

COMMITTENTE:



DIREZIONE INVESTIMENTI
DIREZIONE PROGRAMMI INVESTIMENTI
DIRETTRICE SUD - PROGETTO ADRIATICA

DIREZIONE LAVORI:



APPALTATORE:

Mandataria

Mandanti



PROGETTAZIONE:

MANDATARIA

MANDANTI



PROGETTO ESECUTIVO

LINEA PESCARA - BARI
RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI - LESINA
LOTTI 2 e 3 - RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA

Relazione Idraulica

Modello Bidimensionale dei corsi d'acqua Saccione, Capo d'Acqua e minori alle pk 21+600, 22+800, 23+000

L'Appaltatore
Ing. Gianguido Babini

A.A. D'AGOSTINO COSTRUZIONI GENERALI S.r.l.
Il Direttore Tecnico
(Ing. Gianguido Babini)

I progettisti (il Direttore della progettazione)
Ing. Massimo Facchini

Data Dicembre 2023

firma

Data Dicembre 2023

firma



COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA / DISCIPLINA	PROGR	REV	SCALA
L I O B	0 2	E	Z Z	R I	I D 0 0 0 2	0 0 1	D	---

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato/Data
A	Prima emissione	C. Cofone	Dicembre 2022	O. Caruso	Dicembre 2022	V. Secreti	Dicembre 2022	
B	Revisione a seguito di RdV	C. Cofone	Giugno 2023	O. Caruso	Giugno 2023	V. Secreti	Giugno 2023	
C	Revisione a seguito di RdV	C. Cofone	Ottobre 2023	O. Caruso	Ottobre 2023	V. Secreti	Ottobre 2023	
D	Revisione a seguito di RdV	C. Cofone	Dicembre 2023	O. Caruso	Dicembre 2023	V. Secreti	Dicembre 2023	



MANDATARIA HUB ENGINEERING <small>CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A R.L.</small>	MANDANTI HYpro S.P.A.	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
		Relazione Idraulica	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC RI	OPERA 7 DISCIPLINA ID 00 02			PROGR 001

INDICE

1.	INQUADRAMENTO GENERALE E OBIETTIVI DELLO STUDIO	6
2.	DATI DI BASE	8
	<i>Rilievi topografici ed opere esistenti</i>	8
3.	PERICOLOSITA' IDRAULICA NELL'AREA DI STUDIO	9
4.	IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO IDRAULICO	11
	<i>Il modello di calcolo</i>	11
	<i>Equazioni base del modello</i>	12
	<i>Moto Permanente</i>	12
	<i>Moto vario</i>	17
	<i>Perdite di carico in moto vario</i>	23
	<i>Modellazione dei ponti</i>	25
	<i>Modellazione di confluenze e biforcazioni</i>	29
	<i>Lateral structure</i>	29
5.	MODELLAZIONE BIDIMENSIONALE	32
6.	CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL MODELLO	37
	<i>Parametri di scabrezza</i>	38
7.	SCENARI SIMULATI	40
	<i>Torrente Saccione</i>	41
	<i>Canale Capo D'acqua e corsi d'acqua secondari</i>	57
8.	RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE	76
	<i>Torrente Saccione</i>	76
	<i>Canale Capo D'acqua e corsi d'acqua minori</i>	86
9.	SISTEMAZIONI IDRAULICHE	97
	9.1 Verifica allo scalzamento	97
	<i>Metodo di calcolo dello scalzamento</i>	98
	<i>Calcolo della profondità di scalzamento</i>	103
	9.2 Verifica dell'erosione dell'alveo	107
	<i>Metodo di calcolo delle tensioni agenti e resistenti (Shields)</i>	110
	<i>Metodo di calcolo della Federal Highway Administration (FHWA)</i>	118
10.	COMPATIBILITA' IDRAULICA	124
11.	STUDIO FASE REALIZZATIVA	126
	<i>Modellazione idraulica Viadotto VI06 in progetto</i>	127
	<i>Modellazione idraulica Viadotto VII5 in progetto</i>	129
12.	VERIFICHE DI STABILITA' DEI RILEVATI	131
13.	DOCUMENTI E NORMATIVA DI RIFERIMENTO	137

<small>MANDATARIA</small>  <small>CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE & R.L.</small>	<small>MANDANTI</small> 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
		Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV
	LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1-1-Inquadramento dell'area.....	6
Figura 3-1. P.A.I. - Aree di pericolosità idraulica del Torrente Saccione.....	10
Figura 4-1 Schema di calcolo implicito a 4 punti.....	20
Figura 4-2 - Termini F.D.A.....	21
Figura 4-3 Termini F.D.A.	21
Figura 4-4 - Termini F.D.A.....	22
Figura 4-5 - Termini F.D.A.....	23
Figura 4-6 Sezione di ponte - Modello HEC-RAS.....	26
Figura 4-7 Lateral Structure - Modello HEC-RAS.....	30
Figura 4-8 Lateral structure - Equazioni descrittive.....	31
Figura 5-1 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.....	37
Figura 7-1. Dominio di calcolo del Bacino del Torrente Saccione.	42
Figura 7-2. Torrente Saccione: posizione delle condizioni al contorno del modello 2D.....	43
Figura 7-3. Ponte Saccione dell'A14.....	45
Figura 7-4. Ponte Saccione dell'A14, implementato nel modello bidimensionale.....	45
Figura 7-5. Attraversamenti in prossimità dello sbocco a mare del torrente Saccione.	46
Figura 7-6. Attraversamenti alla foce del torrente Saccione, implementati nel modello 2D.....	47
Figura 7-7 Viadotto di progetto VI06: implementazione in Hec-Ras.....	48
Figura 7-8. Tombini di trasparenza implementati nel modello 2D.....	49
Figura 7-9. Rilevati di approccio del calvaccaferrovia implementati nel modello 2D.....	49
Figura 7-10. Riprofilatura del canale acque medie.....	50
Figura 7-11. Sottostazione elettrica implementata nel modello 2D ed aree di affinamento della mesh.....	50
Figura 7-12. Zona Capo d'Acqua: idrografia dell'area indagata.....	57
Figura 7-13. Mesh di calcolo in zona Palude Capo D'acqua.	58
Figura 7-14. Zona Palude Capo d'Acqua: condizioni idrauliche al contorno del modello 2D.....	59
Figura 7-15. Zona Palude Capo d'Acqua: tombini dell'A14 alle pk 21+600 e 22+050.	61
Figura 7-16. Zona Palude Capo d'Acqua: tombini dell'A14 alla pk 22+800.	61
Figura 7-17. Zona Palude Capo d'Acqua: tombini dell'A14 alle pk 23+550 e 23+650.	62
Figura 7-18. Implementazione in Hec Ras del viadotto VI15, della NV18 e dei tombini di trasparenza.....	63
Figura 7-19. Viadotto VI14 sul Capo D'Acqua.....	64
Figura 7-20. Ponte e relative spalle in alveo del canale 21+600.....	64
Figura 7-21. Modello 2D - Località Capo d'Acqua: posizione della condizione al contorno di valle (CC Valle).....	74
Figura 7-22. Modello 2D - Località Capo d'Acqua: posizione della condizione CCV1.....	75
Figura 8-1. Idrogrammi di piena forniti dall' AdB per Tr 30 e Tr 200.	77
Figura 8-2 Confronto P.R.G.A. con aree di esondazione ante operam TR 30 (aree in arancione).....	78
Figura 8-3 Confronto P.R.G.A. con aree di esondazione ante operam TR 200 (aree in verde).....	78
Figura 8-4. Aree di esondazione Tr200 del Fiume Fortore.....	94
Figura 9-1 – Schematizzazione delle turbolenze e dello scavo nell'intorno di una pila circolare isolata.....	97
Figura 9-2 – Calcolo dello scalzamento in corrispondenza delle spalle.....	101
Figura 9-3 – Differenti tipologie di pile non uniformi dotate di fondazioni.....	103
Figura 9-4-Curva sperimentale di Shields.....	111
Figura 9-5 -Forze agenti su di un grano, posizionato su una sponda, impiegate nelle equazioni di equilibrio di Lane.....	113

MANDATARIA  	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	4

Figura 9-6 -S hear Stress Maps in corrispondenza del nuovo viadotto sul Torrente Saccione.	114
Figura 9-7 - Shear Stress Maps in corrispondenza del nuovo viadotto sul Canale Capo d'Acqua (VI14). .	115
Figura 9-8 - Shear Stress Maps in corrispondenza del canale alla pk 22+800 (VI15).	115
Figura 9-8 - Pila P04 con fondazione.....	122
Figura 9-8 – Estratto elaborato LI0B02EZZBZID0002002C	122
Figura 9-8 – Estratto elaborato LI0B02EZZP6ID0002106C	123
Figura 11-1 Idrogramma di piena del Torrente Saccione per T=5anni	126
Figura 11-2 Idrogramma di piena del Capo d'acqua per T=5anni	127
Figura 11-3 2. Planimetria di realizzazione di tura e condotte provvisorie del diametro DN 2000, per deflusso acque per controfosso e T. Saccione.....	128
Figura 11-4 Deviazione fosso idraulico esistente tratto compreso tra pile P10 e P11	128
Figura 11-5 Risultati della modellazione	129
Figura 11-6 Deviazione fosso idraulico esistente tratto compreso tra pile P08 e P10.....	130
Figura 11-7 Risultati della modellazione	131
Figura 12-1 RI08 (13+950) Analisi statica SLU – H= 9.0m.....	132
Figura 12-2 RI08 (13+950) Analisi statica SLU +rilevato saturo in presenza di battente idrico – H= 9.0m.....	133
Figura 12-3 RI08 (13+950) Analisi statica SLU +rilevato saturo (con livello idrico massimo) in assenza di battente – H= 9.0m.....	134
Figura 12-4 RI08 (13+950) Analisi statica SLU +rilevato saturo (con livello idrico variabile entro e fuori dal rilevato) – H= 9.0m.....	135
Figura 12-5 RI08 (13+950) Analisi sismica SLU (+kv) H= 9.0m	136
Figura 12-6 RI08 (13+950) Analisi sismica SLU (-kv) H= 9.0m.....	137

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	5

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 6-1. Tabella dei valori del coefficiente di scabrezza sulle aree 2D (Pestana et al. 2013).	39
Tabella 6-2. Valori del coefficiente di Manning per il Saccione.	40
Tabella 6-3. Valori del coefficiente di Manning per il C. Capo D'acqua e corsi d'acqua minori.	40
Tabella 7-1. Tipologie di modellazione adottate.	41
Tabella 2. Bacino del T. Saccione: portate al colmo relative ai bacini idrografici minori.	55
Tabella 3. Località Capo d'Acqua: portate al colmo per i bacini idrografici minori.	73
Tabella 8-1 – Verifica del franco idraulico del viadotto VI06 secondo le indicazioni di normativa e regolamenti di progettazione vigenti.	85
Tabella 9-1. Formulazione CSU: valori dei fattori correttivi K1, K2, K3.....	99
Tabella 9-2. Viadotto VI06 (pk 15+565, T. Saccione): dimensioni delle pile e delle spalle e variabili idrauliche.	104
Tabella 9-3. Viadotto VI13 (pk 21+575): variabili idrauliche in corrispondenza delle spalle.	104
Tabella 9-4. Viadotto VI14 (pk 21+900): dimensioni delle pile e delle spalle e variabili idrauliche.	105
Tabella 9-5. Viadotto VI15 (pk 22+800): dimensioni delle pile e delle spalle e variabili idrauliche.	105
Tabella 9-6. Viadotto VI06 (pk 15+565, T. Saccione): valori attesi della profondità di scalzamento.	107
Tabella 9-7. Viadotto VI13 (pk 21+575): valori attesi della profondità di scalzamento.....	107
Tabella 9-8. Viadotto VI14 (pk 21+900): valori attesi della profondità di scalzamento.....	107
Tabella 9-9. Viadotto VI15 (pk 22+800): valori attesi della profondità di scalzamento.....	109
Tabella 9-10. Formulazione di Shields: risultati del dimensionamento delle opere di sistemazione idraulica per il viadotto Saccione.	116
Tabella 9-11. Formulazione di Shields: risultati del dimensionamento delle opere di sistemazione idraulica per i viadotti in zona Capo d'Acqua.....	116
Tabella 9-12. Verifica del rispetto dei franchi idraulici minimi per il viadotto Saccione	117
Tabella 9-12. Verifica del rispetto dei franchi idraulici minimi per il viadotto Capo d'Acqua.....	117
Tabella 9-14. Valori di riferimento per la resistenza a tensione tangenziali massi sciolti/legati.....	118
Tabella 9-15. Valori di riferimento per la resistenza a tensione tangenziale per Materassi Reno.....	118
Tabella 9-16. Formulazione FHWA: risultati del dimensionamento delle scogliere per i viadotti VI06 (Saccione), VI13 e VI14 (zona Capo d'Acqua).....	120
Tabella 9-17. Torrente Saccione: opere di protezioni dei rilevati.	124
Tabella 9-18. Zona Palude Capo d'Acqua: opere di protezioni dei rilevati.	124

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE & R.L.	MANDANTI HYpro S.P.A.	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA								
		Relazione Idraulica	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC RI	OPERA 7 DISCIPLINA ID 00 02	PROGR 001	REV D

1. INQUADRAMENTO GENERALE E OBIETTIVI DELLO STUDIO

La tratta ferroviaria Termoli - Ripalta si sviluppa in direzione Nord – Est per circa 25 km, per metà nella regione Molise e per l'altra metà nella regione Puglia.

In Figura 1, l'inquadramento geografico dell'area di studio:



Figura 1-1-Inquadramento dell'area

La tratta oggetto di studio ricade all'interno dei bacini del fiume Biferno e del fiume Saccione che vengono attraversati dalla linea ferroviaria (rappresentata in rosso in Figura 1) in corrispondenza delle Pk 4+900 e 15+500. Le principali infrastrutture di trasporto presenti nell'area sono l'autostrada A14 (rappresentata in arancione in Figura 1) e la Strada Statale Adriatica SS 16 (rappresentata in giallo in Figura 1), i cui tracciati risultano essere in sostanziale affiancamento all'intera tratta ferroviaria. In verde è rappresentata invece la linea ferroviaria esistente.

I territori comunali interessati dal tracciato sono quelli di Termoli, Santa Maria degli Angeli, Campomarino, Cialaluca, Marina di Chieuti e Ripalta.

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D

Nei capitoli seguenti sarà illustrata la metodologia seguita per l'analisi idraulica, basata sull'uso di modelli di calcolo idraulico bidimensionale, necessari per studiare la propagazione delle esondazioni del reticolo idrografico sul territorio interessato dal progetto ferroviario in esame.

Per la sicurezza idraulica della linea ferroviaria, 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 vanno verificate per eventi di massima piena caratterizzati dai seguenti tempi di ritorno (Tr):

- Tr = 300 anni per $S \geq 10 \text{ km}^2$;
- Tr = 200 anni per $S < 10 \text{ km}^2$.

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

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** 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**.

Le opere inoltre devono rispondere a quanto previsto dal DM 14.1.2018 "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni" (par. 5.1.2.4 "Compatibilità idraulica").

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D

2. DATI DI BASE

Rilievi topografici ed opere esistenti

Gli studi idraulici sono stati sviluppati su modelli digitali del terreno, integrati da ulteriori elementi recepiti dagli Enti preposti alla tutela e salvaguardia del territorio.

In particolare, sono state condotte le seguenti attività:

1. acquisizione del DTM 20mx20m della penisola Italiana da database ISPRA per la definizione dei bacini idrologici, del DTM ad alta risoluzione (Lidar 1mx1m) dal database del Ministero dell’Ambiente unito ad un rilievo di dettaglio eseguito con volo drone e GPS nei dintorni della nuova sede ferroviaria, per le aree sottoposte a modellazione idraulica;
2. acquisizione delle cartografie del Piano assetto Idrogeologico dell’Autorità di Bacino dei fiumi Trigno, Biferno, e Minori, Saccione e Fortore;
3. esecuzione di una campagna di indagini topografiche con rilievo delle sezioni trasversali batimetriche e opere d’arte sui corsi d’acqua oggetto di studio;
4. sopralluogo fotografico delle aste fluviali.

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D

3. PERICOLOSITA' IDRAULICA NELL'AREA DI STUDIO

L'analisi condotta nel presente studio ha preso in considerazione gli strumenti di pianificazione territoriale attualmente in vigore. In particolare, è stato consultato il Progetto di Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico dei bacini interregionali del Fiume Biferno e Minori (adottato con Deliberazione del Comitato Istituzionale il 29/09/2006) e del Fiume Saccione (adottato con Deliberazione del Comitato Istituzionale il 29/09/2006).

Nella Relazione di Piano sono individuate le aree soggette a pericolosità idraulica attraverso l'individuazione, la localizzazione e la caratterizzazione degli eventi alluvionali che abbiano prodotto effetti sul territorio, in particolare danni a persone o cose, o, semplicemente, abbiano creato condizioni di disagio o allarme. Tale individuazione è un importante strumento che ha condotto alla delimitazione delle aree a potenziale rischio inondazione.

A livello normativo gli studi effettuati hanno tenuto conto anche del "Progetto di Piano di Gestione del Rischio Alluvioni" redatto per conto del distretto Idrografico dell'Appennino Meridionale di recente emanazione (dicembre 2015).

Tale ente raggruppa: Autorità di Bacino Nazionale dei Fiumi Liri-Garigliano e Volturno, Regione Abruzzo, Regione Basilicata, Regione Calabria, Regione Campania, Regione Lazio, Regione Molise, Regione Puglia. Tra i vari elaborati allegati al piano, sono pubblicate le mappe di pericolosità idraulica (PI).

Per i Fiumi Biferno e Saccione, gli aggiornamenti effettuati in fase di redazione del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni non hanno portato a sostanziali modifiche delle mappe di pericolosità idraulica omogenea rispetto a quanto rappresentato nelle tavole del Piano di Bacino.

Dagli elaborati grafici annessi relativi alle carte di pericolosità idraulica si evince come l'infrastruttura ferroviaria di progetto, in corrispondenza degli attraversamenti del Fiume Biferno e del Fiume Saccione, intercetti le perimetrazioni del Piano di Bacino e attraversi aree classificate come ad alta pericolosità idraulica PI3 (Figura 3-1).

Le Norme Tecniche di Attuazione del Progetto di Piano Stralcio del l'Assetto Idrogeologico del Bacini interregionali dei Fiumi Biferno e Saccione classificano le aree di pericolosità come:

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	10

- a) Aree a pericolosità idraulica alta (PI3): aree inondabili per tempo di ritorno minore o uguale a 30 anni;
- b) Aree a pericolosità idraulica moderata (PI2): aree inondabili per tempo di ritorno maggiore di 30 e minore o uguale a 200 anni;
- c) Aree a pericolosità idraulica bassa (PI1): aree inondabili per tempo di ritorno maggiore di 200 e minore o uguale a 500 anni.

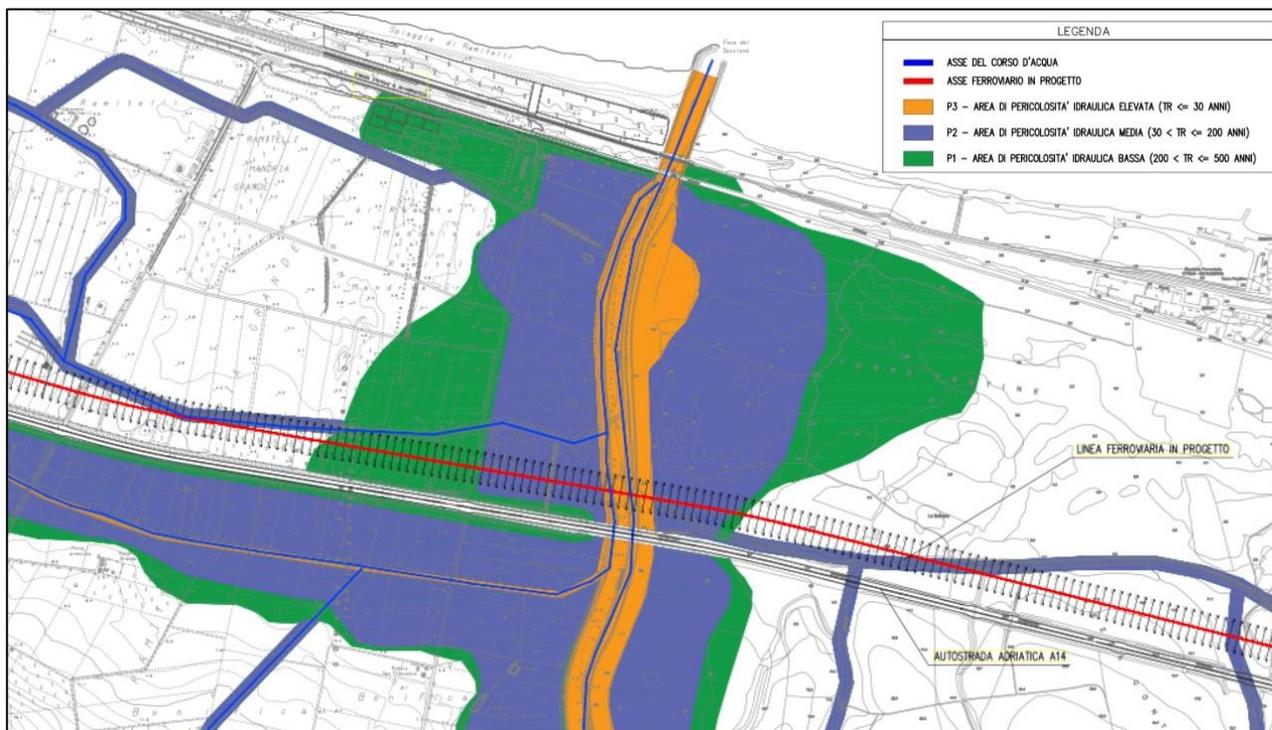


Figura 3-1. P.A.I. - Aree di pericolosità idraulica del Torrente Saccione.

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	11

4. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO IDRAULICO

Il modello di calcolo

Il codice di calcolo HEC-RAS è un programma sviluppato dal Corpo degli ingegneri dell'esercito U.S.A. presso l'Hydrologic Engineering Centre (HEC) utilizzato per la modellazione mono e bidimensionale di reti di canali naturali e artificiali, River Analysis System (RAS).

Il software HEC RAS permette di:

- Effettuare simulazioni in condizioni stazionarie (steady flow) in corrente lenta, veloce o mista, calcolando i corrispettivi profili di corrente.
- Effettuare simulazioni in condizioni non stazionarie (unsteady flow).
- Effettuare simulazioni per la classificazione e quantificazione di processi di idrodinamica del trasporto solido relativi a fenomeni di erosione o deposizione generalizzata e/o localizzata.

Con la versione 5.0.5 di HEC RAS. è stata aggiunta la possibilità di effettuare simulazioni idrauliche bidimensionali all'interno dell'analisi in moto vario. E' possibile ora eseguire sia simulazioni con modelli monodimensionali e bidimensionali in moto vario, sia modelli monodimensionali integrati con modelli 2D nelle aree inondabili.

Di seguito vengono riportati degli esempi di come le Aree 2D implementate nella nuova versione possono essere utilizzate come supporto alla modellazione di HEC-RAS:

- Dettagliata modellazione 2D del canale;
- dettagliata modellazione 2D del canale e delle aree golenali;
- combinazione tra canale 1D e aree golenali 2D;
- combinazione tra canale 1D e aree inondabili esterne agli argini;
- connessione diretta del corpo idrico 1D all'interno delle aree inondabili 2D;

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D

- connessione diretta tramite l'ausilio di strutture idrauliche tra aree inondabili 2D e aree di accumulo 1D;
- aree inondabili 2D multiple all'interno di una singola geometria;
- connessione diretta multipla di aree 2D con strutture idrauliche;
- simulazione dettagliata delle breccie in presenza di dighe;
- simulazione dettagliata delle breccie in presenza di argini;
- modellazione mono e bidimensionale in grado di gestire moto supercritico e subcritico e passaggio attraverso risalti idraulici.

Equazioni base del modello

Moto Permanente

La procedura di calcolo di HEC-RAS si basa sulla soluzione delle equazioni dell'energia secondo lo schema monodimensionale, andando ad analizzare solamente la componente della velocità diretta secondo la direzione prevalente del moto (longitudinale).

Il calcolo dei profili di corrente viene effettuato all'interno del software attraverso la risoluzione dell'equazione dell'energia tra due sezioni consecutive, mediante un processo iterativo (standard step method).

$$Y_2 + Z_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

Dove:

- Y_1, Y_2 sono i tiranti idrici;
- Z_1, Z_2 sono le quote geodetiche;
- V_1, V_2 sono le velocità medie;
- a_1, a_2 sono i coefficienti di ragguglio delle altezze cinetiche;
- g è l'accelerazione di gravità;

MANDATARIA  CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A R.L.	MANDANTI 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA								
		Relazione Idraulica	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC RI	OPERA 7 DISCIPLINA ID 00 02		PROGR 001

- h_e è la perdita di carico totale nel tratto considerato;

Il valore di h_e è definito dalla somma delle perdite dovute all'attrito (perdite distribuite) e delle perdite di carico dovute alla contrazione o all'espansione della vena liquida (perdite localizzate).

$$h_e = L S_f + C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right|$$

con:

- L la lunghezza del tratto fluviale mediata sulle portate, calcolata come segue

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

Dove il pedice lob , rob e ch indica la golena sinistra, destra e il canale centrale, relativamente alle lunghezze e alle portate;

- S_f è la cadente della linea dei carichi totali;
- C è il coefficiente di espansione/contrazione compreso tra 0 e 1, che tiene conto delle perdite di carico dovute all'espansione e alla contrazione della vena fluida.

Tramite la formula di Chezy è possibile calcolare il valore delle conveyance considerando le singole porzioni di flusso (in golena destra e sinistra e nel canale centrale).

$$Q = K S_f^{1/2} \quad \text{e} \quad K = \frac{1}{n} A R^{2/3}$$

con:

- K conveyance espressa in m^3/s ;
- n coefficiente di scabrezza di Manning espressa in $m^{1/3}/s$;
- A area relativa al deflusso espressa in m^2 ;

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D

- R raggio idraulico espresso in m .

Il valore della conveyance viene calcolato per le singole sezioni di deflusso, ottenendo quindi un valore totale della stessa, come somma dei contributi di K_{rob} , K_{ob} e K_{ch} .

Infine il coefficiente di raggualgio α viene calcolato considerando che l'altezza cinetica deriva dal valore medio pesato sulla portata sulle singole sezioni (golenali e centrale)

$$\frac{\alpha \bar{v}^2}{2g} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \frac{v_i^2}{2g}}{Q_{tot}} \quad \text{con} \quad \alpha = \frac{\sum_{i=1}^n v_i^2 Q_i}{Q_{tot} \bar{v}^2}$$

Il valore relativo all'altezza della superficie libera incognita viene determinato in maniera iterativa a partire dai dati assegnati di portata e dalle caratteristiche geometriche delle singole sezioni.

La procedura di calcolo prevede la risoluzione dell'equazione dell'energia e delle perdite di carico in maniera iterativa, come di seguito descritto:

1. Scelta di un valore di primo tentativo per la quota della superficie libera $WS1$, in corrispondenza della sezione di monte per correnti lente, o di valle per correnti veloci.
2. Calcolo a partire dal valore definito al punto 1, dei corrispondenti valori di conveyance totale e di altezza cinetica;
3. Stima di Sf e soluzione dell'equazione delle perdite di carico per il calcolo delle perdite di carico totali h_e ;
4. Soluzione, a partire dai valori ottenuti al passo 2 e 3, dell'equazione dell'energia per il calcolo della superficie libera $WS2$;
5. Confronto fra il valore di $WS2$ calcolato ed il valore assunto al punto 1 e reiterazione dei passi da 1 a 5 fino al raggiungimento della convergenza, definita per default da una differenza fra i due valori inferiore a 0,003 m (o qualsiasi altra tolleranza definibile dall'utente).

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D

La scelta del valore dell'altezza della superficie libera di partenza è effettuata con metodi che variano fra la prima e le successive iterazioni: per il primo tentativo si adotta un valore ottenuto dalla proiezione dell'altezza calcolata alla sezione precedente; alla seconda iterazione il valore di primo tentativo è incrementato del 70% dell'errore ($WS_{calcolata} - WS_{assunta}$) relativo al primo step; infine il terzo tentativo e seguenti sono basati sul metodo "secante", che proietta il valore della differenza fra quota calcolata e quota assunta ai due tentativi precedenti, secondo la relazione:

$$WS_i = WS_{i-2} - Err_{i-2} \cdot \frac{Err_{ass}}{Err_{diff}}$$

dove:

- WS_i = valore di WS assunto al passo i-esimo
- WS_{i-1} = valore di WS assunto nella (i-1)-esima iterazione ;
- WS_{i-2} = valore di WS assunto nella (i-2)-esima iterazione ;
- Err_{i-2} = errore relativo alle due iterazioni precedenti ($WS_{calcolato, i-2} - WS_{i-2}$) ;
- $Err_{ass} = WS_{i-2} - WS_{i-1}$;
- $Err_{diff} = WS_{i-1} - WS_{calcolato, i-1} + Err_{i-2}$

La massima variazione di WS tra un'iterazione e l'altra è del 50% e il numero massimo delle iterazioni che il programma effettua è 20. Nei casi in cui non si arriva ad un bilanciamento prima di tale numero di iterazioni, il programma calcola l'altezza critica e verifica se l'errore connesso alla superficie libera di minimo errore è inferiore ad una prefissata tolleranza. Se ciò accade viene verificato inoltre se tale superficie risulta essere ben posta rispetto all'altezza critica calcolata, ovvero maggiore dell'altezza critica in caso di corrente lenta e minore dell'altezza critica in caso di corrente veloce. Superato quest'ulteriore test il programma assume proprio tale valore come output del processo iterativo.

Solitamente tale problema (non bilanciamento dell'equazione dell'energia) è da imputare ad un insufficiente numero di sezioni. Quando invece la superficie libera risulta essere mal posta rispetto all'altezza critica, il programma determina l'altezza critica mediante un processo iterativo dove viene assunto un valore di WS pari al minimo del carico totale.

MANDATARIA  CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A R.L.	MANDANTI 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA								
		Relazione Idraulica	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC RI	OPERA 7 DISCIPLINA ID 00 02	PROGR 001	REV D

Nei casi in cui vi sia passaggio per l'altezza critica, quindi in presenza di fenomeni che producono transizione corrente lenta-veloce o viceversa il software HEC-RAS utilizza l'equazione dei momenti, in quanto l'equazione dell'energia, basandosi sull'ipotesi di flusso gradualmente variato, risulta essere non applicabile. Di seguito viene riportata l'equazione dei momenti applicata nel programma tra due sezioni consecutive 1 e 2.

$$P_2 - P_1 + W_x - F_f = Q \cdot \rho \cdot \Delta V_x$$

Dove i termini:

- P_1 e P_2 rappresentano il contributo dovuto alla pressione idrostatica;
- W_x è il contributo relativo alla forza d'inerzia nella direzione del moto;
- F_f rappresenta la forza d'attrito
- $Q \cdot \rho \cdot \Delta V_x$ è la variazione di quantità di moto, con ΔV_x variazione del campo di velocità tra la sezione 1 e la 2 e ρ densità dell'acqua.

Esplicitando i termini sopra riportati si arriva all'equazione dei momenti utilizzata dal software:

$$\frac{\beta_2 \cdot Q_2^2}{g \cdot A_2} + A_2 \cdot Y_2 + \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) \cdot L \cdot S_0 - \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) \cdot L \cdot S_f = \frac{\beta_1 \cdot Q_1^2}{g \cdot A_1} + A_1 \cdot Y_1$$

Nell'equazione sopra riportata il termine S_f indica la cadente della linea dei carichi totali.

In corrispondenza di una sezione la cadente media S_f viene calcolata con l'equazione di Manning per moto uniforme

$$S_f = \left(\frac{Q}{K} \right)^2$$

Il valore della cadente media S_f viene calcolato mediante quattro modalità diverse proposte all'interno del software:

1. Media delle conveyance tra le sezioni 1 e 2 assumendo $S_f = S_f$ (opzione di default)

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	17

$$\bar{S}_f = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2$$

2. Media aritmetica della cadente S_f tra le sezioni 1 e 2

$$\bar{S}_f = \left(\frac{S_{f,1} + S_{f,2}}{2} \right)$$

3. Media geometrica della cadente S_f tra le sezioni 1 e 2

$$\bar{S}_f = \sqrt{S_{f,1} \cdot S_{f,2}}$$

4. Media armonica della cadente S_f tra le sezioni 1 e 2

$$\bar{S}_f = \left(\frac{S_{f,1} \cdot S_{f,2}}{S_{f,1} + S_{f,2}} \right)$$

Moto vario

Per la modellazione in moto vario vengono adottate le seguenti ipotesi, ottenendo a partire dalle equazioni differenziali di continuità e di conservazione della massa per moto monodimensionale, le equazioni di De Saint Venant.

- La distribuzione delle pressioni è di tipo idrostatico (ipotesi valida se le linee di flusso non presentano curvatura accentuata);
- La pendenza del fondo alveo è minima, tale che la sezione trasversale normale alla corrente si confonda con la sezione verticale;

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00 02	001	D	18

- Alveo prismatico, laddove le variazioni nella sezione trasversale e nella pendenza di fondo possono essere prese in considerazione approssimando il corso d'acqua con una serie di tratti prismatici;
- Le perdite di carico possono essere espresse tramite una delle classiche formule adottate per il moto uniforme (si utilizza l'equazione di Manning); con questa ipotesi si assume che in regime di moto vario ad una data velocità V della corrente si abbiano le stesse perdite di carico che si avrebbero in moto uniforme con la stessa velocità;
- La velocità e le accelerazioni lungo la verticale sono trascurabili rispetto alle analoghe grandezze in direzione del moto;
- Le variazioni della densità del fluido sono trascurabili.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_{lat} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial Q}{\partial x} + S_f \right) = 0$$

Nel caso di alvei a sezione composta le aree golenali esterne al canale vengono considerate come aree di accumulo o di espansione. Quindi, per i due flussi vengono sviluppate le equazioni di continuità e di conservazione della quantità di moto ipotizzando che la WS sia definita da un'unica superficie orizzontale in modo tale che lo scambio di quantità di moto tra il channel e le aree golenali (foodplain) sia trascurabile e la portata sia distribuita nell'intera sezione.

La portata che defluisce all'interno del channel vale:

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	19

$$Q_c = \frac{K_c}{K_c + K_f} Q$$

$$K_c = \frac{1}{n} \cdot A_c \cdot R_c^{2/3}$$

$$K_f = \frac{1}{n} \cdot A_f \cdot R_f^{2/3}$$

I pedici c ed f indicano rispettivamente l'alveo centrale e l'area golenale.

L'unione delle equazioni per il canale e per le aree golenali viene attuata mediante un coefficiente β che mette in relazione i termini convettivi.

$$\beta = \frac{V_c^2 A_c + V_f^2 A_f}{V^2 A} = \frac{V_c Q_c + V_f Q_f}{Q A}$$

Di seguito vengono riportate le equazioni di De Saint Venant in forma differenziale:

$$\Delta Q + \frac{\Delta A_c}{\Delta t} x_e + \frac{\Delta A_f}{\Delta x_f} x_f + \frac{\Delta S}{\Delta t} x_f - \bar{Q}_{lat} = 0$$

$$\frac{\Delta(Q_c \Delta x_c + Q_f \Delta x_f)}{\Delta t \Delta x_e} + \frac{\Delta(QV\beta)}{\Delta x_e} + g\bar{A} \left(\frac{\Delta z}{\Delta x_e} + \bar{S}_f \right) = 0$$

dove Δx_e è l'equivalent flow path , cioè un contorno bagnato equivalente dove vengono considerati i contributi di resistenza generati dalle golene laterali sul flusso.

Nell'ambito del software HEC-RAS, la risoluzione del sistema non lineare di equazioni differenziali viene sviluppata mediante la linearizzazione proposta da Preissmann-Cunge-Chen mediante uno schema di calcolo implicito a 4 punti (box scheme), illustrato in figura:

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	20

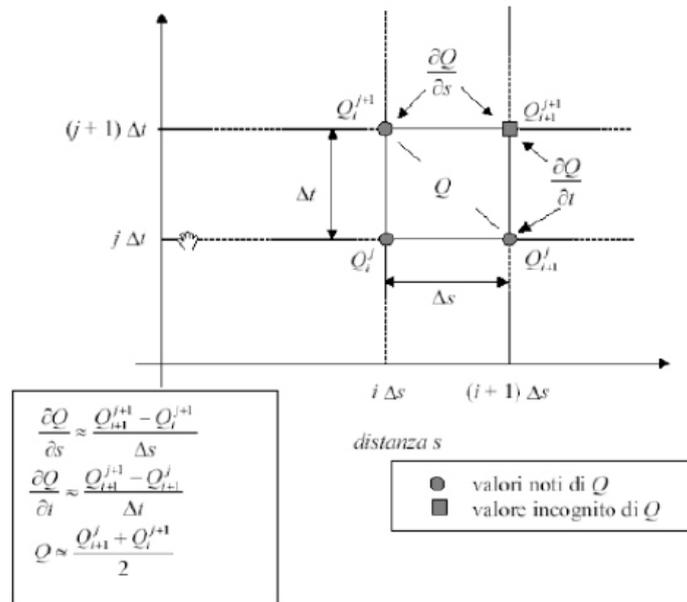


Figura 4-1 Schema di calcolo implicito a 4 punti

Le equazioni di bilancio della massa e della quantità di moto vengono scritte come:

$$CQ1_j \Delta Q_j + CZ1_j \Delta z_j + CQ2_j \Delta Q_{j+1} + CZ2_j \Delta Z_{j+1} = CB_j$$

$$MQ1_j \Delta Q_j + MZ1_j \Delta z_j + MQ2_j \Delta Q_{j+1} + MZ2_j \Delta Z_{j+1} = MB_j$$

Avendo diviso ogni tronco fluviale in N-1 tratti con 2N incognite (Q e Z negli N nodi) e 2N-2 equazioni.

L'analisi di stabilità della soluzione con Von Neumann mostra che lo schema implicito è teoricamente incondizionatamente stabile per $0,5 < \theta \leq 1$, condizionatamente stabile per $\theta = 0,5$ e instabile per $\theta < 0,5$.

Di seguito vengono illustrate le tabelle riassuntive dove sono stati riportati i termini presenti nelle equazioni che descrivono il moto vario con le loro corrispondenti approssimazioni inserite nella formulazione alle differenze finite.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	21

Term	Finite Difference Approximation
ΔQ	$(Q_{j+1} - Q_j) + \theta(\Delta Q_{j+1} - \Delta Q_j)$
$\frac{\partial A_c}{\partial t} \Delta x_c$	$0.5 \Delta x_{c_j} \frac{\left(\frac{dA_c}{dz}\right)_j \Delta z_j + \left(\frac{dA_c}{dz}\right)_{j+1} \Delta z_{j+1}}{\Delta t}$
$\frac{\partial A_f}{\partial t} \Delta x_f$	$0.5 \Delta x_{f_j} \frac{\left(\frac{dA_f}{dz}\right)_j \Delta z_j + \left(\frac{dA_f}{dz}\right)_{j+1} \Delta z_{j+1}}{\Delta t}$
$\frac{\partial S}{\partial t} \Delta x_f$	$0.5 \Delta x_{f_j} \frac{\left(\frac{dS}{dz}\right)_j \Delta z_j + \left(\frac{dS}{dz}\right)_{j+1} \Delta z_{j+1}}{\Delta t}$

Figura 4-2 - Termini F.D.A.

Term	Finite Difference Approximation
$\frac{\partial(Q_c \Delta x_c + Q_f \Delta x_f)}{\partial t \Delta x_c}$	$\frac{0.5}{\Delta x_c \Delta t} (\partial Q_c \Delta x_{c_j} + \partial Q_f \Delta x_{f_j} + \partial Q_{c,j+1} \Delta x_{c_j} + \partial Q_{f,j+1} \Delta x_{f_j})$
$\frac{\Delta \beta VQ}{\Delta x_j}$	$\frac{1}{\Delta x_j} [(\beta VQ)_{j+1} - (\beta VQ)_j] + \frac{\theta}{\Delta x_j} [(\beta VQ)_{j+1} - (\beta VQ)_j]$
$g \bar{A} \frac{\Delta z}{\Delta x_c}$	$g \bar{A} \left[\frac{z_{j+1} - z_j}{\Delta x_j} + \frac{\theta}{\Delta x_j} (\Delta z_{j+1} - \Delta z_j) \right] + \theta g \Delta \bar{A} \frac{(z_{j+1} - z_j)}{\Delta x_j}$
$g \bar{A} (\bar{S}_r + \bar{S}_c)$	$g \bar{A} (\bar{S}_r + \bar{S}_c) + 0.5 g \bar{A} (\Delta S_{c,j+1} + \Delta S_c) + (\Delta S_{f,j+1} + \Delta S_f) + 0.5 g (\bar{S}_c + \bar{S}_c) (\Delta A_j + \Delta A_{j+1})$
\bar{A}	$0.5 (A_{j+1} + A_j)$
\bar{S}_r	$0.5 (S_{0,j+1} + S_0)$
∂A_j	$\left(\frac{dA}{dz}\right)_j \Delta z_j$
∂S_j	$\left(\frac{-2S_r}{K} \frac{dK}{dz}\right)_j \Delta z_j + \left(\frac{2S_r}{Q}\right)_j \Delta Q_j$
$\partial \bar{A}$	$0.5 (\Delta A_j + \Delta A_{j+1})$

Figura 4-3 Termini F.D.A.

LINEA PESCARA – BARI

**RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA
LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA**

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA	PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID 00 02	001	D	22

Coefficient	Value
$CQ1_j$	$\frac{-\theta}{\Delta x_{0j}}$
$CZ1_j$	$\frac{0.5}{\Delta \Delta x_{0j}} \left[\left(\frac{dA_c}{dz} \right)_j \Delta x_{0j} + \left(\frac{dA_r}{dz} + \frac{dS}{dz} \right)_j \Delta x_{0j} \right]$
$CQ2_j$	$\frac{\theta}{\Delta x_{0j}}$
$CZ2_j$	$\frac{0.5}{\Delta \Delta x_{0j}} \left[\left(\frac{dA_c}{dz} \right)_{j+1} \Delta x_{0j} + \left(\frac{dA_r}{dz} + \frac{dS}{dz} \right)_{j+1} \Delta x_{0j} \right]$
CB_j	$-\frac{Q_{j+1} - Q_j}{\Delta x_{0j}} + \frac{Q_l}{\Delta x_{0j}}$

Figura 4-4 - Termini F.D.A.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA	PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID 00 02	001	D	23

Term	Value
MQ1 _j	$0.5 \frac{\Delta x_{qj} \phi_j + \Delta x_{qj}(1-\phi_j)}{\Delta x_{qj} \Delta t} - \frac{\beta_j V_j \theta}{\Delta x_{qj}} + \theta \frac{gA}{Q_j} (S_{qj} + S_{hj})$
MZ1 _j	$\frac{-gA\theta}{\Delta x_{qj}} + 0.5g(z_{j+1} - z_j) \left(\frac{dA}{dz} \right)_j \left(\frac{\theta}{\Delta x_{qj}} \right) - g\theta A \left[\left(\frac{dK}{dz} \right)_j \left(\frac{S_{qj}}{K_j} \right) + \left(\frac{dA}{dz} \right)_j \left(\frac{S_{hj}}{A_j} \right) \right] + 0.50g \left(\frac{dA}{dz} \right)_j (\bar{S}_r + \bar{S}_b)$
MQ2 _j	$0.5 \left[\Delta x_{qj} \phi_{j+1} + \Delta x_{qj}(1-\phi_{j+1}) \right] \left(\frac{1}{\Delta x_{qj} \Delta t} \right) + \beta_{j+1} V_{j+1} \left(\frac{\theta}{\Delta x_{qj}} \right) + \frac{\theta gA}{Q_{j+1}} (S_{qj+1} + S_{hj+1})$
MZ2 _j	$\frac{gA\theta}{\Delta x_{qj}} + 0.5g(z_{j+1} - z_j) \left(\frac{dA}{dz} \right)_{j+1} \left(\frac{\theta}{\Delta x_{qj}} \right) - \theta gA \left[\left(\frac{dK}{dz} \right)_{j+1} \left(\frac{S_{qj+1}}{K_{j+1}} \right) + \left(\frac{dA}{dz} \right)_{j+1} \left(\frac{S_{hj+1}}{A_{j+1}} \right) \right] + 0.50g \left(\frac{dA}{dz} \right)_{j+1} (\bar{S}_r + \bar{S}_b)$
MB _j	$- \left[(\beta_{j+1} V_{j+1} Q_{j+1} - \beta_j V_j Q_j) \left(\frac{1}{\Delta x_{qj}} \right) + \left(\frac{gA}{\Delta x_{qj}} \right) (z_{j+1} - z_j) + gA (\bar{S}_r + \bar{S}_b) \right]$

Figura 4-5 - Termini F.D.A.

Perdite di carico in moto vario

Per la determinazione delle perdite di carico distribuite, come visto per il moto permanente, si risolve l'equazione di Chezy andando a tener conto delle diverse scabrezze tra l'alveo centrale, channel, e le due aree golenali, right e left overbank.

$$Q = K \cdot S_f^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} S_f^{1/2}$$

Il valore di conveyance totale è dato dalla somma dei singoli contributi relativi a channel, right overbank e left overbank.

