

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



## U.O. OPERE CIVILI E GESTIONE DELLE VARIANTI

### PROGETTO DEFINITIVO

## DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA

## RADDOPPIO TRATTA FIUMETORTO – LERCARA DIRAMAZIONE LOTTO 1+2

### IDROLOGIA E IDRAULICA

#### Studio idraulico del Fiume Torto – Relazione

SCALA:

-

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

RS3Z 00 D 09 RI ID0002 003 B

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Esecutiva	A. Cappelli	gen. 2020	A. Cappelli	gen. 2020	A. Barreca	gen. 2020	A. Vittozzi set. 2021 <small>ITALFERR S.p.A. U.O. Opere Civili e Gestione delle varianti Dott. Ing. Angelo Vittozzi Ingegnere degli Ingegneri della Provincia di Roma N° A/20783</small>
B	Emissione Esecutiva	A. Cappelli	set. 2021	A. Cappelli	set. 2021	A. Barreca	set. 2021	



## INDICE

1	INTRODUZIONE .....	5
1.1	OBIETTIVI E METODOLOGIA DI STUDIO .....	5
1.2	RIFERIMENTI NORMATIVI .....	5
2	INQUADRAMENTO GENERALE .....	7
2.1	AMBITO DI STUDIO .....	7
2.2	ASSETTO IDRAULICO ATTUALE .....	7
2.3	PERICOLOSITÀ IDRAULICA NELL'AREA DI INTERVENTO .....	8
3	STUDIO IDRAULICO BIDIMENSIONALE .....	11
3.1	IMPOSTAZIONE GENERALE .....	11
3.2	DATI DI BASE .....	11
3.3	IDROGRAMMI DI PIENA DEL FIUME TORTO .....	11
3.4	IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO .....	13
	3.4.1 <i>Modello numerico</i> .....	13
	3.4.2 <i>Geometria di calcolo</i> .....	15
	3.4.3 <i>Scabrezze</i> .....	17
	3.4.4 <i>Condizioni al contorno</i> .....	17
3.5	SCENARI SIMULATI .....	19
	3.5.1 <i>Stato di fatto</i> .....	19
	3.5.2 <i>Stato di progetto</i> .....	19
3.6	RISULTATI DELLE SIMULAZIONI .....	20
	3.6.1 <i>Stato di fatto</i> .....	20
	3.6.2 <i>Stato di progetto</i> .....	21
4	ANALISI DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA .....	24
4.1	CRITERI DI VERIFICA .....	24
	4.1.1 <i>Manuale di Progettazione ferroviario e Norme Tecniche per le Costruzioni</i> .....	24

4.1.2	<i>Norme di Attuazione del Piano di Assetto Idrogeologico</i> .....	25
4.2	VERIFICA DEI FRANCHI DI PROGETTO .....	26
4.3	LUCI DELLE CAMPATE DEI VIADOTTI IN PROGETTO .....	26
4.4	COMPATIBILITÀ CON L'ASSETTO IDRAULICO DEL TERRITORIO .....	27
5	CALCOLO DELLE EROSIONI LOCALIZZATE.....	29
5.1	METODOLOGIA DI ANALISI.....	29
5.1.1	<i>Scelta della formula di calcolo</i> .....	29
5.1.2	<i>Metodologia di applicazione della formula scelta</i> .....	29
5.1.3	<i>Equazione S/M di Sheppard-Melville</i> .....	30
5.2	SCALZAMENTI CALCOLATI.....	32
6	SISTEMAZIONI IDRAULICHE .....	33
6.1	PROTEZIONI DELLE FONDAZIONI DEI VIADOTTI.....	33
6.1.1	<i>Tipologia di intervento</i> .....	33
6.1.2	<i>Metodologia di riferimento</i> .....	33
6.1.3	<i>Dimensionamento delle protezioni in massi</i> .....	34
6.2	PROTEZIONE DELLA SCARPATA FERROVIARIA .....	35
7	BIBLIOGRAFIA .....	36

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>RADDOPPIO TRATTA FIUMETORTO – LERCARA DIRAMAZIONE</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	<b>STUDIO IDRAULICO DEL FIUME TORTO</b>  <b>RELAZIONE IDRAULICA</b>	COMMESSA <b>RS3Z</b>	LOTTO <b>00 D 09</b>	CODIFICA <b>RI</b>	DOCUMENTO <b>ID0002 003</b>	REV. <b>B</b>

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 2-1 - Inquadramento linea ferroviaria su ortofoto. ....	7
Figura 2-2: Aree a Pericolosità idraulica (fonte SITR Regione Sicilia, 2019) .....	9
Figura 2-3: Aree a Pericolosità idraulica (fonte SITR Regione Sicilia, 2019) .....	10
Figura 2-4. Legenda delle aree a Pericolosità idraulica.....	10
Figura 3-1: Idrogramma di piena Tr300 anni per il Fiume Torto a monte della confluenza con il Vallone Torre del Principe .....	12
Figura 3-2: idrogrammi di piena Tr300 anni per i contributi del Fiume Torto a valle della confluenza con il Vallone Torre del Principe.....	12
Figura 3-3 – Software Hec Ras 5.0.7: sistema di riferimento. ....	14
Figura 3-4 – Software Hec Ras 5.0.7: 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. ....	15
Figura 3-5 – dominio di calcolo del modello 2D del Fiume Torto.....	16
Figura 3-6 – Modello 2D: implementazione delle opere di attraversamento in Hec Ras. ....	17
Figura 3-7 – Modello 2D: condizioni al contorno .....	18
Figura 3-8: confronto tra la geometria dello stato di fatto (a sinistra) e quella dello stato di progetto (a destra).....	19
Figura 3-9: Risultato della simulazione per Tr300 anni – stato di fatto, altezze d’acqua (tratto di monte).....	20
Figura 3-10: Risultato della simulazione per Tr300 anni – stato di fatto, altezze d’acqua (tratto di valle) .....	21
Figura 3-11: Risultato della simulazione per Tr300 anni – stato di progetto, altezze d’acqua (tratto di monte).....	22
Figura 3-12: Risultato della simulazione per Tr300 anni – stato di progetto, altezze d’acqua (tratto di valle) ...	23
Figura 4-1: ubicazione planimetrica delle sezioni di interesse in corrispondenza del ponte ferroviario esistente .....	27
Figura 4-2: confronto tra i livelli idrici ante e post operam per l’evento con Tr 300 anni in corrispondenza della sezione immediatamente a monte del ponte della ferrovia esistente sul Fiume Torto.....	28
Figura 4-3: confronto tra i livelli idrici ante e post operam per l’evento con Tr 300 anni in corrispondenza della sezione immediatamente a valle del ponte della ferrovia esistente sul Fiume Torto .....	28
Figura 5-1 – Abaco di confronto.....	29
Figura 5-2 – Differenti tipologie di pile e delle corrispondenti fondazioni. ....	30

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 4-1 – Sintesi normativa di riferimento .....	24
Tabella 4-2: Verifica di compatibilità idraulica.....	26
Tabella 5-1: scalzamenti per le pile più sollecitate .....	32

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA RADDOPPIO TRATTA FIUMETORTO – LERCARA DIRAMAZIONE</b></p> <p><b>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>												
<p><b>STUDIO IDRAULICO DEL FIUME TORTO</b></p> <p><b>RELAZIONE IDRAULICA</b></p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RS3Z</td> <td>00 D 09</td> <td>RI</td> <td>ID0002 003</td> <td>B</td> <td>4 di 38</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	RS3Z	00 D 09	RI	ID0002 003	B	4 di 38
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
RS3Z	00 D 09	RI	ID0002 003	B	4 di 38								

Tabella 6-1: dimensioni minime delle protezioni in massi.....34

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>RADDOPPIO TRATTA FIUMETORTO – LERCARA DIRAMAZIONE</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>STUDIO IDRAULICO DEL FIUME TORTO</b>  <b>RELAZIONE IDRAULICA</b>	COMMESSA <b>RS3Z</b>	LOTTO <b>00 D 09</b>	CODIFICA <b>RI</b>	DOCUMENTO <b>ID0002 003</b>	REV. <b>B</b>	FOGLIO <b>5 di 38</b>

# 1 INTRODUZIONE

## 1.1 OBIETTIVI E METODOLOGIA DI STUDIO

Il presente documento è parte della progettazione definitiva della “Tratta Fiume Torto – Lercara diramazione” nell’ambito del più ampio progetto della “Direttrice ferroviaria Messina – Catania – Palermo. Nuovo collegamento Palermo – Catania”.

La presente relazione descrive lo studio idraulico eseguito al fine di verificare l’estensione delle aree allagabili dovute alle piene del Fiume Torto, nella cui bassa valle si sviluppa il progetto in questione. La mappatura delle aree allagabili consente di individuare le possibili criticità dovute all’interferenza delle opere in progetto con l’assetto idraulico dell’area di studio e conseguentemente definire gli eventuali interventi di mitigazione, ovvero di verificare che la presenza delle nuove opere sul territorio sia compatibile con i livelli idrici di piena e che non peggiori la situazione attuale, né ostacoli la possibilità di realizzare interventi di mitigazione del rischio idraulico.

