

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE



DIREZIONE TECNICA

U.O. OPERE CIVILI E GESTIONE DELLE VARIANTI

PROGETTO DEFINITIVO

ITINERARIO NAPOLI – BARI
RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA
II LOTTO FUNZIONALE HIRPINIA – ORSARA

RELAZIONE IDRAULICA
MODELLO BIDIMENSIONALE DEL TORRENTE CERVARO

SCALA:

-

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

IF1V 02 D 09 RI ID0002 001 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	EMISSIONE ESECUTIVA	C Cesali	Set.2018	F. Cabas	Set.2018	D. Aprea	Set.2018	A. Vittozzi 18

ITALFERR S.p.A.
U.O. Opere Civili e Gestione delle Varianti
Dott. Ing. Angelo Vittozzi
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
N° 420783

INDICE

1	PREMESSA	5
2	INQUADRAMENTO GENERALE E OBIETTIVO DELLO STUDIO.....	6
2.1	PERICOLOSITÀ IDRAULICA NELL'AREA DI STUDIO.....	6
2.2	OBIETTIVI DELLO STUDIO IDRAULICO	9
3	DATI DI BASE.....	10
3.1	RILIEVI TOPOGRAFICI E OPERE ESISTENTI	10
3.2	OPERA IN PROGETTO – VIADOTTO VI01.....	11
4	IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO IDRAULICO	12
4.1	MODELLAZIONE BIDIMENSIONALE.....	13
4.2	GEOMETRIA DEL MODELLO.....	ERRORE. IL SEGNALIBRO NON È DEFINITO.
4.3	SCABREZZE.....	18
4.4	CONDIZIONI AL CONTORNO	19
4.5	SCENARI SIMULATI.....	ERRORE. IL SEGNALIBRO NON È DEFINITO.
5	RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE	21
5.1	SCENARIO ANTE OPERAM E CONFRONTO CON STUDIO DELL'ADB PUGLIA	21
5.2	SCENARIO POST OPERAM E CONFRONTO CON SCENARIO ANTE OPERAM	21
5.3	VERIFICA DEL FRANCO DI PROGETTO	26
5.4	EVENTO DI PIENA DI CANTIERE	26
6	SISTEMAZIONI IDRAULICHE.....	30
6.1	VERIFICA ALLO SCALZAMENTO.....	30
6.1.1	<i>Metodo di calcolo dello scalzamento</i>	<i>31</i>
6.2	VERIFICA DELL'EROSIONE DELL'ALVEO.....	35
6.2.1	<i>Metodo di calcolo della Federal Highway Administration (FHWA).....</i>	<i>35</i>

6.2.2	Definizione delle opere di protezione	36
7	VALUTAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA.....	37
8	BIBLIOGRAFIA.....	38

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Inquadramento geografico della zona in esame con evidenziata la linea ferroviaria e l'intersezione con il T. Cervaro.	7
Figura 2 - Inquadramento su ortofoto del T. Cervaro alla sezione in cui è prevista la realizzazione del viadotto (tratteggiato verde).	8
Figura 3 – Torrente Cervaro e linea ferroviaria in progetto: aree a pericolosità idraulica PAI – Regione Puglia.	8
Figura 4 – Torrente Cervaro: aree a pericolosità idraulica Tr 200 (ciano) e Tr 500 (blu), fonte: Studio Idraulico 2013 – ADB Puglia.....	9
Figura 5 – Torrente Cervaro: sezioni idrauliche rilevate (in rosso).	11
Figura 6 – Prospetto (Pile 3 – Spalla A) del viadotto in progetto sul T. Cervaro.	11
Figura 7 – Stralcio planimetrico del viadotto in progetto sul Torrente Cervaro.	12
Figura 8 – Software Hec Ras 5.0.5: sistema di riferimento.....	15
Figura 9 – Software Hec Ras 5.0.4: in grigio il dato della griglia DTM, in rosso la cella di calcolo del modello idraulico. A destra la schematizzazione effettuata da Ras sulle facce del bordo della cella.	16
Figura 10 – Estensione del tratto di studio del T. Cervaro, nel modello idraulico 2D.	17
Figura 11 – Modello idraulico 2D del T Cervaro: implementazione del viadotto VI01.	18
Figura 11 –Modello idraulico 2D del T. Cervaro: Coefficiente di Manning, n, per le aree inondabili, esterne all'alveo inciso (CLC, 2012).	19
Figura 12 – Idrogrammi di piena del T. Cervaro, alla sezione di interesse, per diversi tempi di ritorno.	20
Figura 13 – Aree di esondazione (Tr 500 anni) del Torrente Cervaro: confronto con i risultati dell'ADB Puglia.	21
Figura 14 – Aree di allagamento ante operam (in alto) e post operam (in basso) per TR 30 anni.	22
Figura 15 – Aree di allagamento ante operam (in alto) e post operam (in basso) per TR 200 anni.	23
Figura 21 – Aree di allagamento ante operam (in alto) e post operam (in basso) per TR 300 anni.	24
Figura 21 – Aree di allagamento ante operam (in alto) e post operam (in basso) per TR 500 anni.	25
Figura 18 – T. Cervaro e T. Acquara: idrogrammi di piena per Tr 10 anni.	27
Figura 18 – T. Cervaro e T. Acquara: risultati modellazione idraulica Tr 10 anni (scenario "di cantiere").	28
Figura 23 – Schematizzazione delle turbolenze e dello scavo nell'intorno di una pila circolare isolata.	30
Figura 26 – Differenti tipologie di pile non uniformi dotate di fondazioni.	33

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1. Tabella dei valori del coefficiente di scabrezza sulle aree 2D (Pestana et al. 2013).	19
Tabella 2 – Verifica del franco idraulico del viadotto VI01 secondo le indicazioni di normativa e regolamenti di progettazione vigenti.....	26
Tabella 3 – Calcolo dello scalzamento: valori delle variabili idrauliche e dimensioni delle pile e delle relative fondazioni.	32



ITINERARIO NAPOLI – BARI
RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA
II LOTTO FUNZIONALE HIRPINIA - ORSARA
PROGETTO DEFINITIVO

RELAZIONE IDRAULICA: MODELLO 2D CERVARO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IF1V	02 D 09	RI	ID0002 001	A	4 di 38

Tabella 4 – Valori di scalzamento in corrispondenza delle pile P1 e P2.....34

1 **PREMESSA**

La presente relazione idraulica è parte integrante della progettazione definitiva del Raddoppio della Tratta Apice-Orsara – II° Lotto Funzionale Hirpinia-Orsara, nell’ambito dell’Itinerario Napoli-Bari, oggetto di approfondimenti tecnico-progettuali sul progetto preliminare. Il suddetto progetto prevede la realizzazione di un viadotto (VI01) sul Torrente Cervaro.

Nel presente documento vengono illustrate le simulazioni idrauliche, condotte secondo un modello bidimensionale, finalizzate alla verifica del comportamento ante operam e post operam del corso d’acqua nel tratto in corrispondenza dell’attraversamento, con riferimento alle piene di progetto.

È stata inoltre effettuata la simulazione dello scenario di cantiere, mediante la quale sono stati ricavati i paramenti idraulici per garantire la sicurezza durante le fasi di costruzione dell’opera in progetto.

Sono, infine, illustrate le elaborazioni condotte per il dimensionamento delle opere per la sistemazione dell’alveo in corrispondenza dell’attraversamento (scogliere a massi) nonché le verifiche allo scalzamento in corrispondenza delle pile del viadotto interessate dalle piene di progetto.

Elaborati Annessi

IF1V02D09RIID0001001A – Relazione idrologica

IF1V02D09P4ID0002001A – Stralcio del P.A.I.: Torrente Cervaro

IF1V02D09C3ID0001001A – Corografia dei bacini idrografici

IF1V02D09P6ID0002001A – Planimetria livelli idrici ante operam Tr 30 e Tr 200

IF1V02D09P6ID0002002A – Planimetria livelli idrici ante operam Tr 300 e Tr 500

IF1V02D09P6ID0002003A – Planimetria valori di velocità ante operam Tr 30 e Tr 200

IF1V02D09P6ID0002004A – Planimetria valori di velocità ante operam Tr 300 e Tr 500

IF1V02D09P6ID0002005A – Planimetria livelli idrici post operam Tr 30 e Tr 200

IF1V02D09P6ID0002006A – Planimetria livelli idrici post operam Tr 300 e Tr 500

IF1V02D09P6ID0002007A – Planimetria valori di velocità post operam Tr 30 e Tr 200

IF1V02D09P6ID0002008A – Planimetria valori di velocità post operam Tr 300 e Tr 500

	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA II LOTTO FUNZIONALE HIRPINIA - ORSARA PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDRAULICA: MODELLO 2D CERVARO	COMMESSA IF1V	LOTTO 02 D 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 6 di 38

IF1V02D09F7ID0002001A – Profili di rigurgito ante e post operam Tr 30 e Tr 200

IF1V02D09F7ID0002002A – Profili di rigurgito ante e post operam Tr 300 e Tr 500

IF1V02D09W9ID0002001A – Sezioni con livelli idrici del T. Cervaro ante e post operam Tr 30 e Tr 200

IF1V02D09W9ID0002002A – Sezioni con livelli idrici del T. Cervaro ante e post operam Tr 300 e Tr 500

IF1V02D09P7ID0002001A – Planimetria sistemazione idraulica del T. Cervaro – viadotto VI01

IF1V02D09PZID0002001A – Tipologico sistemazione idraulica del T. Cervaro

IF1V02D09WZID0002001A – Sezioni sistemazione idraulica del T. Cervaro – viadotto VI01

2 INQUADRAMENTO GENERALE E OBIETTIVO DELLO STUDIO

2.1 Pericolosità idraulica nell'area di studio

La tratta ferroviaria Hirpinia – Orsara (da pk 40+889 a pk 68+953) si sviluppa (in galleria) quasi interamente nella Regione Campania, eccetto un breve tratto iniziale, comprendente l'opera di attraversamento sul T. Cervaro, che ricade nella Regione Puglia. In particolare il viadotto in progetto sul Torrente Cervaro è situato alle progressive 41+114.64 ÷ 41+428.29 km, in prossimità del confine regionale (Figura 1).

Il Torrente Cervaro nasce dal monte Le Felci (853 m di quota) presso Monteleone di Puglia, si immette in provincia di Avellino e rientra in quella di Foggia fra Panni e Montaguto; incanalato nell'ultimo tratto, prende il nome di canale Cervaro Nuovo e sfocia, dopo circa 80 km di percorso, nel golfo di Manfredonia, mentre due rami si immettono nelle vasche di colmata del Cervaro. Costeggiato, da Radogna a Stradola, dalla SS 90, riceve a sinistra il torrente Lavella e il torrente Sannoro, a destra il torrente Bilera. Il bacino idrografico, chiuso in prossimità del viadotto in progetto, ricopre un'area di 205 km². L'inquadramento geografico, morfologico e idrografico del bacino è riportato nell'Elaborato progettuale annesso IF1V02D09RIID0001001A – *Relazione idrologica*.

In Figura 2 è riportato un inquadramento su ortofoto del tratto del Torrente Cervaro in corrispondenza della sezione di attraversamento della linea ferroviaria, mentre in Figura 3 è riportato uno stralcio dell'elaborato di progetto IF1V02D09P4ID0002001A – *Stralcio del P.A.I.: Torrente Cervaro*. La zona in corrispondenza dell'attraversamento in progetto (Viadotto VI01, dal km 41+122,68 al km 41+442,68) non è classificata come area a pericolosità idraulica, secondo il P.A.I. della Regione Puglia; soltanto le aree, in prossimità del corso d'acqua,

ricomprese tra le progressive 38+600 e 30+800 (ad una distanza di circa 3 km, a valle, della sezione di attraversamento), sono classificate come aree a pericolosità “alta”.

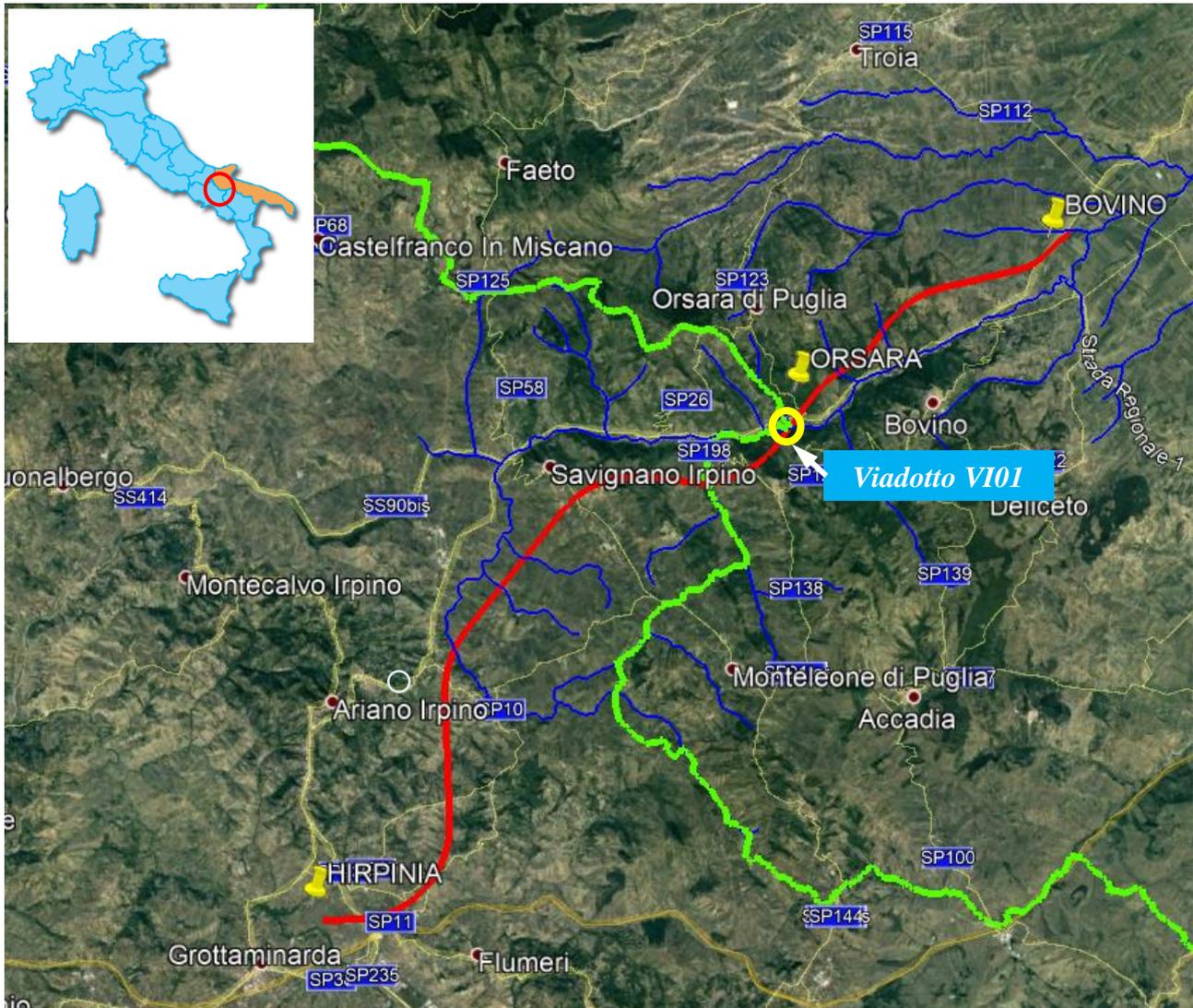


Figura 1 - Inquadramento geografico della zona in esame con evidenziata la linea ferroviaria e l'intersezione con il T. Cervaro.