Riguardo alle perdite di carico concentrate, il programma HEC-RAS considera una contrazione ogni volta che l'altezza cinetica della sezione di monte risulta maggiore di quella della sezione più a valle, viceversa un'espansione. Le perdite concentrate vengono espresse dalla seguente equazione:

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A R.L.	MANDANTI HYpro S.P.A.	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA								
		Relazione Idraulica	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC RI	OPERA 7 DISCIPLINA ID 00 02		PROGR 001

$$h_{ce} = C \left| \frac{a_1 V_1^2}{2g} - \frac{a_2 V_2^2}{2g} \right|$$

dove C è il coefficiente di contrazione/espansione ed i pedici 1 e 2 sono relativi alla sezione di monte ed alla sezione di valle.

Le perdite di carico concentrate si hanno soprattutto in corrispondenza di ostacoli al deflusso, ovvero nel caso di ponti, dighe e altre particolarità idrauliche, per il calcolo delle quali sono stati incorporati gli stessi codici di calcolo sviluppati nel modulo relativo al moto permanente.

Il programma calcola le perdite di carico come somma di tre contributi: le perdite dovute alla contrazione e all'espansione del flusso rispettivamente a monte e a valle della struttura e una perdita in corrispondenza della struttura.

Quest'ultima viene calcolata, nel caso particolare dei ponti, tramite i metodi seguenti:

- Energy Method, per i casi in cui il livello idrico rimane al di sotto della quota minima di intradosso (low cord); il programma risolve l'equazione di bilancio energetico tra le sezioni a monte ed a valle del ponte, il calcolo avviene sottraendo all'area contribuente al deflusso le zone occupate dalle strutture del ponte ed aggiungendo le superfici del ponte a contatto con l'acqua nella perimetrazione del contorno bagnato;
- Pressure and Weir flow method, che prevede di considerare il ponte in pressione non appena il livello idrico raggiunge una percentuale prefissata dell'altezza delle aperture; quando il livello idrico è superiore al low cord nella sezione di monte, il programma sceglie una modellazione del comportamento idrico come deflusso attraverso una luce a battente (libero o rigurgitato a seconda che il livello idrico sia più basso o più alto del low cord nella sezione di valle);

$$Q = C_d A_b \sqrt{2g \left(Y_3 - \frac{Z}{3} + a_3 \frac{V_3^2}{2g} \right)}$$

dove Q è il flusso totale attraverso il ponte, Cd è il coefficiente di flusso, Abu è l'area della sezione di monte del ponte al netto delle zone occupate dal ponte, Y3 il tirante idrico nella

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D

sezione subito a monte del ponte, Z è la massima distanza tra la quota del low cord e la profondità media della sezione di monte del ponte. Quando la quota del pelo idrico supera, invece, anche il livello di high cord (quota di impalcato del ponte), si usa l'equazione per gli stramazzi liberi o rigurgitati:

$$Q = \sqrt{2g} C_d L H^{3/2}$$

dove il valore del coefficiente C_d si assume pari a 1,7 se lo sfioro è libero e viene ridotto in base alla sommergenza percentuale se il deflusso è rigurgitato.

Modellazione dei ponti

I ponti sono elementi di singolarità rispetto alla normale geometria fluviale causa di contrazioni ed espansioni della vena fluida e conseguente perdite di carico.

Per tale motivo all'interno del software HEC-RAS la presenza di tali infrastrutture viene modellata mediante l'inserimento di quattro sezioni:

- La sezione 1, ubicata a valle del ponte, a una distanza pari ad almeno quattro volte il semi-restringimento causato dal ponte nella sezione 2 con le spalle e le eventuali pile;
- Le sezioni 2 e 3 ubicate rispettivamente subito a valle e subito a monte del ponte;
- La sezione 4, ubicata a monte del ponte, a una distanza pari almeno al semirestringimento causato dal ponte nella sezione 3.

Questo tipo di modellazione permette infatti di tenere conto del fenomeno di contrazione e espansione della vena liquida a monte e a valle del restringimento della sezione generato dalla presenza dell'infrastruttura.

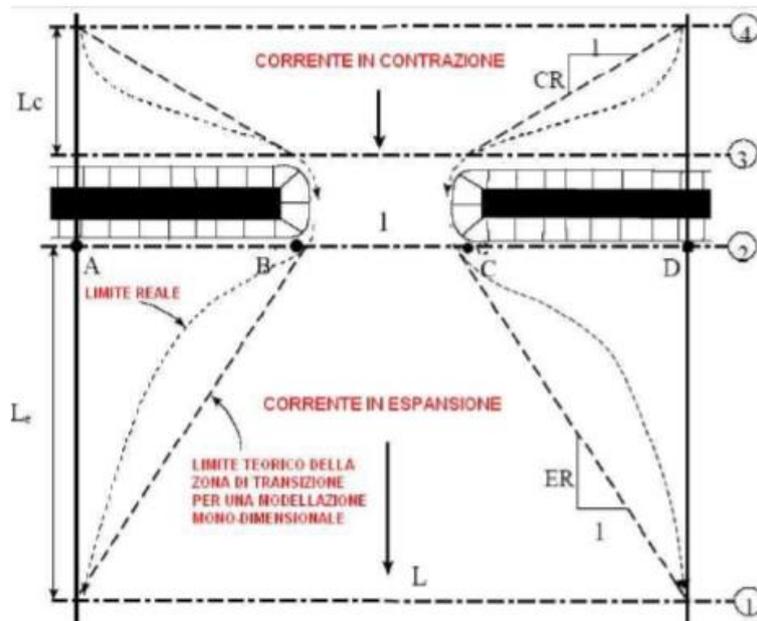


Figura 4-6 Sezione di ponte - Modello HEC-RAS

All'interno della sezione dedicata alla modellazione dei ponti vi è una finestra per l'inserimento della geometria nella quale si richiede:

- La descrizione dell'impalcato: per ogni valore di y inserito si devono fornire le quote corrispondenti dei punti sull'intradosso (low cord) e sull'estradosso (high cord);
- La descrizione delle pile (pier): se sono presenti pile in alveo, va specificato il loro numero, l'ordinata corrispondente all'asse e gli spessori alle varie quote sotto l'impalcato.

Per quanto riguarda le modalità di approccio alla simulazione il software HEC-RAS permette di effettuare una modellazione idraulica nelle seguenti situazioni di flusso:

- Low flow: si verifica quando il flusso che attraversa il ponte avviene come in un canale aperto, con la superficie libera al di sotto del punto più alto dell'intradosso del ponte. I metodi di calcolo utilizzabili sono: equazione dell'energia, equazione dei momenti, metodo di Yarnell e metodo WSPRO.

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D

- Weir flow: s'innesca quando la superficie libera raggiunge la quota di estradosso del ponte. Vengono applicate nel calcolo le classiche equazioni delle luci a stramazzo;
- Pressure flow: avviene quando la superficie libera supera la quota di intradosso del ponte. HEC-RAS assume nel calcolo l'equazione più appropriata tra quelle disponibili per descrivere il flusso attraverso la luce del ponte.
- High flow: si verifica quando il ponte risulta fortemente sommerso; il programma in questo caso applica automaticamente l'equazione dell'energia.

Nel caso di low flow il programma differenzia tre casi, a seconda che la corrente sia sempre lenta (subcritica), mista o sempre veloce (super critica).

Nel primo caso il programma dà la possibilità di scegliere 4 metodi di soluzione differenti:

1. Equazione dell'energia (metodo standard);
2. Bilancio della quantità di moto: il bilancio avviene tra le sezioni 2 e 3 in tre step successivi. In un primo momento fra la sezione 2 e la sezione di valle interna al ponte, quindi fra valle-ponte e monte-ponte, infine tra la sezione a monte interna al ponte e la sezione 3.
3. Equazione di Yarnel:

$$\frac{\Delta Y}{Y_0} = k_2(k_2 - 0.6 + 5 Fr^2) \left[1 - \frac{b}{b_0} + 15 \left(1 - \frac{b}{b_0} \right)^4 \right] Fr^2$$

dove:

- ΔY è il rigurgito provocato dalla presenza delle pile del ponte tra le sezioni 2 e 3;
- b_0 , Y_0 sono rispettivamente la larghezza e l'altezza del corso d'acqua in condizioni indisturbate (canale a sezione rettangolare);
- b è la larghezza della sezione ristretta;

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D

- Fr è il numero di Froude;
 - k_2 è un coefficiente tabellato che tiene conto della geometria delle pile del ponte e del suo effetto sulle modifiche al deflusso;
4. Metodo FHWA WSPRO: consiste nella soluzione iterativa dell'equazione dell'energia fra le sezioni di entrata (1) e di uscita (4) del ponte (sezioni in cui le linee di flusso sono approssimativamente parallele). L'equazione è risolta in più passi fra le sezioni 1-2, 2-3, 3-4. Di seguito viene riportata l'equazione del metodo WSPRO:

$$h_4 + \frac{a_4 V_4^2}{2g} = h_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_{L4-1}$$

con:

- h_1 , h_4 sono le quote della superficie libera;
- h_{L4-1} rappresenta la perdita di carico che viene calcolata di volta in volta tra le sezioni. Le perdite vengono valutate tramite il coefficiente di scabrezza n e i coefficienti di contrazione/espansione.

Nel caso di weir flow il programma utilizzerà le equazioni delle luci a stramazzo. Se il pelo libero raggiunge altezze molto elevate il programma riduce automaticamente la quantità di flusso, riducendo il coefficiente di sbarramento (weir coefficient) in base all'ammontare della sommergenza raggiunta. Quando il ponte diventa altamente sommerso, il programma passa automaticamente al calcolo delle perdite di carico utilizzando l'equazione dell'energia.

Il momento in cui il programma passa all'utilizzo di tale equazione può essere modificato dall'utente. Il caso di pressure flow avviene quando la superficie libera supera la quota di intradosso del ponte. Una volta che il flusso entra in contatto con il lato a monte del ponte, nella zona si verifica un ristagno. In questo caso il programma gestisce due casi: il primo è quando solo il lato a monte del ponte è a contatto con l'acqua e il secondo è quando il ponte viene completamente sommerso. Nel primo caso il programma utilizza il metodo FHWA, nel secondo utilizza le equazioni delle luci a stramazzo. Il programma inizia il controllo del pressure flow quando la linea dell'energia supera la massima elevazione del low chord. La risposta del pressure flow viene comparata a quella del

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D

low flow e la maggiore delle due viene considerata. L'utente ha la possibilità di indicare al programma di utilizzare la superficie libera, invece di quella dell'energia, per attivare il calcolo del flusso di pressione.

Modellazione di confluenze e biforcazioni

In presenza di confluenze e biforcazioni, denominate junction nel programma, il software HEC-RAS determina i livelli idrici nei vari tronchi con un metodo energetico basato sull'equazione di Bernoulli rispettando la condizione di continuità delle portate tra le due aste fluviali in corrispondenza dei nodi:

$$\sum_{i=1}^l S_{gi} Q_i = 0$$

con:

- l numero di rami connessi alla junction;
- S_{gi} è un coefficiente pari a ± 1 a seconda che la portata sia entrante o uscente;
- Q_i rappresenta la portata nei vari rami connessi alla junction;

e la condizione di continuità dei livelli $z_k = z_c$, dove z_k è il livello nel ramo di analisi mentre z_c è il livello nella junction in esame.

Lateral structure

All'interno del software di calcolo HEC-RAS è possibile modellare la presenza di sbarramenti laterali e luci a battente. Le lateral structures, come verrà più ampiamente descritto in seguito possono essere utilizzate come strutture di collegamento tra l'area monodimensionale in alveo e le aree inondabili esterne con struttura bidimensionale. La rappresentazione geometrica delle lateral structures prevede la presenza di almeno una sezione a monte e una sezione a valle di quest'ultima. La sezione a monte può essere collocata sia in corrispondenza dell'inizio della lateral structure che leggermente prima, stesso discorso ovviamente vale per la sezione di valle che può essere posizionata anche più avanti.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	30

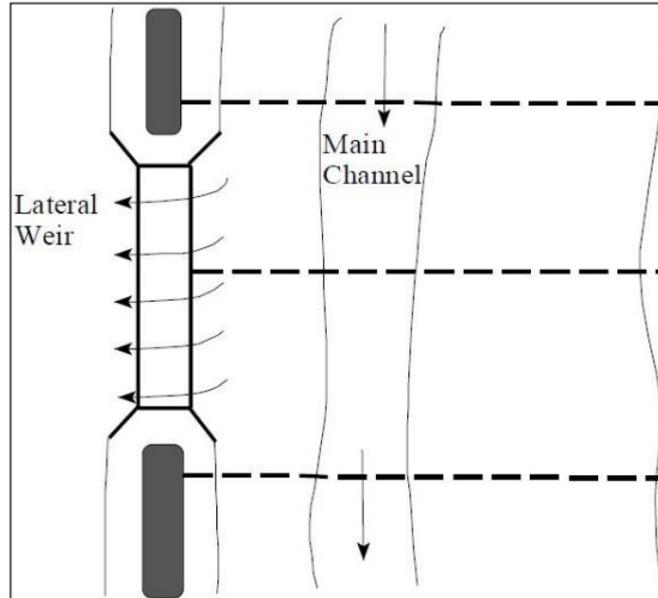


Figura 4-7 Lateral Structure - Modello HEC-RAS

Come mostrato nella figura seguente, sia la superficie dell'acqua che il terreno presentano una determinata pendenza dovendo quindi andare a derivare l'equazione dello stramazzo laterale. In figura vengono indicate l'equazione della superficie idrica e del terreno laddove le costanti a_{ws} e a_w rappresentando il coefficiente angolare delle due equazioni, mentre le variabili C_{ws} e C_w sono le costanti che rappresentano i livelli iniziali.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA	PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID 00 02	001	D	31

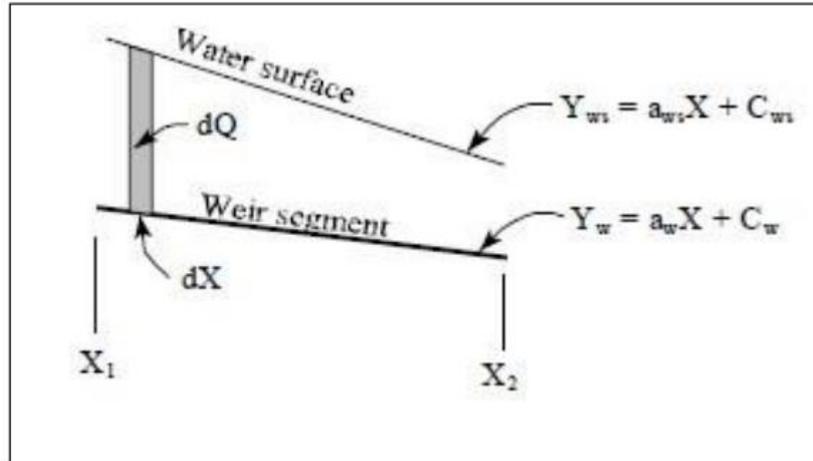


Figura 4-8 Lateral structure - Equazioni descrittive

L'equazione dello stramazzo laterale standard ipotizza che la struttura sia parallela alla superficie idrica (cioè la profondità dell'acqua è costante da una estremità all'altra dello stramazzo). La seguente equazione generale deriva dall'integrazione dell'equazione dello stramazzo laterale andando a considerare sia la pendenza della struttura laterale che del terreno:

$$dQ = C(y_{ws} - y_w)^{3/2} dx$$

$$dQ = C(a_{ws}x + C_{ws} - a_w x - C_w)^{3/2} dx$$

$$dQ = C((a_{ws} - a_w)x + C_{ws} - C_w)^{3/2} dx$$

Posto $a1 = a_{ws} - a_w$ e $C1 = C_{ws} - C_w$

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE & R.L.	MANDANTI HYpro S.P.A.	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA								
		Relazione Idraulica	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC RI	OPERA 7 DISCIPLINA ID 00 02	PROGR 001	REV D

$$\int_{x_1}^{x_2} dQ = C \int_{x_1}^{x_2} (a_1 x + C_1)^{\frac{3}{2}} dx = \frac{2C}{5a_1} (a_1 x + C_1)^{\frac{5}{2}} \Big|_{x_1}^{x_2}$$

$$Q_{x_1-x_2} = \frac{2C}{5a_1} ((a_1 x_2 + C_1)^{5/2} - (a_1 x_1 + C_1)^{5/2})$$

Tale equazione è valida finché il termine a_1 è diverso da zero. Quando a_1 è nullo, la superficie dell'acqua e la lateral structures sono parallele.

5. MODELLOAZIONE BIDIMENSIONALE

Il software HEC-RAS versione 5.0.5. permette la simulazione dei deflussi combinando il modello monodimensionale dell'asta fluviale principale con il modello bidimensionale delle zone esterne.

Le caratteristiche principali dell'algoritmo di modellazione della nuova versione 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

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	33

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 stramazzone 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-elaborata 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 molto 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.

Relazione Idraulica

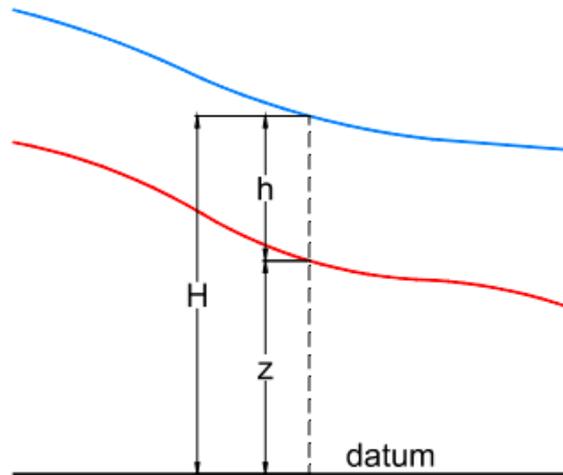
COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00 02	001	D	34

- 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 $H(x,y,t) = z(x,y) + h(x,y,t)$.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00 02	001	D	35



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.

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D

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:

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

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 preprocessione 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.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	37

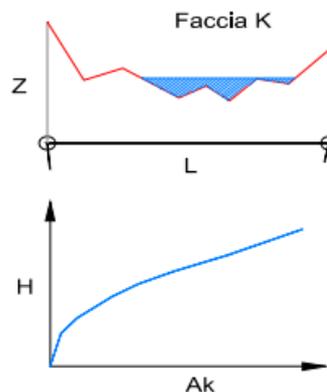
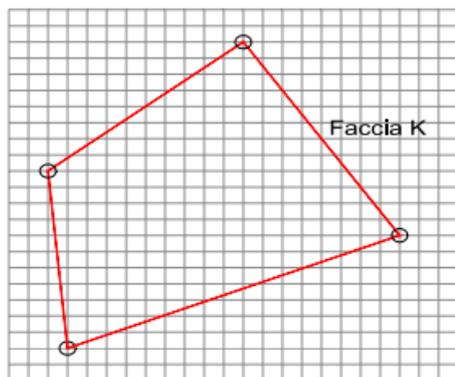


Figura 5-1 in grigio il dato della griglia DTM, in rosso la cella di calcolo del modello idraulico. A destra la schematizzazione effettuata da Ras sulle facce del bordo della cella.

6. CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL MODELLO

La geometria del modello è stata implementata utilizzando i dati LIDAR disponibili per l'area in esame e da rilievo topografico.

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. Per una più corretta definizione della geometria di progetto sono state utilizzate anche delle sezioni interpolate, generate da HEC-RAS, a partire dalle sezioni rilevate.
- 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, 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 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.

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D

Le metodologie modellistiche effettuate per il Torrente Saccione ed il Canale Capo D'Acqua risultano essere di tipo bidimensionale puro.

Al fine di tener conto della presenza di pile e rilevati in alveo, gli stessi sono stati prima implementati mediante software dedicato (Civil 3D 2018) e successivamente accoppiati al DTM terreno.

Parametri di scabrezza

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

Nello specifico, per il Torrente Saccione sono risultati valori mediamente equivalenti per l'intero corso d'acqua, sia per le aree in alveo che per le aree golenali.

Il medesimo risultato è stato ottenuto per i modelli bidimensionali del Canale Capo D'acqua e dei corsi d'acqua minori alle progressive 21+600 e 23+000.

Si riportano i coefficienti di scabrezza adottati per i 4 corsi d'acqua oggetto di studio:

1. Torrente saccione: Manning n in alveo e nelle golene pari a 0.041 ($m^{1/3}/s$);
2. Canale Capo D'Acqua: Manning n dettato da uso suolo 0.041-0.045 ($m^{1/3}/s$) considerando anche una non perfetta manutenzione del corso d'acqua;
3. Corso D'acqua 21+600: Manning n in alveo e nelle golene pari a 0.04 ($m^{1/3}/s$);
4. Corso D'acqua 23+000 : Manning n in alveo e nelle golene pari a 0.041 ($m^{1/3}/s$);

Il coefficiente di scabrezza delle celle bidimensionali è stato assegnato a partire dall'uso del suolo derivato dal progetto Corine Land Cover, secondo la seguente tabella di corrispondenza (ripresa 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).

LINEA PESCARA – BARI

**RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA
LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA**

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	39

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

Tabella 6-1. Tabella dei valori del coefficiente di scabrezza sulle aree 2D (Pestana et al. 2013).

Si riportano i coefficienti di scabrezza per le aree 2D adottate nelle simulazioni bidimensionali:

Torrente Saccione

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	40

Land Cover to Manning's n (2D Flow Areas Only)

Set Manning's n to Override Default Land Cover Values				
Selected Area Edit Options				
<input type="button" value="Add Constant ..."/> <input type="button" value="Multiply Factor ..."/> <input type="button" value="Set Values ..."/> <input type="button" value="Replace ..."/>				
Land Cover Layer		Geometry Overrides (Blank for Default Values)		
Name	Default Mann n	Base Mann n (blank for default)	Manning Area Saccione	
1 area vegetata 1		0.05	0.0416	
2 area vegetata 2		0.05	0.0416	
3 boschi 1		0.06	0.0416	
4 boschi 2		0.06	0.0416	
5 boschi 3		0.06	0.0416	
6 boschi 4		0.06	0.0416	
7 colture		0.07	0.0416	
8 colture intensive		0.07	0.0416	
9 frutteti		0.07	0.0416	
10 spazi naturali		0.05	0.0416	
11 urbano		0.03	0.0416	
12 vigneti		0.06	0.0416	

Tabella 6-2. Valori del coefficiente di Manning per il Saccione.

Canale Capo D'Acqua e corsi d'acqua minori

Land Cover to Manning's n (2D Flow Areas Only)

Set Manning's n to Override Default Land Cover Values							
Selected Area Edit Options							
<input type="button" value="Add Constant ..."/> <input type="button" value="Multiply Factor ..."/> <input type="button" value="Set Values ..."/> <input type="button" value="Replace ..."/>							
Land Cover Layer		Geometry Overrides (Blank for Default Values)					
Name	Default Mann n	Base Mann n (blank for default)	Capo D'acqua m	Capo Palude 1 m	Capo Palude 2 m	m 21+600	
1 acqua	0.08	0.035	0.0416		0.0416	0.0416	0.0416
2 aree arbustive	0.08	0.058	0.0416	0.0416		0.0416	0.0416
3 aree arbustive/bosco	0.08	0.058	0.0416	0.0416	0.0416		0.0416
4 boschi	0.08	0.058	0.0416	0.0416	0.0416		0.0416
5 colture intensive	0.08	0.06	0.0416	0.0416		0.0416	0.0416
6 palude	0.08	0.115	0.0416	0.0416	0.0416		0.0416
7 pascoli	0.08	0.058	0.0416	0.0416		0.0416	0.0416
8 vegetazione in evoluzione	0.08	0.043	0.0416	0.0416	0.0416		0.0416

Tabella 6-3. Valori del coefficiente di Manning per il C. Capo D'acqua e corsi d'acqua minori.

7. SCENARI SIMULATI

Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
	LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	41

Le valutazioni oggetto della presente analisi idraulica riguardano:

- Torrente Saccione
- Canale Capo D'Acqua e corsi d'acqua minori

A seconda della morfologia del corso d'acqua e dell'interazione con le opere costituenti il progetto di nuova realizzazione si sono adottati modalità di indagine che permettessero di determinare le maggiori criticità per la tratta di nuova realizzazione. Si riportano di seguito gli approcci modellistici adottati:

Corso d'acqua oggetto di valutazione	Modellazione in Moto Vario		
	1D	1D/2D Combined	2D
Torrente Saccione	-	-	X
Canale Capo D'Acqua e reticolo minore	-	-	X

Tabella 7-1. Tipologie di modellazione adottate.

Torrente Saccione

La modellazione idraulica in moto vario effettuata è del tipo 2D, con celle di calcolo della maglia pari a 10 x10 m per l'ante operam e di spaziosa 5 x 5 m per la modellazione post operam, con la presenza di alcune regioni in cui la spazatura è stata ridotta a 1mx1m per una maggiore precisione. L'area di calcolo 2D per la modellazione del Torrente Saccione ha un'estensione complessiva di circa 38,5 km².

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	42

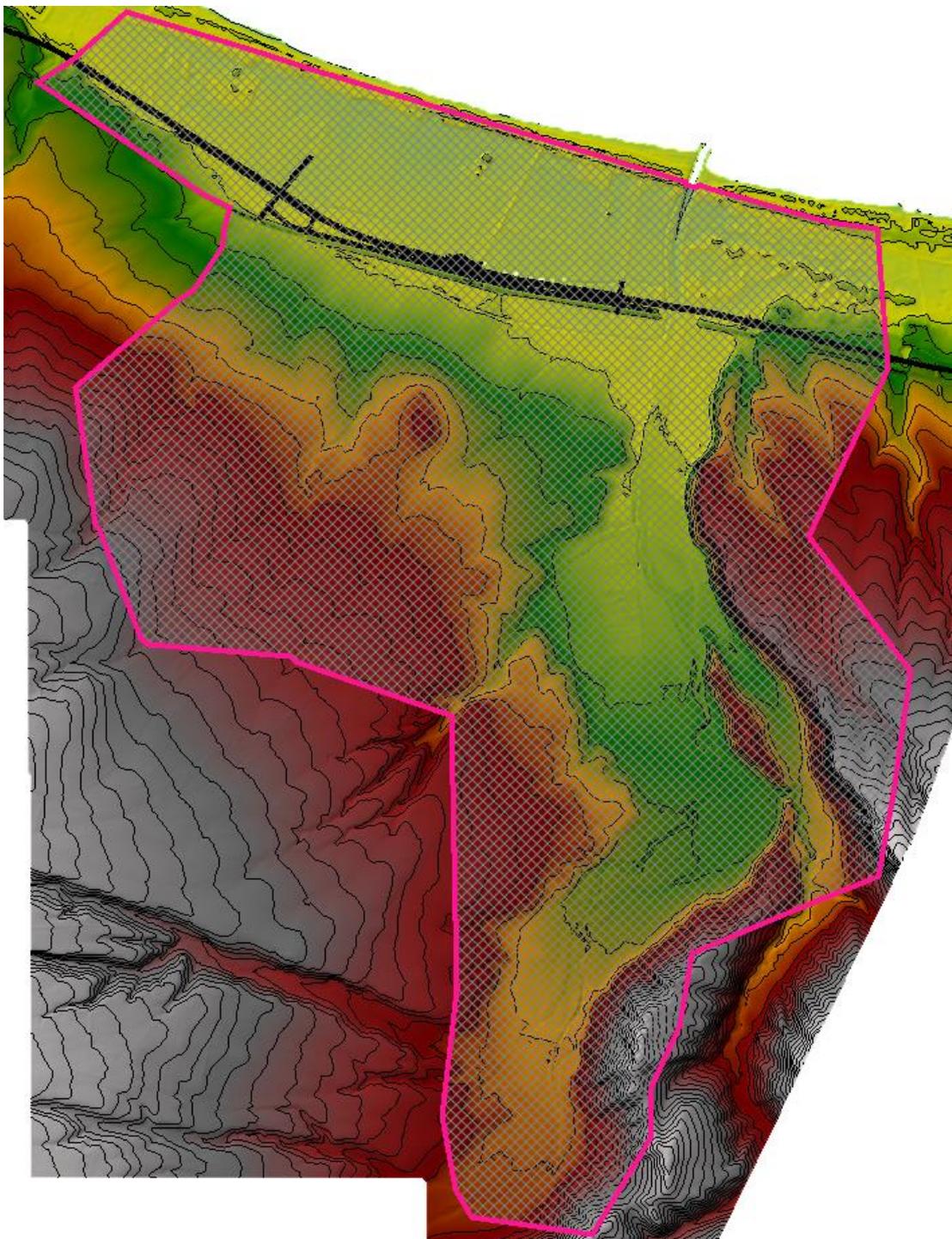


Figura 7-1. Dominio di calcolo del Bacino del Torrente Saccione.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	43

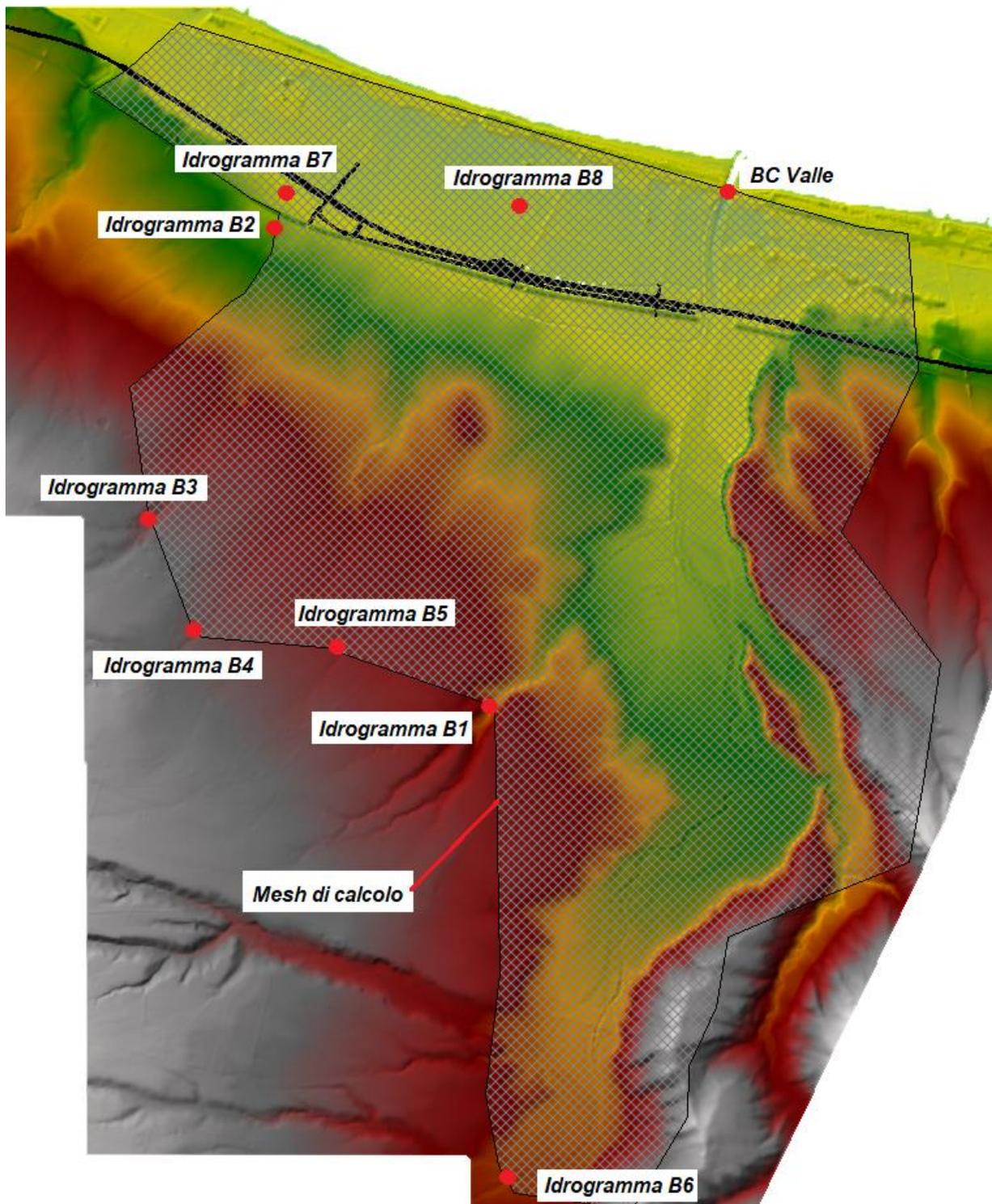


Figura 7-2. Torrente Sacicone: posizione delle condizioni al contorno del modello 2D.

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	44

La procedura di creazione della mesh di calcolo del dominio bidimensionale ha tenuto conto degli eventuali rilevati e/o elementi morfologici significativi mediante opportuni elementi, quali breaklines, e/o elementi lineari quotati. Inoltre per garantire una migliore lettura del terreno da parte della mesh di calcolo, in prossimità di connessioni e zone critiche, sono stati effettuati degli affinamenti locali della maglia.

Caratteristiche degli scenari simultati

Le condizioni di riferimento (scenari) sono state assunte in linea con quanto prescritto dall’Autorità del Bacino di competenza:

- **Scenario SDF** (stato di fatto): l’assetto del corso d’acqua studiato è caratterizzato dall’assenza delle infrastrutture di progetto. Nell’assetto attuale si terrà conto soltanto delle infrastrutture principali esistenti di cui si riporta una breve descrizione:
 1. Ponte sul Saccione dell’Autostrada Adriatica E55 con e relativi rilevati di approccio in sinistra e destra idraulica (pk riferita alla nuova infrastruttura di progetto 15+600 m);
 2. N° 5 Sottopassi esistenti lungo l’autostrada Adriatica E55 alle pk 12+100, 12+450, 13+050, 13+900, 15+100. (progressive riferite alla nuova infrastruttura di progetto)
 3. Viadotto della Strada Statale Adriatica SS16 (pk riferita alla nuova infrastruttura di progetto 15+500 m -15+600 m);
 4. Ponte della Ferrovia Adriatica (pk riferita alla nuova infrastruttura di progetto 15+500 m -15+600 m);

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00 02	001	D	45



Figura 7-3. Ponte Saccione dell'A14.

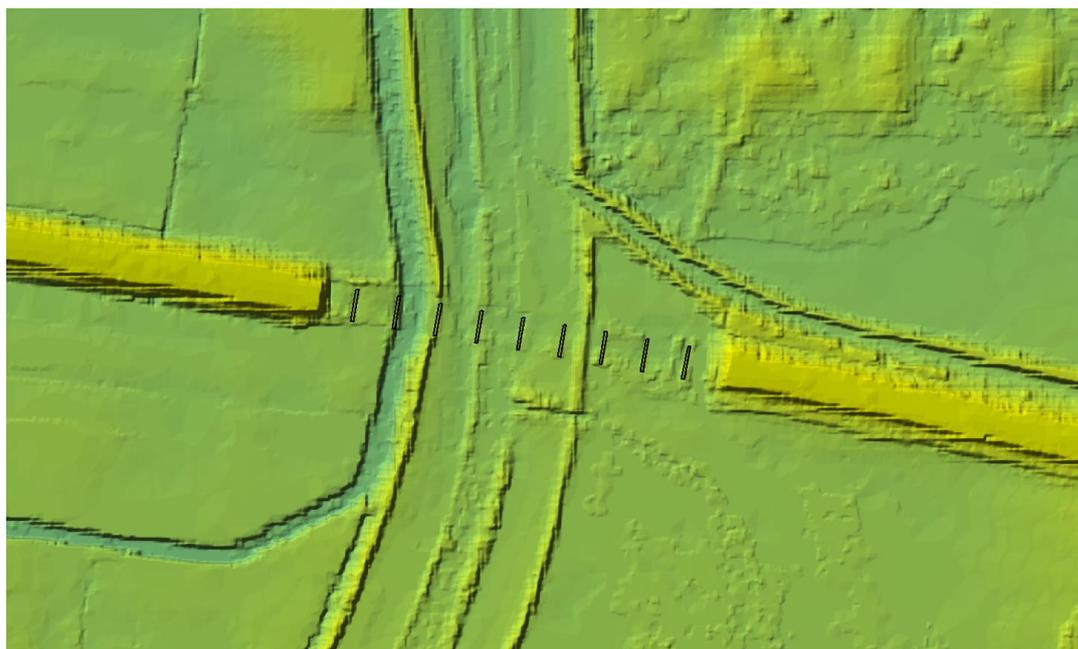


Figura 7-4. Ponte Saccione dell'A14, implementato nel modello bidimensionale.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	46



Figura 7-5. Attraversamenti in prossimità dello sbocco a mare del torrente Saccione.

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	47

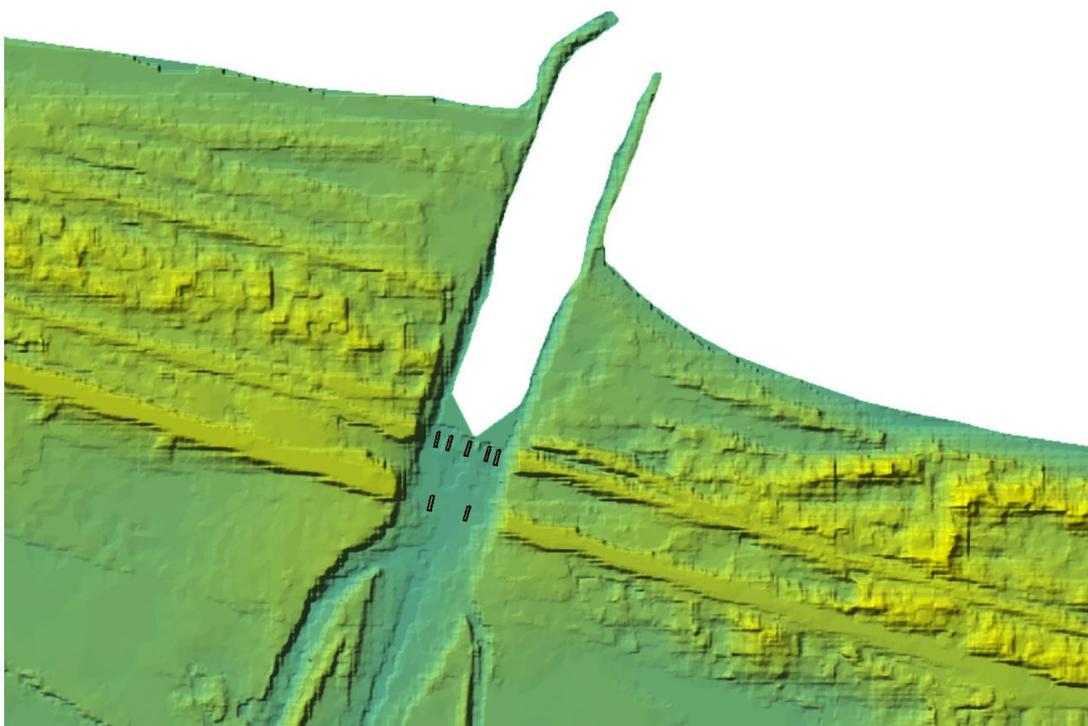


Figura 7-6. Attraversamenti alla foce del torrente Saccione, implementati nel modello 2D

▪ **Scenario SDP** (stato di progetto):

1. Viadotto VI06 - lo scenario post operam del corso d'acqua è caratterizzato dalla presenza del nuovo attraversamento dell'infrastruttura ferroviaria in progetto della tratta Termoli - Lesina (pk 15+500 m), con i relativi rilevati d'approccio in destra e sinistra idraulica del torrente Saccione;
2. Tombini di trasparenza lungo il rilevato di progetto in sinistra idraulica del Saccione alle progressive 11+790, 11+840, 11+895, 11+950, 12+000, 12+050, 12+100, 12+155, 12+250, 12+300, 12+355, 13+050, 13+435, 14+180, 14+500, 14+600, 14+700, 14+800, 14+900, 13+870, 13+925, 13+850, 13+972, 14+000, 14+025, 13+325, 13+385, 13+485, 13+545;
3. Tombini di trasparenza lungo la viabilità NV21 di accesso alle SSE, in sinistra idraulica del Saccione, alle progressive 0+095, 0+130, 0+165;

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A R.L.	MANDANTI HYpro S.P.A.	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA								
		Relazione Idraulica	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC RI	OPERA 7 DISCIPLINA ID 00 02	PROGR 001	REV D

4. N°1 sottopasso ferroviario (pk 13+900 m);
5. N°1 Cavalca ferrovia (pk 12+100 m);
6. Riprofilatura del tratto di canale delle acque medie tra le progressive 13+850 e 15+500;
7. Prolungamento del sottovia autostradale alla pk 13+050 al di sotto del rilevato ferroviario, con variazione di “*destinazione d’uso*”, ossia con funzione soltanto di tombino idraulico (dimensioni 5x3 m).

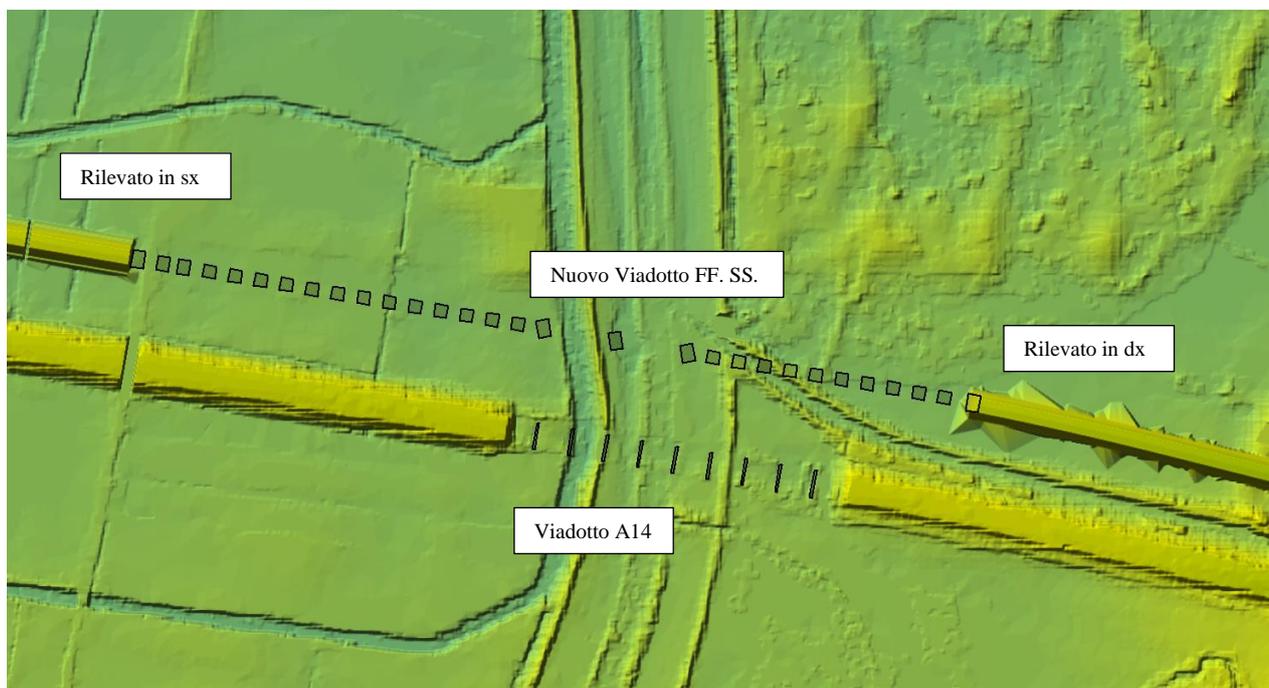


Figura 7-7 Viadotto di progetto VI06: implementazione in Hec-Ras.

Il viadotto di nuova realizzazione, la cui quota di intradosso rispetto all’alveo ordinario del Saccione risulta essere di 7.24 m.sl.m, ha un estensione complessiva di 800 m circa. Si identificano 27 campate di luce pari a 25 metri e 2 campate di scavalco dell’alveo inciso di ampiezza pari a 70 metri.

Di seguito si riportano a titolo illustrativo le implementazioni, dei punti precedentemente esposti,

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	49

all'interno del modello idraulico sviluppato in Hec-Ras 5.0.5.

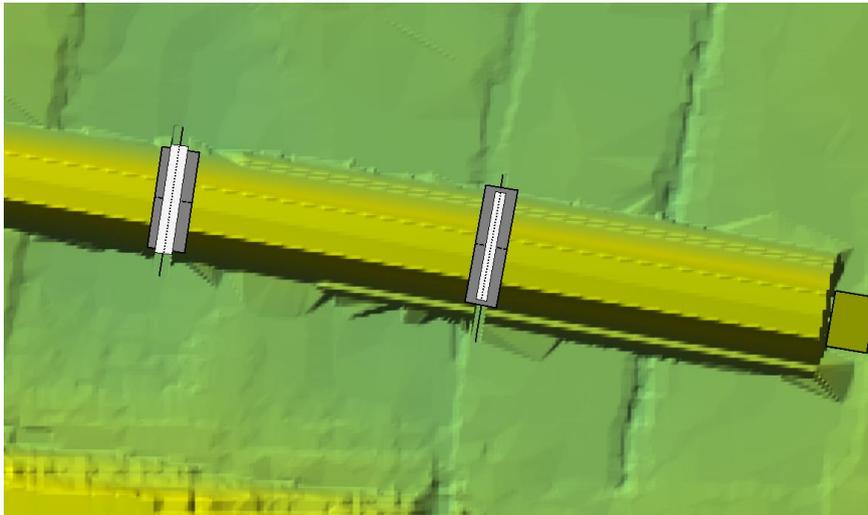


Figura 7-8. Tombini di trasparenza implementati dnel modello 2D.

