



SOGGETTO ATTUATORE:

PROVINCIA DI REGGIO EMILIA

come da Protocollo d'Intesa tra la Provincia di Reggio Emilia  
e la Provincia di Mantova sottoscritto il 29/03/2018

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

CIG: 8557517E6A CUP: C67H20000290001

## PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ED ECONOMICA

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  
Geom. FABIO LUCCHETTA

MANDANTE:

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

Prof. Ing. PIER GIORGIO MALERBA  
Ing. PAOLO GALLI

ELABORATO:

## PARTE GENERALE RELAZIONE COMPATIBILITÀ IDRAULICA

PROGETTISTA:

Ing. MICHELE TITTON

RESP. UNICO DEL PROCEDIMENTO:

Ing. GIUSEPPE TUMMINO

IL DIRIGENTE:

Ing. VALERIO BUSSEI

CODICE PROGETTO

PROGETTO

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 0 | 2 | 1 | 0 | 2 | 2 | - | P | F |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

STR. FASE

NOME FILE 2021\_022 PF IDR RE 01\_B\_Rel. compa.

REVISIONE

SCALA

CODICE ELAB

|   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|
| I | D | R | R | E | 0 | 1 |
|---|---|---|---|---|---|---|

B

-

|      |                 |         |            |           |            |
|------|-----------------|---------|------------|-----------|------------|
|      |                 |         |            |           |            |
|      |                 |         |            |           |            |
| B    | REVISIONE       | ADP     | ADP        | MT        | 26.07.2021 |
| A    | PRIMA EMISSIONE | ADP     | ADP        | MT        | 02.07.2021 |
| 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 |
| 7   | FENOMENI LEGATI AL TRASPORTO SOLIDO .....          | 19 |
| 8   | SPINTA IDRODINAMICA.....                           | 24 |
| 9   | CONCLUSIONI .....                                  | 25 |

## **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

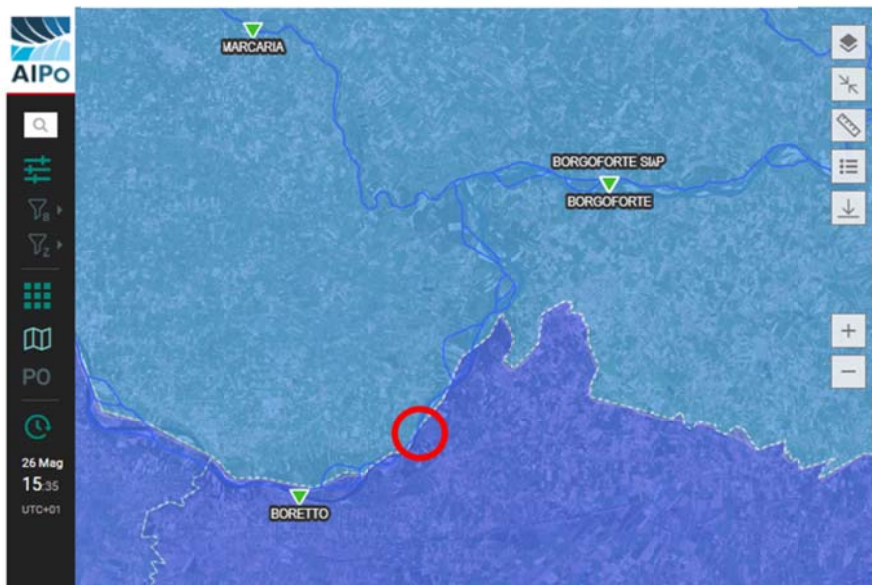


Figura 1 - Estratto dal sito di AIPO delle stazioni idrometriche prossime all'area di progetto (cerchio rosso)

| A1003               |                  |                                                 |            |                 | A502                |                  |                                                       |        |       |
|---------------------|------------------|-------------------------------------------------|------------|-----------------|---------------------|------------------|-------------------------------------------------------|--------|-------|
| 10/05/2021 11:30:00 |                  |                                                 |            |                 | 10/05/2021 11:30:00 |                  |                                                       |        |       |
|                     | A                | B                                               | C          | D               |                     | A                | B                                                     | C      | D     |
|                     |                  | Boretto - Livello<br>Idrometrico -<br>14017 (m) |            |                 |                     |                  | Borgoforte -<br>livello<br>idrometrico -<br>13988 (m) |        |       |
| 1                   | Orario           |                                                 | Variazione | Valore assoluto | 1                   | Orario           |                                                       | Valore |       |
| 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<br>E<br>STAZIONE | Tipo<br>della stazione | CARATTERISTICHE                                |                                            |                                  |                         |                                   |                                                |                             | NOTE                                                                     |
|-------------------------|------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
|                         |                        | Quota<br>dello zero<br>idrometrico<br>m. s. m. | Bacino<br>di<br>dominio<br>Km <sup>2</sup> | Altezza<br>di max<br>piena<br>m. | DATA<br>della max piena | Altezza<br>idrom.<br>minima<br>m. | DATA<br>della minima<br>altezza<br>idrometrica | Anno<br>inizio<br>osservaz. |                                                                          |
| PO a BORETTO            | MIr                    | 19.90                                          | 55183.0                                    | 9.96                             | 19 ott. 2009            | -4.51                             | 22 lug. 2006                                   | 1868                        | Altezza di guardia m. 5.50.<br>Nuova quota da livellazione<br>AIPO 2005. |
| PO a BORGOFORTE         | MIr                    | 14.55                                          | 62450.0                                    | 9.96                             | 14 nov. 1951            | -3.84                             | 23 lug. 2006                                   | 1923                        | Altezza di guardia m. 6.00.<br>Nuova quota da livellazione<br>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.

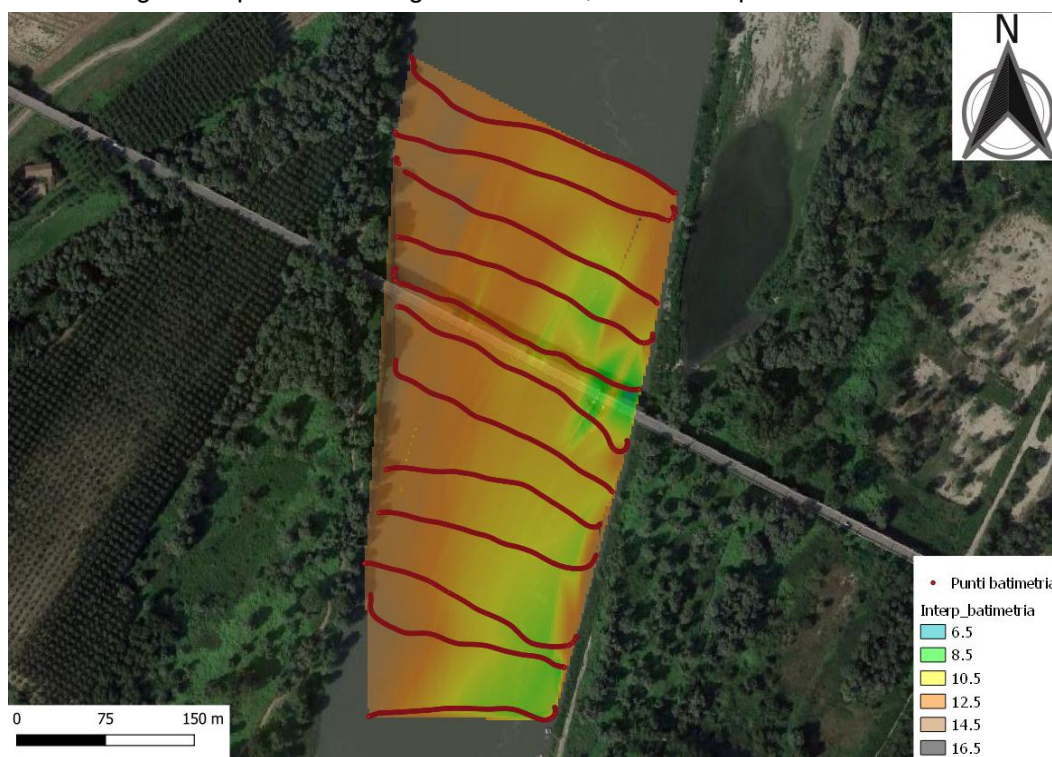


Figura 4 – Punti batimetrici rilevati e mappa della quota del fondo ottenuta da interpolazione

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.