Tuttavia, con riferimento al recente studio idraulico condotto dall'Autorità di Bacino della Regione Puglia nell'ambito del P.O. FESR 2007-2013 (“Studio per la definizione delle opere necessarie per la messa in sicurezza del reticolo idrografico pugliese”), l'area di intervento risulta interessata dalle esondazioni delle piene Tr 200 e Tr 500 del Torrente Cervaro (Figura 4).

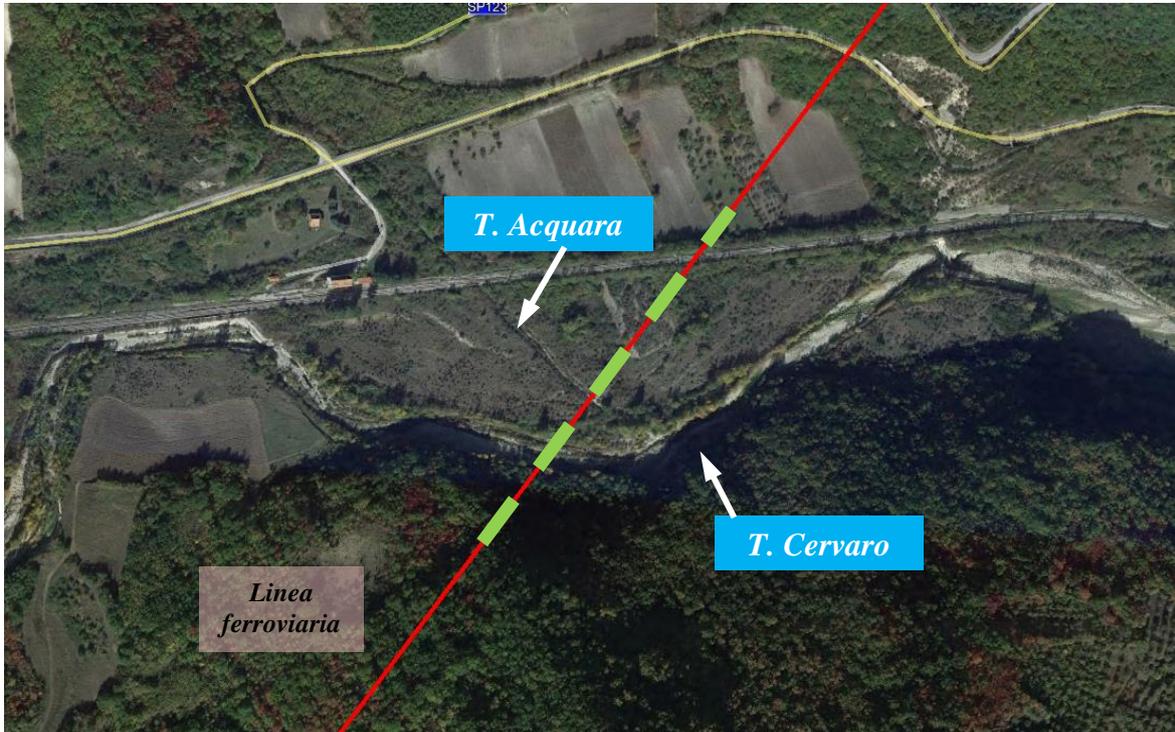


Figura 2 - Inquadramento su ortofoto del T. Cervaro alla sezione in cui è prevista la realizzazione del viadotto (tratteggio verde).

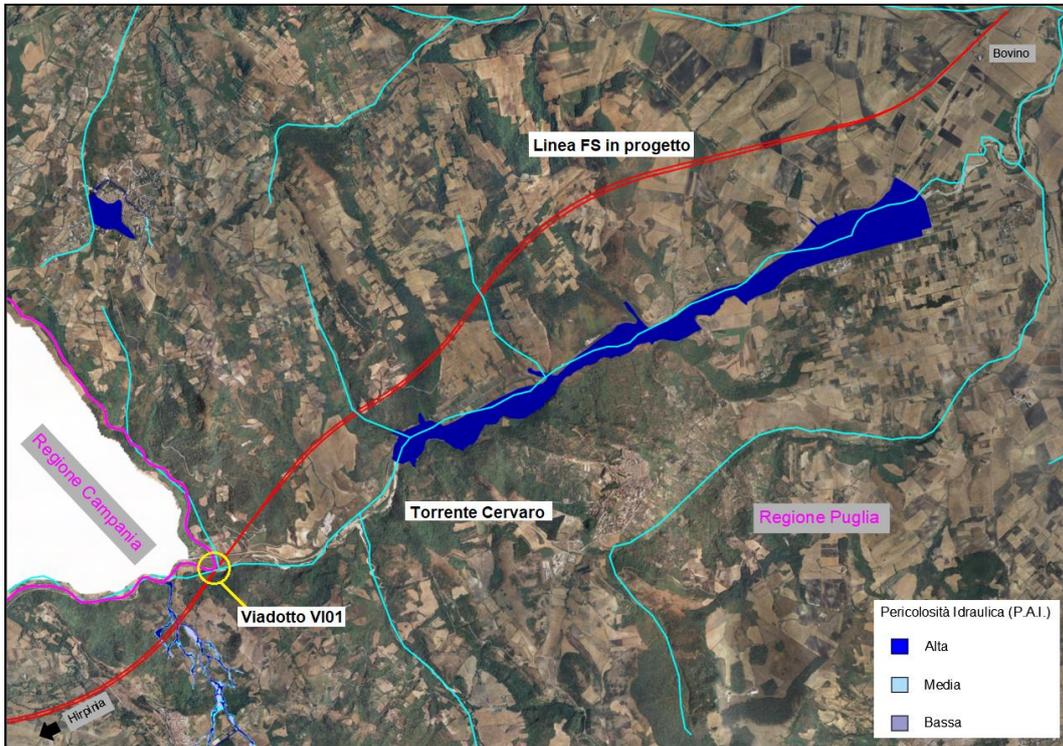


Figura 3 – Torrente Cervaro e linea ferroviaria in progetto: aree a pericolosità idraulica PAI – Regione Puglia.

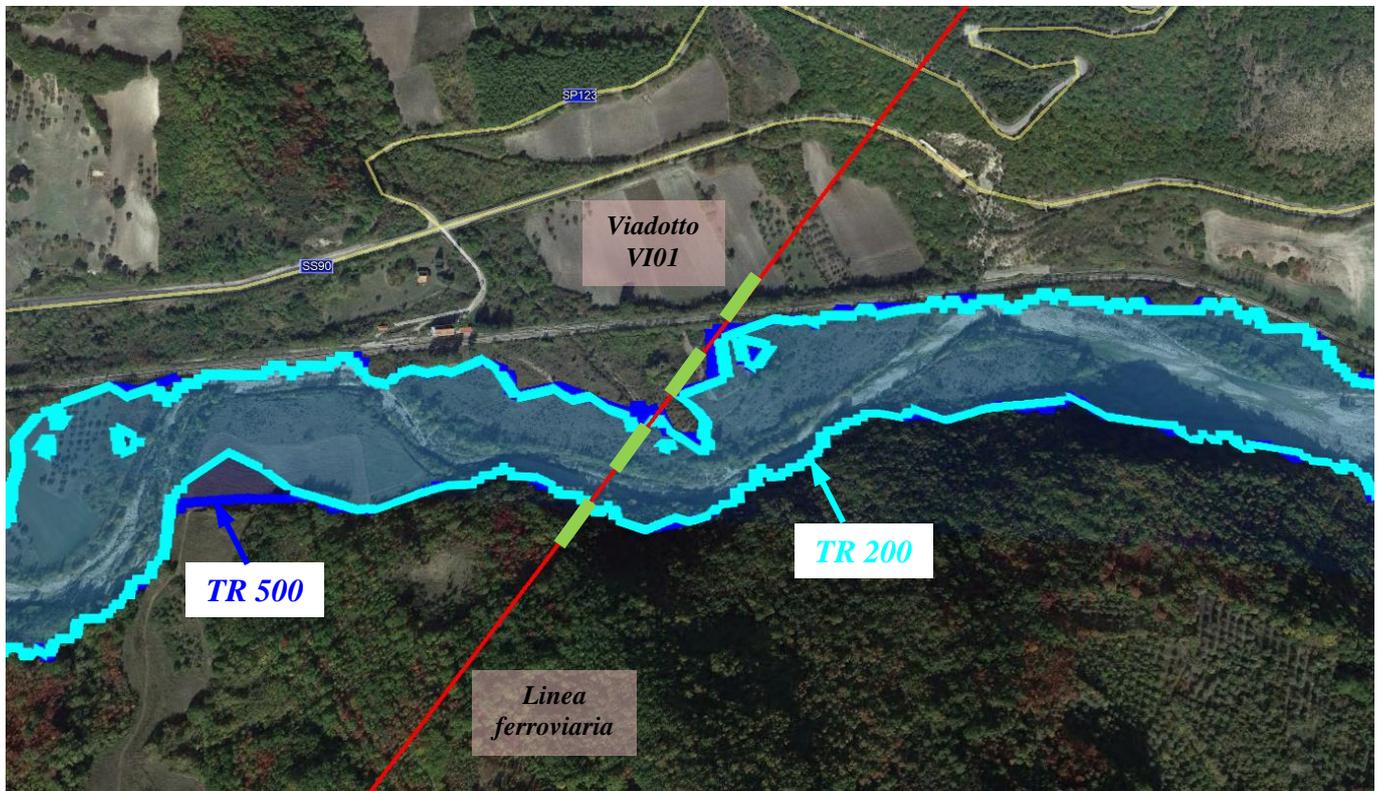


Figura 4 – Torrente Cervaro: aree a pericolosità idraulica Tr 200 (ciano) e Tr 500 (blu), fonte: Studio Idraulico 2013 – AdB Puglia.

2.2 Obiettivi dello studio idraulico

Obiettivo del presente studio idraulico è quello di valutare l'efficacia degli interventi previsti per assicurare la compatibilità idraulica del nuovo attraversamento sul Torrente Cervaro della linea Napoli-Bari, tratta Hirpinia - Orsara.

Per la sicurezza idraulica della linea, le opere d'arte di attraversamento, esistenti o di progetto, devono osservare le prescrizioni del Manuale di progettazione RFI. In sintesi, le opere idrauliche di attraversamento devono essere verificate per eventi di massima piena caratterizzati dai seguenti tempi di ritorno (Tr):

- Tr = 300 anni per $S \geq 10 \text{ km}^2$ (Torrente Cervaro);
- Tr = 200 anni per $S < 10 \text{ km}^2$ (Torrente Acquara, affluente in sinistra idraulica del T. Cervaro, Figura 2, considerato nella simulazione idraulica dello scenario di cantiere)

avendo indicato con S la superficie del bacino idrografico sotteso alla sezione dell'attraversamento.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA II LOTTO FUNZIONALE HIRPINIA - ORSARA PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDRAULICA: MODELLO 2D CERVARO	COMMESSA IF1V	LOTTO 02 D 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 10 di 38

Per gli attraversamenti principali (ponti e viadotti), relativamente ai requisiti idraulici nei confronti dei livelli di massima piena, si specifica quanto segue:

- il franco idraulico tra intradosso manufatto e livello della superficie libera deve essere non inferiore a **1.5 m** (Tr 200 per le NTC 2018; Tr 300 per il Manuale di Progettazione RFI) nella sezione immediatamente a monte dell'attraversamento;
- il franco minimo tra intradosso manufatto e quota di carico idraulico totale deve essere almeno pari a **50 cm** (Tr 300, Manuale di Progettazione RFI)

L'opera inoltre deve rispondere a quanto previsto dalle Nuove Norme Tecniche per le costruzioni 2018, DECRETO 17 gennaio 2018. *Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»*, MINISTRO DELLE INFRASTRUTTURE, relativamente alla luce netta tra pile in alveo (40 metri, misurata ortogonalmente al filone principale della corrente) e alla distanza tra il fondo alveo e la quota di sottotrave che non dovrà essere inferiore a 6/7 metri, anche con riferimento ad eventuali fenomeni di trasporto solido di fondo e/o di materiale galleggiante.

3 DATI DI BASE

3.1 rilievi topografici e opere esistenti

I dati topografici a disposizione per l'implementazione dei modelli idraulici sono i seguenti:

- sezioni trasversali dell'alveo ottenute da apposita campagna topografica, in particolare sono state rilevate 17 sezioni trasversali del Torrente Cervaro e 13 sezioni trasversali del T. Acquara (Figura 5);
- rilievo laseraltimetrico (LiDAR), risoluzione 1x1 m, fornito dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare;
- rilievo laseraltimetrico (LiDAR), ad alta risoluzione, effettuato da ITALFERR S.p.A..

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

Questo permette di poter utilizzare nell'implementazione del modello idraulico le due informazioni topografiche in maniera complementare.

