di Progetto e di 41 cm allo stato transitorio di cantierizzazione rispetto allo Stato Attuale.

	Stato Attuale	Stato Progetto	Stato Progetto Cantiere
Livello massimo atteso [m slm] (Sez. 23.833)	68.37	68.41	68.78

Tabella 5-6 Livelli massimi attesi [m slm] per eventi con durata 4.5 h e tempo di ritorno 200 anni sulla sezione corrispondente al ponte ferroviario per le tre geometrie

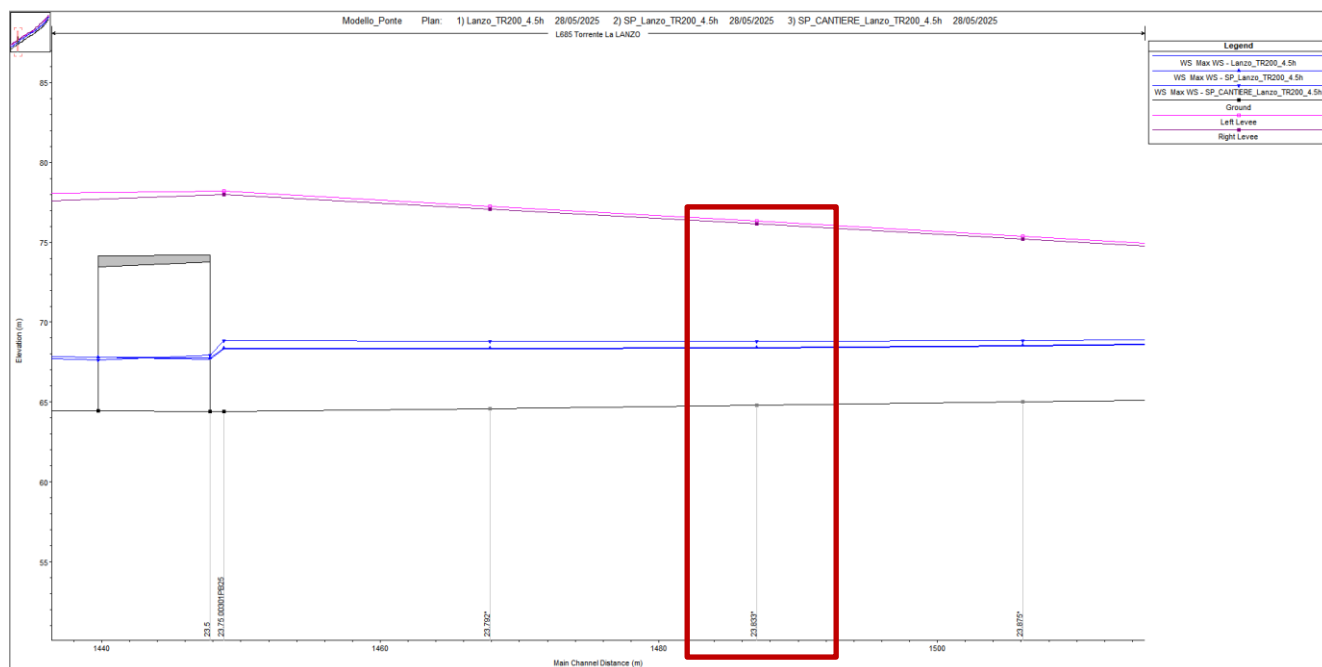


Figura 5-21 Verifica interferenze con ponte ferroviario nel tratto a monte del ponte in esame (riquadrate in rosso la zona relativa al ponte ferroviario)

Data la comparabilità delle quote dell'intradosso dei due ponti e la modellazione a favore di sicurezza dello Stato di Progetto e dello stato transitorio di cantierizzazione, si ritiene che gli interventi di progetto non costituiscano un aggravio per il ponte della ferrovia a monte dell'attraversamento oggetto d'intervento. Per maggiori dettagli si rimanda all'elaborato A.06 – *Planimetria e sezioni interferenze*.

6. CONCLUSIONI

Sulla base dei risultati riportati in

Tabella 5-3, si ritiene che, nonostante la riduzione della sezione idraulica utile, dovuta sia alla variazione della geometria della fondazione della pila che alla realizzazione della scogliera in destra idraulica, tali interventi non costituiscano un aggravio significativo rispetto allo Stato Attuale, né allo Stato di Progetto finale, né allo stato transitorio di cantierizzazione. Si verifica di fatto un innalzamento del livello nella sezione a filo monte del ponte in esame di 3 cm.

