

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**U.O. INFRASTRUTTURE NORD**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**LINEA CODOGNO-CREMONA-MANTOVA**

**TRATTA PIADENA-MANTOVA**

**OPERE IDRAULICHE DI ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO**

Relazione idraulica attraversamenti minori ferroviari

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

N M 2 5    0 3    D    2 6    R I    I D 0 0 0 0    0 0 2    A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Esecutiva	G. Coppa <i>[Signature]</i>	Aprile 2020	S. Santopietro <i>[Signature]</i>	Aprile 2020	M. Berlingeri <i>[Signature]</i>	Aprile 2020	

File: NM2503D26RIID000002A

## Sommario

<b>1. PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
<b>1 INTRODUZIONE .....</b>	<b>4</b>
<b>2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>4</b>
2.1 Documenti di input.....	4
<b>2. RIFERIMENTI NORMATIVI .....</b>	<b>5</b>
<b>3. ANALISI IDROLOGICA.....</b>	<b>6</b>
<b>4 STIMA DELLE PORTATE DI PIENA .....</b>	<b>10</b>
<b>5 DIMENSIONAMENTO E VERIFICA TOMBINI IDRAULICI.....</b>	<b>12</b>
5.1 Criteri di verifica .....	12
5.1.1 Modellazione idraulica.....	13
5.2 Sifoni .....	17
<b>6 VERIFICHE IDRAULICHE DEGLI ATTRAVERSAMENTI VI03 E VI04</b>	<b>22</b>
6.1 La schematizzazione delle sezioni e i parametri di verifica.....	23
6.1.1 Modello di calcolo HEC-RAS .....	24
6.2 OPERA VI03.....	25
6.2.1 Descrizione ante operam.....	25
6.2.2 Risultati della simulazione idraulica ante operam TR 200 anni .....	26
6.2.3 Descrizione della configurazione post operam .....	28
6.2.4 Risultati della simulazione idraulica post operam TR 200 anni .....	29
6.3 OPERA VI04.....	33

**RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI  
MINORI FERROVIARI**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NM25	03	D26	RIID0000002	A	2 di 56

6.3.1	Descrizione ante operam .....	34
6.3.2	Risultati della simulazione idraulica ante operam TR 200 anni .....	35
6.3.3	Risultati della simulazione idraulica monodimensionale post operam TR 200 anni ...	37
6.3.4	Studio volumetrico e modello idraulico bidimensionale .....	41
6.3.5	Descrizione della configurazione post operam .....	47
6.4	COMPATIBILITA' IDRAULICA.....	48
6.4.1	Sistemazioni idrauliche .....	48
6.4.2	Analisi di compatibilità idraulica.....	49
<b>7</b>	<b>Opere provvisionali .....</b>	<b>51</b>
	<b>ALLEGATI DI CALCOLO .....</b>	<b>54</b>

## 1. PREMESSA

Nel Programma Regionale Mobilità e Trasporti della Regione Lombardia è riportata la pianificazione di “Riqualficazione Milano – Codogno – Cremona - Mantova”. Tale voce, oltre a citare gli interventi di raddoppio conclusi nel 2015 tra la località Cavatigozzi e Cremona, riporta anche l’intervento di raddoppio, proposto in maniera selettiva, sull’intera relazione.

Recentemente sulla linea sono stati firmati impegni e convenzioni attuative che hanno interessato la Regione Lombardia e Rete Ferroviaria Italiana. L’obiettivo commerciale, alla base di questi interventi, è creare le condizioni per l’incremento della regolarità sulla relazione regionale Milano – Mantova ed un suo successivo potenziamento, nonché raggiungere la frequenza di un treno/h per direzione.

Successivi approfondimenti svolti dalle strutture territoriali di RFI congiuntamente alla Regione Lombardia, hanno messo in evidenza la necessità di approfondire la tratta prioritaria di raddoppio, anche alla luce del modello di esercizio che sarà adottato dalla Regione stessa.

La linea ha inoltre un notevole interesse merci legato, non solo alla presenza degli impianti industriali raccordati, ma anche al fatto che tale linea fa parte del corridoio alternativo al Mediterraneo.

In quest’ottica, il presente Progetto Definitivo, compendia gli interventi necessari, nell’ambito della linea Codogno – Cremona – Mantova, all’attivazione prioritaria della tratta Piadena – Mantova, 1^ fase funzionale del raddoppio della linea in oggetto.

L’opera si sviluppa nella bassa pianura lombarda, ad una quota compresa tra i 60 e i 20 metri s.l.m. andando da ovest verso est; lo sviluppo della tratta è di circa 34km tra le località di Piadena (km 55+286 LS) e Mantova (km 89+557 LS).

La 1^ fase del progetto prevede i seguenti interventi:

- Raddoppio tratta Piadena – Bozzolo: raddoppio con tratti in variante tramite la realizzazione di un nuovo binario ad interasse di circa 22.50 m dall’attuale, da eseguirsi in presenza di esercizio ferroviario;
- Raddoppio tratta Bozzolo – Mantova: raddoppio in stretto affiancamento da eseguirsi in interruzione prolungata di esercizio ferroviario.

Il progetto prevede, nell’ambito della realizzazione nuova della sede ferroviaria a doppio binario, dei relativi impianti ed apparati tecnologici e di trazione elettrica, inoltre la riqualficazione delle Stazioni e dei PRG di

	<b>LINEA CODOGNO-CREMONA-MANTOVA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO – PIADENA -MANTOVA</b> <b>LOTTO 03</b>					
<b>RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI MINORI FERROVIARI</b>	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D26	DOCUMENTO RIID0000002	REV. A	FOGLIO 4 di 56

Piadena, Bozzolo e Marcaria, della Fermata di Castellucchio e del PRG di Mantova. È prevista, ancora, la soppressione di tutti i PL di linea tramite realizzazione di opportune nuove opere sostitutive.

L'intervento, nel suo complesso, grazie all'incremento delle prestazioni della linea, si caratterizza come un potenziamento dei collegamenti regionali e merci attualmente programmati.

## 1 INTRODUZIONE

La presente relazione parte integrante del progetto definitivo “Raddoppio Codogno-Cremona-Mantova”, illustra tutte le fasi del dimensionamento e della verifica dei manufatti idraulici di progetto che confluiranno nei ricettori finali. Le opere in esame sono tombini idraulici in cls a diverse tipologie di sezione quali opere circolari e scatolari che garantiranno la continuità idraulica del reticolo idrografico intercettato dall'infrastruttura ferroviaria. Oltre ai fossi e canali l'opera intercetta anche corsi d'acqua minori che hanno determinato la realizzazione di ponti ferroviari, a tal proposito la metodologia di dimensionamento e verifica, come verrà dettagliatamente illustrata nella presente relazione, ha comportato metodologie e riferimenti normativi differenti dai tombini idraulici a causa, appunto, della tipologia dell'opera che verrà realizzata.

La scelta dei tempi di ritorno è stata effettuata in conformità a quanto previsto dalle indicazioni riportate nelle Norme Tecniche di Attuazione (NTA) del Progetto di Piano Stralcio per l'assetto Idrogeologico (PAI) del bacino del Fiume Po (PAI Fiume Po), dalle Norme tecniche delle costruzioni (NTC18) e dal Manuale di Progettazione Ferroviaria 2018.

## 2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

### 2.1 Documenti di input

Nella presente relazione, si è fatto riferimento ai seguenti documenti:

- Rif. [1] Italferr S.p.a., documento n.° NM2503D26RHID0000001, intitolato “Relazione Idrologica”, datato Aprile 2020;
- Rif. [2] Italferr S.p.a., documento n.° NM2503D26P7ID0000001-42, intitolato “Planimetria di drenaggio ferroviario”, datato Aprile 2020;

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>LINEA CODOGNO-CREMONA-MANTOVA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO – PIADENA -MANTOVA</b> <b>LOTTO 03</b></p>					
<p><b>RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI MINORI FERROVIARI</b></p>	<p>COMMESSA NM25</p>	<p>LOTTO 03</p>	<p>CODIFICA D26</p>	<p>DOCUMENTO RIID0000002</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 5 di 56</p>

## 2. RIFERIMENTI NORMATIVI

Il progetto è stato redatto nel rispetto delle seguenti norme:

- Direttiva Quadro Acque 2000/60/CE.
- Direttiva Alluvioni 2007/60/CE.
- R.D. 25/07/1904, N. 523 "Testo unico delle disposizioni di legge intorno alle opere idrauliche delle diverse categorie".
- D.Lgs. 3 aprile 2006, n. 152 e ss.mm.ii. Norme in materia ambientale.
- Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14 gennaio 2008).
- Dlgs 16 marzo 2009, n. 30. Protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento.
- Dm Ambiente 16 giugno 2008, n. 131. Criteri tecnici per la caratterizzazione dei corpi idrici.
- Dm Ambiente 12 giugno 2003, n. 185. Regolamento recante norme tecniche per il riutilizzo delle acque reflue.
- Dlgs 27 gennaio 1992, n. 132. Protezione delle acque sotterranee.
- "Manuale di Progettazione delle Opere Civili" della Rete Ferroviaria Italiana (RFI) aggiornato.
- PAI - 7. Norme di Attuazione - Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica - Allegato 3 Distribuzione spaziale delle precipitazioni intense. Parametri delle linee segnalatrici di probabilità pluviometrica per tempi di ritorno di 20, 100, 200 e 500 anni.
- PdG Po – Piano di Gestione del fiume Po approvato il 3/03/2016 (DPCM 27 ottobre 2016).
- Piano di Gestione del Rischio Alluvioni del Distretto Idrografico Padano (P.G.R.A. 03/03/2016).
- Norme tecniche di attuazione del Programma di Tutela e Uso delle Acque (PTUA) della Regione Lombardia del 2016.
- L.R. 15 marzo 2016, n. 4; “Revisione della normativa regionale in materia di difesa del suolo, di prevenzione e mitigazione del rischio idrogeologico e di gestione dei corsi d’acqua”.
- Regolamento regionale 24 marzo 2006, n.2 - Disciplina dell'uso delle acque superficiali e sotterranee, dell'utilizzo delle acque a uso domestico, del risparmio idrico e del riutilizzo dell'acqua in attuazione dell'articolo 52, comma 1, lettera c) della legge regionale 12 dicembre 2003, n. 26.

	<b>LINEA CODOGNO-CREMONA-MANTOVA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO – PIADENA -MANTOVA</b> <b>LOTTO 03</b>					
<b>RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI MINORI FERROVIARI</b>	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D26	DOCUMENTO RIID0000002	REV. A	FOGLIO 6 di 56

- Regolamento regionale 24 marzo 2006, n.3 - Disciplina e regime autorizzatorio degli scarichi di acque reflue domestiche e di reti fognarie, in attuazione dell'articolo 52, comma 1, lettera a) della legge regionale 12 dicembre 2003, n. 26 e relative "Norme tecniche regionali in materia di trattamento degli scarichi di acque reflue in attuazione dell'articolo 3, comma 1 del Regolamento reg. 2006, n.3".
- Regolamento regionale 24 marzo 2006, n.4 “Disciplina dello smaltimento delle acque di prima pioggia e di lavaggio delle aree esterne, in attuazione dell'articolo 52, comma 1, lettera a) della legge regionale 12 dicembre 2003, n. 26.
- DGR 6738 del 19 giugno 2017. “Disposizioni regionali concernenti l’attuazione del piano di gestione rischi alluvioni (PGRA) nel settore urbanistico e di pianificazione dell’emergenza, ai sensi dell’art. 58 delle norme di attuazione del piano stralcio per l’assetto idrogeologico (PAI) del bacino del Fiume Po così come integrate dalla variante adottata in data 7/12/2016 con deliberazione n. 5 dal comitato istituzionale dell’autorità di bacino del Fiume Po”.
- Testo coordinato del r.r. 23 novembre 2017, n. 7 «Regolamento recante criteri e metodi per il rispetto del principio dell’invarianza idraulica ed idrologica ai sensi dell’articolo 58 bis della legge regionale 11 marzo 2005, n. 12 (Legge per il governo del territorio)» Serie Ordinaria n. 51 - Sabato 21 dicembre 2019.

### 3. ANALISI IDROLOGICA

L’analisi idrologica dei bacini in questione è stata condotta con riferimento ai seguenti documenti prodotti dalle autorità competenti sul territorio lombardo:

- *Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni – Art.7 della Direttiva 2007/60/CE e del D.lgs. n.49 del 23.02.2010 – Profili fi piena dei corsi d’acqua del reticolo principale*
- *Studio di fattibilità della sistemazione idraulica: - dell’Adda nel tratto da Olginate alla confluenza nel Po, del Fiume Brembo nel tratto da Lenna alla confluenza in Adda, del Fiume Serio nel tratto da Parre alla confluenza in Adda*

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>LINEA CODOGNO-CREMONA-MANTOVA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO – PIADENA -MANTOVA</b> <b>LOTTO 03</b></p>					
<p><b>RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI MINORI FERROVIARI</b></p>	<p>COMMESSA NM25</p>	<p>LOTTO 03</p>	<p>CODIFICA D26</p>	<p>DOCUMENTO RIID0000002</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 7 di 56</p>

I valori delle portate di piena sono stati stimati mediante l'utilizzo delle curve di possibilità pluviometrica fornite dall'ARPA Lombardia e successivamente l'applicazione di modelli idrologici afflussi-deflussi.

Per la stima delle portate di piena defluenti nei corsi d'acqua sono stati utilizzati modelli di trasformazione afflussi-deflussi che a partire dalle curve di possibilità pluviometrica dell'ARPA Lombardia forniscono il corrispondente andamento nel tempo delle portate.

L'applicazione di tali modelli necessita quindi della conoscenza del regime delle precipitazioni di forte intensità nel territorio di interesse, sintetizzato nelle cosiddette Linee Segnalatrici di Possibilità Pluviometrica (LSPP) che legano l'altezza h, la durata d della pioggia e il tempo di ritorno T tramite l'espressione:

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

Per il calcolo del regime pluviometrico sono state considerati i parametri delle LSPP più gravosi in termini di intensità di pioggia vedi Rif[01].