Nel dettaglio l’analisi effettuata ha seguito le seguenti fasi:

- Inquadramento dell’ambito di studio e definizione dell’assetto idraulico attuale
- Raccolta dei dati cartografici e topografici per la definizione delle caratteristiche fisiche dell’ambito di studio
- Implementazione di un modello di calcolo idraulico per la determinazione delle aree allagabili nell’ambito di studio
- Verifica della compatibilità idraulica degli interventi in progetto con l’assetto idraulico

## 1.2 RIFERIMENTI NORMATIVI

Di seguito, la normativa nazionale e regionale di riferimento:

- Regio Decreto (R.D.) n. 3918/1877
- **R.D. 27 luglio 1904, n. 523**
- R.D. 27 luglio 1904, n. 368
- R.D. n. 3267/1923
- R.D. 17 maggio 1926, n. 1126
- R.D. n. 215/1933
- **Legge n. 183/1989, “Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo”**
- **D.M. del 14 febbraio 1997 “Direttive tecniche per l’individuazione e perimetrazione da parte delle Regioni a rischio idraulico”**
- D.L. n. 180/1998 (Decreto Sarno)
- **Legge n. 365/2000 “Conversione in legge, con modificazioni, del decreto legge 12 ottobre 2000, n. 279, recante interventi urgenti per le aree a rischio idrogeologico molto elevato ed in materia di protezione civile” (legge Soverato)**
- **Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico (P.A.I.) della Regione Siciliana (2004) e relative Norme Tecniche di Attuazione (NTA)**

- ***D.Lgs. n. 152/2006 “Norma in materia ambientale”***
- Direttiva n. 2007/60/CE
- ***D.Lgs. n. 49/2010 “Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi alluvioni”***
- ***Piano di Gestione del Rischio Alluvioni della Regione Siciliana (2015) e relative Norme di Attuazione***
- ***Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC2018) – D.M. 17 gennaio 2018***
- ***Circolare esplicativa delle NTC 2018 n. 7 del 21 gennaio 2019***

## 2 INQUADRAMENTO GENERALE

### 2.1 AMBITO DI STUDIO

L'intervento progettuale in oggetto ricade all'interno del bacino del Fiume Torto, nel versante centrale dell'Isola, sviluppandosi nel territorio della provincia di Palermo.

I territori comunali interessati dal tracciato sono quelli di: Termini Imerese, Sciarra e Cerda.

La tratta ferroviaria si sviluppa in destra idrografica del fiume Torto. Le interferenze con la rete idrografica superficiale maggiore sono numerose.

In Figura 2-1 è rappresentato l'inquadramento geografico della linea ferroviaria di progetto.

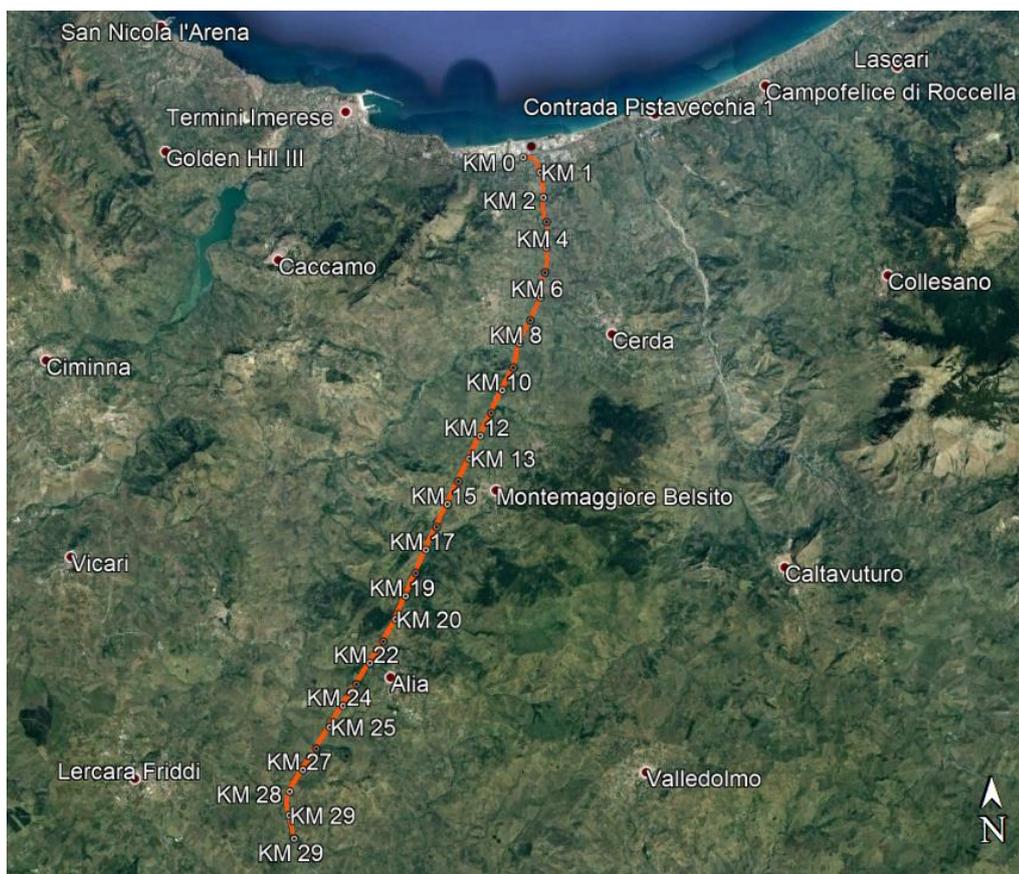


Figura 2-1 - Inquadramento linea ferroviaria su ortofoto.

### 2.2 ASSETTO IDRAULICO ATTUALE

L'assetto idraulico dell'ambito di studio può essere definito sia dalla ricostruzione del regime idraulico del Fiume Torto, lungo la cui valle si sviluppa il progetto in questione, sia dall'esame delle aree a pericolosità idraulica riportate nel Piano di Assetto Idrogeologico della Regione Siciliana, come discusso nel successivo paragrafo 2.3.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO          NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA          RADDOPPIO TRATTA FIUMETORTO – LERCARA DIRAMAZIONE</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>STUDIO IDRAULICO DEL FIUME TORTO</b>  <b>RELAZIONE IDRAULICA</b>	COMMESSA <b>RS3Z</b>	LOTTO <b>00 D 09</b>	CODIFICA <b>RI</b>	DOCUMENTO <b>ID0002 003</b>	REV. <b>B</b>	FOGLIO <b>8 di 38</b>

Il Fiume Torto rappresenta la principale linea di deflusso idrico superficiale dell'area. Il bacino di tale corso d'acqua si estende per circa 423 km<sup>2</sup>. Il bacino idrografico del Fiume Torto presenta una variabilità morfologica piuttosto spiccata, sviluppando il suo territorio tra due complessi montuosi (Madonie e Monti di Termini) e comprendendo anche la zona interna collinare tra la catena settentrionale ed i Monti Sicani.

Tra gli elementi che determinano l'andamento dell'asta principale e dei suoi affluenti principali si ricordano: la dorsale di Monte Roccelito (destra orografica, 1145 m s.l.m.) e la sua prosecuzione ad ovest con P.zo Bosco; la dorsale nord-sud denominata La Montagna che a partire dall'abitato di Roccapalumba e fino al nucleo abitato di Sambuchi, delimita ad ovest il bacino idrografico; le alture arenarie di P.zo Fico, P.zo Conca, M. Castellazzo, M. Rigiura, La Montagna (Alia) e Serra Tignino che caratterizzano la porzione centrale in destra idrografica.

I contrasti morfologici sono maggiormente presenti nei versanti del tratto che attraversa la catena costiera siciliana, a partire dalla stretta morfologica posta subito a valle della stazione ferroviaria di Montemaggiore Belsito e fino all'ultimo tratto del corso del F. Torto, quando questo attraversa la Piana costiera di Bonfornello. A monte prevalgono i paesaggi collinari, generalmente omogenei, se si eccettuano le alture arenarie descritte precedentemente, dove i tratti terminali del reticolo idrografico presentano pendenze elevate.

L'asta principale del fiume, lungo complessivamente circa 57 km, nel tratto di monte, si sviluppa in direzione est-ovest, parallelamente allo spartiacque meridionale. In questo primo tronco gli affluenti principali sono: il T. Gian Jacopo ed il V.ne Guccia. Nella zona centrale, fino alla confluenza in sinistra del T. Lisca, il corso d'acqua raccoglie i deflussi del F. S. Filippo e del V.ne Raffo, in sponda sinistra.