Inoltre, come da paragrafo 5.1.2.3 della NTC2018, il franco idraulico immediatamente a monte del ponte è da assumersi non inferiore a 1.50 m per tempo di ritorno T_r pari a 200 anni, perciò, dato l'elevato franco idraulico risultante allo Stato di Progetto riportato in Tabella 6-1 si conferma l'assenza di modifiche rilevanti dal punto di vista idraulico.

	Stato Attuale	Stato Progetto
Tempo di ritorno [anni]	200	200
Franco idraulico [m] (Sez. di Monte – 23.75)	4.07	4.04

Tabella 6-1 Franchi di sicurezza in corrispondenza del ponte oggetto di studio

Anche durante la temporanea fase di cantierizzazione viene garantito un franco idraulico di 1.5 m

APPENDICE A: MODELLISTICA IDROLOGICO-IDRAULICA

A.1 MODELLISTICA IDROLOGICA

La modellistica idrologica per la determinazione dell'idrogramma di piena in una o più sezioni fluviali di un bacino idrografico deve significativamente rappresentare tutte le fasi che si hanno a partire dalla distribuzione delle piogge insistenti sul bacino, fino alla valutazione dell'onda di piena.

La trasformazione da pioggia al suolo a portata nella sezione di chiusura avviene secondo una cascata di processi. L'ingresso principale al modello è costituito da una serie di misurazioni di pioggia. La quota parte di tali precipitazioni che andrà in scorrimento superficiale, detta anche precipitazione efficace (netta), viene valutata con un opportuno *modello di trasformazione afflussi-deflussi*, per la stima della produzione di deflusso idealmente in ciascun punto del bacino, avente la dimensione di una portata per unità di area. Infine, il processo di concentrazione dei deflussi nel reticolo idrografico e di trasferimento lungo questo fino alla sezione di chiusura verrà rappresentato tramite un opportuno *modello di formazione dell'onda di piena*.

La metodologia alla base degli studi effettuati mira ad un'agevole caratterizzazione degli eventi in termini di tempi di ritorno e durata dell'evento meteorico; conseguenza diretta, la possibilità di definire i livelli di rischio in funzione della probabilità di accadimento. Ciò si ottiene facilmente attraverso una procedura semplificata di generazione di eventi sintetici, che si basa sulle seguenti ipotesi:

- isofrequenza fra evento meteorico e portata in alveo (Tr evento di pioggia = Tr idrogramma di piena).

A.1.1 REGIME PLUVIOMETRICO – STUDIO REGIONALE LSPP

Il regime pluviometrico è stato caratterizzato sulla base dei risultati prodotti dal gruppo di lavoro dell'attività "Modellazione idrologica", nell'ambito dell'Accordo stipulato tra la Regione Toscana e il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Firenze, per lo sviluppo di attività di ricerca sulla Mitigazione del Rischio Idraulico nella Regione Toscana.

Nell'ambito di tale lavoro è stata fornita la stima dell'altezza di pioggia per le diverse durate caratteristiche (1, 3, 6, 12 e 24 ore e giornaliera) e i diversi tempi di ritorno fissati (2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 150, 200 e 500 anni). Per le durate caratteristiche, sono state elaborate le griglie di risoluzione 1 km dei valori estremi delle altezze di pioggia, per i tempi di ritorno.

La previsione quantitativa dei valori estremi di pioggia in un determinato punto è stata effettuata anche attraverso la determinazione della curva o linea segnalatrice di probabilità pluviometrica (LSPP), cioè della relazione che lega l'altezza di precipitazione alla sua durata, per un assegnato tempo di ritorno.

La LSPP è comunemente descritta da una legge di potenza del tipo:

$$h(t) = a t^n$$

con: h = altezza di pioggia [mm]; t = durata [ore], a e n parametri caratteristici per i tempi di ritorno considerati.

Note le altezze di pioggia per durate e tempi di ritorno fissati, attraverso una regressione logaritmica è possibile determinare le griglie di 1 km su tutta la regione dei parametri a e n .

Una volta noti i parametri a e n della LSPP per i tempi di ritorno fissati è possibile calcolare l'altezza di pioggia di durata desiderata in punto della Regione Toscana.

A.1.2 CALCOLO DELLA PIOGGIA DI PROGETTO SU UN BACINO IDROGRAFICO

Dalle linee guida della Regione Toscana è possibile definire la metodologia di calcolo delle altezze di pioggia su un bacino idrografico.