Tr (anni)	a (mm/h)	n
25	45.392	0.266
50	55.212	
100	62.238	
200	69.615	

**Tabella 1 - Parametri delle CPP al variare del Tr per piogge extraorarie t>1h**



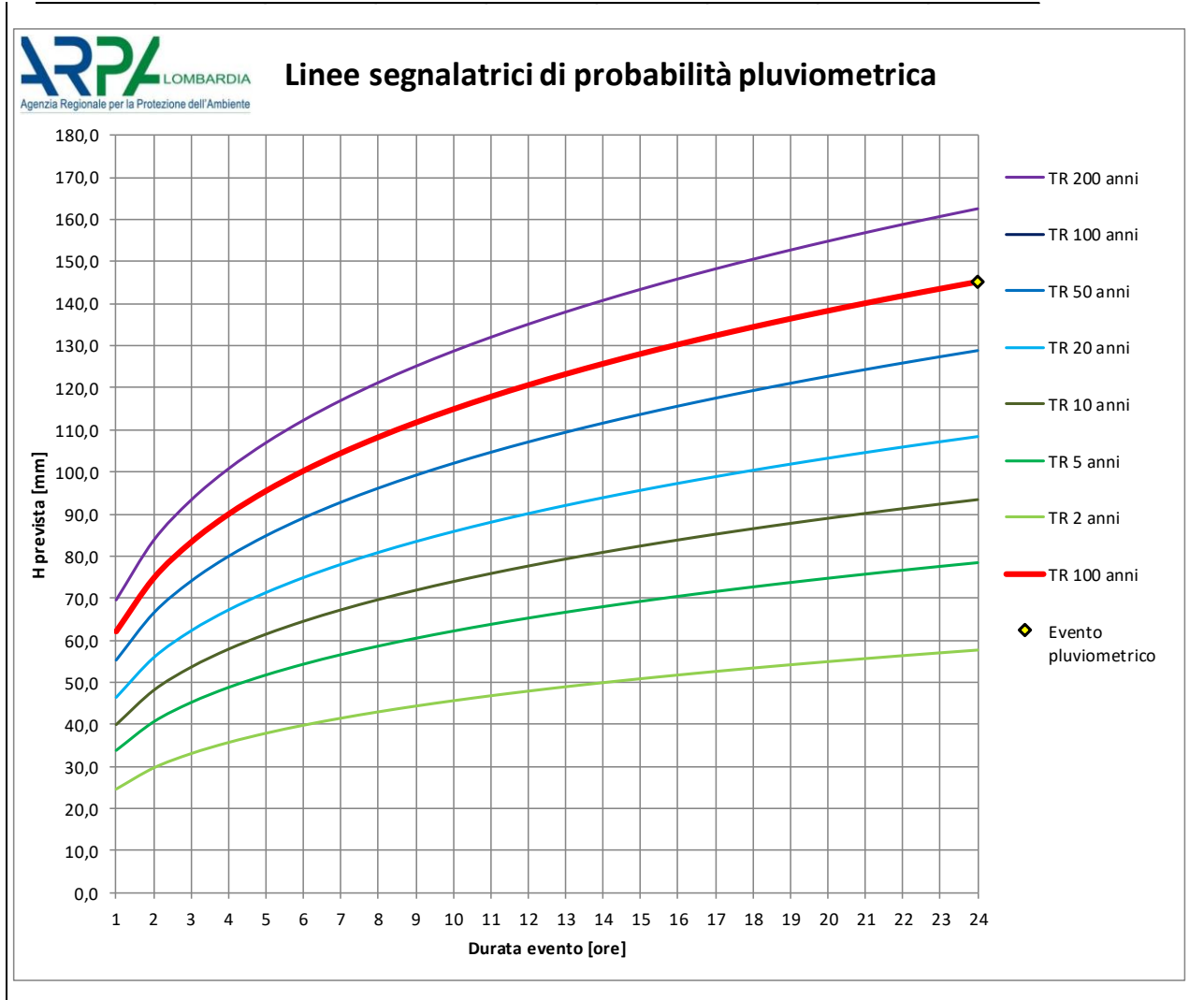


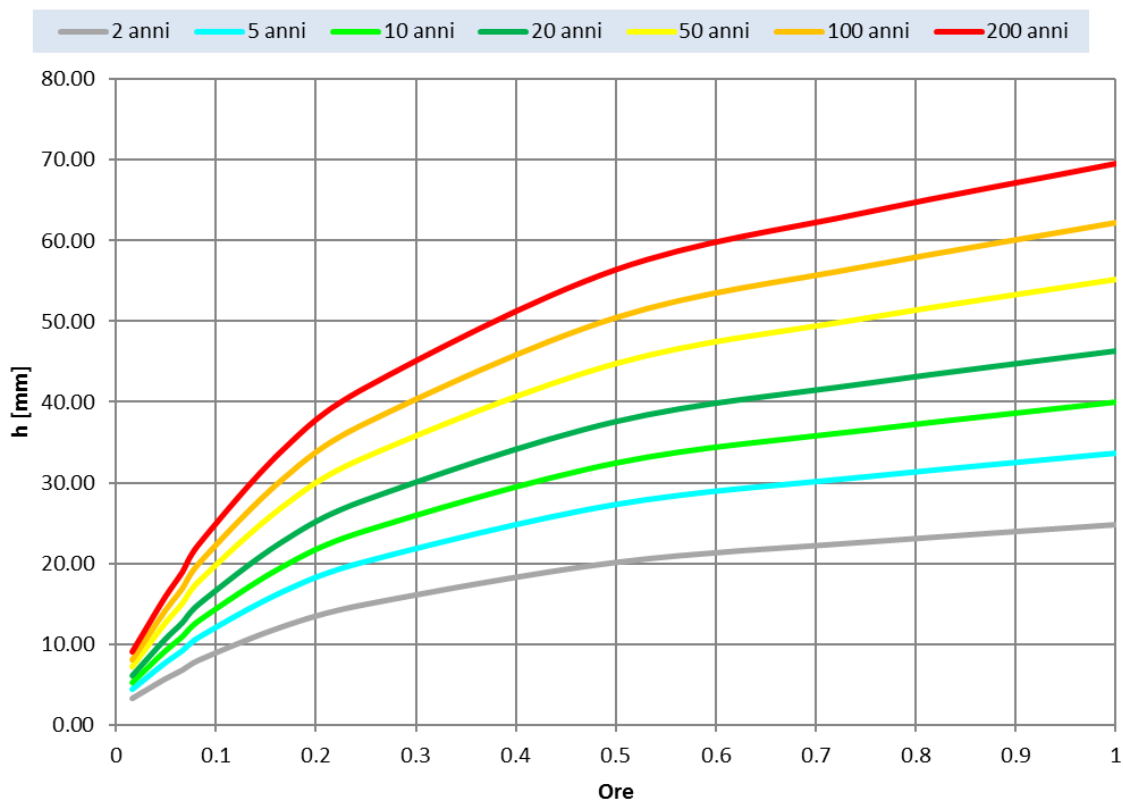
Figura 1 - LSPP ARPA Lombardia

A seguito dell'analisi delle piogge di breve durata secondo il metodo di Bell nella seguente tabella i parametri  $a$  e  $n$  delle leggi di probabilità pluviometrica per eventi di durata inferiore all'ora misurati in minuti per i vari tempi di ritorno, vedi Rif[01]:

Tr (anni)	a (mm/h)	n
25	51.69	0.518
50	61.50	
100	69.29	
200	77.54	

**Tabella 2 - Parametri delle CPP al variare del Tr per piogge sub-orarie  $t < 1h$**

Le curve di possibilità pluviometrica per i vari tempi di ritorno durata inferiore ad un'ora (stimate con il metodo di Bell), riferite al progetto in essere, sono riportate di seguito, con tempo  $t$  espresso in minuti.



**Figura 2 - Curve di possibilità pluviometrica piogge di forte intensità e breve durata**

#### 4 STIMA DELLE PORTATE DI PIENA

Per la stima delle portate di piena transitanti all'interno dei tombini idraulici si è fatto riferimento a due differenti metodi di trasformazione afflussi-deflussi:

- Metodo Razionale;
- Metodo SCS.

Il metodo razionale si basa sull'ipotesi che durante un evento meteorico, che inizi istantaneamente e continui con intensità costante nel tempo e nello spazio, la portata aumenti sino ad un tempo pari al tempo di corrivazione  $t_c$ , quando l'area di tutto il bacino contribuisce al deflusso. La portata al colmo  $Q_c$  è allora proporzionale al prodotto tra intensità di pioggia e area del bacino attraverso il coefficiente di afflusso  $\phi$ . Il calcolo del tempo di corrivazione, definito come il tempo che impiega la particella di acqua idraulicamente più lontana ad arrivare alla sezione di chiusura. Stimato il tempo di concentrazione è stato individuato il coefficiente di deflusso che consente di tener conto della tipologia di terreno e di conseguenza la perdita del flusso di acqua all'interno del terreno.

Il coefficiente di deflusso  $\phi$  è dato dal rapporto tra il volume (che coincide con la pioggia efficace) defluito dal bacino in un dato intervallo di tempo e il relativo afflusso costituito dalla precipitazione totale:

$$C = \frac{P_e}{P}$$

Per bacini di ridotte dimensioni, sono stati assunti i valori dei coefficienti di afflusso  $C$  e le percentuali di ripartizione tra aree boschive, aree ad uso agricolo e aree urbanizzate, sulla base dei valori riportati nella tabella seguente e da cui deriva un valore stimato di  $C=0.30$ .

Il calcolo della portata è così definito:

$$Q = \varphi \cdot i(t_c) \cdot A_b$$

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>LINEA CODOGNO-CREMONA-MANTOVA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO – PIADENA -MANTOVA</b> <b>LOTTO 03</b></p>					
<p><b>RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI MINORI FERROVIARI</b></p>	<p>COMMESSA NM25</p>	<p>LOTTO 03</p>	<p>CODIFICA D26</p>	<p>DOCUMENTO RIID0000002</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 11 di 56</p>

Il CN (Curve Number) è un parametro sintetico che esprime l'attitudine di una porzione di territorio a produrre deflusso diretto (superficiale) proposto dal Soil Conservation Service (USDA) nel 1972. Il CN varia da zero a cento. Più alto è il valore maggiore è il deflusso prodotto a parità di precipitazione. Tale modello è concentrato nello spazio e nel tempo e si basa sulla semplificazione concettuale del processo idrologico. La sua formulazione deriva dall'equazione di bilancio fra i valori cumulati nel tempo dei principali termini dell'afflusso e quelli del deflusso. Si ipotizza che durante l'intero evento preso in considerazione resti invariata la relazione di proporzionalità tra le perdite per infiltrazione e il deflusso superficiale.

Lo sviluppo successivo ha richiesto la stima della portata massima adottando come forzante del bacino una pioggia netta desunta dal metodo del Curve Number introdotto dal Soil Conservation Service (SCS). Il volume specifico di pioggia netta  $P_e$ , dall'inizio dell'evento meteorico fino all'istante generico  $t$  è legato al volume specifico di pioggia lorda  $P$  caduta nel medesimo intervallo temporale. Come per il metodo razionale, anche in questo caso si è stimato un valore del CN medio per i bacini in quanto ricadevano in aree diversamente permeabili. Tale operazione è stata eseguita utilizzando i dati del Corine Land Cover 2012 IV livello e ricavando il corrispettivo Curve Number, tale tabella ci fornisce il CN(II) che a sua volta è stato utilizzato per stimare il CN(III) che nel caso in esame è pari a 85.54.

Il calcolo della portata è così definito:

$$Q = \frac{0.208 \cdot h_n \cdot A}{t_a}$$

Per approfondimenti sullo studio idrologico si rimanda all'elaborato "NM2500D26RHID0000001A"

	<b>LINEA CODOGNO-CREMONA-MANTOVA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO – PIADENA -MANTOVA</b> <b>LOTTO 03</b>					
<b>RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI MINORI FERROVIARI</b>	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D26	DOCUMENTO RIID0000002	REV. A	FOGLIO 12 di 56

## 5 DIMENSIONAMENTO E VERIFICA TOMBINI IDRAULICI

Il calcolo delle portate massime di progetto, con riferimento alle curve di possibilità climatica elaborate nello studio idrologico per tempo di ritorno  $Tr=200$  anni, è illustrato nell'elaborato Rif[01].

### 5.1 Criteri di verifica

Il calcolo di progetto della dimensione dei tombini si è basato nel rispetto delle normative vigenti ed in particolare:

- Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14 gennaio 2008);
- Circolare 21/01/2019, n.7 C.S.LL.PP.;
- "Manuale di Progettazione delle Opere Civili" della Rete Ferroviaria Italiana (RFI) aggiornato.

Seguendo quanto riportato nelle suddette normative si è provveduto alla verifica dei manufatti idraulici garantendone:

- la capacità di far defluire la portata stimata per il tempo di ritorno  $Tr=200$  anni;
- un grado di riempimento GR, rapporto tra l'altezza del pelo libero ed il diametro interno del tombino, che deve essere minore o uguale al 67%;
- il manufatto non deve presentare un funzionamento in pressione;
- la velocità di sbocco deve mantenersi al di sotto di un valore massimo cautelativo pari a 5m/s, per evitare fenomeni erosivi localizzati.
- In linea di principio la dimensione minima per i tombini deve essere di 2.00 m per gli scatolari e  $\phi$  1500 per i circolari così come previsto dal manuale di progettazione RFI;
- Pendenza minima del tombino pari al 2‰ come previsto dal manuale di progettazione RFI;
- Franco di sicurezza minimo tra livello massimo di piena ed estradosso dell'impalcato pari a 1,50m (per le opere VI03 e VI04).

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>LINEA CODOGNO-CREMONA-MANTOVA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO – PIADENA -MANTOVA</b> <b>LOTTO 03</b></p>					
<p><b>RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI MINORI FERROVIARI</b></p>	<p>COMMESSA NM25</p>	<p>LOTTO 03</p>	<p>CODIFICA D26</p>	<p>DOCUMENTO RIID0000002</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 13 di 56</p>

### 5.1.1 Modellazione idraulica

Le verifiche ed il dimensionamento idraulico sono stati effettuati in condizioni di moto permanente mediante l'utilizzo del software HY8.

Il programma HY-8 ha lo scopo di consentire un supporto alla progettazione ed alla verifica delle intersezioni dei corsi d'acqua minori con le infrastrutture viarie come strade e ferrovie. Il software utilizza le routines, in accordo ai criteri della FHWA definiti nelle pubblicazioni seguenti: HDS-5, "Hydraulic Design of Highway Culverts," e HEC-14, "Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels".

I principali risultati che si possono ottenere tramite questo programma sono:

- determinare la dimensione, la forma ed il numero di opere d'arte (tombini e
- scotolari necessari a far defluire una portata di progetto;
- definire la capacità di deflusso di un manufatto esistente imponendo il livello
- idricoammissibile di monte;
- calcolare il livello idrico raggiunto a monte del manufatto per far defluire una
- determinata portata, sia in condizioni di normale deflusso che in condizioni di acqua
- ferma all'imbocco.
- determinare la scala di portata o altre relazioni tra le principali variabili idrauliche per
- determinare il livello di rischio della struttura.
- determinare il profilo idrico della portata transitante nell'opera.

Il programma fornisce direttamente output sintetici con le variabili principali della simulazione ed alcuni grafici che mostrano il comportamento idraulico della struttura al variare della portata di progetto o del livello idrico di monte.

Nel caso dei tombini ferroviari, essendo realizzati in cls, si assume un valore per il parametro di scabrezza  $k$  [ $m^{1/3}s^{-1}$ ] pari a 67.

Al fine di verificare che la luce di sbocco non sia sommersa e che il tombino non vada in pressione, si calcola il carico idraulico totale a monte  $H$ :

$$H = y_u + \frac{U^2}{2g}$$

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>LINEA CODOGNO-CREMONA-MANTOVA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO – PIADENA -MANTOVA</b> <b>LOTTO 03</b></p>					
<p><b>RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI MINORI FERROVIARI</b></p>	<p>COMMESSA NM25</p>	<p>LOTTO 03</p>	<p>CODIFICA D26</p>	<p>DOCUMENTO RIID0000002</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 14 di 56</p>

La condizione richiesta è verificata quando tale valore H risulta inferiore ad un'altezza l'altezza H\*:

$$H^* = 1.2 \div 1.5 D \text{ (diametro del tombino).}$$

- In termini di velocità e di grado di riempimento si assumono i seguenti valori di riferimento:
- Velocità massima: 5 m/s;
- Grado di riempimento massimo consentito: 67%
  
- Tensioni tangenziali al fondo  $T_m$  non minori di  $0,2 \text{ kg/m}^2$ , per evitare fenomeni di deposito di materiale solido nel tombino.

Per la realizzazione dei tombini sono stati individuati tubolari di calcestruzzo a sezione circolare e manufatti scatolari di calcestruzzo.

Dai calcoli effettuati si prospetta quanto riportato nella seguente tabella l'ID dell'opera, la progressiva, la portata transitata ( $Q[\text{m}^3/\text{s}]$ ), l'altezza/ diametro dell'opera ( $h/\phi$ ) e la sezione corrispondente.

**RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI  
 MINORI FERROVIARI**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NM25	03	D26	RIID0000002	A	15 di 56

ID Opera	Progressiva [m]	Q [m <sup>3</sup> /s]	h/φ [m]	Opera	Sezione
IN03	85+726.72	1.29	1.50	Circolare	1500
IN05	82+872.11	2.17	2.00	Scatolare	2.0x1.5
IN06	81+755.82	1.82	2.50	Scatolare	4.0x2.5
IN07	81+461.18	0.67	2.50	Scatolare	4.0x2.5
IN08	81+352.87	0.73	1.50	Scatolare	2.0x1.5
IN09	80+519.90	0.83	1.50	Circolare	1500
IN10	77+706.51	1.78	1.50	Circolare	1500
IN11	77+447.84	2.21	2.00	Scatolare	2.0x1.5
IN12	76+342.83	1.76	1.50	Scatolare	2.0x1.5
IN13	75+687.44	0.99	1.50	Scatolare	2.0x1.5
IN14	75+390.17	1.00	1.50	Circolare	1500
IN15	74+979.53	0.78	1.50	Circolare	1500
IN17	74+660.78	0.58	1.50	Circolare	1500
IN18	74+364.61	0.67	1.50	Circolare	1500
IN20	73+963.00	0.90	1.50	Circolare	1500
IN21	72+797.03	1.30	1.50	Scatolare	2.0x1.5
IN22	72+660.31	0.29	1.50	Circolare	1500
IN23	72+194.27	0.53	2.00	Scatolare	2.0x2.0
IN25	70+085.32	0.54	1.50	Scatolare	2.0x1.5
IN28	67+622.12	0.52	1.50	Circolare	1500
IN29	66+950.00	0.97	1.50	Circolare	1500
IN30	66+749.45	0.62	2.00	Scatolare	2.0x2.0
IN31	66+685.00	1.23	1.50	Circolare	1500
IN32	65+878.54	0.55	1.50	Circolare	1500
IN33	65+055.41	0.62	2.00	Scatolare	2.0x2.0
IN34	64+868.40	0.26	1.50	Circolare	1500
IN35	64+507.41	1.15	2.00	Scatolare	2.0x2.0
IN36	64+180.03	0.45	1.50	Circolare	1500
IN38	61+945.82	3.43	2.00	Scatolare	2.5x2.0
IN42	60+109.56	0.68	1.50	Circolare	1500
IN43	59+464.59	0.95	1.50	Circolare	1500
IN45	58+644.20	0.35	1.50	Circolare	1500
IN46	58+209.39	0.14	1.50	Circolare	1500
IN49	57+704.36	0.55	1.50	Circolare	1500
IN50	57+542.38	0.66	1.50	Circolare	1500
IN51	57+282.01	0.38	1.50	Circolare	1500
IN52	57+133.49	0.69	1.50	Circolare	1500
IN53	56+306.45	0.72	1.50	Circolare	1500

**Tabella 3 - Tabella di sintesi**



**RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI  
 MINORI FERROVIARI**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NM25	03	D26	RIID0000002	A	16 di 56

Le verifiche in moto permanente sono state compiute per ogni tipologia di tombino tramite il software HY-8.

Nella tabella 4 si riportano le verifiche dei tombini idraulici.

ID Opera	Q [m <sup>3</sup> /s]	Qmonte [s.l.m.]	Qvalle [s.l.m.]	L [m]	i [%]	h/φ [m]	Opera	r [m]	R [%]	Manning opera	Manning canale
IN03	1.29	23.30	23.22	16.50	0.48%	1.50	Circolare	0.81	<b>54%</b>	0.012	0.03
IN05	2.17	22.62	22.58	20.00	0.20%	1.54	Scatolare	1.02	<b>66%</b>	0.012	0.03
IN06	1.82	21.36	21.28	16.00	0.50%	2.50	Scatolare	0.47	<b>19%</b>	0.012	0.03
IN07	0.67	20.08	20.04	17.60	0.23%	2.50	Scatolare	0.33	<b>13%</b>	0.012	0.03
IN08	0.73	20.62	20.58	18.60	0.22%	1.50	Scatolare	0.50	<b>33%</b>	0.012	0.03
IN09	0.83	25.32	25.28	15.60	0.26%	1.50	Circolare	0.73	<b>49%</b>	0.012	0.03
IN10	1.78	24.24	24.20	16.00	0.25%	1.50	Circolare	1.00	<b>67%</b>	0.012	0.03
IN11	2.21	23.65	23.60	17.70	0.28%	1.50	Scatolare	0.86	<b>57%</b>	0.012	0.03
IN12	1.76	24.41	24.31	15.10	0.66%	1.50	Scatolare	0.87	<b>58%</b>	0.012	0.03
IN13	0.99	24.25	24.19	15.70	0.38%	1.50	Scatolare	0.64	<b>43%</b>	0.012	0.03
IN14	1.00	24.62	24.58	15.70	0.25%	1.50	Circolare	0.90	<b>60%</b>	0.012	0.03
IN15	0.78	22.74	22.64	16.95	0.59%	1.50	Circolare	0.61	<b>41%</b>	0.012	0.03
IN17	0.58	24.12	24.08	16.90	0.24%	1.50	Circolare	0.59	<b>39%</b>	0.012	0.03
IN18	1.04	23.90	23.86	15.90	0.25%	1.50	Circolare	0.86	<b>57%</b>	0.012	0.03
IN20	0.90	23.91	23.87	18.70	0.21%	1.50	Circolare	0.81	<b>54%</b>	0.012	0.03
IN21	1.30	25.12	25.08	15.70	0.25%	1.50	Scatolare	0.74	<b>49%</b>	0.012	0.03
IN22	0.29	25.39	25.27	15.00	0.80%	1.50	Circolare	0.36	<b>24%</b>	0.012	0.03
IN23	0.53	23.97	23.74	17.70	1.30%	2.00	Scatolare	1.24	<b>62%</b>	0.012	0.03
IN25	0.54	25.07	24.92	17.70	0.85%	1.50	Scatolare	0.35	<b>23%</b>	0.012	0.03
IN28	0.52	24.10	23.66	61.00	0.72%	1.50	Circolare	0.49	<b>33%</b>	0.012	0.03
IN29	0.97	20.83	20.74	30.00	0.30%	1.50	Circolare	0.69	<b>46%</b>	0.012	0.03
IN30	2.87	20.77	20.41	40.00	0.90%	2.00	Scatolare	1.01	<b>51%</b>	0.012	0.03
IN31	1.23	20.93	20.59	40.00	0.85%	1.50	Circolare	0.78	<b>52%</b>	0.012	0.03
IN32	1.35	21.41	21.30	21.60	0.51%	1.50	Circolare	0.83	<b>55%</b>	0.012	0.03
IN33	5.65	22.84	22.70	15.70	0.89%	2.00	Scatolare	1.33	<b>67%</b>	0.012	0.03
IN34	0.26	22.11	21.97	19.50	0.72%	1.50	Circolare	0.34	<b>23%</b>	0.012	0.03
IN35	1.99	21.64	21.48	19.40	0.82%	2.00	Scatolare	0.76	<b>38%</b>	0.012	0.03
IN36	0.45	22.14	22.02	29.20	0.41%	1.50	Circolare	0.46	<b>31%</b>	0.012	0.03
IN38	4.21	25.95	25.84	26.00	0.42%	2.00	Scatolare	1.21	<b>61%</b>	0.012	0.03
IN42	0.68	28.37	28.23	15.40	0.91%	1.50	Circolare	0.60	<b>40%</b>	0.012	0.03
IN43	0.95	28.02	27.86	19.95	0.80%	1.50	Circolare	0.70	<b>47%</b>	0.012	0.03
IN45	0.35	27.93	27.77	18.00	0.89%	1.50	Circolare	0.40	<b>27%</b>	0.012	0.03
IN46	0.14	28.23	28.06	21.60	0.79%	1.50	Circolare	0.25	<b>17%</b>	0.012	0.03
IN49	0.55	29.79	29.61	21.00	0.86%	1.50	Circolare	0.51	<b>34%</b>	0.012	0.03
IN50	0.66	29.67	29.53	19.20	0.73%	1.50	Circolare	0.56	<b>37%</b>	0.012	0.03
IN51	0.38	30.26	30.14	15.00	0.80%	1.50	Circolare	0.42	<b>28%</b>	0.012	0.03
IN52	0.69	30.06	29.94	15.40	0.78%	1.50	Circolare	0.57	<b>38%</b>	0.012	0.03
IN53	0.72	29.91	29.79	18.00	0.67%	1.50	Circolare	0.58	<b>39%</b>	0.012	0.03

**Tabella 4 - Verifiche tombini**

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>LINEA CODOGNO-CREMONA-MANTOVA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO – PIADENA -MANTOVA</b> <b>LOTTO 03</b></p>					
<p><b>RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI MINORI FERROVIARI</b></p>	<p>COMMESSA NM25</p>	<p>LOTTO 03</p>	<p>CODIFICA D26</p>	<p>DOCUMENTO RIID0000002</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 17 di 56</p>

Le tabelle di calcolo, complete con i risultati finali del dimensionamento, relativamente ai vari tombini identificati secondo la tavola di planimetria (vedi Rif[02]), sono riportati in allegato. Alcuni sparuti attraversamenti presentano un grado di riempimento maggiore del 50 %, ma data la morfologia valliva, e la destinazione d’uso irrigua e agricola di tutti i bacini insistenti sugli attraversamenti esaminati, si ritiene da escludersi la presenza nella corrente di corpi flottanti di dimensioni tali da occludere le sezioni previste in progetto. Inoltre, i canali sotto la giurisdizione dei vari consorzi di bonifica sono soggetti ad una costante manutenzione.

## 5.2 Sifoni

Gli attraversamenti IN01, IN40 e IN44 sono allo stato attuale dei sifoni, nel presente progetto definitivo tali opere verranno mantenute realizzate mediante collettori circolari dotati di una camera di ispezione per la manutenzione ordinaria e straordinaria. I sifoni IN01 e IN40 saranno composti da 2 collettori circolari del diametro pari a 2000mm mentre il sifone IN44 sarà a singola canna con un diametro di 1000 mm.

Si prevede la realizzazione di un sifone a doppio canna, nel rispetto della normativa vigente circa gli attraversamenti della linea ferroviaria con condotte in pressione, di cui una attivabile per le situazioni eccezionali.

Per calcolare la perdita di carico distribuita  $h$  per ogni condotta in pressione si è adottata la formula:

$$h = Q^2 (\beta_r L + 0,124 D) / D^5$$

$$\beta_r = 2 g / (K_s^2 R^{4/3})$$

In cui  $Q$  e’ la portata  $L$  la lunghezza della condotta,  $D$  il diametro,  $K_s$  la scabrezza e  $R$  il raggio idraulico.

A tale perdita di carico si sono sommate le perdite localizzate all'imbocco e allo sbocco:

$$H_{i-s} = \frac{0.1 \cdot v_c^2}{2g}$$

Perdite localizzate in curva:

$$H_{i-s} = \frac{0.4 \cdot v_c^2}{2g}$$

con  $v_c$  = velocità nella condotta.

La perdita di carico totale pertanto è quantificata in:

$$Y = h + H_{i-s}$$

Applicando il principio di conservazione dell'energia tra i punti di ingresso e di uscita del sifone, esplicitato dall'equazione sotto riportata, si ricava la quota geodetica della linea di carico idraulico della corrente idrica in uscita dal sifone:

$$z_s = H - \left( Y + \frac{v_c^2}{2g} \right)$$

La verifica avrà esito positivo se la differenza tra le quote di imbocco e sbocco dei canali risulta maggiore della somma delle perdite di carico.

**RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI  
MINORI FERROVIARI**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NM25	03	D26	RIID0000002	A	19 di 56

### 5.2.1 RISULTATI DELLE VERIFICHE.

IN01

Quota imbocco	22,42
Quota sbocco	21,87
Dg	<b>0,55</b>
g	9,81

	H	L	area	perimetro	Rid
dimensioni pozzo vert	2	2	4	8	0,5
dimensione cunicolo	2	2	4	8	0,5
lunghezza cunicolo	21,72				
velocita'	1,25				

portata	5
coeff.perdite imbocco spigoli	0,1
coeff. perdite curva	0,4
X carico distribuito	0,011349702
Ks	66

perdita imbocchi	0,015927625
perdita curve	0,063710499
perdita cunicolo	0,386340256
perdita sbocchi	0,015927625
perdite totali	<b>0,481906005</b>

Dg>perdite totali

OK

**RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI  
MINORI FERROVIARI**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NM25	03	D26	RIID0000002	A	20 di 56

IN40

Quota imbocco	28,78
Quota sbocco	28,35
Dg	0,43
g	9,81

	H	L	area	perimetro	Rid
dimensioni pozzo vert	2	2	4	8	0,5
dimensione cunicolo	2	2	4	8	0,5
Dg	1		0,785	3,14	0,25
lunghezza cunicolo	20				
velocita'	0,5625				

portata	2,25
coeff.perdite imbocco spigoli	0,1
coeff. perdite curva	0,4
X carico distribuito	0,028599457
Ccls	66

perdita imbocchi	0,003225344
perdita curve	0,012901376
perdita cunicolo	0,259449689
perdita sbocchi	0,003225344
<b>perdite totali</b>	<b>0,278801753</b>

Dg>perdite totali

OK

**RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI  
MINORI FERROVIARI**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NM25	03	D26	RIID0000002	A	21 di 56

IN44

Quota imbocco	28,43
Quota sbocco	28
Dg	0,43
g	9,81

Geometria	H	L	area	perimetro	Rid
dimensioni pozzo vert	2	2	4	8	0,5
dimensione cunicolo	2	2	4	8	0,5
Dg	1		0,785	3,14	0,25
lunghezza cunicolo	20				
velocita'	0,50955414				

portata	0,4
coeff.perdite imbocco spigoli	0,1
coeff. perdite curva	0,4
X carico distribuito	0,028599457
Ks	66

perdita imbocchi	0,002646742
perdita curve	0,010586969
perdita cunicolo	0,004099946
perdita sbocchi	0,002646742

perdite totali **0,0199804**

Dg>perdite totali

OK

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>LINEA CODOGNO-CREMONA-MANTOVA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO – PIADENA -MANTOVA</b> <b>LOTTO 03</b></p>					
<p><b>RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI MINORI FERROVIARI</b></p>	<p>COMMESSA NM25</p>	<p>LOTTO 03</p>	<p>CODIFICA D26</p>	<p>DOCUMENTO RIID0000002</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 22 di 56</p>

## 6 VERIFICHE IDRAULICHE DEGLI ATTRAVERSAMENTI VI03 E VI04

I fenomeni di deflusso in esame si caratterizzano per la prevalenza di una dimensione rispetto alle altre, ed appare quindi del tutto ragionevole l'accettazione della ipotesi di monodimensionalità del moto che, consentendo notevoli semplificazioni del sistema di equazioni differenziali che governando il fenomeno, ne assicurano la risolubilità con tempi di calcolo ragionevoli. Tale ipotesi, ancorché generalmente adottata, deve essere tuttavia attentamente valutata in presenza di estesi fenomeni di esondazione o in prossimità di ostacoli presenti in alveo quali ponti, soglie, o briglie, cui consegue per il moto l'acquisizione di spiccati caratteri di bi o tridimensionalità.

Un ragionevole compromesso tra l'accuratezza e lo sforzo computazionale appare pertanto quello di limitare la simulazione, in condizioni di portate estreme, all'ipotesi di condizioni di quasi stazionarietà concomitanti con il passaggio del colmo di piena, ed adottando differenti coefficienti di scabrezza e di ragguaglio delle velocità per le aree golenali, rispetto all'alveo vero e proprio.

Anche in tali condizioni, assai incerte rimangono le determinazioni relative alla effettiva direzione del moto ed al conseguente fenomeno di riduzione delle distanze, per effetto dei tagli temporanei di eventuali curve, e delle conseguenti accentuazioni della pendenza idrica locale.

Infine, la determinazione del coefficiente di scabrezza da assegnare a ciascun tronco di alveo, unitamente alla ipotesi di indeformabilità dei contorni costituenti la sezione, palesemente non veritiera specialmente durante accentuati eventi di piena, costituiscono altrettanti limiti alla attendibilità delle valutazioni ottenibili. Peraltro, alla luce della convenzionalità della definizione di rischio potenziale, soprattutto per elevati valori del tempo di ritorno caratteristico dell'evento esaminato, la metodologia prevista appare ragionevolmente corretta anche se suscettibile di affinamenti sia concettuali che applicativi.

Un aspetto assai rilevante ai fini della valutazione qualitativa dei risultati conseguibili dalla adozione di un modello numerico siffatto è rappresentato dalle caratteristiche di affidabilità delle determinazioni relative alle "condizioni al contorno", in termini di livelli idrici nelle sezioni di controllo del sistema. La particolare natura delle aste fluviali considerate consiglia l'adozione dell'ipotesi semplificativa di raggiungimento delle condizioni di moto uniforme alla estremità di monte o di valle del tronco fluviale analizzato.

	<b>LINEA CODOGNO-CREMONA-MANTOVA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO – PIADENA -MANTOVA</b> <b>LOTTO 03</b>					
<b>RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI MINORI FERROVIARI</b>	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D26	DOCUMENTO RIID0000002	REV. A	FOGLIO 23 di 56

Nei paragrafi seguenti verranno quindi espone le metodologie impiegate per le verifiche idrauliche oggetto della presente relazione, evidenziando le ipotesi adottate di semplificazione teorica delle schematizzazioni concettuali dei fenomeni idraulici, ed i criteri di valutazione assunti per la quantificazione dei parametri sintetici.