A valle della confluenza con il T. Lisca, che costituisce il maggiore affluente del F. Torto, il corso d'acqua prosegue fino alla foce raccogliendo i deflussi del V.ne Finantelli e Scarcella, in sponda sinistra, e il Fosso Zimma ed il V.ne Baglio, in sponda destra.

Il Fiume Torto ha un regime tipicamente torrentizio, caratterizzato da lunghi periodi di magra, con valore della portata praticamente uguale a zero. In 7 anni di osservazione della stazione idrometrica di località Bivio Cerda, si è registrato un numero massimo di 158 giorni consecutivi a portata nulla, mentre nel 50% degli anni si è raggiunto un numero di 118 giorni.

### 2.3 PERICOLOSITÀ IDRAULICA NELL'AREA DI INTERVENTO

La definizione delle aree di pericolosità idraulica è attualmente riportata nel Piano di Assetto Idrogeologico (P.A.I., 2004) e nel Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (P.G.R.A., 2015) della Regione Siciliana.

In particolare, sono individuate 3 classi di pericolosità idraulica (P3 - alta, P2 - moderata, P1 - bassa).

La classe di pericolosità **alta (P3)** fa riferimento ad un evento caratterizzato da una probabilità di accadimento  $Tr \leq 50$  anni e/o all'instaurarsi di condizioni di lama d'acqua massima raggiunta sul piano campagna superiore ad 1 metro.

La classe di pericolosità **moderata (P2)** fa riferimento ad un evento caratterizzato da una probabilità di accadimento  $Tr = 100 - 200$  anni e all'instaurarsi di condizioni di lama d'acqua massima raggiunta sul piano campagna compresa tra 30 cm ed 1m.

La classe di pericolosità **bassa (P1)** fa riferimento ad un evento di piena raro, caratterizzato da un tempo di ritorno  $Tr = 300 - 500$  anni e/o all'instaurarsi di condizioni di lama d'acqua inferiori a 0.30 m.

Come illustrato nelle figure seguenti e riportato negli elaborati RS3Z00D09P4ID0002001B e RS3Z00D09P4ID0002002B, il tracciato ferroviario in progetto si sviluppa prevalentemente all'esterno delle aree classificate a pericolosità idraulica del Fiume Torto, definite nell'ambito del P.A.I./P.G.R.A.; solamente nel tratto terminale del Fiume Torto le aree di pericolosità idraulica alta (P3) interessano la linea ferroviaria esistente, dove lo sviluppo plano-altimetrico del tracciato in progetto è vincolato dal doversi raccordare con i binari esistenti.

Le restanti criticità, dove le aree di pericolosità lambiscono solamente la linea ferroviaria esistente, vengono superate grazie all'innalzamento della livelletta di progetto, rispetto alla quota attuale del binario esistente; al contempo si è verificato che la presenza delle nuove opere non peggiori le condizioni attuali, come dimostra lo studio idraulico bidimensionale descritto nel seguito.



Figura 2-2: Aree a Pericolosità idraulica (fonte SITR Regione Sicilia, 2019)



Figura 2-3: Aree a Pericolosità idraulica (fonte SITR Regione Sicilia, 2019)

Pericolosità idraulica	
Classe di pericolosità	
	P1 – bassa
	P2 – moderata
	P3 - alta

Figura 2-4. Legenda delle aree a Pericolosità idraulica

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO          NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA          RADDOPPIO TRATTA FIUMETORTO – LERCARA DIRAMAZIONE</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>STUDIO IDRAULICO DEL FIUME TORTO</b>  <b>RELAZIONE IDRAULICA</b>	COMMESSA <b>RS3Z</b>	LOTTO <b>00 D 09</b>	CODIFICA <b>RI</b>	DOCUMENTO <b>ID0002 003</b>	REV. <b>B</b>	FOGLIO <b>11 di 38</b>

## 3 STUDIO IDRAULICO BIDIMENSIONALE

### 3.1 IMPOSTAZIONE GENERALE

Lo studio idraulico del Fiume Torto descritto in questa sede riguarda il suo tratto terminale, da poco a valle della confluenza del Torrente Trabiata (dopo la stretta morfologica di Montemaggiore) fino alla foce a mare in località Bonfornello.

Al fine di verificare l'effettiva estensione delle aree di esondazione che interessano la valle del F. Torto, è stato messo a punto un modello di calcolo idraulico bidimensionale, impiegando il noto codice HEC-RAS<sup>1</sup> versione 5.0.7 del marzo 2019, che consente di simulare la propagazione delle acque di piena sulla piana allagabile, determinando nel dominio di calcolo la superficie idrica e le relative grandezze idrodinamiche.

L'area di simulazione bidimensionale include l'alveo di magra e le aree golenali allagabili, come mostrato nel seguito.

### 3.2 DATI DI BASE

I dati cartografici e topografici a disposizione per l'implementazione del modello numerico bidimensionale sono:

- rilievo laseraltimetrico (LiDAR) ad alta risoluzione eseguito dalla Società Italferr SPA;
- rilievo laseraltimetrico (LiDAR), risoluzione 2x2 m, fornito dalla Regione Sicilia;
- rilievo laseraltimetrico (LiDAR), risoluzione 1x1 m, fornito dal Ministero dell'Ambiente;
- rilievo di sezioni (batimetriche) trasversali del F. Torto e delle relative opere di attraversamento esistenti;
- sezioni trasversali del F. Torto riportate nel P.A.I./P.G.R.A..

Il confronto tra le diverse informazioni, ed in particolare tra le sezioni trasversali dell'alveo rilevate durante apposite campagne topografiche ed i rilievi LiDAR, ha permesso, nell'implementazione del modello numerico sviluppato, di utilizzare i dati più aggiornati, che riproducessero maggiormente le attuali condizioni in alveo e nelle aree golenali, potenzialmente inondabili.

### 3.3 IDROGRAMMI DI PIENA DEL FIUME TORTO

La metodologia per la determinazione degli idrogrammi di piena, riportata nel Piano di Assetto Idrogeologico della Regione Sicilia, suggerisce di adottare uno ietogramma di tipo Chicago con durata di pioggia pari al tempo di corrivazione del bacino. I parametri di pioggia adottati sono quelli del VaPi, in quanto risultano più cautelativi di quelli dell'analisi statistica delle stazioni pluviometriche, come riportato e discusso nella Relazione idrologica RS3Z00D09RIID0001001B. La trasformazione afflussi-deflussi si basa sul metodo del Curve Number e per la convoluzione, nell'applicazione in esame, si è adottato un idrogramma unitario del tipo SCS.

Gli idrogrammi calcolati sono riportati nelle seguenti figure.

<sup>1</sup> HEC-RAS, Hydrologic Engineering Center – River Analysis System, U.S. Army Corps of Engineers

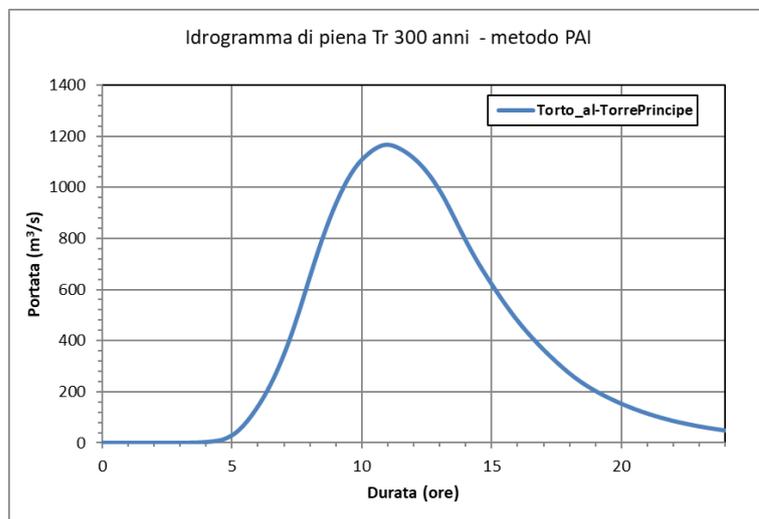


Figura 3-1: Idrogramma di piena Tr300 anni per il Fiume Torto a monte della confluenza con il Vallone Torre del Principe

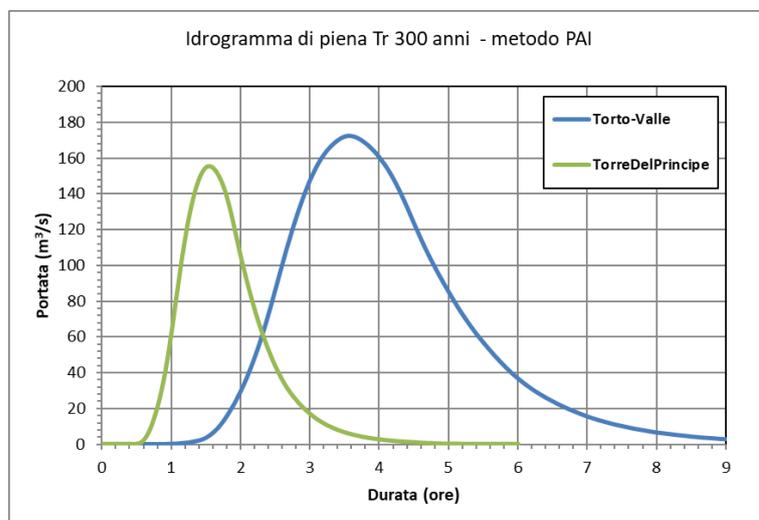


Figura 3-2: idrogrammi di piena Tr300 anni per i contributi del Fiume Torto a valle della confluenza con il Vallone Torre del Principe