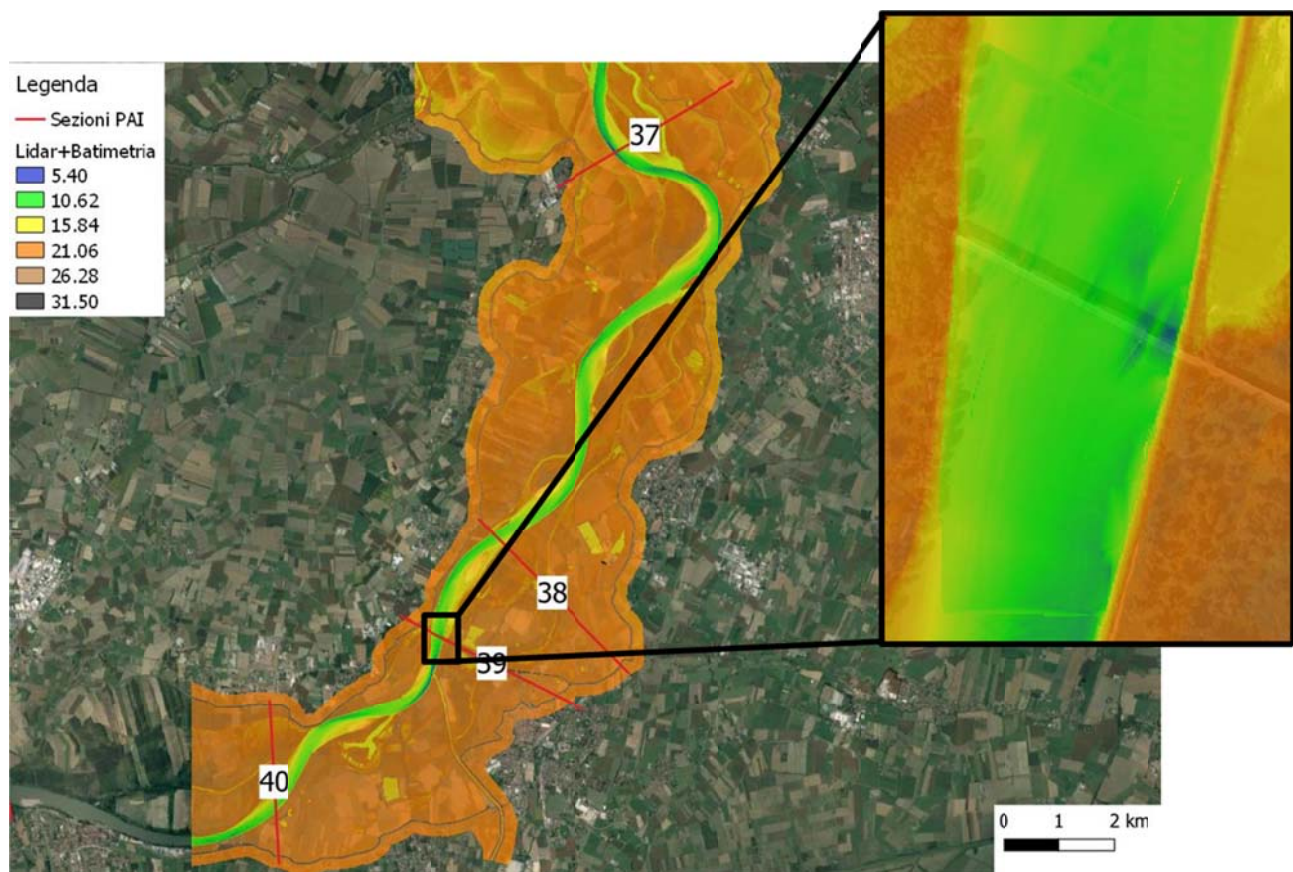


Figura 5 - Batimetria sovrapposta al lidar dell'alveo del Po fornito da AdBPo. A destra particolare nell'area di rilievo

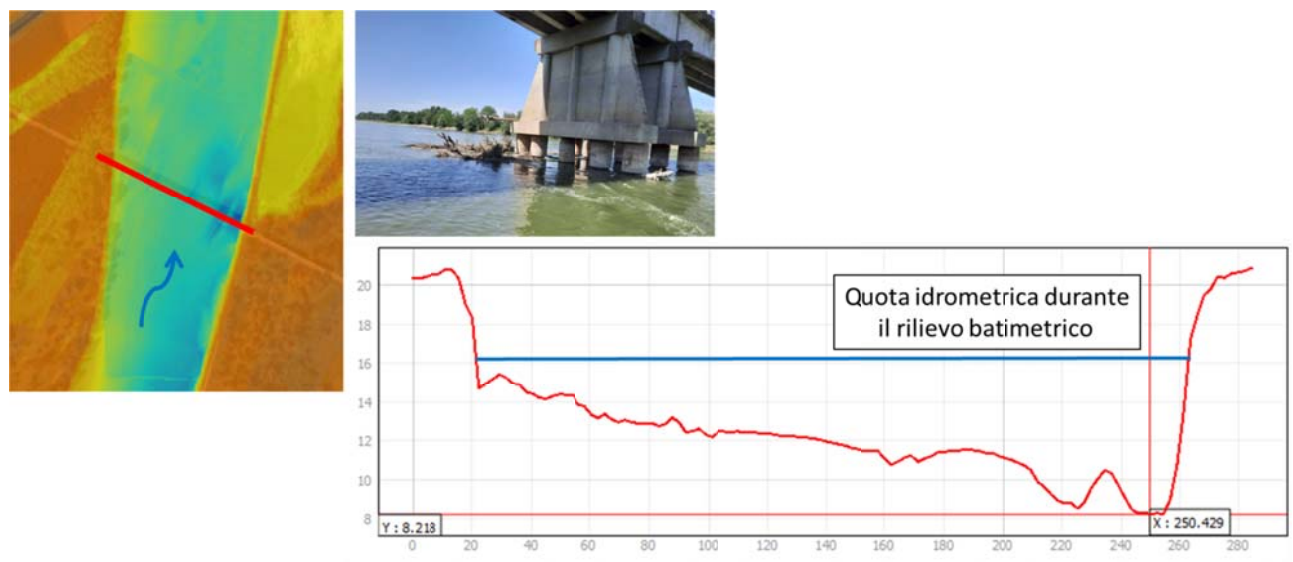


Figura 6 - Estratto di sezione in corrispondenza del ponte (in alto, una foto scattata durante il rilievo batimetrico alla pila 9)

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<br>km <sup>2</sup> | Q20<br>m <sup>3</sup> /s | Q100<br>m <sup>3</sup> /s | Q200<br>m <sup>3</sup> /s | Q500<br>m <sup>3</sup> /s | Idrometro<br>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                 | 27.53                 | 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                |
|----------------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| <b>Condizione al contorno di monte</b> | 40                         | Portata= 13 700 mc/s     |
| <b>Condizione al contorno di valle</b> | 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.

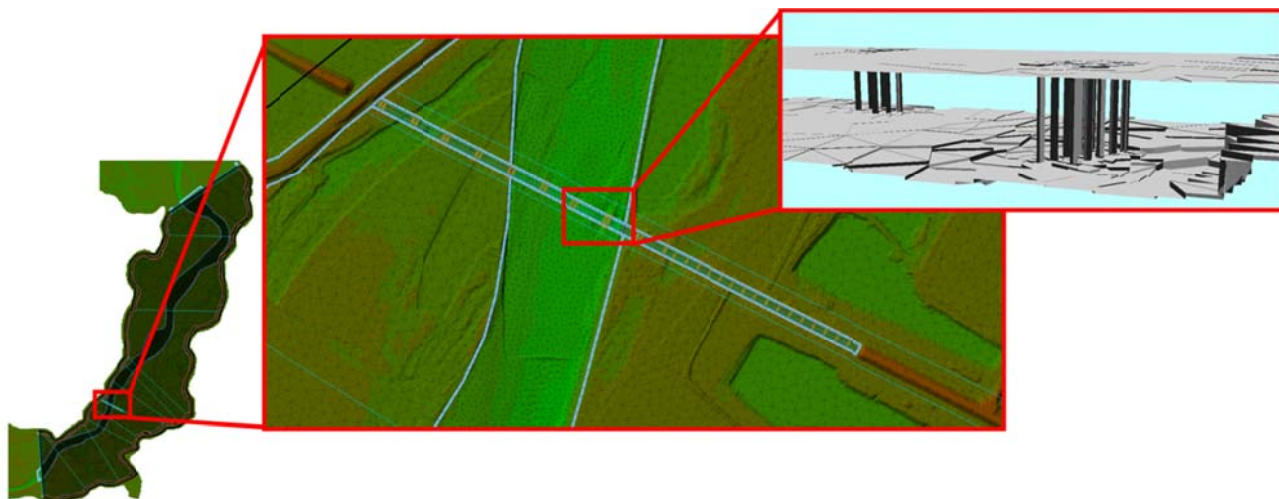


Figura 9 - Estratto in ambiente Infoworks del dominio di calcolo. In alto a destra particolare 3D della modellazione delle pile.