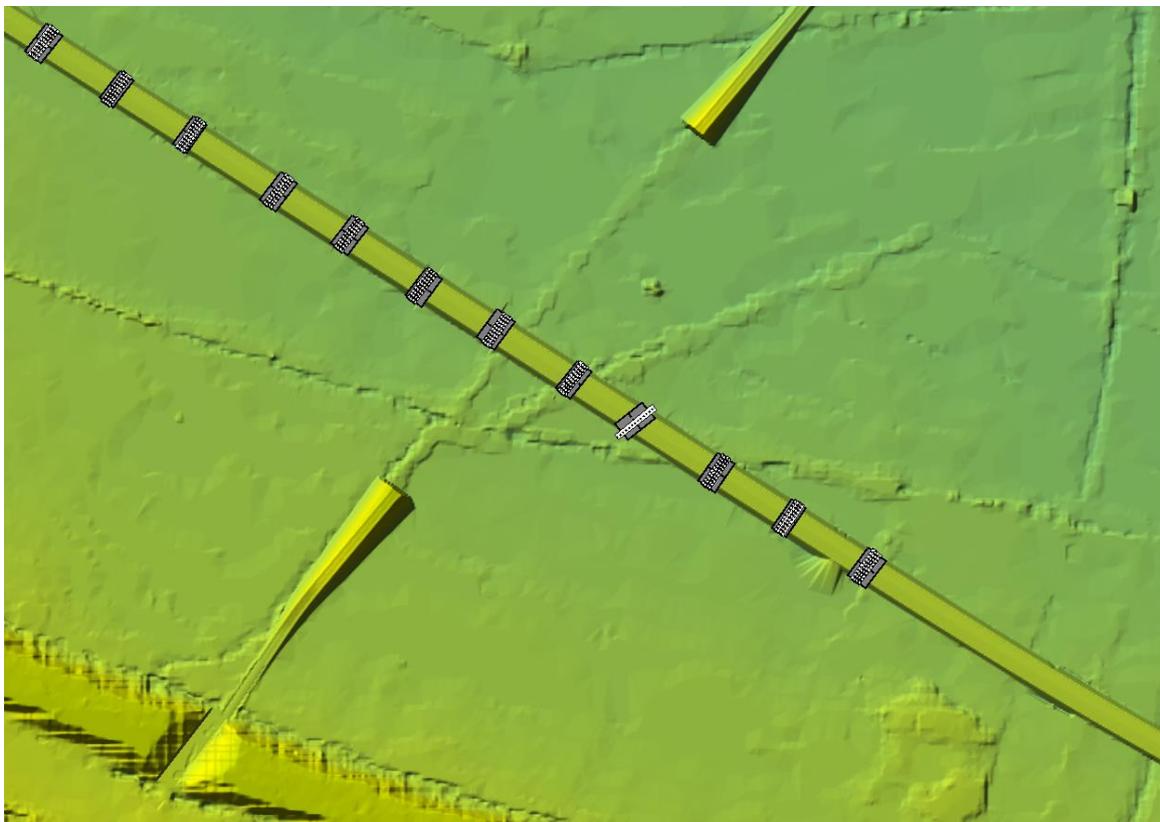


Figura 7-9. Rilevati di approccio del calvacaferrovia implementati nel modello 2D.

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	50

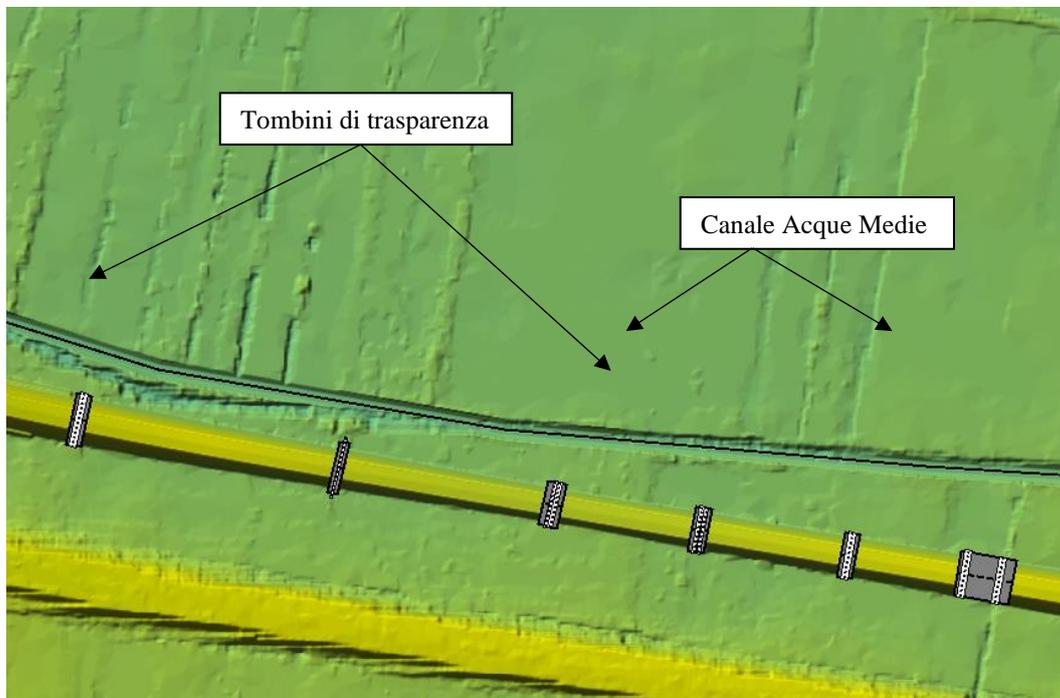


Figura 7-10. Riprofilatura del canale acque medie.

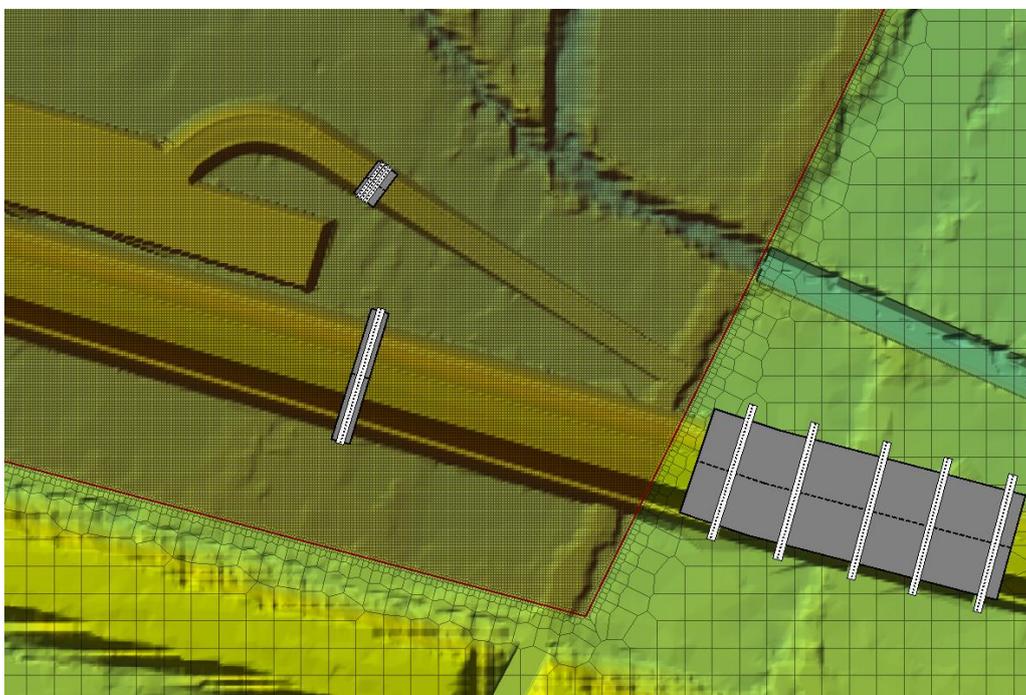


Figura 7-11. Sottostazione elettrica implementata nel modello 2D ed aree di affinamento della mesh.

Relazione Idraulica

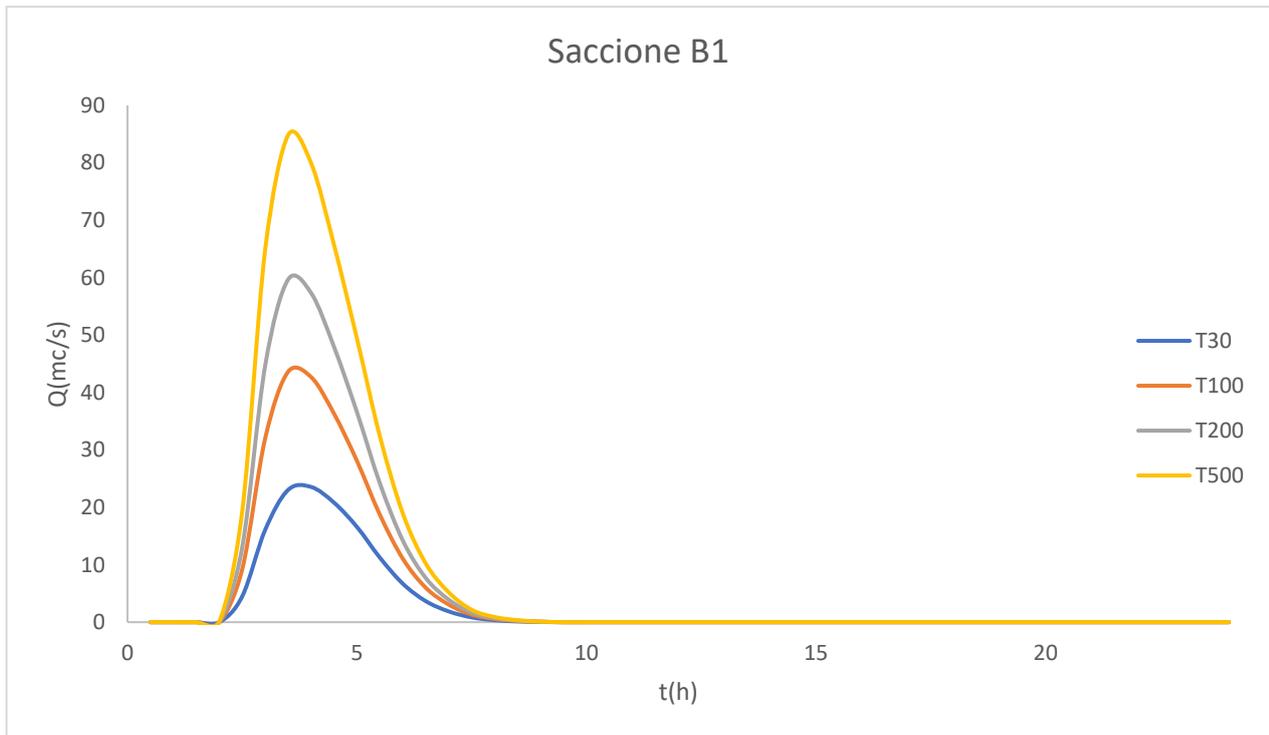
COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	51

Condizione al contorno di monte

Nelle simulazioni idrauliche del Saccione sono stati utilizzati gli idrogrammi ricavati tramite gli studi idrologici dei bacini che compongono il sistema idrologico del torrente Saccione stesso, riportati nell'elaborato LI0B02EZZRIID0001001B.

Di seguito, le onde di piena e le relative portate al colmo per tempi di ritorno 30, 100, 200 e 500 anni per gli otto contributi in ingresso alla modello bidimensionale.

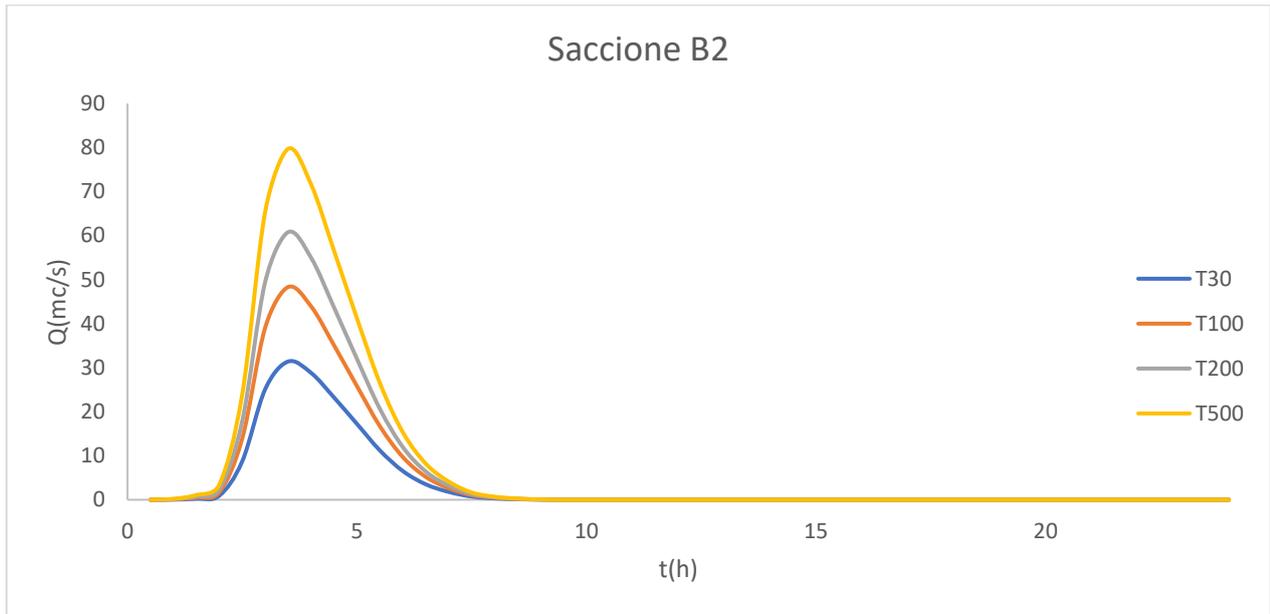
Sottobacino del Saccione - Bacino 1



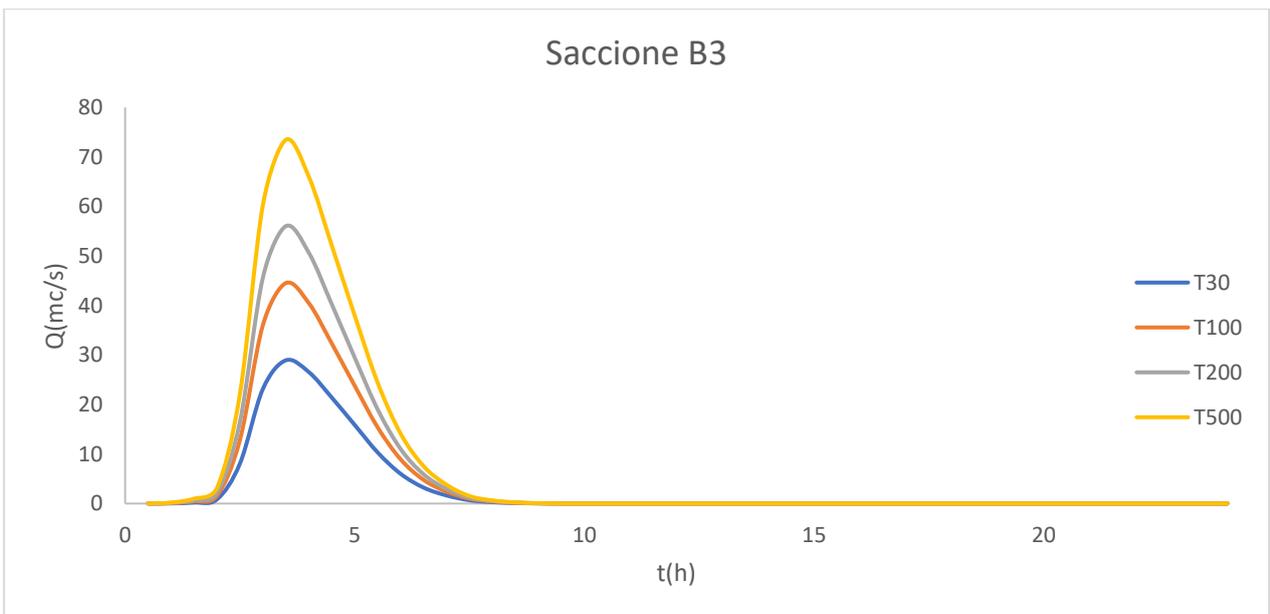
Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	52

Vallone Saracini - Bacino 2



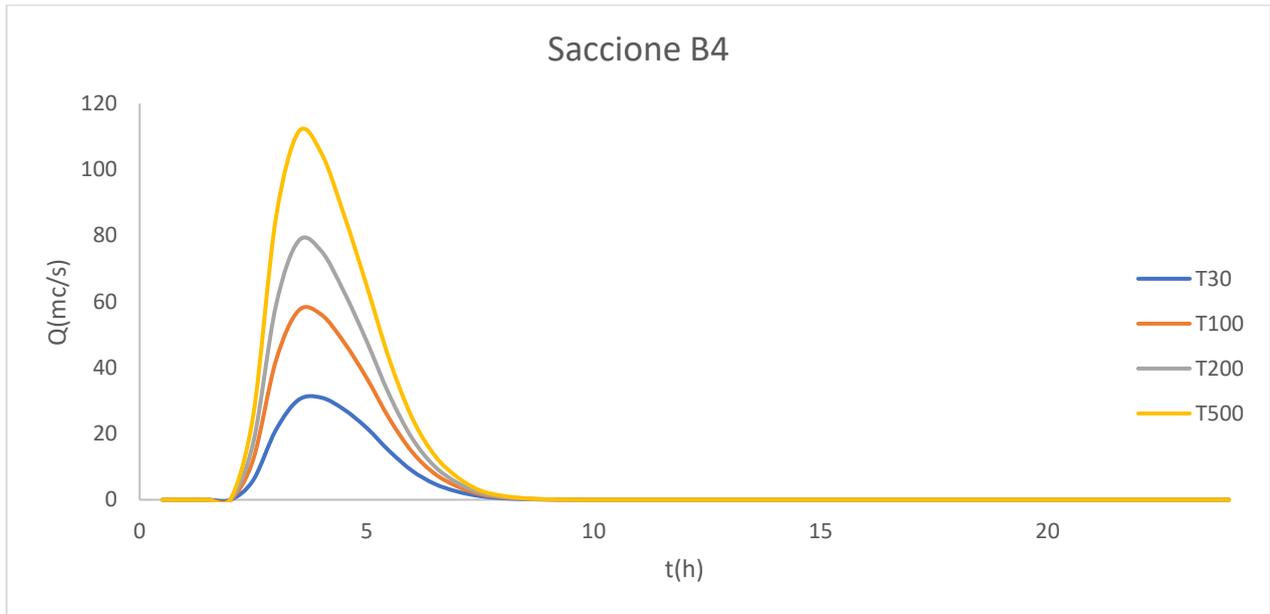
Vallone Madonna Grande - Bacino 3



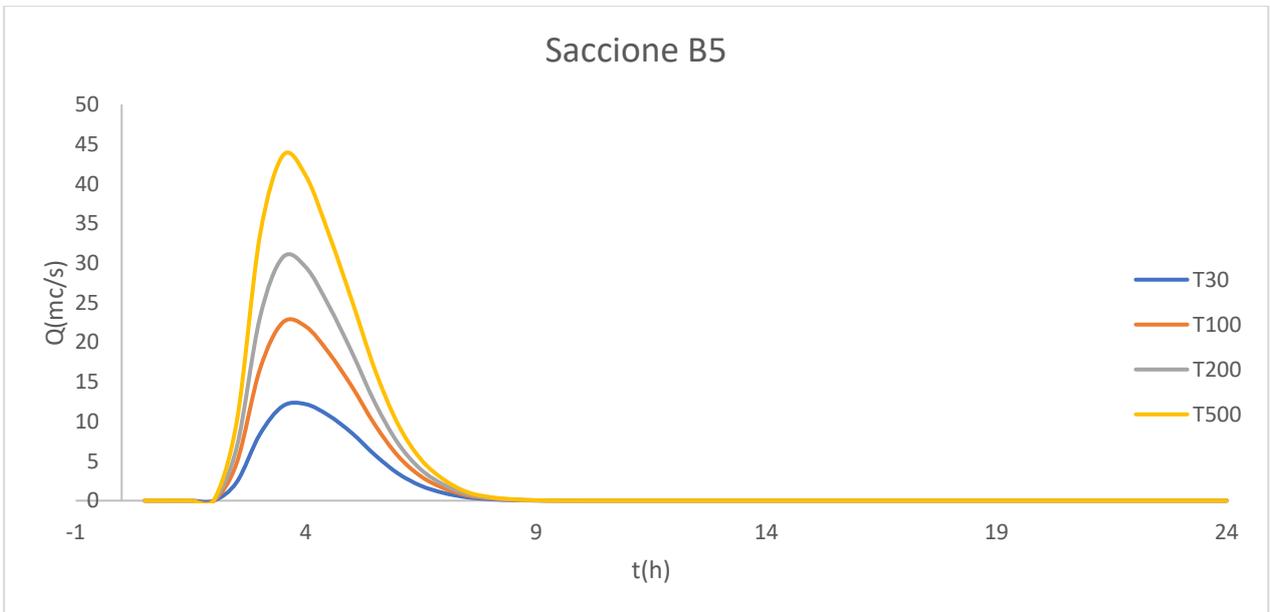
Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	53

Vallone Sciabolone - Bacino 4



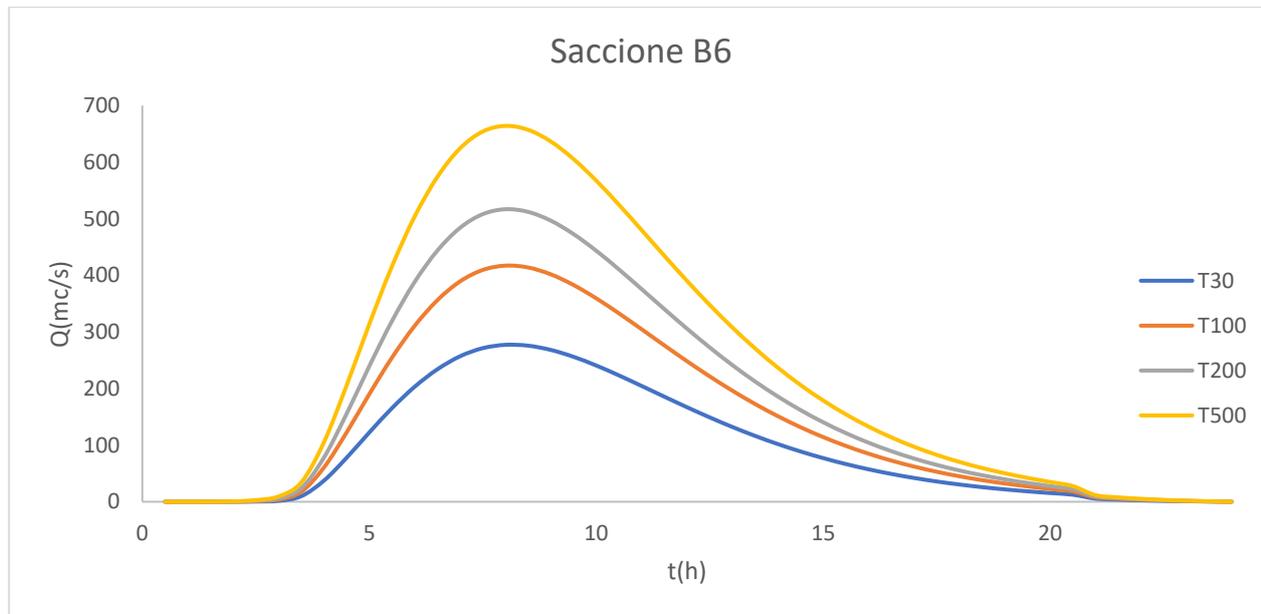
Vallone degli Osci - Bacino 5



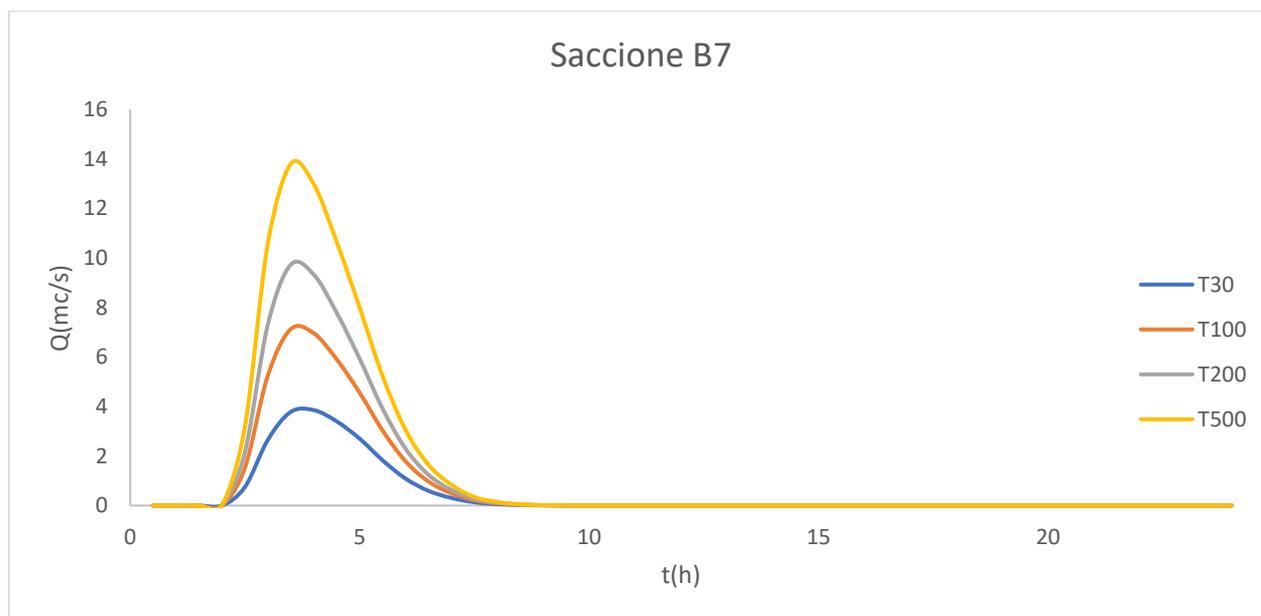
Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	54

Bacino del Torrente Saccione - Bacino 6



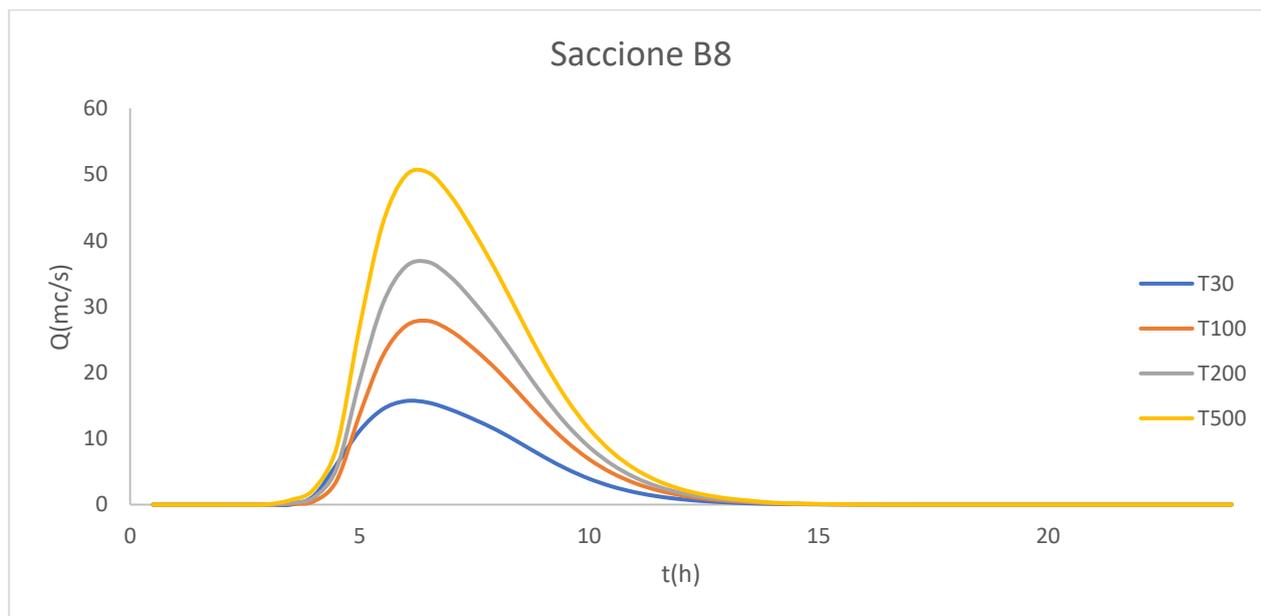
Bacino di monte delle acque medie - Bacino 7



Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	55

Bacino di valle delle acque medie - Bacino 8



Di seguito, la tabella riepilogativa delle portate al colmo relative ai corsi d'acqua minori del Bacino del T. Saccione.

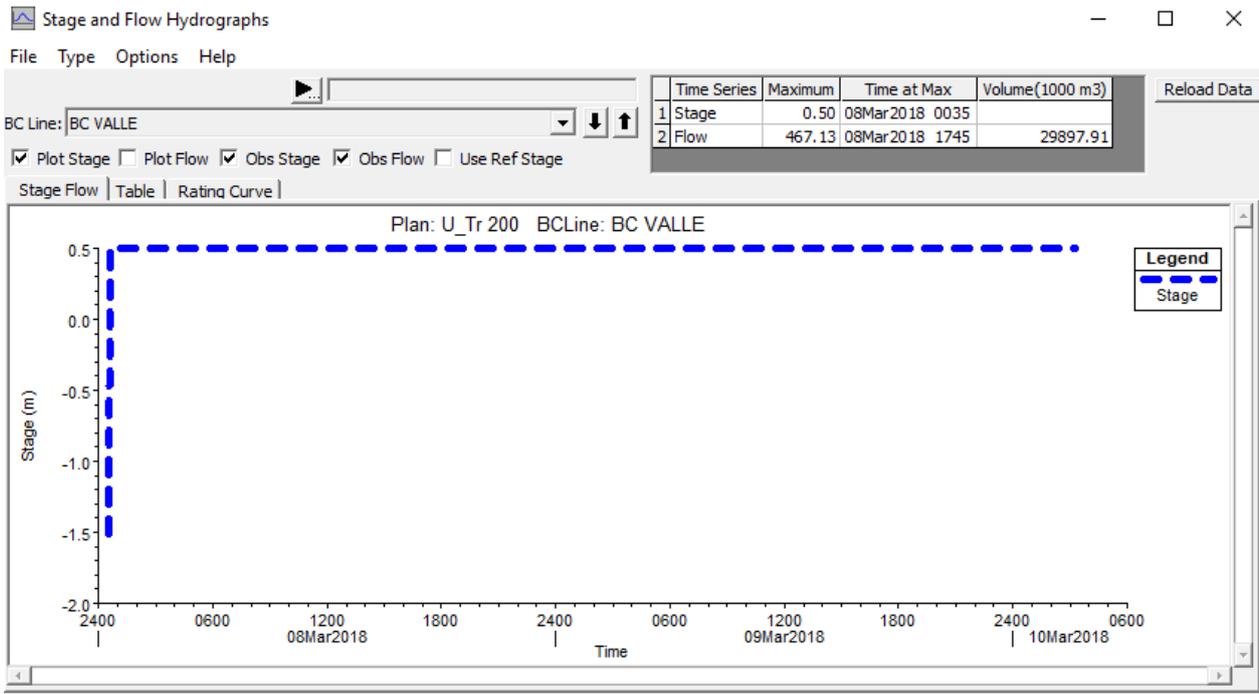
<i>Complesso del T. Saccione</i>					
N. Bacino	A	Q_{Tr30}	Q_{Tr100}	Q_{Tr200}	Q_{Tr500}
	Km^2	m^3/s	m^3/s	m^3/s	m^3/s
1	6.70	23.55	43.62	59.67	84.81
2	4.86	31.39	48.33	60.80	79.73
3	4.49	28.93	44.53	56.02	73.46
4	8.83	30.94	57.31	78.41	111.45
5	3.41	12.18	22.50	30.72	43.56
6	211.44	277.23	417.15	516.80	664.10
7	1.08	3.86	7.13	9.73	13.80
8	4.93	15.68	27.82	36.73	50.28

Tabella 2. Bacino del T. Saccione; portate al colmo relative ai bacini idrografici minori.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA	PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID 00 02	001	D	56

Condizione al contorno di valle



Per le condizioni al contorno di valle, è stato utilizzato uno Stage Hydrograph. Come indicato dall’Autorità di bacino dei fiumi Trigno, Bifermo e Minori, Saccione e Fortore è stato ipotizzato un sovrizzo del livello del mare di 0.5 m slm in considerazione ed all’eventualità di una concomitanza di condizioni meteo marine avverse.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA	PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID 00 02	001	D	57

Canale Capo D'acqua e corsi d'acqua secondari

La modellazione del canale Capo D'acqua e dei corsi d'acqua alle progressive di progetto 21+600, 22+800 e 23+000 è stata considerata come un sistema idraulico unico. Tale scelta è stata dettata dalla particolare complessità del terreno di natura paludosa (Palude del capo D'Acqua), così da poter meglio valutare i fenomeni di esondazione nella propria totalità.

Così come per il Torrente Saccione, la modellazione idraulica effettuata per il Capo D'Acqua è stata effettuata in moto vario del tipo 2D. Le celle di calcolo della maglia sono pari a 5 x5 m sia per l'ante operam che per il post operam. L'area di calcolo 2D per la modellazione del Capo D'Acqua ha un'estensione complessiva di circa 3,80 km².

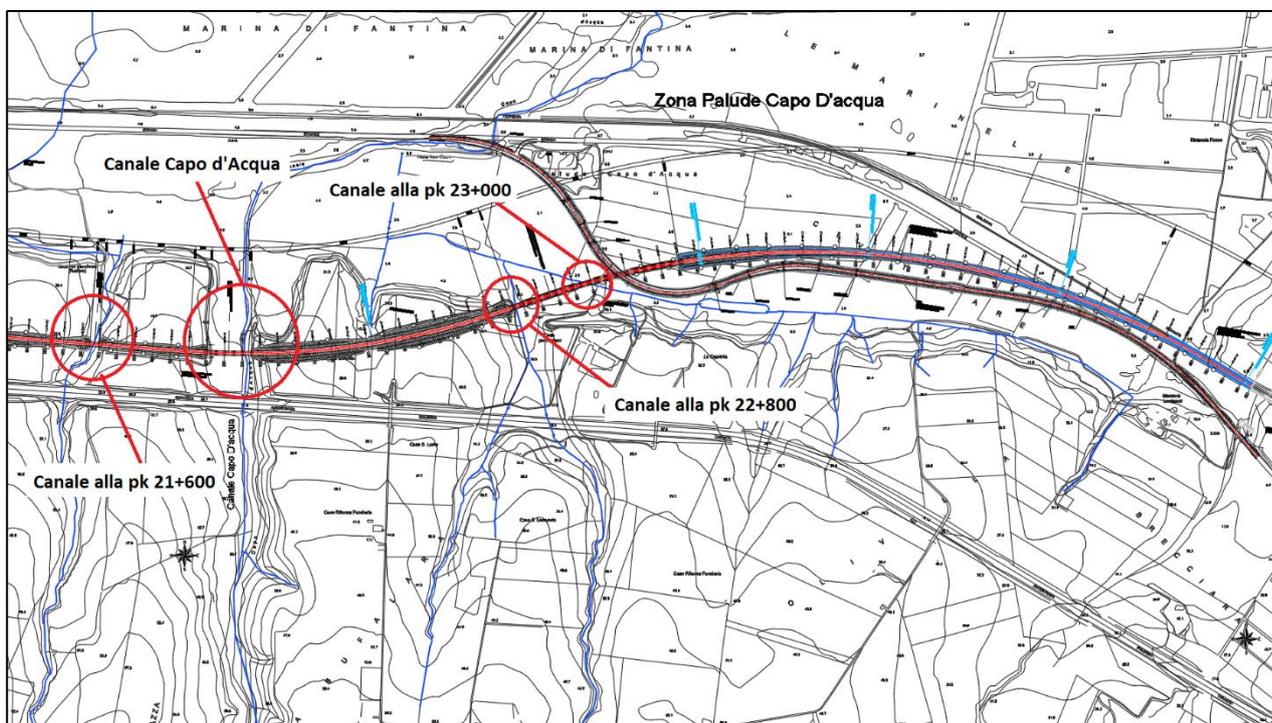


Figura 7-12. Zona Capo d'Acqua: idrografia dell'area indagata.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	58

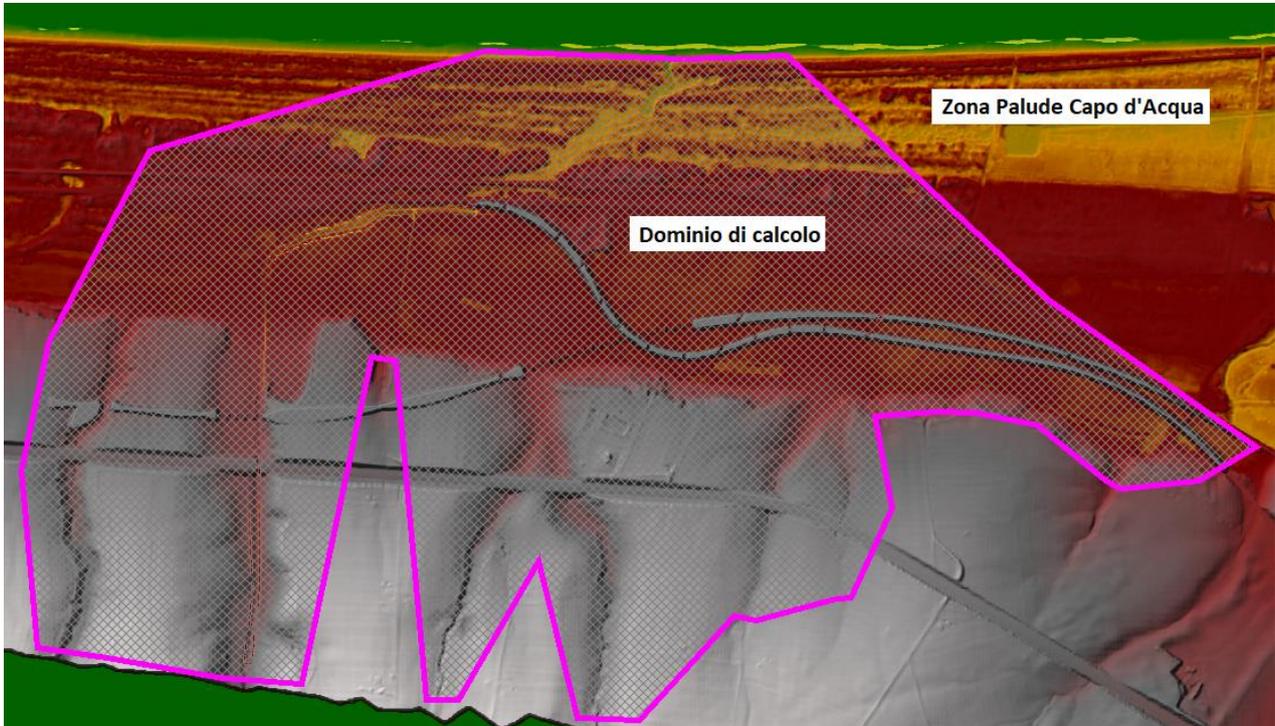


Figura 7-13. Mesh di calcolo in zona Palude Capo D'acqua.

La procedura di creazione della mesh di calcolo del dominio bidimensionale ha tenuto conto degli eventuali rilevati/o elementi morfologici significativi mediante opportuni elementi, quali breaklines, e/o elementi lineari quotati.

Inoltre, per garantire una migliore lettura del terreno da parte della mesh di calcolo, in prossimità di connessioni e zone critiche, sono stati effettuati degli affinamenti locali della magliatura.

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	59

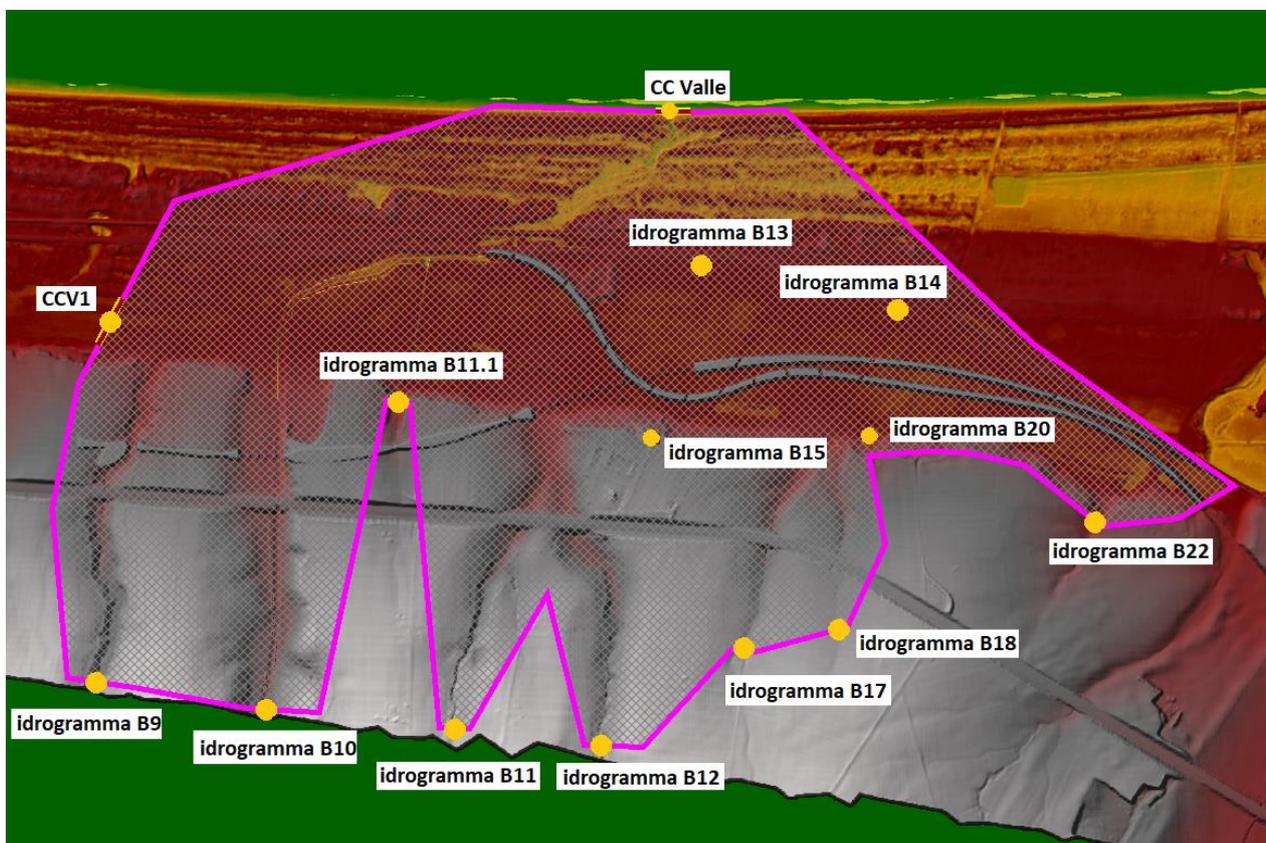


Figura 7-14. Zona Palude Capo d'Acqua: condizioni idrauliche al contorno del modello 2D.

Gli idrogrammi in input per i bacini B13, B14, B15, B16, B19, B20 e B21 sono stati inseriti all'interno della griglia di calcolo, questo è stato possibile grazie alle nuove funzionalità della versione di 5.0.5 di Hec-Ras.

Caratteristiche degli scenari simulati

Le condizioni di riferimento (scenari) sono state assunte in linea con quanto prescritto dall'Autorità del Bacino di competenza:

- **Scenario SDF** (stato di fatto): l'assetto del corso d'acqua studiato è caratterizzato dall'assenza delle infrastrutture di progetto. Nell'assetto attuale si terrà conto soltanto delle

LINEA PESCARA – BARI

**RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA
LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA**

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	60

infrastrutture principali esistenti di cui si riporta una breve descrizione:

1. N° 6 Tombini idraulici di attraversamento esistenti lungo l'autostrada Adriatica E55 alle pk 21+600, 22+050, 22+800, 23+550, 23+650. (progressive riferite alla nuova infrastruttura di progetto)

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	61



Figura 7-15. Zona Palude Capo d'Acqua: tombini dell'A14 alle pk 21+600 e 22+050.



Figura 7-16. Zona Palude Capo d'Acqua: tombini dell'A14 alla pk 22+800.

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	62



Figura 7-17. Zona Palude Capo d'Acqua: tombini dell'A14 alle pk 23+550 e 23+650.