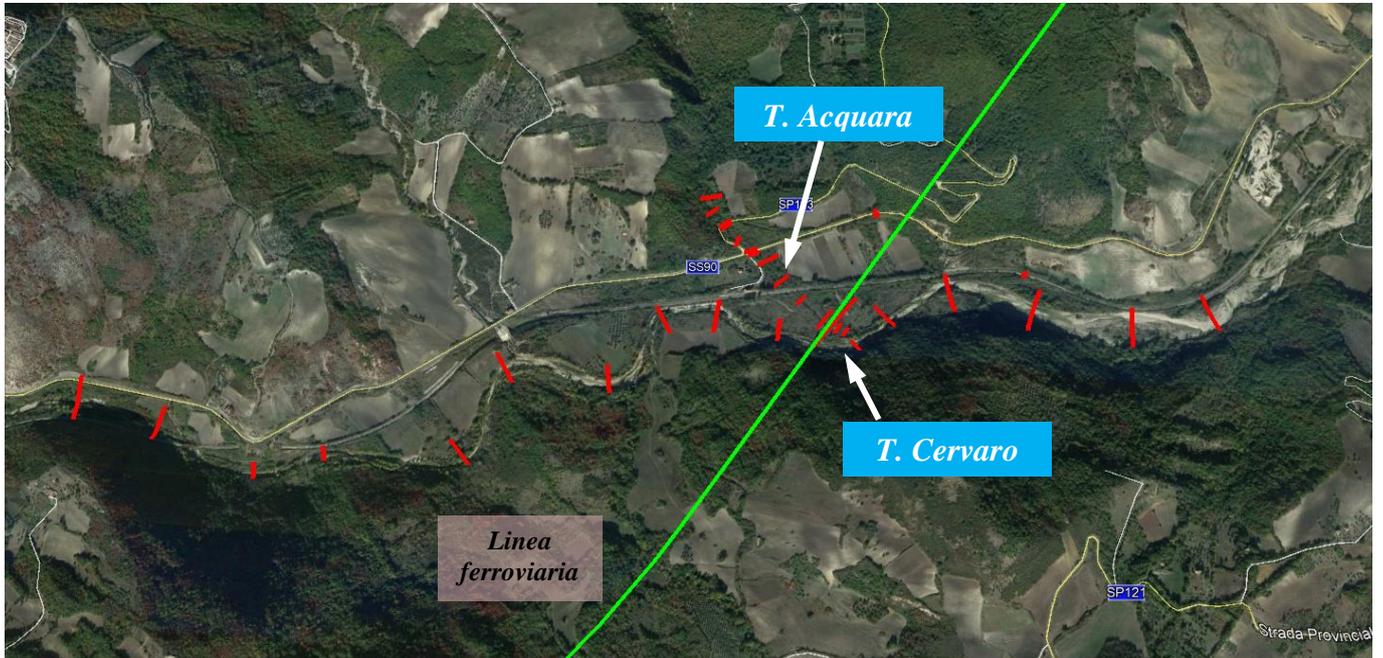


Figura 5 – Torrente Cervaro: sezioni idrauliche rilevate (in rosso).

3.2 Opera in progetto – Viadotto VI01

Di seguito è riportato un prospetto (Figura 6) e uno stralcio planimetrico (Figura 7) e del viadotto in progetto.

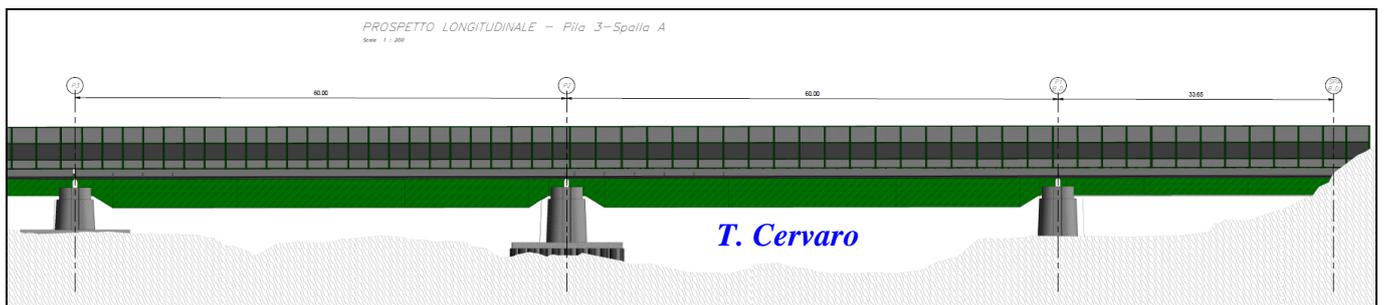


Figura 6 – Prospetto (Pila 3 – Spalla A) del viadotto in progetto sul T. Cervaro.

Si tratta di un viadotto di lunghezza complessiva di circa 300 m (Spalla A – Spalla B), con 2 campate di scavalco da 60 metri (asse Pila P1 – asse Pila P2; asse Pila2 – asse Pila3).

La quota minima di intradosso dell’impalcato (in mezzeria) si attesta a +356.70 m s.l.m..

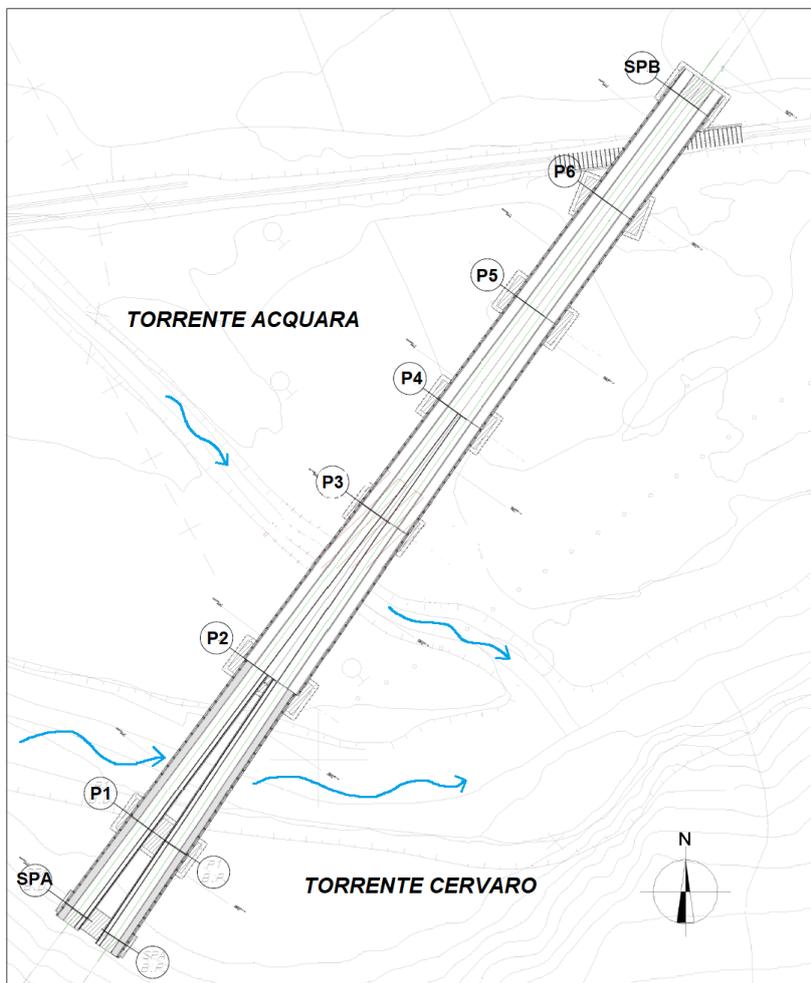


Figura 7 – Stralcio planimetrico del viadotto in progetto sul Torrente Cervaro.

4 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO IDRAULICO

Per la valutazione della compatibilità idraulica dell'opera in progetto è stato sviluppato un modello idraulico bidimensionale teso alla determinazione delle aree potenzialmente inondabili e dei profili di rigurgito, in regime di moto vario, sia nella configurazione attuale che post operam. Il modello di calcolo utilizzato è il software HEC-RAS 5.0.5., sviluppato dall'US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, di Davis (USA). Anche per le verifiche idrauliche in fase di cantierizzazione (paragrafo 5.4), è stato sviluppato un modello idraulico bidimensionale, che include anche il contributo idrologico del T. Acquara, affluente in sinistra idraulica del T. Cervaro.

4.1 Modellazione bidimensionale

Le caratteristiche principali dell’algoritmo di modellazione della versione 5.0.5. del software Hec Ras sono:

- Modellazione combinata 1D e 2D che prevede la possibilità di eseguire una simulazione combinata 1D e 2D all'interno dello stesso modello in regime di moto vario che permettendo di lavorare su schemi fluviali più complessi, utilizzando come sopra descritto la modellazione 1D per l’alveo, e la modellazione 2D aree inondabili esterne.
- Equazioni complete di Saint Venant o di diffusione dell'onda in 2D: Il programma risolve sia le equazioni 2D di diffusione dell'onda o quelle complete di Saint Venant. Questa opzione è selezionabile dall'utente, offrendo quindi una maggiore flessibilità. In generale, le equazioni di diffusione dell'onda in 2D consentono al software di funzionare più velocemente garantendo inoltre una maggiore stabilità. Le equazioni 2D in forma completa di Saint Venant sono applicabili a una gamma più ampia di problemi, ma la grande maggioranza delle situazioni può essere modellata con sufficiente precisione con le equazioni di diffusione dell'onda.
- Algoritmo di soluzione ai volumi finiti: Il risolutore delle equazioni di moto bidimensionale utilizza un algoritmo implicito ai volumi finiti. L'algoritmo di soluzione consente di utilizzare step temporali di calcolo maggiori rispetto ai metodi espliciti. L'approccio ai volumi finiti fornisce una misura dei miglioramenti in termini di stabilità e robustezza rispetto alle tradizionali tecniche differenziali di soluzione basate su metodi agli elementi finiti.
- Algoritmo per la soluzione accoppiata dei modelli 1D e 2D: Gli algoritmi di soluzione 1D e 2D sono strettamente accoppiati nello stesso passo temporale di calcolo permettendo una perfetta coerenza a ogni step tra i modelli 1D e 2D. Ad esempio, se un fiume è modellato in 1D, ma l'area dietro un argine è modellata in 2D, il deflusso al di sopra dell'argine o eventualmente attraverso una breccia nell'argine è valutato utilizzando come carico di monte il livello nel fiume 1D e come carico di valle il livello nell'area 2D. L'equazione dello stramazzo è utilizzata per calcolare il deflusso al di sopra dell'argine o attraverso la breccia.
- Maglie computazionali strutturate e non strutturate: Il software è stato progettato per utilizzare mesh computazionali strutturate o non strutturate. Ciò significa che le cellule computazionali possono essere triangoli, quadrati, rettangoli o anche elementi a cinque e sei facce. La maglia può essere una miscela di forme e dimensioni delle celle. Il contorno esterno della maglia computazionale è definito con un poligono.

- Tabella dettagliata delle proprietà idrauliche per le celle di calcolo: All'interno di HEC-RAS le celle e le facce delle celle si basano sui dati del terreno sottostante (DTM). Ogni cella della maglia computazionale è pre-elaborato per sviluppare dei grafici dettagliati sulle proprietà idrauliche basate sul terreno sottostante che vengono utilizzati nella modellazione di HEC. Inoltre, ogni faccia delle celle viene valutata come una sezione trasversale dove vengono elaborate in tabelle che descrivono le proprietà idrauliche. Il flusso si muove in tutta la faccia (tra le celle) basandosi su questi dati. Questo permette agli utenti di utilizzare delle celle molti grandi senza però perdere troppo il dettaglio del terreno sottostante che governa il movimento del flusso. Il vantaggio è un minor numero di calcoli e quindi tempi di esecuzione molto più veloci.
- Dettagliata mappatura dello scenario degli allagamenti con animazioni: La perimetrazione delle aree allagabili così come le animazioni dello scenario degli allagamenti in funzione del tempo può essere fatta all'interno di HEC-RAS utilizzando le funzionalità di RAS-Mapper. La mappatura delle aree allagate si basa sul DTM, ciò significa che la reale superficie bagnata sarà basata sui dettagli della morfologia del terreno sottostante e non sulla dimensione della cella di calcolo. Le celle quindi possono anche essere parzialmente bagnate/asciutte.
- Algoritmo di calcolo basato su sistemi Multi-Processore: Il modello di calcolo 2D è stato programmato per sfruttare i sistemi multi-processore presenti sui computer moderni (architettura parallela). In questo l'algoritmo di soluzione presenta una maggiore velocità e quindi i computer dotati di più processori saranno in grado di eseguire la modellazione 2D più velocemente rispetto ai computer a singolo processore.
- Motori di calcolo a 64 e 32 bit: HEC-RAS è ora dotato di motori di calcolo sia a 64 bit che a 32 bit. Il software utilizzerà automaticamente i motori di calcolo a 64 bit se si installa su un sistema operativo a 64 bit

Il modello matematico bidimensionale utilizza le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto, che vengono risolte con uno schema ai volumi finiti. Si riporta di seguito il sistema di riferimento di HEC-RAS 2D, ove la quota del terreno è indicata con $z(x,y)$, l'altezza idrica con $h(x,y,t)$ e l'altezza del pelo libero con $H(x,y,t) = z(x,y) + h(x,y,t)$ (Figura 8).

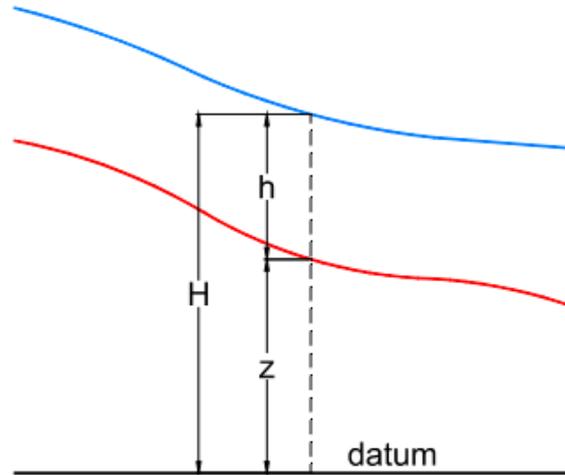


Figura 8 – Software Hec Ras 5.0.5: sistema di riferimento.