Per calcolare l'altezza di pioggia su un bacino idrografico è necessario individuare lo spartiacque del bacino imbrifero e, una volta scelto il tempo di ritorno, è possibile utilizzare due metodologie per la valutazione delle altezze di pioggia.

A. Utilizzo dei parametri a e n della LSPP - Noti i parametri a e n della LSPP per assegnato Tr , viene definita la durata t dell'evento. Per un bacino idrografico si usa $t = t_{cr}$ (tempo critico), solitamente assunto pari al tempo di corrivazione t_c . È possibile quindi trovare l'altezza di pioggia in ogni cella tramite la relazione:

$$h(t) = a t_c^n \quad (4)$$

con: h = altezza di pioggia [mm]; t_c = tempo di corrivazione [ore], a e n parametri caratteristici.

La stima dell'altezza di pioggia con l'equazione (4) può essere effettuata tramite software GIS con un *tool* tipo **Raster Calculator**.

Una volta trovata l'altezza di pioggia h in ogni cella, per la durata e il tempo di ritorno stabilito, è sufficiente calcolare il valore medio sul bacino idrografico.

A.1.3 CALCOLO DEGLI IDROGRAMMI DI PROGETTO

La determinazione degli idrogrammi di piena è stata effettuata secondo lo schema e la procedura che comunemente veniva utilizzata dalla *Regionalizzazione delle Portate di Piena della Regione Toscana*. **Nel caso specifico del presente studio, tutti i parametri necessari alla determinazione e formazione dell'onda di piena sono stati ricalcolati.**

Tale procedura parte dalla teoria dell'*Idrogramma Istantaneo Unitario* (*Instantaneous Unit Hydrograph, IUH*) dove i parametri in gioco sono ricavati dalle caratteristiche geomorfologiche del bacino, ottenendo così un *Idrogramma Istantaneo Unitario Geomorfologico* di cui vengono riportate di seguito le linee principali. Il modello di formazione dell'onda di piena adottato è quello proposto da Nash.

L'input meteorico è rappresentato da uno "ietogramma sintetico ad intensità costante" con il quale si assume che l'intensità di precipitazione sia costante durante l'intera evoluzione del fenomeno. Tale ietogramma consente la determinazione della portata al colmo di assegnato tempo di ritorno e durata dell'evento.

Il valore della pioggia lorda deve essere depurato delle perdite. La trasformazione afflussi-deflussi adottata prevede l'adozione di un "approccio asintotico a soglia" che richiede la stima di due parametri: la *perdita iniziale*, schematizzata introducendo un *volume unitario di perdita iniziale* (indicato con I_a) che il terreno assorbe completamente durante i primi istanti di precipitazione (dall'inizio dell'evento $t=0$ all'istante $t=t_a$) e la perdita per infiltrazione nel suolo durante l'evento, schematizzata con una *infiltrazione cumulata costante a saturazione* (indicata con K_s).

$$\begin{cases} I_a(t) = I_a(0) + \int_0^{t_a} (P(\tau) - K_s) d\tau & \text{per } t < t_a \\ P_n(t) = 0 \\ I_a(t) = I_a & \text{per } t \geq t_a \\ P_n(t) = P(t) - K_s \end{cases}$$

dove:

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

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

$I_a(t)$ volume unitario di 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]..

In particolare, per la stima del coefficiente I_a si è utilizzata la formula $I_a = 3.3 + 22S_b$, in cui S_b rappresenta la percentuale di superficie boscata presente sul bacino considerato.

Per quanto riguarda invece il valore del coefficiente K_s adottato, nella tabella A.1-1 si riportano i valori dello stesso in funzione della classe geolitologica.

Osservando sperimentalmente le piogge intense è possibile affermare che, all'interno di una certa area, l'intensità di precipitazione durante l'evento piovoso varia da punto a punto, anche in maniera sensibile, e questa variazione è tanto maggiore quanto maggiore è l'estensione dell'area considerata. Per questo alla precipitazione lorda, calcolata rispetto alla sezione di calcolo, è stato applicato un coefficiente di ragguaglio dipendente dall'area del bacino e dalla durata dell'evento, in linea con la trattazione riportata nella Regionalizzazione delle Portate di Piena della Regione Toscana, secondo la seguente formulazione:

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

dove t è la durata dell'evento, A è l'area del bacino sotteso e α , β , γ sono parametri dipendenti dal bacino considerato.