▪ **Scenario SDP** (stato di progetto):

Lo scenario post operam prevede l'inserimento nel modello 2D delle seguenti opere:

1. Viadotto VI14 sul Canale Capo d'Acqua alla pk 22+050 m, con i relativi rilevati d'approccio in destra e sinistra idraulica. Il nuovo viadotto di progetto ha un'estensione complessiva di 125 metri avente 5 campate da 25 metri ciascuna.
2. Viadotto VI13 alla pk 21+600, con le relative spalle in prossimità dell'alveo inciso in destra e sinistra idraulica (estensione complessiva di 25 metri) e la riprofilatura della sponda (in sinistra) con gabbioni.
3. Viadotto VI15 alle pk 22+800 e 23+000, con i relativi rilevati d'approccio in destra e sinistra idraulica. Il viadotto di nuova realizzazione ha un'estensione complessiva di 550 metri circa avente 18 campate da 25 metri ed una da 35 metri, in corrispondenza dell'attraversamento della nuova viabilità NV18 (variante della SS16).

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE & R.L.	MANDANTI HYpro S.P.A.	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA								
		Relazione Idraulica	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC RI	OPERA 7 DISCIPLINA ID 00 02		PROGR 001

4. Riprofilatura del tratto di canale 23+000 alla progressiva 23+000 della nuova ferrovia di progetto, secondo le sezioni batimetriche rilevate in sito;
5. Inserimento della deviazione della strada statale SS16 (viabilità NV18);
6. Inserimento di tombini di trasparenza lungo la NV 18, alle pk 0+180, 0+440, 0+520, 0+580, 0+980, 1+080, 1+180, 1+280, 1+385, 1+938;
7. Inserimento di tombini di trasparenza lungo il rilevato ferroviario in progetto alle pk 23+308, 23+784, 24+330;
8. Sistemazione idraulica e riprofilatura del fondo alveo del Canale Capo d'Acqua, attraversato dalla NV18, alla pk 0+180 (per maggiori dettagli si rimanda agli elaborati specialistici).

Di seguito, si riportano a titolo illustrativo le modalità di implementazione delle opere precedentemente esposte all'interno del modello idraulico sviluppato in Hec-Ras 5.0.5.

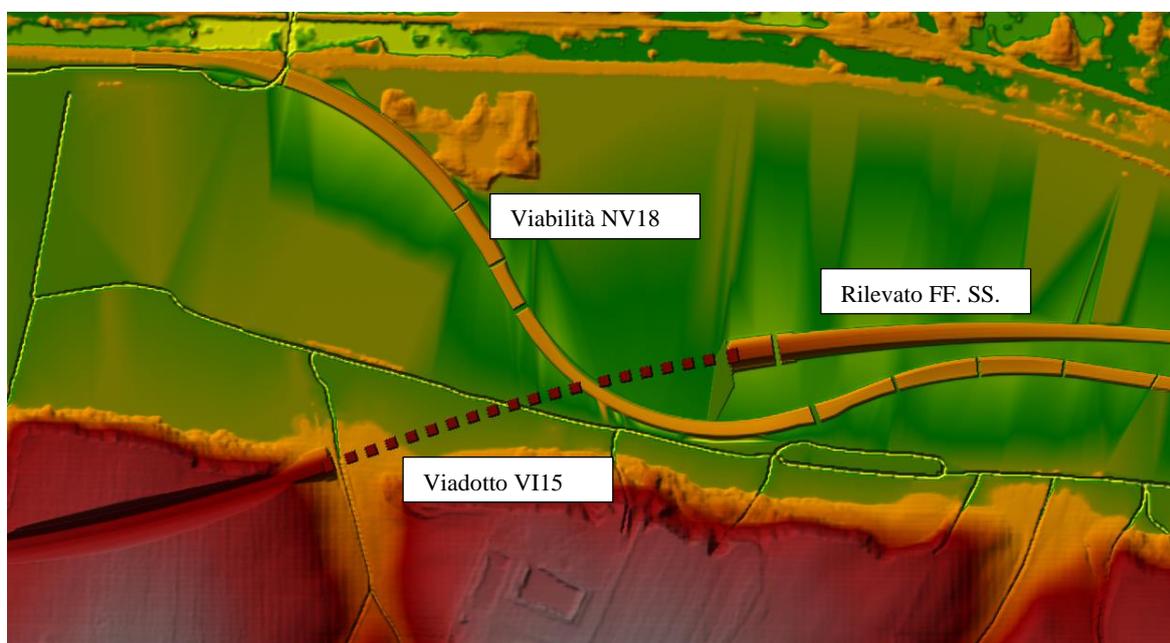


Figura 7-18. Implementazione in Hec Ras del viadotto VI15, della NV18 e dei tombini di trasparenza.

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE & R.L.	MANDANTI HYpro S.P.A.	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA								
		Relazione Idraulica	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC RI	OPERA 7 DISCIPLINA ID 00 02		PROGR 001

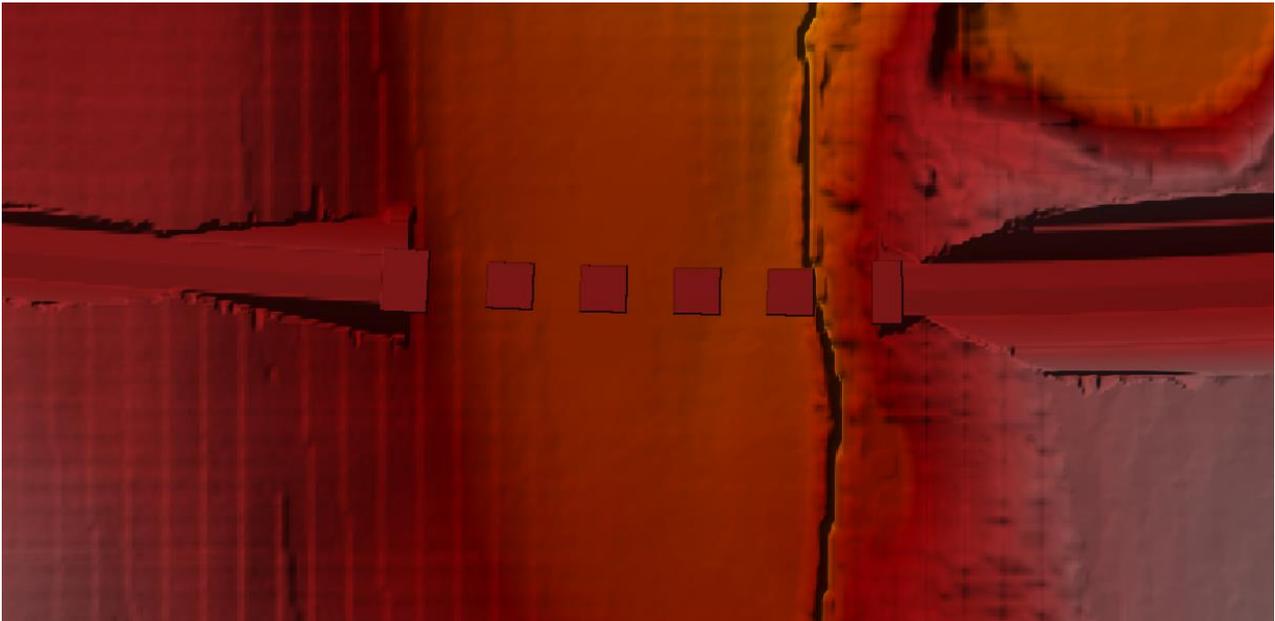


Figura 7-19. Viadotto VI14 sul Capo D'Acqua.



Figura 7-20. Ponte e relative spalle in alveo del canale 21+600.

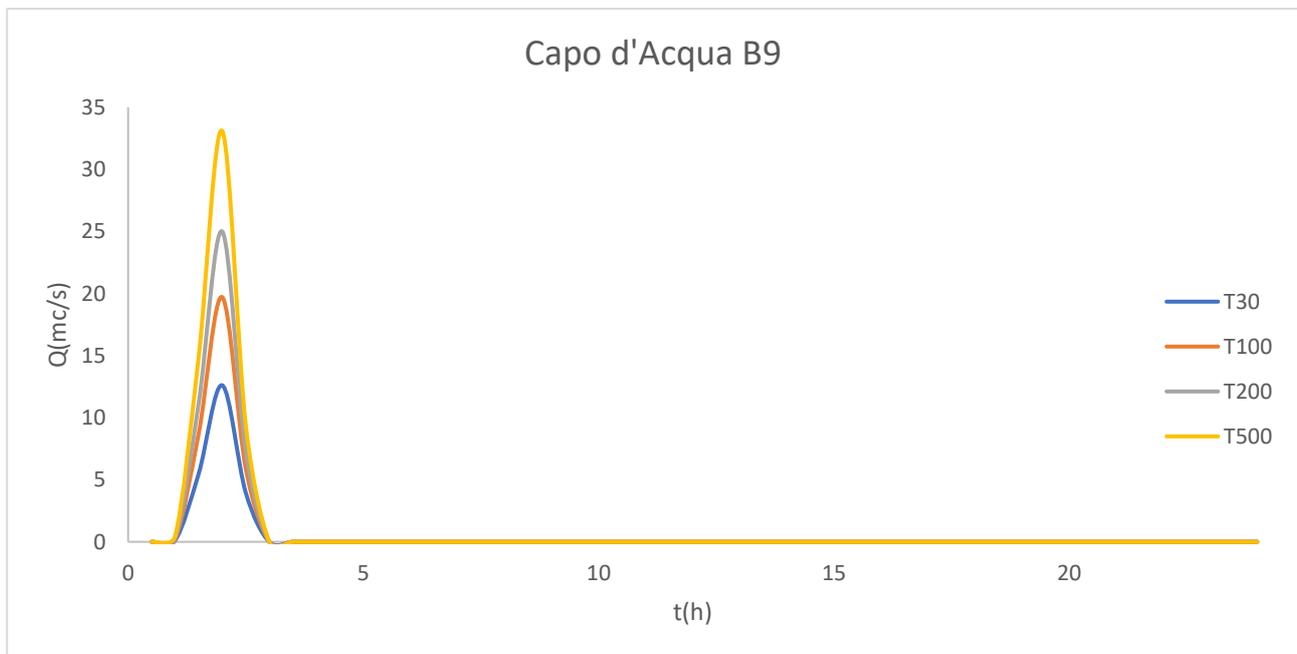
Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	65

Condizione al contorno di monte

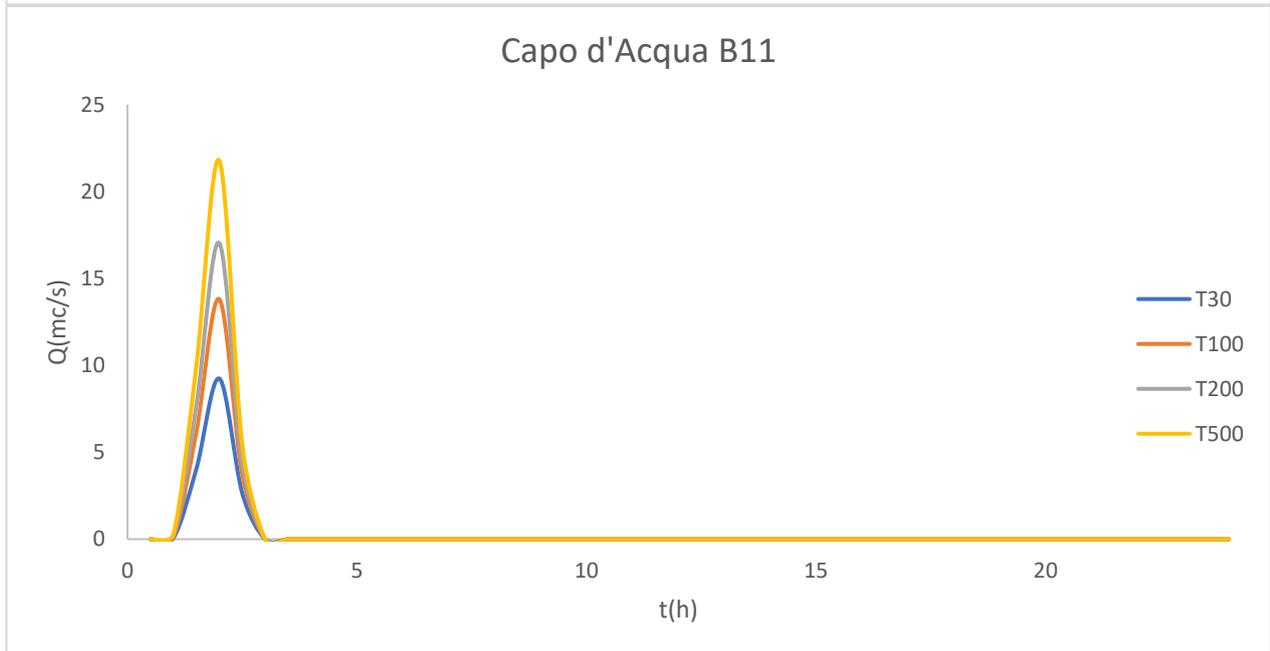
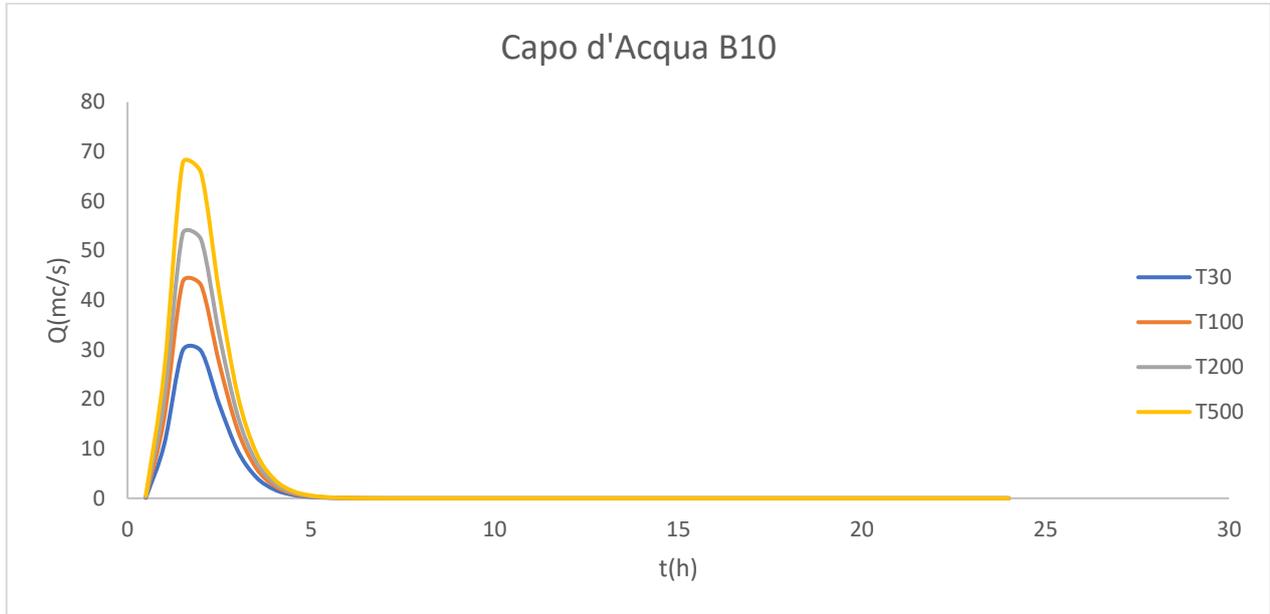
Nelle simulazioni idrauliche del Capo D'Acqua e dei canali minori sono stati utilizzati gli idrogrammi ricavati tramite studi idrologici dei bacini che compongono il sistema idrologico del precedentemete esposto.

Si riportano di seguito le onde di piena e le relative portate al colmo per tempi di ritorno 30, 100, 200 e 500 anni per i quindici contributi in ingresso alla modellazione bidimensionale:



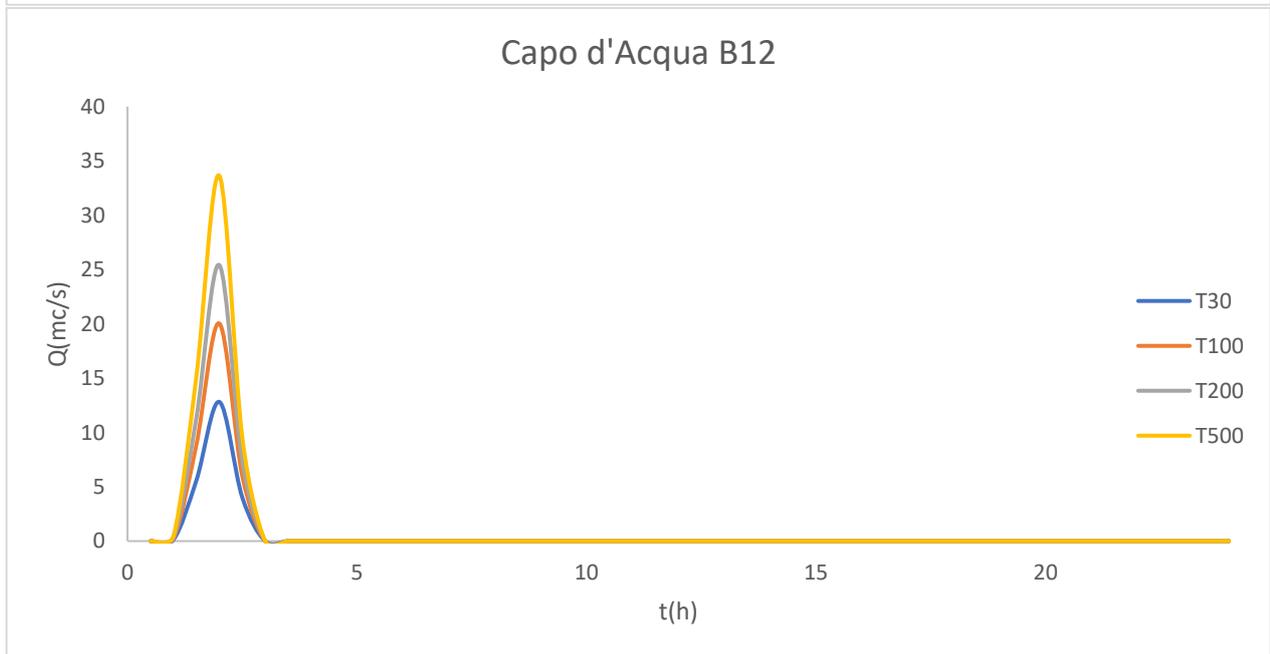
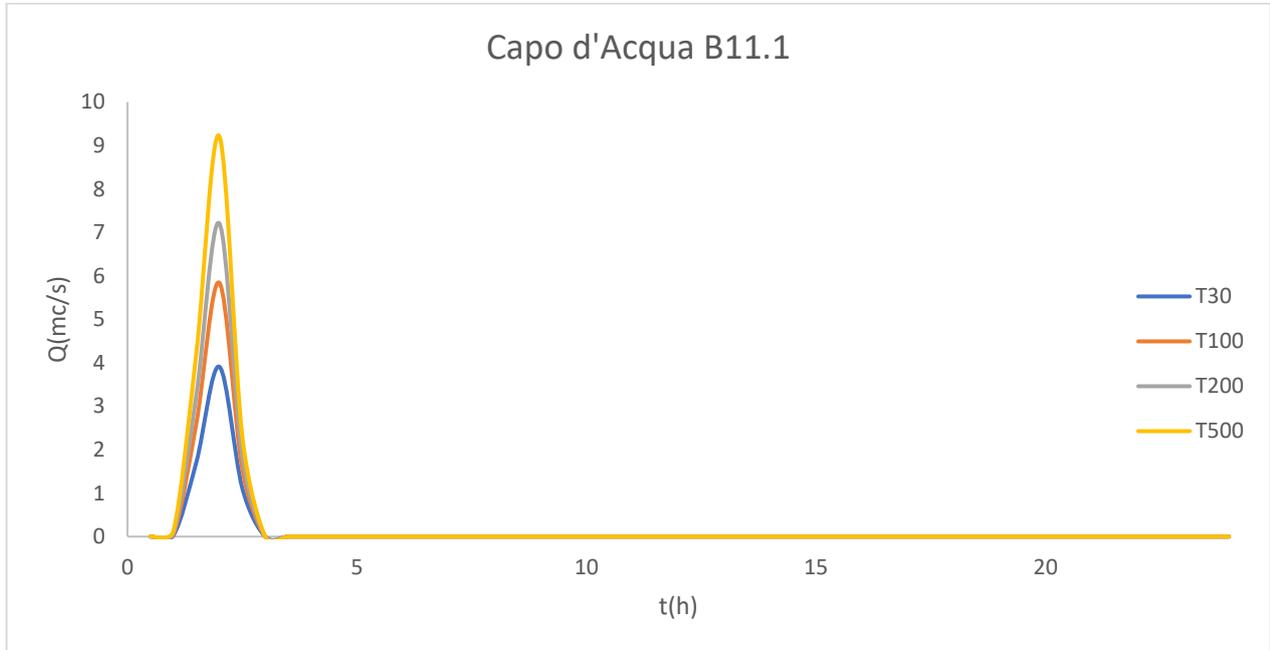
Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	66



Relazione Idraulica

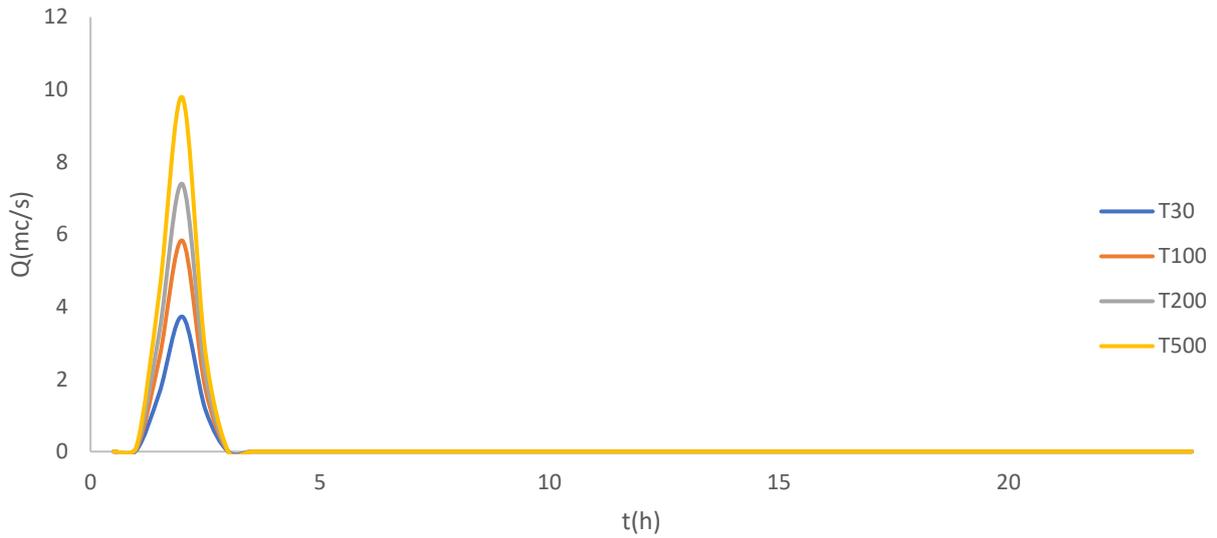
COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV	FOGLIO	
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	67



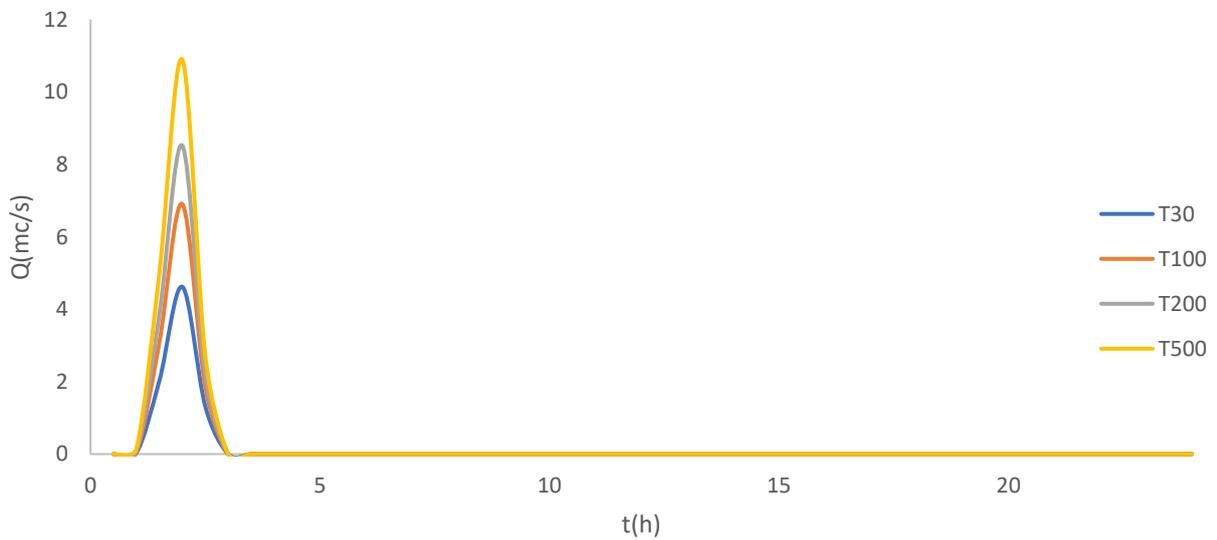
Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00 02	001	D	68

Capo d'Acqua B13

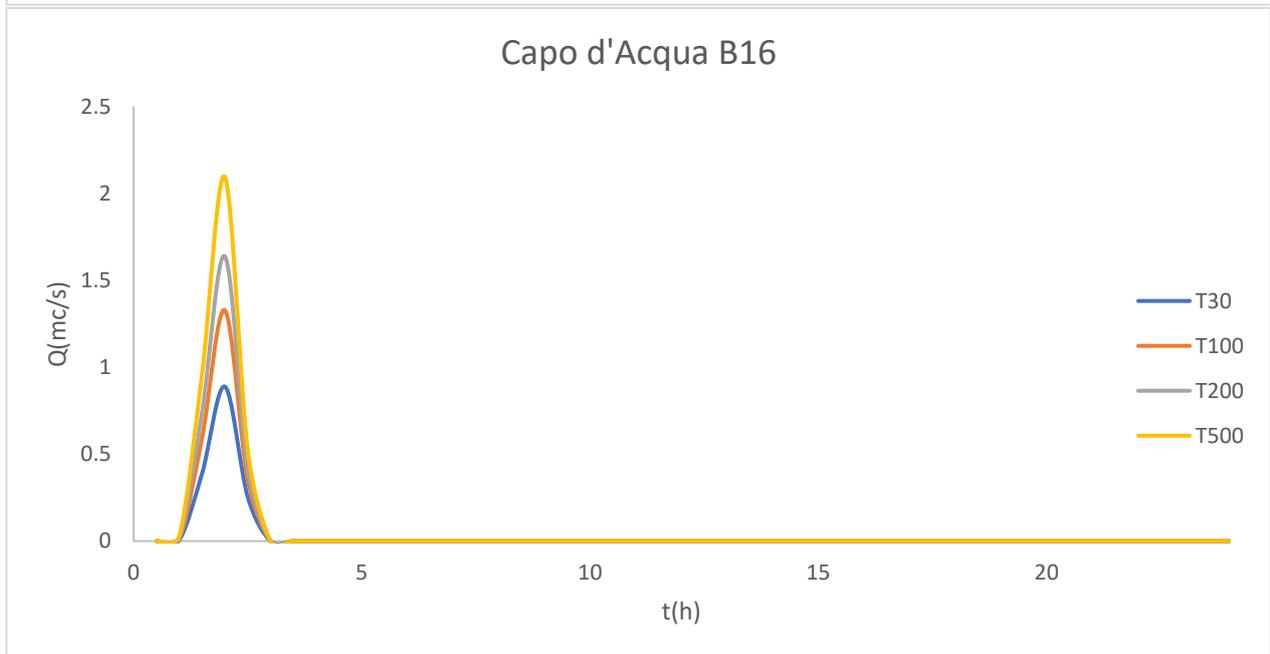
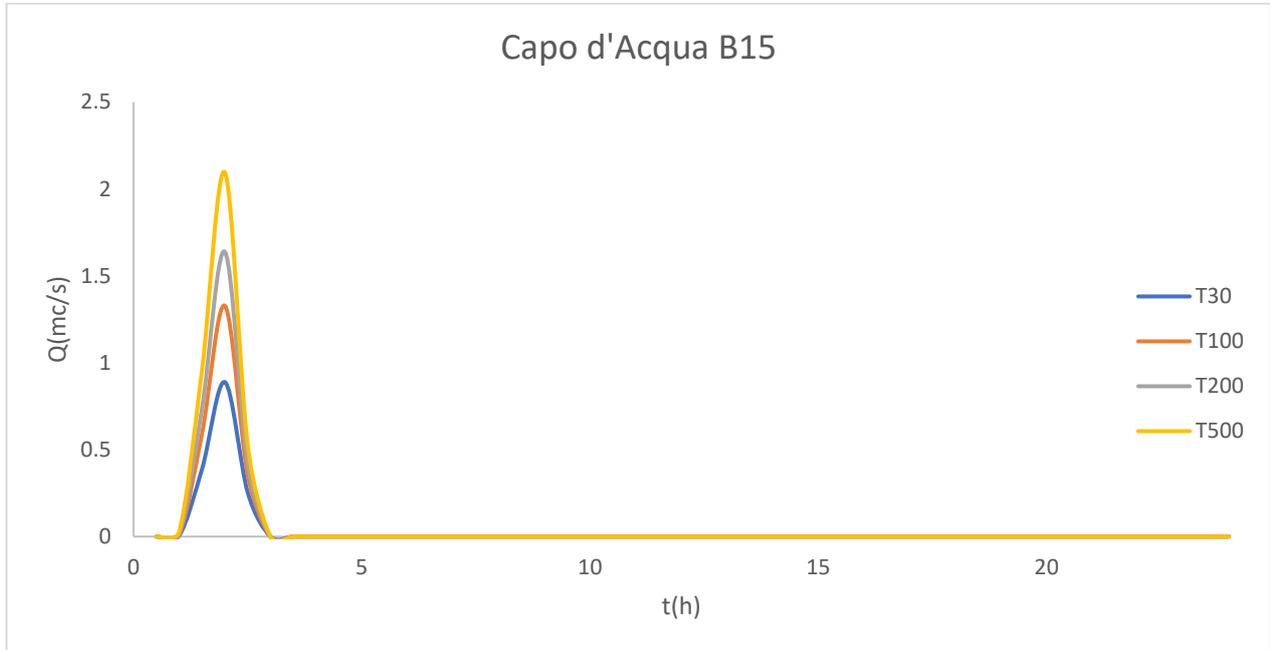


Capo d'Acqua B14



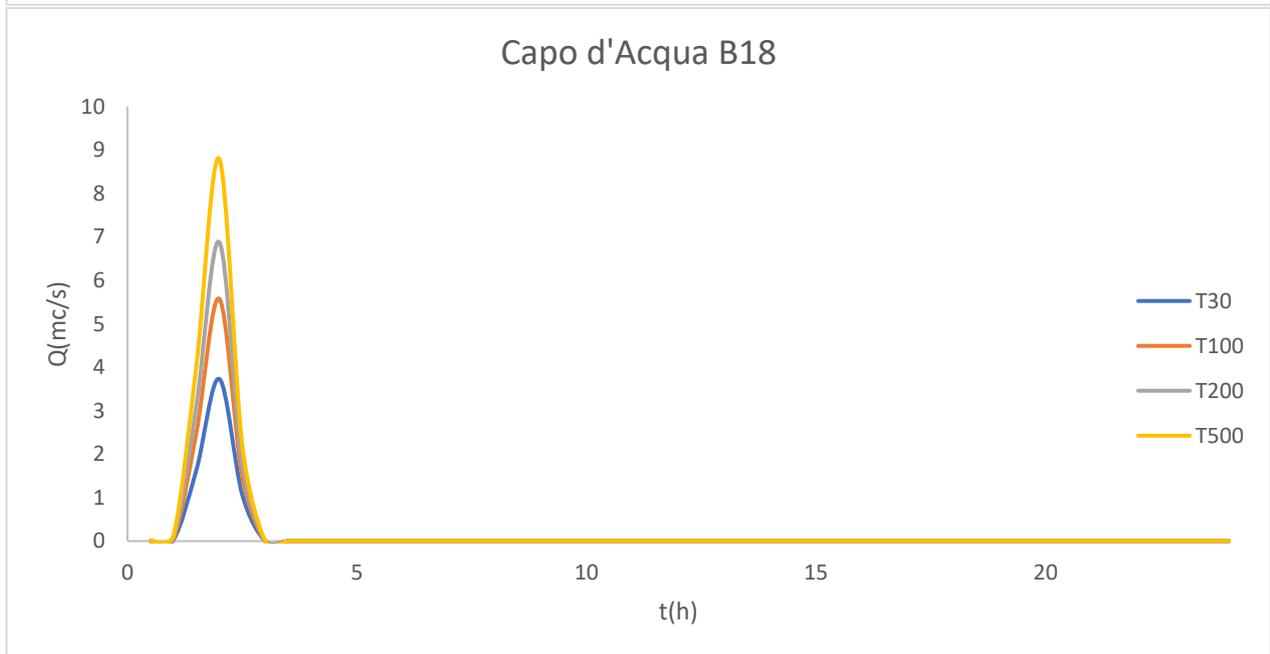
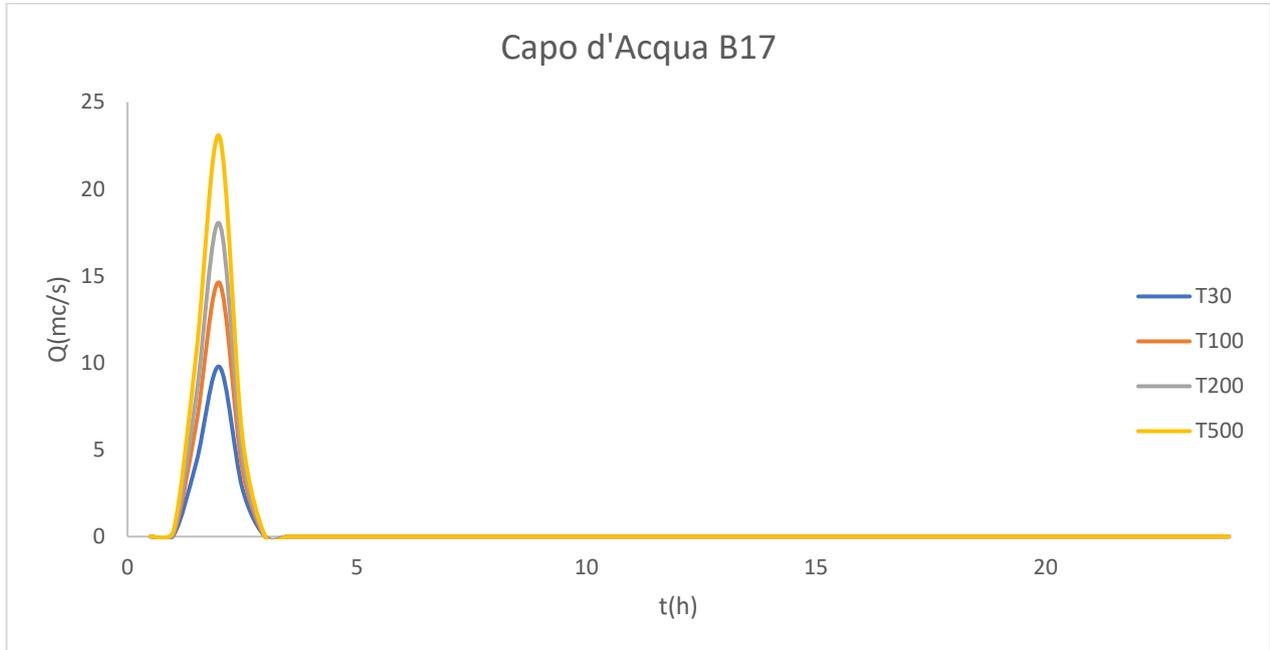
Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	69



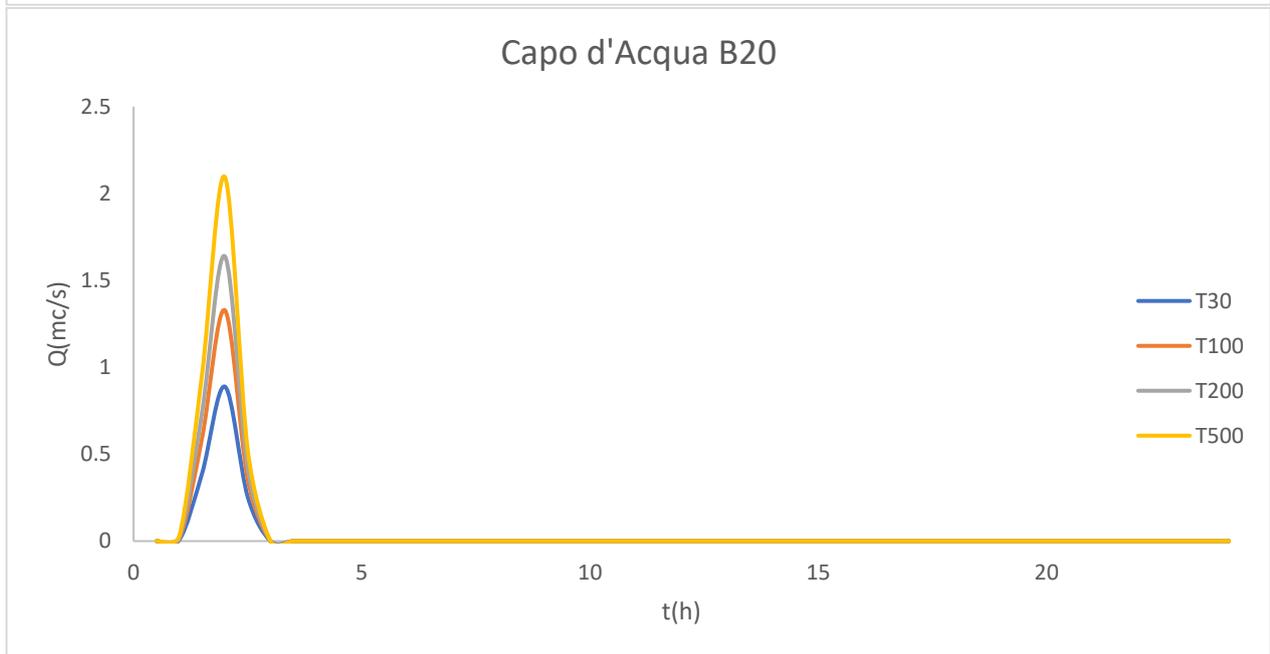
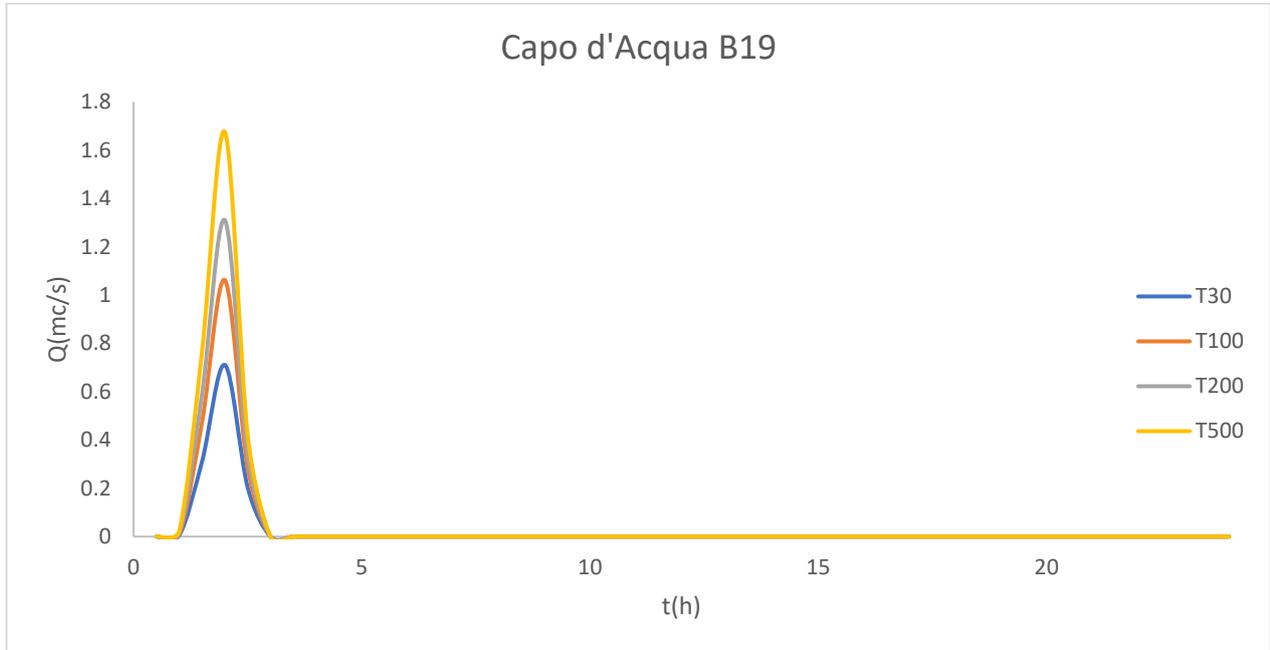
Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV	FOGLIO	
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	70



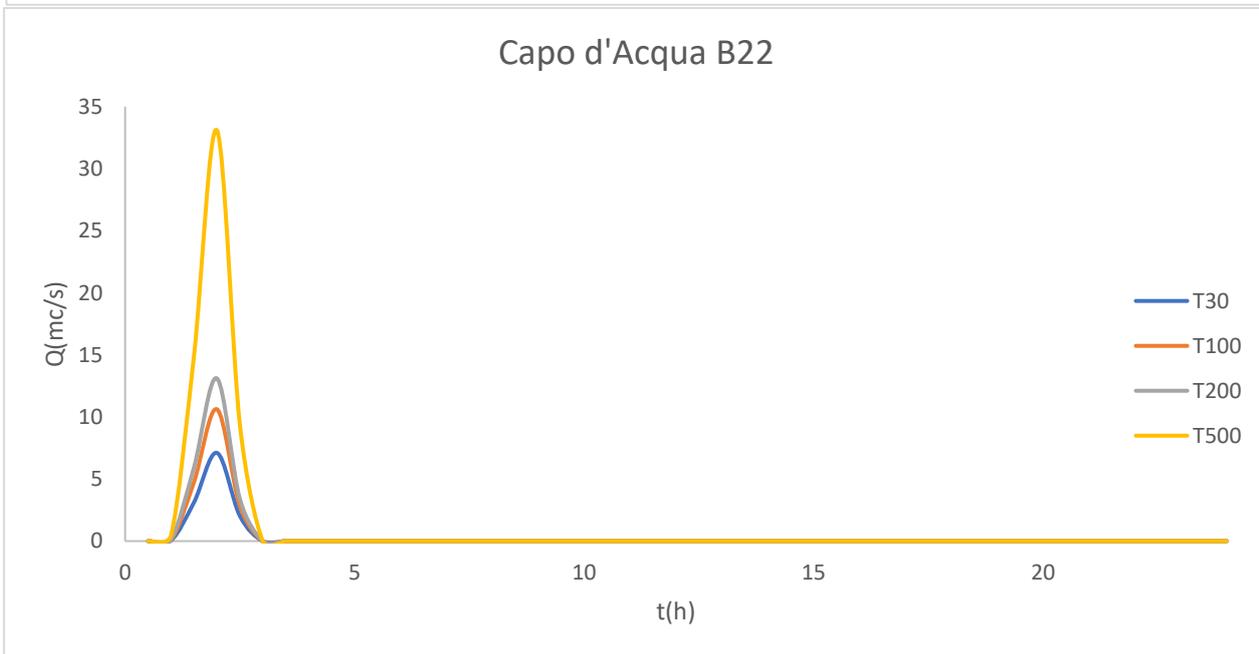
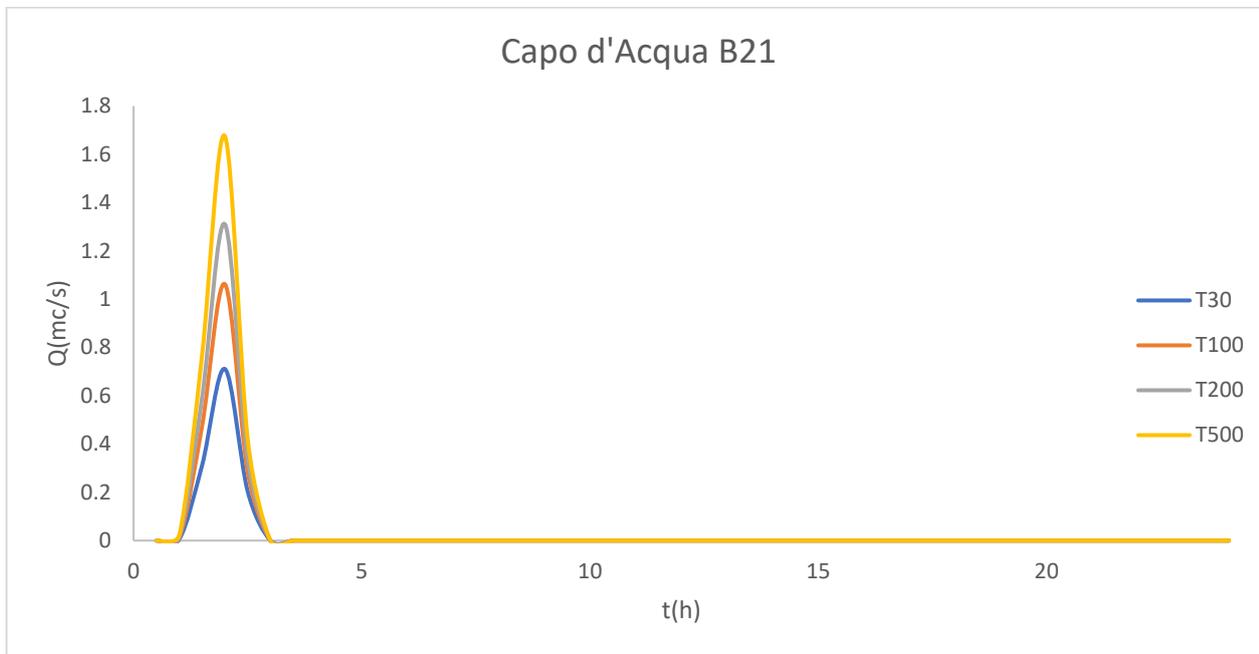
Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	71



Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	72



Si riporta la tabella riepilogativa delle portate per i vari bacini utilizzando, come per i bacini principali:

<i>Complesso del Capo d'Acqua</i>					
N. Bacino	A	Q_{Tr30}	Q_{Tr100}	Q_{Tr200}	Q_{Tr500}
	Km^2	m^3/s	m^3/s	m^3/s	m^3/s
9	1.15	12.61	19.71	25.00	33.10
10	6.23	29.80	43.65	53.37	67.60
11	0.52	9.24	13.81	17.04	21.79
11.1	0.29	3.91	5.84	7.21	9.22
12	1.17	12.82	20.04	25.41	33.64
13	0.19	3.73	5.83	7.39	9.79
14	0.26	4.62	6.91	8.52	10.89
15	0.05	0.89	1.33	1.64	2.09
16	0.05	0.89	1.33	1.64	2.09
17	0.49	9.78	14.61	18.02	23.04
18	0.21	3.73	5.58	6.88	8.80
19	0.04	0.71	1.06	1.31	1.68
20	0.05	0.89	1.33	1.64	2.09
21	0.04	0.71	1.06	1.31	1.68
22	0.40	7.11	10.62	13.11	33.10

Tabella 3. Località Capo d'Acqua: portate al colmo per i bacini idrografici minori.