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO          NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA          RADDOPPIO TRATTA FIUMETORTO – LERCARA DIRAMAZIONE</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>STUDIO IDRAULICO DEL FIUME TORTO</b>  <b>RELAZIONE IDRAULICA</b>	COMMESSA RS3Z	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 003	REV. B	FOGLIO 13 di 38

### 3.4 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO

#### 3.4.1 Modello numerico

Il codice di calcolo utilizzato per l'implementazione del modello bidimensionale del Fiume Torto è il software Hec-Ras 5.0.7. Le caratteristiche principali dell'algoritmo di modellazione del software HEC-RAS sono:

- Modellazione combinata 1D e 2D che prevede la possibilità di eseguire una simulazione combinata 1D e 2D all'interno dello stesso modello in regime di moto vario che permettendo di lavorare su schemi fluviali più complessi, utilizzando come sopra descritto la modellazione 1D per l'alveo, e la modellazione 2D aree inondabili esterne.
- Equazioni complete di Saint Venant o di diffusione dell'onda in 2D: Il programma risolve sia le equazioni 2D di diffusione dell'onda o quelle complete di Saint Venant. Questa opzione è selezionabile dall'utente, offrendo quindi una maggiore flessibilità. In generale, le equazioni di diffusione dell'onda in 2D consentono al software di funzionare più velocemente garantendo inoltre una maggiore stabilità. Le equazioni 2D in forma completa di Saint Venant sono applicabili a una gamma più ampia di problemi, ma la grande maggioranza delle situazioni può essere modellata con sufficiente precisione con le equazioni di diffusione dell'onda.
- Algoritmo di soluzione ai volumi finiti: Il risolutore delle equazioni di moto bidimensionale utilizza un algoritmo implicito ai volumi finiti. L'algoritmo di soluzione consente di utilizzare step temporali di calcolo maggiori rispetto ai metodi espliciti. L'approccio ai volumi finiti fornisce una misura dei miglioramenti in termini di stabilità e robustezza rispetto alle tradizionali tecniche differenziali di soluzione basate su metodi agli elementi finiti.
- Algoritmo per la soluzione accoppiata dei modelli 1D e 2D: Gli algoritmi di soluzione 1D e 2D sono strettamente accoppiati nello stesso passo temporale di calcolo permettendo una perfetta coerenza a ogni step tra i modelli 1D e 2D. Ad esempio, se un fiume è modellato in 1D, ma l'area dietro un argine è modellata in 2D, il deflusso al di sopra dell'argine o eventualmente attraverso una breccia nell'argine è valutato utilizzando come carico di monte il livello nel fiume 1D e come carico di valle il livello nell'area 2D. L'equazione dello 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-elaborato per sviluppare dei grafici dettagliati sulle proprietà idrauliche basate sul terreno sottostante che vengono utilizzati nella modellazione di HEC. Inoltre, ogni faccia delle celle viene valutata come una sezione trasversale dove vengono elaborate in tabelle che descrivono le proprietà idrauliche. Il flusso si muove in tutta la faccia (tra le celle) basandosi su questi dati. Questo permette agli utenti di utilizzare delle celle 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.
- 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

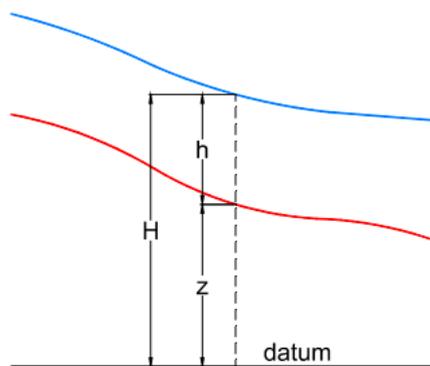


Figura 3-3 – Software Hec Ras 5.0.7: sistema di riferimento.

Il modello matematico bidimensionale utilizza le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto, che vengono risolte con uno schema ai volumi finiti. Si riporta di seguito il sistema di riferimento di HEC-RAS 2D, ove la quota del terreno è indicata con  $z(x,y)$ , l'altezza idrica con  $h(x,y,t)$  e l'altezza del pelo libero con  $H(x,y,t) = z(x,y) + h(x,y,t)$  (Figura 3-3).

**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  $x$  e  $y$ , 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:

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

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

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

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

in cui  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $|V|$  è il modulo del vettore velocità,  $C$  è il coefficiente di Chézy e  $R$  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 pre-processing viene ricavata la legge di variazione con la quota del pelo libero delle grandezze idrauliche caratteristiche, basandosi sui dati topografici ad alta risoluzione relativi alla cella stessa.

Vengono così determinate: curva di invaso della cella, area, contorno bagnato e raggio idraulico su ogni bordo della cella. Tale schema di risoluzione consente di sfruttare al massimo il dettaglio dei dati in ingresso.

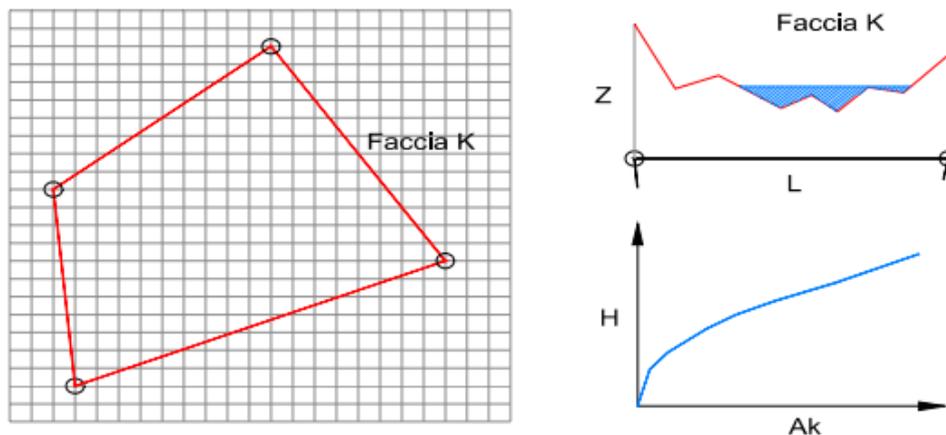


Figura 3-4 – Software Hec Ras 5.0.7: in grigio il dato della griglia DTM, in rosso la cella di calcolo del modello idraulico. A destra la schematizzazione effettuata da Ras sulle facce del bordo della cella.

### 3.4.2 Geometria di calcolo

Le caratteristiche geometriche della zona di interesse (in seguito definita dominio di calcolo) sono riportate all'interno del modello idraulico numerico tramite una discretizzazione del territorio attraverso elementi generalmente poligonali, nota come *mesh*. La mesh di calcolo possiede una risoluzione variabile spazialmente

tale per cui l'andamento plano altimetrico del territorio è riprodotto con un livello di accuratezza adeguato a rappresentare il corso d'acqua, alvei e golene, sia i canali secondari e le aree ripariali potenzialmente allagabili.

Nel caso in esame, il modello idraulico relativo al tratto terminale del Fiume Torto ha una estensione di circa 8 km.