### **6.1 La schematizzazione delle sezioni e i parametri di verifica**

Il modello richiede che vengano definite un certo numero di sezioni di calcolo su cui si andranno a calcolare i livelli idrici nelle diverse condizioni di portata.

A tale scopo si è ricostruito lo sviluppo di alcune sezioni trasversali del corso d'acqua utilizzando le informazioni cartografiche e di rilievo disponibili.

Nelle sezioni si è avuto cura di rilevare i seguenti elementi significativi:

- Quote del fondo alveo desunte dai rilievi;
- Quote delle aree golenali in base alla cartografia 1:10000;
- Quote e luci dei manufatti che interferiscono idraulicamente con l'evoluzione della piena.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno ci si è posti nell'ipotesi di regime misto e pertanto si è imposta una condizione di valle e una di monte.

La caratterizzazione delle resistenze idrauliche dell'alveo e delle aree limitrofe è stata pensata assumendo opportuni valori del coefficiente di Manning secondo quanto riportato in letteratura.

I coefficienti di scabrezza sono stati attribuiti a tratti omogenei d'alveo e di golena riconosciuti attraverso fotografie aeree e ricognizioni sul posto.

Le verifiche idrauliche degli attraversamenti principali, riportati nel seguente elenco:

- Opera VI03
- Opera VI04

I risultati delle modellazioni idrauliche in regime di moto permanente sono riportati in appendice alla relazione, contenente le planimetrie di riferimento per l'individuazione delle sezioni idrauliche, le



 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>LINEA CODOGNO-CREMONA-MANTOVA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO – PIADENA -MANTOVA</b> <b>LOTTO 03</b></p>					
<p><b>RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI MINORI FERROVIARI</b></p>	<p>COMMESSA NM25</p>	<p>LOTTO 03</p>	<p>CODIFICA D26</p>	<p>DOCUMENTO RIID0000002</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 24 di 56</p>

tabelle di output con le principali grandezze idrauliche riferite alle sezioni di calcolo, i profili e le sezioni idrauliche di riferimento.

<b>opera</b>	<b>"n" alveo</b>	<b>"n" golena</b>
VI03	0.03	0.035
VI04	0.03	0.035

### **6.1.1 Modello di calcolo HEC-RAS**

Per la verifica idraulica dei due attraversamenti è stato utilizzato il modello numerico HEC-RAS in quanto le dimensioni e la natura e la geometria dei corsi d'acqua intercettati è tale da essere studiata approfonditamente in funzione delle condizioni al contorno. Si rimanda agli allegati di calcolo per la descrizione completa del modello di calcolo utilizzato.

## 6.2 OPERA VI03

### 6.2.1 Descrizione ante operam

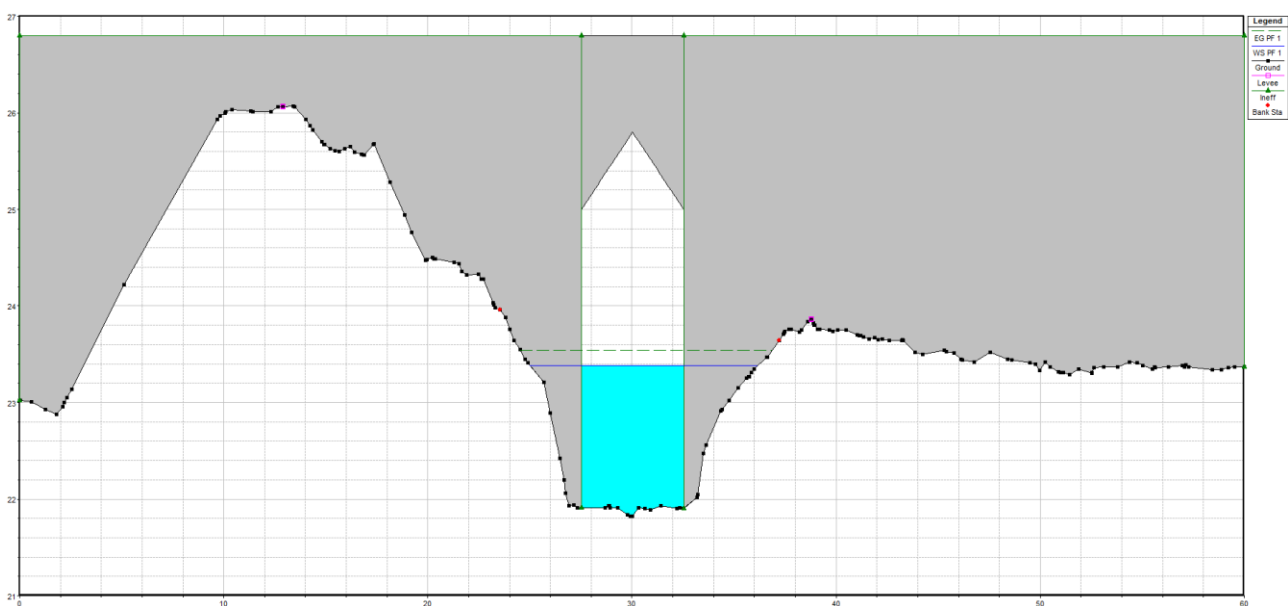
Attualmente l'opera è costituita da un ponticello ad arco in muratura che consente l'attraversamento del Canale Osone. Il manufatto verrà completamente demolito per consentire la realizzazione del nuovo ponte a doppia vasca in rispetto alle nuove normative vigenti.



**Figura 3 - Foto VI03 sopralluogo**

## 6.2.2 Risultati della simulazione idraulica ante operam TR 200 anni

Le simulazioni effettuate sono state effettuate partendo dalla ricostruzione della geometria dell'alveo mediante l'utilizzo della cartografia e del LiDar disponibili, le condizioni al contorno utilizzate per la simulazione sono state date in funzione della pendenza del canale cioè, conoscendo la quota di monte e la quota di valle della porzione di corso d'acqua simulato e la sua estensione si è potuta ricavare la pendenza di esso, nel caso in esame questa risulta essere pari al 0.21% in quanto la lunghezza dell'asta simulata è pari a 1820m. come portata simulata è stato utilizzato un valore pari  $12.94 \text{ m}^3/\text{s}$  come calcolato nel presente Progetto Definitivo. Il modello richiede, per poter simulare la tipologia di alveo e di golena, l'inserimento del coefficiente di scabrezza, che nel caso in esame sono pari a 0.030 in golena e 0.035 in alveo. Per poter simulare la presenza dell'impalcato nella sezione subito a monte e quella subito a valle dell'opera, sono state inserite delle Ineffective Flow Area per poter simulare la presenza dell'opera stessa. Di seguito si riporta lo stralcio planimetrico del canale modellato e la sezione idraulica in corrispondenza del ponte.



**Figura 4 - Simulazione Ante-Operam**

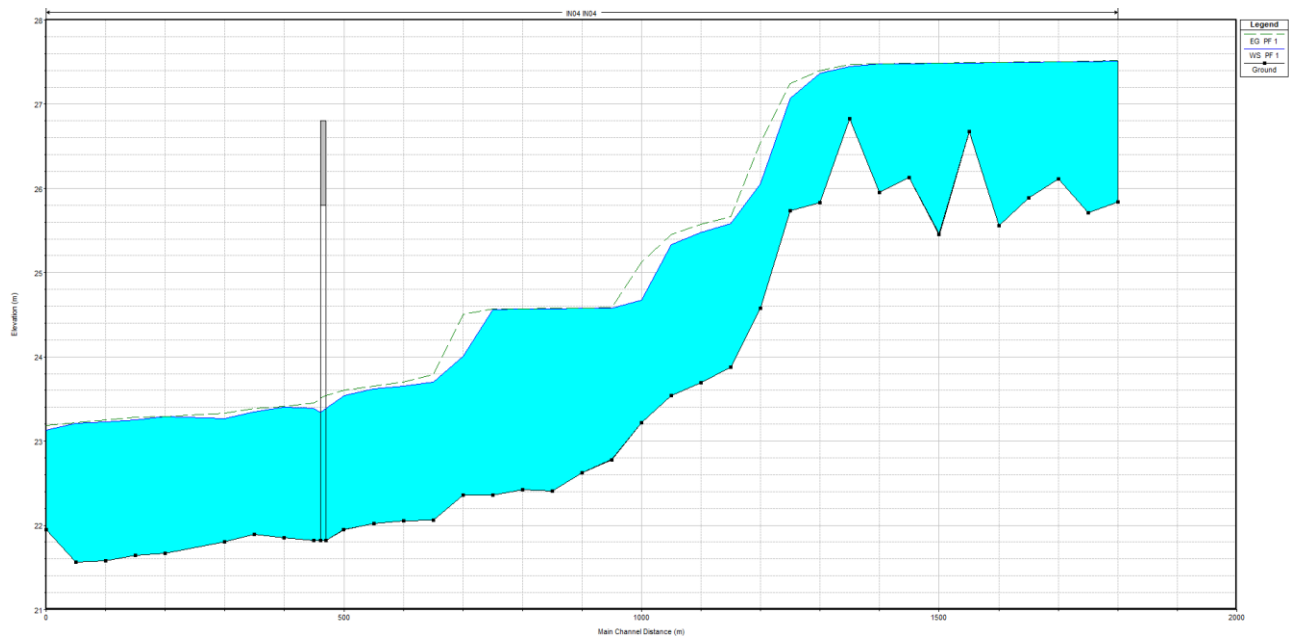
**RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI  
MINORI FERROVIARI**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NM25	03	D26	RIID0000002	A	27 di 56

La tabella 4 si riporta la quota fondo alveo (zf), il livello idrico (Qid), il livello energetico (Qe), il franco idraulico (Fid) ed il franco energetico (Fe). Le condizioni al contorno utilizzate per le simulazioni sono state la pendenza del canale e la portata avente tempo di ritorno pari a 200 anni calcolata con la metodologia descritta nell'elaborato Rif[01].

zf[m]	Qid[m]	Qe [m]	Fid[m]	Fe[m]
21.91	23.38	23.54	2.42	2.26

**Tabella 5 - Franchi ante-operam**

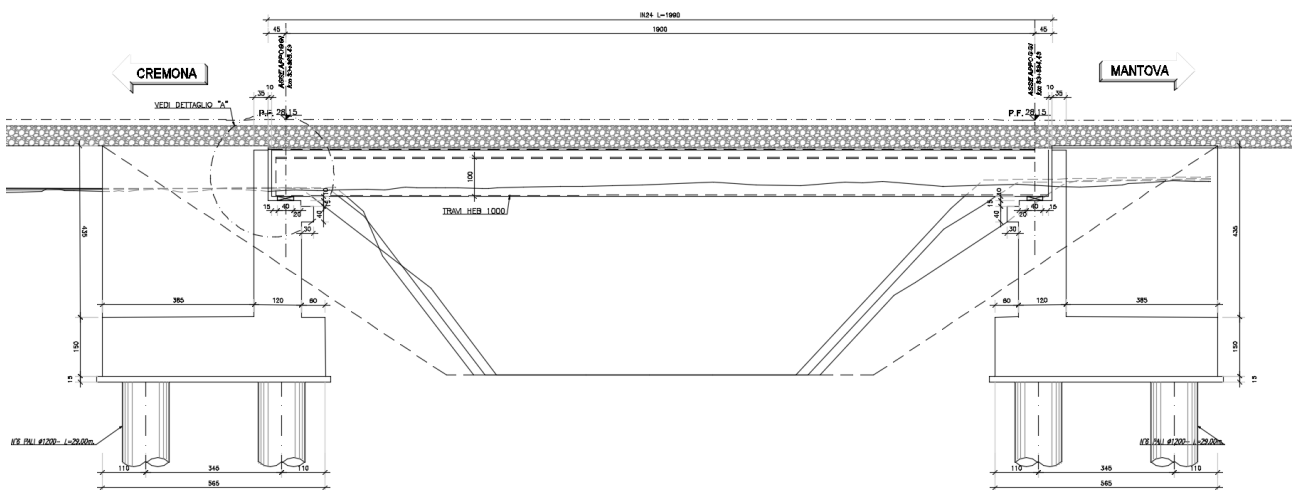


**Figura 5 - Profilo idrico ante operam Tr 200**

### 6.2.3 Descrizione della configurazione post operam

La configurazione di progetto prevede la costruzione di un nuovo attraversamento ferroviario per il raddoppio della linea di interesse.

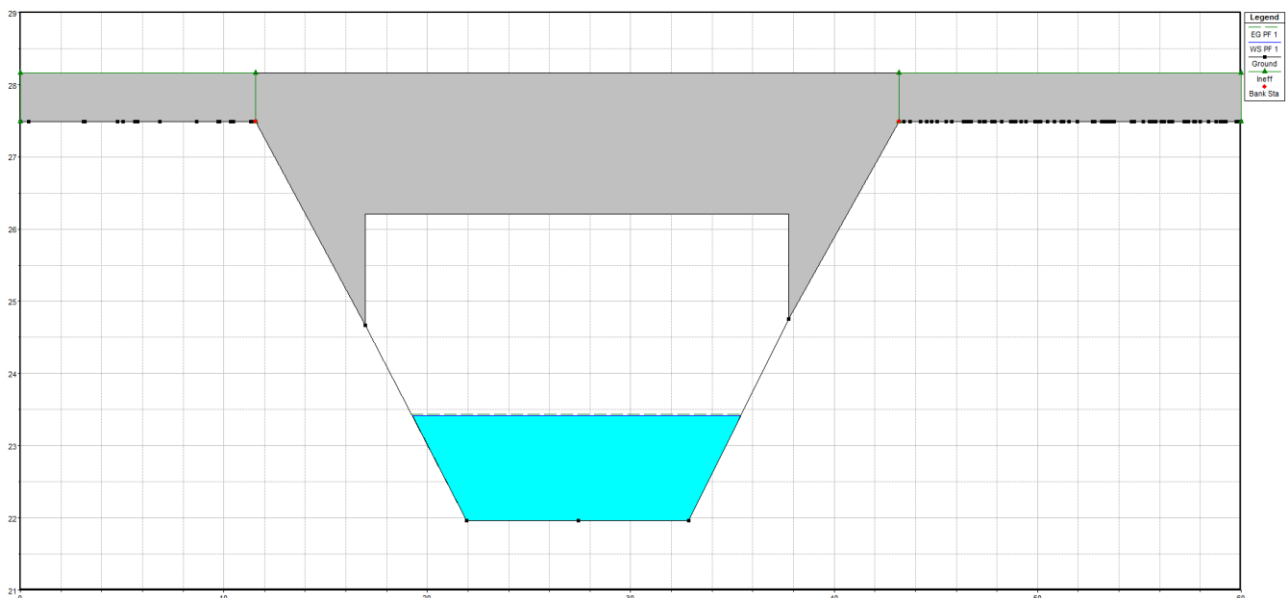
L'attraversamento di progetto è costituito da un ponte a doppia vasca semplicemente appoggiato senza la presenza di pile avente quota di intradosso pari a 26.21m s.m.m. In Figura 7 si riporta l'opera di progetto.



**Figura 6 – VI03**

## 6.2.4 Risultati della simulazione idraulica post operam TR 200 anni

Le simulazioni sono state effettuate partendo dalla ricostruzione della geometria dell'alveo mediante l'utilizzo della cartografia e del LiDAR disponibili, le condizioni al contorno utilizzate per la simulazione sono state date in funzione della pendenza del canale cioè, conoscendo la quota di monte e la quota di valle della porzione di corso d'acqua simulato e la sua estensione si è potuta ricavare la pendenza di esso, nel caso in esame questa risulta essere pari al 0.21% in quanto la lunghezza dell'asta simulata è pari a 1820m. come portata simulata è stato utilizzato un valore pari 12.94 m<sup>3</sup>/s come calcolato nel presente Progetto Definitivo. Il modello richiede, per poter simulare la tipologia di alveo e di golena, l'inserimento del coefficiente di scabrezza, che nel caso in esame sono pari a 0.030 in golena e 0.035 in alveo. Per poter simulare la presenza dell'impalcato nella sezione subito a monte e quella subito a valle dell'opera, sono state inserite delle Ineffective Flow Area per poter simulare la presenza dell'opera stessa. Di seguito si riporta lo stralcio planimetrico del canale modellato e la sezione idraulica in corrispondenza del ponte.