Il parametro α della formula sopra riportata dipende dal coefficiente a' della curva di possibilità pluviometrica a tre parametri.

Poiché le curve delle nuove LSPP sono rappresentate con la formula a due parametri nella formulazione $h(t) = a t^n$, al fine di determinare il corrispettivo valore di a' da utilizzare nella stima del coefficiente di ragguaglio, si è operato come segue:

Dalle nuove LSPP sono stati calcolati per ogni "Tr" e per ogni durata "D" l'altezza di pioggia "h".

Dalla formula a 3 parametri $h = a' t^n \text{Tr}^m$ in campo logaritmico si ottiene $\log(h) = \log(a') + n \log(t) + m \log(\text{Tr})$.

Tramite regressione lineare, sulle altezze di pioggia h , funzione della durata e del tempo di ritorno, si ottengono i parametri a' , m ed n della formula a 3 parametri.

Il coefficiente a' così calcolato è stato utilizzato per la determinazione del "K_r".

L'*Idrogramma Istantaneo Unitario* rappresenta l'idrogramma di piena causato da un evento impulsivo di pioggia di volume unitario e durata tendente a zero. Ipotizzando un comportamento del sistema bacino idrografico lineare e stazionario, la risposta $Q(t)$ ad una sollecitazione meteorica di intensità $p(t)$, supposta costante su tutti i punti del bacino (approccio di tipo integrato), è data dall'integrale di convoluzione fra ietogramma di pioggia 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;
 $U(t)$ è l'idrogramma unitario

$$\begin{cases} U(0) = 1 \\ U(t > 0) = 0 \end{cases} \quad \int_0^{\infty} U(t) dt = 1$$

sigla_cart	nome_ulf	Ks
ACCa	Litofacies calcareo-argillitica	0.775
APA	Argille a Palombini	0.000
APAA	Litofacies calcareo-marnosa	1.550
APAb	Litofacies arenacea	1.550
b	Depositi alluvionali attuali	0.000
bnA	Depositi alluvionali recenti, terrazzati e non terrazzati	0.000
bnb	Depositi alluvionali terrazzati	0.000
BUR	Formazione anidritica di Burano	4.650
CCA	Calcare cavernoso	4.650
CGV	Calcarei di Groppo del Vescovo	4.650
CPE	Siltiti scure e filladi con olistoliti carbonatici	0.000
CRP	Filladi, quarziti e metaconglomerati.	0.775
DSA	Diaspri	1.550
EMO	Argille e argille marnoso-sabbiose con livelli e lenti di gessi	0.000
f1a	Travertini e calcari continentali	4.650
f1b	Travertini e calcari continentali	4.650
FAA	Argille azzurre	0.000
FAAb	Argille sabbiose, limi e argille siltose con intercalazioni sabbiose con fossili marini	0.000
FNE	Filladi nere e quarziti	0.000
FOS	Argille con intercalazioni di arenarie e conglomerati	1.550
FRM	Filladi e metarenarie torbiditiche	1.550
MESa	Brecce e conglomerati ad elementi di Calcare cavernoso	4.650
MESb	Conglomerati poligenici	0.775
MESc	Sabbie e arenarie	2.325
MESd	Lenti di Argille	0.000
PLIb	Conglomerati marini poligenici	0.775
PLIc	Calcareni e calciruditi bioclastiche.	4.650
PLIs	Sabbie e arenarie gialle.	2.325
PRN	Peridotiti serpentizzate con filoni gabbrici e basaltici	4.650
PTF	Pietraforte	1.550
PTFa	Ruditi	4.650
PTFc	Siltiti e argilliti	0.000
QMS	Quarziti e filladi	0.000
RIO	Rioliti	4.650
ROsb	Calcarei e calciruditi	4.650
SIL	Formazione di Sillano	4.650
SLEc	Conglomerati e paraconglomerati eterometrici moderatamente elaborati con ciottoli e matrice arrossati	0.775
STO2	Membro delle Marne del Sugame	1.550
STO2a	Litofacies calcarenitica del Monte Lischeta	4.650
STO3	Membro delle Calcareni di Montegrossi	4.650
TNI	Calcarei bioclastici.	4.650
VEU	Formazione della Verruca	4.650
VEUa	Membro delle Anageniti grossolane	2.325
VILa	Conglomerati e ciottolami poligenici	0.775
VILb	Sabbie, sabbie ciottolose e sabbie siltoso-argillose e limi sabbiosi	2.325
VILc	Argille e argille sabbiose lignitifere lacustri e fluvio-lacustri	1.550
VILe	Sabbie e conglomerati	2.325
VINb	Dolomie grigio-scure e rosate	4.650
VINC	Calcarei di Retignano	4.650