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                          |
|---------------------------|----------------|----------------|-------------------------------|
| <b>Sezioni principali</b> |                |                |                               |
| 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          |                               |
| <b>Sezioni al ponte</b>   |                |                |                               |
|                           | 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

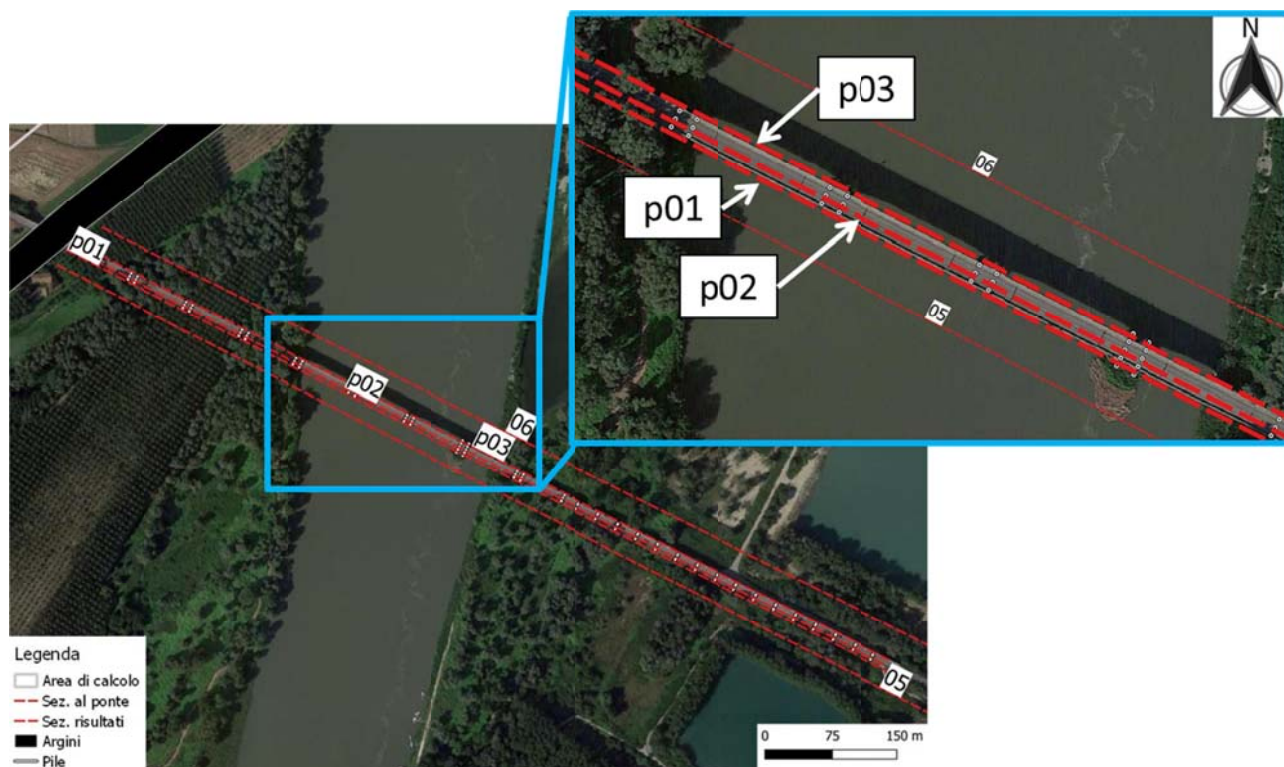


Figura 11 - Sezioni al ponte di estrazione dei risultati

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

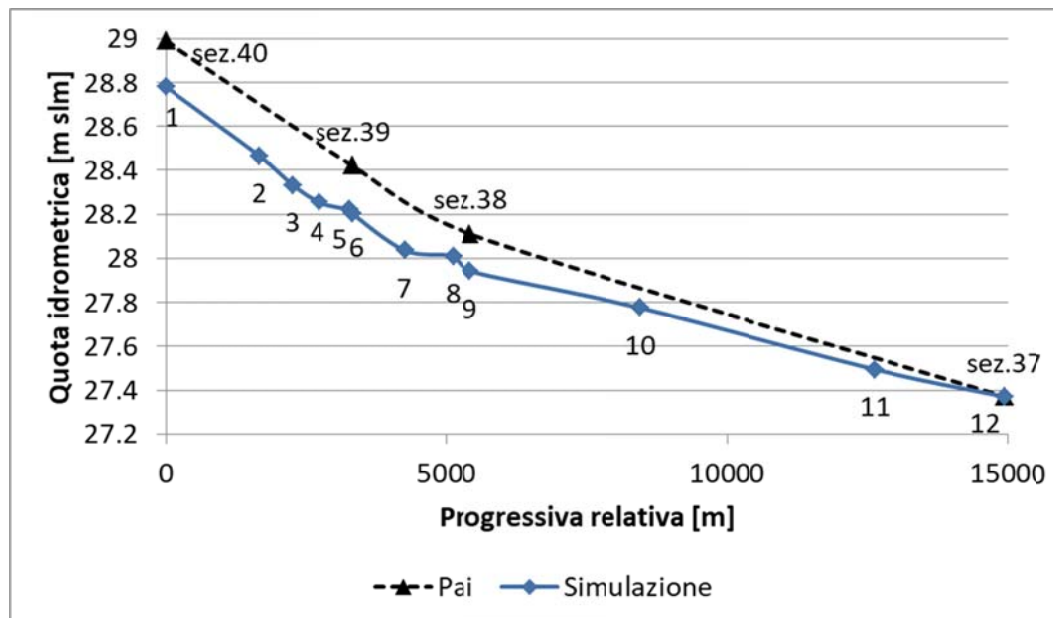


Figura 12 - Quote idrometriche assolute derivante dalla simulazione confrontate con il profilo di piena del PAI

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.

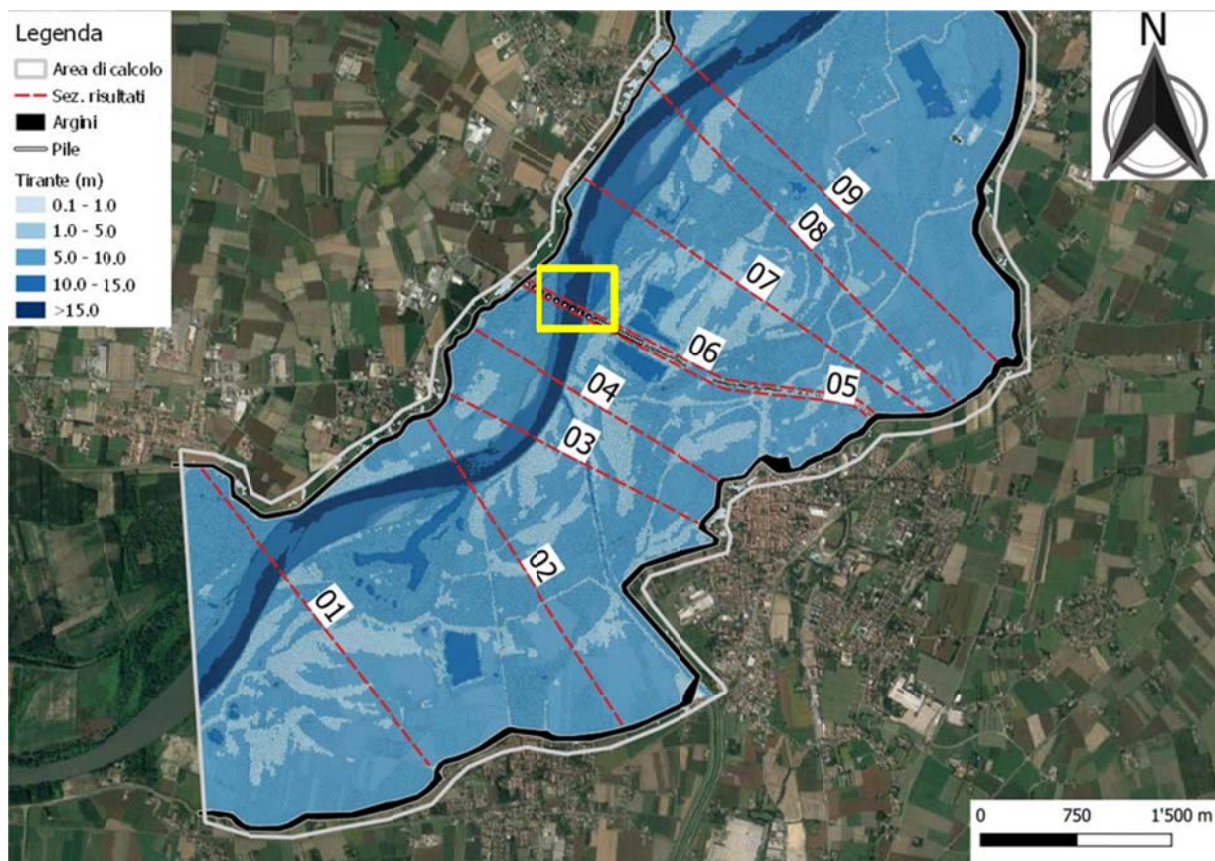


Figura 13 - Mappa dei tiranti (il quadrato giallo identifica l'area di zoom dell'immagine successiva)