**Figura 7 - Simulazione Post-Operam**

Essendo la distanza tra fondo alveo e estradosso dell'opera inferiore a 6.00 metri si è valutata la possibilità di trasporto di alberi di alto fusto che potrebbero impattare sull'opera stessa. Analizzando

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>LINEA CODOGNO-CREMONA-MANTOVA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO – PIADENA -MANTOVA</b> <b>LOTTO 03</b></p>					
<p><b>RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI MINORI FERROVIARI</b></p>	<p>COMMESSA NM25</p>	<p>LOTTO 03</p>	<p>CODIFICA D26</p>	<p>DOCUMENTO RIID0000002</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 30 di 56</p>

il bacino di pertinenza dell’infrastruttura è emerso che tale possibilità non sussiste in quanto l’intero bacino è interessato da terreni agricoli privi di alberi ad alto fusto.

La tabella 6 riporta tutte le grandezze fondamentali del moto risultanti dalla simulazione, in particolare: la quota fondo alveo (zf), il livello idrico (Qid), il livello energetico (Qe), il franco idraulico (Fid) ed il franco energetico (Fe). Le condizioni al contorno utilizzate per le simulazioni sono state la pendenza del canale e la portata avente tempo di ritorno pari a 200 anni calcolata con la metodologia descritta nell’elaborato Rif[01].

zf[m]	Qid[m]	Qe [m]	Fid[m]	Fe[m]
21.26	23.41	23.44	2.80	2.77

**Tabella 6 – Franchi post operam**

In tabella 7 si riportano i risultati delle simulazioni individuando le grandezze fisiche di tutte le sezioni costruite.

**RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI  
MINORI FERROVIARI**

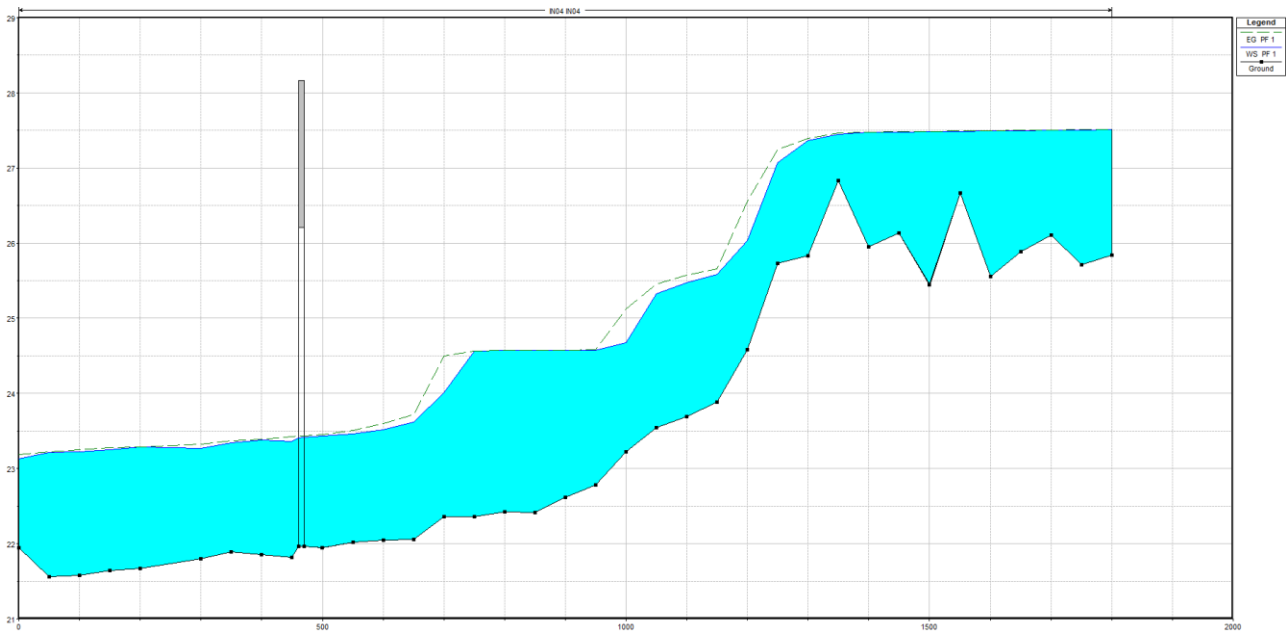
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NM25	03	D26	RIID0000002	A	31 di 56

Sezione	zf[m]	h [m]	hc [m]	H [m]	U [m/s]	Fr
1818	25.84	27.51	26.66	27.51	0.24	0.07
1768	25.71	27.51		27.51	0.34	0.1
1718	26.11	27.5		27.5	0.26	0.08
1668	25.89	27.5		27.5	0.31	0.1
1618	25.56	27.49		27.5	0.22	0.06
1568	26.67	27.49		27.49	0.22	0.08
1518	25.45	27.49		27.49	0.25	0.07
1468	26.13	27.48		27.48	0.34	0.1
1418	25.95	27.48		27.48	0.23	0.07
1368	26.83	27.45		27.47	0.71	0.32
1318	25.83	27.36		27.4	0.94	0.31
1268	25.73	27.07	27.07	27.24	1.99	0.76
1218	24.58	26.03	26.14	26.55	3.2	1.2
1169	23.88	25.58	24.92	25.66	1.25	0.38
1119	23.69	25.48		25.57	1.36	0.37
1069	23.54	25.33		25.45	1.57	0.47
1018	23.22	24.67	24.67	25.12	2.97	1
969	22.78	24.58	23.91	24.58	0.3	0.09
918	22.62	24.57		24.58	0.28	0.08
868	22.41	24.57		24.57	0.24	0.06
819	22.42	24.57		24.57	0.22	0.06
769	22.36	24.56		24.57	0.35	0.09
719	22.36	24.02	24.02	24.5	3.09	1
669	22.06	23.62	23.04	23.72	1.39	0.44
619	22.05	23.52		23.6	1.28	0.4
569	22.02	23.46		23.51	1.02	0.31
519	21.95	23.43		23.45	0.77	0.24
488	21.96	23.41	22.47	23.44	0.66	0.19
VI03	21.96	23.41		23.44	0.66	0.19
479	21.96	23.41		23.43	0.67	0.19
469	21.82	23.36		23.42	1.08	0.33
419	21.85	23.38		23.38	0.41	0.13
369	21.89	23.34		23.37	0.76	0.23
319	21.8	23.27		23.32	1.03	0.32
218	21.67	23.29		23.29	0.28	0.07
168	21.64	23.25		23.28	0.78	0.22
118	21.58	23.22		23.25	0.76	0.24
68	21.56	23.21		23.22	0.57	0.16
18	21.95	23.13	22.89	23.19	1.13	0.4

**Tabella 7 - Risultati simulazione post operam**



Nella figura seguente è riportato il profilo idrico di calcolo, unitamente ai profili del terreno, dell'energia, del tirante critico e quelli degli argini.



**Figura 8 - Profilo idrico post operam Tr 200**

La configurazione di progetto non peggiora le condizioni idrauliche attuali. È evidente il superamento dell'attraversamento ferroviario di progetto con un adeguato franco.

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>LINEA CODOGNO-CREMONA-MANTOVA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO – PIADENA -MANTOVA</b> <b>LOTTO 03</b></p>					
<p><b>RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI MINORI FERROVIARI</b></p>	<p>COMMESSA NM25</p>	<p>LOTTO 03</p>	<p>CODIFICA D26</p>	<p>DOCUMENTO RIID0000002</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 33 di 56</p>

### **6.3 OPERA VI04**

Alla progressiva 71+360 la linea ferroviaria di progetto interseca il Torrente Tartaro-Fabrezza. Quest'ultimo nasce presso la località Lame di Carpenedolo, alimentato dai numerosi fontanili della zona a nord di Castel Goffredo e confluisce dopo 35 km circa nell'Oglio a Marcaria, dopo aver attraversato il territorio dei comuni di Castel Goffredo, Casaloldo, Mariana, Redondesco.

Il Tartaro superata la linea ferroviaria, prosegue per circa 2,3 km e si getta nell'Oglio. Il suo efflusso nel ben noto Fiume è regolato attraverso una paratia che viene attivata e chiusa, quando il tirante nell'Oglio supera i livelli di guardia, per poter che l'apporto del Tartaro alimenti e aggravi la piena già in atto nell'Oglio.

La chiusura della paratia può protrarsi per lassi di tempo anche importanti (circa 48h), al fine di permettere l'esaurirsi dei fenomeni di piena nell'Oglio. Questa chiusura prolungata, non permettendo il deflusso dei volumi afferenti dal Canale Tartaro, causa dei fenomeni di esondazione che si originano dalla confluenza e si ripercuotono verso monte, sino ad arrivare all'attraversamento della linea ferroviaria.

L'area compresa tra la ferrovia e l'argine dell'Oglio, alla confluenza, ha una conformazione tale da creare un vero e proprio volume di invaso quando la paratia viene chiusa, fornendo da cassa di espansione per i volumi provenienti dal Tartaro. Risulta evidente quindi che i livelli idrici massimi attesi in quest'area sono si verificano certamente in concomitanza con questo fenomeno, ovvero la chiusura della paratia e l'accumulo del volume, piuttosto che in regime di deflusso libero anche per periodi di ritorno elevati, come i 200 anni richiesti da normativa.

Per questo attraversamento dunque sono state effettuate le seguenti simulazioni idrauliche:

- Simulazione monodimensionale ante operam e post operam (a paratia aperta)
- Studio volumetrico e simulazione bidimensionale post operam (a paratia chiusa)

### 6.3.1 Descrizione ante operam

Attualmente l'attraversamento è costituito da un ponticello ad arco



**Figura 9 - Foto opera IN24 sopralluogo**

Come per l'opera VI03, anche la VI04 verrà demolita e ricostruita secondo lo schema di progetto.

### 6.3.2 Risultati della simulazione idraulica ante operam TR 200 anni

Le simulazioni sono state effettuate partendo dalla ricostruzione della geometria dell'alveo mediante l'utilizzo della cartografia e del LiDar disponibili, le condizioni al contorno utilizzate per la simulazione sono state date in funzione della pendenza del canale cioè, conoscendo la quota di monte e la quota di valle della porzione di corso d'acqua simulato e la sua estensione si è potuta ricavare la pendenza di esso, nel caso in esame questa risulta essere pari al 0.30% in quanto la lunghezza dell'asta simulata è pari a 1500m. come portata simulata è stato utilizzato un valore pari  $61.64 \text{ m}^3/\text{s}$  come calcolato nel presente Progetto Definitivo. Il modello richiede, per poter simulare la tipologia di alveo e di golena, l'inserimento del coefficiente di scabrezza, che nel caso in esame sono pari a 0.030 in golena e 0.035 in alveo. Per poter simulare la presenza dell'impalcato nella sezione subito a monte e quella subito a valle dell'opera, sono state inserite delle Ineffective Flow Area per poter simulare la presenza dell'opera stessa. Di seguito si riporta lo stralcio planimetrico del canale modellato e la sezione idraulica in corrispondenza del ponte.

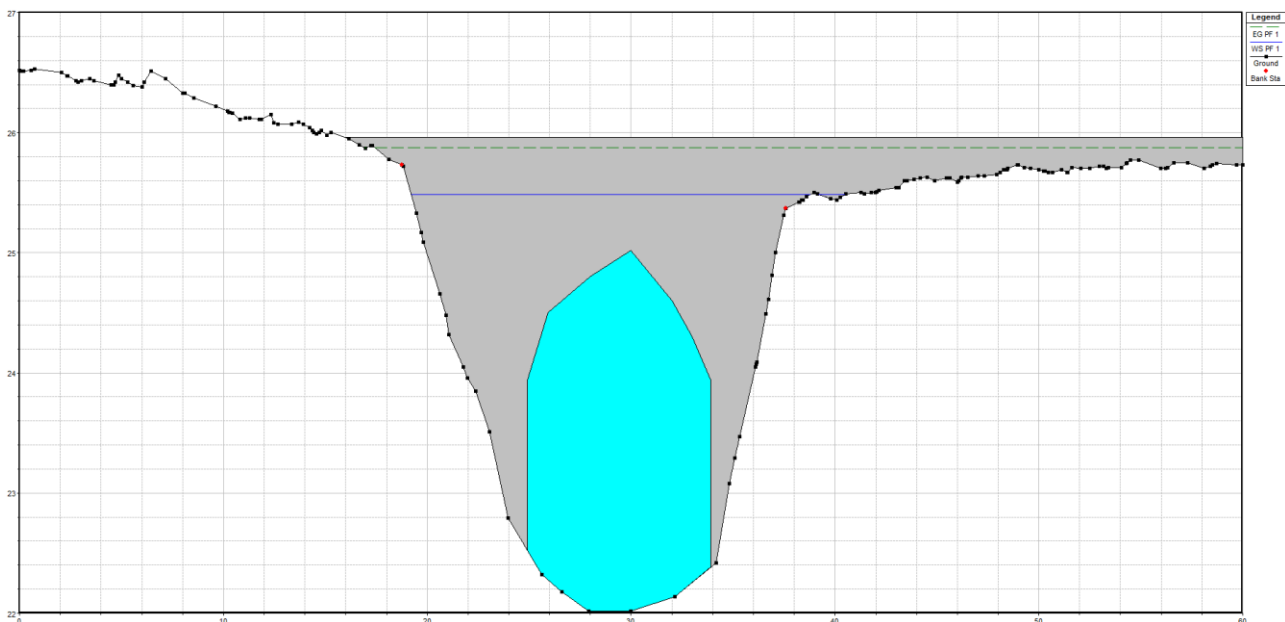


Figura 10 - Simulazione Ante-Operam

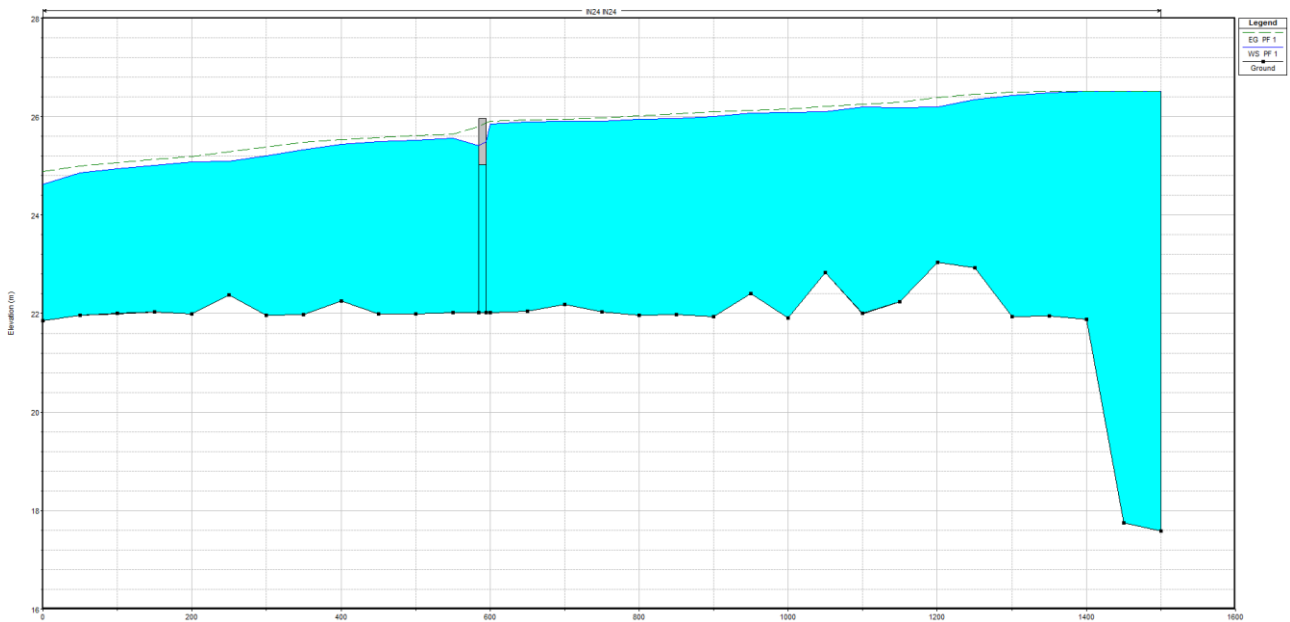
La tabella 8 si riporta la quota fondo alveo (zf), il livello idrico (Qid), il livello energetico (Qe), il franco idraulico (Fid) ed il franco energetico (Fe). Le condizioni al contorno utilizzate per le simulazioni sono state la pendenza del canale e la portata avente tempo di ritorno pari a 200 anni calcolata con la metodologia descritta nell'elaborato Rif[01].

**RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI  
MINORI FERROVIARI**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NM25	03	D26	RIID0000002	A	36 di 56

zf[m]	Qid[m]	Qe [m]	Fid[m]	Fe[m]
22.02	25.49	25.88	0.00	0.00

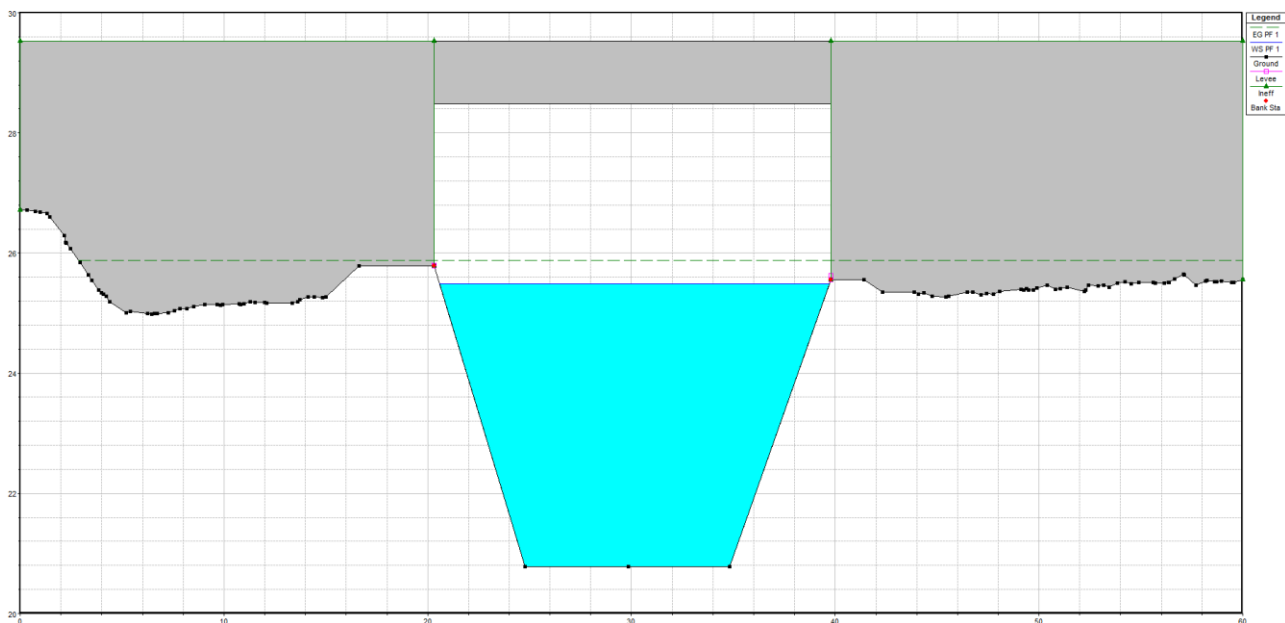
**Tabella 8 - Franchi ante operam**



**Figura 11 - Profilo idrico ante operam Tr 200**

### 6.3.3 Risultati della simulazione idraulica monodimensionale post operam TR 200 anni

Le simulazioni sono state effettuate partendo dalla ricostruzione della geometria dell'alveo mediante l'utilizzo della cartografia e del LiDar disponibili, le condizioni al contorno utilizzate per la simulazione sono state date in funzione della pendenza del canale cioè, conoscendo la quota di monte e la quota di valle della porzione di corso d'acqua simulato e la sua estensione si è potuta ricavare la pendenza di esso, nel caso in esame questa risulta essere pari al 0.21% in quanto la lunghezza dell'asta simulata è pari a 1820m. come portata simulata è stato utilizzato un valore pari  $61.64 \text{ m}^3/\text{s}$  come calcolato nel presente Progetto Definitivo. Il modello richiede, per poter simulare la tipologia di alveo e di golena, l'inserimento del coefficiente di scabrezza, che nel caso in esame sono pari a 0.030 in golena e 0.035 in alveo. Per poter simulare la presenza dell'impalcato nella sezione subito a monte e quella subito a valle dell'opera, sono state inserite delle Ineffective Flow Area per poter simulare la presenza dell'opera stessa. Di seguito si riporta lo stralcio planimetrico del canale modellato e la sezione idraulica in corrispondenza del ponte.



**Figura 12 - Simulazione Post-Operam**

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>LINEA CODOGNO-CREMONA-MANTOVA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO – PIADENA -MANTOVA</b> <b>LOTTO 03</b></p>					
<p><b>RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI MINORI FERROVIARI</b></p>	<p>COMMESSA NM25</p>	<p>LOTTO 03</p>	<p>CODIFICA D26</p>	<p>DOCUMENTO RIID0000002</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 38 di 56</p>

La tabella 7 si riporta la quota fondo alveo (zf), il livello idrico (Qid), il livello energetico (Qe), il franco idraulico (Fid) ed il franco energetico (Fe).

Essendo la distanza tra fondo alveo e estradosso dell'opera superiore a 6.00 metri (7.70m) no è stata analizzata la possibilità di trasporto di alberi di alto fusto che potrebbero impattare sull'opera stessa.

zf[m]	Qid[m]	Qe [m]	Fid[m]	Fe[m]
20.78	25.61	25.64	2.87	2.84

**Tabella 9 - Franchi**

La tabella seguente riporta tutte le grandezze fondamentali del moto risultanti dalla simulazione, in particolare: la quota del fondo (zf), la quota del pelo libero della corrente (h), il livello critico (hc) ed energetico (H), la velocità media della corrente (U) ed il numero di Froude (Fr). Il nome delle sezioni corrisponde a quello riportato negli elaborati grafici.

**RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI  
 MINORI FERROVIARI**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NM25	03	D26	RIID0000002	A	39 di 56

Sezione	zf [m]	h [m]	hc [m]	H [m]	U [m/s]	Fr
1476	17.58	26.41	18.28	26.41	0.13	0.01
1426	17.75	26.41		26.41	0.16	0.02
1376	21.88	26.4		26.41	0.4	0.06
1326	21.95	26.37		26.4	0.97	0.16
1276	21.94	26.31		26.39	1.3	0.22
1226	22.93	26.22		26.35	1.59	0.36
1176	23.04	26.03		26.25	2.07	0.45
1126	22.24	26		26.14	1.65	0.35
1076	22	26.03		26.08	1.07	0.22
1026	22.84	25.9		26.04	1.66	0.38
976	21.91	25.89		25.97	1.26	0.26
926	22.4	25.86		25.93	1.19	0.25
876	21.94	25.77		25.89	1.53	0.32
826	21.98	25.72		25.83	1.48	0.32
776	21.97	25.69		25.78	1.29	0.28
726	22.03	25.64		24	25.73	1.39
676	22.18	25.63	23.7	25.69	1.11	0.23
626	22.05	25.61		25.67	1.08	0.21
576	20.78	25.61	22.27	25.64	0.87	0.14
IN24	20.78	25.61		25.64	0.87	0.14
556	20.78	25.6	22.27	25.63	0.87	0.14
526	21.99	25.53		25.61	1.3	0.26
476	21.99	25.49	23.62	25.58	1.32	0.26
426	22.26	25.44		25.54	1.42	0.29
376	21.98	25.33		25.48	1.71	0.38
326	21.97	25.2		25.38	1.91	0.43
276	22.38	25.1		25.28	2	0.43
226	21.99	25.08		25.2	1.59	0.32
176	22.04	25.01	23.84	25.14	1.59	0.37
126	22	24.94		25.07	1.63	0.35
76	21.97	24.86		25	1.73	0.37
26	21.86	24.62		23.84	24.89	2.34

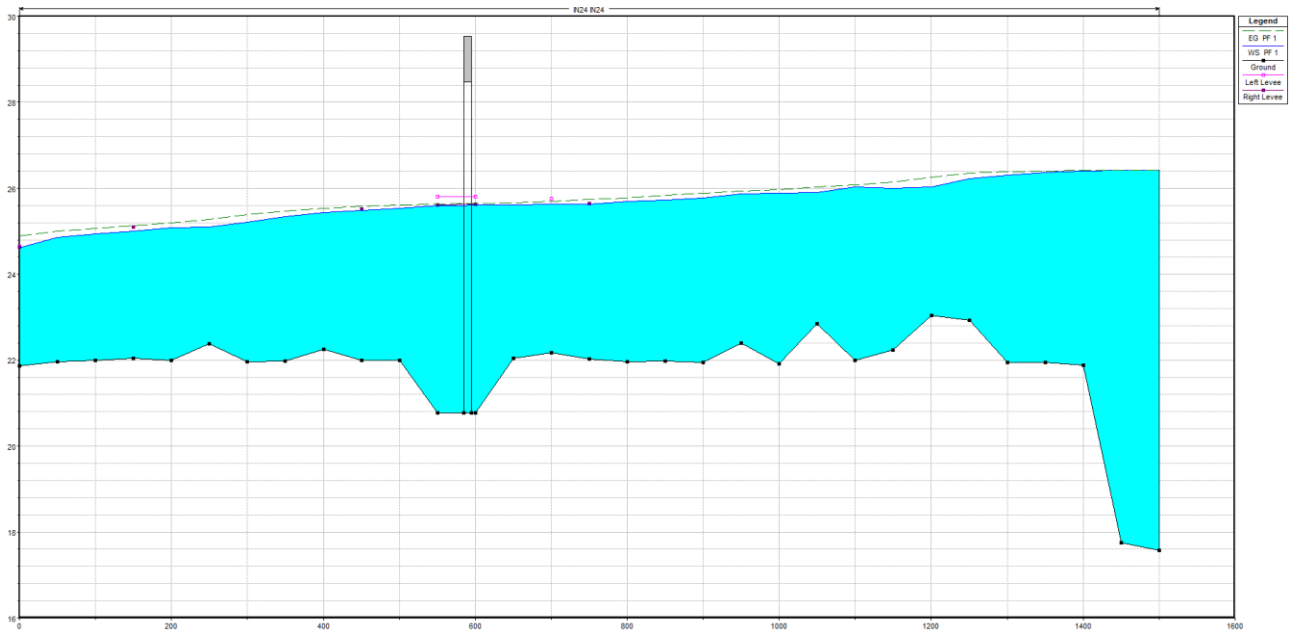
**Tabella 10 - Risultati simulazione post operam**



**RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI  
MINORI FERROVIARI**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NM25	03	D26	RIID0000002	A	40 di 56

Nella figura seguente è riportato il profilo idrico di calcolo, unitamente ai profili del terreno, dell'energia, del tirante critico e quelli degli argini.

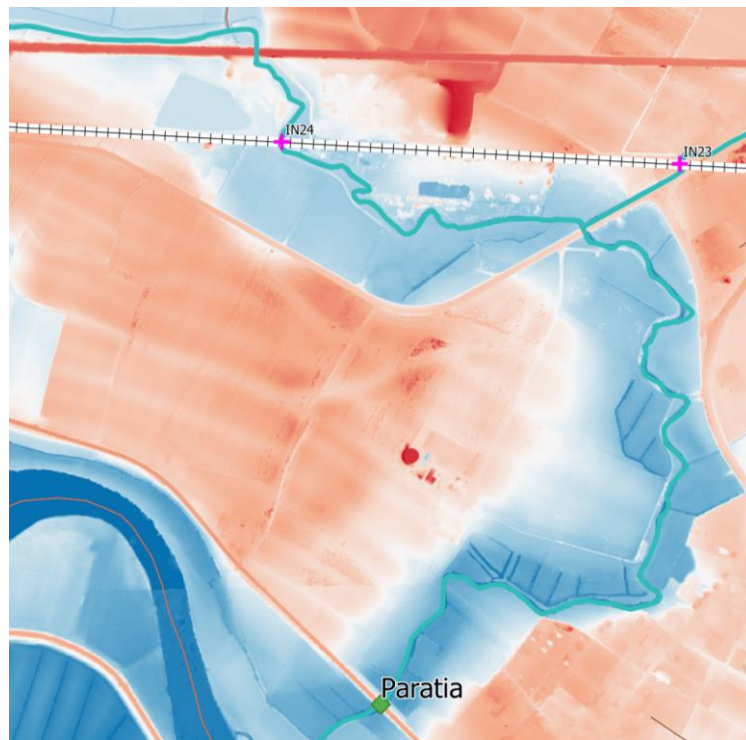


**Figura 13 - Profilo idrico post operam Tr 200**

### 6.3.4 Studio volumetrico e modello idraulico bidimensionale

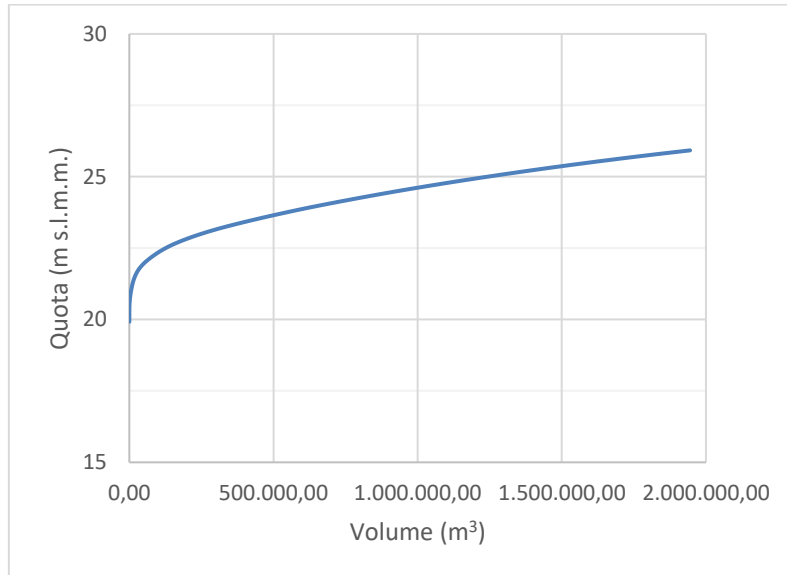
Dunque, per poter risalire ai massimi valori del tirante idrico che si possono verificare in corrispondenza dell'attraversamento ferroviario è stato condotto uno studio volumetrico sul bacino di invaso che si va a configurare quando la paratia sull'Oglio viene chiusa.

Nell'immagine seguente è possibile vedere a livello cromatico la depressione che va a fungere da volume di invaso in caso di paratia chiusa.



**Figura 14 - Livelli a paratia chiusa**

Studiando il succitato volume di invaso è stato possibile, dal rilievo lidar, estrapolare la relativa curva ipsografica, che viene riportata nella figura seguente.



**Figura 15 - Volumi di invaso**

Tramite questa curva, supponendo la conservazione della massa, è possibile correlare un valore di quota ad un valore di volume invasato. Questo studio è stato funzionale alla calibrazione del modello idraulico bidimensionale realizzato con il software HEC-RAS, che ha permesso di validare o di stimare in maniera più robusta i parametri adottati.