Tabella A.1- 1: Valori Ks utilizzati nel presente studio

La caratterizzazione di un modello di formazione della piena basato su tale principio consiste quindi essenzialmente nella determinazione della forma della funzione $U(t)$, che può essere stimata fissandone la struttura sulla base di considerazioni teoriche, e stimandone i parametri o per taratura, utilizzando dati sperimentali contemporanei di afflussi sul bacino e deflussi nella sezione di chiusura, o sulla base di caratteristiche geomorfologiche del bacino. Uno dei più diffusi modelli concettuali utilizzati per determinare la forma della funzione $U(t)$

è quello basato sull'ipotesi che il bacino idrografico si comporti come un insieme di n serbatoi lineari disposti in serie. L'espressione dell'idrogramma istantaneo unitario che ne deriva per un singolo serbatoio lineare è:

$$U(t) = \frac{1}{k} \cdot e^{-\frac{t}{k}}$$

dove k è la costante del serbatoio che rappresenta il tempo caratteristico di svuotamento del serbatoio.

Supponendo che il bacino si comporti come una serie di n serbatoi, ciascuno con uguale tempo caratteristico k , la portata in uscita dall'intero bacino come risposta ad un input impulsivo distribuito sul bacino rappresenterà l'idrogramma istantaneo unitario del bacino alla sua chiusura, nota come *Idrogramma Istantaneo Unitario di Nash*:

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

dove la funzione $\Gamma(n)=(n-1)!$.

Il momento di primo ordine dell'IUH rispetto all'origine viene detto *tempo di ritardo (lag) Tl* ed è dato da:

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

In questo schema il tempo di ritardo è dato dal prodotto nk (pari proprio alla media dell'idrogramma unitario). I parametri n , k dell'IUH di Nash sono stati ricavati sulla base delle caratteristiche geomorfologiche del reticolo idrografico, mediante le seguenti espressioni:

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

$$k = 0.7(Ra/(Rb \cdot Rl))^{0.48} Lc/v$$

in unità congruenti, dove:

R_b = rapporto di biforcazione;

R_l = rapporto di lunghezza;

R_a = rapporto di area;

L_c = lunghezza del canale principale (dalla sorgente alla sezione di interesse);

v = fattore cinematico legato alla velocità della piena ("media spazio-temporale di scorrimento dell'acqua o di propagazione dell'onda di piena").

I parametri geomorfologici sopra elencati permettono di rappresentare lo sviluppo della rete idrografica mediante una descrizione gerarchica e possono quindi essere calcolati, una volta ordinato il reticolo idrografico secondo il metodo di gerarchizzazione e classificazione geomorfologica di Horton e Strahler.

La gerarchizzazione di una rete idrografica si esegue attribuendo un ordine a ciascun segmento fluviale; un'asta che non nasce dalla confluenza di altre due è di primo ordine; un'asta di ordine n e un'asta di ordine $n-1$ congiungendosi danno origine a un'asta di ordine n ; due aste di ordine n congiungendosi danno origine a un'asta di ordine $n+1$. Per ogni bacino idrografico esiste una relazione fra il numero dei rami fluviali aventi un certo ordine e l'ordine stesso: in genere, il valore del primo diminuisce all'aumentare del secondo.

L'organizzazione della rete idrografica e quindi il suo grado di gerarchizzazione possono essere espressi mediante parametri quantitativi che definiscono la geometria del reticolo idrografico e il suo grado di organizzazione gerarchica. Il parametro di base è il rapporto di biforcazione R_b , che esprime il rapporto fra il numero di segmenti fluviali di un certo ordine ed il numero dei segmenti dell'ordine immediatamente successivo. Considerando invece la lunghezza media delle aste di un certo ordine si ottiene il rapporto fra le lunghezze, R_l . Analogamente, si definisce anche il rapporto fra le aree, R_a .