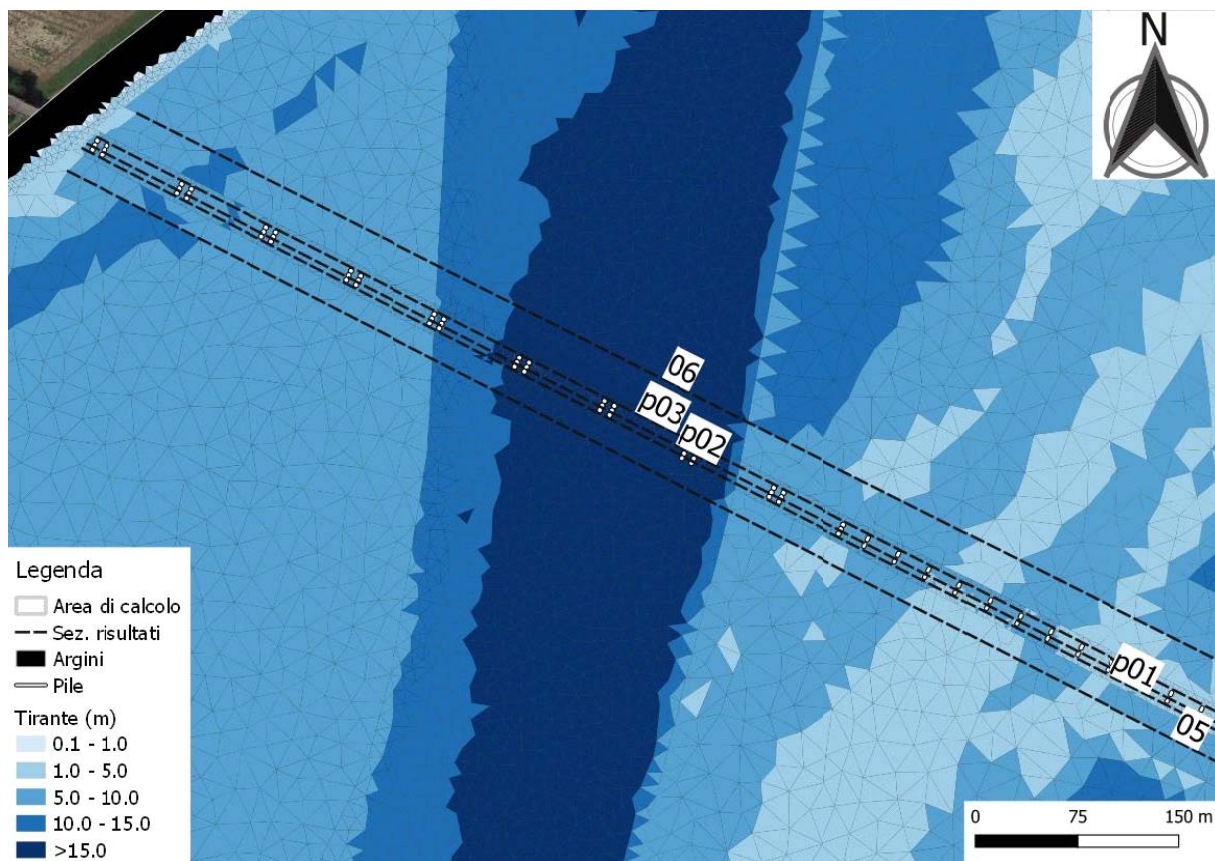


Figura 14 - Mappa dei tiranti: zoom al ponte (quadrato giallo nell'immagine precedente)

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.

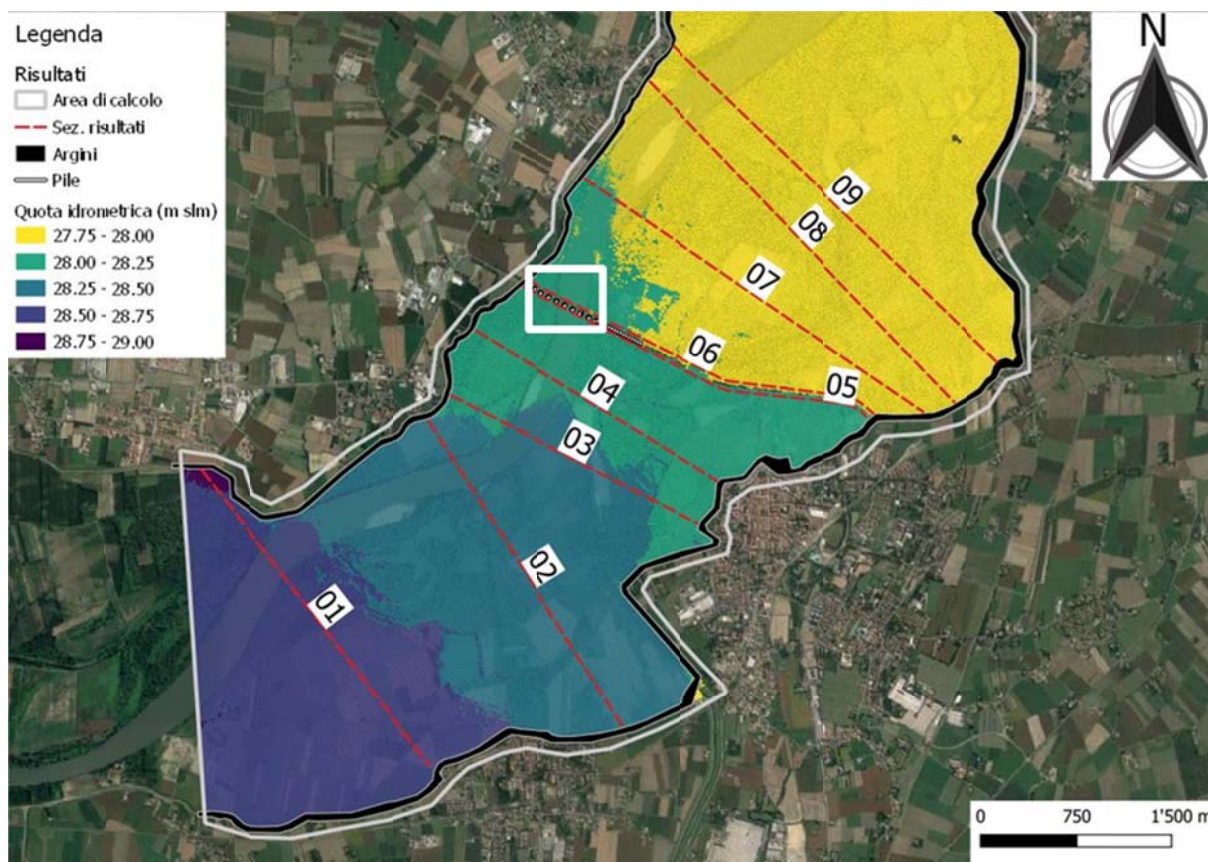


Figura 15 - Mappa delle quote idrometriche

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 slm.

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.