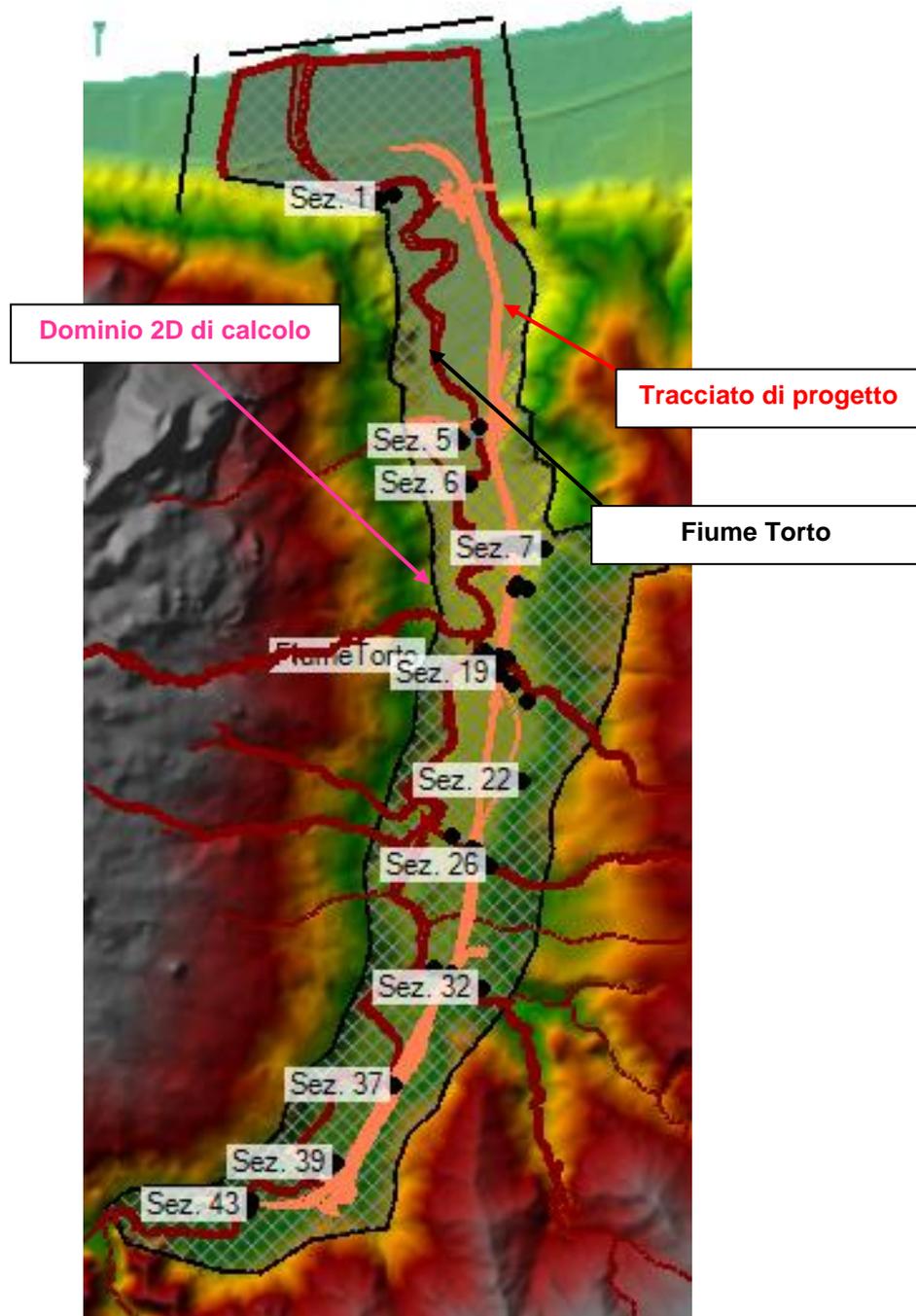


Figura 3-5 – dominio di calcolo del modello 2D del Fiume Torto

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA RADDOPPIO TRATTA FIUMETORTO – LERCARA DIRAMAZIONE</p> <p><b>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>					
	<p><b>STUDIO IDRAULICO DEL FIUME TORTO</b></p> <p><b>RELAZIONE IDRAULICA</b></p>	<p>COMMESSA</p> <p><b>RS3Z</b></p>	<p>LOTTO</p> <p><b>00 D 09</b></p>	<p>CODIFICA</p> <p><b>RI</b></p>	<p>DOCUMENTO</p> <p><b>ID0002 003</b></p>	<p>REV.</p> <p><b>B</b></p>

In particolare, il dominio di calcolo ha una superficie di circa 10 km<sup>2</sup>. La geometria del modello è stata implementata utilizzando i dati topografici disponibili per l'area di studio, precedentemente descritti. La rete di calcolo bidimensionale interessa sia l'alveo inciso sia le aree golenali di espansione esterne ed è stata definita utilizzando le opzioni di discretizzazione automatica del dominio di calcolo presenti in Hec Ras, definendo opportune aree di infittimento della maglia in corrispondenza di elementi morfologicamente ed idraulicamente significativi, quali strade, corsi d'acqua, rilevati, etc. La creazione della mesh è stata sviluppata in modo tale che le dimensioni massime degli elementi non fossero superiori a valori di 100 m<sup>2</sup>. Gli infittimenti della mesh (alveo e opere esistenti in alveo) sono stati sviluppati imponendo una dimensione degli elementi pari a 5x5 m.

Le opere di attraversamento esistenti sul Fiume Torto sono state invece implementate tramite appositi elementi disponibili nel software di calcolo (HecRas). Nello specifico, la riproduzione di un ponte è ottenuta mediante l'utilizzo di una "2D flow areas connection" (tramite cui viene estratta dal DTM di base la sezione d'alveo) lungo la quale viene definito il "weir/embankment" e le aperture/luci dell'attraversamento (*culverts*).

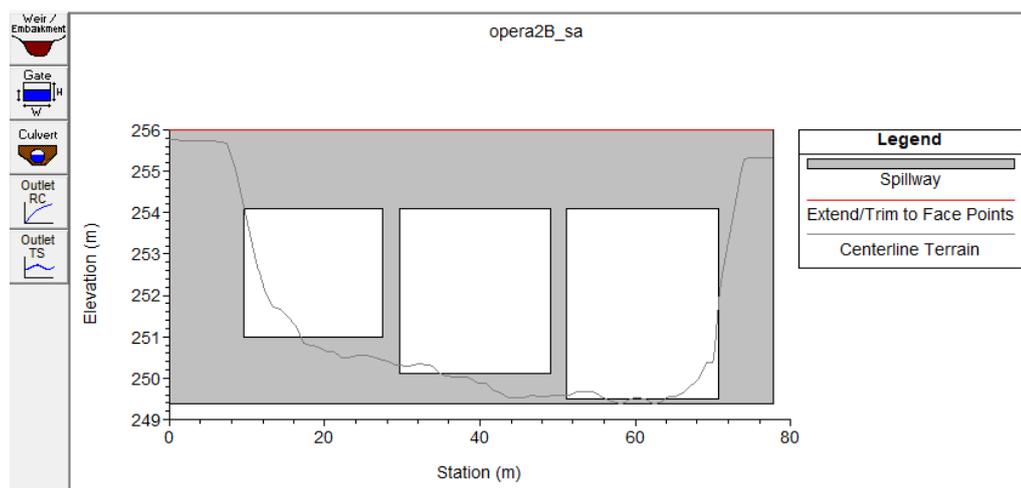


Figura 3-6 – Modello 2D: implementazione delle opere di attraversamento in Hec Ras.

### 3.4.3 Scabrezze

Per quanto concerne il coefficiente di scabrezza (Manning,  $n$ ), in analogia alle simulazioni condotte nell'ambito del P.A.I./P.G.R.A., sono stati adottati i seguenti valori:

- per l'alveo inciso,  $n = 0,040 \text{ s/m}^{1/3}$ ;
- per le aree golenali e/o esterne, potenzialmente inondabili,  $n = 0,060 \text{ s/m}^{1/3}$ .

### 3.4.4 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno assegnate sono schematicamente rappresentate nella figura seguente. Nello specifico, gli idrogrammi di riferimento imposti come condizione al contorno di monte sono quelli riportati nel precedente paragrafo 3.3. Come condizione di valle, che corrisponde alla foce a mare, è stata imposta l'altezza idrica corrispondente al sovrizzo di tempesta pari a 1,5 m slm per tutta la durata della simulazione.