I tre parametri appena descritti vengono determinati sulla base delle seguenti relazioni:

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

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

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

dove

ω è l'ordine massimo del reticolo;

N_u il numero delle aste di ordine u , con $u=1, 2, 3, \dots$;

\bar{L}_u la lunghezza media delle aste di ordine u , con $u=1, 2, 3, \dots$;

\bar{A}_u l'area media sottesa da aste di ordine u , con $u=1, 2, 3, \dots$

A.2 MODELLISTICA IDRAULICA

Il software utilizzato per la modellazione idraulica è HEC-RAS 5.0.7 distribuito da US Army Corps of Engineers. Il modello permette di effettuare analisi idrauliche monodimensionali come quello implementato per il presente studio.

La dinamica fluviale in alveo è stata modellata con schema monodimensionale in moto vario attraverso le equazioni di De Saint Venant.

In particolare, il modello di moto vario risolve in forma numerica le equazioni di continuità e della quantità di moto che risultano:

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_L = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QU}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial H}{\partial x} + S_f + S_h \right) = 0 \end{cases}$$

in cui:

- A = area della sezione liquida [mq];
- Q = portata [mc/s];
- $q_L(x)$ = portata laterale (positiva se entrante) [mq/s];
- $H = z + h$ è la quota del pelo libero (z quota del fondo e h battente idraulico) [m];
- g = accelerazione di gravità [m/s^2];
- U = velocità media della corrente [m/s];
- S_f = perdite di carico distribuite per unità di lunghezza [m/m];
- S_h = perdite di carico concentrate [m/m].

Assumendo la gradualità spazio-temporale del fenomeno, la perdita di carico effettivo può essere stimata con un'equazione analoga a quella adottata per il moto uniforme:

$$S_f = \frac{Q|Q|n^2}{R^{4/3}A^2}$$

dove R [m] è il raggio idraulico e n è il coefficiente di Manning [$s/m^{1/3}$].

Per includere nel modello gli effetti dissipativi indotti da variazioni di sezione, quali allargamenti o restringimenti, si valutano le perdite di carico effettivo addizionali, S_h , mediante la formula:

$$S_h = \frac{d}{dx} \left(C \frac{Q^2}{2g} \frac{1}{A^2} \right)$$

in cui C è un coefficiente funzione della velocità, del battente e delle proprietà geometriche della sezione.

Per la risoluzione del sistema di equazioni è necessario conoscere le condizioni al contorno di ciascun tratto sia a monte che a valle.

La condizione di valle può essere costituita da un idrogramma di livelli idrometrici, oppure da un legame funzionale tra portata e livelli ovvero una scala di deflusso. A monte invece è necessario imporre una condizione sulla portata in ingresso attraverso un idrogramma di piena, che è stato ricavato sulla base dell'analisi idrologica già descritta al paragrafo precedente.

Dal punto di vista numerico, il sistema di equazioni monodimensionali viene risolto con uno schema implicito alle differenze finite.

Per quel che riguarda le aree simulate attraverso celle di accumulo, il fenomeno non stazionario è descritto attraverso la sola legge d'invaso:

$$A_{ck} \frac{\partial h_k}{\partial t} = \sum_i Q_{ki}(h_k, h_i)$$

dove A_{ck} e h_k rappresentano rispettivamente l'area e il livello idrico della cella k-esima, h_i il livello idrico nella generica cella i-esima circostante, e Q_{ki} la portata scambiata con detta cella.

APPENDICE B: TABULATO DEI RISULTATI

B.1 TABULATO DEI RISULTATI

Codifica Variabili delle Tabelle dei risultati ottenuti con:

- evento Tempo di Ritorno 200 anni durata 4.5 h in moto vario
- evento Tempo di Ritorno 30 anni durata 4.5 h in moto vario
- **Q Total** – Portata Massima del corso d'acqua (m3/s)
- **Min Ch El** – Quota minima della sezione (m)
- **W.S. Elev** – Quota livello idrico massimo (m)
- **E.G: Elev** – Quota dell'energia totale (m)
- **Vel. Chnl** – Velocità del flusso (m/s)
- **Flow Area** – Area bagnata della sezione (m2)
- **Froude Chl** – Numero di Froude

Si riporta il tabulato dei risultati ottenuti per le tre geometrie tra la sez. 23 e la sez. 25 contenute nel tratto di interesse:

