



SOGGETTO ATTUATORE:



PROVINCIA DI REGGIO EMILIA
come da Protocollo d'Intesa tra la Provincia di Reggio Emilia
e la Provincia di Mantova sottoscritto il 09/03/2020

MANUTENZIONE STRAORDINARIA DEL PONTE SUL FIUME PO TRA GUASTALLA (RE) E DOSOLO (MN)

CUP: C67H20000290001

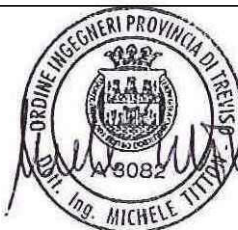
PROGETTO ESECUTIVO

GRUPPO DI PROGETTAZIONE:

CAPOGRUPPO R.T.P.



ITS srl
Corte delle Caneve, 11
31053 Pieve di Soligo (TV)
Tel. 0438 82082 email: info@its-engineering.com



Ing. MICHELE TITTON
Ing. ANDREA DE PIN
Ing. MATTEO TANCON
Ing. MIRKO LORENZON
Ing. ELOISA TORRESINI
Ing. MASSIMO DE NARDI
Geom. FABIO LUCCHETTA

Prof. Ing. PIER GIORGIO MALERBA
Ing. PAOLO GALLI

MANDANTE:

MALERBA INGEGNERIA STRUTTURALE

Prof. Ing. PIER GIORGIO MALERBA
Viale Abruzzi, 17 - 20131 Milano (MI) - Tel. 02 29526561

ELABORATO:

IDRAULICA RELAZIONE COMPATIBILITÀ IDRAULICA

PROGETTISTA:

Ing. MICHELE TITTON

RESP. UNICO DEL PROCEDIMENTO:

Ing. GIUSEPPE TUMMINO

IL DIRIGENTE:

Ing. VALERIO BUSSEI

CODICE PROGETTO

PROGETTO

2021 022 - PE

STR. FASE

NOME FILE 2021_022 PE IDR RE 01_A_Rel. compa.

REVISIONE

SCALA

CODICE ELAB

IDR RE 01

A

-

A	PRIMA EMISSIONE	ADP	ADP	MT	19.11.2021
REV.	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO	DATA

Provincia di Reggio Emilia

**Interventi di manutenzione straordinaria al ponte sul fiume Po tra
Dosolo (MN) e Guastalla (RE)**

RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA

Indice

1	PREMESSA	1
2	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	1
3	DATI GEOMETRICI E IDROMETRICI DI RIFERIMENTO	1
4	PORTATE DI PIENA E ASPETTI IDRAULICI.....	5
5	MODELLAZIONE IDRAULICA	6
5.1	GEOMETRIA DEL MODELLO.....	7
5.2	VALORI DI SCABREZZA	9
5.3	PORTATA DI PROGETTO	9
5.4	CALIBRAZIONE DEL MODELLO	9
5.5	RISULTATI DELLA MODELLAZIONE	10
6	ANALISI DEI RISULTATI	14
6.1	VERIFICA DEL FRANCO IDRICO	18
6.2	VERIFICA DEL TEMPO DI RITORNO ASSOCIATO AL FRANCO IDRICO MINIMO	19
7	FENOMENI LEGATI AL TRASPORTO SOLIDO	23
8	SPINTA IDRODINAMICA	28
9	CONCLUSIONI	29

1 PREMESSA

La Direttiva 4 del PAI indica i criteri per la valutazione della compatibilità idraulica di ponti esistenti. Nella presente relazione si porrà particolare attenzione alle “condizioni di sicurezza idraulica del ponte e delle opere collegate”, per le quali il manufatto deve essere sottoposto a verifica della stabilità strutturale rispetto ai seguenti aspetti:

- scalzamento massimo sulle fondazioni delle pile;
- spinta idrodinamica per effetto del sovrizzo indotto dalla struttura.

A tal proposito, il presente studio mira a determinare mediante modellazione idraulica le grandezze fondamentali alla stima dei punti precedenti, e in particolar modo tiranti e velocità in corrispondenza delle pile del ponte presenti all'interno dell'alveo.

2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Per la redazione della presente relazione idrologica ed idraulica sono state utilizzate come riferimento le seguenti normative e linee guida:

- Direttiva Europea 2007/60/CE del 23 ottobre 2007, relativa alla valutazione e alla gestione del rischio di alluvioni;
- D.Lgs. 49/2010 del 23 febbraio 2010, attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni (G.U. 2 aprile 2010, n. 77);
- Progetto di Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) e norme attuative – Autorità di Bacino del fiume Po;
- D.M. 17 gennaio 2018, Norme Tecniche per le Costruzioni.

3 DATI GEOMETRICI E IDROMETRICI DI RIFERIMENTO

La presente analisi mira a determinare le grandezze idrauliche fondamentali alla verifica di compatibilità idraulica del ponte oggetto di intervento.

A tal proposito è stato necessario individuare il tratto di studio per effettuare la modellazione idraulica, in dipendenza dai dati geometrici e idrometrici disponibili.

In data 10 maggio 2021, alle ore 11.30 circa, è stato effettuato un rilievo batimetrico da parte della provincia di Reggio Emilia in collaborazione con AIPO, per un tratto di alveo esteso circa 200 m a valle e 300 m a monte del ponte Dosolo-Guastalla e per un totale di 12 sezioni.

Il rilievo ha fornito una serie di punti georeferenziati e indicanti il valore di tirante idrico del fiume dalla quota del pelo libero. Al fine di convertire il dato nella quota assoluta del fondo, sono stati scaricati dal sito di AIPO (<https://www.agenziapo.it>) i livelli idrometrici corrispondenti alla data e all'ora del rilievo per gli idrometri più vicini, corrispondenti alla stazione di Boretto a monte e a quella di Borgoforte a valle.

Monitoraggio idrografico

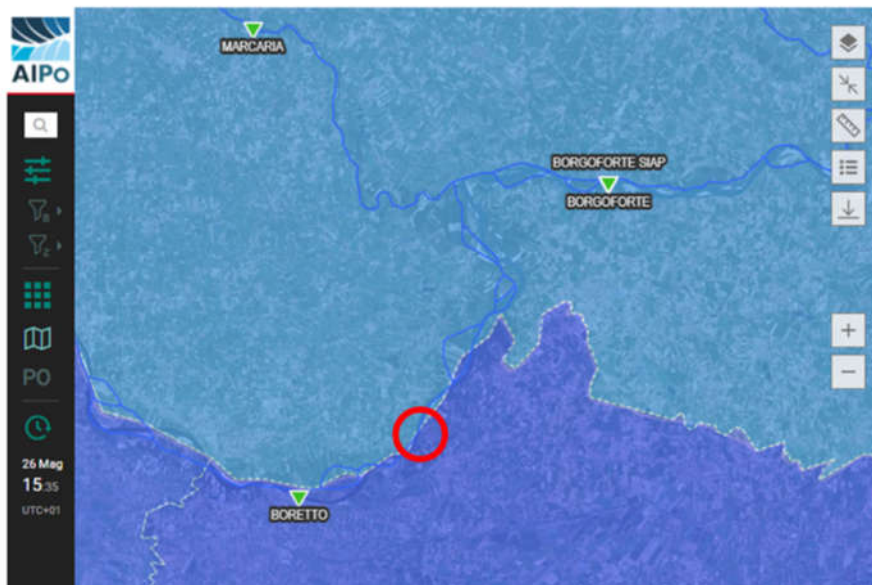


Figura 1 - Estratto dal sito di AIPO delle stazioni idrometriche prossime all'area di progetto (cerchio rosso)

A1003					A502				
10/05/2021 11:30:00					10/05/2021 11:30:00				
	A	B	C	D		A	B	C	D
		Boretto - Livello Idrometrico - 14017 (m)					Borgoforte - Livello Idrometrico - 13988 (m)		
1	Orario		Variazione	Valore assoluto	1	Orario		Variazione	Valore assoluto
999	10/05/2021 11:10	-2.2	0	-2.2	498	10/05/2021 10:50	-1.36	0.02	-1.36
1000	10/05/2021 11:15	-2.2	0	-2.2	499	10/05/2021 11:00	-1.35	0.01	-1.35
1001	10/05/2021 11:20	-2.21	-0.01	-2.21	500	10/05/2021 11:10	-1.36	-0.01	-1.36
1002	10/05/2021 11:25	-2.21	0	-2.21	501	10/05/2021 11:20	-1.36	0	-1.36
1003	10/05/2021 11:30	-2.2	0.01	-2.2	502	10/05/2021 11:30	-1.36	0	-1.36
1004	10/05/2021 11:35	-2.21	-0.01	-2.21	503	10/05/2021 11:40	-1.35	0.01	-1.35
1005	10/05/2021 11:40	-2.2	0.01	-2.2	504	10/05/2021 11:50	-1.36	-0.01	-1.36
1006	10/05/2021 11:45	-2.2	0	-2.2	505	10/05/2021 12:00	-1.36	0	-1.36
1007	10/05/2021 11:50	-2.2	0	-2.2	506	10/05/2021 12:10	-1.36	0	-1.36
1008	10/05/2021 11:55	-2.21	-0.01	-2.21	507	10/05/2021 12:20	-1.36	0	-1.36

Figura 2 –Estratti dei valori di livello idrometrico forniti da AIPO per il giorno e l'ora del rilievo a Boretto e Borgoforte

I valori forniti, riferiti allo zero idrometrico dell'idrometro corrispondente, sono stati convertiti in quote assolute. Di seguito lo zero idrometrico estratto dagli annali idrologici pubblicati da ARPAE e le quote idrometriche assolute ottenute.

BACINO E STAZIONE	Tipo della stazione	CARATTERISTICHE							NOTE
		Quota dello zero idrometrico m. s. m.	Bacino di dominio Km ²	Altezza di max piena m.	DATA della max piena	Altezza idrom. minima m.	DATA della minima altezza idrometrica	Anno inizio osservaz.	
PO a BORETTO	Mlr	19.90	55183.0	9.06	19 ott. 2000	-4.51	22 lug. 2006	1868	Altezza di guardia m. 5.50. Nuova quota da livellazione AIPO 2005.
PO a BORGOFORTE	Mlr	14.55	62450.0	9.96	14 nov. 1951	-3.84	23 lug. 2006	1923	Altezza di guardia m. 6.00. Nuova quota da livellazione AIPO 2014.

Figura 3 - Estratto di annale idrologico pubblicato sul sito di ARPAE, con indicazione dello zero idrometrico degli idrometri

	Stazione di Boretto	Stazione di Borgoforte
Quota idrometrica assoluta [m slm]	17.70	13.19

Dopodiché, mediante interpolazione lineare rispetto alla distanza (determinata sulla base delle progressive delle sezioni individuate nel PAI), si è ricavata la quota idrometrica assoluta nei pressi del ponte Dosolo-Guastalla.

	Ponte Dosolo-Guastalla
Quota idrometrica assoluta [m slm]	16.29

Rispetto a questa quota, sottraendo il valore di tirante idrico ottenuto dal rilievo batimetrico, si è ricavata per ogni punto la quota assoluta del fondo.

Infine, mediante interpolazione in ambiente GIS, è stata prodotta una mappa raster (DTM) in quote assolute del fondo alveo nel tratto rilevato.

Di seguito una immagine dei punti rilevati e georeferenziati, e della interpolazione ottenuta.

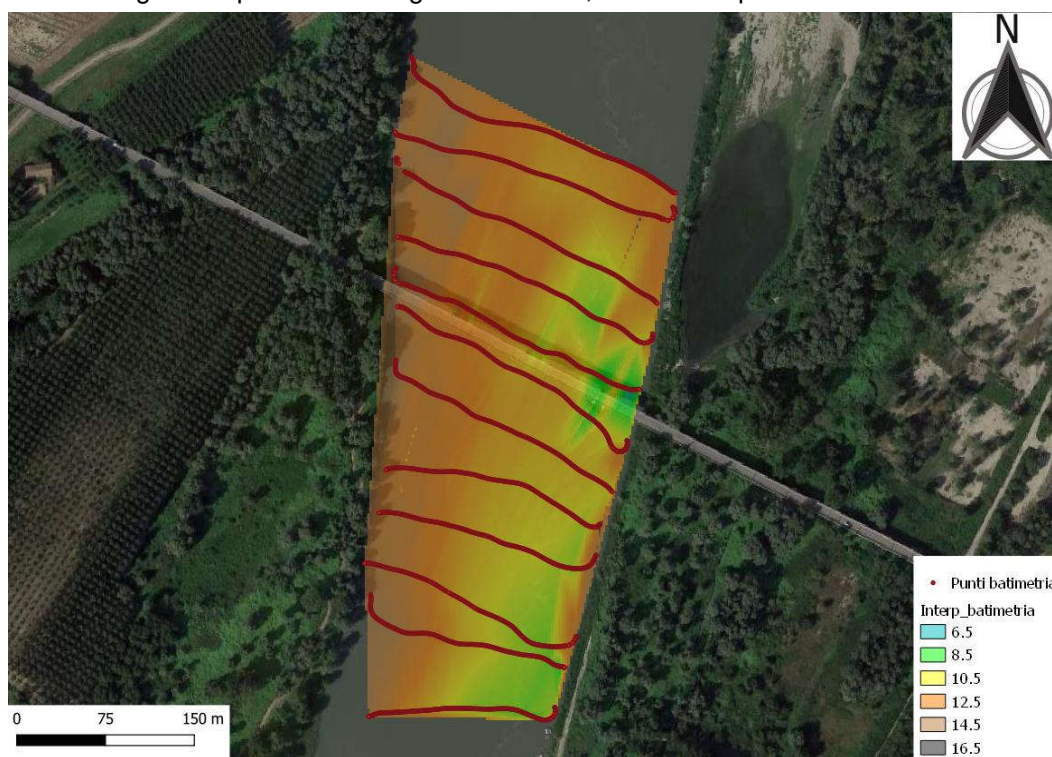


Figura 4 – Punti batimetrici rilevati e mappa della quota del fondo ottenuta da interpolazione

Tale area, tuttavia, risulta insufficiente per la definizione delle condizioni al contorno necessarie e per una modellazione adeguata dell'intero alveo del fiume Po.

Per soddisfare ciò, è stata sovrapposta l'interpolazione del rilievo batimetrico al rilievo Lidar del 2004, anch'esso batimetrico, fornito da AdBPo (<http://www.adbpo.it>) e scaricato per il tratto di interesse. Tra le due mappe la differenza di quota media nell'area di sovrapposizione è dell'ordine dei 25 cm, ovvero differenze di quota tali da non compromettere la modellazione bidimensionale effettuata.