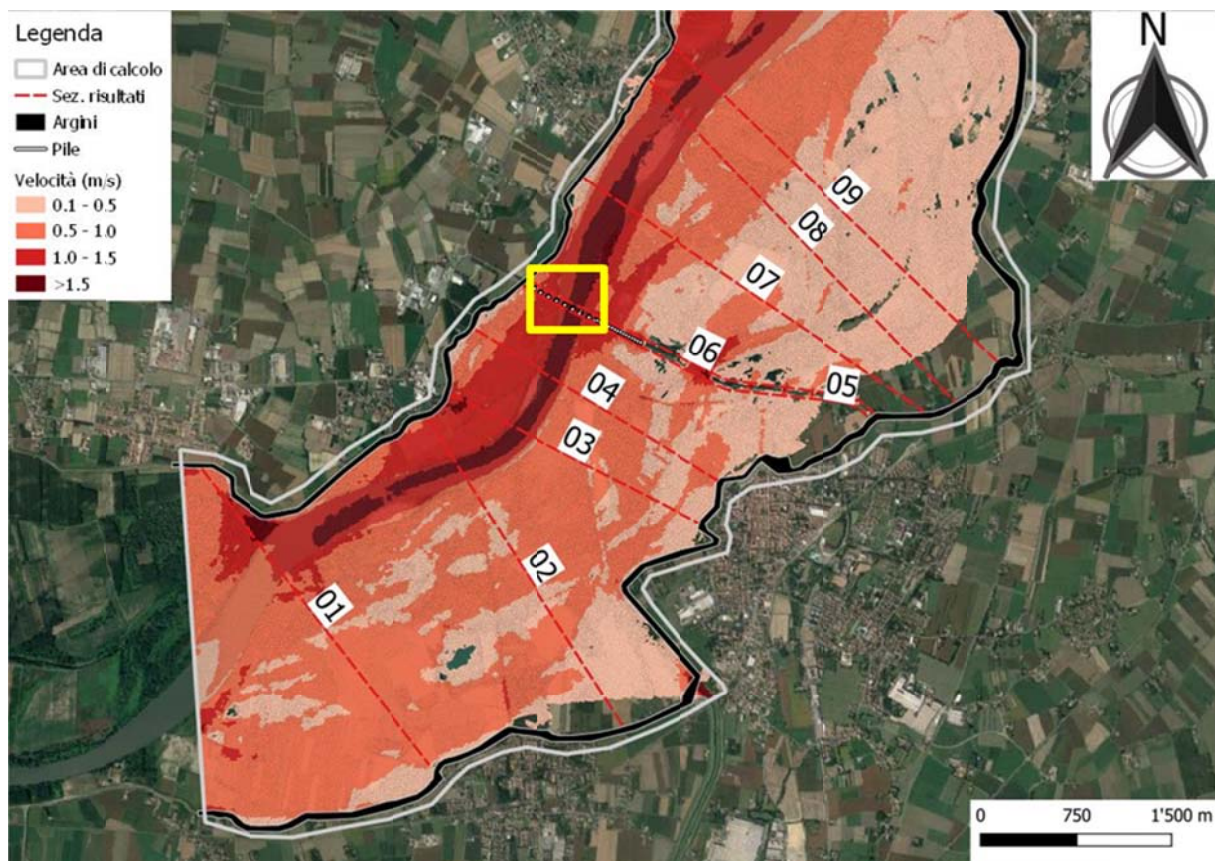


Figura 16 - Mappa delle velocità (il quadrato giallo identifica l'area di zoom dell'immagine successiva)

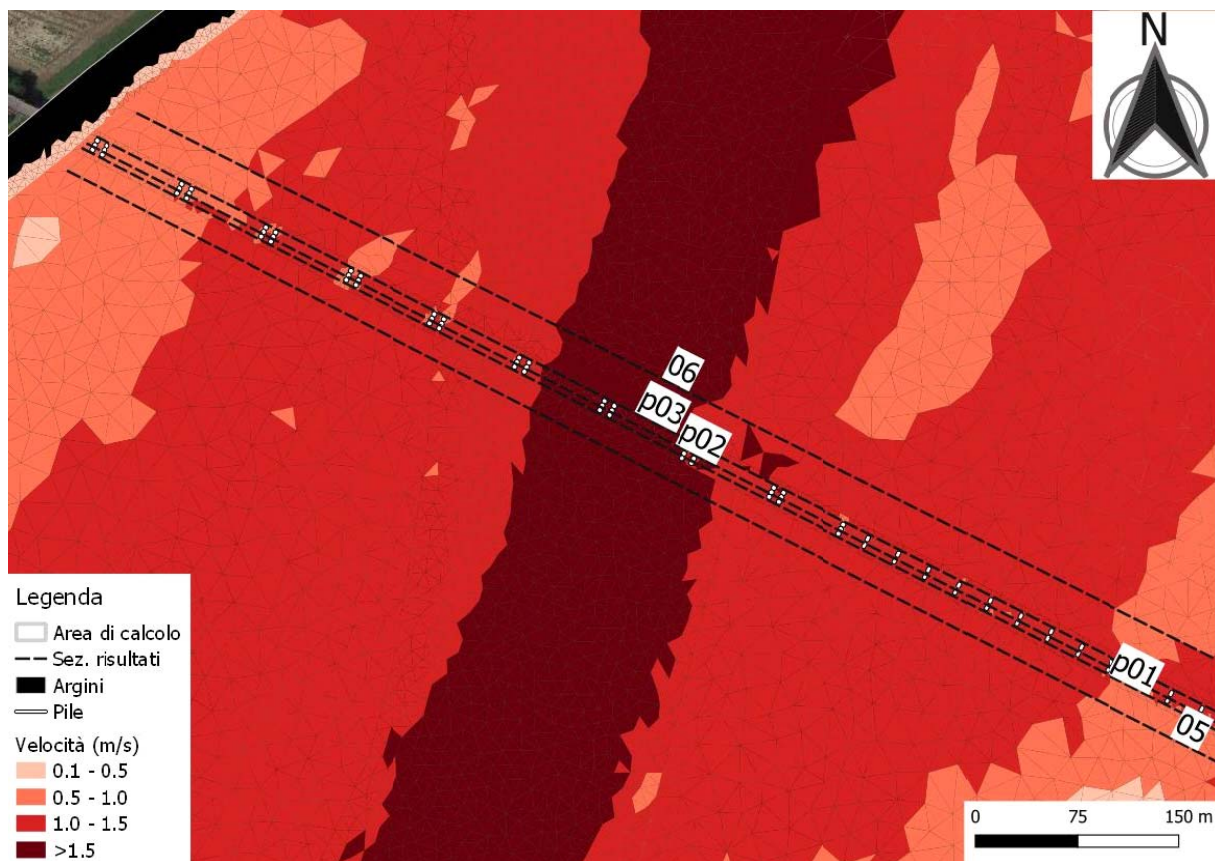


Figura 17 - Mappa delle velocità: zoom al ponte (quadrato giallo nell'immagine precedente)

## 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.relattiva [m] | Quota PAI [m slm] | Quota idrom. [m slm] | Tirante [m] | Quota fondo [m slm] | Velocità [m/s] |
|---------------------------|----------------|---------------------|-------------------|----------------------|-------------|---------------------|----------------|
| <b>Sezioni principali</b> |                |                     |                   |                      |             |                     |                |
| 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           |
| <b>Sezioni al ponte</b>   |                |                     |                   |                      |             |                     |                |
|                           | 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           |