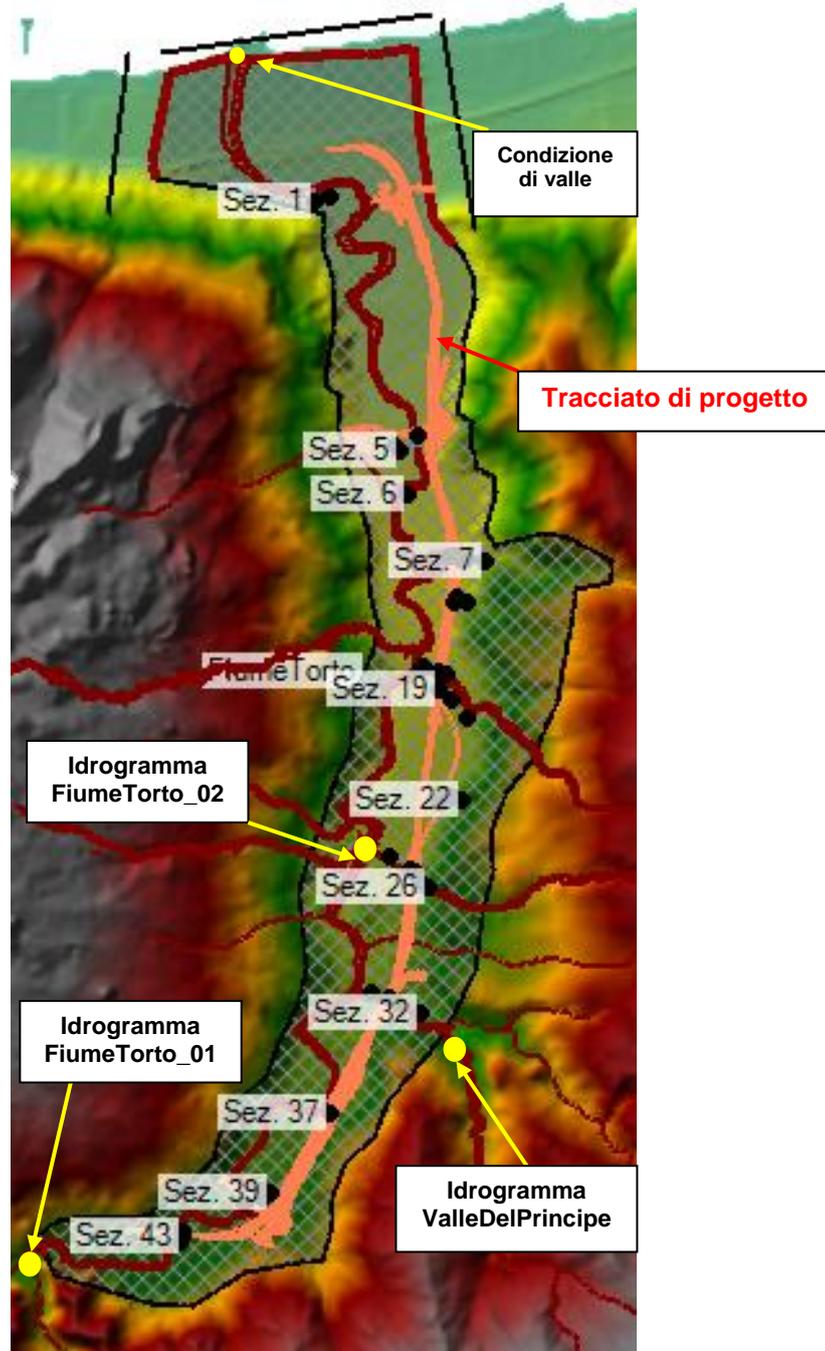


Figura 3-7 – Modello 2D: condizioni al contorno

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA RADDOPPIO TRATTA FIUMETORTO – LERCARA DIRAMAZIONE PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO IDRAULICO DEL FIUME TORTO RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3Z	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 003	REV. B

### 3.5 SCENARI SIMULATI

#### 3.5.1 Stato di fatto

Lo stato di fatto è rappresentato dalla geometria di calcolo nelle condizioni attuali, così come rappresentate dal modello digitale del terreno utilizzato e inserendo le opere esistenti in alveo che possono ostacolare il deflusso.

Gli idrogrammi di piena simulati sono quelli corrispondenti ad un evento con tempo di ritorno  $T = 300$  anni, in quanto tale tempo di ritorno è quello corrispondente alla piena di progetto per le opere ferroviarie.

#### 3.5.2 Stato di progetto

Lo stato di progetto considera la presenza degli interventi sul territorio, che sono rappresentati nel modello di calcolo modificando la geometria mediante:

- la *modifica della superficie del terreno*, per tenere conto di:
  - o demolizione della sede ferroviaria storica che sarà dismessa
  - o costruzione della nuova sede ferroviaria in rilevato
  - o presenza di piazzali di stazione e di emergenza
  - o presenza delle nuove viabilità di collegamento agli impianti ferroviari in progetto
- l'*inserimento* delle nuove opere di attraversamento

Tutte le altre condizioni di calcolo restano invariate rispetto allo stato di fatto. La seguente figura mostra il confronto tra la geometria dello stato di fatto (a sinistra) e quella dello stato di progetto (a destra), in cui si possono notare le demolizioni ed i nuovi rilevati

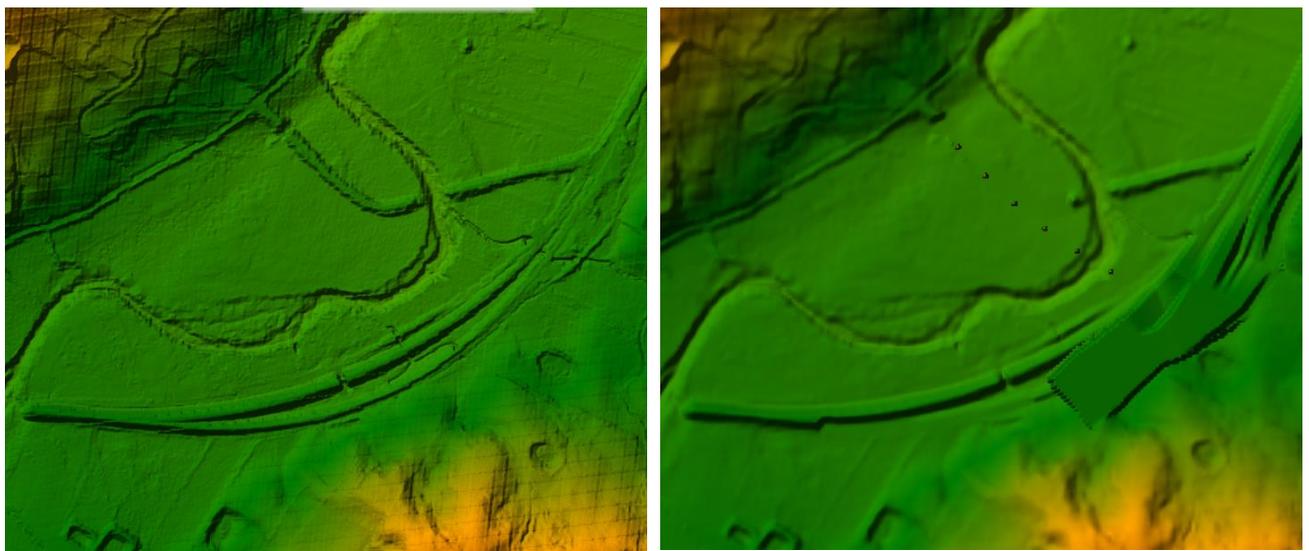


Figura 3-8: confronto tra la geometria dello stato di fatto (a sinistra) e quella dello stato di progetto (a destra)

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>RADDOPPIO TRATTA FIUMETORTO – LERCARA DIRAMAZIONE</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	<b>STUDIO IDRAULICO DEL FIUME TORTO</b>  <b>RELAZIONE IDRAULICA</b>	COMMESSA <b>RS3Z</b>	LOTTO <b>00 D 09</b>	CODIFICA <b>RI</b>	DOCUMENTO <b>ID0002 003</b>	REV. <b>B</b>

## 3.6 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

### 3.6.1 Stato di fatto

I risultati delle simulazioni per lo stato di fatto mostrano l'estensione delle aree allagate per gli eventi di piena simulati e sono riportati negli elaborati RS3Z00D09P6ID0002013A, RS3Z00D09P6ID0002014A, RS3Z00D09P6ID0002015A, RS3Z00D09P6ID0002016A, RS3Z00D09P6ID0002017A e RS3Z00D09P6ID0002018A, con l'indicazione delle classi di altezze d'acqua (tiranti) calcolate.

Le seguenti figure mostrano uno stralcio dei risultati forniti dal codice di calcolo e degli elaborati suindicati, da cui è possibile notare che quasi tutta la valle del Fiume Torto è interessata da diffusi allagamenti, che interessano le infrastrutture presenti appunto nel fondovalle e la stessa linea ferroviaria esistente, con altezze d'acqua sul piano campagna mediamente pari a 2 m.