- Stato Attuale
- Stato Progetto
- Stato Progetto Cantiere

B.1.1 STATO ATTUALE

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
LANZO	25	Max WS	200.86	68.03	72.33	72.33	74.16	0.015943	5.99	33.52	9.18	1.00
LANZO	24.889*	Max WS	200.86	67.76	71.89	71.90	73.62	0.014963	5.82	34.49	10.07	1.00
LANZO	24.778*	Max WS	200.86	67.49	71.48	71.50	73.12	0.014269	5.68	35.36	10.96	1.01
LANZO	24.667*	Max WS	200.86	67.22	71.08	71.11	72.66	0.013827	5.56	36.12	11.85	1.02
LANZO	24.556*	Max WS	200.86	66.95	70.69	70.75	72.22	0.013633	5.47	36.71	12.74	1.03
LANZO	24.444*	Max WS	200.86	66.68	70.34	70.39	71.80	0.011290	5.35	37.54	13.62	1.03
LANZO	24.333*	Max WS	200.86	66.41	70.02	70.05	71.39	0.010839	5.19	38.74	14.51	1.01
LANZO	24.222*	Max WS	200.86	66.14	69.72	69.71	71.01	0.010361	5.02	40.01	15.40	0.99
LANZO	24.111*	Max WS	200.86	65.87	69.41	69.39	70.63	0.011428	4.89	41.04	16.29	0.98
LANZO	24	Max WS	200.86	65.60	69.09	69.07	70.27	0.011318	4.81	41.72	17.18	0.99
LANZO	23.958*	Max WS	200.86	65.40	68.88	68.85	69.81	0.010336	4.26	47.11	24.04	0.97
LANZO	23.917*	Max WS	200.86	65.20	68.68	68.66	69.59	0.010645	4.21	47.72	25.66	0.99
LANZO	23.875*	Max WS	200.86	65.00	68.50		69.29	0.008145	3.93	51.14	24.03	0.86
LANZO	23.833*	Max WS	200.86	64.80	68.37		68.99	0.005751	3.48	57.67	24.39	0.72
LANZO	23.792*	Max WS	200.85	64.60	68.33		68.79	0.004130	3.00	67.01	27.91	0.62
LANZO	23.75	Max WS	200.85	64.40	68.34	67.45	68.68	0.002879	2.57	78.22	31.48	0.52
LANZO	23.5	Bridge										
LANZO	23.25	Max WS	200.85	64.46	67.89		68.29	0.003927	2.81	71.57	34.29	0.62
LANZO	23.200*	Max WS	200.85	64.32	67.78		68.20	0.003823	2.86	70.32	32.25	0.62
LANZO	23.150*	Max WS	200.85	64.18	67.67		68.11	0.003941	2.95	68.01	30.44	0.63
LANZO	23.100*	Max WS	200.85	64.04	67.54		68.02	0.004270	3.06	65.62	29.75	0.66
LANZO	23.050*	Max WS	200.85	63.90	67.40		67.94	0.004629	3.24	62.02	27.35	0.69
LANZO	23	Max WS	200.85	63.76	67.23		67.91	0.005640	3.66	54.87	22.07	0.74

B.1.2 STATO PROGETTO

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
LANZO	25	Max WS	200.86	68.03	72.33	72.33	74.16	0.015936	5.99	33.53	9.18	1.00
LANZO	24.889*	Max WS	200.86	67.76	71.89	71.90	73.62	0.014956	5.82	34.49	10.07	1.00
LANZO	24.778*	Max WS	200.86	67.49	71.48	71.50	73.12	0.014254	5.68	35.37	10.96	1.01
LANZO	24.667*	Max WS	200.86	67.22	71.08	71.11	72.66	0.013807	5.56	36.14	11.85	1.02
LANZO	24.556*	Max WS	200.86	66.95	70.69	70.74	72.22	0.013604	5.47	36.74	12.74	1.03
LANZO	24.444*	Max WS	200.86	66.68	70.34	70.39	71.80	0.011252	5.34	37.58	13.62	1.03
LANZO	24.333*	Max WS	200.86	66.41	70.03	70.05	71.39	0.010781	5.18	38.80	14.51	1.01
LANZO	24.222*	Max WS	200.86	66.14	69.73	69.71	71.01	0.010278	5.01	40.11	15.40	0.99
LANZO	24.111*	Max WS	200.86	65.87	69.42	69.39	70.63	0.011300	4.88	41.20	16.29	0.98
LANZO	24	Max WS	200.86	65.60	69.10	69.07	70.27	0.011123	4.79	41.97	17.18	0.98
LANZO	23.958*	Max WS	200.86	65.40	68.90	68.85	69.81	0.010030	4.22	47.56	24.04	0.96
LANZO	23.917*	Max WS	200.86	65.20	68.71	68.66	69.59	0.010309	4.15	48.36	25.90	0.97
LANZO	23.875*	Max WS	200.85	65.00	68.53		69.30	0.007861	3.87	51.88	24.28	0.85
LANZO	23.833*	Max WS	200.85	64.80	68.41		69.01	0.005502	3.43	58.55	24.49	0.71
LANZO	23.792*	Max WS	185.79	64.60	68.38		68.76	0.003308	2.71	68.44	27.94	0.55
LANZO	23.75	Max WS	185.74	64.40	68.37	67.49	68.68	0.003463	2.46	75.40	31.49	0.51
LANZO	23.5	Bridge										
LANZO	23.25	Max WS	200.85	64.49	67.89		68.35	0.006041	2.99	67.13	34.28	0.68
LANZO	23.200*	Max WS	200.85	64.32	67.78		68.20	0.003823	2.86	70.32	32.25	0.62
LANZO	23.150*	Max WS	200.85	64.18	67.67		68.11	0.003941	2.95	68.01	30.44	0.63
LANZO	23.100*	Max WS	200.85	64.04	67.54		68.02	0.004270	3.06	65.62	29.75	0.66
LANZO	23.050*	Max WS	200.85	63.90	67.40		67.94	0.004629	3.24	62.02	27.35	0.69
LANZO	23	Max WS	200.85	63.76	67.23		67.91	0.005640	3.66	54.87	22.07	0.74