Conservazione della massa: assumendo il fluido incomprimibile, l'equazione differenziale della conservazione della massa (continuità) in moto vario è:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(h \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(h \cdot v)}{\partial y} + q = 0$$

in cui t è il tempo, u e v sono rispettivamente le componenti di velocità lungo le direzioni x ed y , e q è la portata in ingresso ed in uscita dovuta a immissioni od uscite di acqua.

Conservazione della quantità di moto: quando la dimensione orizzontale caratteristica dell'area di studio è molto maggiore della dimensione verticale, gli effetti legati alla componente verticale della velocità possono essere trascurati e si può assumere una distribuzione idrostatica delle pressioni, a partire dalle equazioni di Navier-Stokes. In tali ipotesi e nell'ipotesi di densità del fluido costante, l'equazione di conservazione della quantità di moto assume la seguente forma:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = -g \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f \cdot u + f \cdot v$$

in cui oltre ai simboli già illustrati, g è l'accelerazione di gravità, ν_t è il coefficiente di viscosità turbolenta, c_f è il coefficiente di attrito al fondo, ed f è il coefficiente di Coriolis.

Utilizzando la formula di Chézy il coefficiente di scabrezza sul fondo è dato da:

$$c_f = \frac{g \cdot |V|}{C^2 \cdot R}$$

in cui g è l'accelerazione di gravità, $|V|$ è il modulo del vettore velocità, C è il coefficiente di Chézy ed R è il raggio idraulico. Utilizzando la formula di Manning $C = R^{1/6}/n$, in cui n è il coefficiente di scabrezza di Manning, pertanto si ha:

$$c_f = \frac{n^2 \cdot g |V|}{R^{4/3}}$$

Per la modellazione del campo di moto HEC-RAS utilizza l'approccio batimetrico sub-grid sviluppato da Casulli. Con tale approccio si riesce a sfruttare informazioni topografiche ad alta risoluzione (ad esempio dati Lidar con passo della griglia pari ad 1m) pur utilizzando celle di calcolo a dimensione caratteristica maggiore rispetto alla risoluzione dei dati in ingresso. Per ogni singola cella di calcolo infatti in fase di pre-processing viene ricavata la legge di variazione con la quota del pelo libero delle grandezze idrauliche caratteristiche, basandosi sui dati topografici ad alta risoluzione relativi alla cella stessa. Vengono così determinate: curva di invaso della cella, area, contorno bagnato e raggio idraulico su ogni bordo della cella. Tale schema di risoluzione consente di sfruttare al massimo il dettaglio dei dati in ingresso.

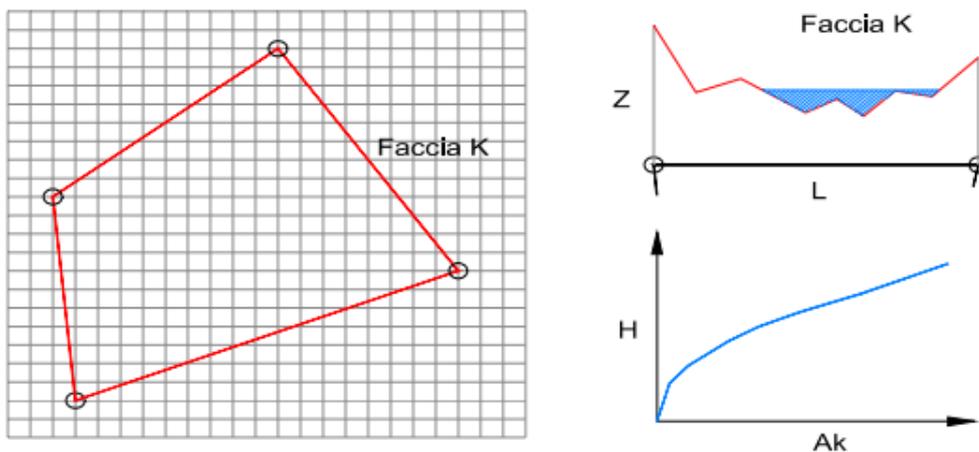


Figura 9 – Software Hec Ras 5.0.4: in grigio il dato della griglia DTM, in rosso la cella di calcolo del modello idraulico. A destra la schematizzazione effettuata da Ras sulle facce del bordo della cella.

4.2 Geometria del modello

Attraverso il modello idraulico sviluppato è stato simulato il Torrente Cervaro per un tratto di lunghezza totale di 3.0 km; in particolare, 1.5 km a monte e 1.5 km a valle del viadotto (VI01) in progetto, (Figura 10).

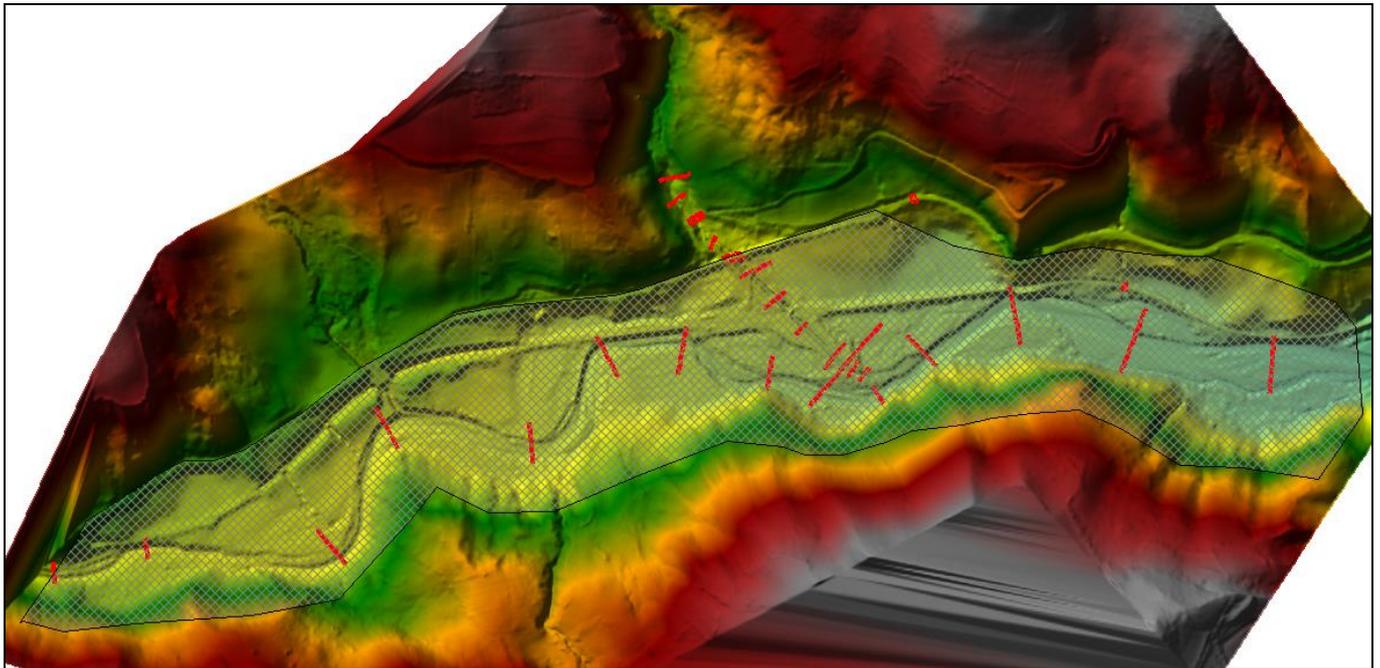


Figura 10 – Estensione del tratto di studio del T. Cervaro, nel modello idraulico 2D.

La geometria del modello è stata implementata utilizzando i dati LIDAR disponibili per l'area in esame e da rilievo topografico, precedentemente descritti. In particolare:

- per la modellazione dell'alveo inciso si è fatto riferimento a sezioni di rilievo topografico. L'ubicazione delle finche di calcolo è riportata negli elaborati planimetrici delle fasce di esondazione.
- le caratteristiche topografiche della rete di calcolo 2D sono state desunte dal modello digitale del terreno a maglia 1m x 1m fornito dal Ministero dell'Ambiente e realizzato da ITALFERR, verificando la congruenza tra i rilievi disponibili ed il DTM medesimo. La rete di calcolo bidimensionale interessa sia l'alveo inciso sia le aree golenali di espansione esterne, questa è stata definita utilizzando le opzioni di discretizzazione automatica del dominio di calcolo presenti in HEC-RAS, definendo opportune break lines e/o aree di infittimento della maglia in corrispondenza di elementi morfologicamente ed idraulicamente significativi, quali strade, corsi d'acqua, rilevati, etc.

Al fine di tener conto della presenza di pile in prossimità dell'alveo (nella configurazione *post operam*), le stesse sono state prima implementate mediante software dedicato (Autocad, QGIS) e successivamente accoppiati al DTM (Figura 11).

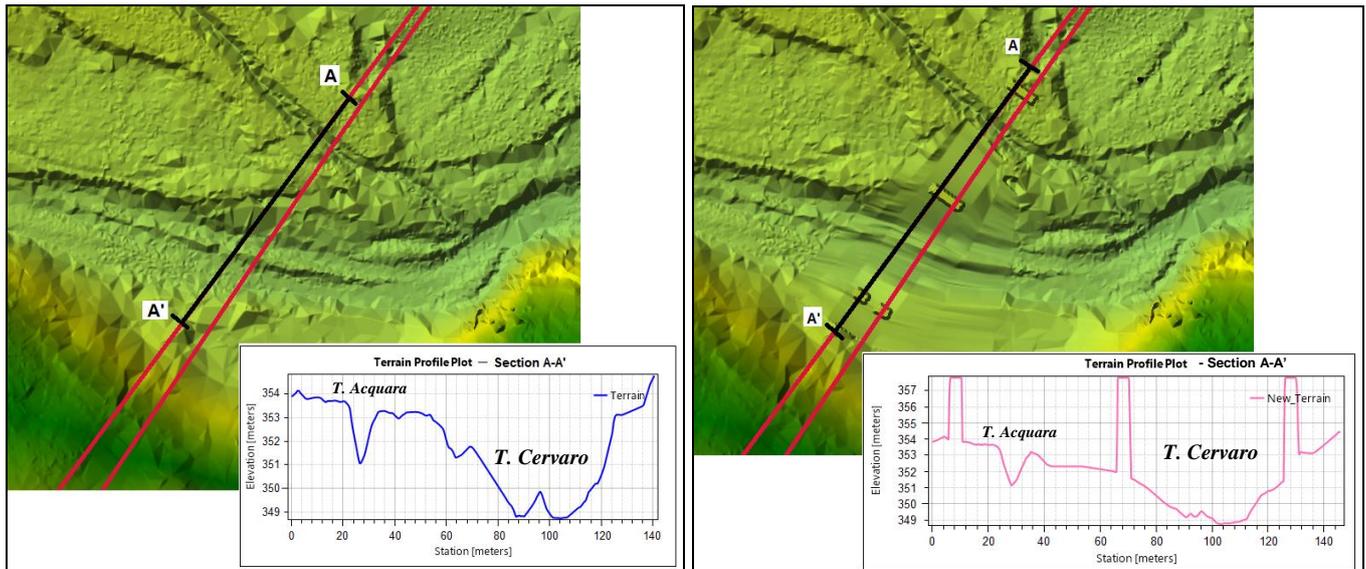


Figura 11 – Modello idraulico 2D del T Cervaro: implementazione del viadotto VI01.

4.3 Scabrezze

I coefficienti di scabrezza n di Manning sono stati fissati tramite calibrazione idraulica dei modelli stessi partendo da valori di letteratura.

In particolare, per l'alveo e le golene è stato assunto $n = 0.045$ ($m^{1/3}/s$); il coefficiente di scabrezza per le aree esterne, potenzialmente inondabili, è stato assegnato a partire dall'uso del suolo derivato dal progetto Corine Land Cover (Ispra, 2012), secondo la seguente tabella di corrispondenza (tratta da R. Pestana et al., 2013, Calibration of 2d hydraulic inundation models in the floodplain region of the lower Tagus river, ESA Living Planet Symposium 2013).

Il dato di copertura del suolo è stato inserito dunque come dato di input nel modello (in formato .shp), come riportato in Figura 12.

Code	Designation	n	Code	Designation	n
111	Continuous urban fabric	0.230	242	Complex cultivation patterns	0.023
112	Discontinuous urban fabric	0.115	243	Agriculture, w/significant natural vegetation	0.058
121	Industrial or commercial units	0.230	244	Agro-forestry areas	0.058
122	Roads and rail networks and associated land	0.038	311	Broad-leaved forest	0.230
124	Airports	0.230	312	Coniferous forest	0.127
131	Mineral extraction sites	0.104	313	Mixed forest	0.230
132	Dump sites	0.115	321	Natural grasslands	0.039
133	Construction sites	0.115	322	Moors and heathland	0.058
142	Sport and leisure facilities	0.023	323	Sclerophyllous vegetation	0.058
211	Non-irrigated arable land	0.043	324	Transitional woodland-shrub	0.058
212	Permanently irrigated land	0.043	331	Beaches, dunes, sands	0.138
213	Rice fields	0.023	332	Bare rocks	0.104
221	Vineyards	0.043	333	Sparsely vegetated areas	0.104
222	Fruit trees and berry plantations	0.043	334	Burnt areas	0.104
223	Olive groves	0.043	411	Inland marshes	0.115
231	Pastures	0.298	511	Water courses	0.035
241	Annual crops associated w/permanent crops	0.043	512	Water bodies	0.035

Tabella 1. Tabella dei valori del coefficiente di scabrezza sulle aree 2D (Pestana et al. 2013).