Condizione al contorno di valle

Così come per il torrente Saccione, le condizioni al contorno di valle adottate sono del tipo Stage Hydrograph. In particolare, è stato ipotizzato un sovrizzo del livello del mare di 0.5 m slm in considerazione e all'eventualità di una concomitanza di condizioni meteo-marine avverse.

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	74

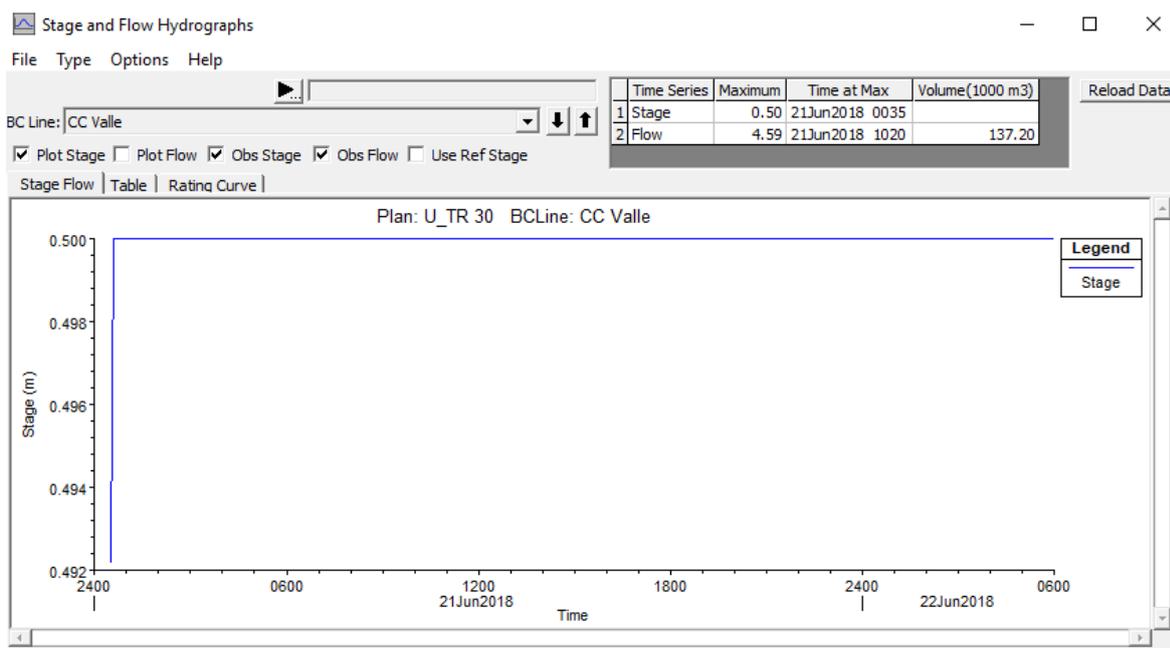
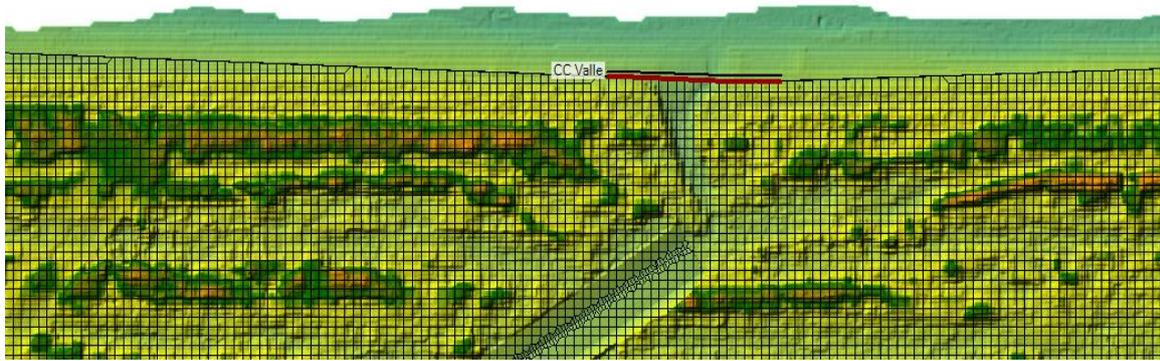


Figura 7-21. Modello 2D - Località Capo d'Acqua: posizione della condizione al contorno di valle (CC Valle).

E' stata inserita anche una condizione al contorno (CCV1) all'estremità sinistra del modello 2D di tipo *Normal Depth* ($i=0.005$), ad indicare la possibile "fuoriuscita" di acqua, in dipendenza delle esondazioni dei corsi d'acqua simulati, implementate tramite l'utilizzo di BC-lines.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	75

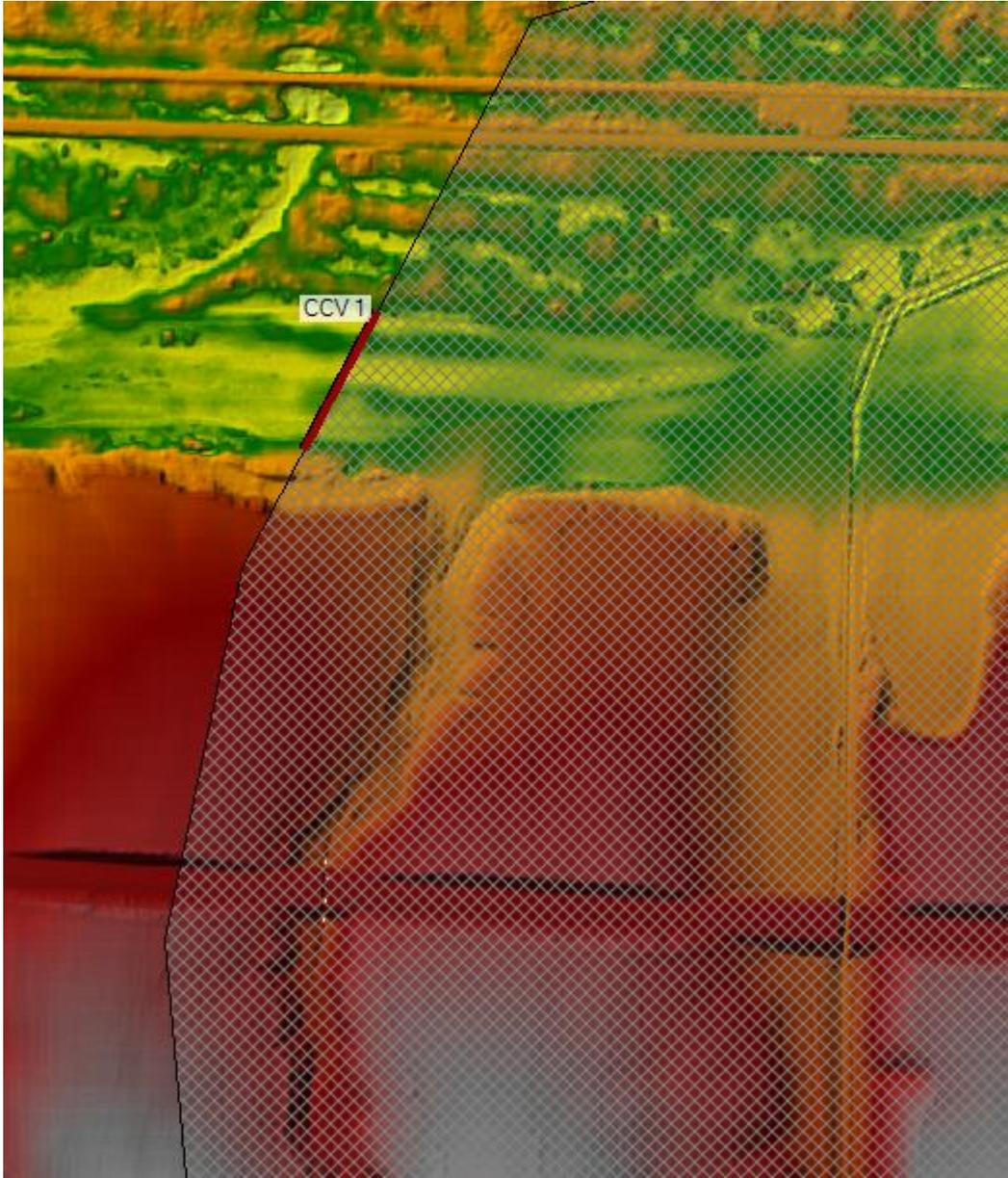


Figura 7-22. Modello 2D - Località Capo d'Acqua: poszione della condizione CCV1.

MANDATARIA  CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE & R.L.	MANDANTI 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
		Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV
	LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D

8. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE

Si riportano di seguito i risultati ottenuti nelle simulazioni idrauliche effettuate per i corsi d'acqua oggetto di studio.

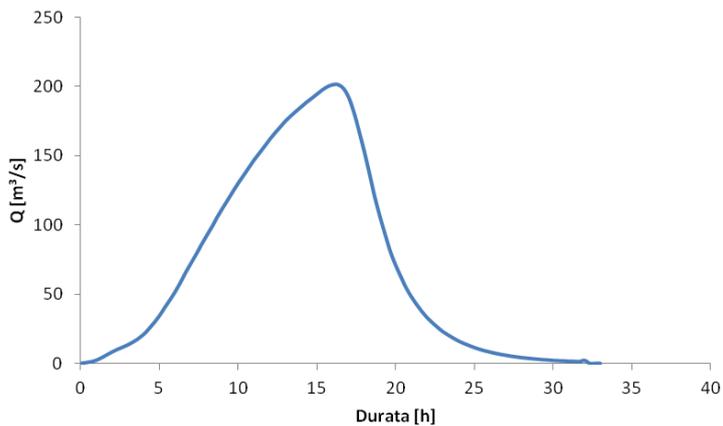
Torrente Saccione

Di seguito sinteticamente, per una corretta taratura del modello idraulico, i risultati ottenuti dal confronto delle aree di esondazione del P.R.G.A/P.A.I. ed risultati ottenuti nella modellazione ANTE OPERAM con tempo di ritorno TR 30 e TR 200 con i relativi idrogrammi di piena forniti dell'Autorità di Bacino.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	77

ADB Tr 30



ADB Tr 200

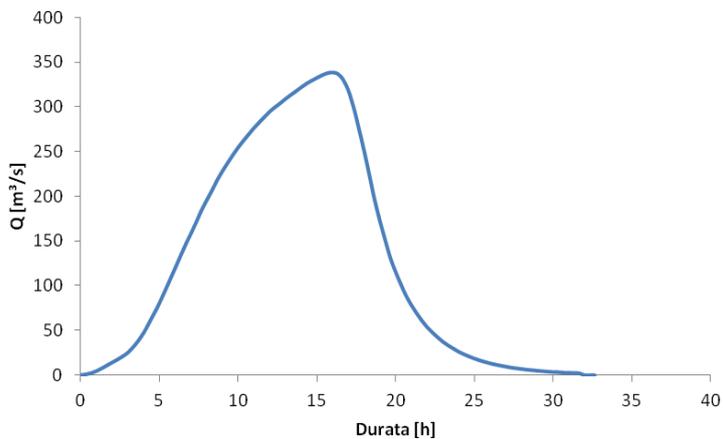


Figura 8-1. Idrogrammi di piena forniti dall' AdB per Tr 30 e Tr 200.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	78

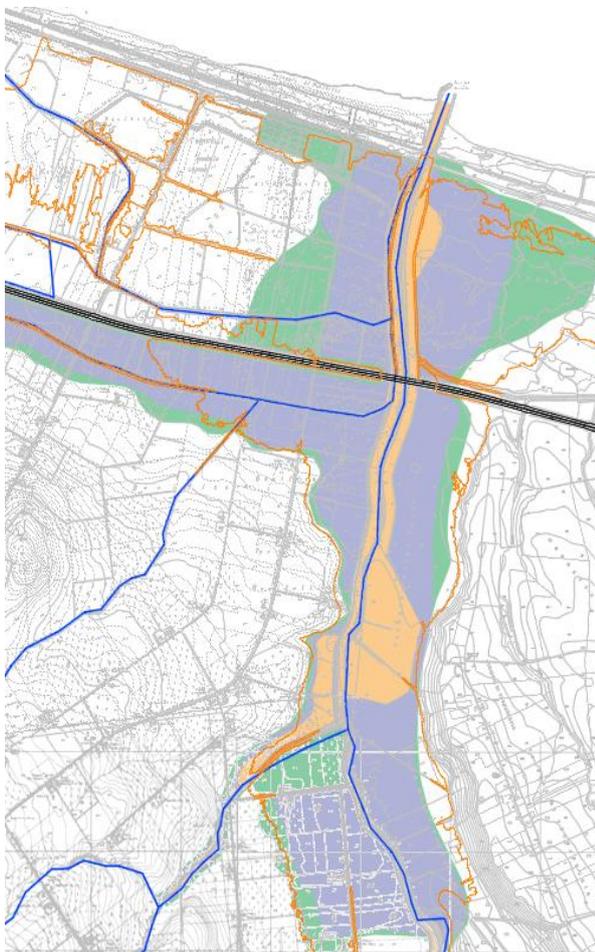


Figura 8-2 Confronto P.R.G.A. con aree di esondazione ante operam TR 30 (aree in arancione)

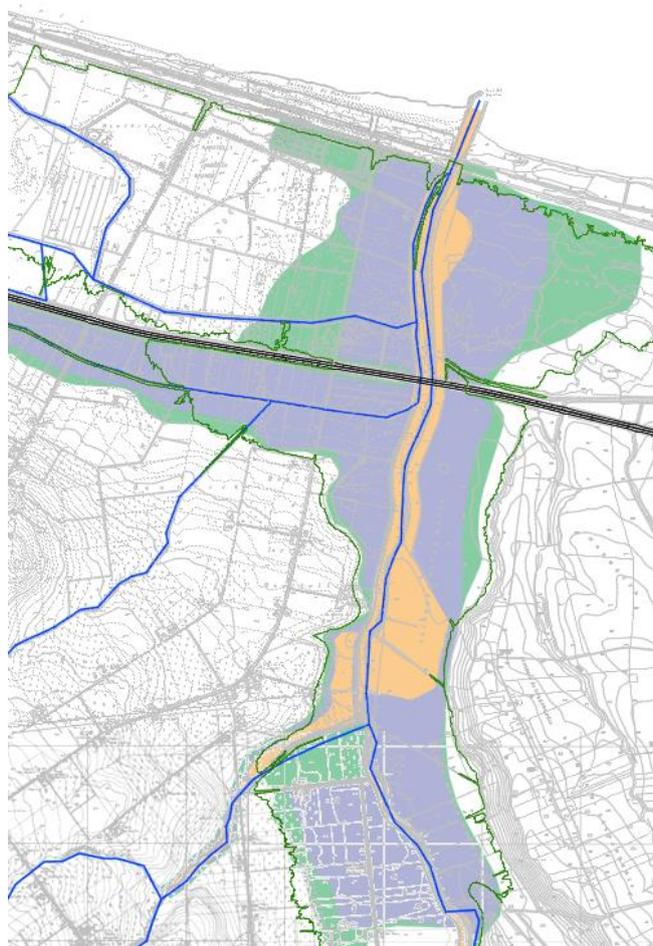


Figura 8-3 Confronto P.R.G.A. con aree di esondazione ante operam TR 200 (aree in verde).

Dal confronto con il P.G.R.A./P.A.I. emerge una discreta corrispondenza con le aree allagabili a monte dell'autostrada A14, con riferimento allo stato di fatto. Tale condizione appare indicativa di una corretta taratura dei parametri adottati per la modellazione di progetto.

Tuttavia non vi è la perfetta corrispondenza tra l'area allagata simulata in questa progettazione e l'area allagata riportata sul P.G.R.A. soprattutto nella parte a valle dell'A14, poiché molto probabilmente durante le simulazioni condotte per la determinazione delle Aree allagate P.G.R.A., non saranno stati utilizzati tutti gli idrogrammi inseriti nella simulazione attuale, ma altri essendo

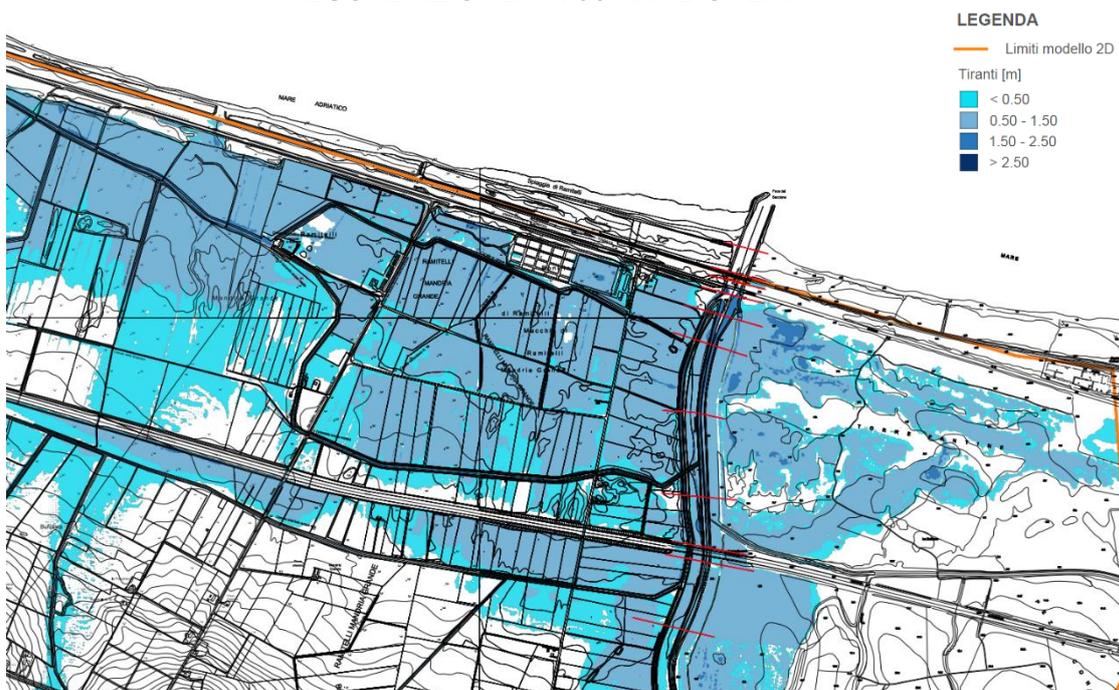
Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	79

sicuramente il dominio 2D indagato di estensione maggiore, inoltre non si conoscono i dettagli delle simulazioni condotte dall'AdB, quali ad esempio la definizione del DTM di base, la spaziatura tra le maglie, il passo temporale utilizzato e i vari coefficienti di Manning adottati, che sono tutti parametri in grado di far variare notevolmente i risultati ottenuti.

Il confronto dei risultati ottenuti mediante le simulazioni ante e post operam sviluppate sono di seguito riportate.

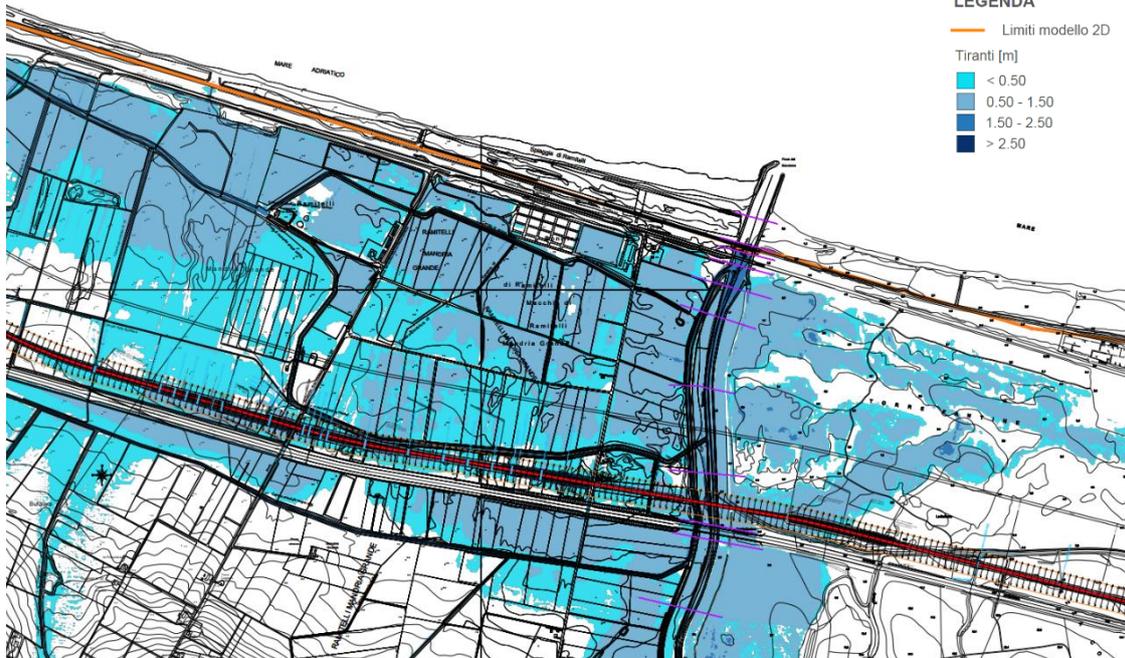
ESONDAZIONE TR 30 ANTE OPERAM



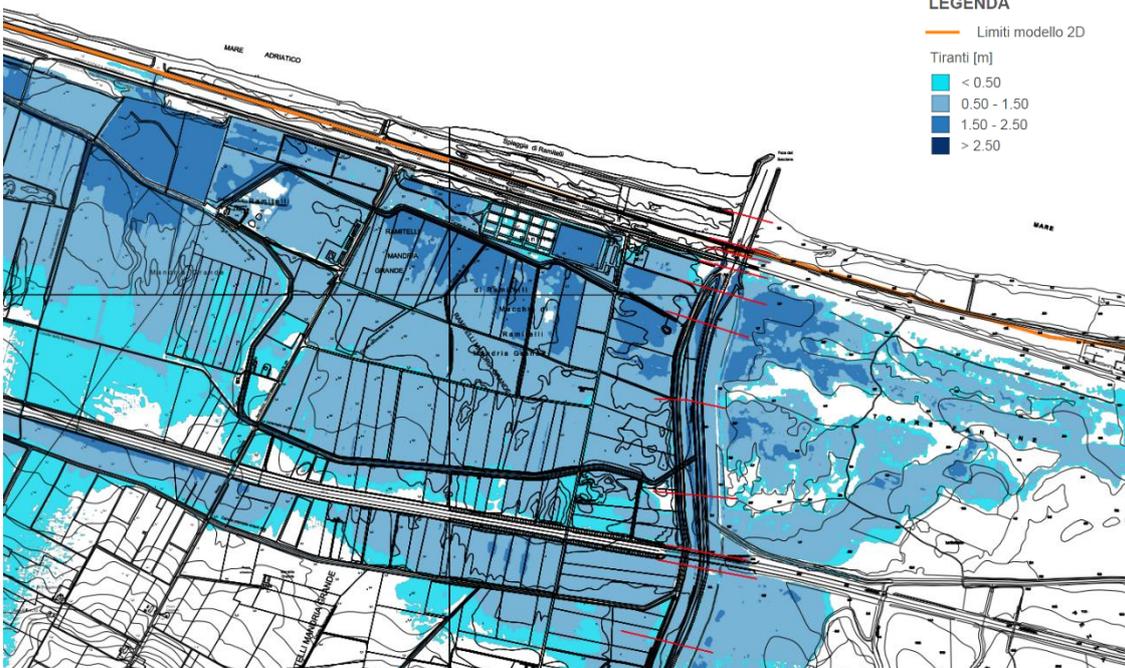
ESONDAZIONE TR 30 POST OPERAM

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	80



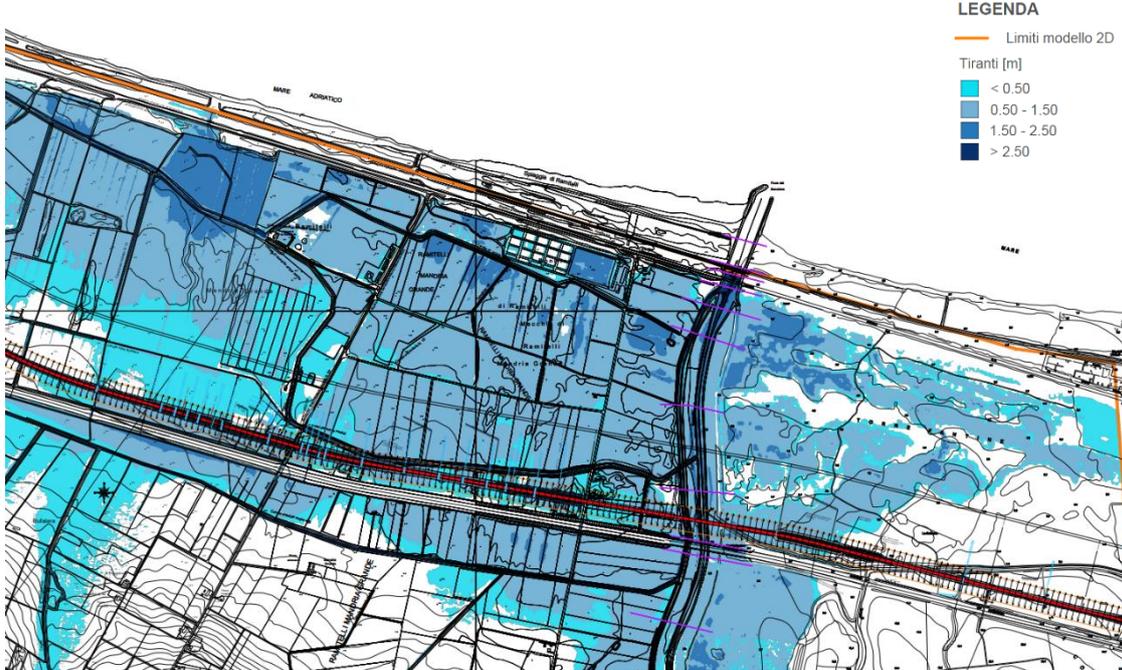
ESONDAZIONE TR 100 ANTE OPERAM



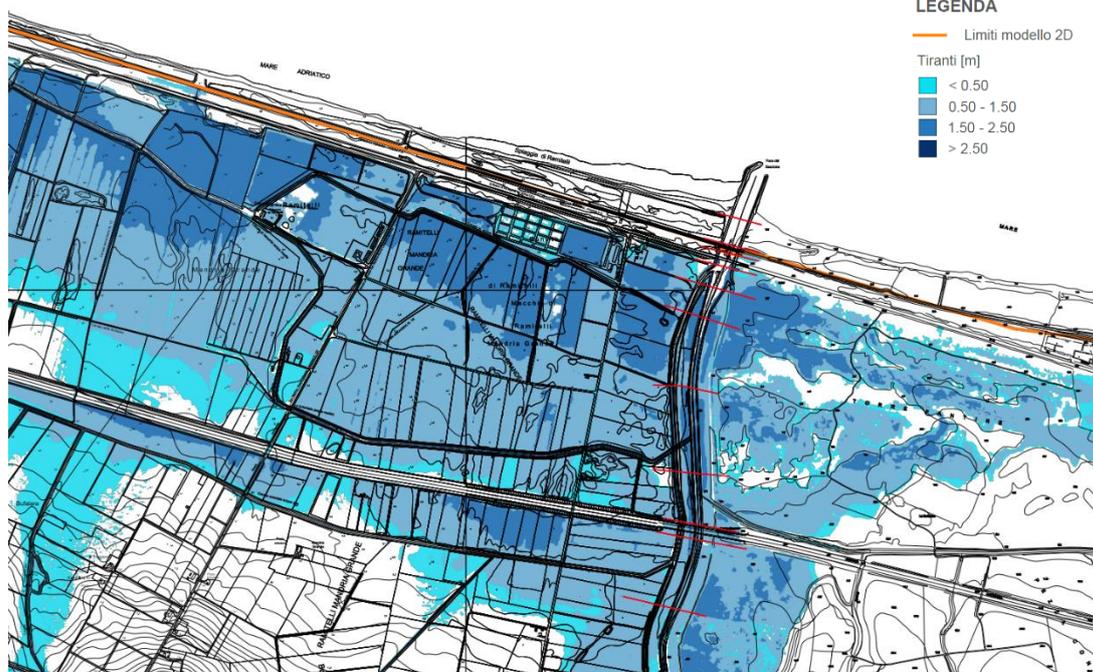
Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	81

ESONDAZIONE TR 100 POST OPERAM



ESONDAZIONE TR 200 ANTE OPERAM



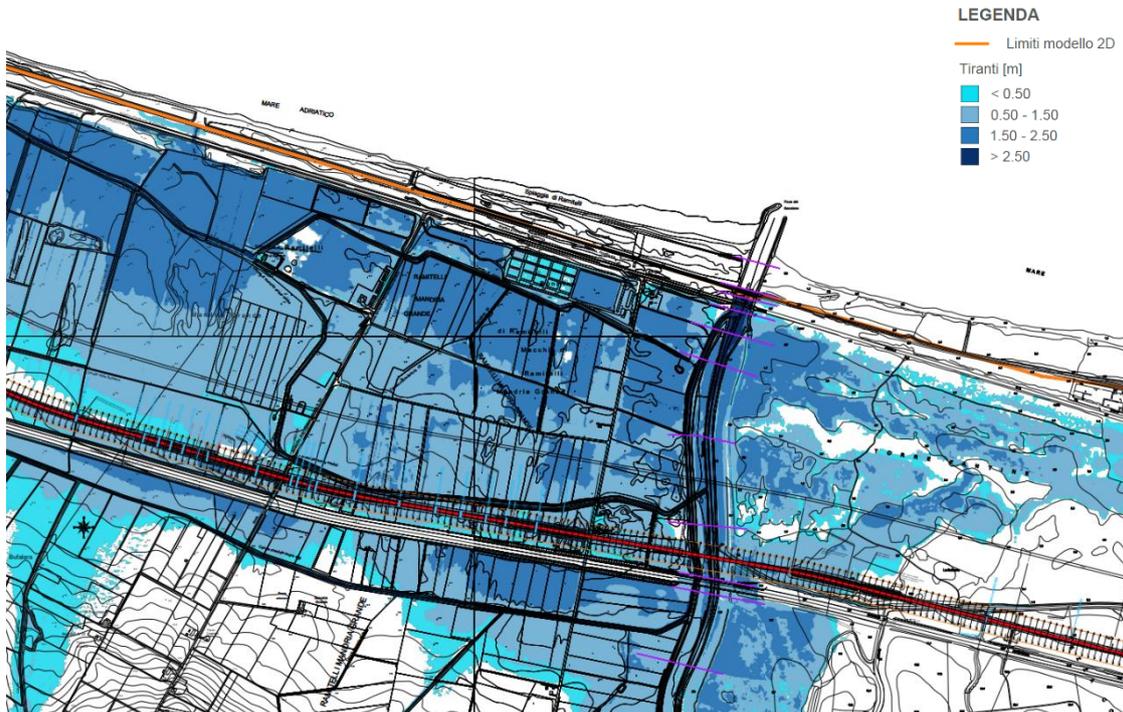
LINEA PESCARA – BARI

**RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA
LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA**

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	82

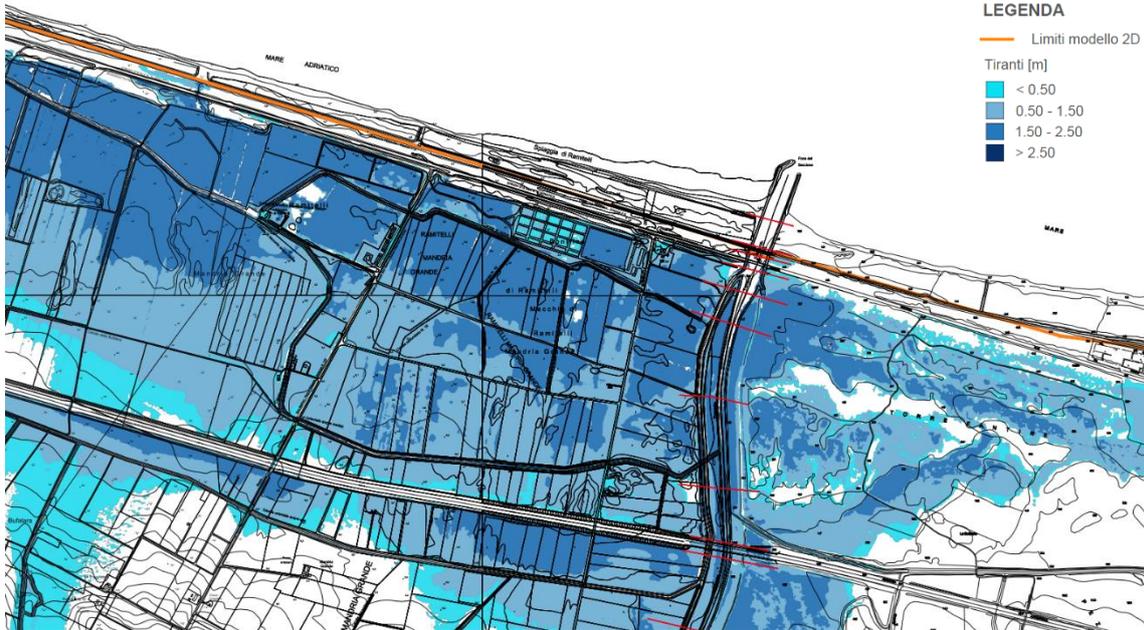
ESONDAZIONE TR 200 POST OPERAM



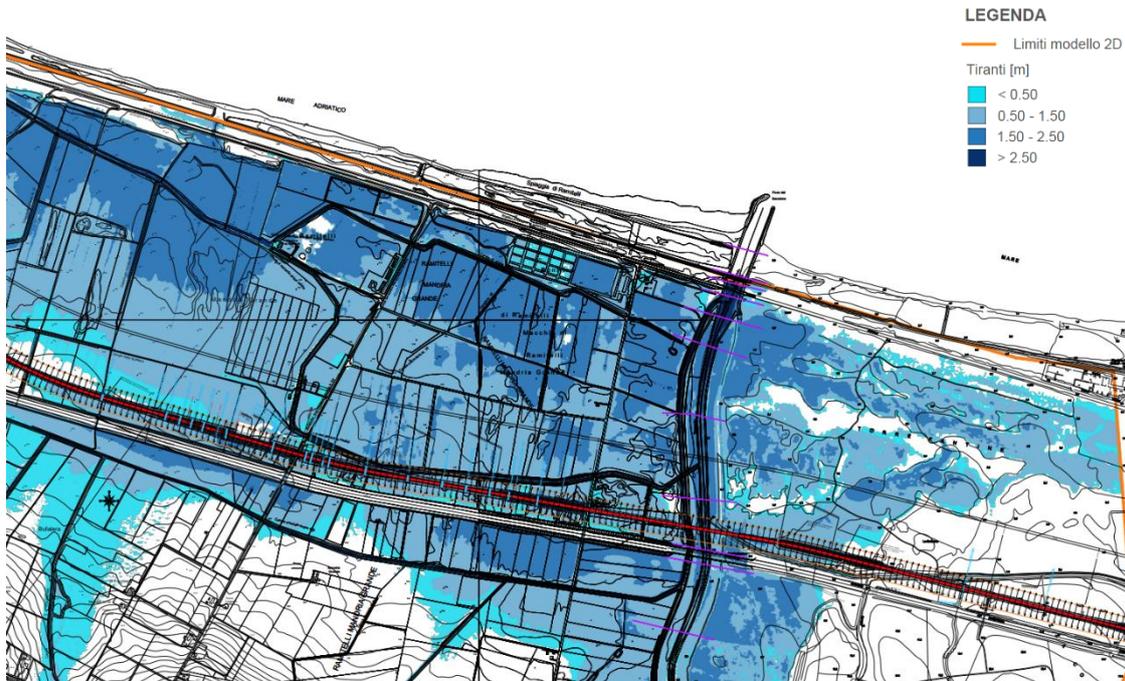
ESONDAZIONE TR 500 ANTE OPERAM

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	83



ESONDAZIONE TR 300 POST OPERAM



LINEA PESCARA – BARI

**RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA
LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA**

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	84

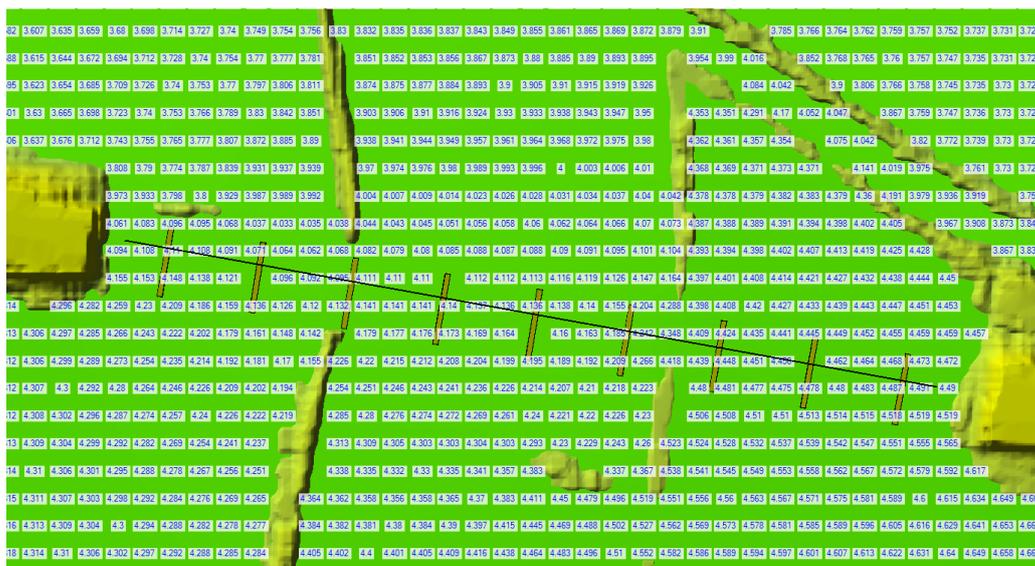
Dal confronto tra le aree di esondazione ante operam e post operam, non si riscontrano modifiche delle aree di esondazione a monte dell'autostrada A14; modeste variazioni si osservano a valle dell'opera di attraversamento (VI06) in progetto, in particolare in sinistra idraulica, imputabili alla presenza del nuovo rilevato ferroviario, che modifica, seppure localmente in corrispondenza di alcuni tratti di ridotta estensione, l'evoluzione dell'esondazione che già interessa tali aree nello scenario ante-operam.

Con riferimento al ponte esistente sul T. Saccione dell'autostrada A14, nello scenario ANTE OPERAM – Tr 200, il livello idrico si attesta a +4.49 m.sl.m.; mentre nello scenario POST OPERAM – Tr 200, a + 4.52 m.sl.m., a fronte di una quota di intradosso di + 6.50 m.sl.m. Pertanto, nello scenario post operam, la nuova opera di attraversamento ferroviaria (VI06) in progetto, non compromette la funzionalità idraulica del ponte esistente dell'A14.

Di seguito, si riportano le linee di corrente in corrispondenza del ponte dell'A14 esistente, nelle configurazioni ante e post operam, per il tempo di ritorno di 200 anni.

ANTE OPERAM (Tr200): Ponte Saccione – Autostrada Adriatica E55 (quota intradosso + 6.50 m.sl.m.)

Superficie idrica massima registrata in alveo + 4.69 m.sl.m.



COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	85

POST OPERAM (Tr200): Ponte Saccione – Autostrada Adriatica E55 (quota intradosso + 6.50 m.sl.m.)

Superficie idrica massima registrata in alveo + 4.54 m.sl.m.



Con riferimento alla nuova opera di attraversamento ferroviaria, la verifica del franco di progetto è eseguita secondo le diverse normative e regolamenti di riferimento; in particolare, le NTC 2018 e il manuale di progettazione ferroviaria (RFI). Nella tabella seguente, si riportano i risultati delle verifiche eseguite: il viadotto è ampiamente verificato e quindi risulta compatibile dal punto di vista idraulico.

	Quota minima impalcato [m s.m.m]	Livello di piena + franco [m s.m.m]	Carico totale + franco [m s.m.m]	Verifica
NTC (Tr200 anni)	+7.24	4.19+2.0 = 6.19	-	OK
MANUALE RFI (Tr200 anni)		4.30+1.5 = 5.80	4.80+0.5 = 5.30	OK

Tabella 8-1 – Verifica del franco idraulico del viadotto VI06 secondo le indicazioni di normativa e regolamenti di progettazione vigenti.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	86

Il viadotto presenta 2 campate di scavalco di luce netta pari a 65 m, che misurata ortogonalmente al filone principale della corrente si attesta a circa 60 metri, **ben superiore rispetto alla distanza minima richiesta dalle NTC 2018 (40 metri).**

Inoltre, la distanza tra la quota di fondo e quella di sottotrave è pari a circa 6 metri, ampiamente sufficiente a garantire l'eventuale passaggio (se non ostacolati prima dalle pile del ponte esistente dell'A14) di alberi d'alto fusto senza possibilità che gli stessi si incastrino a causa della presenza dell'infrastruttura e occludano parzialmente o totalmente la sezione di deflusso.

POST OPERAM (Tr200): Viadotto VI06 in progetto (quota intradosso + 7.24 m.sl.m.)

Superficie idrica massima registrata in alveo + 3.85 m.sl.m.



Canale Capo D'acqua e corsi d'acqua minori

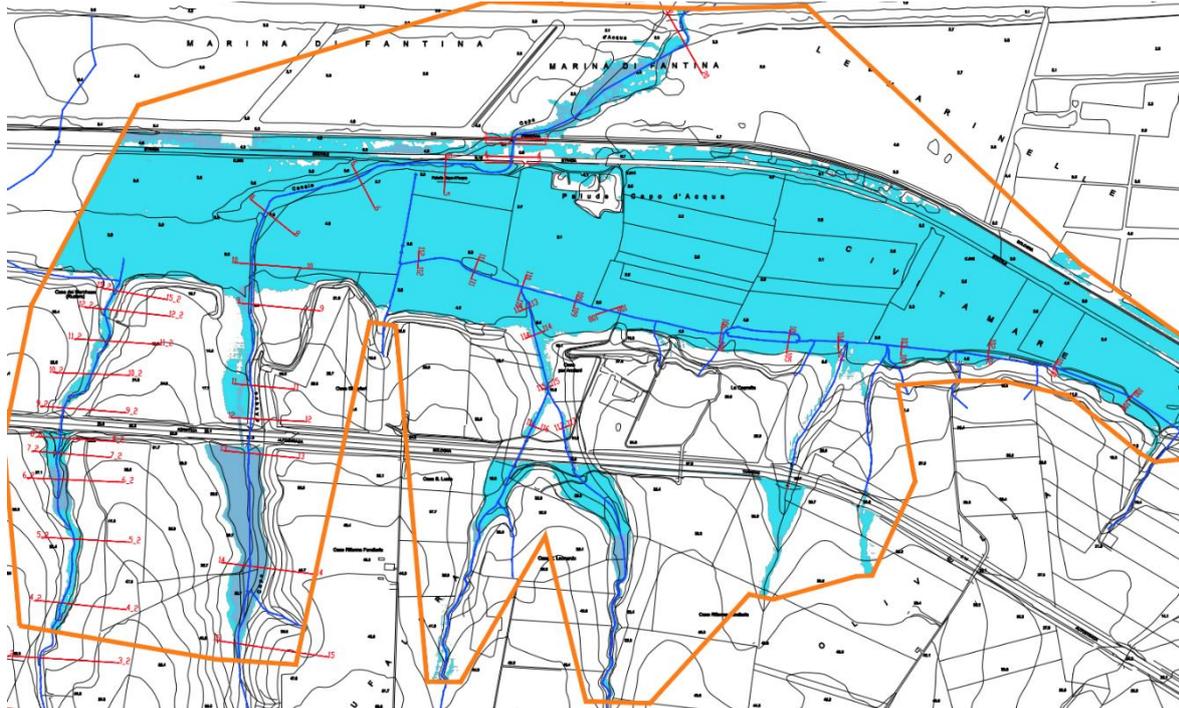
Per via dell'assenza di aree di esondazione o pericolosità idraulica definite nell'ambito del P.R.G.A./P.A.I. non è stato possibile effettuare alcun confronto preliminare per la calibrazione dei modelli sviluppati.