B.1.3 STATO PROGETTO CANTIERE

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
LANZO	25	Max WS	200.86	68.03	72.34	72.34	74.16	0.015864	5.98	33.59	9.18	1.00
LANZO	24.889*	Max WS	200.86	67.76	71.90	71.90	73.62	0.014846	5.81	34.58	10.07	1.00
LANZO	24.778*	Max WS	200.86	67.49	71.49	71.50	73.12	0.014100	5.66	35.51	10.96	1.00
LANZO	24.667*	Max WS	200.86	67.22	71.10	71.11	72.65	0.013574	5.53	36.35	11.85	1.01
LANZO	24.556*	Max WS	200.85	66.95	70.72	70.75	72.21	0.013248	5.42	37.08	12.74	1.01
LANZO	24.444*	Max WS	200.85	66.68	70.38	70.39	71.79	0.010783	5.27	38.10	13.62	1.01
LANZO	24.333*	Max WS	200.85	66.41	70.08	70.05	71.39	0.010130	5.07	39.58	14.51	0.98
LANZO	24.222*	Max WS	200.85	66.14	69.80	69.71	71.01	0.009396	4.87	41.27	15.40	0.95
LANZO	24.111*	Max WS	200.85	65.87	69.53		70.64	0.009981	4.68	42.94	16.29	0.92
LANZO	24	Max WS	200.85	65.60	69.26		70.29	0.009271	4.51	44.58	17.18	0.89
LANZO	23.958*	Max WS	200.85	65.40	69.10		69.85	0.007489	3.85	52.22	24.04	0.83
LANZO	23.917*	Max WS	200.85	65.20	68.95		69.63	0.007500	3.65	55.03	28.29	0.84
LANZO	23.875*	Max WS	200.85	65.00	68.83		69.41	0.005613	3.38	59.34	26.58	0.72
LANZO	23.833*	Max WS	200.85	64.80	68.78		69.23	0.003692	2.95	68.12	26.61	0.59
LANZO	23.792*	Max WS	200.85	64.60	68.82		69.13	0.002319	2.49	80.69	28.18	0.47
LANZO	23.75	Max WS	200.85	64.40	68.85	67.47	69.08	0.001785	2.15	93.53	31.73	0.40
LANZO	23.5	Bridge										
LANZO	23.25	Max WS	200.85	64.46	67.89		68.31	0.004588	2.85	70.50	34.29	0.63
LANZO	23.200*	Max WS	200.85	64.32	67.78		68.20	0.003823	2.86	70.32	32.25	0.62
LANZO	23.150*	Max WS	200.85	64.18	67.67		68.11	0.003942	2.95	68.00	30.44	0.63
LANZO	23.100*	Max WS	200.85	64.04	67.54		68.02	0.004270	3.06	65.62	29.75	0.66
LANZO	23.050*	Max WS	200.84	63.90	67.40		67.94	0.004629	3.24	62.02	27.35	0.69
LANZO	23	Max WS	200.85	63.76	67.23		67.91	0.005640	3.66	54.87	22.07	0.74

APPENDICE C: LIBRETTO SEZIONI CON LIVELLI MASSIMI