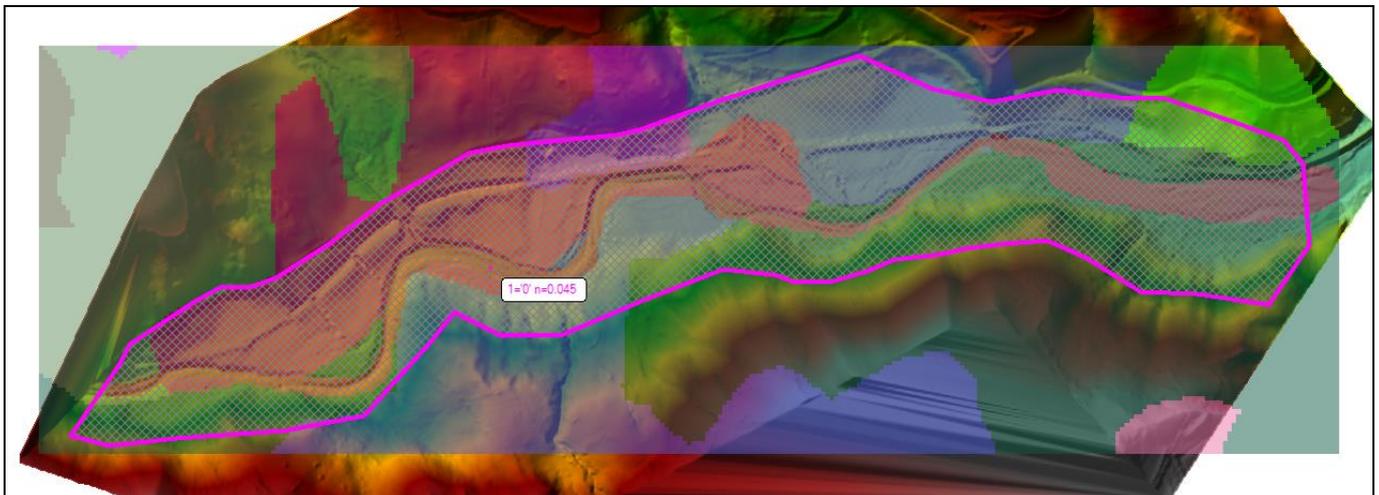


Figura 12 –Modello idraulico 2D del T. Cervaro: Coefficiente di Manning, n, per le aree inondabili, esterne all'alveo inciso (CLC, 2012).

4.4 Condizioni al contorno

Gli idrogrammi di riferimento sono quelli ricavati nello studio idrologico, elaborato IF1V02D09RIID0001001A – *Relazione idrologica*, al quale si rimanda.

Nella figura seguente sono riportati gli idrogrammi utilizzati come condizione al contorno di monte del modello idraulico 2D.

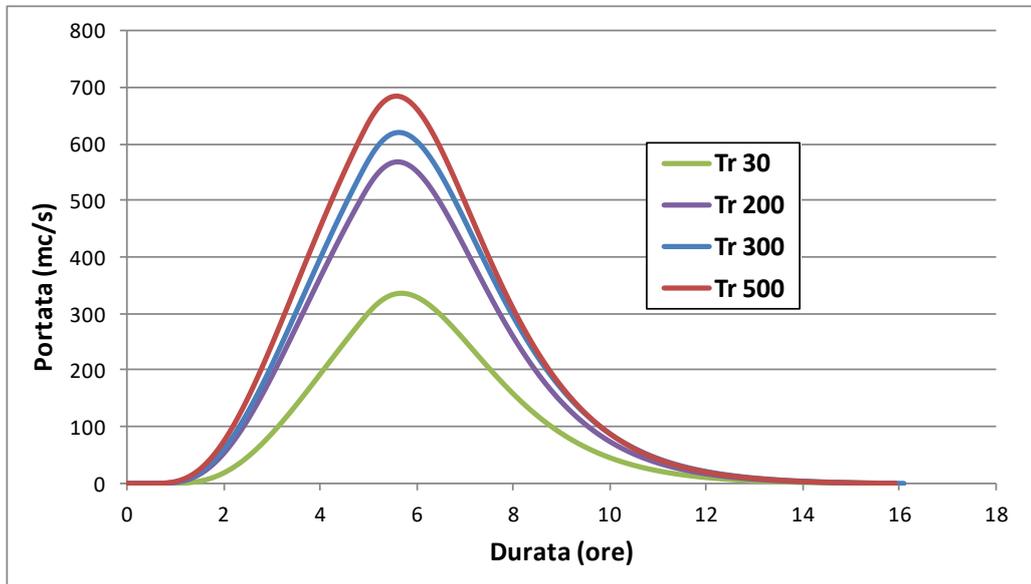


Figura 13 – Idrogrammi di piena del T. Cervaro, alla sezione di interesse, per diversi tempi di ritorno.

Per quanto riguarda la condizione di valle, è stato imposto un livello idrico di moto uniforme ($Normal\ Depth = 0.01$). Al fine di valutare l'influenza di tale condizione sui profili di rigurgito e sulle aree potenzialmente inondabili, le simulazioni idrauliche ante e post operam sono state effettuate anche con $Normal\ Depth = 0.001$.

La modifica della condizione al contorno di valle si riflette in maniera del tutto trascurabile sull'opera in progetto.

4.5 Scenari simulati

Gli scenari simulati fanno riferimento alle seguenti tre configurazioni geometriche:

- *ante operam*: si intende la geometria ottenuta dal modello del terreno nello stato di fatto;
- *post operam*: è stato inserito il viadotto di progetto ed in particolare le pile dello stesso, nonché il rimodellamento delle sponde, a seguito della realizzazione delle opere di sistemazione idraulica;
- *provvisoria*: fa riferimento alla fase di costruzione del viadotto VI01 e alle aree di cantiere annesse alla realizzazione dell'imbocco della Galleria GN01, che interferiscono anche con il T. Acquara.

Alle configurazioni geometriche ante operam e post operam sono state applicate in ingresso al modello gli idrogrammi di piena per TR 30, 200, 300 e 500 anni. Nella configurazione provvisoria si fa riferimento alle portate di piena del T. Cervaro e del T. Acquara con tempo di ritorno di 10 anni, come da elaborato annesso IF1V02D09RIID0001001A – *Relazione idrologica*.

5 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE

5.1 Scenario ante operam e confronto con studio dell'AdB Puglia

In Figura 14 è riportato il risultato della simulazione idraulica del T. Cervaro, per Tr 500 anni, in corrispondenza del viadotto in progetto, per lo scenario ante operam. In particolare sono indicate le aree potenzialmente inondabili ottenute nello studio condotto dall'AdB delle Regione Puglia e nella modellazione sviluppata.

Le modeste differenze sono imputabili alla diversa base cartografica utilizzata per l'implementazione del modello idraulico 2D.

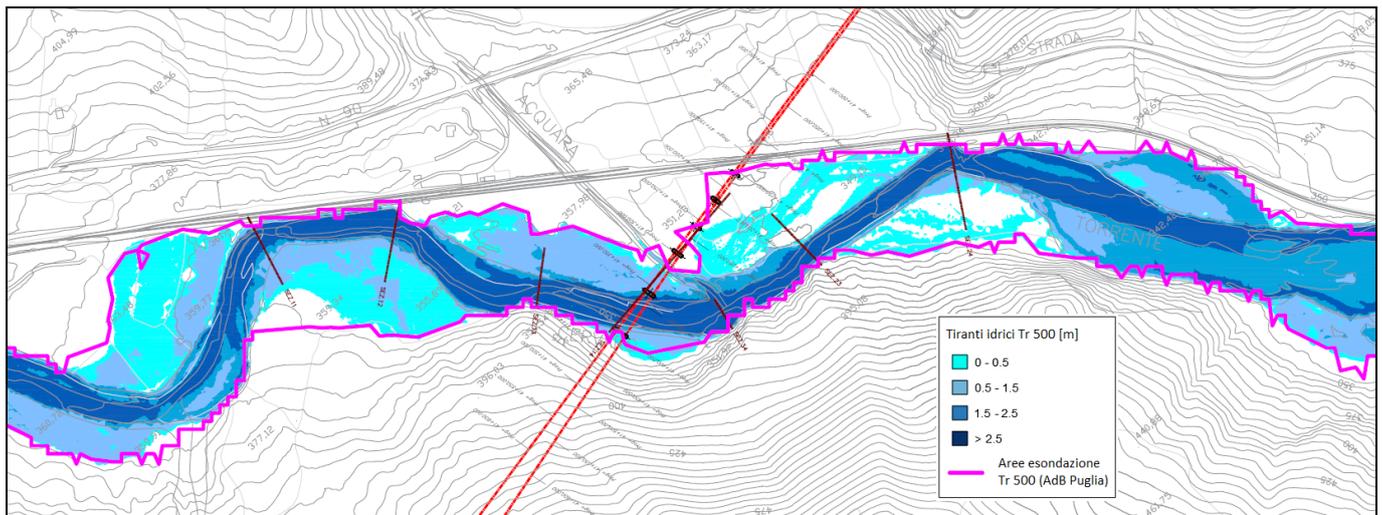


Figura 14 – Aree di esondazione (Tr 500 anni) del Torrente Cervaro: confronto con i risultati dell'AdB Puglia.

5.2 Scenario post operam e confronto con scenario ante operam

Nelle Figure seguenti si riportano le aree di allagamento nelle condizioni ante operam e post operam, in corrispondenza del viadotto di progetto, per i diversi tempi di ritorno indagati.

Le aree potenzialmente inondabili (elaborati grafici IF1V02D09P6ID0002001A, IF1V02D09P6ID0002002A, IF1V02D09P6ID0002005A, IF1V02D09P6ID0002006A) non subiscono variazioni apprezzabili, a dimostrazione della totale “trasparenza idraulica” dell’opera di attraversamento in progetto.

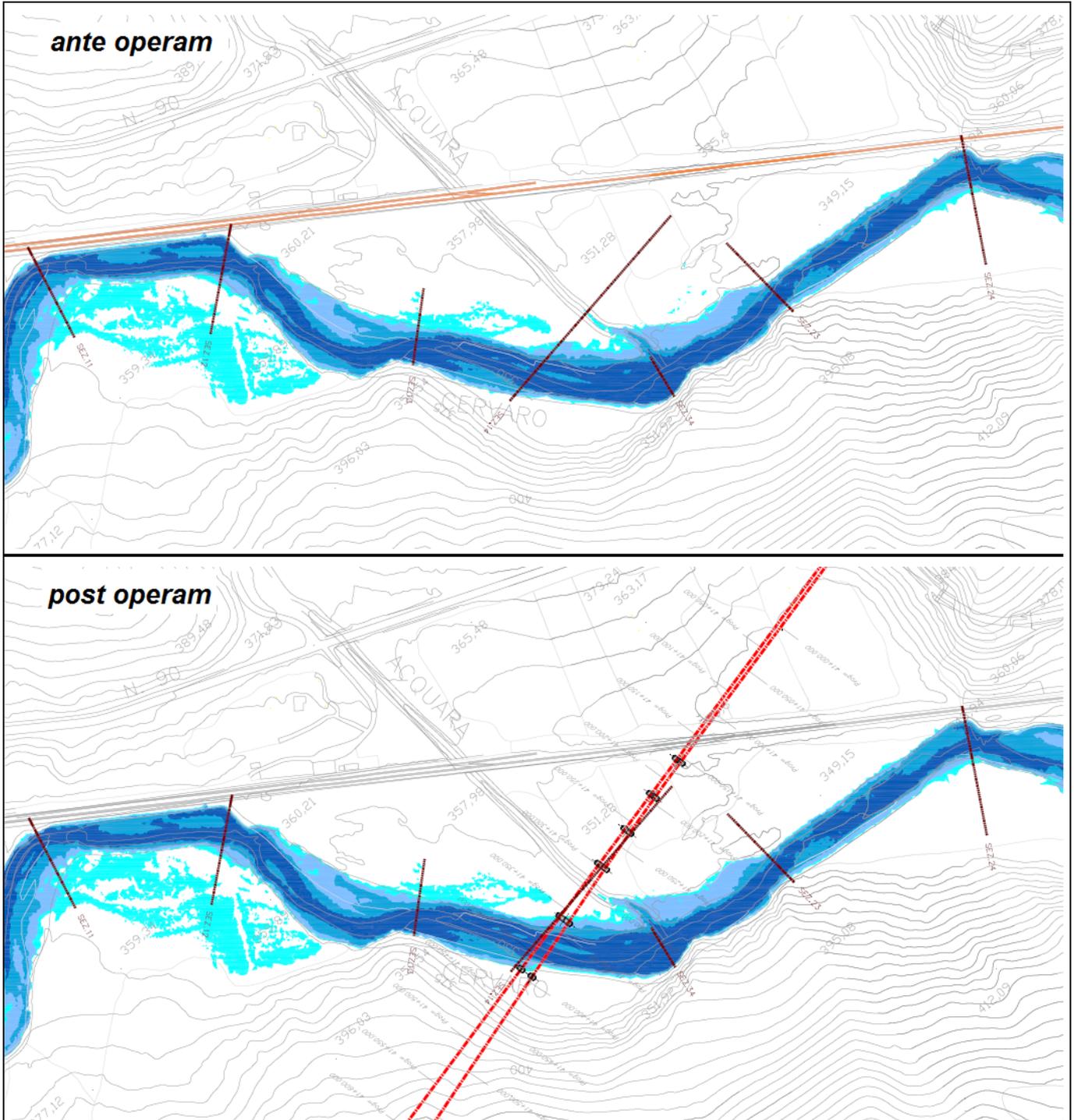


Figura 15 – Aree di allagamento ante operam (in alto) e post operam (in basso) per TR 30 anni.