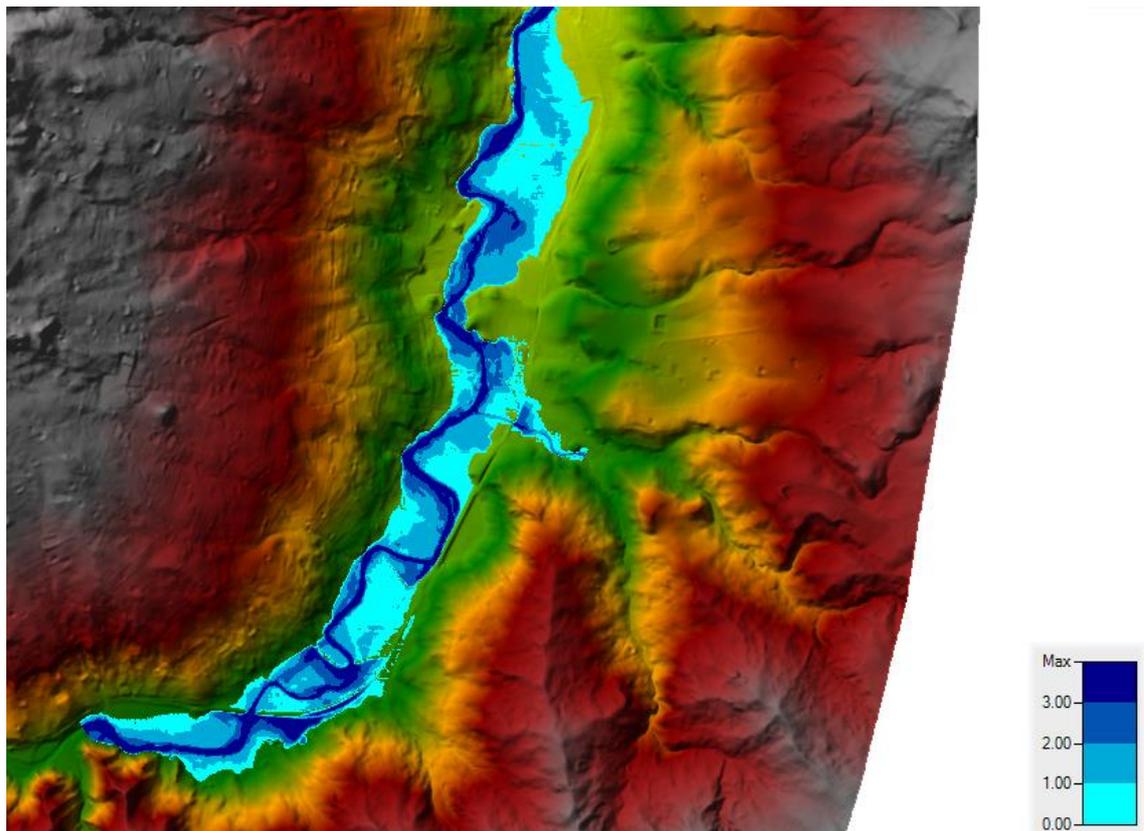


Figura 3-9: Risultato della simulazione per Tr300 anni – stato di fatto, altezze d'acqua (tratto di monte)

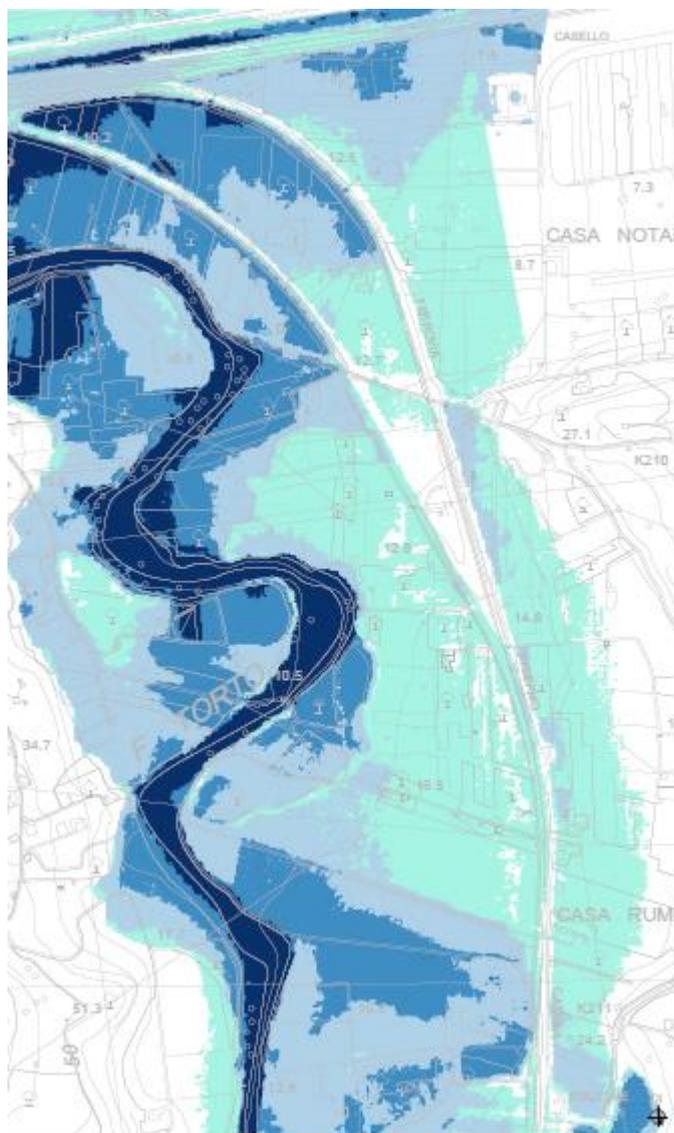


Figura 3-10: Risultato della simulazione per Tr300 anni – stato di fatto, altezze d’acqua (tratto di valle)

### 3.6.2 Stato di progetto

I risultati delle simulazioni per lo stato di progetto mostrano l’estensione delle aree allagate per gli eventi di piena simulati e sono riportati negli elaborati RS3Z00D09P6ID0002013A, RS3Z00D09P6ID0002014A, RS3Z00D09P6ID0002015A, RS3Z00D09P6ID0002016A, RS3Z00D09P6ID0002017A e RS3Z00D09P6ID0002018A, con l’indicazione delle classi di altezze d’acqua (tiranti) calcolate.

Le seguenti figure mostrano uno stralcio dei risultati forniti dal codice di calcolo e degli elaborati suindicati, da cui è possibile notare che la valle del Fiume Torto continua ad essere interessata da diffusi allagamenti, sempre con altezze d’acqua sul piano campagna mediamente pari a 2 m. Le opere in progetto risultano pienamente compatibili con tali livelli idrici, infatti non si ha mai il rischio di sormonto della linea, che, in alcuni casi, fa da sbarramento laterale all’esonazione, riducendo di conseguenza l’estensione delle aree allagate ai margini della valle, senza aumento significativo dei livelli idrici rispetto allo stato di fatto, in ragione sia della modesta riduzione

del volume di espansione dell'allagamento, sia della possibilità per le acque di esondazione di continuare a propagarsi verso valle.

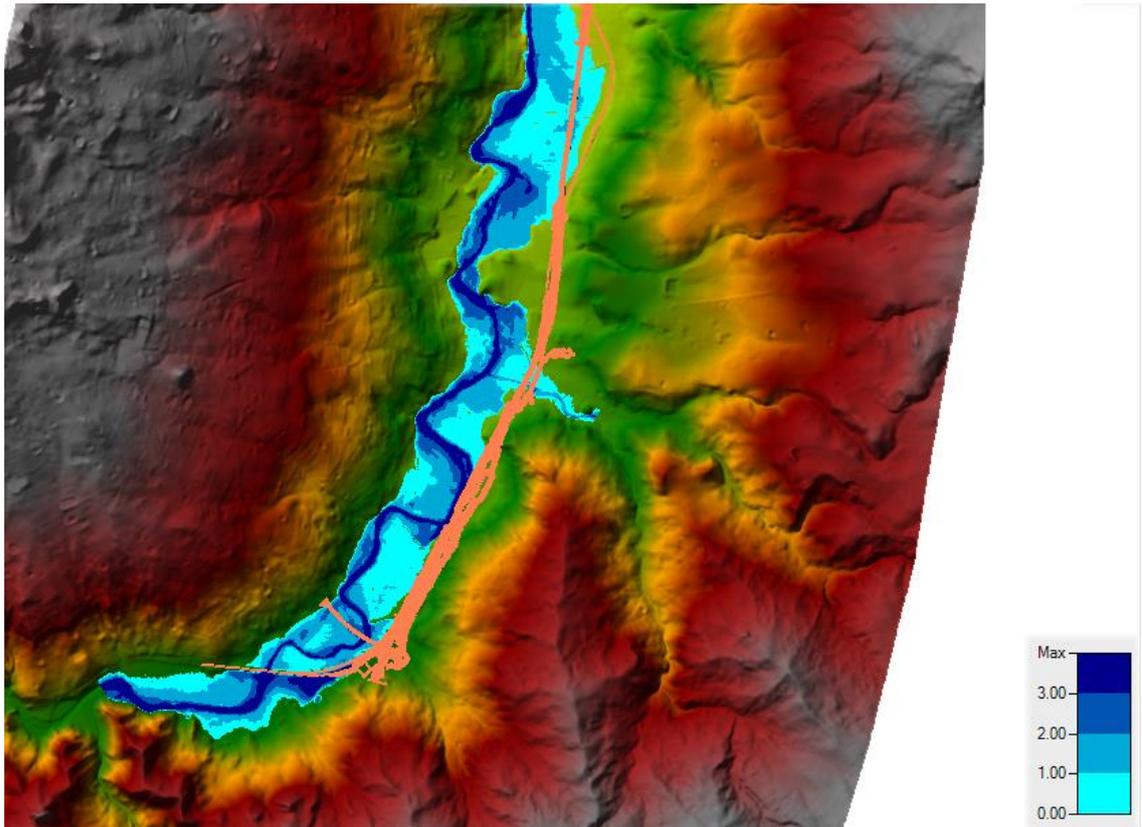


Figura 3-11: Risultato della simulazione per Tr300 anni – stato di progetto, altezze d'acqua (tratto di monte)



 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>RADDOPPIO TRATTA FIUMETORTO – LERCARA DIRAMAZIONE</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	<b>STUDIO IDRAULICO DEL FIUME TORTO</b>  <b>RELAZIONE IDRAULICA</b>	COMMESSA RS3Z	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 003	REV. B

## 4 ANALISI DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA

### 4.1 CRITERI DI VERIFICA

#### 4.1.1 Manuale di Progettazione ferroviario e Norme Tecniche per le Costruzioni

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

- franco idraulico tra intradosso manufatto e livello della superficie libera non inferiore a 1.5 m nella sezione immediatamente a monte dell'attraversamento;
- franco minimo tra intradosso manufatto e quota di carico idraulico totale almeno pari a 50 cm.