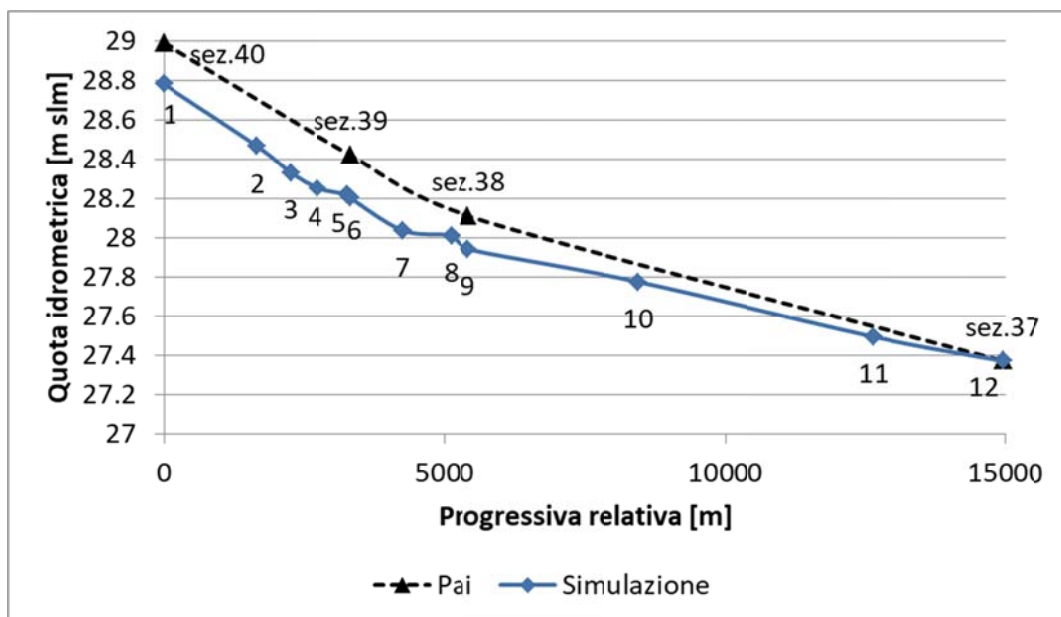


Figura 18 – Quota idrometrica in relazione al profilo di piena del PAI

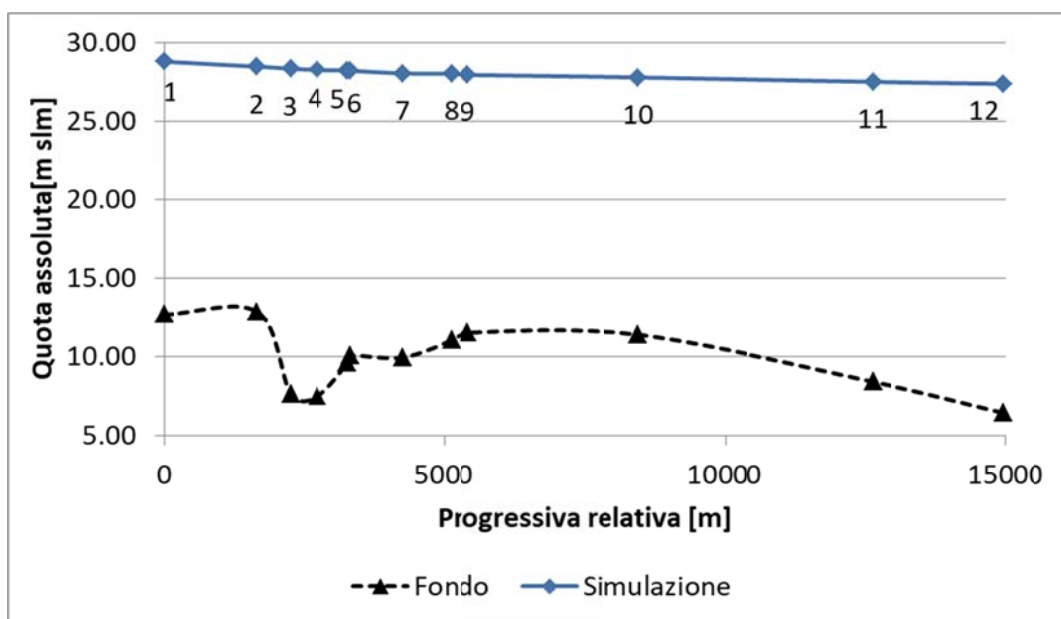


Figura 19 - Quota idrometrica in relazione alla quota del fondo

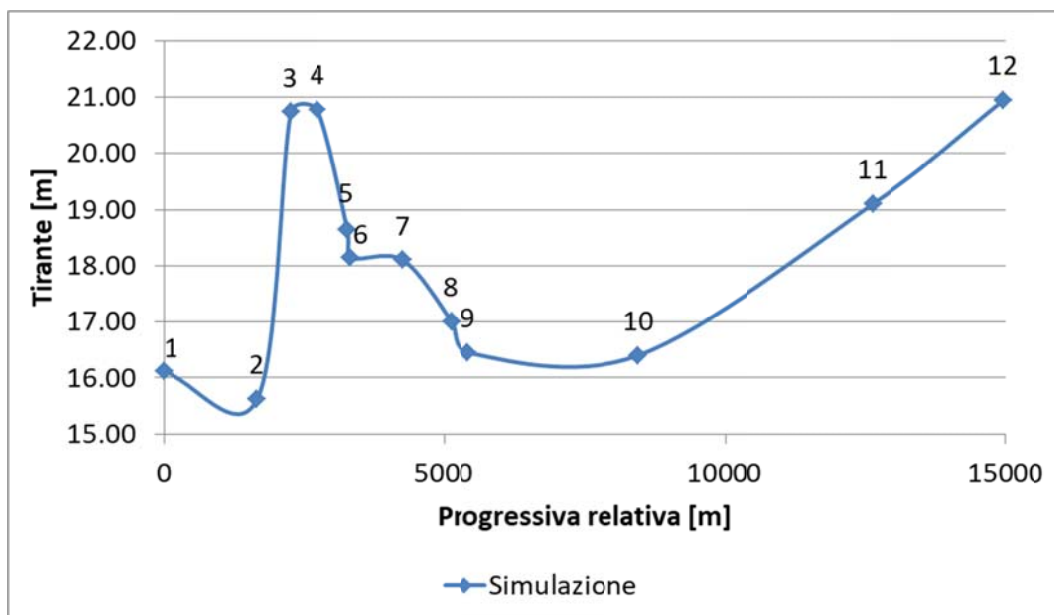


Figura 20 – Tirante idrico

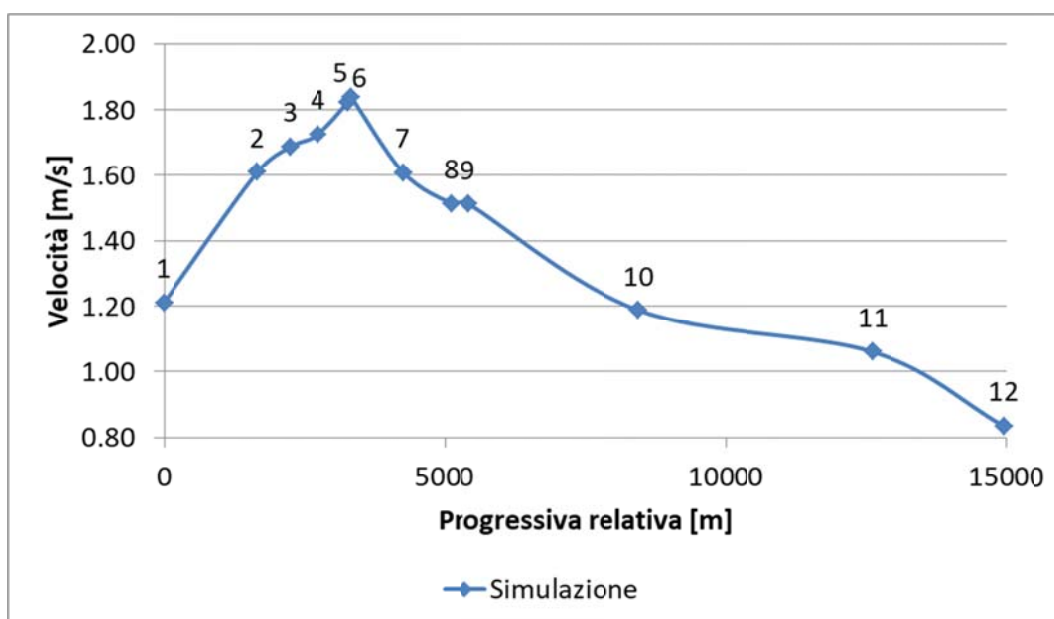


Figura 21 – Velocità

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.