Si riportano di seguito i risultati ottenuti, in termini di aree di esondazione (ANTE e POST OPERAM), per l'intero sistema di corsi d'acqua analizzati in località Capo D'Acqua, nelle simulazioni idrauliche sviluppate.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	87

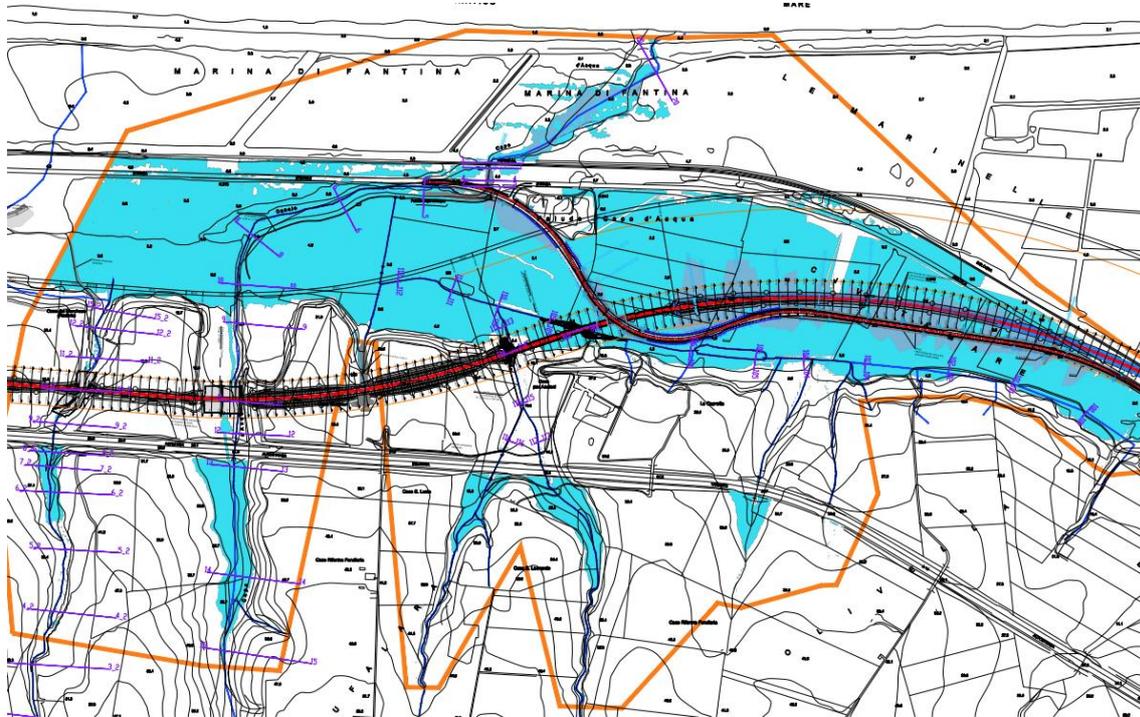
ESONDAZIONE TR 30 ANTE OPERAM



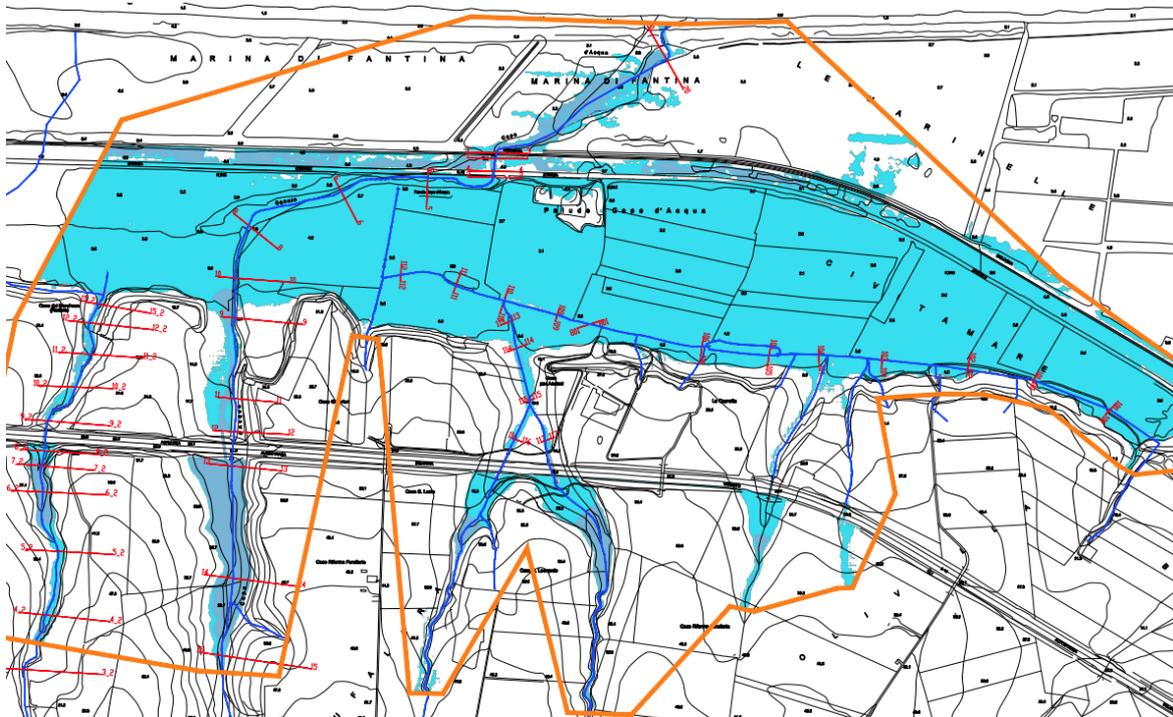
ESONDAZIONE TR 30 POST OPERAM

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	88



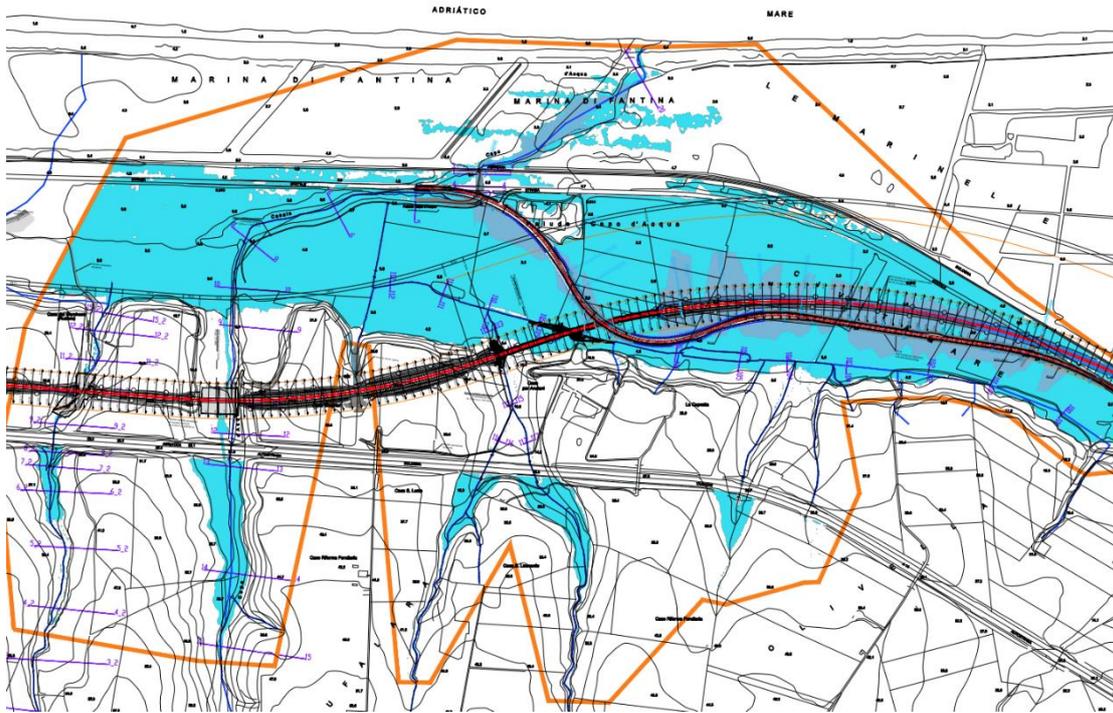
ESONDAZIONE TR 100 ANTE OPERAM



Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	89

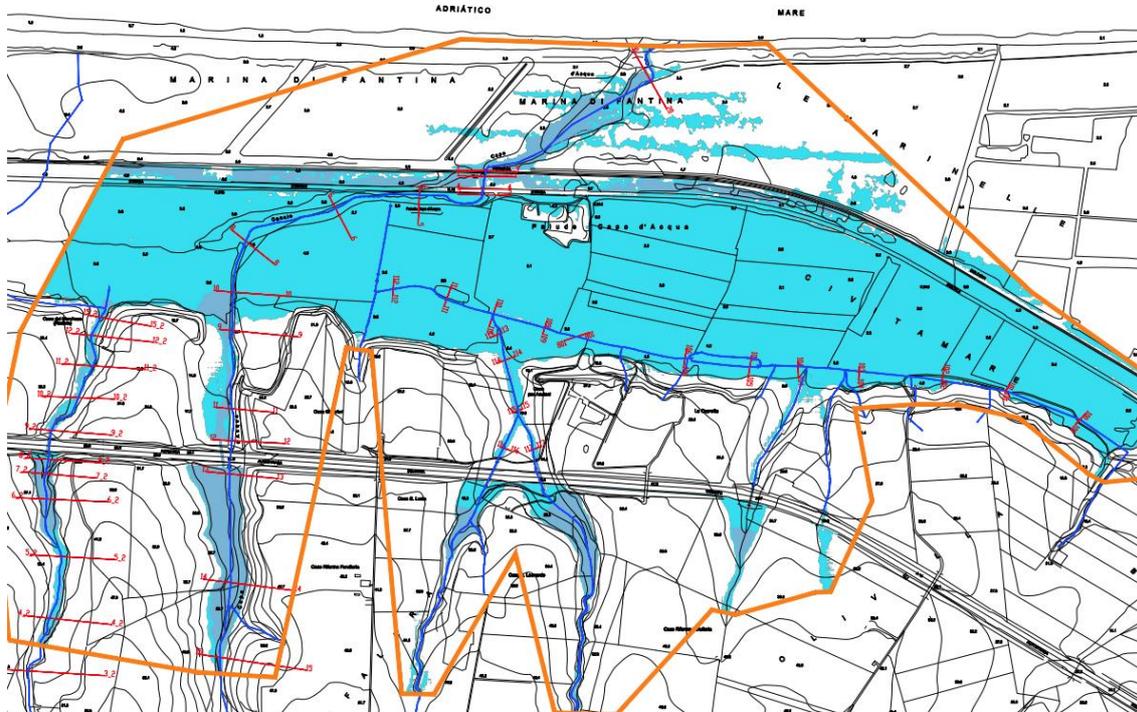
ESONDAZIONE TR 100 POST OPERAM



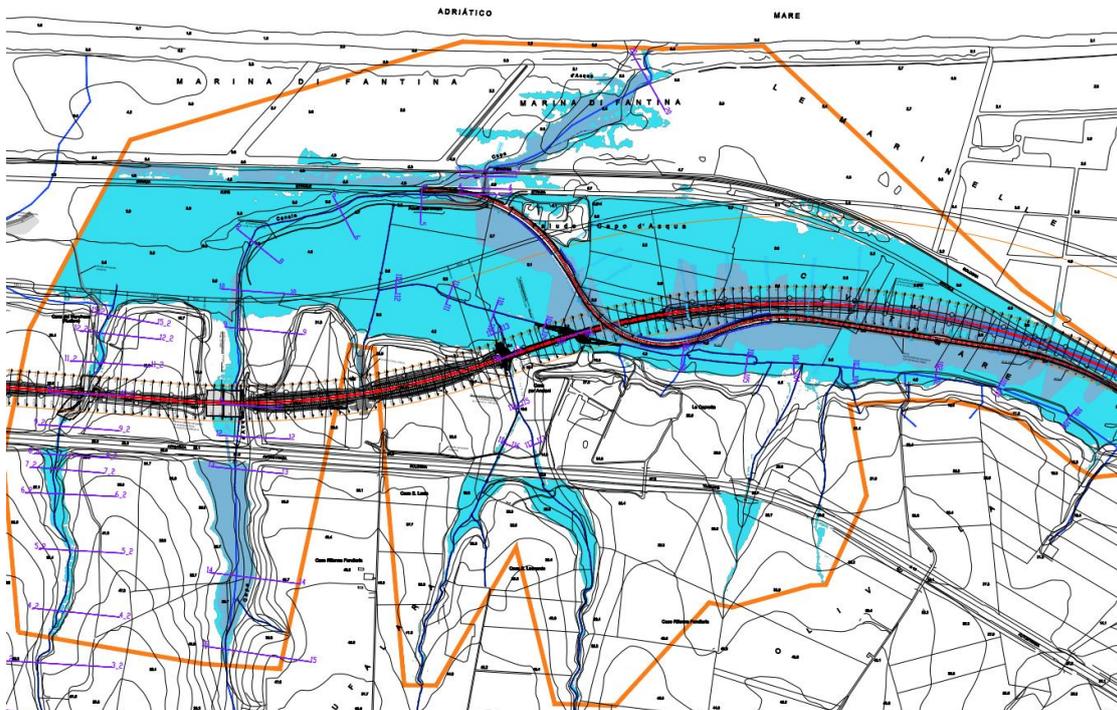
ESONDAZIONE TR 200 ANTE OPERAM

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	90



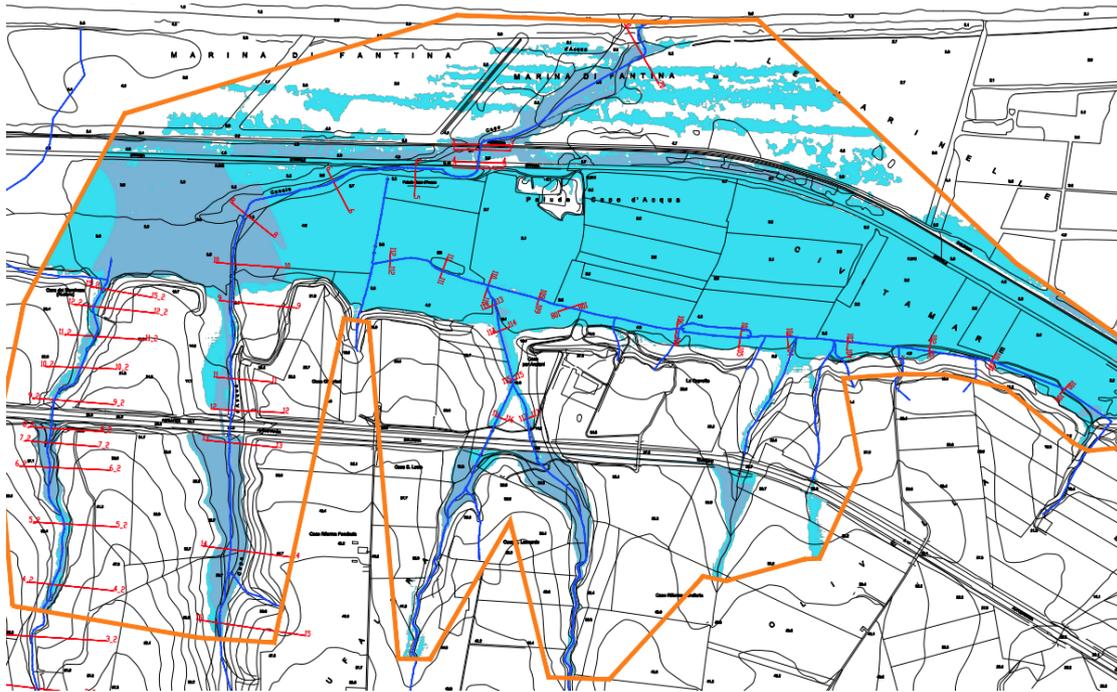
ESONDAZIONE TR 200 POST OPERAM



Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	91

ESONDAZIONE TR 500 ANTE OPERAM



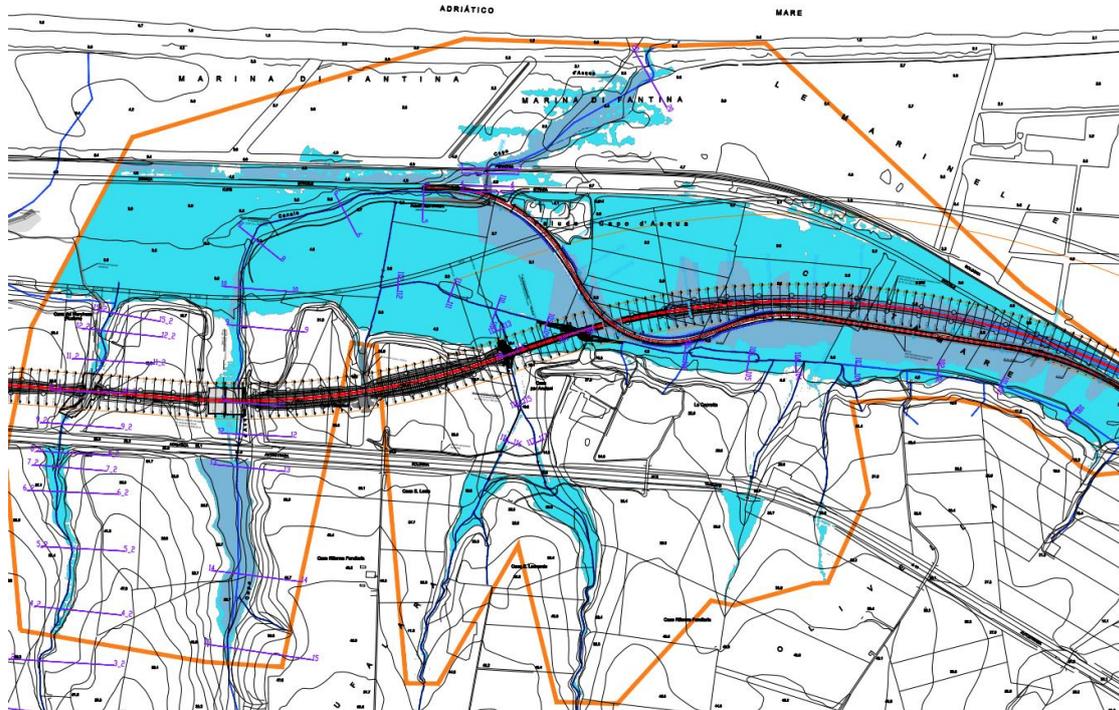
ESONDAZIONE TR 500 POST OPERAM

LINEA PESCARA – BARI

**RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA
 LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA**

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	92



 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D

Come anticipato nel capitolo precedente, nella configurazione post operam sono state implementate anche le opere di sistemazione e riprofilatura del Canale Capo d'Acqua (attraversato dalla NV18 alla pk 0+180), atte alla verifica del franco idraulico del tombino (IN90) di progetto (2 canne, 3.5 x 3.5 m), secondo la normativa vigente. Per maggiori dettagli, si rimanda agli elaborati specialistici. Dal confronto tra gli scenari ante e post operam, non si rilevano significative differenze nelle aree di esondazione. A monte della linea FF.SS. storica e della SS16, le modeste (locali) variazioni sono imputabili ai rilevati ferroviario e della nuova viabilità che modificano, seppure in limitati punti, l'evoluzione delle esondazioni in aree peraltro già inondate nello scenario ante operam. A valle della SS16, le modeste differenze sono imputabili alle opere di sistemazione idraulica (che prevedono anche la demolizione dei tombini stradale e ferroviario esistenti) del Canale Capo d'Acqua. In ogni caso, si deve tenere presente che per il tempo di ritorno di 200 anni, la zona *“Palude Capo d'Acqua”* indagata in questa sede è interessata dalle aree di esondazione del Fiume Fortore, come mostrato nel relativo studio idraulico, annesso al Progetto Definitivo *“Linea Pescara- Bari – Raddoppio della tratta ferroviaria Termoli-Lesina – Lotti 1 – Raddoppio Ripalta – Lesina”*. Per completezza, si riporta un estratto dell'elaborato grafico riportante le aree di esondazione (TR 200, post operam) del Fiume Fortore.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA	PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID 00 02	001	D	94

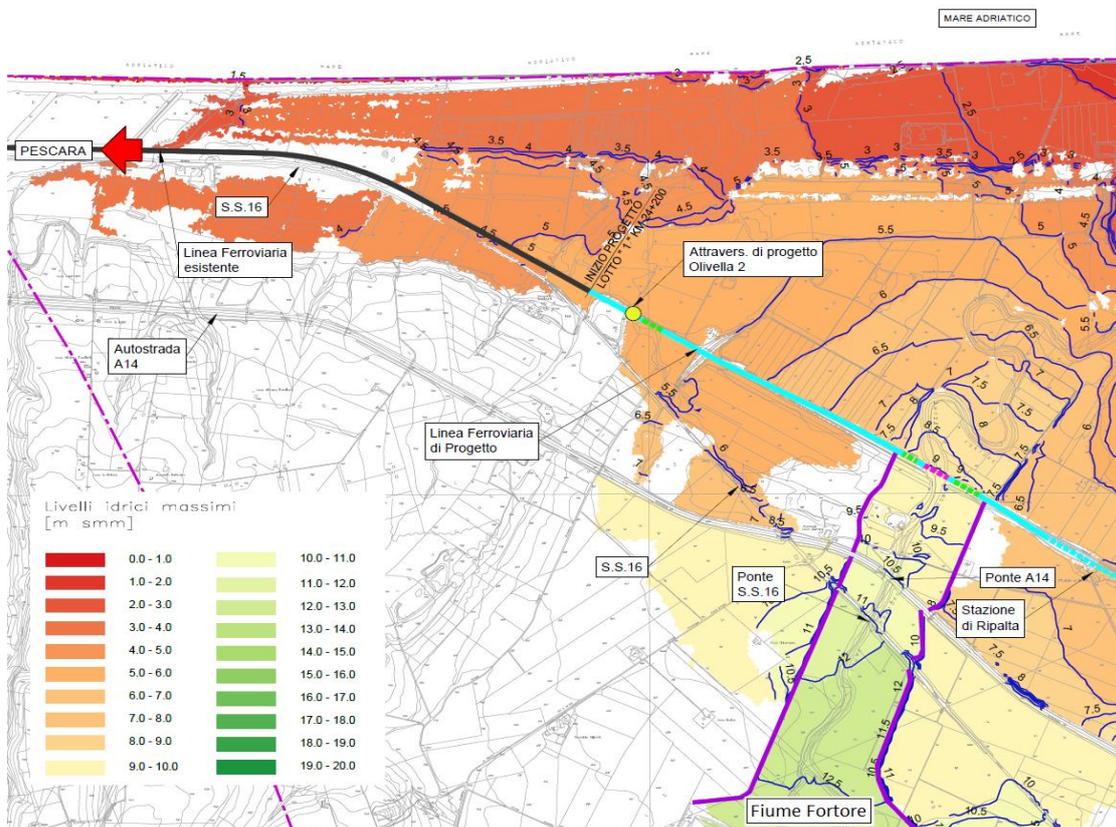


Figura 8-4. Aree di esondazione Tr200 del Fiume Fortore.

I livelli idrici associati alle esondazioni del Fiume Fortore sono stati debitamente considerati (e verificati) nell’ambito del presente studio idraulico. Anche le dimensioni delle opere di protezione dei rilevati (riportate nei paragrafi successivi) sono state definite sulla base di tali tiranti idrici.

Di seguito, i valori di tirante idrico assoluto, per la piena duecentennale, in corrispondenza degli attraversamenti in zona Capo d’Acqua, nello scenario POST OPERAM.

Viadotto VI13 – Canale 21+600

	Quota minima impalcato [m s.m.m]	Livello di piena + franco [m s.m.m]	Carico totale + franco [m s.m.m]	Verifica

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	95

NTC (Tr 200 anni) + MANUALE RFI (Tr 200 anni)	+18.90	$10.34+1.50 =$ 11.84	$11.40+0.5 =$ 11.90	OK
--	--------	-------------------------	------------------------	-----------

Viadotto VI14 – Canale Capo D'Acqua

	Quota minima impalcato [m s.m.m]	Livello di piena + franco [m s.m.m]	Carico totale + franco [m s.m.m]	Verifica
NTC (Tr 200 anni) + MANUALE RFI (Tr 200 anni)	+18.70	$12.00+1.50 =$ 13.50	$12.40+0.5 =$ 12.90	OK

Viadotto VI15 – Palude Capo D'Acqua (canali alle pk 22+800 e 23+000)

	Quota minima impalcato [m s.m.m]	Livello di piena + franco [m s.m.m]	Carico totale + franco [m s.m.m]	Verifica
NTC (Tr 200 anni) + MANUALE RFI (Tr 200 anni)	+11.4 (pk 22+800)	$6.5+1.50 = 8.0$ (pk 22+800)	$6.65+0.5 = 7.15$ (pk 22+800)	OK
	+10.9 (pk 23+000)	$4.5+1.50 = 6.0$ (pk 23+000)	$4.65+0.5 = 5.15$ (pk 22+800)	

Il franco idraulico risulta ampiamente verificato su tutte le opere di attraversamento analizzate, con riferimento sia alle NTC 2008 sia al Manuale di Progettazione RFI.

LINEA PESCARA – BARI

**RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA
LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA**

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	96

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	97

9. SISTEMAZIONI IDRAULICHE

9.1 Verifica allo scalzamento

Nel presente paragrafo viene analizzato lo scalzamento massimo atteso del fondo alveo e delle aree golenali in corrispondenza delle pile e delle spalle di sostegno dell'impalcato ferroviario in occasione di eventi di piena, rispetto alle condizioni naturali del corso d'acqua.

Lo scalzamento, causato dallo scavo e dall'erosione di materiale dal letto 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.

La presenza della pila in alveo causa un aumento della velocità, rilevata dall'addensamento delle linee di corrente. In corrispondenza della pila 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 9-1). 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).

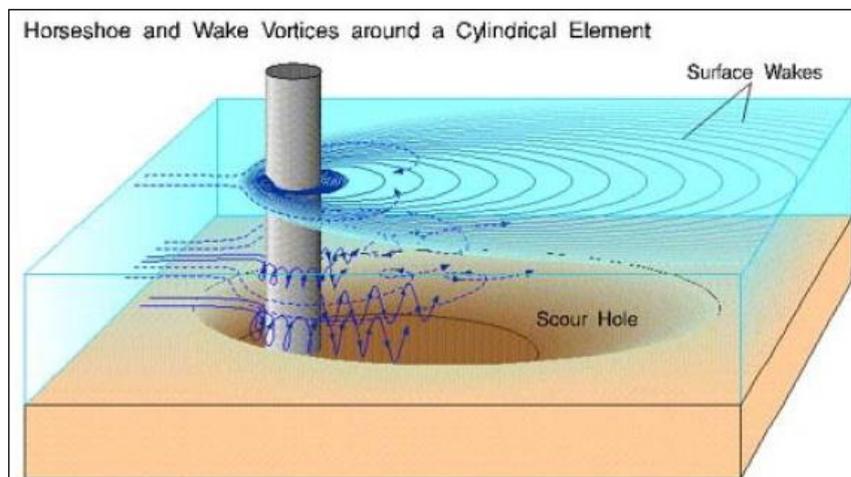


Figura 9-1 – Schematizzazione delle turbolenze e dello scavo nell'intorno di una pila circolare isolata.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	98

Metodo di calcolo dello scalzamento

Per il calcolo dell’erosione localizzata dovuta alla presenza di una pila sono state utilizzate le formule riportate di seguito.

Formulazione CSU

La profondità di scalzamento attesa può essere stimata mediante la seguente relazione:

$$\frac{Y_s}{Y_1} = 2 \cdot K_1 K_2 K_3 \left(\frac{a}{Y_1} \right)^{0.65} FR^{0.43}$$

in cui

- K_1, K_2, K_3 sono fattori correttivi legati alla forma delle pile, all’angolo di attacco e alle condizioni del fondo alveo (Tabella 9-1);
- Y_s , la profondità di scalzamento;
- Y_1 , l’altezza della corrente;
- a , la larghezza della pila;
- FR , il numero di Froude ($FR \square V_0/(gh_m)^{1/2}$).

Correction Factor, K_1		Correction Factor, K_2			
Shape of Pier Nose	K_1	Angle	L/a=4	L/a=8	L/a=12
(a) Square nose	1.1	0	1.0	1.0	1.0
(b) Round nose	1.0	15	1.5	2.0	2.5
(c) Circular cylinder	1.0	30	2.0	2.75	3.5
(d) Group of cylinders	1.0	45	2.3	3.3	4.3
(e) Sharp nose	0.9	90	2.5	3.9	5.0

Angle = skew angle of flow
L = length of pier

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	99

Bed Condition	Dune Height ft	K ₃
Clear-Water Scour	N/A	1.1
Plane bed and Antidune flow	N/A	1.1
Small Dunes	10 > H ≥ 2	1.1
Medium Dunes	30 > H ≥ 10	1.2 to 1.1
Large Dunes	H ≥ 30	1.3

Tabella 9-1. Formulazione CSU: valori dei fattori correttivi K1, K2, K3

Formulazione di Sheppard – Melville

La profondità di scalzamento attesa può essere valutata come:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{y_s}{a^*} = 2.5 f_1 f_2 f_3 \quad \text{for } 0.4 < \frac{V_1}{V_c} < 1.0 \\ \frac{y_s}{a^*} = f_1 \left[2.2 \left(\frac{\frac{V_1}{V_c} - 1}{\frac{V_{1p}}{V_c} - 1} \right) + 2.5 f_3 \left(\frac{\frac{V_{1p}}{V_c} - \frac{V_1}{V_c}}{\frac{V_{1p}}{V_c} - 1} \right) \right] \quad \text{for } 1 < \frac{V_1}{V_c} < \frac{V_{1p}}{V_c} \\ \frac{y_s}{a^*} = 2.2 f_1 \quad \text{for } \frac{V_1}{V_c} > \frac{V_{1p}}{V_c} \end{array} \right.$$

con

- $V_{1p} = \max(V_{1p1}; V_{1p2})$
- $V_{1p1} = 5V_c; V_{1p2} = 0.6\sqrt{gy_1}$
- $V_c = \begin{cases} 2.5 \cdot u^* \ln \left(\frac{7.35y_1}{d_{50} [Re(2.85 - 0.58 \ln(Re) + 0.002Re) + \frac{111}{Re} - 6]} \right) & \text{for } 5 \leq Re \leq 70 \\ 2.5 \cdot u^* \ln \left(\frac{2.21y_1}{d_{50}} \right) & \text{for } Re > 70 \end{cases}$
- $Re = \frac{u^* d_{50}}{2.32 \cdot 10^{-7}}; u^* = \left[16.2 \cdot d_{50} \left(\frac{9.09 \cdot 10^{-6}}{d_{50}} - d_{50} (38.76 + 9.6 \ln(d_{50})) - 0.005 \right) \right]^{0.5}$
- $y_1 = \text{tirante idrico (m)}$
- $f_1 = \tanh \left[\left(\frac{y_1}{a^*} \right)^{0.4} \right]$
- $f_2 = \left\{ 1 - 1.2 \left[\ln \left(\frac{V_1}{V_c} \right) \right]^2 \right\}$
- $f_3 = \left[\frac{\left(\frac{a^*}{d_{50}} \right)}{0.4 \left(\frac{a^*}{d_{50}} \right)^{1.2} + 10.6 \left(\frac{a^*}{d_{50}} \right)^{-0.13}} \right]$
- $a^* = K_s a_p; a_p = a \cdot \cos \theta + L \cdot \sin \theta; K_s = \begin{cases} 1 \text{ (pila circolare)} \\ 0.86 + 0.97 \left(\left| \frac{\pi \theta}{180} - \frac{\pi}{4} \right| \right)^4 \text{ (pila rettangolare)} \end{cases}$ (a = larghezza della pila; L = lunghezza della pila; θ = angolo di attacco [°])

MANDATARIA  CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE & S.R.L.	MANDANTI 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA								
		Relazione Idraulica	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC RI	OPERA 7 DISCIPLINA ID 00 02		PROGR 001

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 (tra cui anche quelle di Melville, Froehlich, Breusers e CSU), **la formulazione SM** fornisce valori più attendibili (e prossimi a quelli misurati) rispetto alle altre, per i seguenti campi di valori:

- $\frac{V_1}{V_c} = 0.4 \div 7.6$
- $\frac{y_1}{a} = 0.05 \div 10$
- $\frac{a}{d_{50}} = 3.65 \div 65047$
- $FR = 0.03 \div 1.95$

La formulazione SM risulta 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. Saccione e ai corsi d'acqua in zona Capo d'Acqua rientrano nei campi dei valori, o comunque sono dello stesso ordine di grandezza dei valori, per i quali ne è stata valutata l'attendibilità e l'affidabilità.

Per il calcolo dello scalzamento in corrispondenza delle spalle è stata adottata la metodologia della FHWA. In particolare, con riferimento allo schema di Figura 9-2, si definiscono le seguenti variabili:

- α = angolo compreso tra la direzione principale della corrente e l'asse dell'opera di attraversamento
- L = lunghezza di influenza della spalla/rilevato di approccio

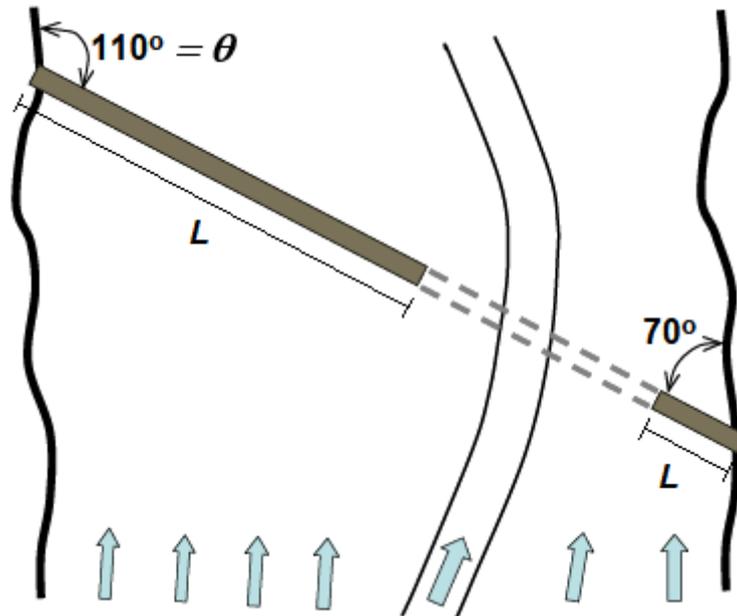


Figura 9-2 – Calcolo dello scalzamento in corrispondenza delle spalle.

Determinate tali variabili, in relazione al valore della quantità L'/Y_1 ($L' = L \cdot \cos(90-\theta)$; Y_1 = altezza della corrente in corrispondenza della spalla), si procede al calcolo dello scalzamento mediante la formulazione di Froehlich e di Hire.

$$\begin{cases} \frac{L'}{Y_1} \leq 25 \rightarrow \text{Froehlich} \\ \frac{L'}{Y_1} > 25 \rightarrow \text{Hire} \end{cases}$$

Formulazione di Froehlich

$$\frac{Y_s}{Y_1} = 2.27K_1K_2 \left(\frac{L'}{Y_1} \right)^{0.43} FR^{0.61} + 1$$

con $K_1 = 0.82$, $K_2 = (\theta/90)^{0.13}$, FR = numero di Froude.

Formulazione di Hire

$$\frac{Y_s}{Y_1} = 4FR^{0.33} \frac{K_1}{0.55} K_2$$

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE & R.L.	MANDANTI HYpro S.P.A.	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA								
		Relazione Idraulica	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC RI	OPERA 7 DISCIPLINA ID 00 02		PROGR 001

K_1 e K_2 , come prima definiti.

In generale, è possibile riscontrare quattro differenti scenari di erosione localizzata (Figura 9-3):

- 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 ben 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.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	103

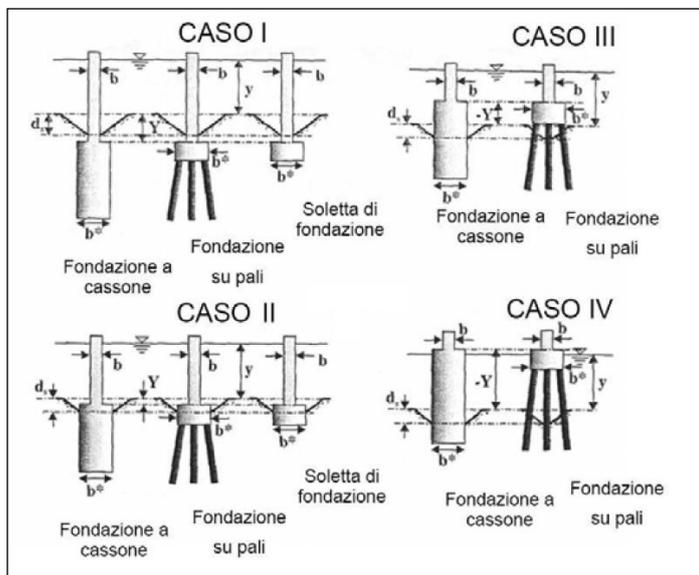


Figura 9-3 – Differenti tipologie di pile non uniformi dotate di fondazioni

Calcolo della profondità di scalzamento

Con riferimento ai risultati ottenuti dalla simulazione idraulica per Tr 300 anni, nelle tabelle seguenti si riportano le dimensioni caratteristiche delle pile e delle spalle dei viadotti VI06 (T. Saccione) e VI13, VI14, VI15 (zona Capo d'Acqua) interessate dallo scalzamento unitamente ai valori delle variabili idrauliche utilizzate per il calcolo dello scavo.

Per quanto concerne il d_{50} , per il T. Saccione si è fatto riferimento al sondaggio S20, campione CR4, prelevato in terreni simili a quelli presenti in alveo ($d_{50} = 0.1395$ mm); mentre per i corsi d'acqua in zona Capo d'Acqua, al sondaggio S35, campione CR1 ($d_{50} = 0.1711$ mm).

Per maggiori dettagli si rimanda agli elaborati specialistici.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	104

ID	Altezza plinto (m)	Larghezza plinto (m)	Lunghezza plinto (m)	Larghezza pila (m)	Lunghezza pila (m)	Tirante Tr 300 (m)	Velocità Tr 300 (m/s)	Froude ()	Angolo di attacco (°)	D50 (mm)
P01	2.5	12	12	3.5	11.45	0.8	0.8	0.29	0	0.1395
P02	2.5	12	12	3.5	10.4	0.8	0.8	0.29	0	0.1395
P03	2.5	12	12	3.5	10.4	0.85	0.6	0.21	23	0.1395
P04	2.5	12	12	3.5	10.4	0.8	0.5	0.18	54	0.1395
P05	2.5	12	12	3.5	10.4	0.7	0.4	0.15	54	0.1395
P06	2.5	12	12	3.5	10.4	0.6	0.5	0.21	56	0.1395
P07	2.5	12	12	3.5	10.4	0.9	0.5	0.17	55	0.1395
P08	2.5	12	12	3.5	10.4	0.95	0.65	0.21	56	0.1395
P09	2.5	12	12	3.5	10.4	0.9	0.65	0.22	55	0.1395
P10	2.5	12	12	3.5	10.4	1.5	0.7	0.18	54	0.1395
P11	2.5	12	12	3.5	10.4	1.5	0.7	0.18	54	0.1395
P12	2.5	12	12	3.5	10.4	1.5	0.7	0.18	56	0.1395
P13	2.5	12	12	3.5	10.4	1.4	0.8	0.22	75	0.1395
P14	2.5	12	12	3.5	10.4	1.3	0.8	0.22	70	0.1395
P15	2.5	12	12	3.5	10.4	1.4	1	0.27	54	0.1395
P16	2.5	16	20	6.5	13.5	1.6	2.3	0.58	44	0.1395
P17	2.5	16	20	6.5	13.5	1.8	1.9	0.45	0	0.1395
P18	2.5	16	20	6.5	13.5	1.5	2.3	0.60	0	0.1395
P19	2.5	12	12	3.5	10.4	1.35	2.1	0.58	0	0.1395
P20	2.5	12	12	3.5	10.4	1.3	1.1	0.31	45	0.1395
P21	2.5	12	12	3.5	10.4	2	1.1	0.25	59	0.1395
P22	2.5	12	12	3.5	10.4	1.1	1.1	0.33	0	0.1395
P23	2.5	12	12	3.5	10.4	1.1	0.5	0.15	55	0.1395
P24	2.5	12	12	3.5	10.4	1.6	0.5	0.13	58	0.1395
P25	2.5	12	12	3.5	10.4	1.65	0.6	0.15	85	0.1395
P26	2.5	12	12	3.5	10.4	1.5	0.3	0.08	78	0.1395
P27	2.5	12	12	3.5	10.4	1.5	0.4	0.10	78	0.1395
P28	2.5	12	12	3.5	10.4	1.3	0.4	0.11	72	0.1395

ID	Tirante Tr 300 (m)	Velocità Tr 300 (m/s)	Froude	D50 (mm)
S01	0.6	0.8	0.33	0.1395
S02	0	0	0.00	0.1395

Tabella 9-2. Viadotto VI06 (pk 15+565, T. Saccione): dimensioni delle pile e delle spalle e variabili idrauliche.

ID	Tirante Tr 300 (m)	Velocità Tr 300 (m/s)	Froude	D50 (mm)
S01	1	2.03	0.65	0.1711
S02	0	0	0.00	0.1711

Tabella 9-3. Viadotto VI13 (pk 21+575): variabili idrauliche in corrispondenza delle spalle.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	105

ID	Altezza plinto (m)	Larghezza plinto (m)	Lunghezza plinto (m)	Larghezza pila (m)	Lunghezza pila (m)	Tirante Tr 300 (m)	Velocità Tr 300 (m/s)	Froude ()	Angolo di attacco (°)	D50 (mm)
P01	2.5	12	12	3.5	10.4	0.3	0.4	0.23	0	0.1711
P02	2.5	12	12	3.5	10.4	0.5	0.75	0.34	16	0.1711
P03	2.5	12	12	3.5	10.4	1	1.5	0.48	18	0.1711
P04	2.5	12	12	3.5	10.4	1.2	1.7	0.50	0	0.1711

ID	Tirante Tr 300 (m)	Velocità Tr 300 (m/s)	Froude	D50 (mm)
S01	0	0	0.00	0.1711
S02	0	0	0.00	0.1711

Tabella 9-4. Viadotto VI14 (pk 21+900): dimensioni delle pile e delle spalle e variabili idrauliche.

ID	Altezza plinto (m)	Larghezza plinto (m)	Lunghezza plinto (m)	Larghezza pila (m)	Lunghezza pila (m)	Tirante Tr 300 (m)	Velocità Tr 300 (m/s)	Froude ()	Angolo di attacco (°)
P01	2.5	14	14	3.5	10.4	0	0	0.00	0
P02	2.5	14	14	3.5	10.4	0	0	0.00	0
P03	2.5	14	14	3.5	10.4	0.7	1.6	0.61	10
P04	2.5	14	14	3.5	10.4	0.4	1	0.50	10
P05	2.5	14	14	3.5	10.4	0.25	0.8	0.51	10
P06	2.5	14	14	3.5	10.4	0.15	0.6	0.49	10
P07	2.5	14	14	3.5	10.4	0.15	0.5	0.41	10
P08	2.5	14	14	3.5	10.4	0.2	0.3	0.21	10
P09	2.5	14	14	3.5	10.4	0.45	0.3	0.14	10
P10	2.5	14	14	3.5	10.4	0.7	0.3	0.11	10
P11	2.5	14	14	3.5	10.4	0.7	0.4	0.15	10
P12	2.5	14	14	3.5	10.4	0.5	0.4	0.18	10
P13	2.5	14	14	3.5	10.4	0.6	0.3	0.12	10
P14	2.5	14	14	3.5	10.4	0.8	0.3	0.11	10
P15	2.5	14	14	3.5	10.4	0.75	0.3	0.11	10
P16	2.5	14	14	3.5	10.4	0.7	0.2	0.08	10
P17	2.5	14	14	3.5	10.4	0.7	0.2	0.08	10
P18	2.5	12	12	3.5	10.4	0.75	0.15	0.06	10

ID	Tirante Tr 300 (m)	Velocità Tr 300 (m/s)	Froude	D50 (mm)
S01	0	0	0.00	0.1711
S02	0.6	0.4	0.00	0.1711

Tabella 9-5. Viadotto VI15 (pk 22+800): dimensioni delle pile e delle spalle e variabili idrauliche.