Si precisa che presso AdBPo è stato richiesto anche il DTM aggiornato al 2015, che tuttavia, non essendo batimetrico, non risulta adeguato agli scopi del presente studio.

Di seguito un estratto dell'elaborazione effettuata, con indicazione delle sezioni individuate nel PAI, e relativa sezione in corrispondenza del ponte.

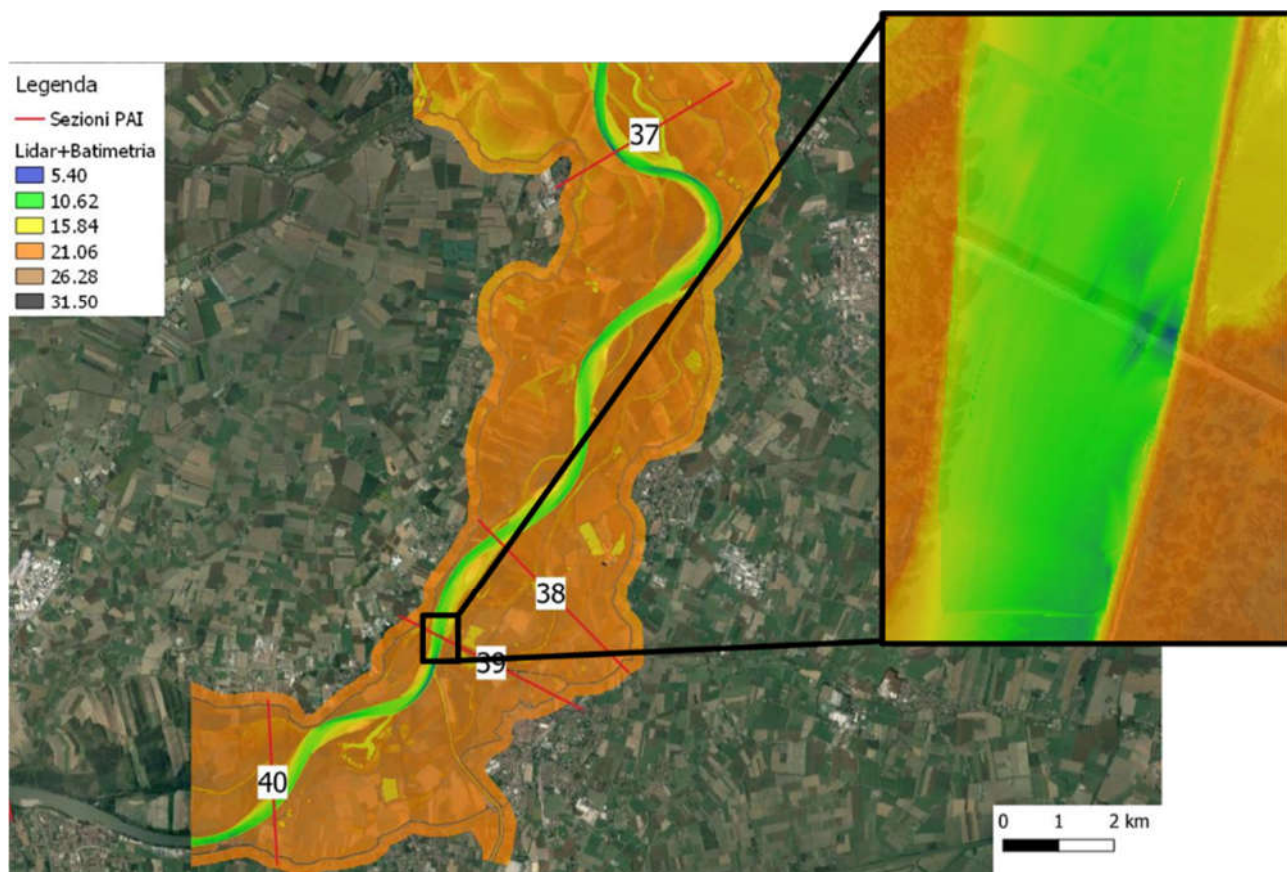


Figura 5 - Battimetria sovrapposta al lidar dell'alveo del Po fornito da AdBPo. A destra particolare nell'area di rilievo

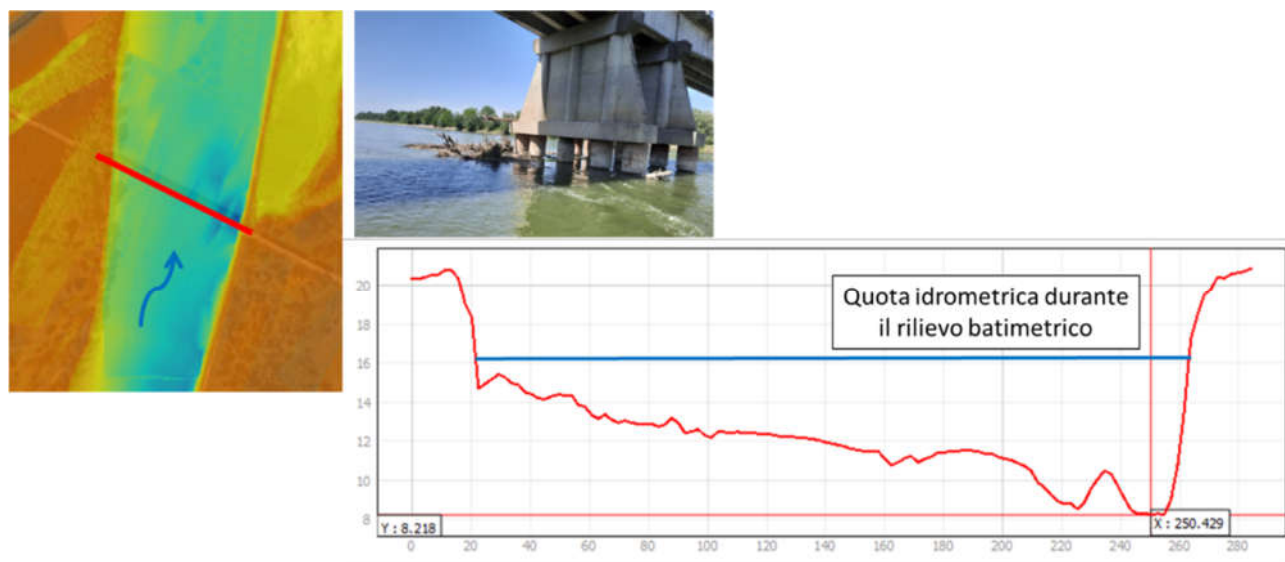


Figura 6 - Estratto di sezione in corrispondenza del ponte (in alto, una foto scattata durante il rilievo batimetrico alla pila 9)

Le sezioni 37 e 40 individuate dal PAI e mostrate in figura precedente sono state prese come riferimento per definire le condizioni al contorno della modellazione, sulla base dei profili di piena del Po descritti nel PGRA (maggiori dettagli nel capitolo dedicato alla modellazione).

Per quanto riguarda la geometria del ponte, è stato svolto un rilievo al fine di georeferenziare la struttura ed estrarre la quota dell'intradosso, necessaria alla verifica del franco idraulico. Tale quota risulta essere di 29.22 m.

4 PORTATE DI PIENA E ASPETTI IDRAULICI

La portata di piena di riferimento, come da Direttiva 4 del PAI, è “quella per cui è stata condotta la delimitazione della fascia B”, ovvero la portata a tempo di ritorno 200 anni. I valori sono riportati per diverse stazioni idrometriche all'interno delle tabelle allegate alla “Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica” del PAI. Per la presente analisi si fa riferimento alle portate di piena stimate alla stazione di Boretto, valide per il tratto di interesse in quanto immediatamente a monte. Di seguito l'estratto.

Tabella 3: portate di piena per il Po nel tratto da Isola Sant'Antonio (confluenza Tanaro) al Delta (incile Po di Goro)

Bacino	Corso d'acqua	Sezione			Superficie km ²	Q20 m ³ /s	Q100 m ³ /s	Q200 m ³ /s	Q500 m ³ /s	Idrometro Denominazione
		Progr.(km)	Cod.	Denomin.						
Asta Po	Po	264.855	82	Becca	36770	9290	12190	13600	15050	Po a Becca
Asta Po	Po	322.250	67	Piacenza	42030	8970	11550	13000	14100	Po a Piacenza
Asta Po	Po	367.640	57	Cremona	50726	10090	13000	14300	15870	Po a Cremona
Asta Po	Po	428.545	41	Boretto	55183	9380	12060	13700	14720	Po a Boretto
Asta Po	Po	457.560	36	Borgoforte	62450	9600	12260	13100	14890	Po a Borgoforte
Asta Po	Po	548.805	10	Pontelagoscuro	70091	9470	12070	13000	14650	Po a Pontelagoscuro

Figura 7 - Estratto della tabella 3 della Direttiva 7 del PAI

Per la piena a tempo di ritorno 200 anni il valore di portata è dunque di 13 700 mc/s.

Sulla base della portata duecentennale, la medesima direttiva fornisce anche le quote idrometriche corrispondenti in ogni sezione individuata. In particolar modo, per il presente studio si fa riferimento alle sezioni 40, 39, 38 e 37, precedentemente illustrate, per impostare il dominio di calcolo, definire le condizioni al contorno e calibrare il modello.

Sez. PAI	Progr. PAI (km)	Sez. rilievo Brioschi	Sez. rilievo SIMPO '82	Sez. rilievo 1999	Sez. rilievo 2004-2005	Progr. rilievo (km)	T = 20 anni	T = 200 anni	SIMPO '82	profilo sx Piena ott.2000	profilo dx Piena ott.2000
							Quota idrica (m s.m.)	Quota idrica (m s.m.)	Quota idrica (m s.m.)	Quota idrica (m s.m.)	Quota idrica (m s.m.)
041	428.545	37	132	37	S37	438.397	28.26	29.67	29.35	29.25	29.21
				37BIS	S37BIS	438.787	28.16	29.65	29.33	29.18	29.15
				37A	S37A	439.446	28.04	29.55	29.24	29.05	29.04
				37B	S37B	440.405	27.91	29.41	29.12	29.01	29.01
				37C	S37C	441.643	27.52	29.23	28.95	28.69	28.72
040	433.435	38	129	38	S38	443.305	27.08	28.99	28.74	28.63	28.44
				38A	S38A	445.285	26.78	28.79	28.39	27.92	28.30
				38B	S38B	446.045	26.70	28.70	28.23	28.15	28.13
				38C	S38C	447.014	26.46	28.58	28.02	28.08	28.05
				38D	S38D	447.925	26.27	28.48	27.84	27.80	27.75
039	438.500	GUASTALLA	126	38D1	S38D_1	448.458	26.12	28.42	27.74	27.68	27.62
				38E	S38E	449.443	26.01	28.28	27.63	27.52	27.50
038	440.670	39	125	39	S39	450.653	25.86	28.11	27.49	27.38	27.31
				39A	S39A	451.941	25.72	28.02	27.36	27.15	27.18
				39B	S39B	453.070	25.57	27.93	27.23	27.00	26.96
				39C	S39C	454.301	25.45	27.84	27.09	26.90	26.87
				39D	S39D	455.936	25.21	27.71	26.90	26.54	26.66
				39E	S39E	457.671	24.94	27.58	26.70	26.48	26.45
				39F	S39F	459.545	24.51	27.45	26.51	26.31	26.24
037	450.055	40	121	40	S40	460.383	24.51	27.37	26.39	26.28	26.09
				40A	S40A	461.781	24.35	27.29	26.29	25.97	26.01
				40B		463.054	24.31	27.22	26.21		25.98

Figura 8 - Estratto della tabella dei profili di piena alle sezioni di interesse

Nella tabella seguente si riassumono i dati utilizzati ai fini della definizione delle condizioni al contorno per la modellazione idraulica bidimensionale.

	Sezione di riferimento PAI	Grandezza
Condizione al contorno di monte	40	Portata=13 700 mc/s
Condizione al contorno di valle	37	Quota idrica=27.37 m slm

5 MODELLAZIONE IDRAULICA

La modellazione del comportamento idrodinamico del fiume Po è stata sviluppata, per il tratto limitato all'area in esame, mediante un modello di calcolo bidimensionale (detto "full 2D") ai volumi finiti. Il software utilizzato per l'implementazione del modello è InfoWorks ICM sviluppato dalla software house Innovyze.

La modellazione bidimensionale del corso d'acqua permette di rappresentare con accuratezza la propagazione delle onde di piena nell'asta fluviale e nelle aree ripariali attigue con la peculiarità di mettere in evidenza il comportamento della corrente in prossimità di bruschi restringimenti/allargamenti e forti curvature; è possibile inoltre valutare con un elevato grado di dettaglio gli effetti sulla 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.

5.1 GEOMETRIA DEL MODELLO

Il modello del terreno utilizzato è quello descritto al capitolo 3, che riunisce il rilievo batimetrico effettuato con il rilievo lidar del 2004 di AIPO. Il dominio di calcolo è compreso longitudinalmente tra le sezioni 40 e 37 del PAI, mentre trasversalmente all'alveo fino a oltre gli argini delimitanti la fascia B. Sono state implementate quindi le pile del ponte oggetto di studio. Si è considerato il diametro corrispondente al plinto di fondazione pari a 1.5 m, che risulta maggiore rispetto al fusto, pari a 1.2m.

Di seguito un estratto in ambiente Infoworks.

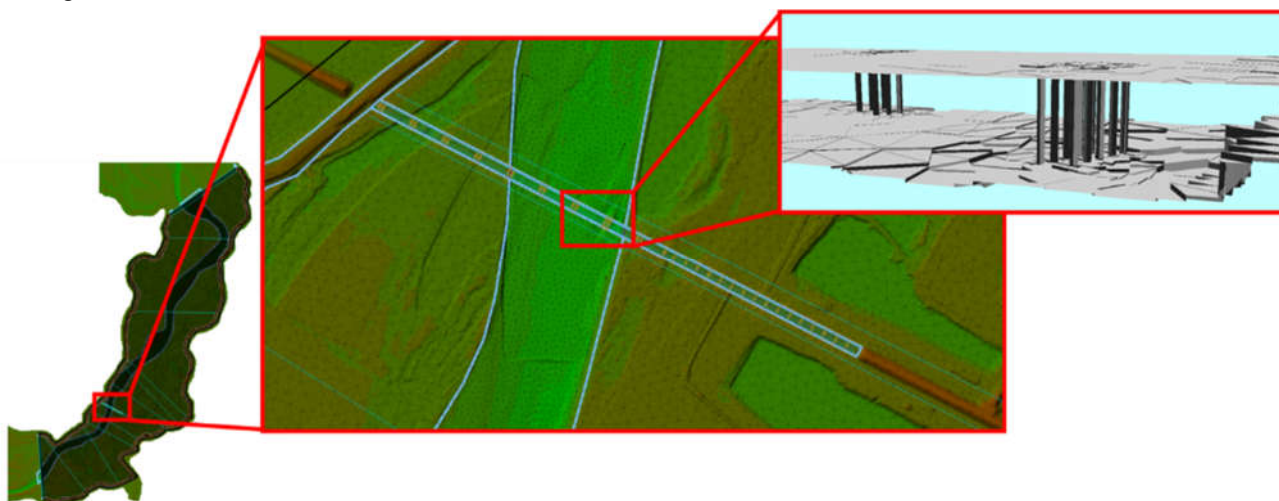


Figura 9 - Estratto in ambiente Infoworks del dominio di calcolo. In alto a destra particolare 3D della modellazione delle pile.