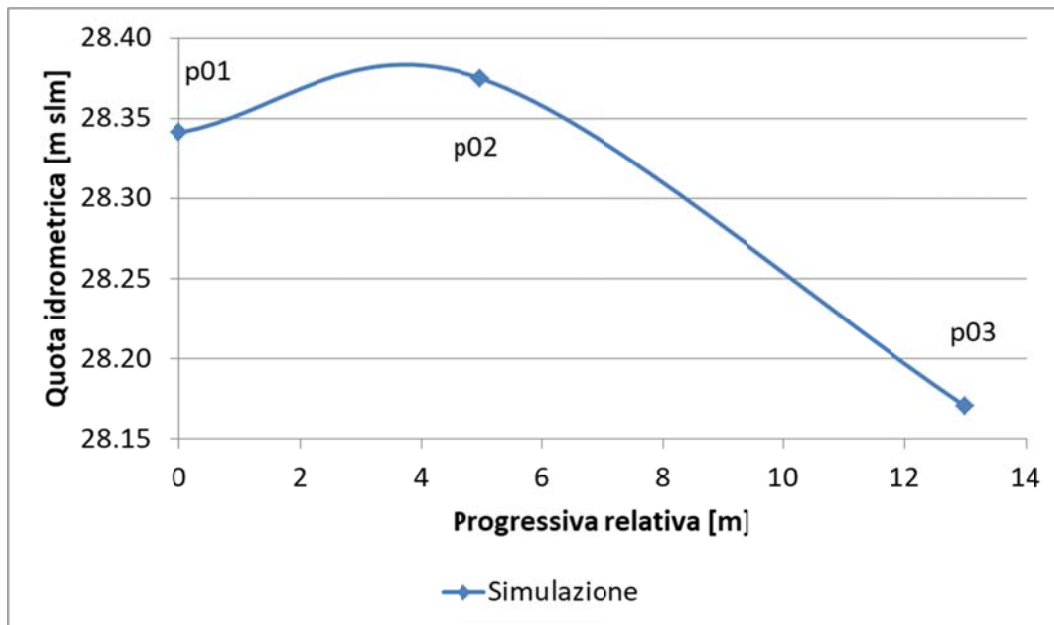


Figura 22 - Quota idrometrica in corrispondenza del ponte

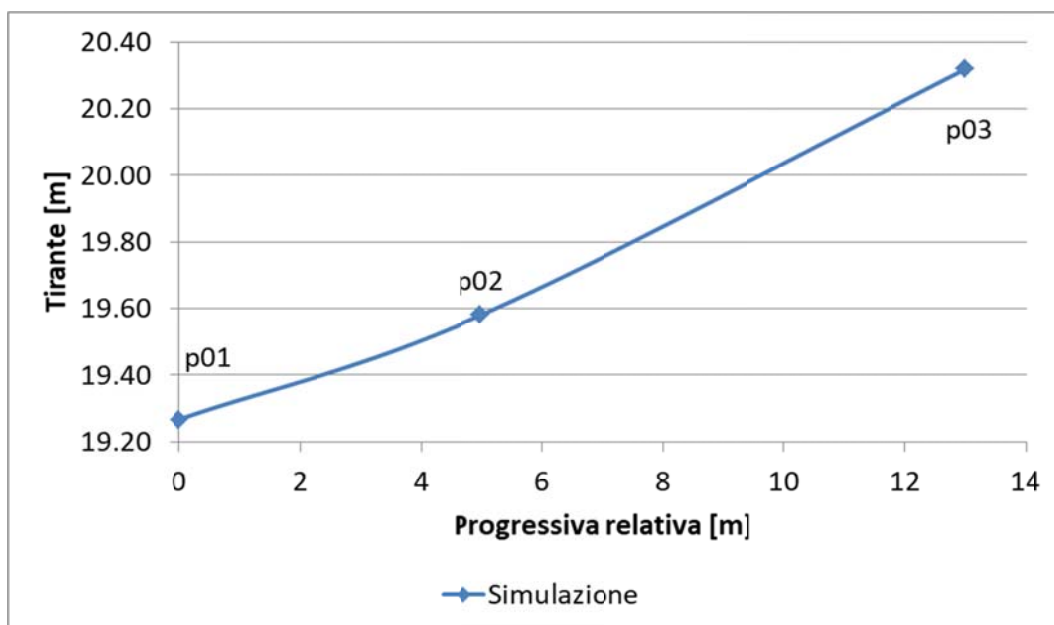


Figura 23 - Tirante idrico in corrispondenza del ponte

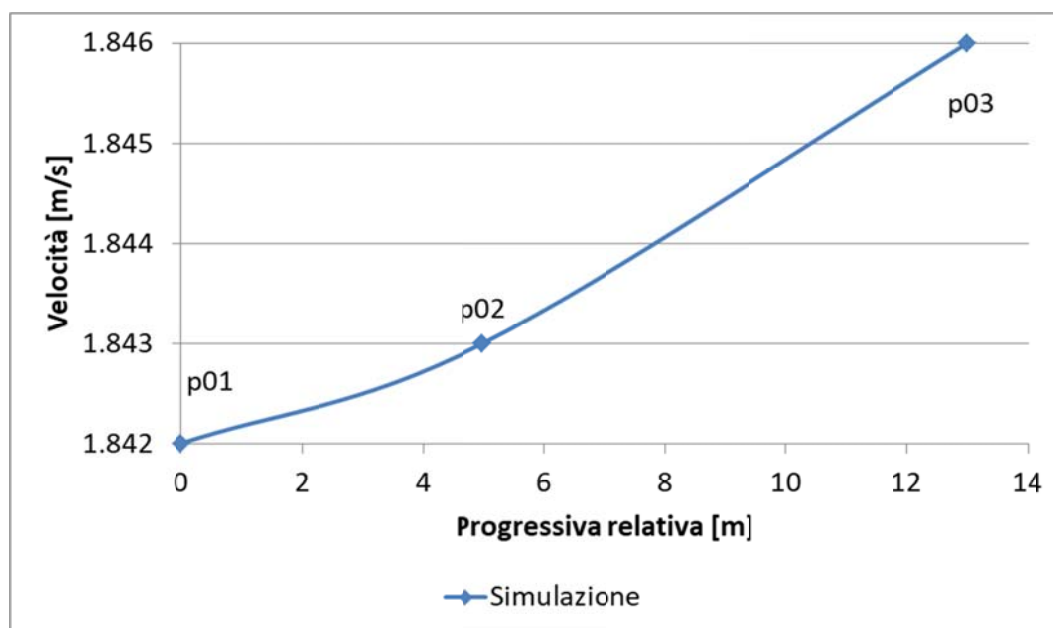


Figura 24 - Velocità in corrispondenza del ponte

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.

Dalla 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 al valore richiesto. 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.

## 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;

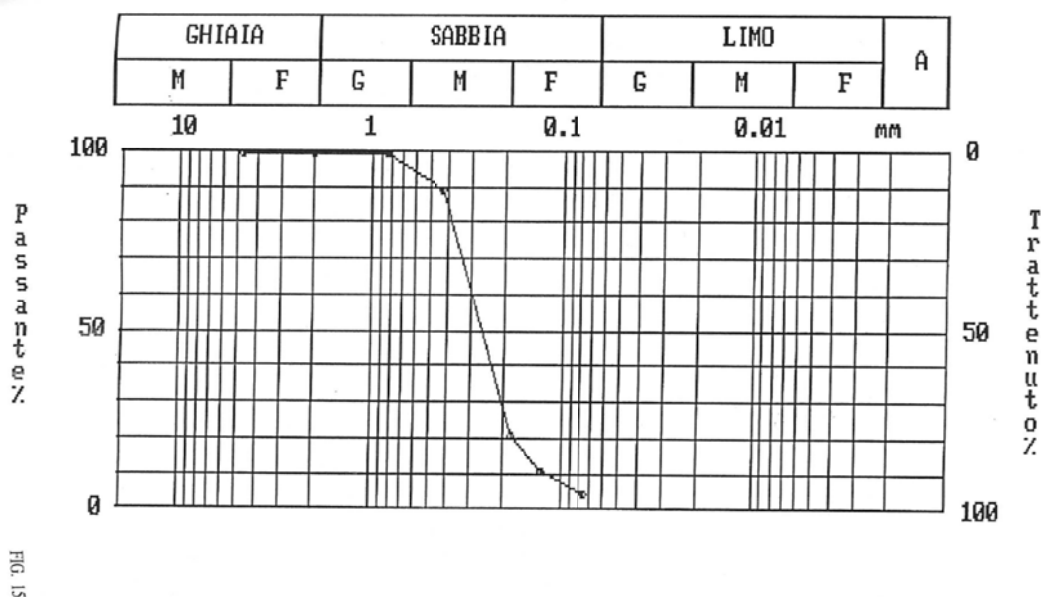


Figura 25 - Estratto di curva granulometrica delle indagini svolte nel 1995 al ponte Dosolo-Guastalla

- 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;