Di seguito, si riportano i valori dello scavo localizzato calcolato con le formulazioni sopra indicate.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	106

Per quanto riguarda le pile, la profondità di scavo presa in considerazione è il valore massimo ottenuto dall'applicazione delle formulazioni CSU e SM.

Per la maggior parte delle pile, la profondità di scavo è risultata maggiore del ricoprimento previsto al di sopra del plinto di fondazione; quindi il calcolo dello scalzamento è stato ripetuto considerando l'intero sistema di fondazioni, ossia il diametro equivalente (Tabella 9-6, Tabella 9-7, Tabella 9-8, Tabella 9-9).

ID	Thalweg (mslm)	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU EQUATION	Ys (m)	Ricoprimento plinto. Yd (m)	Larghezza equivalente (m)	Lunghezza equivalente (m)	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU EQUATION	Ys (m)
P01	3.15	2.3	2.65	2.65	1	7.57	11.71	4.1	4.4	4.4
P02	3.00	2.6	2.65	2.65	1	7.57	11.17	4.1	4.4	4.4
P03	3.03	2.8	3.7	3.70	1	8.54	11.35	3.7	5.3	5.3
P04	3.07	2.9	4	4.00	1	8.81	11.40	3.4	5	5
P05	3.11	2.5	3.2	3.20	1	8.29	11.30	2.9	4	4
P06	3.14	2.8	4	4.00	1	9.04	11.44	3.3	5	5
P07	3.08	3	4.1	4.10	1	8.77	11.39	3.5	5.1	5.1
P08	3.01	3.6	5	5.00	1	9.21	11.48	4.25	6.3	6.3
P09	2.98	3.5	5	5.00	1	9.26	11.48	4.2	6.3	6.3
P10	2.76	4	5.5	5.50	1	8.96	11.43	4.7	6.9	6.9
P11	2.82	4	5.5	5.50	1	8.96	11.43	4.7	6.9	6.9
P12	2.88	4	5.5	5.50	1	8.96	11.43	4.7	6.9	6.9
P13	2.94	4.5	6	6.00	1	9.24	11.48	5.1	7	7
P14	3.02	4.4	6	6.00	1	9.32	11.50	5	7	7
P15	3.00	4.9	6.1	6.10	1	9.28	11.49	5.9	7.6	7.6
P16	3.52	8.5	6.3	8.50	1	13.55	18.33	14.1	10.5	14.1
P17	3.95	4.7	3	4.70	1	11.91	17.20	9.7	6.3	9.7
P18	4.14	5.4	3.2	5.40	1	12.56	17.64	12	7	12
P19	4.15	5.1	3.1	5.10	1	8.9	11.42	9.5	5.6	9.5
P20	4.18	5	5.4	5.40	1	9.08	11.45	6.3	7	7
P21	6.67	5.4	6.6	6.60	1	9.03	11.44	6.4	8	8
P22	4.66	3.3	2.6	3.30	1	7.94	11.24	5.4	4.5	5.4
P23	4.94	3.1	4.1	4.10	1	8.57	11.35	3.6	5.1	5.1
P24	4.84	3.4	4.2	4.20	1	8.19	11.28	3.9	5.1	5.1
P25	4.78	4.2	5	5.00	1	8.61	11.36	4.5	5.5	5.5
P26	4.74	3	2.3	3.00	1	7.28	11.11	3.1	2.5	3.1

MANDATARIA HUB ENGINEERING <small>CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A R.L.</small>		MANDANTI HYpro S.P.A.		LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
Relazione Idraulica				COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV	FOGLIO
				LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D

P27	4.70	3.3	3.4	3.40	1	7.66	11.18	3.5	3.8	3.8
P28	4.71	3.1	3.4	3.40	1	7.84	11.20	3.3	3.9	3.9

ID	Thalweg (mslm)	Ys (m)
S01	3.11	3.00
S02	4.71	0.0

Tabella 9-6. Viadotto VI06 (pk 15+565, T. Saccione): valori attesi della profondità di scalzamento.

ID	Ys (m)
S01	2.50
S02	0.0

Tabella 9-7. Viadotto VI13 (pk 21+575): valori attesi della profondità di scalzamento.

ID	Thalweg (mslm)	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU EQUATION	Ys (m)	Ricoprimento plinto. Yd (m)	Larghezza equivalente (m)	Lunghezza equivalente (m)	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU EQUATION	Ys (m)
P01	14.56	1.41	1.38	1.41	1	5.54	10.78	1.75	1.87	1.87
P02	12.42	2.8	3.5	3.50	1	8.81	11.40	3.98	5.2	5.2
P03	11.97	5	3.8	5.00	1	9.17	11.47	7.4	5.8	7.4
P04	11.81	4.4	1.6	4.4	1	8.66	11.37	7.9	3.1	7.9

ID	Thalweg (mslm)	Ys (m)
S01	16.43	0.0
S02	17.2	0.0

Tabella 9-8. Viadotto VI14 (pk 21+900): valori attesi della profondità di scalzamento.

9.2 Verifica dell'erosione dell'alveo

Un viadotto che si svolga per un tratto più o meno esteso in prossimità di un corso d'acqua può essere esposto, per modifiche della morfologia fluviale, ad azioni delle correnti di piena o di morbida che, se intense o di certa natura, possono comprometterne la stabilità.

In queste condizioni la difesa dei manufatti può essere assicurata conferendo ad essi appropriate caratteristiche strutturali quali dimensioni, protezioni e fondazioni adeguate o intervenendo direttamente sul corso d'acqua con una sistemazione che riproponga un corretto rapporto tra le opere ed il fiume stesso.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	108

Gli interventi di sistemazione in questo secondo caso consistono essenzialmente nel conferire al deflusso delle correnti di piena e di morbida andamenti regolari, nel rapporto con l'attraversamento viario, attraverso interventi relativamente limitati asserviti al solo viadotto.

I manufatti che assicurano la difesa d'una zona di asta fluviale fanno riferimento alle opere longitudinali; queste difese di sponda si propongono di evitarne l'erosione in prossimità di fasce distribuite o zone localizzate che possono presentare criticità idrauliche. La difesa di sponda comporta, generalmente, una regolarizzazione ed un restringimento dell'alveo e, quindi, un suo approfondimento: fatto questo, del quale si deve tener conto nella fase di progettazione del piano di imposta dei manufatti stessi.

ID	Thalweg (mslm)	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU EQUATION	Ys (m)	Ricoprimento plinto. Yd (m)	Larghezza equivalente (m)	Lunghezza equivalente (m)	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU EQUATION	Ys (m)
P01	6.54	0	0	0.00	1	-	-	-	-	0
P02	6.16	0	0	0.00	1	-	-	-	-	0
P03	6.73	4.8	1	4.80	1	10.75	12.89	8.5	2.4	8.5
P04	7.51	3	3.4	3.40	1	10.13	12.67	5	5.8	5.8
P05	7.51	2.25	2.97	2.97	1	9.92	12.60	3.4	5	5
P06	7.88	1.6	2.4	2.40	1	9.26	12.38	2.4	3.98	3.98
P07	6.78	1.4	2.1	2.10	1	8.63	12.16	2.03	3.37	3.37
P08	5.77	1.17	1.29	1.29	1	5.54	11.10	1.36	1.62	1.62
P09	5.16	1.5	1.3	1.50	1	6.19	11.32	1.83	1.71	1.83
P10	5.16	1.7	1.3	1.70	1	6.56	11.45	2.15	1.75	2.15
P11	4.34	2	1.8	2.00	1	7.39	11.73	2.61	2.7	2.7
P12	4.41	1.8	1.8	1.00	1	7.15	11.65	2.35	2.63	2.63
P13	4.57	1.7	1.3	1.70	1	6.7	11.50	2.1	1.8	2.1
P14	4.58	1.8	1.2	1.80	1	6.73	11.51	2.3	1.8	2.3
P15	4.57	1.8	1.25	1.80	1	6.79	11.53	2.2	1.8	2.2
P16	4.55	1.4	0.5	1.40	1	5.5	11.09	1.6	0.6	1.6
P17	4.55	1.4	0.5	1.40	1	5.5	11.09	1.6	0.6	1.6
P18	4.55	0.75	1.2	1.20	1	4.37	10.56	0.8	1.3	1.3

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D

ID	Thalweg (mslm)	Ys (m)
S01	7.21	0.0
S02	4.58	2.50

Tabella 9-9. Viadotto VI15 (pk 22+800): valori attesi della profondità di scalzamento.

Le difese che verranno adottate all'interno di questo studio avranno andamento longitudinale (radente) che fissano la linea di sponda. Possono essere ottenute attraverso diverse metodologie e con l'utilizzo di differenti materiali a seconda delle azioni cui è sottoposta la riva, dalla propensione del corso d'acqua a scavare e trasportare materiale e dalla scarpa che è possibile assegnare alla sponda.

L'intervento da considerare è la protezione delle sponde del corso d'acqua. La costruzione di un ponte comporta la scomparsa della vegetazione al di sotto dell'impalcato; il terreno nudo ed indifeso è così esposto all'azione della corrente già a velocità dell'ordine di 0.50 m/s.

Verrà impiegata una difesa radente a scogliera realizzata con massi di diversa pezzatura e peso; le dimensioni del materiale inerte, come verrà descritto nei paragrafi successivi, devono assicurare la stabilità della scogliera affinché i massi non vengano asportati dalla corrente di piena. Quando, tuttavia, si tema la loro rimozione ed asportazione, specie per lo scavo che può prodursi al piede delle sponde, i massi possono essere collegati fra loro con cavi d'acciaio (trefoli) o attraverso reti metalliche.

Il rivestimento deve essere posto in opera con alcuni necessari accorgimenti, creando, per esempio, un filtro rovescio o impiegando i geotessuti per evitare lo sprofondamento dei massi specie se questi arrivano ad assumere un peso rilevante.

Le fondazioni della scogliera devono essere approfondite ben al di sotto della quota del thalweg al fine di evitare che scavi localizzati dalla corrente operino dannosi scalzamenti al piede dell'opera. La scarpa della stessa deve avere pendenze dell'ordine di 3/2 o 2/1; la sommità della difesa si limita in genere alla quota della massima piena assunta, assumendo rispetto a questa un franco di 1.00 m.

Ai fini della determinazione delle tensioni agenti è bene dare la definizione del "trasporto solido" come l'insieme dei fenomeni che riguardano l'erosione ed il modellamento dell'alveo di un corso d'acqua per opera della corrente che lo percorre.

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D

Il materiale è trasportato secondo due modi: sul fondo (per rotolamento, strisciamento o saltellamento) ed in sospensione, per effetto della turbolenza, per materiali più fini come sabbie, limi e argille.

Il trasporto solido è funzione di numerosi parametri quali: l'assetto geometrico della compagine esposta alla corrente, dalle interazioni (attrito, coesione) tra gli elementi che la compongono, dalle tensioni tangenziali che si esercitano lungo il perimetro bagnato dovuto alla distribuzione delle velocità.

In generale, il valore medio della tensione tangenziale sul contorno bagnato della sezione di riferimento può ottenersi esprimendo la condizione di equilibrio alla traslazione, scritta nel senso del moto, tra la componente del peso di un tratto del corso d'acqua in condizioni di moto uniforme e l'azione resistente che si sviluppa lungo il contorno della sezione.

Metodo di calcolo delle tensioni agenti e resistenti (Shields)

Determinato il tirante idraulico, nella sezione del corso d'acqua dove si intende intervenire, associato ad una portata Q di assegnato tempo di ritorno Tr , si procede con il calcolo dello sforzo di trascinamento medio al contorno attraverso la nota formula:

$$\tau_0 = \gamma \cdot R_H \cdot i$$

dove:

- τ_0 : tensione tangenziale media;
- R_H : raggio idraulico definito come rapporto tra l'area della sezione liquida A ed il perimetro bagnato P della sezione di riferimento, assumibile pari al valore del solo tirante negli alvei molto larghi;
- γ : peso specifico dell'acqua;
- i : rappresenta la pendenza media del fondo alveo del corso d'acqua nel tratto considerato.

Lo sforzo τ_0 viene corretto sulla base di coefficienti moltiplicativi in grado di quantificare alcuni aspetti che inducono lo sforzo di trascinamento agente sulla sezione interessata che portano ad allontanarsi dal valore medio calcolato.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	111

L'azione di trascinamento non è uniformemente distribuita lungo il perimetro bagnato della sezione, bensì risulterà maggiore nei punti di più elevata scabrezza e minore nei punti "idraulicamente più lisci". A. Shields investigò sperimentalmente un letto formato da particelle uniformi non coesive fornendo una relazione di dipendenza di τ_0 dal numero di Reynolds:

$$\frac{\tau_{cr}}{(\gamma_s - \gamma)d} = f(Re)$$

dove:

- τ_{cr} : tensione tangenziale critica che induce le particelle al movimento;
- γ_s : peso specifico del materiale movimentato dalla corrente;
- γ : peso specifico dell'acqua;
- d : diametro del materiale solido in esame.

I risultati di Shields (1936) e la curva interpolare che li interpreta sono riportati in Figura 9-4.

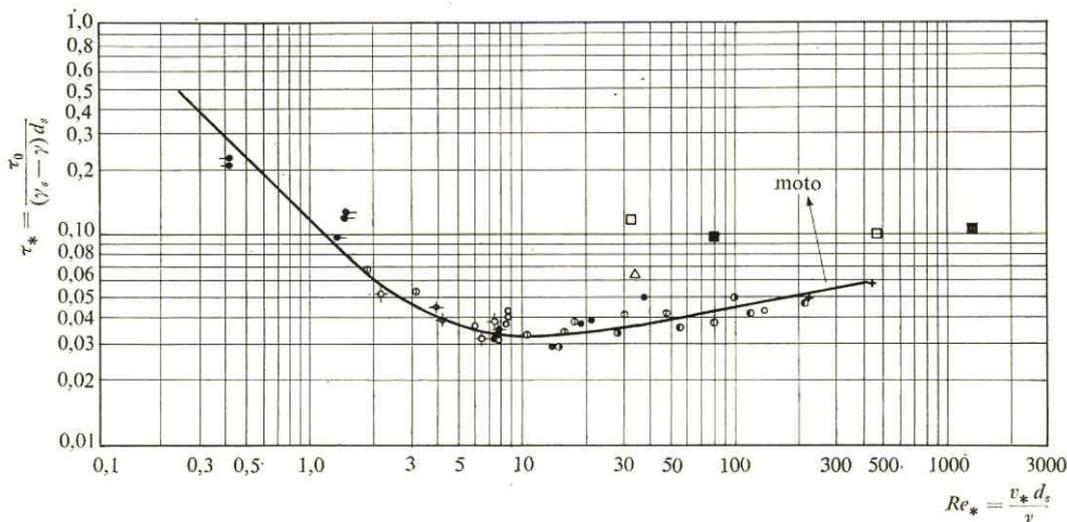


Figura 9-4-Curva sperimentale di Shields.

Si osservi che in regime di moto turbolento, $Re > 1000$, per valori di $d < h$ è possibile scrivere:

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE & R.L.	MANDANTI HYpro S.P.A.	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA								
		Relazione Idraulica	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC RI	OPERA 7 DISCIPLINA ID 00 02		PROGR 001

$$\frac{\tau_{cr}}{(\gamma_s - \gamma)d} = 0.06$$

Tale equazione dà modo di valutare il τ_{cr} per le particelle aventi diametro d appartenenti ad un miscuglio di diametro medio d_{50} , dove con quest'ultimo valore si esprime la dimensione della maglia del setaccio che lascia passare il 50% in peso del materiale che compone il miscuglio stesso.

La relazione indicata ha valenza nel caso di fondo piano o quasi, con le forze resistenti proporzionali al peso immerso e forze destabilizzanti dovute allo sforzo tangenziale.

Nel caso si analizzino le condizioni inerenti lo sforzo tangenziale in prossimità della sponda di un corso d'acqua **E. Lane** (1953) ha fornito, sulla base di equazioni di equilibrio di forze descritte in Figura 9-5, una relazione di τ_{cr} che tenga in conto l'inclinazione della sponda e l'angolo di attrito interno ϕ del materiale:

$$\tau_{cr}(\alpha) = \tau_{cr}(0) \left(\cos\alpha \sqrt{1 - \frac{\text{tg}^2\alpha}{\text{tg}^2\phi}} \right)$$

dove:

- $\tau_{cr}(\alpha)$: tensione tangenziale critica sulla sponda che induce le particelle al movimento;
- $\tau_{cr}(0)$: tensione tangenziale critica sul fondo orizzontale che induce le particelle al movimento;
- α : inclinazione della sponda;
- ϕ : angolo di attrito interno del materiale che caratterizza la sponda.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00 02	001	D	113

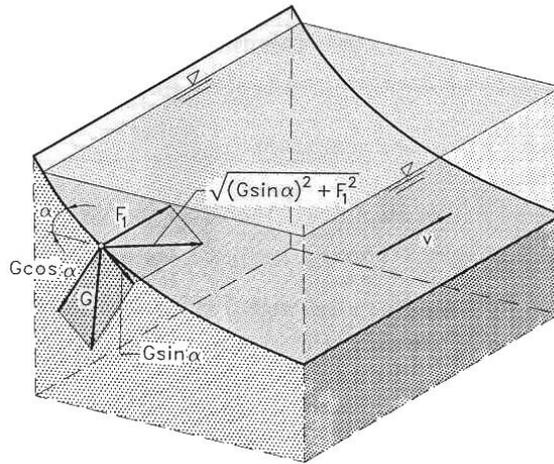


Figura 9-5 -Forze agenti su di un grano, posizionato su una sponda, impiegate nelle equazioni di equilibrio di Lane.

L'equazione scritta in precedenza si presta ad alcune semplici osservazioni che risultano tuttavia essere di interesse pratico. La prima riguarda l'angolo α che deve risultare minore di quello di attrito interno ϕ del materiale poiché il termine sotto radice ha significato solo se positivo; condizione questa necessaria ma non sufficiente per la stabilità del materiale.

La seconda osservazione riguarda la tensione critica sulla sponda, superata la quale prende origine il moto delle particelle, è minore di quella $\tau_{cr}(0)$ sul fondo. Quando cioè sul fondo si verifichi la condizione limite $\tau(0) \cong \tau_{cr}$, il materiale della sponda è esposto alla rimozione per essere $\tau_{cr}(0) \cong \tau(0)$; pertanto la sponda va protetta e rivestita con materiale di maggiore pezzatura rispetto a quello posto come protezione al fondo.

Con il software di calcolo Hec-Ras è possibile visualizzare la tensione tangenziale agente sull'intera sezione d'alveo utilizzando la funzione "Shear Stress Maps"; alcuni esempi per il Torrente Saccione e per gli attraversamenti relativi alla zona Capo d'Acqua sono riportati nelle figure seguenti.

Utilizzando tale strumento è stato possibile individuare delle zone con diverse tipologie di intervento.

LINEA PESCARA – BARI

**RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA
LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA**

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	114



Figura 9-6 -S hear Stress Maps in corrispondenza del nuovo viadotto sul Torrente Saccione.

LINEA PESCARA – BARI

**RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA
LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA**

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	115



Figura 9-7 - Shear Stress Maps in corrispondenza del nuovo viadotto sul Canale Capo d'Acqua (VI14).

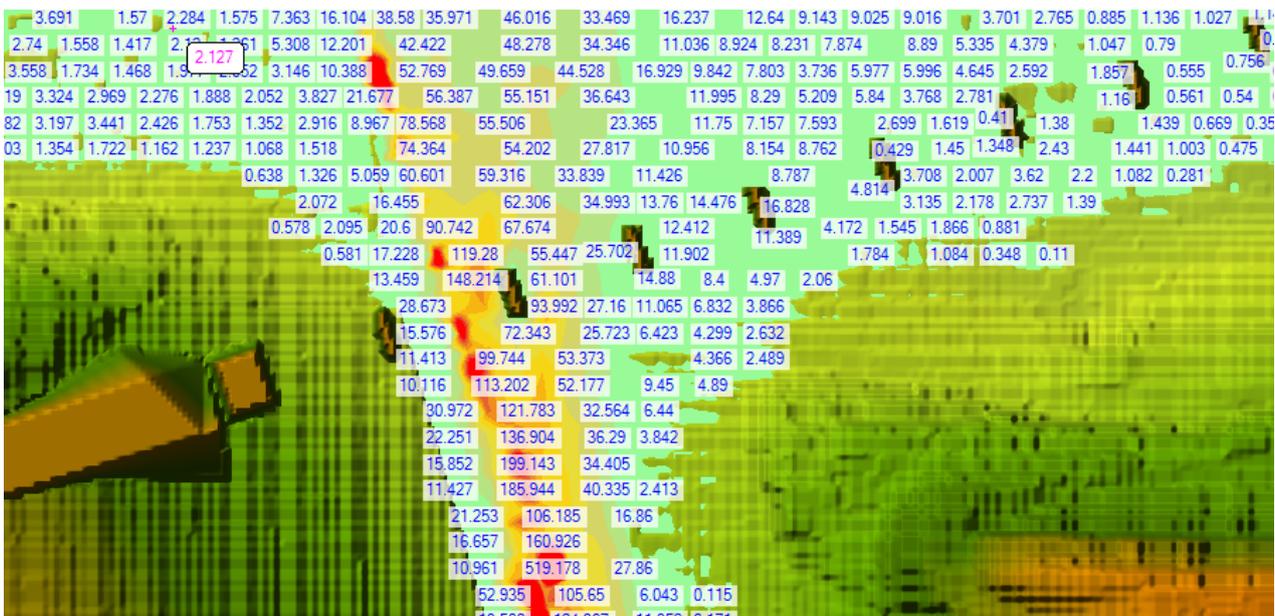


Figura 9-8 - Shear Stress Maps in corrispondenza del canale alla pk 22+800 (VI15).

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	116

Nelle tabelle seguenti sono mostrati i risultati ottenuti dall'applicazione della formulazione di Shields.

Saccione											
Progressiva	Tipologia Opera	B (m)	L (m)	Spessore (m)	D (m)	Tirante (m)	V (m)	Quota Terreno (m.slm)	Quota Tirante (m.slm)	Tensione agente [N/m2]	Tensione resistente [N/m2]
da 15+100 a 15+500	Materassi Reno	3.0	2.0	0.3	-	1.6	1.3	2.70	4.3	39.42	59.85
da 15+500 a 15+750	Massi Legati	-	-	-	0.8	3.06	2.59	2.44	5.5	179.41	276.55
da 15+750 a 15+910	Materassi Reno	3.0	2.0	0.3	-	1.73	0.6	2.21	3.94	38.08	59.85

Tabella 9-10. Formulazione di Shields: risultati del dimensionamento delle opere di sistemazione idraulica per il viadotto Saccione.

Capo d'Acqua											
Progressiva	Tipologia Opera	B (m)	L (m)	Spessore (m)	D (m)	Tirante (m)	V (m)	Quota Terreno (m.slm)	Quota Tirante (m.slm)	Tensione agente [N/m2]	Tensione resistente [N/m2]
21+550	Materassi reno	3.0	2.0	0.23	-	0.82	1.60	14.52	15.34	17.32	40.70
	Gabbioni	1.0	1.0	1.00	-	0.90	1.55	14.90	15.80	-	-
da 21+550 a 21+600	Massi legati				0.8	1.01	1.80	13.38	14.39	293.09	331.86
21+600	Materassi reno	3.0	2.0	0.23		0.60	1.60	13.60	14.20	24.31	40.70
da 21+925 a 21+975	Materassi reno	3.0	2.0	0.23	0.8	0.35	1.64	11.80	12.15	38.01	40.70
da 21+975 a 22+025	Massi legati	-	-	-	0.8	1.58	2.23	11.07	12.65	213.69	276.55
da 22+700 a 22+730	Materassi reno	3.0	2.0	0.30	-	0.51	1.52	12.60	13.11	38.01	59.85
da 22+770 a 23+255	Materassi reno	3.0	2.0	0.30	-	0.49	1.73	4.88	5.37	30.01	59.85

Tabella 9-11. Formulazione di Shields: risultati del dimensionamento delle opere di sistemazione idraulica per i viadotti in zona Capo d'Acqua.

MANDATARIA HUB ENGINEERING <small>CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE & R.L.</small>	MANDANTI HYpro S.P.A.	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
		Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV
	LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D

Si riportano, altresì, le verifiche dei franchi idraulici minimi in alcune sezioni ritenute più significative.

Saccione						
Progressiva	Tirante (m)	Quota terreno (m.s.l.m.)	Quota pelo libero (m.s.l.m.)	Quota massima rilevato (m.s.l.m.)	Franco minimo (m) Man. Italferr	Verifica
NV09	0.17	2.57	2.74	5.91	1.00	Verificato
NV09	0.15	3.89	4.04	7.26	1.00	Verificato
12+325	0.12	3.76	3.88	5.02	1.00	Verificato
12+500	0.10	3.73	3.83	5.08	1.00	Verificato
12+775	0.08	4.26	4.34	5.34	1.00	Verificato
12+950	0.14	4.16	4.3	6.11	1.00	Verificato
13+525	0.15	3.94	4.09	10.11	1.00	Verificato
IN88	0.13	3.35	3.48	5.61	1.00	Verificato
14+450	0.20	3.01	3.21	5.98	1.00	Verificato
15+075	0.15	2.80	2.95	9.83	1.00	Verificato
15+975	0.03	3.62	3.65	10.29	1.00	Verificato

Tabella 9-12. Verifica del rispetto dei franchi idraulici minimi per il viadotto Saccione

Capoacqua						
Progressiva	Tirante (m)	Quota terreno (m.s.l.m.)	Quota pelo libero (m.s.l.m.)	Quota massima rilevato (m.s.l.m.)	Franco minimo (m) Man. Italferr	Verifica
da 0+180 a 0+440	0.15	5.26	5.41	6.81	1.00	Verificato
0+650	0.05	4.92	4.97	5.98	1.00	Verificato
0+980	0.14	4.84	4.98	6.02	1.00	Verificato

Tabella 9-13. Verifica del rispetto dei franchi idraulici minimi per il viadotto Capo d'Acqua.

Per completezza, nelle tabelle seguenti si riportano i valori di riferimento per la resistenza alla tensione tangenziale utilizzati per il dimensionamento delle opere sopra definite.

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE & R.L.	MANDANTI HYpro S.P.A.	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA								
		Relazione Idraulica	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC RI	OPERA 7 DISCIPLINA ID 00 02	PROGR 001	REV D

Massi sciolti						
y_s [kg/mc]	2200	2200	2200	2200	2200	2200
y_w [kg/mc]	1000	1000	1000	1000	1000	1000
d₅₀ [m]	0.3	0.5	0.6	0.7	0.8	
t_{cr} [kg/mq]	16.92	28.20	33.84	39.48	45.12	
F_{Tcr} [N/mq]	165.93	276.55	331.86	387.17	442.48	

Tabella 9-14. Valori di riferimento per la resistenza a tensione tangenziali massi sciolti/legati.

Materassi reno						
	Spessore		Spessore		Spessore	
	0.15-0.17 m		0.23-0.25 m		0.30 m	
y_s [kg/mc]	1813.75	1813.75	1813.75	1813.75	1813.75	1813.75
y_w [kg/mc]	1000	1000	1000	1000	1000	1000
d₅₀ [m]	0.085	0.11	0.085	0.12	0.1	0.125
t_{cr} [kg/mq]	4.15	5.37	4.15	5.86	4.88	6.10
F_{Tcr} [N/mq]	40.70	52.67	40.70	57.46	47.88	59.85

Tabella 9-15. Valori di riferimento per la resistenza a tensione tangenziale per Materassi Reno.

Metodo di calcolo della Federal Highway Administration (FHWA)

Il dimensionamento delle scogliere di protezione può essere effettuato facendo riferimento alla formulazione della FHWA di seguito riportata:

$$d_{50} = 0.001 C_{sg} C_{sf} \frac{V_a^3}{d_{avg}^{0.5} K_1^{1.5}}$$

in cui d_{50} = diametro medio dei massi; V_a = velocità media (ft/s); d_{avg} = tirante medio (ft); $C_{sg} = 2.12/(S_g-1)^{1.5}$; S_g = peso specifico dei massi (t/mc); $C_{sf} = (SF/1.2)^{1.5}$ (SF = coefficiente di sicurezza, $\in [1,2]$); $K_1 = [1-\sin^2(\Theta)/\sin^2(\varphi)]^{0.5}$; Θ inclinazione delle sponde; φ angolo di attrito interno del

<p>MANDATARIA</p>  <p>CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE & R.L.</p> <p>MANDANTI</p> 	<p>LINEA PESCARA – BARI</p> <p>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA</p> <p>LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</p>										
<p>Relazione Idraulica</p>	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
	LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	119

materiale, applicabile per i seguenti valori dei parametri (simili a quelli caratteristici dei corsi d'acqua studiati):

- *pendenza alveo: 0.00006 ÷ 0.0162*
- *tiranti idrici: 1.5÷14.8 m*
- *velocità medie: 0.7÷4 m/s*
- *portate: 35÷2200 mc/s*
- *d50: 0.15÷0.70 m*

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	120

Assumendo $S_g = 2.2$ t/mc; $SF = 2$ (in via cautelativa), $\Theta=34^\circ$ (2/3); $\varphi=38^\circ$, si ottengono i risultati riportati in tabella.

Opera	Tirante (max) [m/s]	Velocità (max) [m/s]	D50 [m]
VI06 (Saccione)	3.1	2.6	0.72
VI13 (pk 21+600)	1	1.8	0.42
VI14 (pk 22+000)	1.6	2.2	0.60

Tabella 9-16. Formulazione FHWA: risultati del dimensionamento delle scogliere per i viadotti VI06 (Saccione), VI13 e VI14 (zona Capo d'Acqua).

I risultati ottenuti con questa seconda metodologia confermano il precedente dimensionamento mediante l'applicazione della formulazione di Shields.

In conclusione, sono previste le seguenti opere di protezione/sistemazione:

TORRENTE SACCIONE

Nel tratto d'alveo compreso tra il viadotto di progetto ed il viadotto esistente A14 Autostrada Adriatica, si sono adottate scogliere in massi legati di pezzatura variabile e materassi tipo Reno. Per la porzione di alveo inciso, ove si osservano i valori più elevati di velocità e dunque di azioni di taglio si sono inseriti massi legati $D50 = 0.8$ m ($\tau_{cr} = 165 \div 276$ kg/m² dall'applicazione della formulazione di Shields (1936)) intervallati da una serie di taglioni (1x1x2m) per il contenimento e l'ancoraggio.

Per le sponde dell'alveo, i rilevati, le aree di esondazione dove si registrano tensioni maggiori e a protezione delle pile del viadotto esterne all'incisione si sono adottati materassi reno con spessore di 0.30 m. Per maggiori dettagli si rimanda agli elaborati specialistici annessi al presente studio.

CAPO D'ACQUA

Le difese spondali e di fondo alveo si concentrano nell'intorno dell'attraversamento di progetto. Le

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D

sponde degli alvei e le scarpate dei rilevati stradali saranno difese mediante materassi tipo reno con spessori di 0.23 m (VI13, VI14) e di 0.30 m (VI15).

Sul fondo d'alveo saranno impiegati massi sciolti e legati di pezzatura variabile (D50=0.3 m e 0.8 m) tali da garantire e prevenire fenomeni erosivi. Inoltre al fine di garantire il contenimento e l'ancoraggio delle opere di protezione/sistemazione si prevedono taglioni (1x1x2m), due a monte ed uno a valle dell'attraversamento.

In corrispondenza del VI13, è previsto anche un intervento di riprofilatura della sponda (in sinistra idraulica) in gabbioni, con riempimento a tergo con materiale proveniente dagli scavi, a difesa/presidio del rilevato e della spalla S01. Per maggiori dettagli, si rimanda agli elaborati LI0B02EZZP7ID0002002B, LI0B02EZZW9ID0002007C.

In corrispondenza del VI15, alle pk 22+775 e 22+995, è prevista inoltre la deviazione dei due canali perché interferenti con le pile del viadotto. In particolare, si prevede la riprofilatura della sezione dei corsi d'acqua in massi cementati. Per maggiori dettagli, si rimanda agli elaborati LI0B02EZZPZID0002001B, LI0B02EZZPZID0002002C.

In zona Capodacqua precisamente tra la pk 21+925 e 22+025(VI14), in corrispondenza della Pila P04 si evidenzia che i tiranti idrici investono la suddetta pila, tuttavia la fondazione della stessa non risulta essere interessata in alcun modo dalle acque poiché:

1. La fondazione della pila P04 è a circa mezzo metro di profondità rispetto al fondo alveo (si veda Figura 9-9);
2. Tutto il fondo alveo in corrispondenza delle pile del ponte è stato protetto dall'erosione con massi legati e materassi Reno, concentrandosi ovviamente e soprattutto attorno alle pile come si può vedere dagli elaborati LI0B02EZZW9ID0002007C e LI0B02EZZBZID0002002C.

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	122

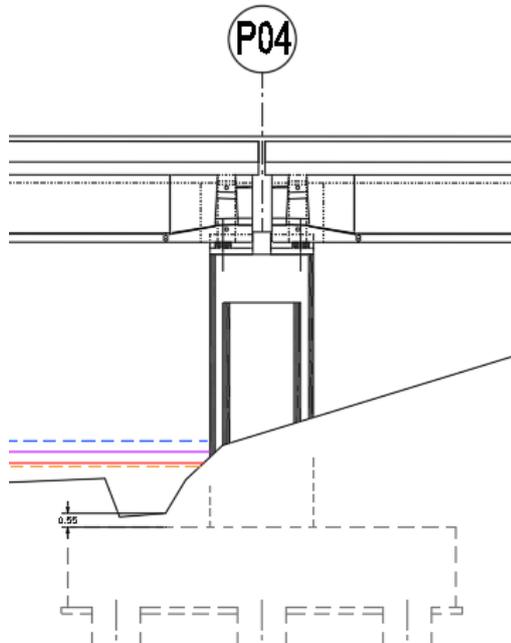


Figura 9-9 - Pila P04 con fondazione

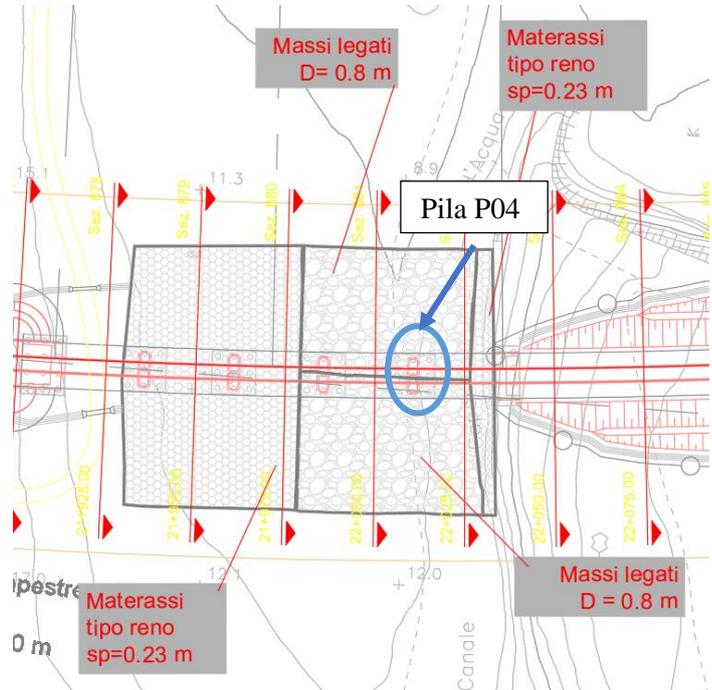


Figura 9-10 – Estratto elaborato

LI0B02EZZBZID0002002C

Sempre in corrispondenza del VI14 e precisamente tra la pk 22+025 e 22+050, a ridosso della spalla destra del viadotto sono stati posizionati dei materassi reno con spessore di 0.23m, che hanno la funzione di garantire unicamente la continuità della protezione del fondo alveo, in quanto sono a ridosso di una porzione di terreno che non viene mai lambita dalle portate duecentennali simulate con modellazione idraulica 2D, quindi non esistono forzanti idraulici ivi agenti, si veda la Figura 9-11

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	123

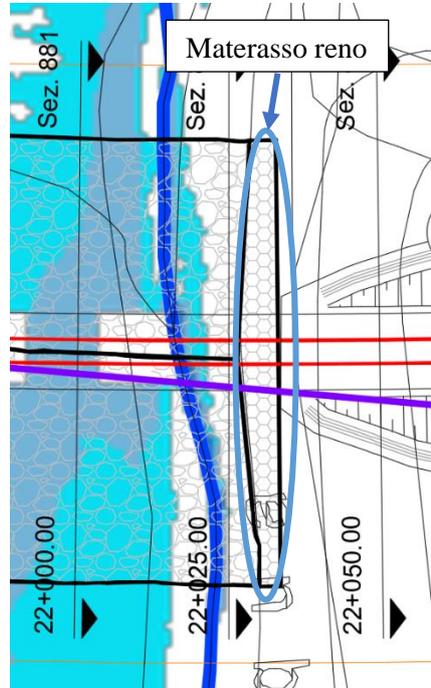


Figura 9-11 – Estratto elaborato LI0B02EZZP6ID0002106C

Sono previste anche idonee opere di protezione dei rilevati in zona di esondazione. Come anticipato, in zona capo d'Acqua, per la definizione della dimensione (altezza) di tali opere sono stati considerati anche i livelli idrici derivanti dall'esondazione delle piene del Fiume Fortore. Nello specifico il dimensionamento è stato effettuando in accordo alle indicazioni del manuale di progettazione RFI: *“l'altezza delle opere di difesa deve essere superiore ad 1 metro rispetto al livello della massima piena di progetto determinato mediante apposito studio idraulico”*. Di seguito, le tabelle riepilogative delle opere di protezione dei rilevati previste.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	124

TORRENTE SACCIONE				
PK INIZIO	PK FINE	TIRANTE MAX TR 300 (m)	ALTEZZA PROTEZIONE (m)	NOTE
10+720	11+450	0.6	1.1	LATO VALLE
11+600	12+600	0.8	1.8	DA AMBO I LATI
12+950	13+250	0.4	1.4	LATO VALLE
13+250	13+890	0.5	1.5	LATO VALLE
		0.9	1.9	LATO MONTE
13+890	14+800	1	2	DA AMBO I LATI
14+800	15+100	1.5	2.5	DA AMBO I LATI
15+925	16+175	1.5	2.5	DA AMBO I LATI

Tabella 9-17. Torrente Saccione: opere di protezioni dei rilevati.

CAPO D'ACQUA				
FERROVIA				
PK INIZIO	PK FINE	TIRANTE MAX TR 200 (m)	ALTEZZA PROTEZIONE (m)	NOTE
23+250	24+930	1	2	DA AMBO I LATI
NV18				
PK INIZIO	PK FINE	TIRANTE MAX TR 200 (m)	ALTEZZA PROTEZIONE (m)	NOTE
0+000	0+400	1	2	LATO MONTE
0+400	1+900	1	2	DA AMBO I LATI
1+900	2+500	1.5	2.5	LATO MONTE
2+500	2+670	1	2	LATO VALLE

Tabella 9-18. Zona Palude Capo d'Acqua: opere di protezioni dei rilevati.

10. COMPATIBILITA' IDRAULICA

Lo studio idraulico svolto mostra come gli interventi previsti (linea ferroviaria e opere annesse, i.e. viabilità) siano perfettamente compatibili con la situazione idraulica del territorio.

Con riferimento al T. Saccione, le simulazioni effettuate evidenziano esondazioni diffuse in tutta la piana in entrambi gli scenari, ante e post operam (anche oltre le aree di pericolosità idraulica definite nel PAI). Marginali differenze tra le aree di esondazione ante e post operam sono riscontrabili nell'area interclusa tra il rilevato ferroviario in progetto e l'autostrada A14, in prossimità della SSE.

LINEA PESCARA – BARI

**RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA
LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA**

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	125

Sono previste comunque opere di mitigazione (tombini di trasparenza) al fine di limitare, il più possibile, eventuali aumenti dei livelli idrici.

A prescindere da tali modeste (locali) differenze, tutte le viabilità (principali e secondarie) nell'area di studio, anche nella configurazione ante operam risultano essere interessate dalle esondazioni e quindi attualmente non praticabili in caso di eventi meteorici estremi.

Medesime osservazioni possono essere dedotte per i corsi d'acqua minori in zona Capo d'Acqua; infatti dal confronto tra gli scenari ante e post operam non emergono significative differenze nelle aree di esondazione. Le modeste (locali) variazioni sono imputabili ai rilevati ferroviario e della nuova viabilità (NV18) che modificano, seppure in limitati punti, l'evoluzione delle esondazioni in aree peraltro già inondate nello scenario ante operam.

Per quanto concerne i viadotti VI06, VI13, VI14, VI15, risultano rispettate le prescrizioni in materia di franco idraulico riportate nelle NTC2018 e nel manuale di Progettazione RFI.

Con riferimento a quest'ultimo, risulta inoltre verificata la prescrizione di un franco *“non inferiore a 1 m tra la quota della piattaforma ferroviaria (piano di regolamento) e la massima altezza raggiungibile dalla quota di massima piena di progetto”*, relativamente ai rilevati in zona di esondazione.

Per quanto concerne infine le aree di pericolosità idraulica del T. Saccione definite nell'ambito del PAI, il viadotto VI06 non interessa con rilevati e spalle le aree di pericolosità PI2, associate alla piena con tempo di ritorno di 200 anni (la cosiddetta fascia B).

Gli interventi previsti sono quindi idraulicamente compatibili con il Piano di Stralcio vigente (artt. 12-13-14-15 delle NTA del PAI del Bacino Interregionale del F. Saccione) e non aumentano, anche con riferimento all'eventuale sottrazione di volume per l'espansione delle piene, il livello di rischio idraulico del territorio limitrofo.

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE & R.L.	MANDANTI HYpro S.P.A.	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA								
		Relazione Idraulica	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC RI	OPERA 7 DISCIPLINA ID 00 02		PROGR 001

11. STUDIO FASE REALIZZATIVA

Lo studio idraulico è stato, altresì, condotto durante le fasi realizzative delle opere. Durante la costruzione delle opere, cioè prima che le stesse abbiano raggiunto il loro assetto definitivo, è opportuno far riferimento ad idrogrammi di piena per un periodo di ritorno di 5 anni, per il dimensionamento delle eventuali opere provvisionali del periodo transitorio.

Per la verifica dei componenti del progetto, è stato utilizzato un modello idraulico bidimensionale (2D) in regime di moto vario mediante l'uso del software HEC-RAS. La superficie oggetto di studio è stata adattata in base ai dati topografici forniti dalla Regione, utilizzando un modello digitale del terreno (DTM) con una risoluzione superiore al metro. Questo approccio tecnico consente di ottimizzare la progettazione del canale transitorio e degli argini per garantire una gestione adeguata delle piene con un tempo di ritorno di 5 anni, utilizzando dati idrologici dettagliati e strumenti di modellazione avanzati.