Al fine di meglio evidenziare il dettaglio degli effetti sulle grandezze idrauliche nel tratto di interesse, si riportano di seguito delle sezioni ritenute significative per la visualizzazione dei risultati derivanti dalle simulazioni. Queste sezioni, numerate progressivamente da 1 a 12, si estendono tra i due argini maestri. Tra le sezioni 5 e 6, individuate a monte e a valle del rilevato stradale in cui si inserisce il ponte di progetto, sono state inserite ulteriori 3 sezioni di risultati (p01, p02, p03) tra le due spalle del ponte, e precisamente a monte, al centro e a valle dell'impalcato. In tabella, le progressive relative e la corrispondenza delle sezioni con quelle individuate nel PAI.

Nei paragrafi seguenti dedicati ai risultati, i valori che verranno riportati in grafici e tabelle sono i valori massimi registrati lungo la sezione e quindi cautelativi rispetto alla situazione media della sezione.

Sez. PAI	Sez. risultati	Progr.relativa	Note
Sezioni principali			
40_pai	1	0	
	2	1670	
	3	2265	
	4	2750	
	5	3285	A monte del rilevato stradale
39_pai	6	3340	A valle del rilevato stradale
	7	4260	
	8	5120	
38_pai	9	5440	
	10	8460	
	11	12630	
37_pai	12	14955	
Sezioni al ponte			
	p01	0	A monte dell'impalcato
	p02	5	Al centro dell'impalcato
	p03	13	A valle dell'impalcato



Figura 10 - Sezioni principali di estrazione dei risultati

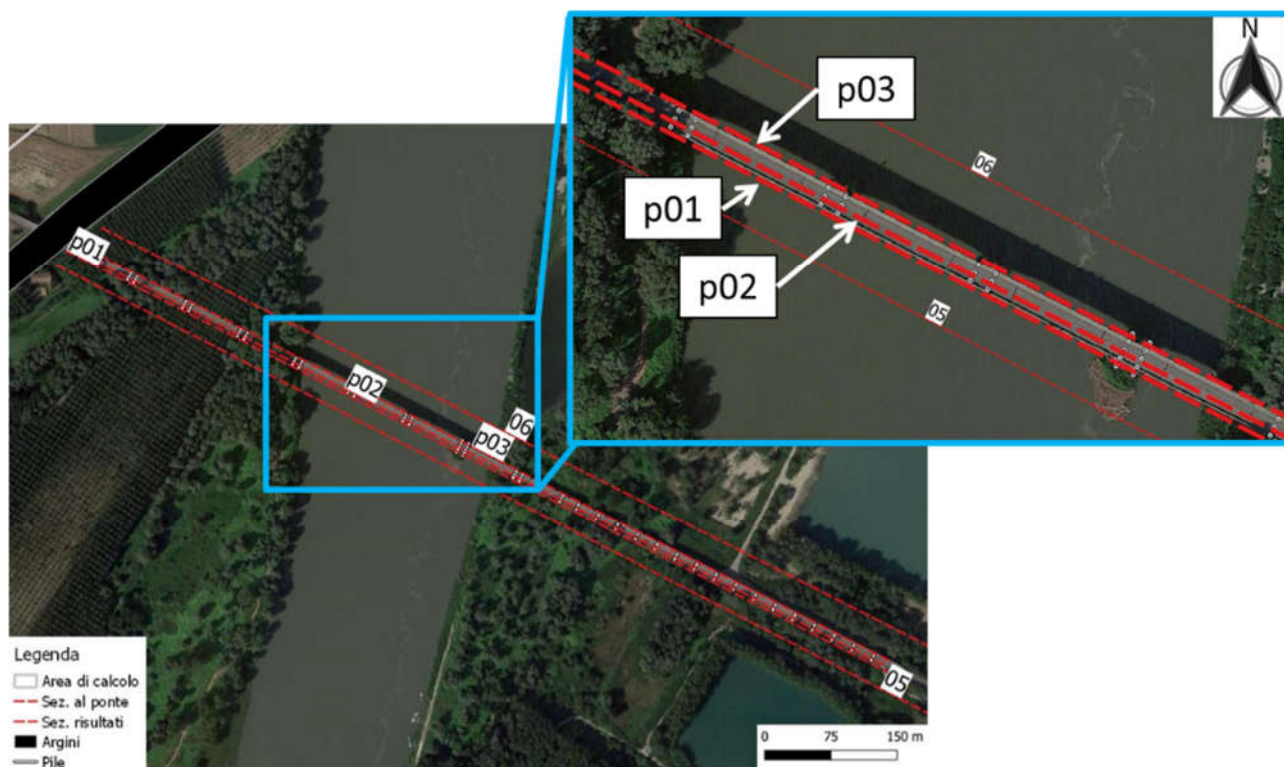


Figura 11 - Sezioni al ponte di estrazione dei risultati

5.2 VALORI DI SCABREZZA

I valori di scabrezza implementati sono stati ricavati dallo “Studio della vulnerabilità idraulica” eseguito nel 2008 per il ponte di Borgoforte a cura del Prof. Ing. Silvio Franzetti, considerati validi poiché immediatamente a valle del tratto del presente studio. In particolare, nello studio citato si propone un range di scabrezza tra 35 e 45 $m^{1/3}/s$ per l'alveo e tra 25 e 35 $m^{1/3}/s$ per le golene.

5.3 PORTATA DI PROGETTO

Al fine del presente studio, per effettuare le verifiche di compatibilità idraulica si è considerato come esposto precedentemente il valore di portata corrispondente ad un tempo di ritorno di 200 anni.

Sulla base del tratto fluviale analizzato e della tipologia di bacino, si è ritenuto valido considerare un idrogramma a portata costante. In ogni caso, il tratto di studio risulterebbe troppo corto (circa 15 km) per apprezzare il cappio di piena determinato dal moto vario.

5.4 CALIBRAZIONE DEL MODELLO

Ai fini della calibrazione del modello, sono state svolte differenti simulazioni al variare dei valori di scabrezza all'interno del range disponibile:

1. Scabrezze di calcolo pari a 40 $m^{1/3}/s$ per l'alveo e 30 $m^{1/3}/s$ per le golene (valore medio del range);
2. Scabrezze di calcolo pari a 35 $m^{1/3}/s$ per l'alveo e 25 $m^{1/3}/s$ per le golene (estremo inferiore del range);

3. Scabrezze di calcolo pari a $45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per l'alveo e $35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per le golene (estremo superiore del range);

Sulla base dei risultati ottenuti, si è ritenuto rappresentativo per l'analisi lo scenario a valori medi di scabrezza sia per l'alveo sia per le golene, e dunque rispettivamente 40 e $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Di seguito il grafico delle quote idrometriche assolute con evidenziato il confronto tra il profilo individuato in Direttiva 7 del PAI e la simulazione effettuata per il presente studio.

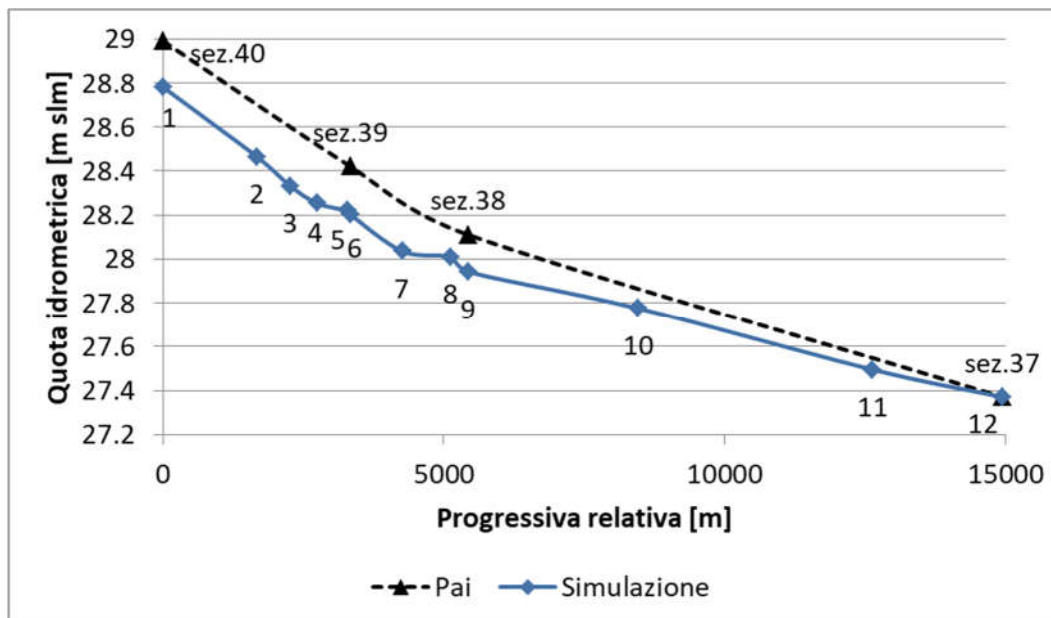


Figura 12 - Quote idrometriche assolute derivante dalla simulazione confrontate con il profilo di piena del PAI

Si nota come nella simulazione effettuata, l'imposizione della condizione al contorno alla sezione 37 del PAI comporta poi una quota idrometrica inferiore rispetto al profilo del PAI, con una differenza che a monte della sezione 38 rimane pressoché costante e dell'ordine dei 20 cm. Tale differenza risulta comunque non significativa, ma bensì accettabile, per gli scopi del presente studio in fase di fattibilità tecnico-economica.

5.5 RISULTATI DELLA MODELLAZIONE

Si riportano di seguito i risultati della modellazione idraulica, nella forma di mappe di velocità e di allagamento (quota e tirante idrico). La modellazione considera l'idrogramma a portata costante pari alla portata di progetto, si riportano quindi i livelli e le velocità ottenute una volta che il modello ha raggiunto le condizioni di equilibrio per la portata inserita (circa 5 ore da inizio simulazione).

Per chiarezza di visualizzazione si riportano gli estratti nel tratto compreso tra le sezioni 1 e 9 (ovvero tra sezione 40 e 38 del PAI), nell'intorno del ponte oggetto di progettazione.

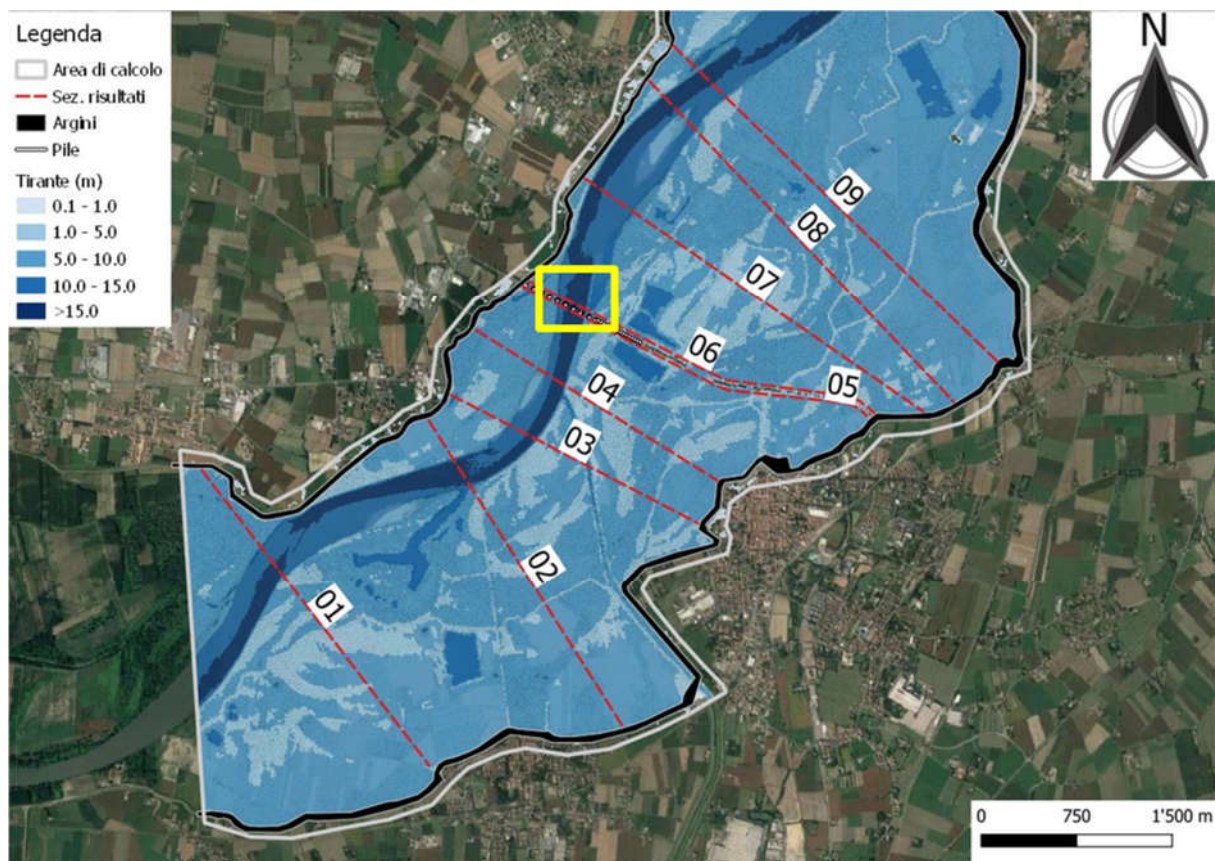


Figura 13 - Mappa dei tiranti (il quadrato giallo identifica l'area di zoom dell'immagine successiva)