RELAZIONE IDRAULICA: MODELLO 2D CERVARO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IF1V	02 D 09	RI	ID0002 001	A	23 di 38

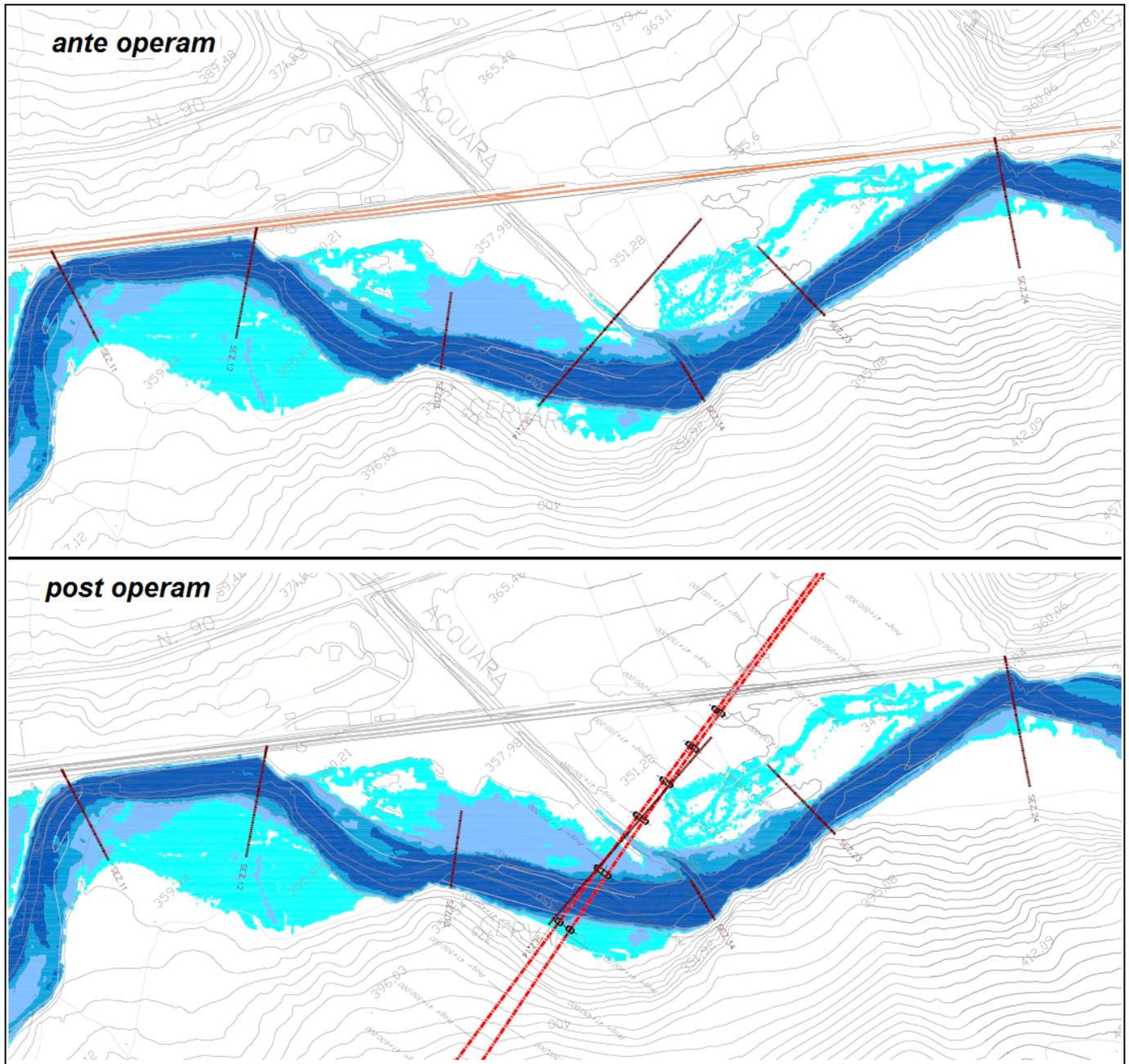


Figura 16 – Aree di allagamento ante operam (in alto) e post operam (in basso) per TR 200 anni.

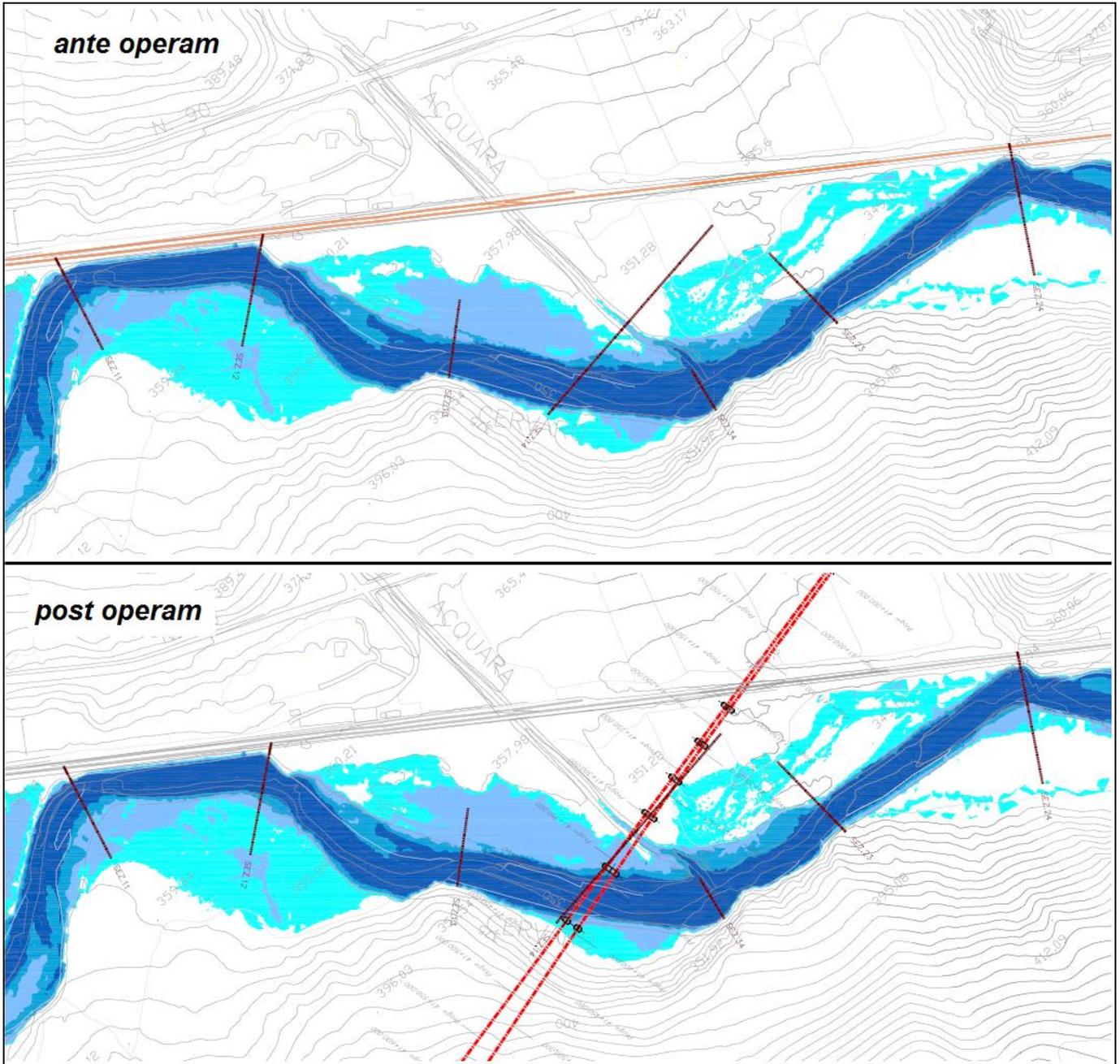


Figura 17 – Aree di allagamento ante operam (in alto) e post operam (in basso) per TR 300 anni.

RELAZIONE IDRAULICA: MODELLO 2D CERVARO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IF1V	02 D 09	RI	ID0002 001	A	25 di 38

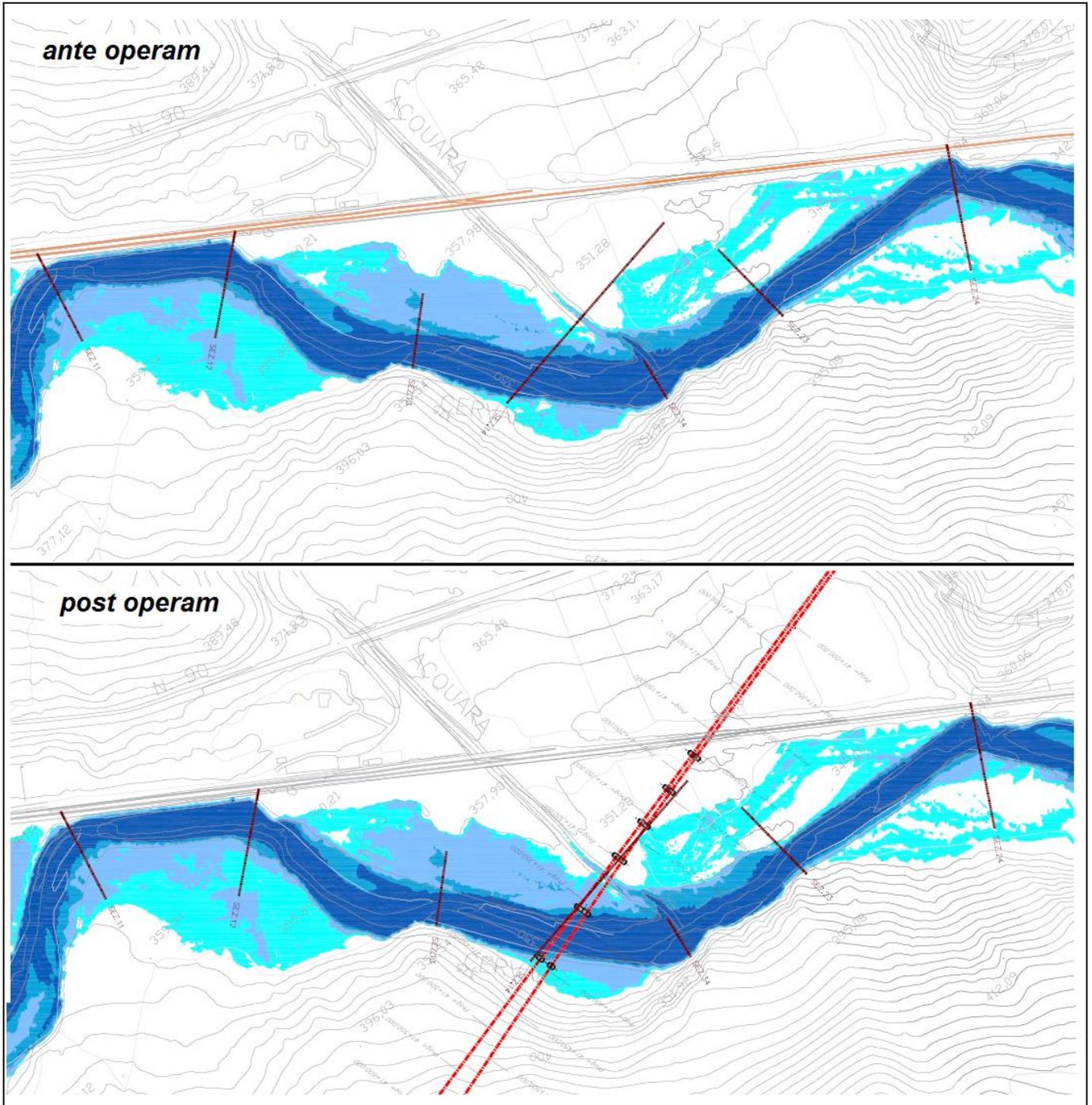


Figura 18 – Aree di allagamento ante operam (in alto) e post operam (in basso) per TR 500 anni.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA II LOTTO FUNZIONALE HIRPINIA - ORSARA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA: MODELLO 2D CERVARO	COMMESSA IF1V	LOTTO 02 D 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A

5.3 Verifica del franco di progetto

La verifica del franco di progetto è eseguita secondo le diverse normative e regolamenti di riferimento così come indicato in precedenza. Nella tabella seguente si riportano le verifiche eseguite: il viadotto risulta ampiamente verificato.

	Quota minima impalcato [m slm]	Livello di piena [m slm]	Carico totale [m slm]	Franco sul livello idrico [m]	Franco sul carico totale [m]	Verifica
<i>NTC (Tr 200 anni)</i>	356,70	353,30	-	3,40 (> 1.50)	-	OK
<i>Manuale RFI (Tr 300 anni)</i>		353,50	355,30	3,20 (> 1.50)	1,40 (> 0,50)	OK

Tabella 2 – Verifica del franco idraulico del viadotto VI01 secondo le indicazioni di normativa e regolamenti di progettazione vigenti.

Le due campate di scavalco (luce = 60 m) del viadotto in progetto presentano una luce netta di 48 m, **rispettando quindi la distanza minima (40 m) richiesta dalle NTC 2018 per la portata di progetto.**

Inoltre la distanza tra la quota di fondo alveo e quella di sottotrave è pari a circa 6,3 m (fondo alveo = +348.42 m slm; quota di sotto-trave = +356.70 m slm), ampiamente sufficiente a garantire il passaggio di eventuali materiali galleggianti, senza possibilità che gli stessi si incastrino a causa della presenza dell’infrastruttura e occludano parzialmente o totalmente la sezione di deflusso. Per le valutazioni sul trasporto solido di fondo si rimanda alla Relazione dello Studio di geomorfologia fluviale IF1V02D09RGID0002001A.

5.4 Evento di piena di cantiere

Per consentire la realizzazione del nuovo viadotto, in particolare delle fondazioni delle pile del ponte ferroviario, si prevede la realizzazione di opere provvisorie in alveo, il cui dimensionamento necessita della determinazione del livello idrico corrispondente alla cosiddetta ‘portata di cantiere’, associata (nel caso in esame) ad un tempo di ritorno pari a 10 anni, secondo quanto riportato nell’elaborato annesso IF1V02D09RIID0001001A – *Relazione idrologica*.

Nella simulazione idraulica dello scenario “Tr 10 anni” sono state considerate anche le opere di attraversamento provvisorie sul T. Cervaro e sull’affluente T. Acquara, annesse alle viabilità di cantiere necessarie per le operazioni di costruzione/realizzazione non soltanto del viadotto VI01, ma anche dell’imbocco della galleria GN01. Sono

RELAZIONE IDRAULICA: MODELLO 2D CERVARO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IF1V	02 D 09	RI	ID0002 001	A	27 di 38

fornite quindi indicazioni anche in merito alla compatibilità idraulica delle aree destinate all’allestimento del cantiere.

La simulazione è stata condotta utilizzando il software HEC-RAS 5.0.5 e adottando sempre una schematizzazione bidimensionale, in regime di moto vario. Di seguito, gli idrogrammi applicati come condizione al contorno di monte; per quanto concerne la condizione al contorno di valle, è stato imposto *Normal Depth* = 0.01.