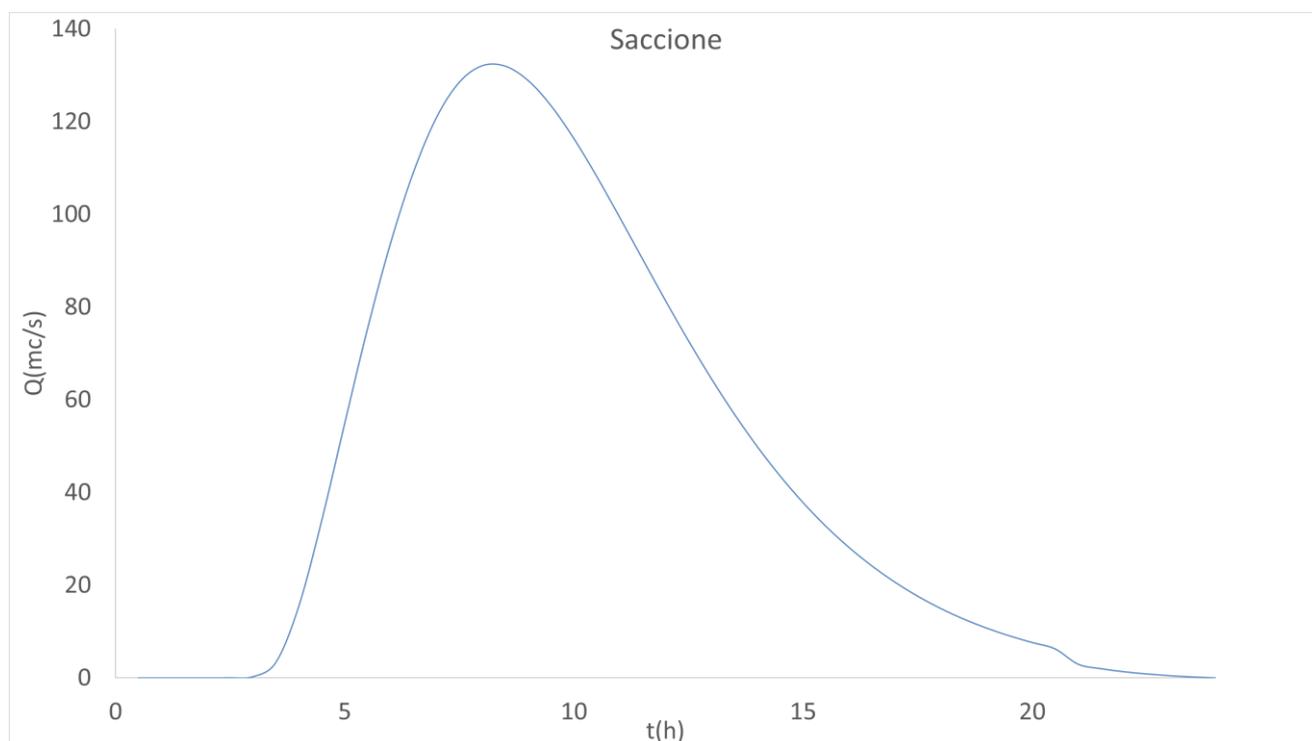


Figura 11-1 Idrogramma di piena del Torrente Saccione per T=5anni

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	127

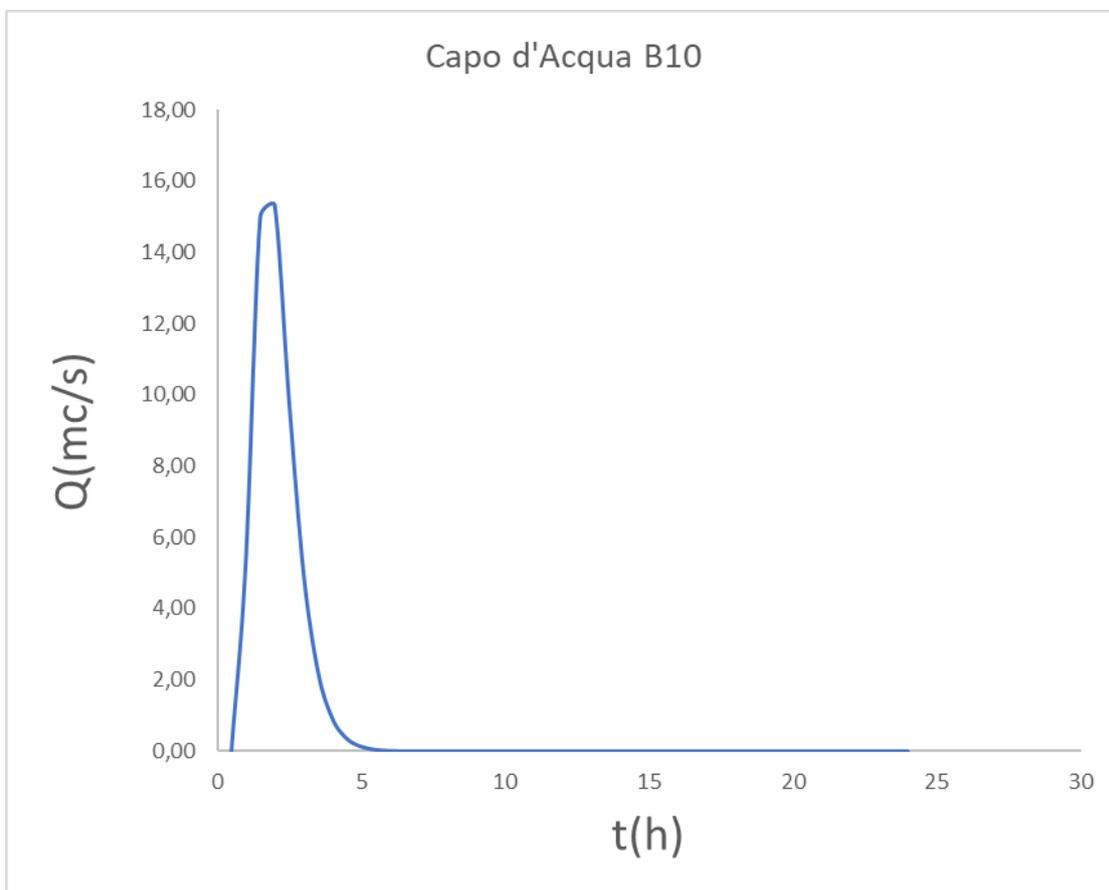


Figura 11-2 Idrogramma di piena del Capo d'acqua per T=5anni

Modellazione idraulica Viadotto VI06 in progetto

Lo scenario di riferimento considerato è costituito dalla situazione attuale di stato di fatto, integrata considerando i seguenti interventi di fasizzazione dei corsi d'acqua:

1. Deviazione fosso idraulico esistente tratto compreso tra pile P10 e P11, al fine di spostare le eventuali acque di magra e rendere agevole la realizzazione delle due pile della campata principale
2. Realizzazione di tura e condotte provvisorie del diametro DN 2000, per deflusso acque per controfosso e T. Saccione.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	128

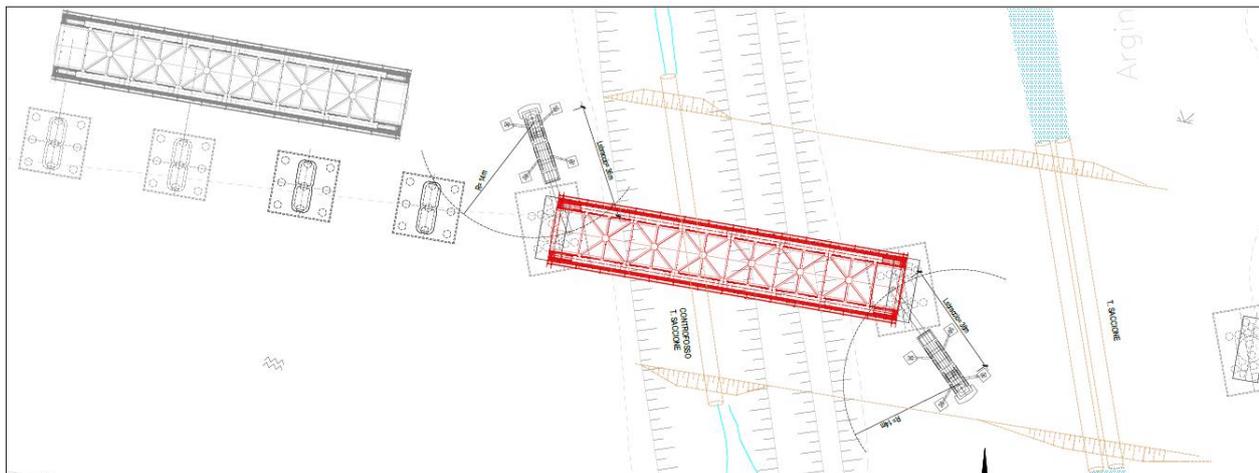


Figura 11-3 2. Planimetria di realizzazione di tura e condotte provvisorie del diametro DN 2000, per deflusso acque per controfosso e T. Saccione.

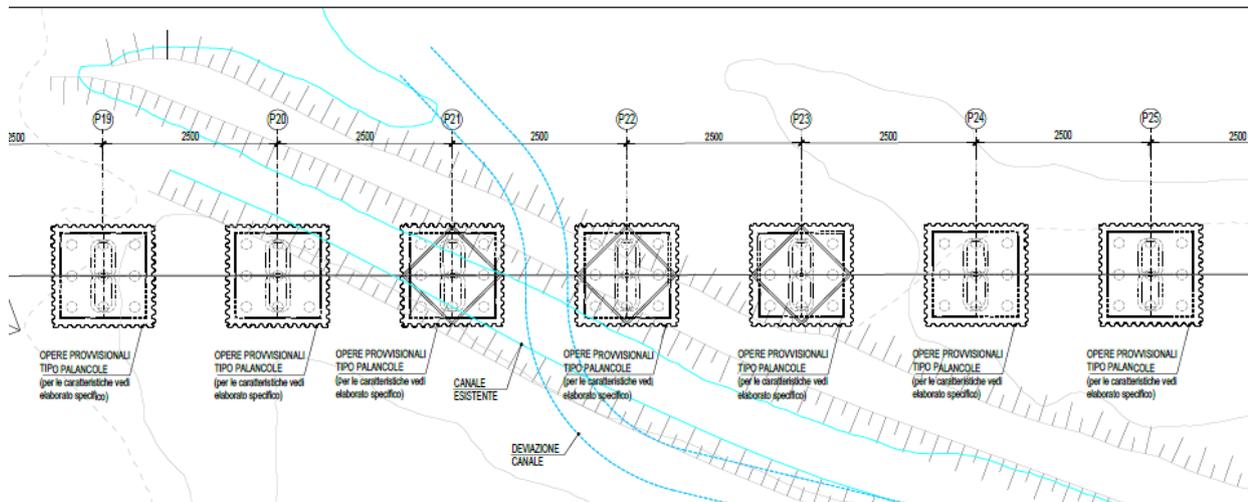


Figura 11-4 Deviazione fosso idraulico esistente tratto compreso tra pile P10 e P11

Per ulteriori dettaglio sulla fasizzaione degli interventi si rimanda ai seguenti elaborati di riferimento: LI0B.0.2.E.ZZ.P9.VI06.0.0.001.B. e LI0B.0.2.E.ZZ.P9.VI06.0.0.002.A

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	129

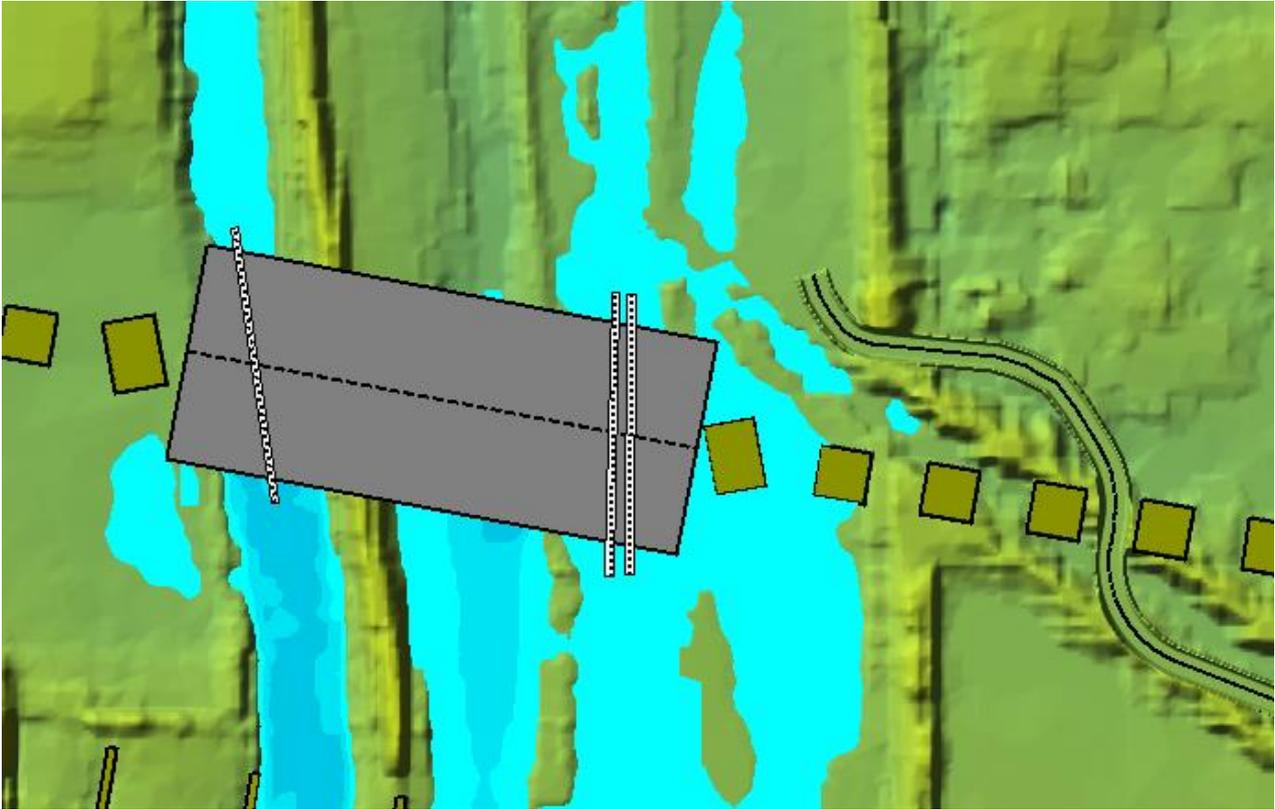


Figura 11-5 Risultati della modellazione

Le strutture temporanee destinate alla fase di realizzazione dimostrano un'eccellente adattabilità al comportamento idraulico del Torrente Saccione e corsi d'acqua minori in presenza di eventi di piena con un periodo di ritorno di 5 anni. Questo periodo di ritorno è ampiamente congruente con il cronoprogramma del cantiere nella zona.

Modellazione idraulica Viadotto VI15 in progetto

Lo scenario di riferimento considerato è costituito dalla situazione attuale di stato di fatto, integrata considerando i seguenti interventi di fasizzazione dei corsi d'acqua:

1. Deviazione fosso idraulico esistente tratto compreso tra pile P08 e P10, al fine di spostare le eventuali acque di magra e rendere agevole la realizzazione delle due pile della campata principale

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	130

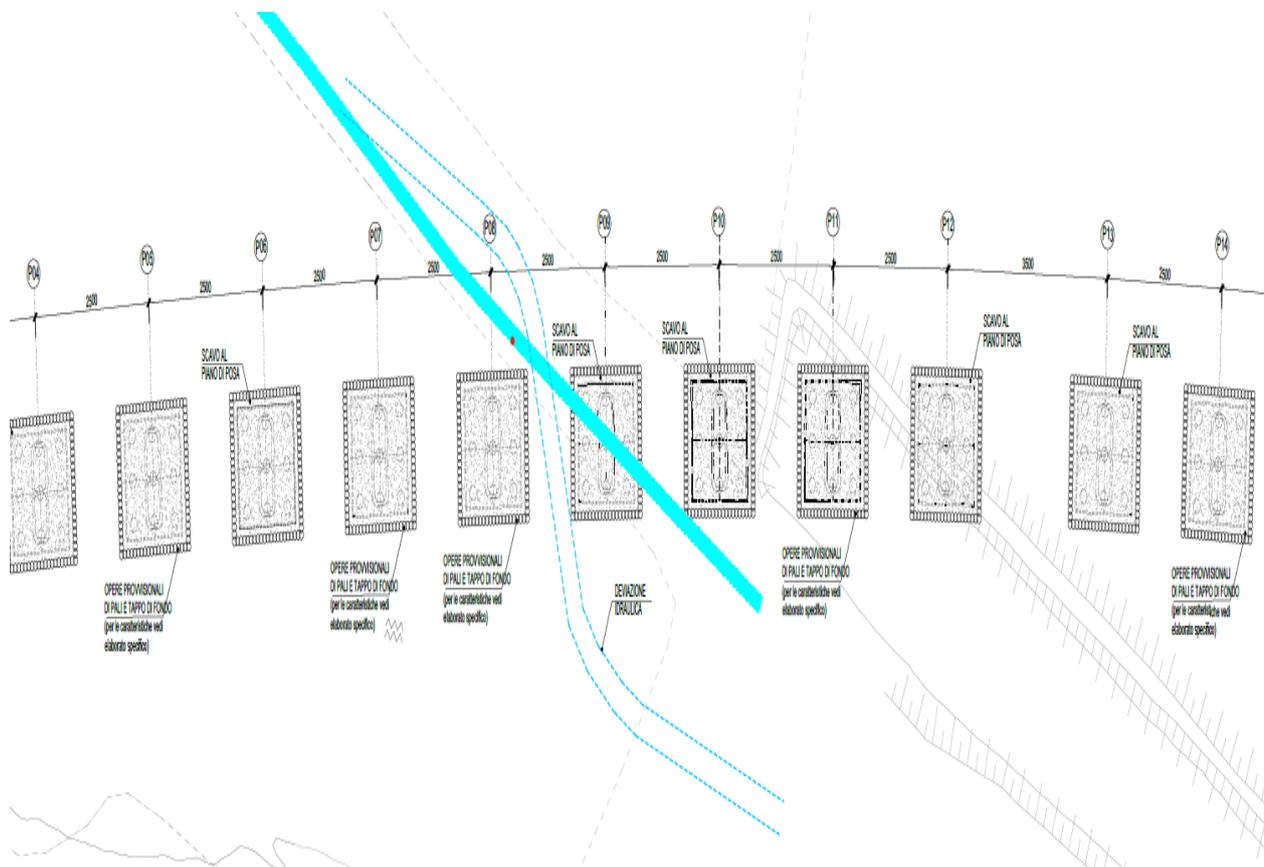


Figura 11-6 Deviazione fosso idraulico esistente tratto compreso tra pile P08 e P10

Per ulteriori dettagli sulla fascezzaione degli interventi si rimanda ai seguenti elaborati di riferimento: LI0B.0.2.E.ZZ.P9.VI15.0.0.001.B.

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE & R.L.	MANDANTI HYpro S.P.A.	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA								
		Relazione Idraulica	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC RI	OPERA 7 DISCIPLINA ID 00 02		PROGR 001

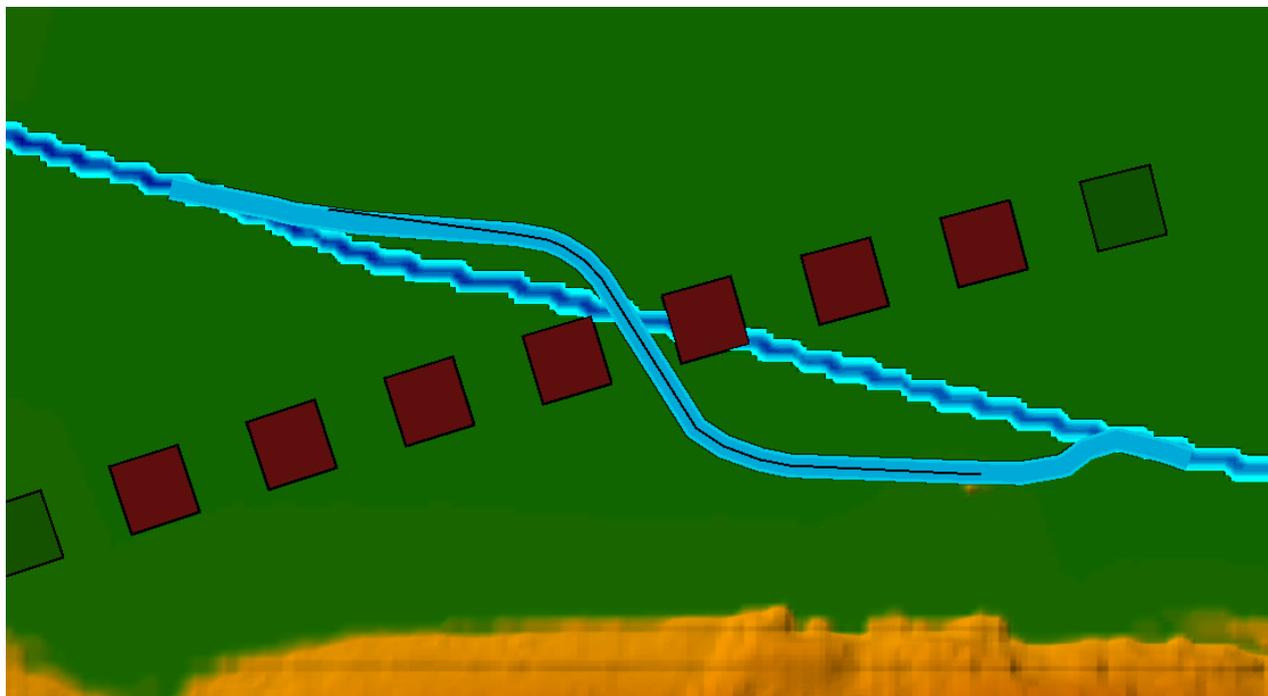


Figura 11-7 Risultati della modellazione

Le strutture temporanee destinate alla fase di realizzazione dimostrano un'eccellente adattabilità al comportamento idraulico del Torrente Capo d'Acqua in presenza di eventi di piena con un periodo di ritorno di 5 anni. Questo periodo di ritorno è ampiamente congruente con il cronoprogramma del cantiere nella zona.

12. VERIFICHE DI STABILITÀ' DEI RILEVATI

Per le verifiche di stabilità dei rilevati interessati dalle aree di esondazione, si rimanda agli specifici elaborati di ambito:

- LI0B02EZZRHGE0005001

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	132

- LI0B02EZZRHGE0005002

A seguire uno stralcio delle verifiche:

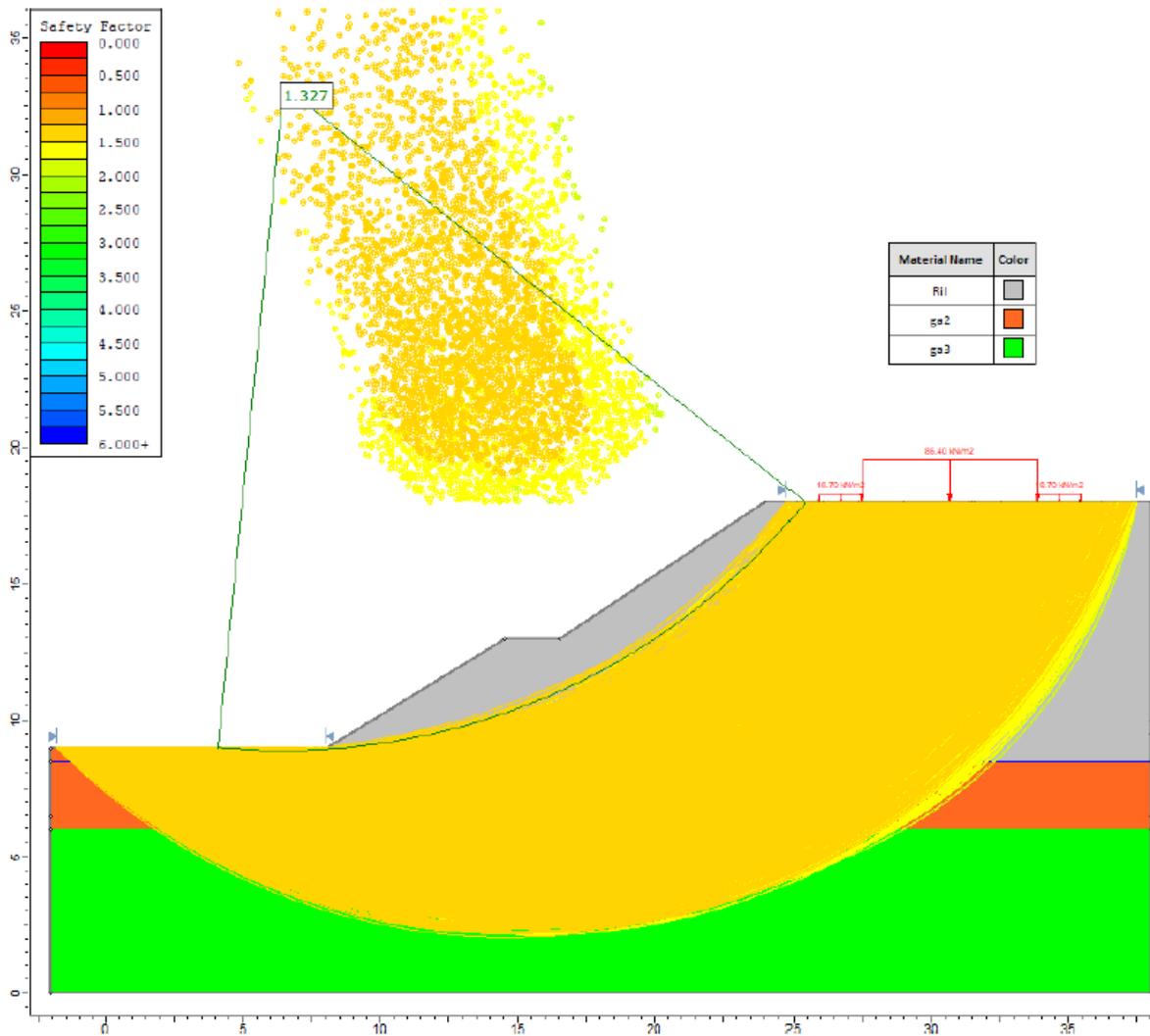


Figura 12-1 RI08 (13+950) Analisi statica SLU – H= 9.0m

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA	PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID 00 02	001	D	133

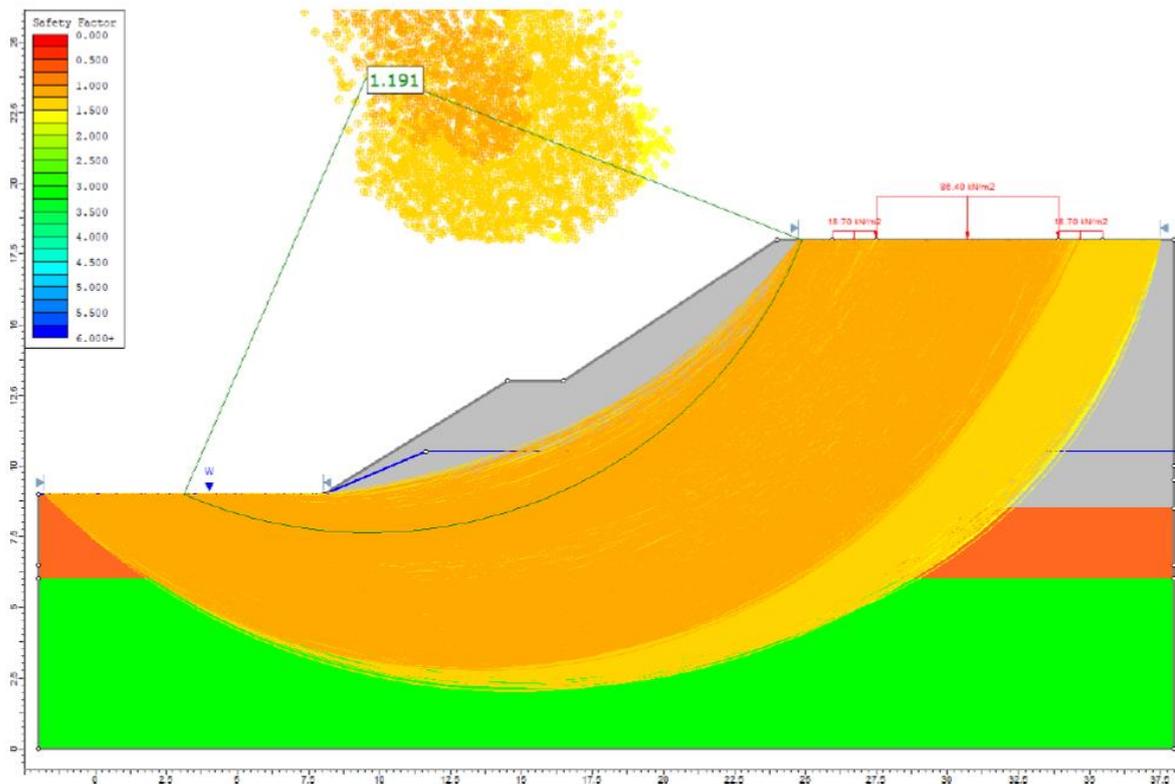


Figura 12-2 RI08 (13+950) Analisi statica SLU +rilevato saturo in presenza di battente idrico – H= 9.0m

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	134

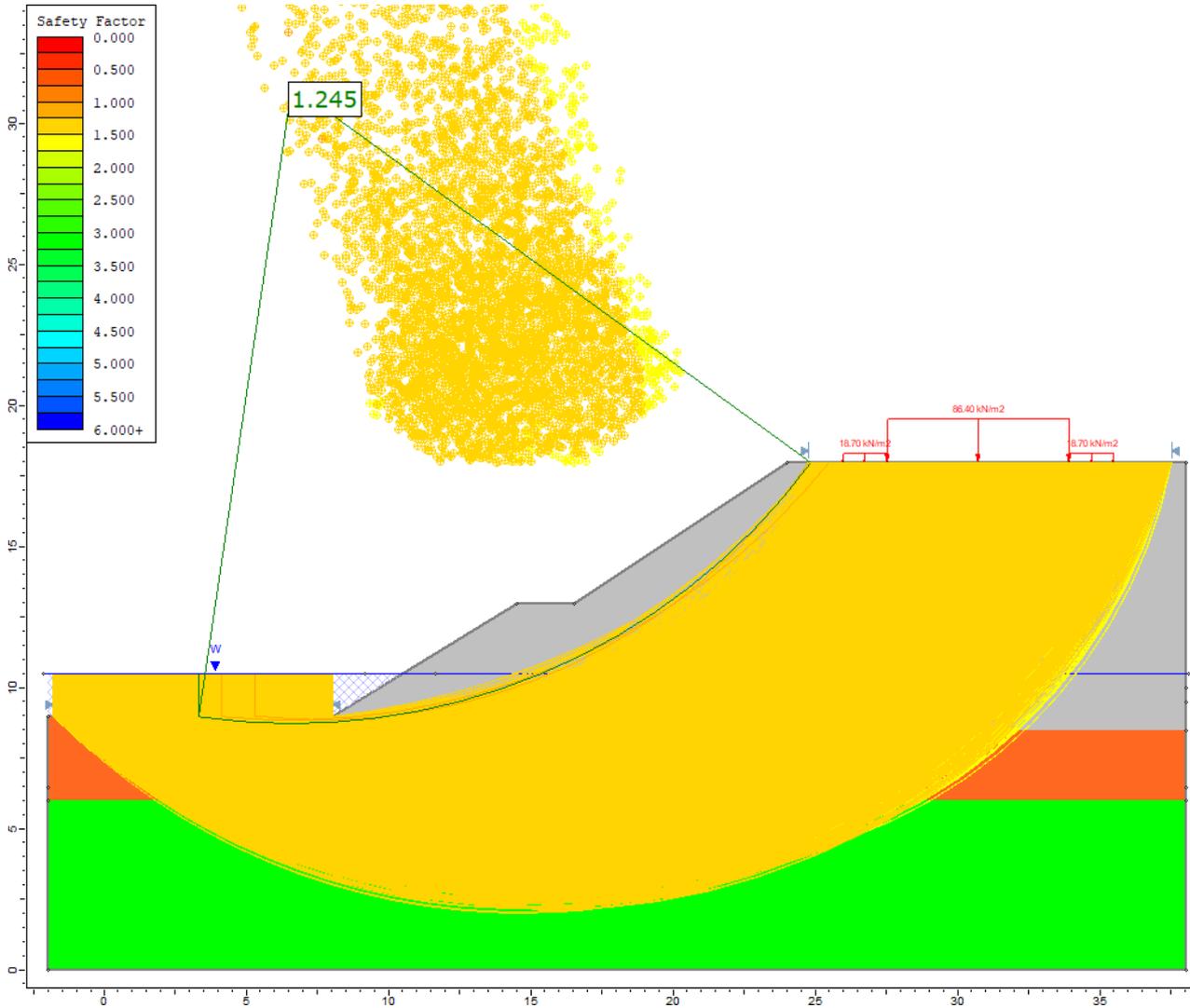


Figura 12-3 RI08 (13+950) Analisi statica SLU +rilevato saturo (con livello idrico massimo) in assenza di battente – H= 9.0m

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	135

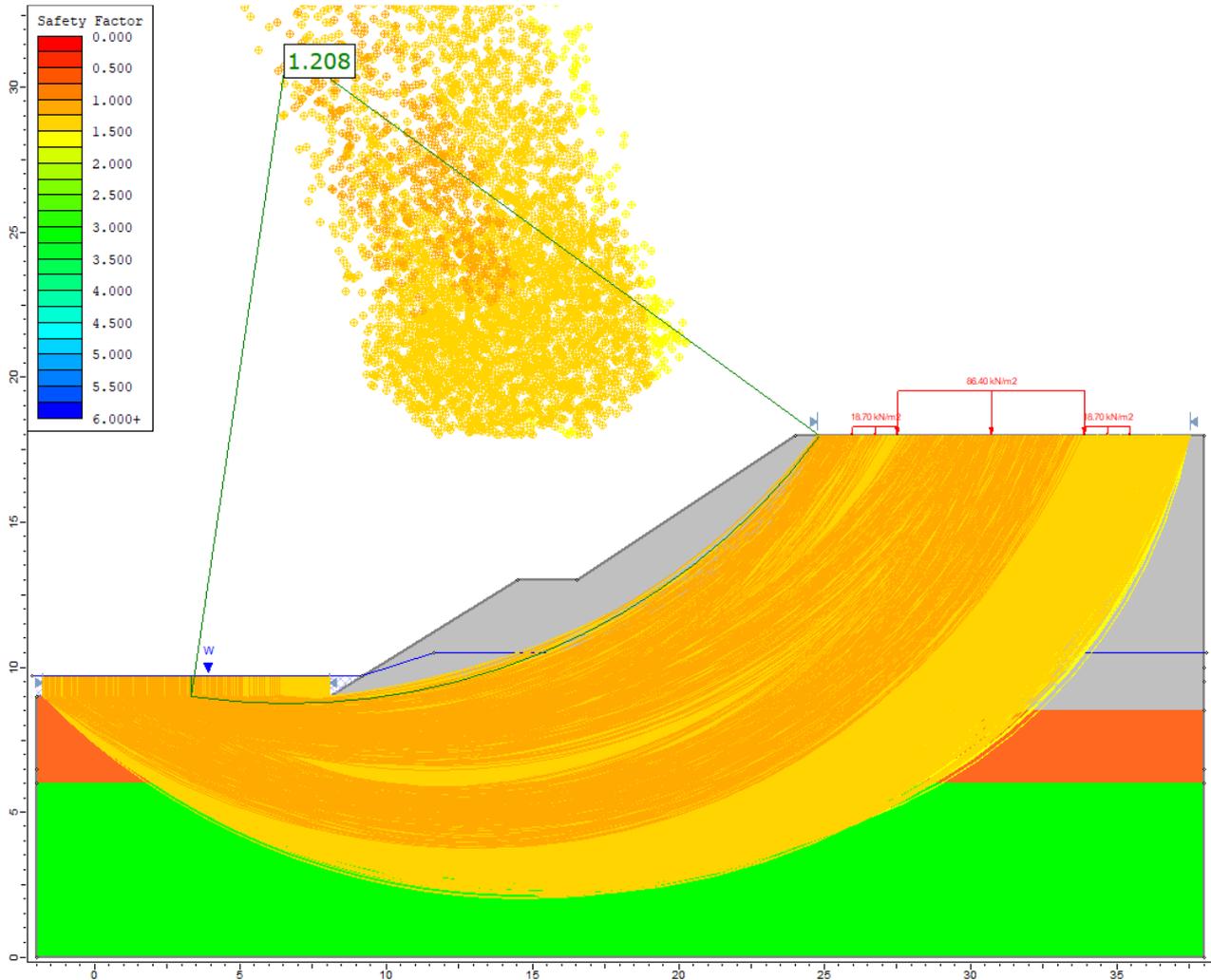


Figura 12-4 RI08 (13+950) Analisi statica SLU +rilevato saturo (con livello idrico variabile entro e fuori dal rilevato) – H= 9.0m

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	136

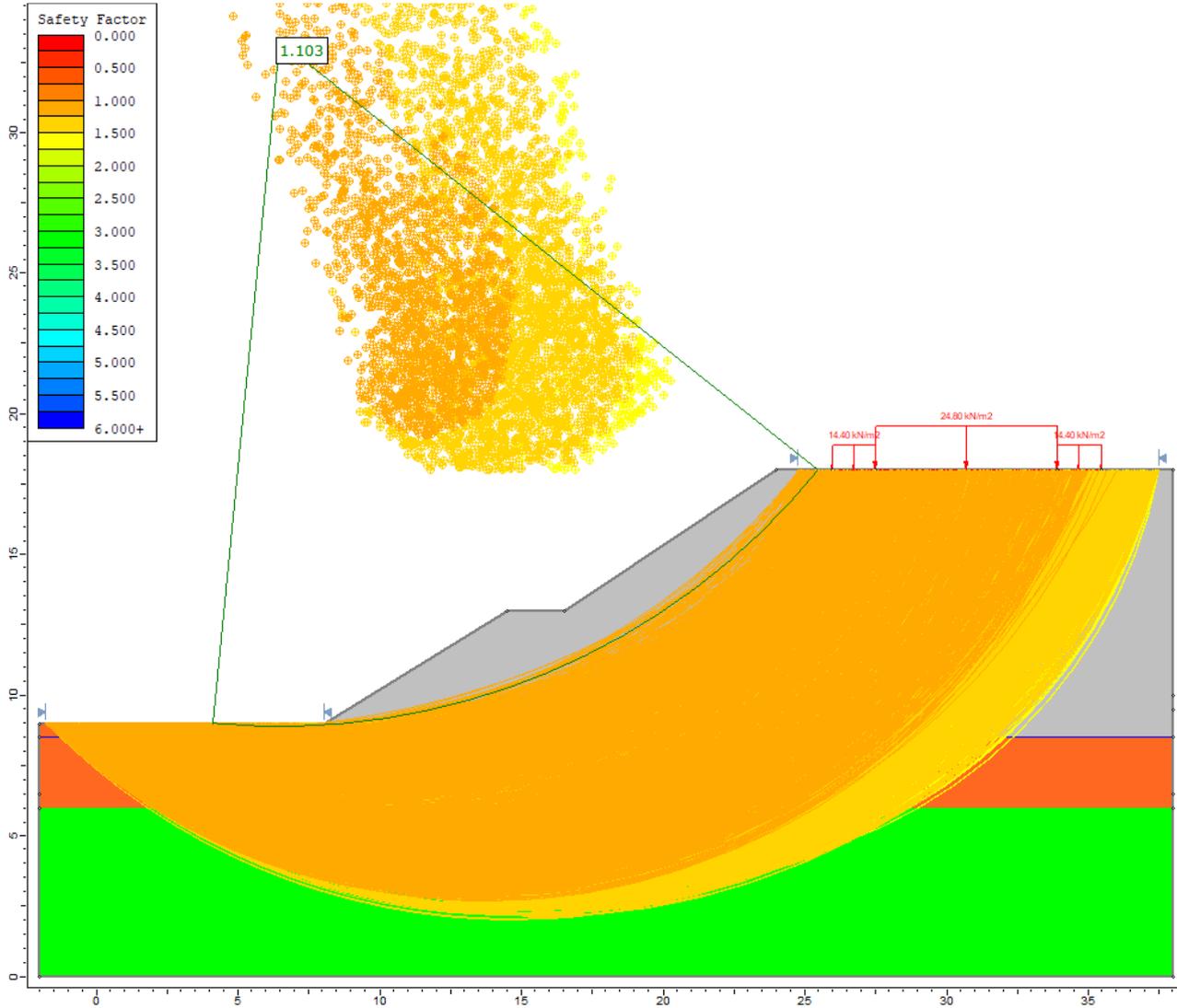


Figura 12-5 RI08 (13+950) Analisi sismica SLU (+kv) H= 9.0m

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D	137

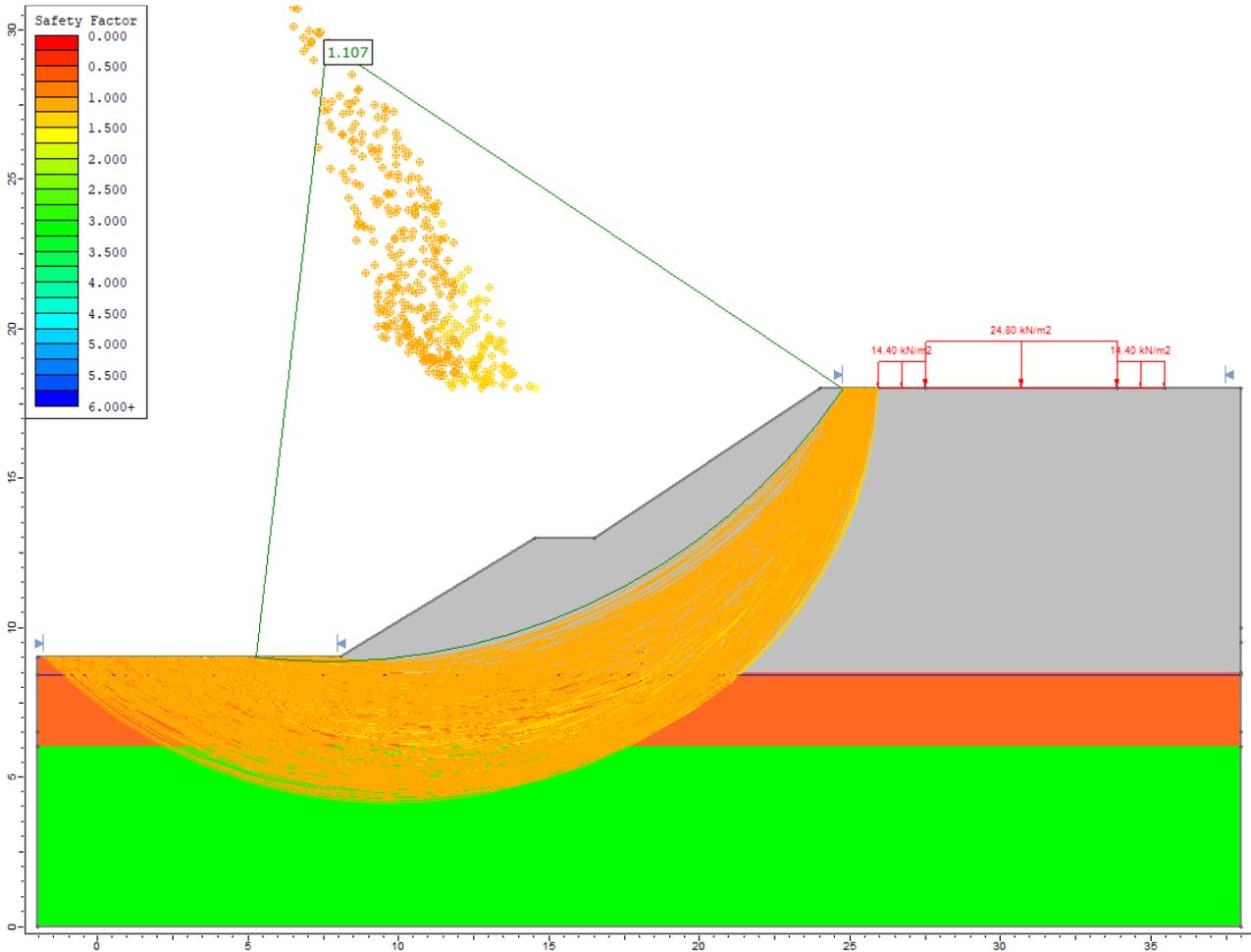


Figura 12-6 RI08 (13+950) Analisi sismica SLU (-kv) H= 9.0m

13. DOCUMENTI E NORMATIVA DI RIFERIMENTO

- Hall M. J., *Urban Hydrology*, Elsevier, London, 1984;
- Calomino e Veltri (a cura di), *Orientamenti attuali di idrologia urbana*, Bios, Cosenza, 1988;
- Maione U., *Appunti di idrologia 3. Le piene fluviali*, La Goliardica Pavese, 1977;
- Ministero LL.PP., *Dati caratteristici dei corsi d'acqua italiani*, Pubblicazione n°17, Roma, 1980;

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	001	D

- Penta A., Rossi F., Silvani G., Veltri M., Versace P., *Un modello stocastico per l'analisi delle massime piogge giornaliere in presenza di grandi nubifragi*, Atti XVII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Palermo, 1980;
- Penta A., Silvani G., Versace P., *Analisi regionale dei massimi annuali delle portate al colmo di piena, Incontro di studio su: Estremi ideologici e modelli di previsione*, Perugia, 1978;
- Rossi F., Fiorentino M., Versavice P., *Two component extreme value distribution for Flood Frequency Analysis*, Water Resources Research, Vol. 20, n°7, 1984;
- Villani P., *La valutazione della piena annua media*, Atti dell'Istituto di Ingegneria Civile, Università di Salerno, n°108, 1990;
- Viparelli C., *Ricostruzione dell'idrogramma di piena*, L'Energia Elettrica, 6, 421-428, 1963;
- Watt W.E. and Chow C.A., *A general expression for the basin lag time*, Canadian Journal of Civil Engineering, 12, 294-300, 1985;
- Caivano A. M., *Rischio idraulico e idrogeologico*, EPC Libri, 2003
- Corine Land Cover 2012 (ISPRA).
- DM 2018 - Norme Tecniche sulle Costruzioni;
- Circolare 2 febbraio 2009, n. 617 - Istruzioni per l'applicazione delle *'Nuove norme tecniche per le costruzioni'* di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008. (GU n. 47 del 26-2-2009 - Suppl. Ordinario n.27);
- Manuale di Progettazione RFI versione RFIDTCSIMAIFS001D
- AUTORITA' DI BACINO DEI FIUMI Trigno, Biferno e Minori, Saccione e Fortore, *"PROGETTO DI PIANO STRALCIO per l'assetto idrogeologico del bacino interregionale del fiume Saccione"*.
- AUTORITA' DI BACINO MERIDIONALE, Aggiornamento Piano di Gestione del rischio di alluvioni II Ciclo (2016/2021).