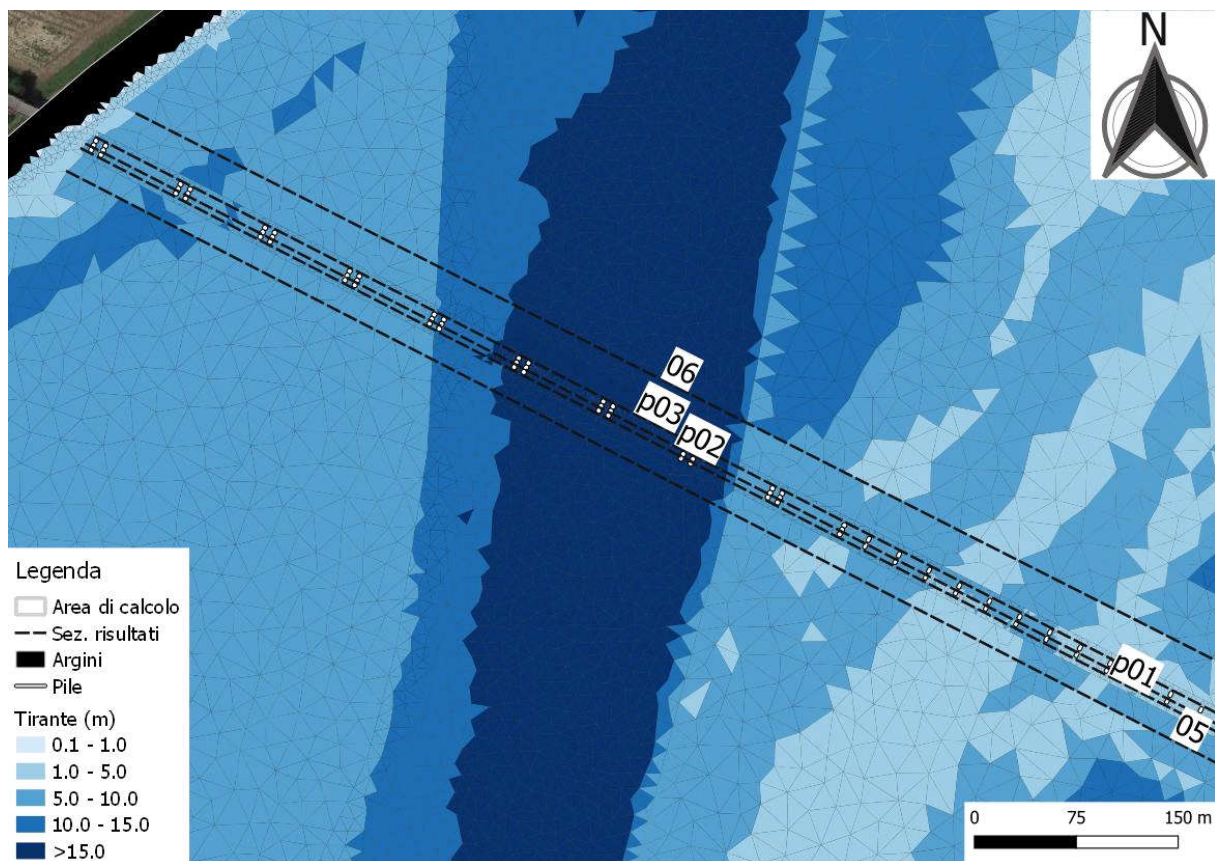


Figura 14 - Mappa dei tiranti: zoom al ponte (quadrato giallo nell'immagine precedente)

All'interno dell'alveo i tiranti variano tra i 10 e i 20 m. Dalla mappa si nota chiaramente come i tiranti maggiori siano in esterno curva con valori superiori ai 15 m, e, in particolare, alla sezione del ponte i tiranti massimi si riscontrano in destra idrografica e dell'ordine dei 20m.

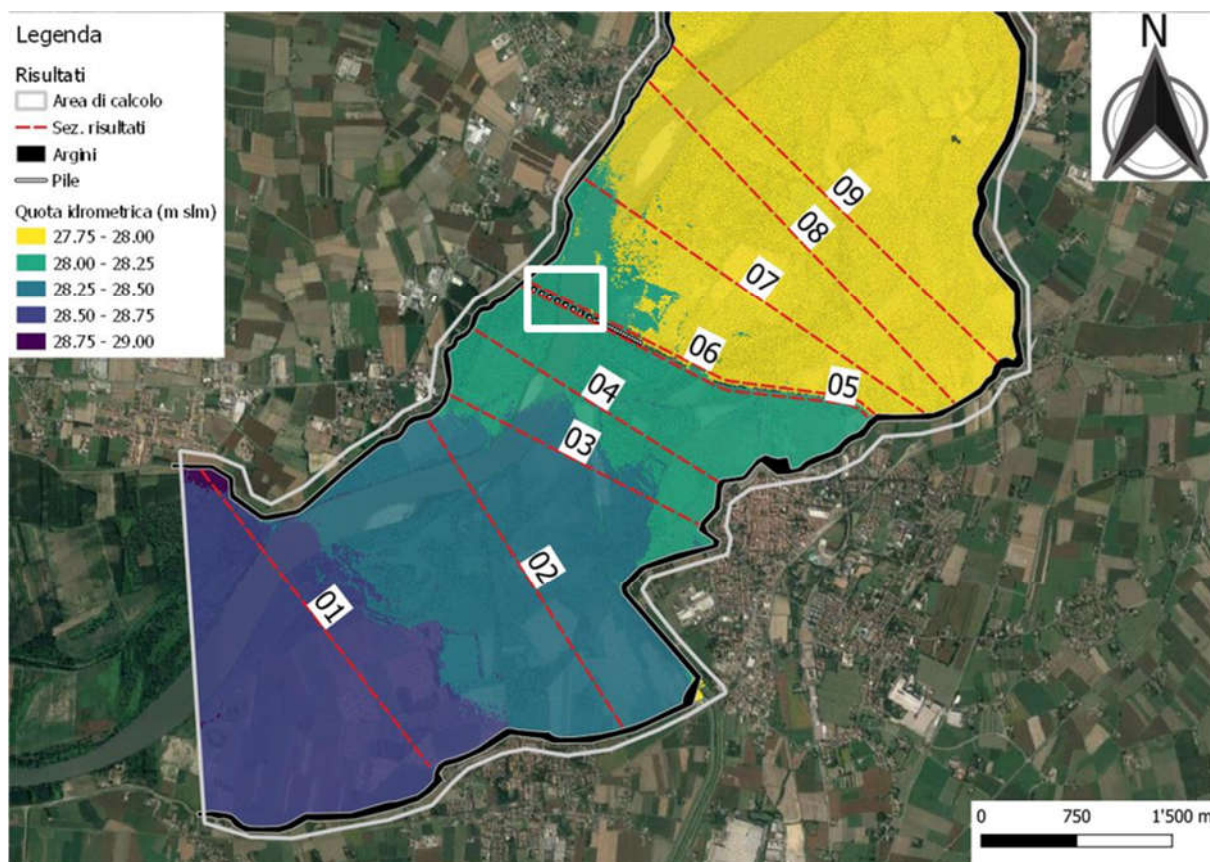


Figura 15 - Mappa delle quote idrometriche

La mappa delle quote idrometriche rivelano una variazione nel tratto estratto (di circa 6 km) dell'ordine di 1 m e una quota in corrispondenza del ponte (quadrato bianco nell'immagine) compresa tra 28.00 e 28.25 m s.l.m.

Di seguito invece si riportano le mappe di velocità. Come per i tiranti, le velocità massime si riscontrano in esterno curva, con valori compresi tra 1.5 e 2.0 m/s. In corrispondenza del ponte, le velocità massime appaiono in destra idrografica e dell'ordine di 2 m/s.

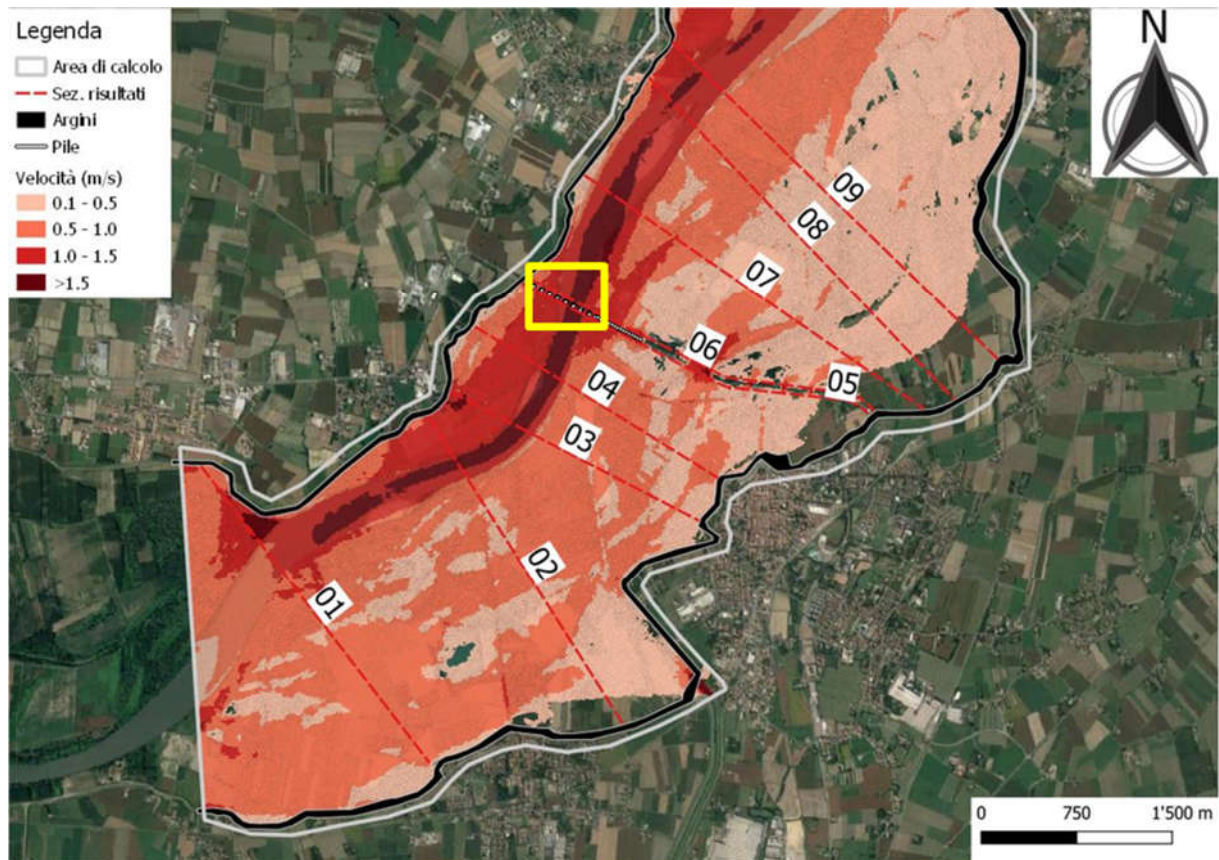


Figura 16 - Mappa delle velocità (il quadrato giallo identifica l'area di zoom dell'immagine successiva)

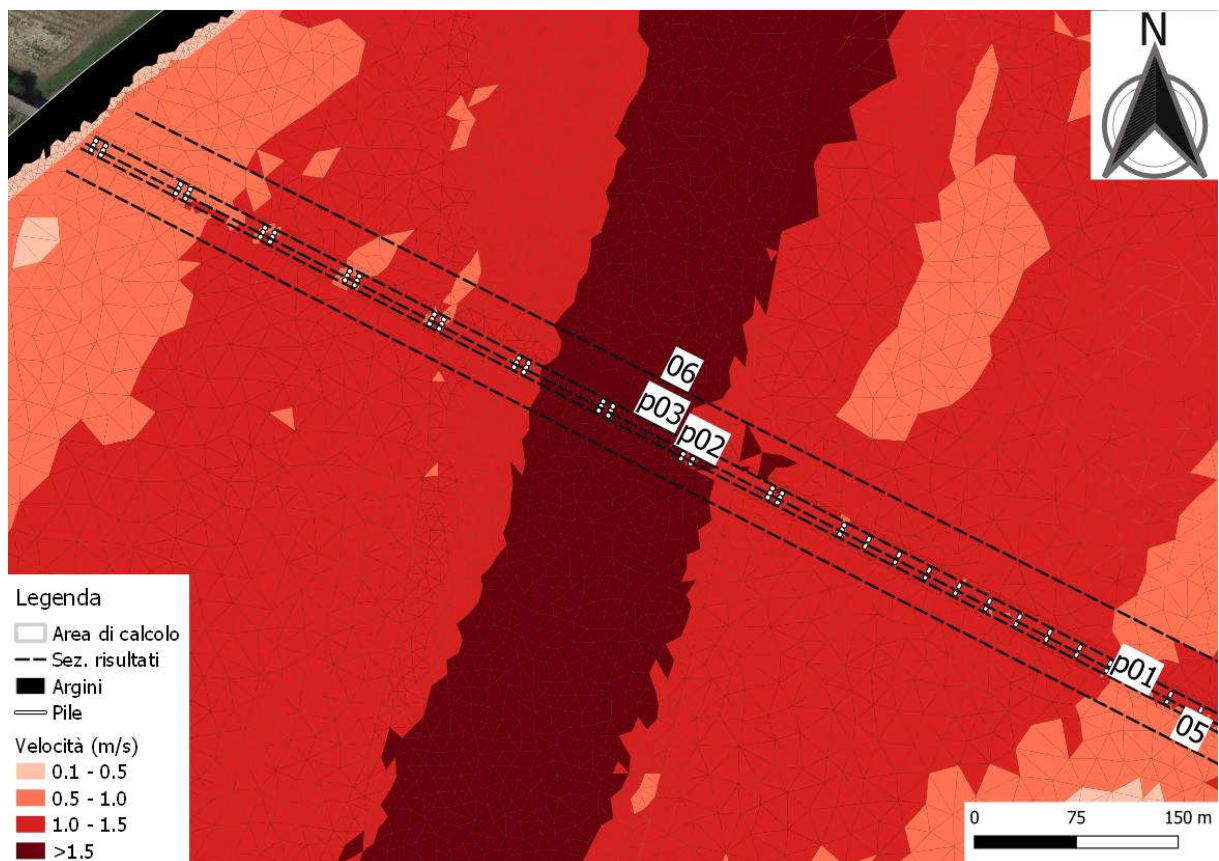


Figura 17 - Mappa delle velocità: zoom al ponte (quadrato giallo nell'immagine precedente)

6 ANALISI DEI RISULTATI

Le precedenti immagini sono esplicative delle aree di allagamento e forniscono un primo riscontro riguardo i tiranti idrici e le velocità della corrente; in questo paragrafo si analizzano i risultati nel dettaglio, anche mediante i valori estratti sulle sezioni di riferimento illustrate nel paragrafo 5.1. Come già detto nello stesso paragrafo, i valori riportati sono i massimi registrati lungo la sezione, e quindi cautelativi rispetto alla situazione media della sezione.