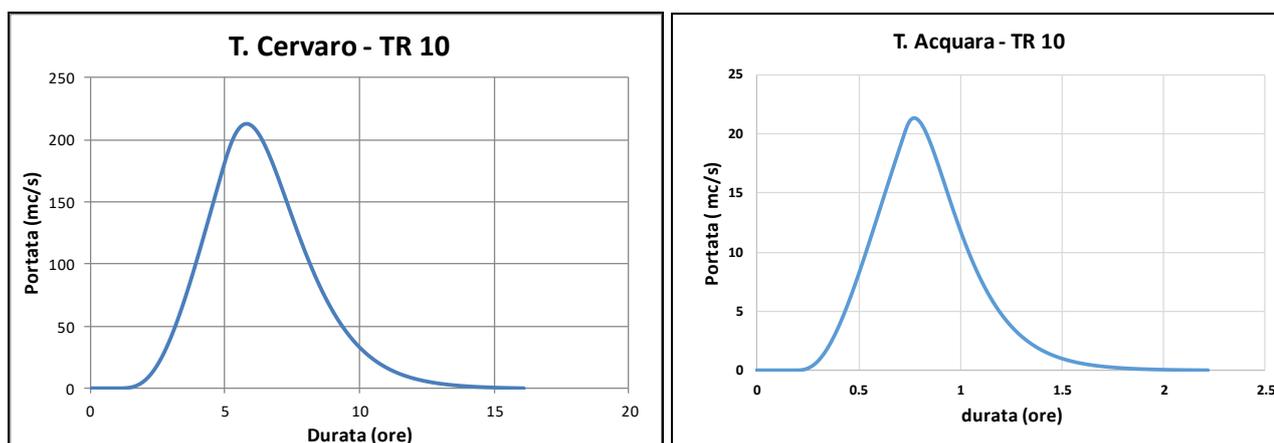


Figura 19 – T. Cervaro e T. Acquara: idrogrammi di piena per Tr 10 anni.

Nelle figure seguenti si riportano i risultati in termini di aree di esondazione per lo scenario di *cantiere*.

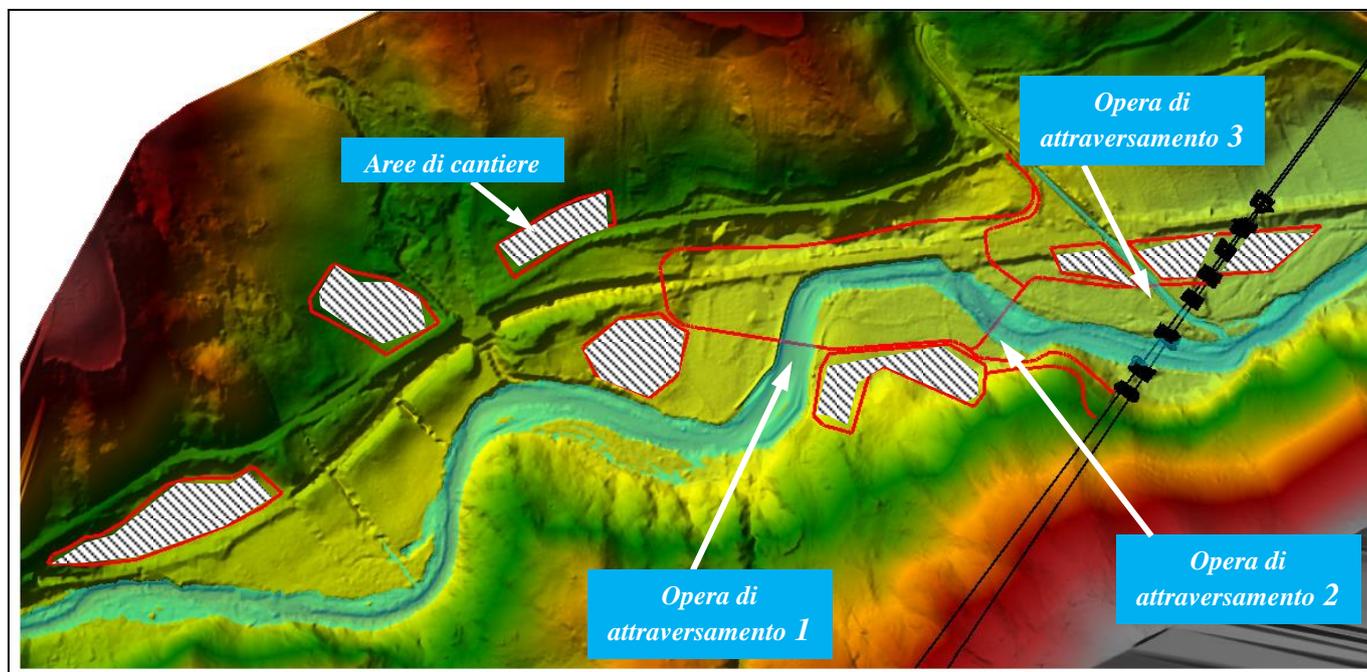


Figura 20 – T. Cervaro e T. Acquara: risultati modellazione idraulica Tr 10 anni (scenario “di cantiere”).

La piena *Tr 10 anni* risulta contenuta in alveo; le opere di attraversamento provvisorie non determinano quindi variazioni significative dei profili di rigurgito, tali da provocare esondazioni localizzate del T. Cervaro e del T. Acquara. Di seguito, le caratteristiche delle opere di attraversamento provvisorie simulate. Con riferimento alla notazione di Figura 20:

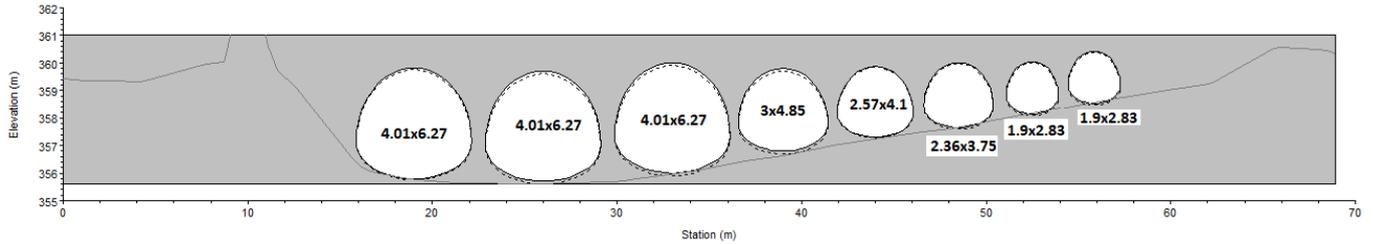
- **Opera di attraversamento 1 (T. Cervaro)**

Tipologia: condotte/tubi ARMCO

Numero	Luce (m)	Freccia (m)
3	6,27	4,01
1	4,85	3,00
1	4,10	2,57
1	3,75	2,36
2	2,83	1,90

RELAZIONE IDRAULICA: MODELLO 2D CERVARO

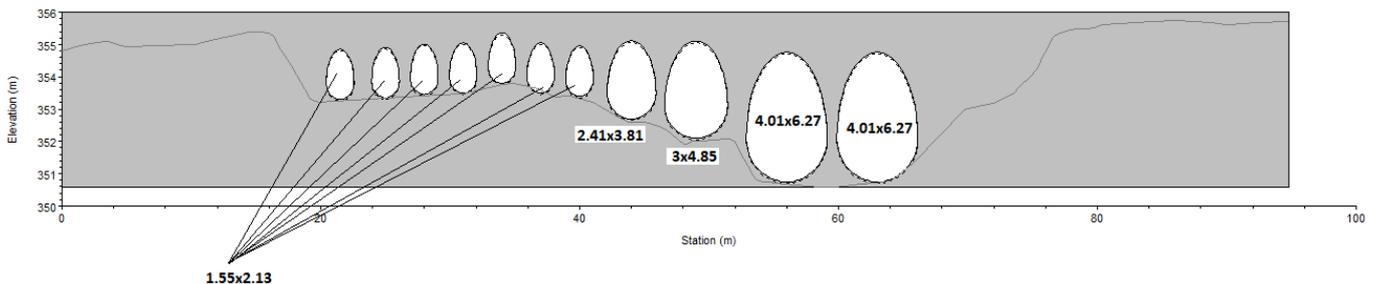
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IF1V	02 D 09	RI	ID0002 001	A	29 di 38



▪ **Opera di attraversamento 2 (T. Cervaro)**

Tipologia: condotte/tubi ARMCO

Numero	Luce (m)	Freccia (m)
7	2,13	1,55
1	3,81	2,41
1	4,85	3,00
2	6,27	4,01



▪ **Opera di attraversamento 3 (T. Acquara)**

Tipologia: condotte/tubi ARMCO

Numero	Luce (m)	Freccia (m)
1	4,10	2,57
2	1,86	1,4

Il livello idrico ($Tr = 10$ anni) in corrispondenza del realizzando viadotto VI01, da considerare nel dimensionamento delle opere provvisionali, si attesta a **+351,50 m s.l.m.**

Le opere di attraversamento dovranno essere realizzate in modo da poter essere autodemolite al passaggio di una piena con portata al colmo superiore a quella di dimensionamento. In particolare i tubi ARMCO dovranno essere

realizzati con conci di lunghezza limitata, affinché, in caso di asportazione del materiale in cui saranno annegati, non provochino ostruzione alla corrente idrica in alveo.

6 SISTEMAZIONI IDRAULICHE

6.1 VERIFICA ALLO SCALZAMENTO

Nel presente capitolo viene analizzato lo scalzamento massimo atteso del fondo alveo e delle aree golenali in corrispondenza delle pile di sostegno dell'impalcato ferroviario in occasione degli eventi di piena di progetto.

Lo scalzamento, causato dallo scavo e dall'erosione di materiale dal fondo e dalle sponde dell'alveo, come conseguenza dell'azione erosiva della corrente, può mettere in crisi la stabilità di un ponte, fino ad esporne totalmente le fondazioni.

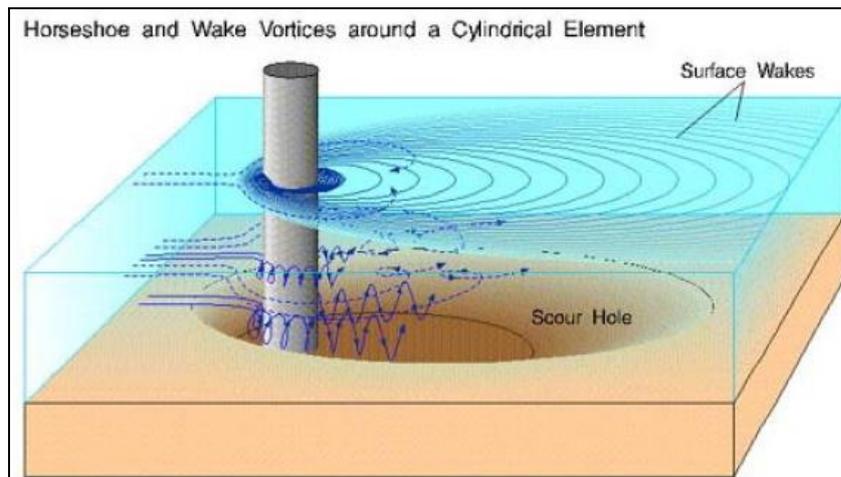


Figura 21 – Schematizzazione delle turbolenze e dello scavo nell'intorno di una pila circolare isolata.

La presenza delle pile in alveo causa un aumento della velocità, rilevata dall'addensamento delle linee di corrente. In corrispondenza delle pile si viene a formare un grosso vortice a ferro di cavallo che interessa planimetricamente tutta l'area circostante la pila e che è il principale responsabile dell'erosione (Figura 21).

Il fenomeno dell'erosione localizzata dipende da numerosi parametri legati sia alle caratteristiche della corrente e dell'alveo (portata, battente, velocità della corrente, capacità di trasporto, caratteristiche del materiale dell'alveo, ecc.), che a quelle dell'ostacolo (forma e dimensioni, inclinazione rispetto alla direzione di flusso).

6.1.1 Metodo di calcolo dello scalzamento

Per il calcolo dell'erosione localizzata dovuta alla presenza di una pila, in letteratura sono disponibili differenti formulazioni, determinate sperimentalmente, valide quindi in particolari condizioni. Nel caso in esame, si è fatto riferimento alla formulazione di Sheppard-Melville (2013):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{y_s}{a^*} = 2.5f_1f_2f_3 \quad \text{for } 0.4 < \frac{V_1}{V_c} < 1.0 \\ \frac{y_s}{a^*} = f_1 \left[2.2 \left(\frac{\frac{V_1}{V_c} - 1}{\frac{V_{1p}}{V_c} - 1} \right) + 2.5f_3 \left(\frac{\frac{V_{1p}}{V_c} - \frac{V_1}{V_c}}{\frac{V_{1p}}{V_c} - 1} \right) \right] \quad \text{for } 1 < \frac{V_1}{V_c} < \frac{V_{1p}}{V_c} \\ \frac{y_s}{a^*} = 2.2f_1 \quad \text{for } \frac{V_1}{V_c} > \frac{V_{1p}}{V_c} \end{array} \right.$$

con

- $V_{1p} = \max(V_{1p1}; V_{1p2}), V_{1p1} = 5V_c; V_{1p2} = 0.6\sqrt{gy_1}$
- $V_c = \begin{cases} 2.5 \cdot u^* \ln \left(\frac{72.5y_1}{d_{50} [Re(2.85 - 0.58 \ln(Re)) + 0.002Re] + \frac{111}{Re} - 4} \right) & \text{for } 5 \leq Re \leq 70 \\ 2.5 \cdot u^* \ln \left(\frac{2.2y_1}{d_{50}} \right) & \text{for } Re > 70 \end{cases}$
- $Re = \frac{u^* d_{50}}{2.32 \cdot 10^{-7}}; u^* = \left[16.2 \cdot d_{50} \left(\frac{9.09 \cdot 10^{-6}}{d_{50}} - d_{50} (38.76 + 9.6 \ln(d_{50})) - 0.005 \right) \right]^{0.5}$
- $y_1 =$ tirante idrico (m)
- $f_1 = \tanh \left[\left(\frac{y_1}{a^*} \right)^{0.4} \right]$
- $f_2 = \left\{ 1 - 1.2 \left[\ln \left(\frac{V_1}{V_c} \right) \right]^2 \right\}$
- $f_3 = \left[\frac{\left(\frac{a^*}{d_{50}} \right)}{0.4 \left(\frac{a^*}{d_{50}} \right)^{1.2} + 10.6 \left(\frac{a^*}{d_{50}} \right)^{-0.12}} \right]$
- $a^* = K_s a_p; a_p = a \cdot \cos \theta + L \cdot \sin \theta; K_s = \begin{cases} 1 & \text{(pila circolare)} \\ 0.86 + 0.97 \left(\left| \frac{\pi \theta}{180} - \frac{\pi}{4} \right| \right)^4 & \text{(pila rettangolare)} \end{cases}$ ($a =$ larghezza della pila; $L =$ lunghezza della pila; $\theta =$ angolo di attacco [°])

Secondo gli studi condotti da Sheppard et al. (2013), riguardanti il confronto tra i valori di scalzamento osservati in laboratorio e in sito e quelli valutati secondo le più comuni ed utilizzate formule per il calcolo dello scalzamento (e.g. Melville, Froehlich, Breusers e CSU), **la formulazione Sheppard-Melville** fornisce valori più attendibili (e prossimi a quelli misurati) rispetto alle altre, per i seguenti campi di valori:

- $Y_1/a = 0.05 \div 10$

- $a/d_{50} = 3.65 \div 65047$
- $V_1/V_c = 0.4 \div 7.6$
- $FR = 0.03 \div 1.95$

Nel caso in esame, soltanto le Pile P1 e P2 risultano interessate dall'erosione della piena di progetto (Tr 300). Le relative caratteristiche geometriche e i valori delle variabili idrauliche (velocità, tirante idrico, angolo di attacco) sono riportate nella tabella seguente.