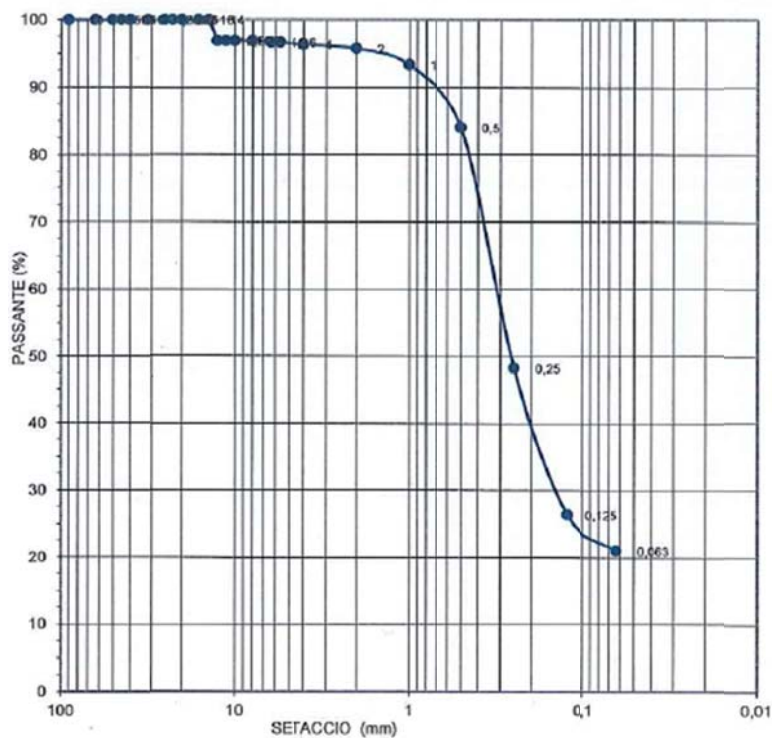


Figura 26 - Estratto di curva granulometrica del sondaggio 1 svolto nel 2021 al ponte Dosolo-Guastalla

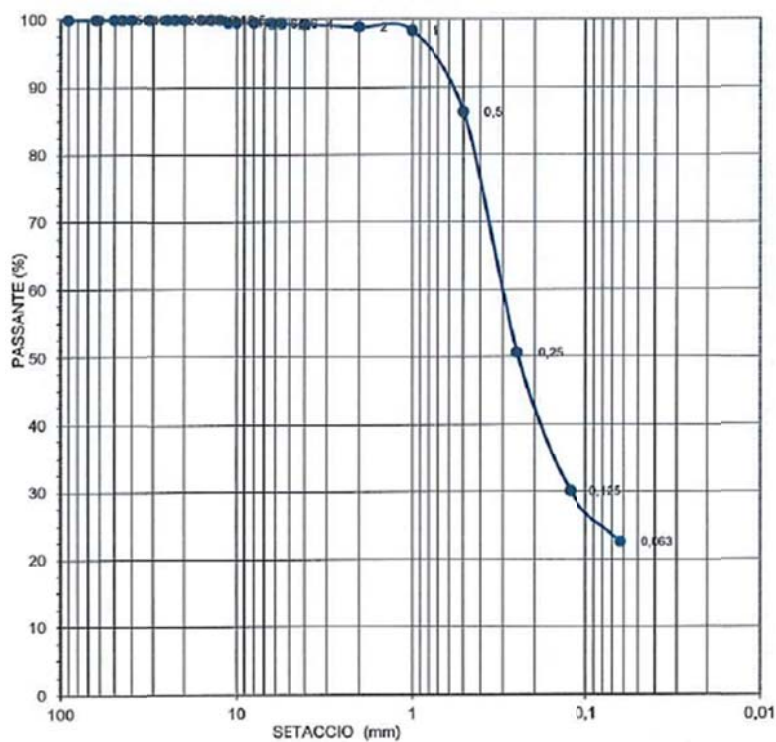
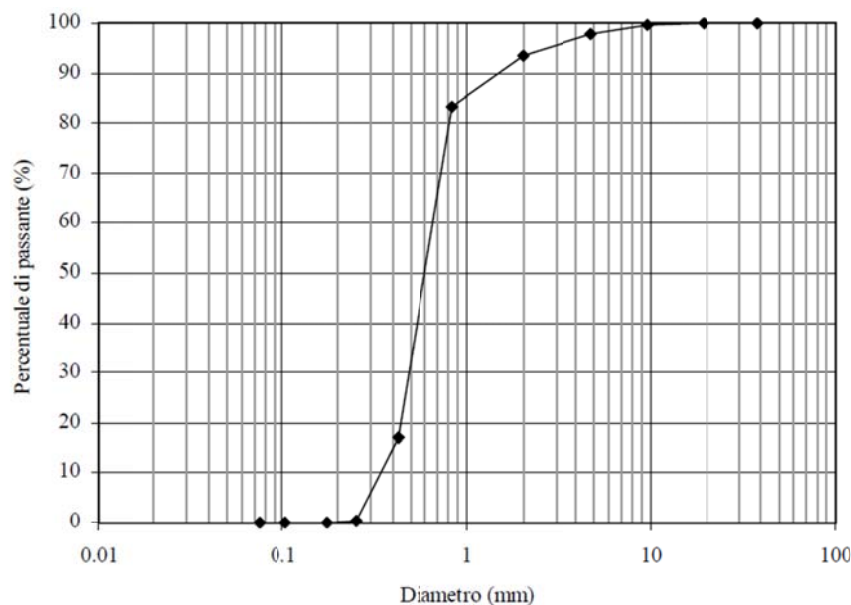


Figura 27 - Estratto di curva granulometrica del sondaggio 2 svolto nel 2021 al ponte Dosolo-Guastalla

- 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 28 - 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<br>[mm] | d90<br>[mm] |
|------------------------------------|-------------|-------------|
| <b>Indagini 1995</b>               | 0.25        | 0.45        |
| <b>Indagini 2021 – Sondaggio 1</b> | 0.26        | 0.70        |
| <b>Indagini 2021 – Sondaggio 2</b> | 0.25        | 0.59        |
| <b>Franzetti a Borgoforte</b>      | 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 ininfluenza 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.

$$\frac{d_s}{s} = f_1 \left( \frac{v_0}{v_{cr}} \right) \cdot \left[ 2 \tanh \left( \frac{y_0}{s} \right) \right] \cdot f_2 (forma) \cdot f_3 \left( \alpha, \frac{l}{s} \right) \quad (9.16)$$

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

$$\begin{aligned} f_1 \left( \frac{v_0}{v_{cr}} \right) &= 0 && \text{per } \frac{v_0}{v_{cr}} \leq 0,5 ; && \boxed{V_0 \leq \frac{V_{cs}}{2}} \\ f_1 \left( \frac{v_0}{v_{cr}} \right) &= 2 \frac{v_0}{v_{cr}} - 1 && \text{per } 0,5 < \frac{v_0}{v_{cr}} \leq 1,0 ; \\ f_1 \left( \frac{v_0}{v_{cr}} \right) &= 1 && \text{per } \frac{v_0}{v_{cr}} > 1,0 ; \end{aligned} \quad (9.17)$$

$f_2 (forma) = 1,00$  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.

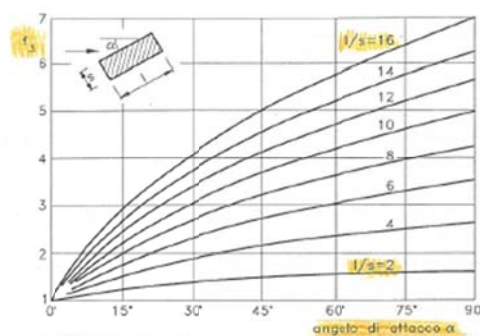


Figura 29 - Formula per il calcolo della profondità di scavo. Immagine da Sistemazione dei corsi d'acqua" di L. Da Deppo et al

Per il calcolo della velocità critica si è considerata la formula in Figura 30 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  $\gamma_s$  il peso specifico del materiale di fondo,  $\gamma$  quello dell'acqua

Figura 30 - 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 (ds).

| 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

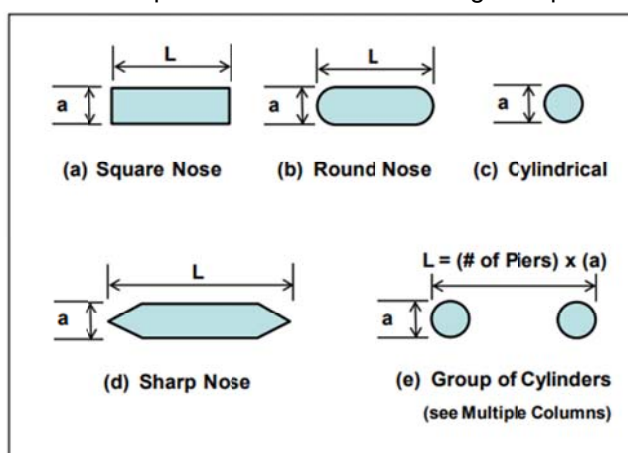
$K_2$  = fattore di correzione in funzione dell'angolo d'attacco fra direzione principale pila e flusso

$K_3$  = 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 ( $\lambda$ ), secondo la seguente tabella.

| Campo           | Lunghezza scala $\lambda$ | $ds/\lambda$ |
|-----------------|---------------------------|--------------|
| $D/h < 0.7$     | 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,  $\rho$  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