Di seguito una tabella riassuntiva delle grandezze utili (in verde le sezioni 5 e 6, rispettivamente a monte e a valle del rilevato stradale in cui si inserisce il ponte di progetto) e relativi grafici.

Sez. PAI	Sez. risultati	Progr.relativa [m]	Quota PAI [m slm]	Quota idrom. [m slm]	Tirante [m]	Quota fondo [m slm]	Velocità [m/s]
Sezioni principali							
40	1	0	28.99	28.78	16.12	12.66	1.21
	2	1670		28.47	15.63	12.84	1.61
	3	2265		28.33	20.74	7.60	1.69
	4	2750		28.25	20.78	7.47	1.73
	5	3285		28.22	18.64	9.58	1.82
39	6	3340	28.42	28.20	18.15	10.06	1.84
	7	4260		28.04	18.10	9.93	1.61
	8	5120		28.01	17.01	11.01	1.51
38	9	5440	28.11	27.94	16.45	11.49	1.51
	10	8460		27.78	16.40	11.37	1.19
	11	12630		27.50	19.10	8.39	1.06
37	12	14955	27.37	27.37	20.94	6.43	0.84
Sezioni al ponte							
	p01	0		28.34	19.27	9.07	1.84
	p02	5		28.38	19.58	8.80	1.84
	p03	13		28.17	20.32	7.85	1.85

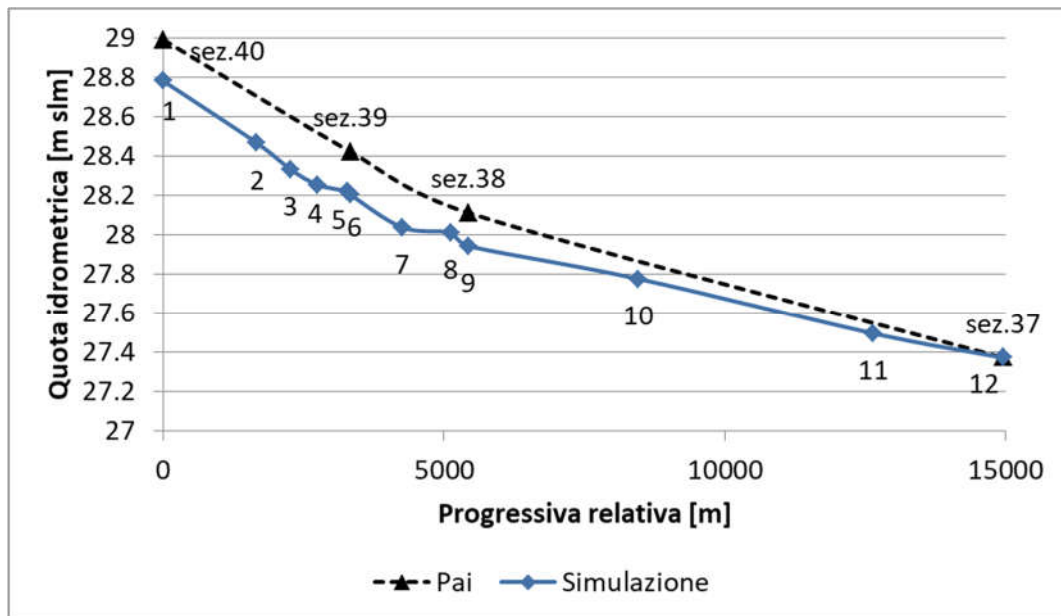


Figura 18 – Quota idrometrica in relazione al profilo di piena del PAI

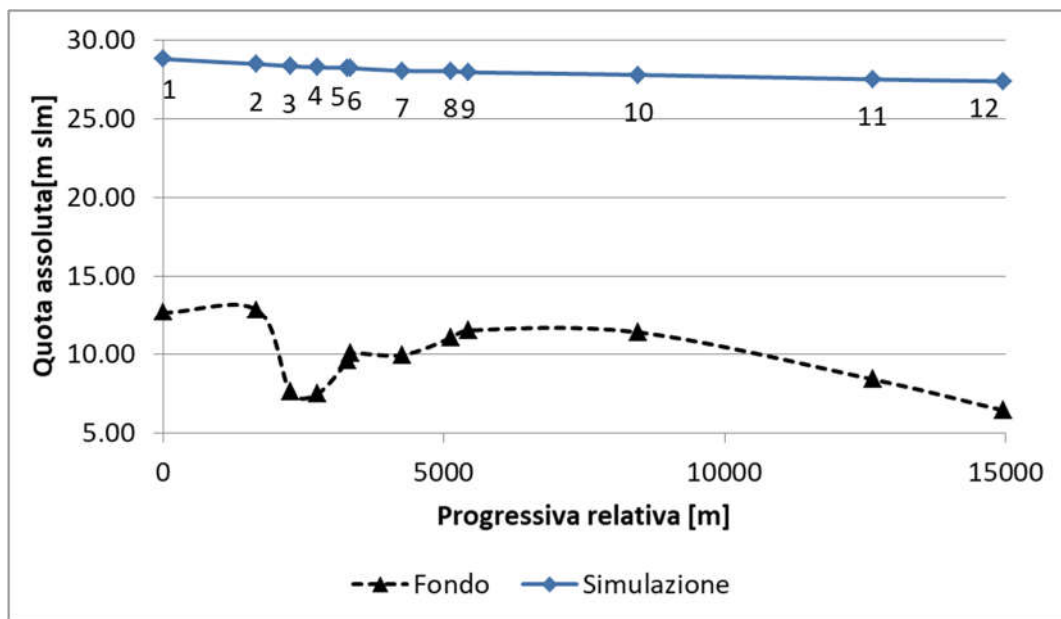


Figura 19 - Quota idrometrica in relazione alla quota del fondo

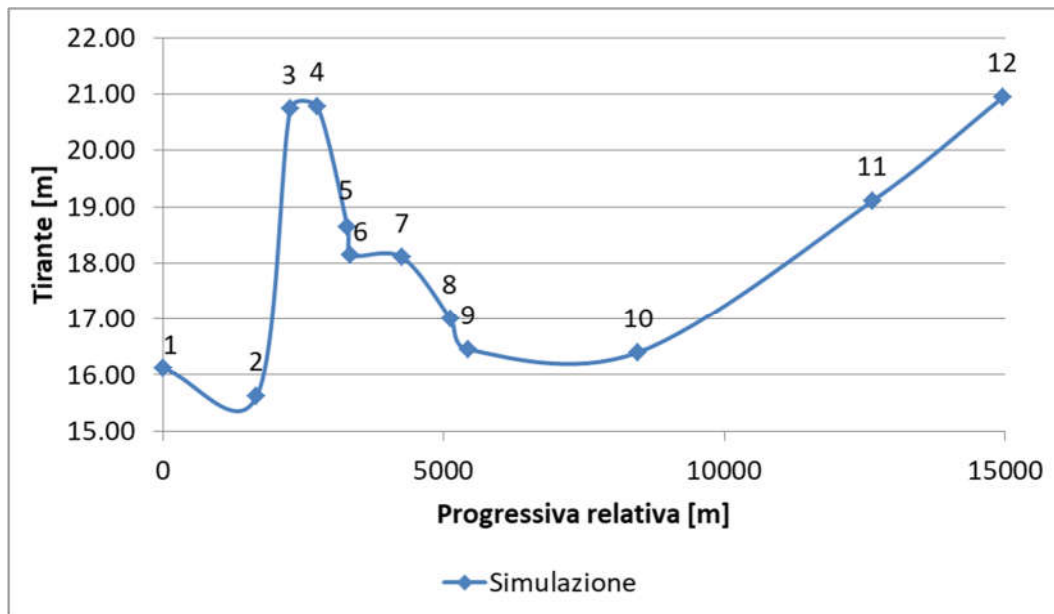


Figura 20 – Tirante idrico

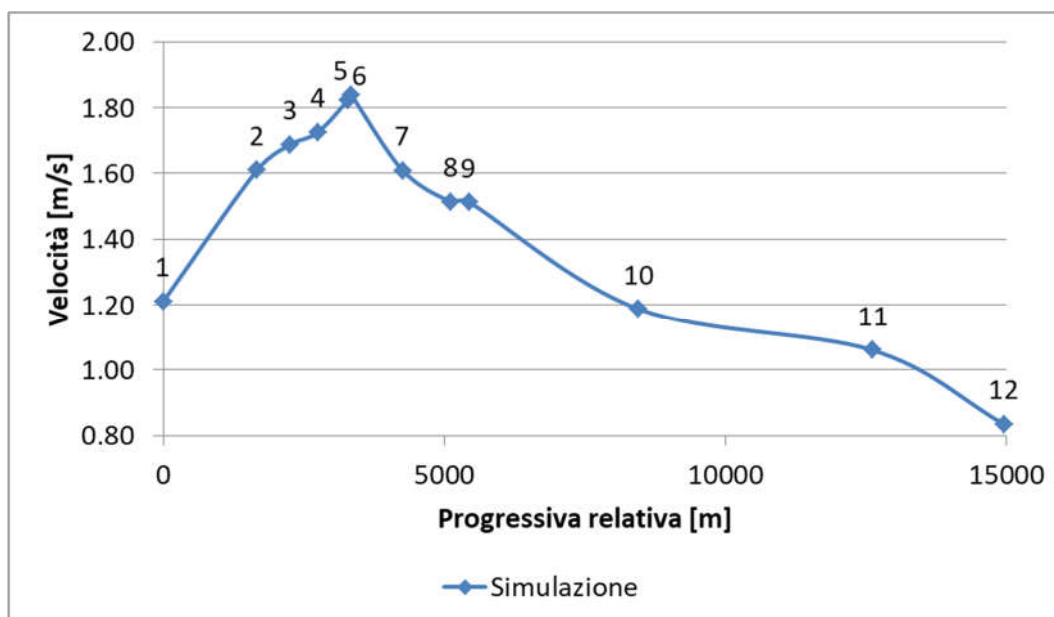


Figura 21 – Velocità

Dai grafici precedenti si nota una forte variazione dei tiranti nel tratto analizzato, che rispecchia un'uguale oscillazione delle quote minime di fondo alveo dovute ai moti secondari presenti. Le velocità hanno il proprio picco nei pressi del ponte, con valori dell'ordine di 1.8 m/s.

Si riportano anche i grafici per le sezioni p01, p02 e p03 in corrispondenza del ponte.