ID pila	a (pila) [m]	L (pila) [m]	a (plinto) [m]	L (plinto) [m]	Flow depth (m)	Flow velocity (m/s)	angle of attack (°)
P1	5	17	12.2	26	3.1	0.6	35
P2	5	17	12.2	26	2.6	3.5	35

Tabella 3 – Calcolo dello scalzamento: valori delle variabili idrauliche e dimensioni delle pile e delle relative fondazioni.

In particolare, si ha: $Y_1/a = 0.20$; $a/d_{50} = 1220$ (con riferimento alla larghezza a del plinto di fondazione; $d_{50} = 1$ cm, come da curva granulometrica del campione prelevato in alveo; per maggiori dettagli si rimanda all'elaborato IF1V02D09RGID0002001A); $V_1/V_c = 2.4$; $FR = 0.69$. La formulazione SM risulta quindi applicabile al corso d'acqua in esame: i valori di tirante e velocità, le dimensioni effettive delle pile e la granulometria del fondo alveo relativi al T. Cervaro rientrano nei campi dei valori ammissibili, per i quali ne è stata valutata l'attendibilità e l'affidabilità.

In generale, è possibile riscontrare inoltre quattro differenti scenari di erosione localizzata (Figura 22):

- CASO I: la fondazione della pila rimane al di sotto della buca erosiva;
- CASO II: la sommità della fondazione è esposta al flusso della corrente all'interno della buca erosiva;
- CASO III: la sommità della fondazione giace al di sopra del fondo alveo;
- CASO IV: la sommità della fondazione si trova al di sotto o in prossimità del pelo libero.

Nel CASO I l'erosione localizzata viene calcolata facendo riferimento alla larghezza della pila b in quanto la presenza della fondazione risulta essere ininfluenza nel processo erosivo.

Nei CASI II e III invece occorre fare riferimento alla procedura di calcolo proposta da *Melville e Raudkivi (1996)* che utilizza una larghezza della pila equivalente definita come:

$$b_e = b \cdot \left(\frac{h_0 + Y}{h_0 + b^*} \right) + b^* \cdot \left(\frac{b^* - Y}{h_0 + b^*} \right)$$

dove:

h_0 : profondità media della corrente rispetto al fondo alveo;

Y : altezza massima della buca erosiva;

b^* : larghezza della fondazione.

Per quanto riguarda il CASO IV, infine, l'erosione localizzata può venire calcolata utilizzando come larghezza equivalente della pila la larghezza della fondazione b^* dal momento che il fenomeno interessa maggiormente la fondazione stessa.

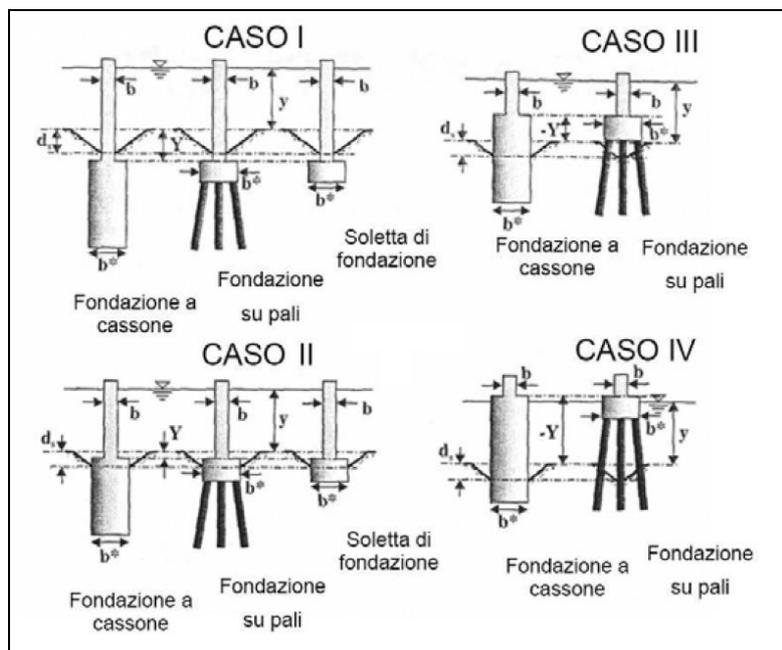


Figura 22 – Differenti tipologie di pile non uniformi dotate di fondazioni.

Si riportano di seguito i valori di scalzamento, valutati con le dimensioni delle pile e dei plinti di fondazione, in corrispondenza delle pile prese in esame (P1 e P2).

ID pila	Scour depth (pila) [m]	Scour depth (plinto) [m]
P1	0.30	-
P2	10.40	14.40

Tabella 4 – Valori di scalzamento in corrispondenza delle pile P1 e P2.

Con riferimento alla Pila P1, la profondità di scalzamento, a causa della modestissima velocità della corrente, è sostanzialmente trascurabile. Mentre per la Pila P2, ricadendo nel caso IV precedentemente descritto, lo scalzamento si attesta a **14.40 m** di profondità.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA II LOTTO FUNZIONALE HIRPINIA - ORSARA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA: MODELLO 2D CERVARO	COMMESSA IF1V	LOTTO 02 D 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A

6.2 VERIFICA DELL'EROSIONE DELL'ALVEO

6.2.1 Metodo di calcolo della Federal Highway Administration (FHWA)

Nel caso in esame, il dimensionamento della scogliera di protezione può essere effettuato facendo riferimento alla formulazione della FHWA (FHWA-NHI-09-112) di seguito riportata:

$$d_{50} = \frac{0,692 \cdot (V_{des})^2}{(S_g - 1) \cdot 2g} \quad (6.1)$$

in cui

d_{50} = diametro medio dei massi (m);

V_{des} = velocità di progetto locale intorno alla pila (m/s);

S_g = peso specifico dei massi (t/m³);

La velocità di progetto deve rappresentare le condizioni nelle immediate vicinanze delle pile. Qualora si dovesse adottare un valore medio di velocità, questo deve essere opportunamente moltiplicato per i fattori che sono funzione della forma della pila e della sua posizione rispetto all'alveo:

$$V_{des} = K_1 K_2 V_{avg} \quad (6.2)$$

Se si dispone di una distribuzione di velocità risultante da modello fisico o da calcolo idraulico 1D o 2D, allora si può utilizzare solamente il coefficiente della forma della pila. Sarebbe opportuno considerare il valore massimo della velocità nell'alveo attivo V_{max} , dal momento che l'alveo stesso può spostarsi nel tempo e la massima velocità impatterebbe le pile.

$$V_{des} = K_1 V_{max} \quad (6.3)$$

in cui:

V_{des} = velocità di progetto locale intorno alla pila (m/s);

K_1 = fattore di forma pari a 1,5 per pile circolari "round-nose" o 1,7 per pile a spigoli vivi;

K_2 = fattore di correzione della velocità per l'ubicazione nell'alveo (varia da 0,9 per pile vicino le sponde in alveo rettilineo, fino a 1,7 per pile immerse nel filone principale della corrente);

V_{avg} = velocità media nell'alveo in corrispondenza del ponte (m/s);

V_{max} = velocità massima nell'alveo attivo (m/s).

Nel caso in esame si hanno i valori riportati nella seguente tabella, dove i valori di velocità sono stati ricavati dai risultati del modello idraulico bidimensionale, avendo adottato cautelativamente il valore massimo della V_{des} tra quelli calcolati con la (6.2) e la (6.3).

G_s (t/mc)	2.65				
V_{max} (m/s)	6	(maximum velocity in the active channel)			
V_{avg} (m/s)	2.8	(average velocity at the bridge)			
K_1	1.5	(1.5÷1.7)			
K_2	1.3	(0.9÷1.7)			
V_{des} (m/s)	9	con V_{max}			
V_{des} (m/s)	5.46	con V_{avg}			
D_{50}	1.73	(m)			
$D_{50}(V_{avg})$	0.637248	(m)			

6.2.2 Definizione delle opere di protezione

Le protezioni delle sponde del Torrente Cerva in corrispondenza del viadotto in progetto, aventi lo scopo di fissare la sezione idraulica e proteggere le fondazioni delle pile, sono rappresentate nell'Elaborato IF1V02D09P7ID0102001A "Planimetria sistemazione idraulica Torrente Cervaro – viadotto VI01" e IF1V02D09WZID0102001A "Sezioni sistemazione idraulica Torrente Cervato – viadotto VI01".

In particolare si prevede una sistemazione spondale per un tratto di circa 30 m in destra idraulica e 74 m in sinistra idraulica, esteso sia a monte che a valle del viadotto, e una sistemazione di fondo a protezione delle zone golenali, interessate dalla corrente per un evento con tempo di ritorno di 300 anni, con massi sciolti. In particolare, in sponda sinistra si prevede di profilare opportunamente le opere di protezione di sponda al fine di garantire la continuità del Torrente Acquara.

Le opere di protezione assecondano il tracciato planimetrico del viadotto e la dislocazione delle pile: prima della realizzazione delle protezioni spondali è da prevedersi la rimozione della porzione ritenuta interferente delle opere provvisorie (diaframmature o pali) previste per la costruzione delle pile. Per le protezioni spondali si prevede l'utilizzo di massi legati (con funi di acciaio) di diametro $D = 1,75$ m, mentre per le protezioni in golena si prevede l'utilizzo di massi sciolti di diametro $D = 0,8$ m, individuati secondo i risultati del calcolo.

	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA II LOTTO FUNZIONALE HIRPINIA - ORSARA PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDRAULICA: MODELLO 2D CERVARO	COMMESSA IF1V	LOTTO 02 D 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 37 di 38

7 VALUTAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA

La valutazione di compatibilità idraulica viene svolta in base ai seguenti criteri:

- Compatibilità con le Norme del PAI, ai fini della sicurezza idraulica del territorio;
- Rispetto dei requisiti richiesti dalle NTC 2018, ai fini della sicurezza dell'opera.

Il PAI dell'AdB Puglia, come visto nel paragrafo 2.1, non riporta nessuna area di pericolosità idraulica per il tratto di Torrente Cervaro interessato dal viadotto in progetto; tuttavia, poiché i recenti studi dell'Autorità di Bacino (P.O. FESR 2007-2013) hanno valutato le aree allagabili del Torrente Cervaro nell'area in esame in questa sede, si è proceduto alla simulazione delle condizioni di esondazione negli scenari ante operam e post operam, al fine di verificare che non vi sia aumento di pericolosità a monte e a valle in seguito alla realizzazione dell'opera. Il confronto tra gli scenari, riportato nel paragrafo 5.2, ha mostrato che non si hanno variazioni apprezzabili delle aree allagate e dei livelli idrici.

I requisiti richiesti dalle NTC 2018 riguardano il franco sui livelli idrici della quota di sottotrave dell'impalcato e la luce minima tra le pile rispetto al filone principale della corrente. Come mostrato nel paragrafo 5.3, il franco tra livelli idrici caratteristici della piena trecentennale è superiore a 1,5 m, minimo previsto dal Manuale di Progettazione RFI (e dalle NTC 2018, con riferimento alla piena Tr 200).

Al fine poi di mantenere la configurazione dell'alveo il più possibile inalterata tra ante e post operam, sono state previste adeguate protezioni idrauliche in tutte le aree interessate dai lavori di costruzione del viadotto e per un'estensione pari agli allagamenti che si verificano con tempo di ritorno trecentennale.

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA II LOTTO FUNZIONALE HIRPINIA - ORSARA PROGETTO DEFINITIVO</p>					
<p>RELAZIONE IDRAULICA: MODELLO 2D CERVARO</p>	<p>COMMESSA IF1V</p>	<p>LOTTO 02 D 09</p>	<p>CODIFICA RI</p>	<p>DOCUMENTO ID0002 001</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 38 di 38</p>

8 BIBLIOGRAFIA

Autorità di Bacino della Puglia, “Studio per la definizione delle opere necessarie per la messa in sicurezza del reticolo idrografico pugliese”, P.O. FESR 2007-2013.

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

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

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

FHWA (1989). *Design of riprap revetment*. HEC 11, FHWA Publication Number: IP-89-016, United State Department of Transportation, Washington, DC, USA.

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

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

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

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

Melville, B.W., Raudakivi, A.J., *Effects of Foundation Geometry on Bridge Pier Scour*. J. Hydraul. Eng. , 122, pp. 203-209. 1996

Pestana, R., Matias, M., Canelas, M., Araujo, A., Roque, D., Van Zeller, E., Trigo-Teixeira, A., Ferreira, R., Oliveira, R., Heleno, S. *Calibration of 2D hydraulic inundation models in the floodplain region of the lower Tagus River*. Proc. ‘ESA Living Planet Symposium 2013’, Edinburg, UK, 9-13 Settembre 2013.

Prescrizioni generali per la progettazione di RFI (PTP).

Sheppard, D.M., Melville, B., Demir, H. (2013). *Evaluation of existing equations for local scour at bridge piers*. J. Hydraulic Eng., doi: 10.1061/ASCE_HY.1943-7900.0000800.

Studi idrogeologici, idraulici e geologici di 5 siti instabili, *Linea Catania-Messina Tratta Ali-Galati – Studio idrologico-idraulico - Relazione Idrologica*, 2010.

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