In particolare, è stato preso in considerazione l'evento meteorico avvenuto tra i giorni 25 e 28 novembre 2019, il quale è stato documentato da un sopralluogo effettuato e durante il quale è stato possibile apprezzare questo fenomeno esondativo, oltre che misurare il livello idrico raggiunto dal Torrente Fabrezza in corrispondenza della paratia sull'argine dell'Oglio



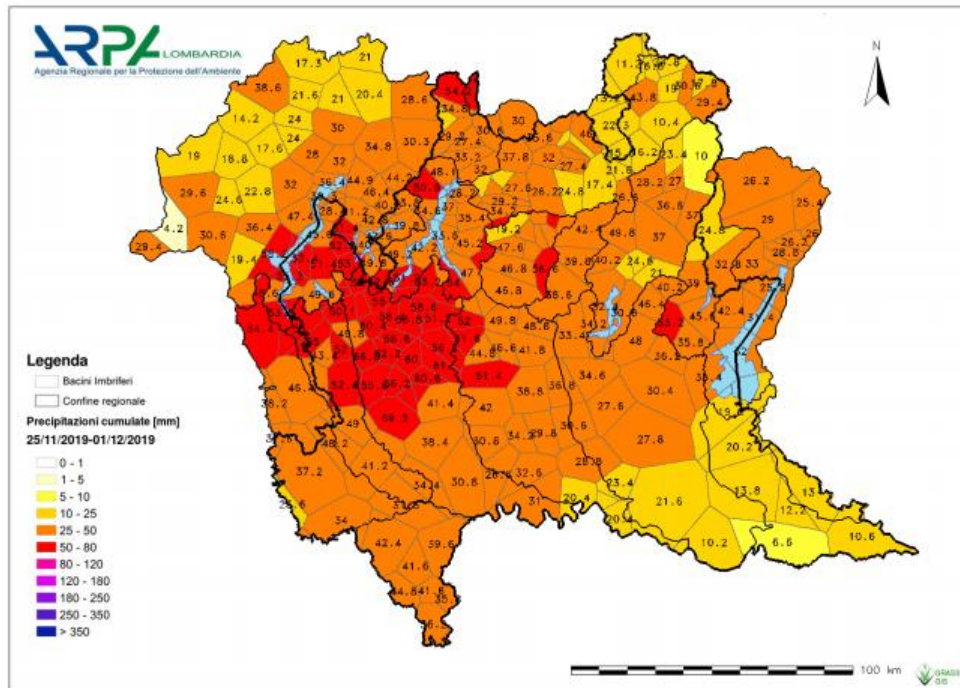
Data la fisica del problema, nel modello idraulico è stato considerato un idrogramma di progetto costante. Questa scelta è stata dettata dal fatto che si è interessati unicamente al massimo livello raggiunto dalla piena di progetto in corrispondenza dell'attraversamento e non dal transitorio del fenomeno.

La modellazione, come detto in precedenza, è stata effettuata in due condizioni, considerando l'evento meteorico verificatosi tra il 25 e il 28 novembre 2019 e considerando un evento meteorico con tempo di ritorno 200 anni.

**RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI  
MINORI FERROVIARI**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NM25	03	D26	RIID0000002	A	44 di 56

Nel primo caso è stato considerato un apporto meteorico pari a quello effettivamente caduto nei giorni, come riportato dal rapporto di evento dell'ARPA Lombardia relativo alla settimana 25nov-1dic 2019.



**Figura 16 - Mappa precipitazioni**

È stata effettuata dunque una simulazione idraulica (a paratia chiusa) considerando l'apporto meteorico totale dei relativi topopietri ed il risultato in termini di livello idrico alla paratia e di area di esondazione, è stato confrontato con quanto apprezzato durante il sopralluogo, ottenendo uno scenario comparabile.



**RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI  
MINORI FERROVIARI**

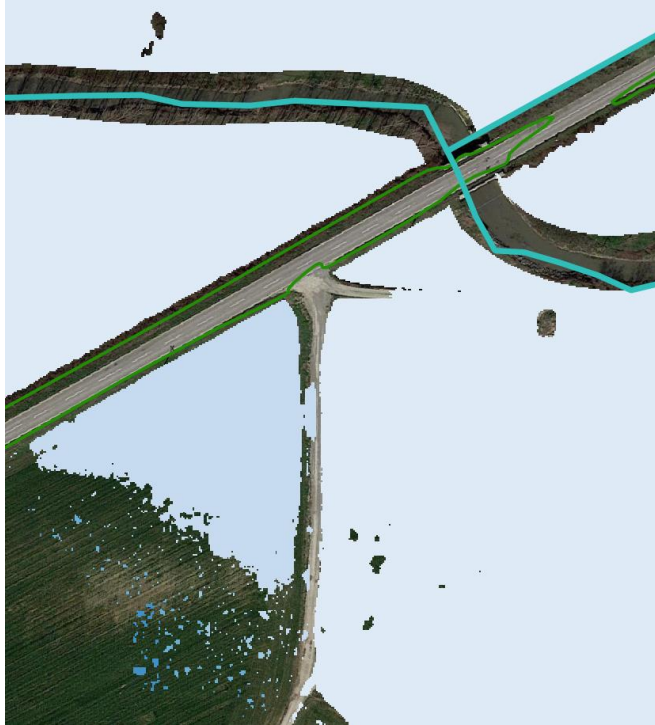
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NM25	03	D26	RIID0000002	A	45 di 56



**Figura 17 - Area di studio**

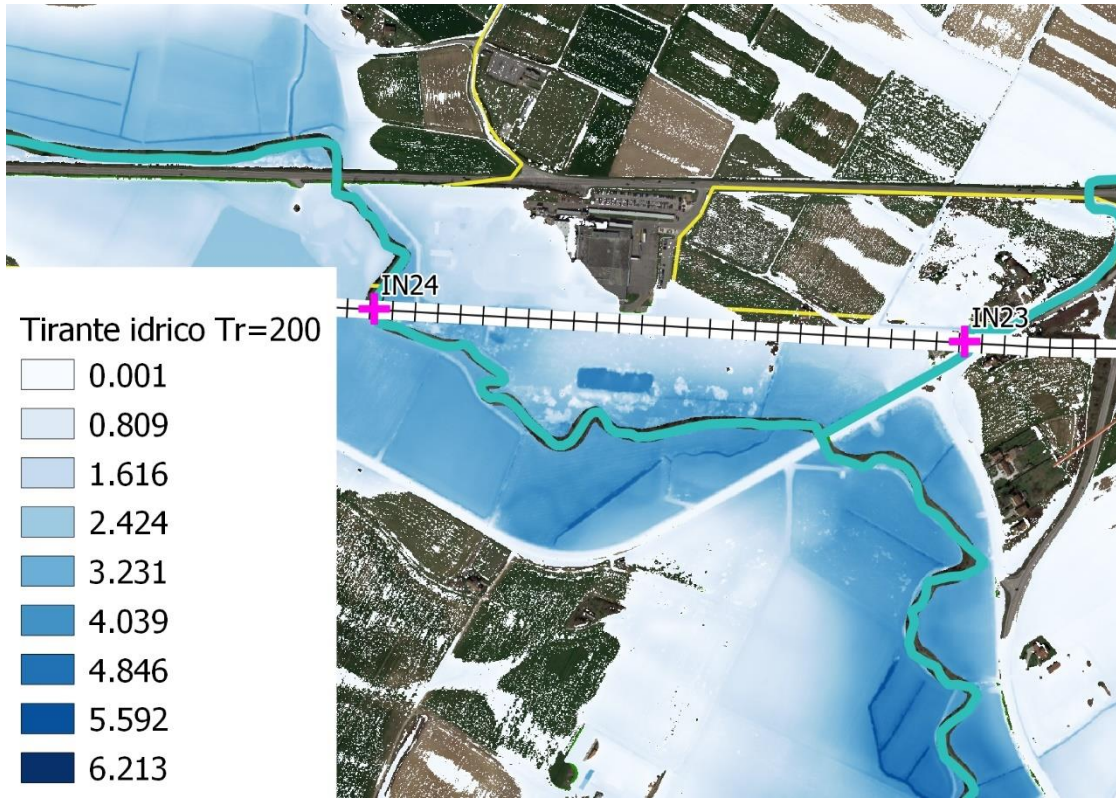
**RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI  
MINORI FERROVIARI**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NM25	03	D26	RIID0000002	A	46 di 56



Come è possibile notare nelle figure precedenti, che riportano l'area di esondazione modellata relativa all'evento meteorico in esame (per un'area adiacente al torrente a alla SP78), si nota che l'area di esondazione modellata ben approssima ciò che è stato rilevato in situ. Inoltre, alla paratia il modello idraulico presenta un livello pari a circa 24.5 m che coincide con quanto rilevato nel sopralluogo.

Di conseguenza il passo successivo è stato effettuare una simulazione di 48 h a paratia chiusa, con un evento meteorico con tempo di ritorno pari a 200 anni, la quale ha consentito di risalire al livello idrico corrispondente in corrispondenza dell'attraversamento ferroviario in oggetto ovvero **26.5 m**.



**Figura 18 - Tiranti Idrici**

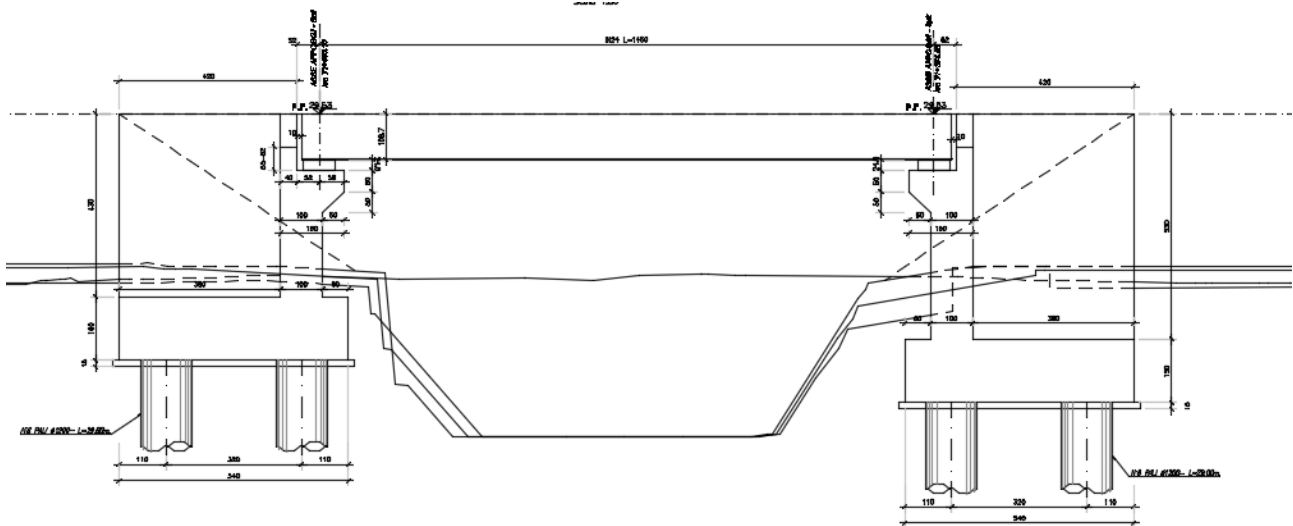
### 6.3.5 Descrizione della configurazione post operam

La configurazione di progetto prevede la costruzione di un nuovo attraversamento ferroviario per il raddoppio della linea di interesse.

L'attraversamento di progetto è costituito da un ponte avente quota di intradosso pari a 28.48m s.m.m.

In Figura 5 si riporta l'opera di progetto.





**Figura 19 - Opera VI04**

Inoltre, data l'ampia area di esondazione che si genera da i fenomeni sopra esposti, si sono previste delle opere a protezione del rilevato ferroviario in corrispondenza dell'area in esame. Nello specifico verranno posati dei materassi Reno dalla **PK 70+900** alla **PK 72+200**, fino ad una quota di **27 m**.

## **6.4 COMPATIBILITA' IDRAULICA**

Le opere in progetto fanno parte del progetto di Raddoppio della linea ferroviaria Codogno-Cremona-Mantova nel tratto Piadena – Mantova dal km 55+780 al km 89+731.83 – Lotto 3.

Nello studio effettuato è stata valutata la compatibilità idraulica dell'infrastruttura di progetto con il territorio ed è stata analizzata la sicurezza del corpo ferroviario, identificando in termini di funzionalità e sicurezza i manufatti di presidio idraulico più opportuni, garantendo la minima interferenza delle opere ferroviarie con il normale deflusso delle acque.

### **6.4.1 Sistemazioni idrauliche**

Gli interventi di sistemazione ripropongono la sagoma delle sezioni attuali d'alveo, e incidono solo limitatamente sulle pendenze longitudinali dei corsi d'acqua e dei canali irrigui interferiti.

Le sistemazioni idrauliche sono state progettate in generale con lo scopo di:

- assicurare con il periodo di ritorno previsto la sicurezza dell'infrastruttura ferroviaria;
- diminuire le eventuali condizioni di rischio, eliminando o riducendo eventuali esondazioni nella zona di intervento;
- non alterare le condizioni di deflusso idrico e solido nel tratto oggetto di studio;
- assicurarsi che l'evoluzione della livelletta del fosso, non approfondisca l'incisione esistente in corrispondenza dell'opera di attraversamento;
- impedire divagazioni che possano andare ad interessare le opere di fondazione delle pile o delle spalle;
- assicurarsi che l'evoluzione della livelletta d'alveo, non approfondisca l'incisione esistente in corrispondenza dell'opera di attraversamento;
- evitare le conseguenze derivanti dai fenomeni di erosione localizzata.

Particolari accorgimenti sono stati adottati per una corretta manutenzione delle opere, onde poter ridurre al minimo gli interventi atti a garantirne l'efficienza e, in ogni caso, a ridurre a livelli minimi i costi delle opere.

#### **6.4.2 Analisi di compatibilità idraulica**

Le soluzioni prescelte seguono gli indirizzi indicati nelle norme nazionali ed in quelle riportate nelle norme Regionali, in quanto:

- il potenziamento della infrastruttura ferroviaria in progetto risponde a specifiche esigenze di sviluppo ed è legata a fattori di pubblico interesse;
- le sistemazioni di progetto sui corsi d'acqua garantiscono la sicurezza dell'opera ferroviaria rendendo stabile il fondo dell'alveo e prevenendo eventuali dissesti da erosione;
- gli attraversamenti ferroviari in progetto sono trasparenti al corso d'acqua e non aumentano l'estensione delle aree soggette ad allagamento;
- I viadotti e le altre opere di attraversamento di progetto non provocano effetti sensibili di restringimento dell'alveo e di indirizzamento della corrente.

Nel caso in esame è stato effettuato uno studio in funzione delle mappe di pericolosità idraulica fornite dal PGRA e compatibili con le mappe di rischio del PAI valutando il volume sottratto all'area di

piena, come riportato in figura, nel caso in esame è risultato trascurabile il volume del rilevato ferroviario rispetto al volume di esondazione della piena in quanto l'area della nuova infrastruttura interessata dall'esondazione ha un volume trascurabile rispetto all'area di esondazione del Fiume Oglio di conseguenza risulta ininfluente all'area di esondazione del fiume, pertanto la configurazione finale di progetto risulta idraulicamente compatibile con le norme della legislazione vigente di protezione dai rischi idraulici e con la conformazione odierna dei luoghi.

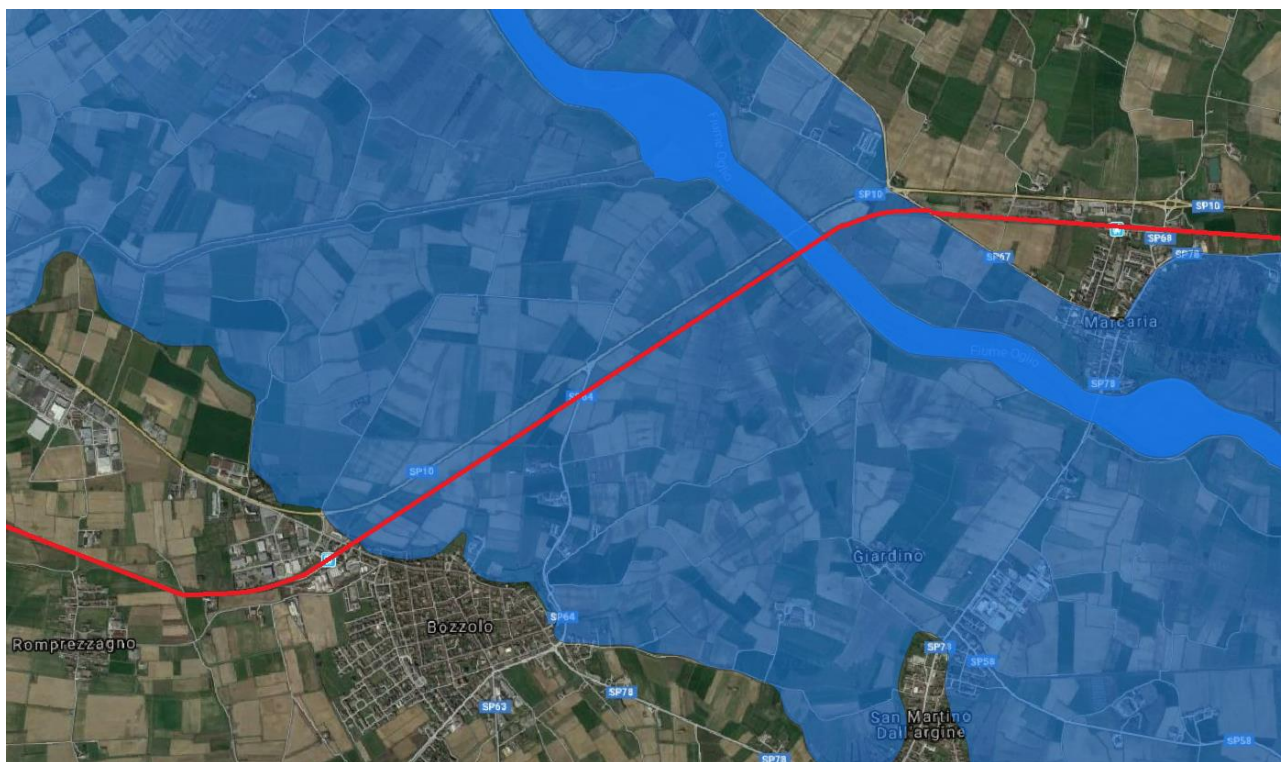


Figura 20 - Area di esondazione Fiume Oglio

In funzione delle norme Attuative del PAI che prevedono, all'interno delle Fasce A e B la realizzazione di opere pubbliche o di interesse pubblico, riferite a servizi essenziali non altrimenti localizzabili, a condizione che non modifichino i fenomeni idraulici naturali e le caratteristiche di particolare rilevanza naturale dell'ecosistema fluviale che possono aver luogo nelle fasce, che non costituiscano significativo ostacolo al deflusso e non limitino in modo significativo la capacità di invaso, e che non concorrano ad incrementare il carico insediativo.