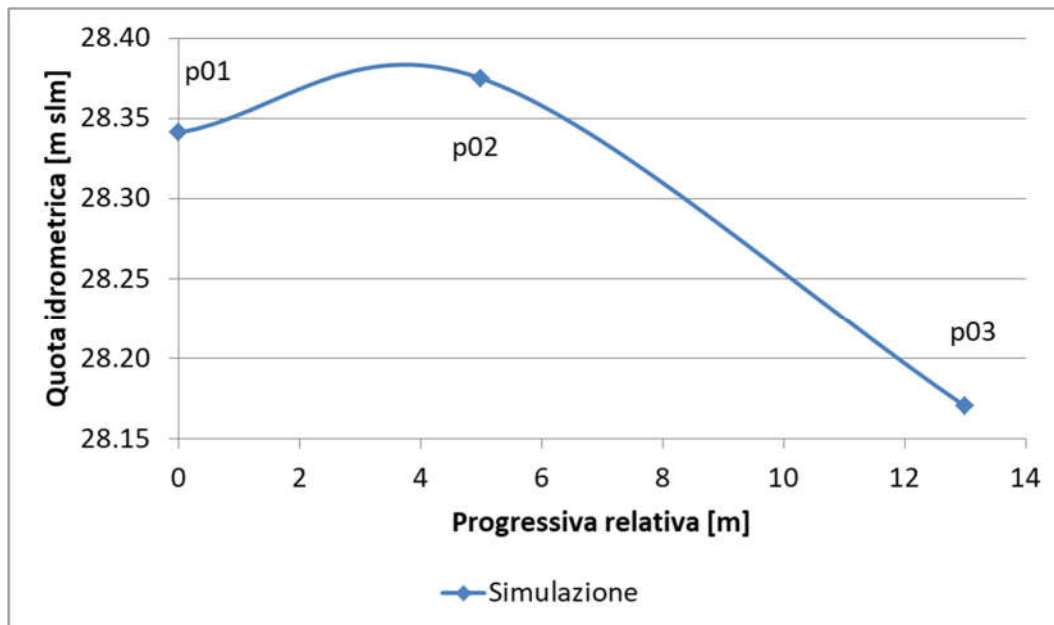


Figura 22 - Quota idrometrica in corrispondenza del ponte

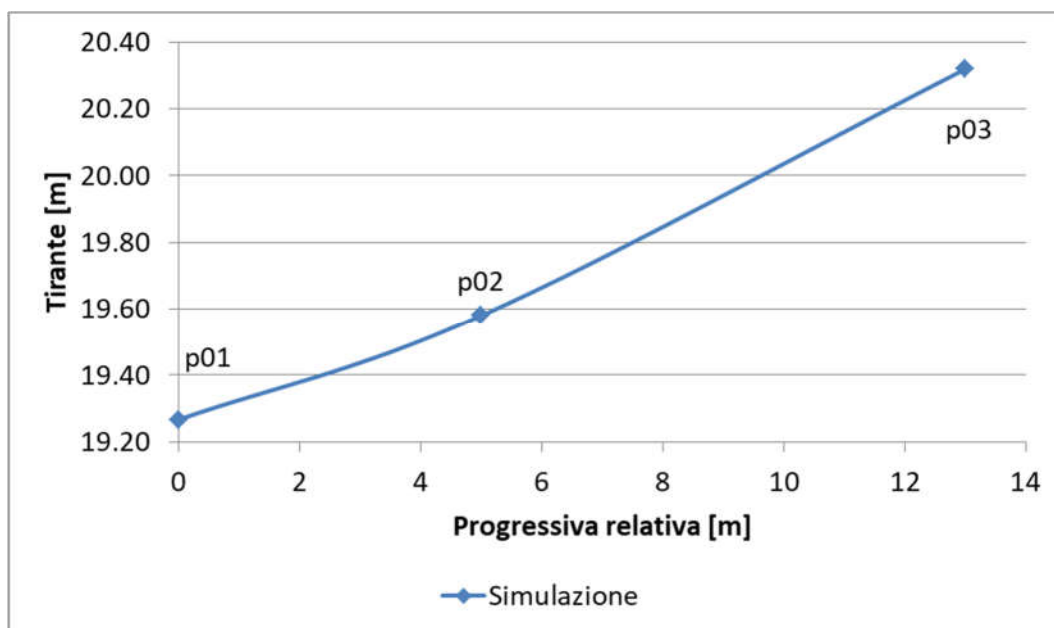


Figura 23 - Tirante idrico in corrispondenza del ponte

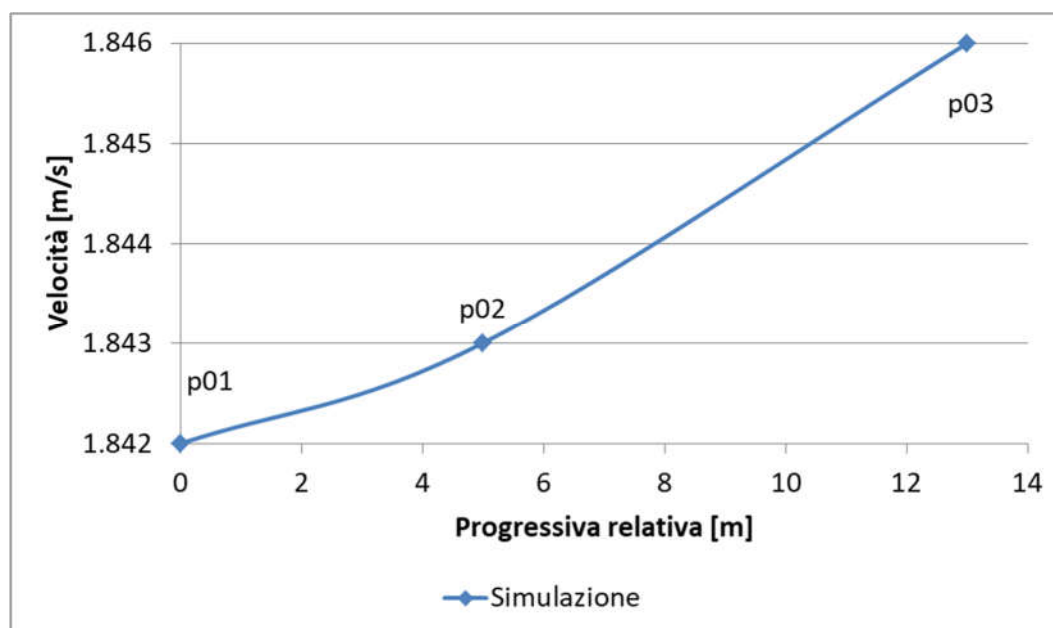


Figura 24 - Velocità in corrispondenza del ponte

Da questi ultimi grafici appare come le variazioni delle grandezze in gioco siano minime tra monte e valle del ponte, con valori di quota idrometrica che oscillano di 20 cm e le velocità di meno di 0.01 m/s. Il valore di tirante presenta il massimo nella sezione di valle, con un valore di 20.32 m, dovuto principalmente alla quota del fondo inferiore a valle delle pile causato dall'erosione localizzata riscontrata nel DTM di base.

Ai fini delle verifiche necessarie alla compatibilità idraulica, si riassumono i valori massimi delle grandezze in corrispondenza del ponte. In particolar modo, per le verifiche di spinta e scalzamento, sono rilevanti i tiranti e le velocità. Dai valori di dettaglio sulle sezioni p01, p02 e p03 si ottiene che i massimi sono, arrotondando per eccesso:

Grandezza	Valore massimo
Tirante [m]	20.5
Velocità [m/s]	2.0

6.1 VERIFICA DEL FRANCO IDRICO

La quota di progetto di intradosso del ponte, come precedentemente riportato, è stata ricavata da rilievo dedicato ed è pari a 29.22 m slm. Nel caso in esame, la quota idrometrica massima derivante dalla modellazione in corrispondenza del ponte risulta di 28.38 m slm, mentre da PAI tale quota è di 28.42 m slm. Tenendo come riferimento la quota del PAI, si ottiene dunque un franco di sicurezza di 80 cm.

Rispetto alle NTC 2018, il franco minimo richiesto è pari a 1.5 m.

Rispetto alla direttiva del AdBPO, il franco minimo deve essere garantito in 0.5 volte l'altezza cinetica della corrente, e comunque non inferiore ad 1 metro. Con una velocità massima in corrispondenza del ponte di 2.0 m/s, l'altezza cinetica risulta essere di 0.22 m.

Nel caso in esame, il franco è dunque inferiore ai valori richiesti, sia in riferimento alle NTC 2018, sia alle direttive AdBPO. Tuttavia, si deve precisare che la quota dell'intradosso dell'impalcato risulta superiore a quella degli argini maestri, che nell'intorno del ponte risulta essere dell'ordine dei 28.90 m slm. Risulta esserci dunque un franco di almeno 30 cm rispetto alla quota di sommità arginale.

6.2 VERIFICA DEL TEMPO DI RITORNO ASSOCIATO AL FRANCO IDRICO MINIMO

La circolare 7/2019 in applicazione alle NTC 2018, richiede al punto C.5.1.2.3 la valutazione della frequenza probabilistica $1/Tr$ degli eventi che comportano il rispetto del franco stabilito dalla NTC, ovvero di 1.5 metri. A tale scopo è stata svolta un'analisi dedicata.

Sono stati recuperati dal PAI dell'AdBPo ulteriori dati al fine di ricavare per interpolazione la scala di deflusso alla sezione in corrispondenza del ponte Dosolo-Guastalla, ed individuare quindi la portata, e di conseguenza il tempo di ritorno, associato alla quota che garantisce il franco minimo, pari a 27.72 m slm (rispetto ad una quota dell'intradosso di 29.22 m slm, si veda paragrafo precedente). In particolare, oltre al profilo della piena duecentennale utilizzato per la calibrazione del modello esposto precedentemente, il PAI riporta due profili di piena, denominati "SIMPO'82" e "piena 1994".

Dal PAI si sono estratti dunque i valori di quota idrometrica e di portata per ognuno di essi in corrispondenza della sezione del ponte in esame.

In merito alle portate, si è ricavato dalla tabella 3.1 un valore di 13'000 mc/s per il profilo SIMPO'82 a Boretto, mentre per la piena 1994 si è estratto il valore di piena di 10'500 mc/s dalla figura 3.4 illustrante le portate massime al colmo per l'anno di riferimento, sempre a Boretto. Di seguito i due estratti con segno grafico in rosso.

Tab. 3.1. Portate e livelli idrometrici al colmo nelle stazioni idrometriche lungo l'asta del Po riferite alla piena del nov. 1951 e al profilo di riferimento SIMPO '82

Stazione	Bacino (km ²)	Progressiva (km)	Piena 1951		Piena SIMPO '82	
			(m ³ /s)	registrato (m s.m.)	ricostruito (m s.m.)	(m ³ /s) (m s.m.)
Becca	36.770	265	11.250	62,95	-	12.000 63,51
Piacenza	42.030	323	12.800	52,41	-	13.000 52,06
Cremona	50.726	367	13.450	40,28	-	13.500 40,61
Casalmaggiore	53.460	415	-	31.13	31.19	13.000 31,44
Boretto	55.183	429	12.100	28,44	28,54	13.000 29,12
Borgoforte (Roncorrente)	62.450	460	11.800	24,94	25,08	13.000 25,74
Revere	67.900	500	11.260	19,76	20,68	12.500 20,79
Pontelagoscuro	70.091	549	10.300(*)	12,79	14,21	12.500 14,24

(*) valore ricostruito 11.580

Figura 25 - Tabella 3.1 del PAI con il valore di piena a Boretto

Fig. 3.4. Po a Boretto: portate massime al colmo

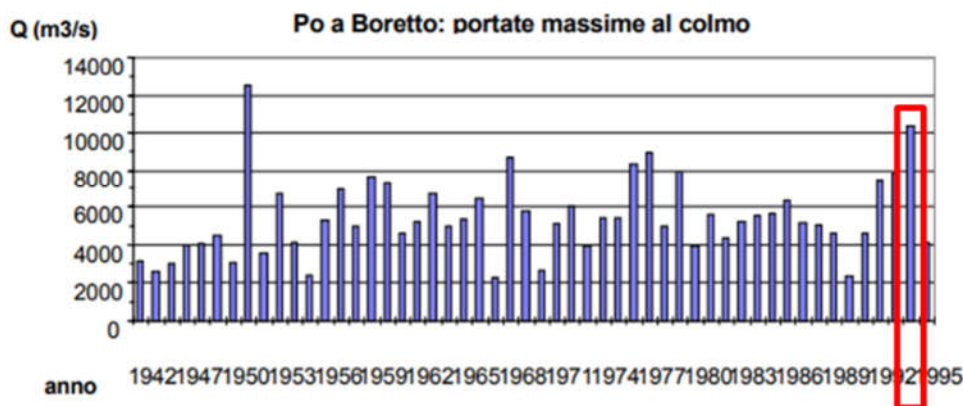


Figura 26 – Figura 3.4 del PAI con il valore delle portate al colmo a Boretto. In rosso il valore per il 1994.

In merito ai livelli idrometrici, essi sono stati estratti dalla tabella 3.7 del PAI, di seguito riportata, individuante i profili relativi alle varie piene. Si è tenuto conto dei valori di quota idrometrica sia in corrispondenza del ponte di progetto (in rosso), sia in corrispondenza della sezione 37 del PAI, riferimento per la condizione al contorno di valle per l'implementazione del modello idraulico (in blu, in questa tabella denominata 40 per diverso riferimento ma coincidente con la 37 del PAI, come si nota in Figura 8). Si precisa che la colonna "Profilo piena 94+51" coincide con il profilo della piena duecentennale già riportato in Figura 8 della presente relazione.

Progres. (km).	Riferimento sez. Brioschi	Riferimento sez. SIMPO '82	Profilo piena SIMPO '82	Profilo piena 1994	Profilo piena 94+51
414.585	35-CASALMAGGIORE	140	31,44	32,07	32,68
419.815	35BIS		30,46	30,34	31,18
424.980	36	134	29,50	29,23	30,28
428.545	37	132	29,35	28,31	29,67
433.435	38	129	28,74	27,53	28,99
438.500	GUASTALLA	126	27,74	26,75	28,42
440.670	39	125	27,49	26,37	28,11
450.055	40	121	26,39	25,37	27,37
457.560	41	116	25,74	24,82	26,85
460.335	42-PONTE SS. 62	114	25,50	24,39	26,42

Figura 27 - tabella 3.7 del PAI individuante i vari profili di piena. In rosso al ponte di progetto, in blu alla sezione di contorno del modello

E' stato quindi rilanciato il modello, così come già calibrato, variando le condizioni al contorno sulla base dei due profili di piena da riprodurre, riassunte di seguito.

	Sezione di riferimento PAI	Grandezza	Profilo di piena
Condizione al contorno di monte	40	Portata=13 000 mc/s	SIMPO'82
Condizione al contorno di valle	37	Quota idrica=26.39 m slm	
Condizione al contorno di monte	40	Portata=10 500 mc/s	Piena 1994
Condizione al contorno di valle	37	Quota idrica=25.37 m slm	

Si riportano in tabella seguente i risultati delle due modellazioni svolte, confrontate con i valori estratti dalle tabelle PAI.

Profilo di riferimento	Quota PAI [m slm]	Quota modello [m slm]
T=200 anni	28.42	28.38
SIMPO'82	27.74	27.69
1994	26.75	26.91

Si nota che la variazione tra le quote estratte da modello e le quote PAI è dell'ordine massimo dei 15 cm, in riferimento al profilo "piena 1994", e dunque assolutamente comparabile.

Per effettuare il confronto, si è tenuto conto delle portate per i tempi di ritorno di 20, 100 e 200 anni individuate dal PAI attraverso elaborazione statistica alla sezione di Boretto, e valide dunque anche alla sezione di riferimento del ponte Dosolo-Guastalla, e rispettivamente 9'380, 12'060 e 13'700 mc/s.

Tabella 3: portate di piena per il Po nel tratto da Isola Sant'Antonio (confluenza Tanaro) al Delta (incile Po di Goro)

Bacino	Corso d'acqua	Progr.(km)	Sezione Cod.	Denomin.	Superficie km²	Q20 m³/s	Q100 m³/s	Q200 m³/s	Q500 m³/s	Idrometro Denominazione
Asta Po	Po	264.855	82	Becca	36770	9290	12190	13600	15050	Po a Becca
Asta Po	Po	322.250	67	Piacenza	42030	8970	11550	13000	14100	Po a Piacenza
Asta Po	Po	367.640	57	Cremona	50726	10090	13000	14300	15870	Po a Cremona
Asta Po	Po	428.545	41	Boretto	55183	9380	12060	13700	14720	Po a Boretto
Asta Po	Po	457.560	36	Borgoforte	62450	9600	12260	13100	14890	Po a Borgoforte
Asta Po	Po	548.805	10	Pontelagoscuro	70091	9470	12070	13000	14650	Po a Pontelagoscuro

Figura 28 - Valori di portata per vari tempi di ritorno a Boretto

Infine quindi si è realizzato un grafico illustrante le scale di deflusso alla sezione del ponte di progetto ottenute sia interpolando i risultati della modellazione (SD-modello), sia direttamente i dati forniti dal PAI (SD-PAI). Nello stesso grafico si sono visualizzati la quota dell'intradosso dell'impalcato (29.22 m slm, in nero), la quota minima per garantire il franco di 1.5 m (27.72 m slm, in arancio), le portate corrispondenti ai vari tempi di ritorno ($Q_{TR20}=9'380$ mc/s, $Q_{TR100}=12'060$ mc/s, $Q_{TR200}=13'700$ mc/s, in rosso tratteggiato), e le linee di interpolazione. Si è considerata una interpolazione logaritmica, come da prassi per le scale di deflusso.

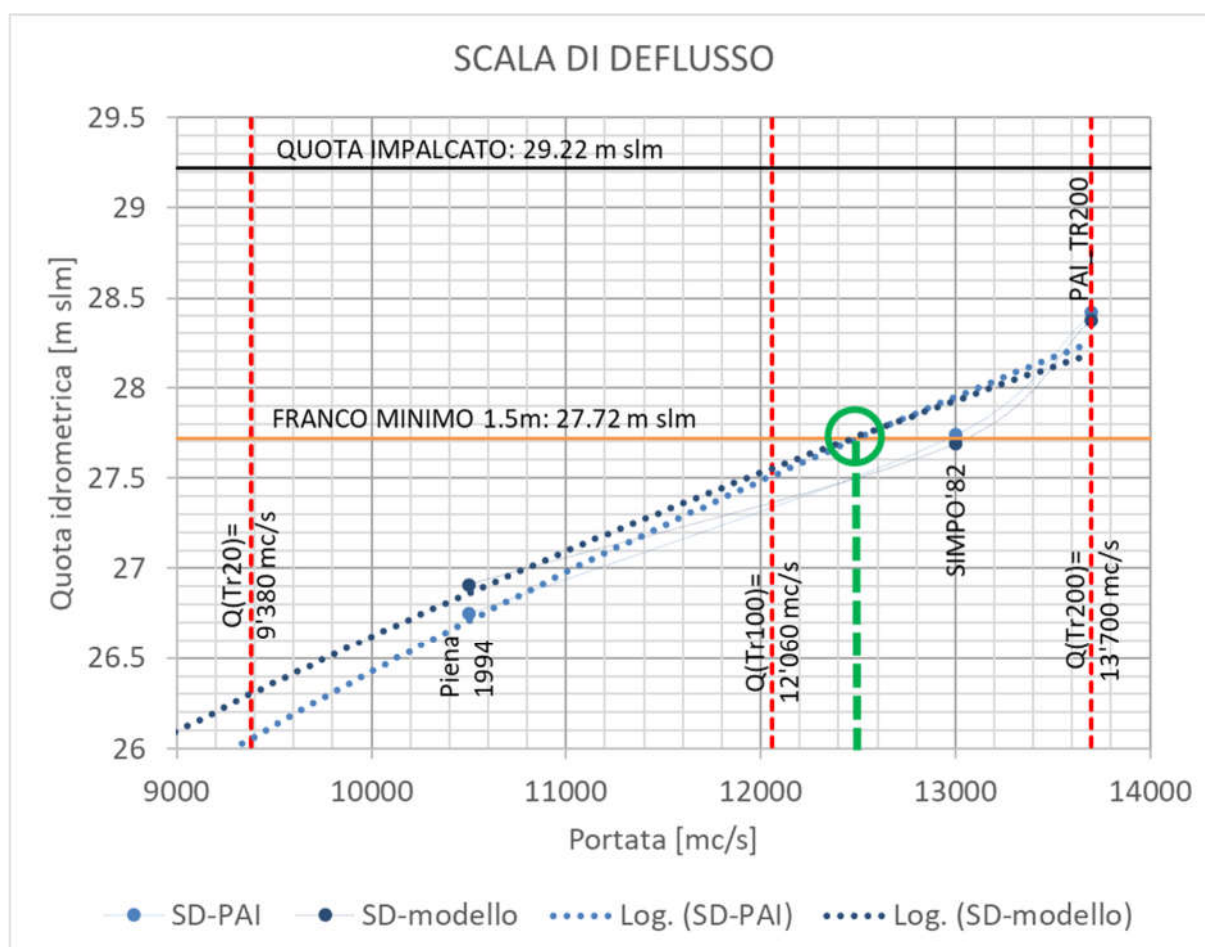


Figura 29 - Scale di deflusso ottenute dalla modellazione e dai dati PAI

Graficamente (cerchio verde) si nota quindi come sia per la scala di deflusso ottenuta dall'interpolazione dei dati PAI sia per quella ottenuta dalla modellazione, la portata che garantisce il rispetto del franco minimo da NTC 2018 di 1.5 m risulta essere dell'ordine di 12'500 mc /s.

Da tale valore, verrà calcolata indirettamente il valore del tempo di ritorno corrispondente, determinando in prima istanza i parametri delle distribuzione di Gumbel. Essendo per la legge di Gumbel:

$$y = -\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{Tr} \right) \right]$$

$$Q(Tr) = u + \alpha \cdot y = u - \alpha \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{Tr} \right) \right]$$

avendo le coppie di valori

$Tr(200); Q(200)$

$Tr(100); Q(100)$

$Tr(20); Q(20)$

si possono determinare i valori delle variabili delle distribuzione di Gumbel, con cui è possibile calcolare il tempo di ritorno corrispondente ad una portata pari a 12'500 mc/s.

Di seguito i risultati ottenuti. Il calcolo è stato eseguito incrociando le coppie di valori aventi tempi di ritorno differenti: 100-200 anni e 20-200 anni. La coppia 20-100 si è esclusa in quanto non rappresentativa dell'intervallo di tempo di ritorno ricercato: anche da Figura 29 appare chiaro che esso sarà compreso tra i 100 e i 200 anni.

Coppia di Tr considerata	Parametro u	Parametro alpha
100-200	1215.32	0.000424
20-200	3862.65	0.000538

Da tali parametri, applicando nuovamente la distribuzione di Gumbel, si è ricavato per ogni combinazione il tempo di ritorno associato alla portata di 12'500 mc/s.

Coppia di Tr considerata	Tr [anni]
100-200	120
20-200	105

I risultati rilevano un ordine di grandezza compreso tra i 105 e i 120 anni.

Il valore più cautelativo di 105 anni è individuato dai parametri ottenuti per la coppia 20-200 anni. Tuttavia, si reputa più accurato considerare il tempo di ritorno di 120 anni ottenuto dalla coppia di valori 100-200 anni, in quanto maggiormente rappresentativi della distribuzione di Gumbel nell'intervallo ricercato.

Da ciò, si può affermare che il tempo di ritorno associato alla portata di 12'500 mc/s che garantisce il minimo franco idrico di 1.5 m è quindi dell'ordine dei 120 anni.

La frequenza probabilistica 1/Tr associata è pari dunque a 0.0083.

7 FENOMENI LEGATI AL TRASPORTO SOLIDO

I manufatti presenti in alveo (pile) interagiscono con la corrente modificando il profilo idraulico e generando moti tridimensionali localizzati (vortici) che comportano fenomeni di erosione e deposito del fondo. Tali fenomeni, in condizioni di piena, possono risultare significativi ed in alcuni casi causano il cedimento delle strutture stesse.

La complessità dei moti non permette una facile stima analitica dei fenomeni erosivi in quanto dipendono da numerose grandezze (tirante, dimensione del sedimento, forma della spalla, velocità della corrente, ecc.). E' però fondamentale stimarli per evitare fenomeni spiacevoli di cedimento delle pile; per fare ciò sono diffuse delle formule sperimentali che permettono una stima dello scavo alla base delle stesse.

Per lo scalzamento della pila sono stati utilizzati i risultati ottenuti dalla modellazione della piena di progetto con tempo di ritorno pari a 200 anni.

Per quanto riguarda la dimensione del sedimento, si è fatto riferimento a diverse curve granulometriche rappresentative per il caso in esame. In particolare, si è preso in considerazione:

- curva granulometrica relativa al sondaggio 2 (eseguito nel terreno di fondazione del ponte in corrispondenza di una delle pile) svolto in occasione delle "Analisi delle condizioni statiche delle fondazioni e dell'impalcato" nel novembre 1995. Si è fatto riferimento al campione 1 relativo al primo deposito sabbioso incontrato durante il carotaggio;

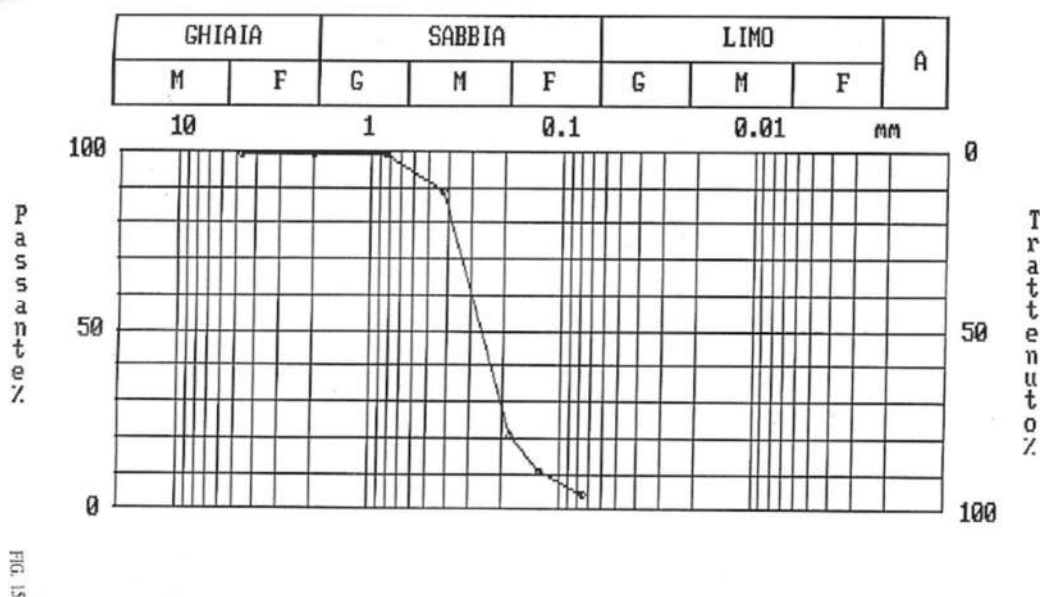


Figura 30 - Estratto di curva granulometrica delle indagini svolte nel 1995 al ponte Dosolo-Guastalla

- curva granulometrica relativa ai sondaggi 1 e 2 (eseguiti sulle sponde dell'alveo di magra, in corrispondenza del ponte, rispettivamente in sinistra e destra idrografica) svolti in occasione delle "Indagini geognostiche per la caratterizzazione geotecnica dei terreni in corrispondenza del ponte sul fiume Po tra Dosolo (MN) e Guastalla (RE)" nel giugno 2021. Si è fatto riferimento ai rispettivi campioni CR1 di ogni sondaggio, rappresentativi dello strato sabbioso presente alla quota di fondo alveo;

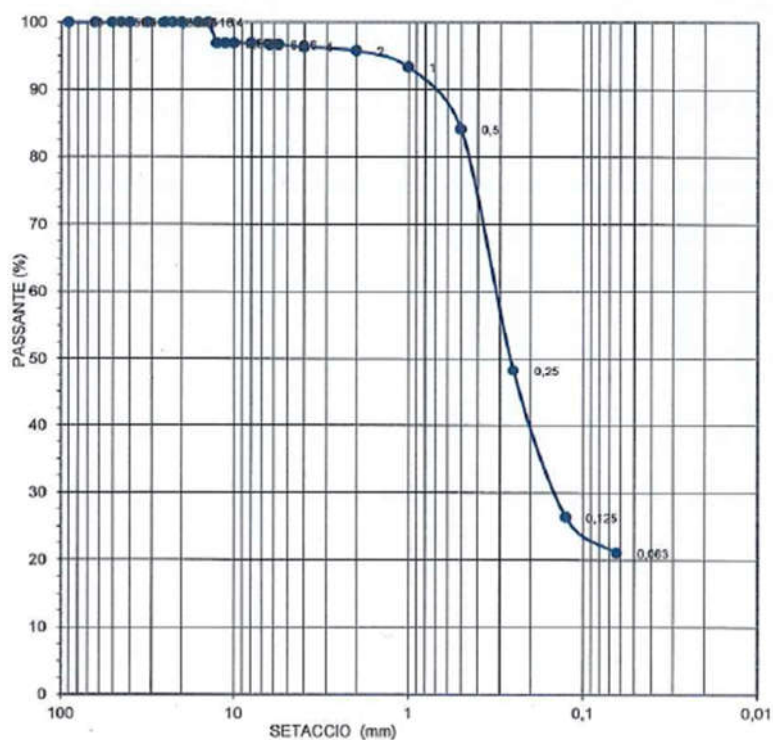


Figura 31 - Estratto di curva granulometrica del sondaggio 1 svolto nel 2021 al ponte Dosolo-Guastalla

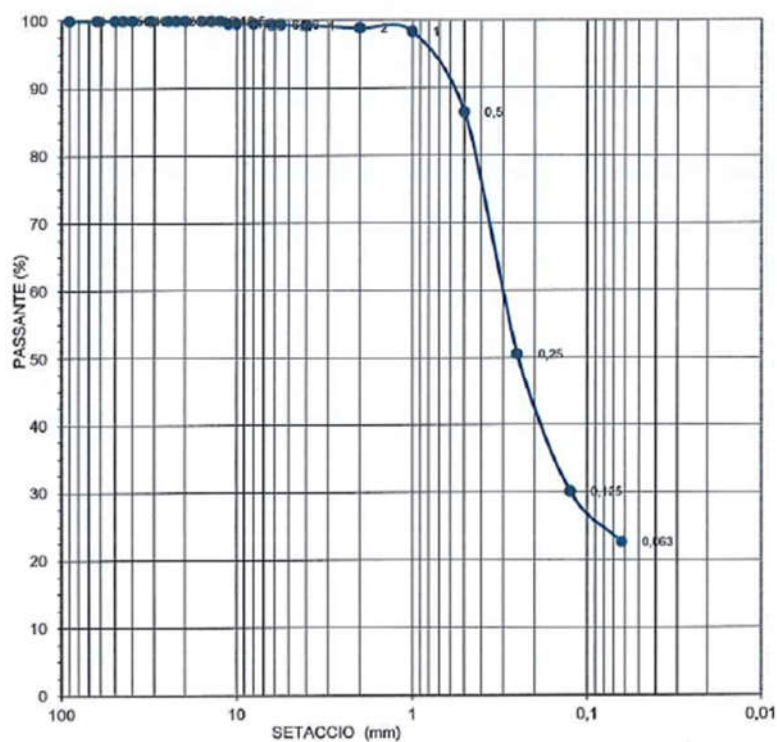


Figura 32 - Estratto di curva granulometrica del sondaggio 2 svolto nel 2021 al ponte Dosolo-Guastalla

- curva granulometrica riportata all'interno dello studio del prof. Ing. Franzetti, già citato, sul ponte di Borgoforte.