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>LINEA CODOGNO-CREMONA-MANTOVA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO – PIADENA -MANTOVA</b> <b>LOTTO 03</b></p>					
<p><b>RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI MINORI FERROVIARI</b></p>	<p>COMMESSA NM25</p>	<p>LOTTO 03</p>	<p>CODIFICA D26</p>	<p>DOCUMENTO RIID0000002</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 51 di 56</p>

Per quanto riguarda il progetto in esame, l’infrastruttura prevista a tergo della linea storica, non comporta variazioni o riduzioni delle aree inondabili e che comunque garantisce la trasparenza idraulica mediante la realizzazione di nuovi tombini ed attraversamenti adeguati alle normative vigenti (NTC2018 e circolare 2019).

Alla luce delle suddette considerazioni, la configurazione finale di progetto risulta idraulicamente compatibile con le norme della legislazione vigente di protezione dai rischi idraulici e con la conformazione odierna dei luoghi.

## 7 Opere provvisionali

Nel Progetto Definitivo in esame sono previsti deviazioni di alcuni dei canali interferiti. Tali deviazioni verranno eseguite nei tratti dove la nuova linea si discosta dalla linea storica, di conseguenza i nuovi tombini idraulici verranno realizzati con una nuova configurazione rispetto a quelli attuali. Essendo opere di trasparenza idraulica atte a garantire la funzionalità di fossi irrigui regolamentati, per tali opere sarebbe opportuno che le fasi realizzative venissero effettuate durante i periodi di poco utilizzo per garantire la realizzazione dei nuovi tombini all’asciutto.

Per quanto riguarda la realizzazione delle opere di attraversamento fluviale, VI03 e VI04, si è provveduto al calcolo di una portata avente tempo di ritorno così definito:

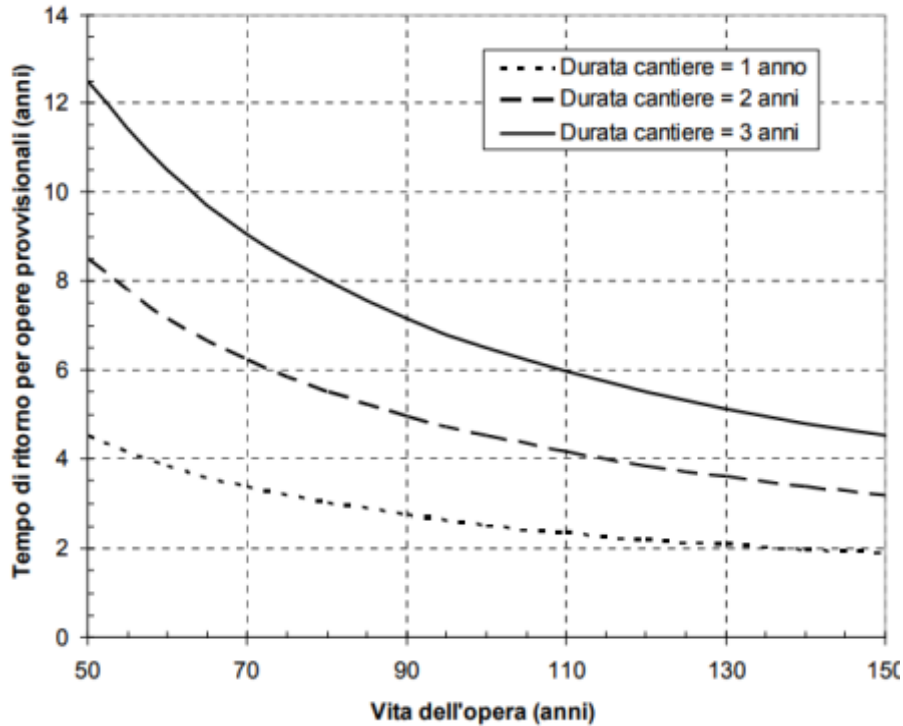
$$T_{pr} = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{1}{TR}\right)^{V/c}}$$

dove:

- $T_r$ =tempo di ritorno di progetto (anni);
- $V$ =durata dell’opera (anni);
- $c$ =durata di costruzione (anni);
- $T_{pr}$ =tempo di ritorno per la verifica di opere provvisionali (anni).

**RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI  
MINORI FERROVIARI**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NM25	03	D26	RIID0000002	A	52 di 56



Tr [anni]	V [anni]	C [anni]	Tpr [anni]
200	100	1.00	2.54

**Tabella 11 - tempo di ritorno cantiere**

Per ridurre i rischi dovuti ad inondazioni durante il periodo di cantiere, si sono stimate le portate con una durata del cantiere di circa 4 anni ed un tempo di ritorno di 9 anni approssimato a 10.

**RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI  
 MINORI FERROVIARI**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NM25	03	D26	RIID0000002	A	53 di 56

Q[m <sup>3</sup> /s]		
IN	SCS	Razionale
1	0.23	0.56
3	0.38	0.58
4	1.45	1.32
5	0.38	1.06
6	0.48	0.89
7	0.13	0.37
8	0.17	0.36
9	0.22	0.40
10	0.54	0.75
11	0.61	0.82
12	0.49	0.70
13	0.27	0.46
14	0.28	0.47
15	0.18	0.45
16	0.14	0.38
17	0.12	0.33
18	0.20	0.60
20	0.25	0.43
21	0.37	0.59
22	0.10	0.17
23	0.14	0.26
24	23.36	16.88
25	0.18	0.27
26	0.09	0.22

Q[m <sup>3</sup> /s]		
IN	SCS	Razionale
28	0.16	0.29
30	0.18	0.30
31	0.34	0.52
32	0.15	0.27
33	0.22	0.29
34	0.07	0.15
35	0.34	0.57
36	0.16	0.26
37	0.48	0.80
38	1.06	1.42
39	0.23	0.45
40	0.36	0.59
41	0.35	0.58
42	0.19	0.33
43	0.28	0.42
44	0.22	0.39
45	0.08	0.20
46	0.04	0.08
47	0.27	0.49
49	0.13	0.27
50	0.17	0.32
51	0.07	0.22
52	0.17	0.33
53	0.25	0.36

**Tabella 12 - portate Tr=10anni**

Come per il tempo di ritorno di progetto, anche in questo caso è stata utilizzata la portata più grande stimata con i due metodi.

**RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI  
MINORI FERROVIARI**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NM25	03	D26	RIID0000002	A	54 di 56

**ALLEGATI DI CALCOLO**

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>LINEA CODOGNO-CREMONA-MANTOVA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO – PIADENA -MANTOVA</b> <b>LOTTO 03</b></p>					
<p><b>RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI MINORI FERROVIARI</b></p>	<p>COMMESSA NM25</p>	<p>LOTTO 03</p>	<p>CODIFICA D26</p>	<p>DOCUMENTO RIID0000002</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 55 di 56</p>

### MODELLO HEC-RAS

HEC-RAS impiega lo "standard step method" per risolvere l'equazione di conservazione dell'energia in alvei a sezione variabile. Il programma quindi per approssimazioni successive determina l'altezza dell'acqua alla successiva sezione di calcolo. In generale la procedura è la seguente:

- a) la quota dell'acqua e la portata sono note alla sezione di inizio calcolo (sez. 1)
- b) si calcola l'energia della sezione sulla base dei dati a) e della geometria della sezione
- c) la geometria della sezione successiva (sez. 2) è nota insieme alla distanza tra le due sezioni
- d) si assume una quota dell'acqua alla successiva sezione 2 e se ne calcola il raggio idraulico e l'area sulla base della geometria della sezione stessa. Quindi si determina un valore medio della capacità di deflusso delle due sezioni. La capacità di deflusso di una sezione di un alveo è, per una determinata altezza d'acqua, la portata che può transitare nell'alveo con una pendenza piezometrica unitaria
- e) si calcola la perdita di carico ripartita sulla base del valore medio della capacità di deflusso, della lunghezza del tratto e della portata
- f) si calcola il carico cinetico pesato,  $\alpha V^2/2g$ , nella seconda sezione.
- g) si calcolano le ulteriori perdite di carico dovute alla contrazione ed all'allargamento della sezione sulla base di quanto determinato in f)
- h) si calcola la variazione della quota dell'acqua tra le due sezioni, come variazione della somma del carico cinetico e delle perdite di carico
- i) si calcola la quota dell'acqua nella seconda sezione come somma del primo livello idrico e delle variazioni di quota calcolata in h)
- j) si calcola l'errore tra il livello d'acqua nella sezione 2 assunto in d) e quello calcolato in i)
- k) se l'errore è minore di 1 cm la procedura è ripetuta per le sezioni successive dell'alveo, altrimenti è ripetuta per le stesse due sezioni ma con una nuova stima iniziale dell'altezza d'acqua nella sezione 2 (punto d)).



### *Coefficienti di scabrezza*

Il coefficiente di scabrezza in un alveo naturale rappresenta una misura globale della resistenza al moto della corrente, in cui si compendiano una molteplicità di fattori tra i quali la forma e la regolarità della sezione, la presenza quali-quantitativa di vegetazione e le caratteristiche litologiche del materiale d'alveo.

La sua determinazione deve quindi essere condotta con grande attenzione, valutando attentamente le caratteristiche specifiche dei materiali che compongono l'alveo e la copertura vegetale delle sponde e delle aree golenali adiacenti interessate al deflusso lungo tutto lo sviluppo dell'asta fluviale di interesse.

Nella pratica tecnica il valore numerico del coefficiente rappresentativo del termine di resistenza nell'equazione del moto può essere determinato facendo ricorso a relazioni e tabelle di natura sperimentale ampiamente disponibili in letteratura tecnica. Tali relazioni forniscono il valore del coefficiente di scabrezza sulla base di analogie delle caratteristiche morfologiche e vegetazionali dell'alveo di interesse ad una serie di situazioni tipiche dei corsi d'acqua naturali già investigate sperimentalmente.

### *Metodologia di verifica utilizzata*

Le simulazioni di calcolo sono state eseguite con il programma HEC RAS sviluppato dall'U.S. Army Corps of Engineers, che consente di verificare il moto di correnti a pelo libero in regime permanente e vario.

Attraverso una modellazione dell'alveo e dei principali manufatti presenti (ponti, scatolari e viadotti), l'applicazione consente di verificare i livelli idraulici raggiunti dalla corrente nelle sezioni introdotte nel modello e le principali grandezze idrauliche (velocità, numero di Froude ecc.), in modo da poter valutare i potenziali rischi connessi (vedi ad esempio i fenomeni di erosione localizzata intorno alle pile dei ponti) e di verificare il rispetto dei franchi di sicurezza previsti.

Le verifiche sono state eseguite in condizioni di moto permanente.

L'equazione del moto può essere scritta nella forma:

$$-\frac{dH}{ds} = \frac{\tau_0}{\gamma R} = j$$

per quanto riguarda la cadente  $j$  del carico totale, si valuta con le espressioni consigliate per il calcolo della perdita di carico nel moto uniforme, assumendo che gli sforzi tangenziali sul contorno dipendano solo dalle condizioni della parete, dalla forma della sezione e dalla velocità media. Si pone così:

$$j = \frac{U^2}{\chi^2 R} \text{ equazione di Chezy}$$

con:

$$\chi = \frac{1}{n} R^{1/6} \text{ espressione di Manning}$$

Il modello di HEC RAS utilizza le seguenti relazioni, integrando le equazioni precedenti rispetto due sezioni idrauliche successive:

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

dove:

- $Y_1$  e  $Y_2$  = altezza d'acqua nelle sezioni 1 e 2;
- $Z_1$  e  $Z_2$  = quota del fondo del canale;
- $V_1$  e  $V_2$  = velocità medie (portata totale/ area di flusso totale);
- $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  = coefficiente di Coriolis, correttivo della velocità;
- $g$  = accelerazione gravitazionale;
- $h_e$  = perdita di carico tra la sezione 2 e la 1.3

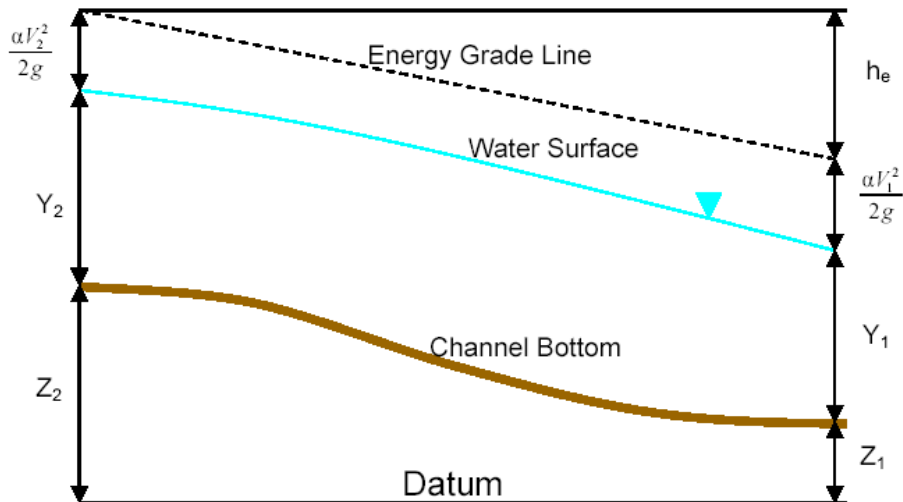


Figura 21 - Rappresentazione dei termini dell'equazione dell'energia

La perdita di carico  $h_e$  è comprensiva dei termini dovuti all'attrito ed alla contrazione ed espansione della sezione. L'equazione per la perdita di carico è la seguente:

$$h_e = L \overline{S_f} + C \left[ \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right]$$

essendo:

- $S_f$  = pendenza media tra le due sezioni
- C = coefficiente di espansione o di contrazione
- L = lunghezza equivalente calcolata come:

**RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI  
MINORI FERROVIARI**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NM25	03	D26	RIID0000002	A	59 di 56

$$L = \frac{L_{lob} \overline{Q_{lob}} + L_{ch} \overline{Q_{ch}} + L_{rob} \overline{Q_{rob}}}{\overline{Q_{lob}} + \overline{Q_{ch}} + \overline{Q_{rob}}}$$

dove:

$L_{lob}$ ,  $L_{ch}$ ,  $L_{rob}$  = distanza tra le sezioni espressa per il flusso rispettivamente in golena sinistra, nel canale principale, in golena destra

$Q_{lob}$ ,  $Q_{ch}$ ,  $Q_{rob}$  = media aritmetica della portata tra le sezioni rispettivamente in golena sinistra, nel canale principale, in golena destra.