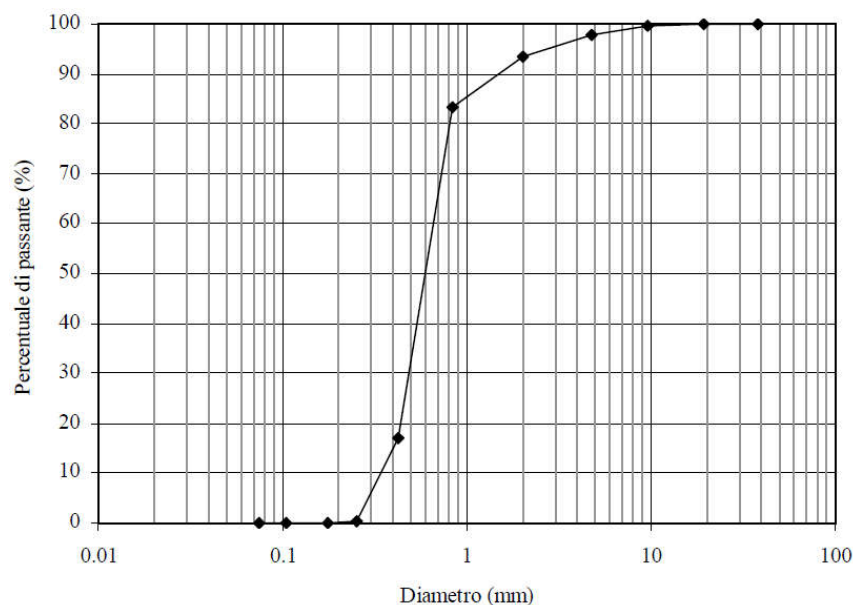


Figura 5.1. Curva granulometrica dei sedimenti d'alveo a Borgoforte.

Figura 33 - Estratto di curva granulometrica dallo "Studio della vulnerabilità idraulica" del prof. Ing. Franzetti a Borgoforte (2008)

Dalle curve granulometriche si estraggono i seguenti diametri caratteristici.

	d50 [mm]	d90 [mm]
Indagini 1995	0.25	0.45
Indagini 2021 – Sondaggio 1	0.26	0.70
Indagini 2021 – Sondaggio 2	0.25	0.59
Franzetti a Borgoforte	0.6	1.6

Si nota una omogeneità nei valori ricavati presso il ponte oggetto della presente progettazione (indagini 1995 e 2021), mentre risultano superiori di circa il doppio, e quindi meno cautelativi, i diametri caratteristici riferiti al ponte di Borgoforte.

Di seguito si mettono a confronto diverse formulazioni per valutare differenti stime per lo scalzamento:

- formula di Breusers, consigliata nella Direttiva 4 del PAI;
- formula HEC-18;
- formula di Melville e Coleman (utilizzata nello studio di Franzetti).

Si precisa che sulla base delle formulazioni considerate, la differenza riscontrata nei diametri caratteristici risulta ininfluente ai fini della stima del valore dello scavo. Di seguito si riporta dunque per semplicità l'analisi riferita al diametro mediano inferiore ricavato, più cautelativo, ovvero $d_{50}=0.25\text{mm}$.

Per la prima formula, si riportano le equazioni in scansione dal capitolo 9.5 del libro: "Sistemazione dei corsi d'acqua" di L. Da Deppo et al., quarta edizione.

Per valutare la profondità di scavo **ds** si è utilizzata la formula descritta nella figura seguente.

$$\frac{d_s}{s} = f_1 \left(\frac{v_0}{v_{cr}} \right) \cdot \left[2 \tanh \left(\frac{v_0}{s} \right) \right] \cdot f_2 (forma) \cdot f_3 \left(\alpha, \frac{l}{s} \right), \quad (9.16)$$

nella quale le funzioni f_1, f_2 e f_3 hanno le seguenti determinazioni:

$$\begin{aligned} f_1 \left(\frac{v_0}{v_{cr}} \right) &= 0 && \text{per } \frac{v_0}{v_{cr}} \leq 0,5 ; && \boxed{N_e \leq \frac{v_{cr}}{2}} \\ f_1 \left(\frac{v_0}{v_{cr}} \right) &= 2 \frac{v_0}{v_{cr}} - 1 && \text{per } 0,5 < \frac{v_0}{v_{cr}} \leq 1,0 ; && \\ f_1 \left(\frac{v_0}{v_{cr}} \right) &= 1 && \text{per } \frac{v_0}{v_{cr}} > 1,0 ; && \end{aligned} \quad (9.17)$$

$f_2 (forma) = 1,00$ per pile circolari o con fronti arrotondate;
 $f_2 (forma) = 0,75$ per pile sagomate in modo da accompagnare la corrente;
 $f_2 (forma) = 1,30$ per pile rettangolari;
 $f_3 \left(\alpha, \frac{l}{s} \right)$ il valore è ricavabile dal grafico di figura 9.14.

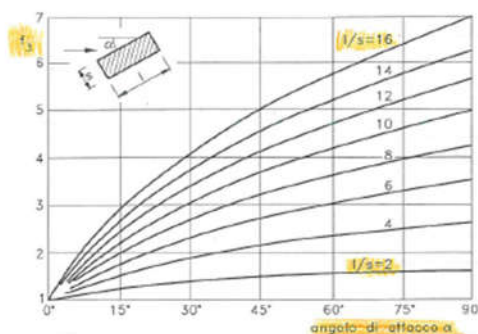


Figura 34 - Formula per il calcolo della profondità di scavo. Immagine da Sistemazione dei corsi d'acqua" di L. Da Deppo et al

Per il calcolo della velocità critica si è considerata la formula in Figura 35 dove $d=d_{50}$ dei sedimenti presenti nell'alveo del corso d'acqua.

Alla luce di questi valori si ricava una velocità critica nettamente inferiore a quella della corrente, che nel caso in esame viene presa pari a 0.08 m/s. Questo comporta un valore di f_1 pari a 1.

$$v_{cr} = 0,85 \sqrt{2gd(\gamma_s - \gamma)/\gamma}, \quad (9.1)$$

essendo γ_s il peso specifico del materiale di fondo, γ quello dell'acqua

Figura 35 - Formula della velocità critica. Immagine da: Sistemazione dei corsi d'acqua di L. Da Deppo et al.

Considerando che per la stima dello scalzamento, come per la modellazione, si è fatto riferimento alla pila avente le dimensioni del plinto di fondazione, risulta un diametro di 1.5m e che la forma da considerare nella formula sia quella cilindrica, con conseguente angolo di attacco delle pile nullo.

Da queste considerazioni geometriche, si possono definire dunque il coefficiente $f_2=1$ e il coefficiente $f_3=1$.

Si sottolinea che le formulazioni di cui sopra sono di carattere empirico e vanno comunque valutate sulla base dell'esperienza e del buon senso.

Di seguito la tabella di riferimento con le grandezze considerate e i risultati ottenuti, la profondità di scavo è riportata nell'ultima colonna (d_s).

s (m)	l (m)	l / s	vo (m/s)	y0 (m)	d50 (m)	v cr (m/s)	vo/vcr	f1	f2	f3	coeff.n.pile	ds (m)
1.50	1.50	1.00	2.00	20.50	0.00025	0.08	26.15	1.00	1.00	1.00	1.30	3.90

Si propone di seguito lo scavo calcolato tramite la formula HEC-18, proposta dalla circolare "Hydraulic Engineering Circular No.18" redatta dalla società Ayres Associates per il dipartimento dei trasporti americano e determinata su sedimenti a grana fine. La formula HEC-18 viene riportata secondo la seguente forma:

$$\frac{Y_s}{a} = 2.0K_1K_2K_3 \left(\frac{Y_1}{a} \right)^{0.35} Fr_1^{0.43}$$

ove:

Y_s = profondità di scavo

a = larghezza della pila

K_1 = fattore di correzione in funzione della forma della pila

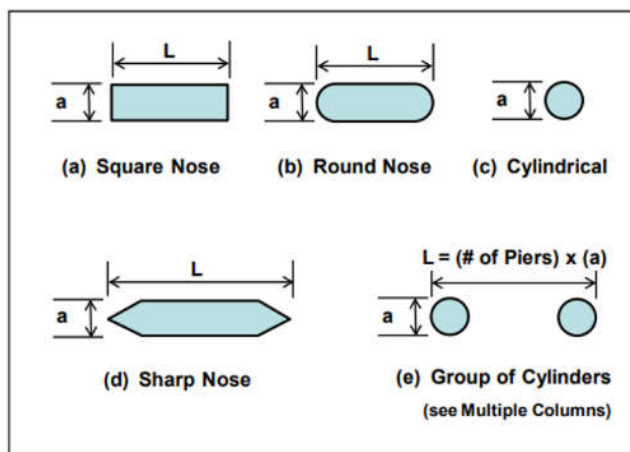
K_2 = fattore di correzione in funzione dell'angolo d'attacco fra direzione principale pila e flusso

K_3 = fattore di correzione in funzione della condizione del letto fluviale

Y_1 = tirante in condizioni di moto uniforme

Fr_1 = numero di Froude in condizioni di moto uniforme

I diversi fattori di correzione possono essere ricavati da diverse tabelle e formule, proposte sempre nel medesimo elaborato americano. Per completezza tali riferimenti vengono riportati di seguito.



Shape of Pier Nose	K_1
(a) Square nose	1.1
(b) Round nose	1.0
(c) Circular cylinder	1.0
(d) Group of cylinders	1.0
(e) Sharp nose	0.9

Angle	$L/a=4$	$L/a=8$	$L/a=12$
0	1.0	1.0	1.0
15	1.5	2.0	2.5
30	2.0	2.75	3.5
45	2.3	3.3	4.3
90	2.5	3.9	5.0

Angle = skew angle of flow
 L = length of pier

$$K_2 = (\cos \theta + \frac{L}{a} \sin \theta)^{0.65}$$

Bed Condition	Dune Height ft	K_3
Clear-Water Scour	N/A	1.1
Plane bed and Antidune flow	N/A	1.1
Small Dunes	$10 > H \geq 2$	1.1
Medium Dunes	$30 > H \geq 10$	1.2 to 1.1
Large Dunes	$H \geq 30$	1.3

In relazione alle considerazioni geometriche già esplicitate per il calcolo dello scavo con la formula di Breusers, si possono trovare i diversi valori dei coefficienti e di conseguenza calcolare l'entità dello scavo.

a (m)	v_1 (m/s)	Y_1 (m)	Fr_1 (-)	K_1	K_2	K_3	Y_s (m)
1.50	2.00	20.50	0.14	1.00	1.00	1.10	3.55

Infine si applica la formula di Melville e Coleman, così come applicata nello studio Franzetti, per la quale la profondità di scavo è funzione della dimensione rappresentativa dell'interazione corrente-ostacolo (λ), secondo la seguente tabella.

Campo	Lunghezza scala λ	ds/λ
$D/h < 0.7$	D	2.4
$0.7 < D/h < 5$	$(Dh)^{0.5}$	2.0
$D/h > 5$	H	4.5

In relazione alle considerazioni geometriche già esplicitate, per le quali si rientra nel caso della prima riga $D/h < 0.7$, si può ricavare l'entità dello scavo.

D	h	D/h	Caso	lambda	ds
m	m	-	-	-	m
1.50	20.50	0.07	$D/h < 0.7$	1.50	3.60

Riassumendo, i valori ottenuti risultano essere i seguenti.

Formula	Scavo [m]
Breusers	3.90
HEC-18	3.55
Melville e Coleman	3.60

Si riscontra una omogeneità nell'ordine di grandezza dello scavo in tutte e tre le formulazioni, pari a circa 4 metri.

8 SPINTA IDRODINAMICA

La spinta idrodinamica si calcola tramite la relazione:

$$F = C_D \frac{1}{2} \rho U^2 D h$$

Dove C_D è il coefficiente di Drag pari a 2, ρ è la densità dell'acqua, U è la velocità della corrente, D è la dimensione della pila, e h il tirante.

Nel caso in esame la formula è stata applicata tanto al singolo palo, tenendo conto anche in questo caso delle dimensioni del plinto di fondazione pari a 1.5 m, quanto alla pila intasata di detriti.

In quest'ultimo caso, si è considerata come dimensione la larghezza massima tra le due file di fusti della singola pila, pari a 10.5 m. Inoltre, si è considerato il medesimo coefficiente di Drag, compensando il fatto che la pila intasata è meno affusolata con quello che la massa di detriti presenta dei vuoti. I valori di tirante e velocità sono i valori massimi riportati precedentemente.

	C_D	rho	U	D	h	F
	-	kg/mc	m/s	m	m	N
Fusto	2.00	1000.00	2.00	1.50	20.50	123'000.00
Pila intasata	2.00	1000.00	2.00	10.50	20.50	861'000.00

Ne risulta una spinta pari a 123 kN sul singolo fusto e di 861 kN nel caso di pila intasata.

9 CONCLUSIONI

La presente relazione, si pone l'obiettivo di verificare la compatibilità idraulica del ponte esistente tra i comuni di Dosolo (MN) e Guastalla (RE) sul fiume Po, ed in particolare lo scalzamento massimo sulle fondazioni delle pile e la spinta idrodinamica sulla struttura.

A tal proposito, è stata svolta una modellazione idraulica bidimensionale a moto permanente per determinare le grandezze idrauliche fondamentali alla stima dei punti precedenti, e in particolar modo tiranti e velocità in corrispondenza delle pile del ponte presenti all'interno dell'alveo.

Il franco idrico risulta pari a 80 cm, ovvero inferiore al valore minimo richiesto di 1 m, ma superiore a 0.5 volte l'altezza cinetica. Si segnala tuttavia, che la quota dell'intradosso dell'impalcato risulta superiore alla quota di sommità arginale, con un franco tra i due di almeno 30 cm.

Sulla base del tirante e della velocità massimi riscontrati dalla modellazione idraulica in prossimità del ponte, si sono stimati scalzamento e spinta idrodinamica prendendo come riferimento il diametro massimo del fusto di pila, ovvero in corrispondenza del plinto di fondazione. La spinta idrodinamica è stata stimata anche nel caso di pila intasata.

Considerata l'evoluzione del fondo alveo negli ultimi 25 anni, la profondità di scavo determinata ai capitoli precedenti, di circa 4 metri è compatibile con la sicurezza del ponte, fatto salvo l'esecuzione di interventi di stabilizzazione del fondo mediante posa di sacchi/materassi di materiale granulare e massi ciclopici, tali da eliminare l'effetto erosivo sul fondo.

Come meglio descritto nelle altre relazioni specialistiche, nello specifico la relazione di vulnerabilità sismica, è opportuno rinforzare la sezione attuale dei pali mediante incamiciatura e ristaffaggio, al fine di fermare il degrado in atto e ripristinare, anzi migliorare la sezione originaria.

Si ritiene tuttavia di segnalare la necessità di monitorare l'evoluzione del fondo alveo, mediante sistemi di monitoraggio fissi o all'occorrenza dopo eventi di piena significativi.

**IL PROGETTISTA
IDRAULICO**

Ing. Andrea De Pin

IL PROGETTISTA

Ing. Michele Titton