Le opere devono, inoltre, rispondere a quanto previsto dall'«Aggiornamento delle “Norme Tecniche per le Costruzioni”» (DM 17 gennaio 2018 – di seguito NTC 2018) che riportano le indicazioni per la redazione della compatibilità idraulica dei ponti stradali e ferroviari. I criteri richiesti sono i seguenti:

- “piena di progetto caratterizzata da un tempo di ritorno  $T_r$  almeno pari a 200 anni”;
- “Il manufatto non dovrà interessare con spalle, pile e rilevati la sezione del corso d'acqua interessata dalla piena di progetto e, se arginata, i corpi arginali. Qualora fosse necessario realizzare pile in alveo, la luce netta minima tra pile contigue, o fra pila e spalla del ponte, non deve essere inferiore a 40 m misurati ortogonalmente al filone principale della corrente.”;
- “Il franco idraulico, definito come la distanza fra la quota liquida di progetto immediatamente a monte del ponte e l'intradosso delle strutture, è da assumersi non inferiore a 1.50 m, e comunque dovrà essere scelto tenendo conto di considerazioni e previsioni sul trasporto solido di fondo e sul trasporto di materiale galleggiante, garantendo una adeguata distanza fra l'intradosso delle strutture ed il fondo alveo.”.

In Tabella 2 è riportata una sintesi dei criteri di verifica richiesti dalla normativa di riferimento.

Tabella 4-1 – Sintesi normativa di riferimento

	Manuale di progettazione ferroviaria	NTC 2018 e circolare applicativa NTC2018
<b>Definizione della portata di progetto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• linea ferroviaria <math>T_r = 300</math> anni per <math>S &gt; 10 \text{ km}^2</math></li> <li>• linea ferroviaria <math>T_r = 200</math> anni per <math>S &lt; 10 \text{ km}^2</math></li> <li>• deviazioni stradali <math>T_r = 200</math> anni</li> </ul>	$T_r = 200$ anni
<b>Verifica Franco di Progetto ponti</b>	<p>Franco minimo tra l'intradosso dell'opera e la quota del carico idraulico totale corrispondente al livello idrico di massima piena, pari a 0.50 m e comunque non inferiore ad 1.5 m sul livello idrico.</p>	<p>Il franco idraulico, definito come la distanza fra la quota liquida di progetto immediatamente a monte del ponte e l'intradosso delle strutture, è da assumersi non inferiore a 1.50 m</p>

	Manuale di progettazione ferroviaria	NTC 2018 e circolare applicativa NTC2018
<b>Dislivello tra fondo e sottotrave</b>	-	<i>Non inferiore a 6÷7 m quando si possa temere il transito d'alberi d'alto fusto</i>
<b>Posizione pile e spalle</b>	<i>Posizionamento delle spalle del viadotto in modo tale da non ridurre significativamente la sezione di deflusso in alveo ed in golena.</i>	<i>Di norma il manufatto non dovrà interessare con spalle, pile e rilevati il corso d'acqua attivo e, se arginato, i corpi arginali.</i>  <i>Luce netta minima pari a 40 m in retto</i>

#### 4.1.2 Norme di Attuazione del Piano di Assetto Idrogeologico

Le aree di pericolosità idraulica individuate dal PAI della Regione Siciliana sono disciplinate dalle relative Norme di Attuazione, riportate nella Relazione generale del PAI. Per l'ambito territoriale di interesse del presente progetto, le aree di pericolosità idraulica sono riportate nelle Tavole RS3Z00D09P4ID0002001B e RS3Z00D09P4ID0002002B da cui si evince che, come discusso nel precedente paragrafo 2.3, il tracciato ferroviario in progetto si sviluppa prevalentemente all'esterno delle aree classificate a pericolosità idraulica del Fiume Torto, definite nell'ambito del P.A.I./P.G.R.A.; solamente nel tratto terminale del Fiume Torto le aree di pericolosità idraulica alta (P3) interessano la linea ferroviaria esistente, dove lo sviluppo plano-altimetrico del tracciato in progetto è vincolato dal doversi raccordare con i binari esistenti.

L'art. 11 delle Norme di Attuazione del PAI disciplina le opere e le attività di trasformazione dello stato dei luoghi, indicando tra gli interventi consentiti (comma 4, lett. d) la "realizzazione di nuovi interventi infrastrutturali e nuove opere pubbliche a condizione che sia incontrovertibilmente dimostrata l'assenza di alternative di localizzazione e che sia compatibile con la pericolosità dell'area" e (comma 4, lett. h) "la realizzazione di nuove infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico, nonché l'ampliamento o la ristrutturazione delle esistenti, purché compatibili con il livello di pericolosità esistente".

La compatibilità idraulica richiesta dalle Norme di Attuazione del PAI è discussa nel successivo paragrafo 4.4.

## 4.2 VERIFICA DEI FRANCHI DI PROGETTO

I viadotti in progetto (stradali e ferroviari) soddisfano i requisiti indicati nel precedente paragrafo, come riportato nella seguente Tabella.

Tabella 4-2: Verifica di compatibilità idraulica

WBS	Livello idrico TR300 [m slm]	CARICO TOTALE TR300 [m slm]	QUOTA FONDO [m slm]	QUOTA INTRADOSSO [m slm]	FRANCO [m]	FRANCO SUL CARICO TOTALE [m]	ALTEZZA LIBERA DA FONDO ALVEO [m]
IV02	23,6	24,12	15,80	30,08	6,48	5,96	14,28
VI02	48,7	49,02	48,3	54,9	6,2	5,88	6,60
VI01	61,55	62,88	58,57	66,7	5,15	3,82	8,13
NW01	61,76	62,08	58,01	64,4	2,64	2,32	6,39
NW02	72,6(*)	72,94(*)	67,45	74,3	1,7	1,36	6,85

(\*) valore riferito al Tr200 in quanto opera stradale

## 4.3 LUCI DELLE CAMPATE DEI VIADOTTI IN PROGETTO

I viadotti in progetto, sia ferroviari che stradali, rispettano la condizione di avere la luce netta delle campate, situate all'interno dell'area interessata dalla piena di progetto<sup>2</sup>, pari ad almeno 40 m misurati ortogonalmente al filone principale della corrente. Tale scansione è stata definita a partire dai risultati del modello idraulico per lo stato di fatto ed è stata verificata nello stato di progetto, in modo che la presenza delle pile all'interno dell'area di esondazione non determini peggioramento della situazione attuale.

Il viadotto denominato VI01 non è un viadotto di scavalco del Fiume Torto, ma attraversa l'area di esondazione relativa alla piena di progetto, sviluppandosi quasi parallelamente al filone principale della corrente, rendendo quindi impossibile il rispetto della condizione richiesta dalla normativa in merito alla luce netta minima pari a 40 m. Tuttavia, è stato verificato, nello stato di progetto del modello di calcolo idraulico, che la scansione delle campate di questo viadotto non determina peggioramento della situazione attuale sui livelli idrici e sull'estensione delle aree d'esondazione.

<sup>2</sup> La circolare applicativa delle NTC 2018 chiarisce che per "alveo" si intende la sezione occupata dal deflusso della portata di piena di progetto

#### 4.4 COMPATIBILITÀ CON L'ASSETTO IDRAULICO DEL TERRITORIO

La compatibilità dell'intervento in progetto con l'assetto idraulico del territorio può essere valutata confrontando le mappe di allagamento dello stato di progetto con quelle dello stato di fatto. Come mostrato nel paragrafo 3.6, la valle del Fiume Torto è interessata da diffusi allagamenti, sempre con altezze d'acqua sul piano campagna mediamente pari a 2 m<sup>3</sup>.

Le possibili criticità, dove le aree di pericolosità lambiscono solamente la linea ferroviaria esistente, vengono superate grazie all'innalzamento della livelletta di progetto, rispetto alla quota attuale del binario esistente; al contempo si è verificato che la presenza delle nuove opere non peggiori le condizioni attuali, come dimostra lo studio idraulico bidimensionale precedentemente descritto.

Le opere in progetto risultano pienamente compatibili con i livelli idrici suddetti, infatti non si ha mai il rischio di sormonto della linea, che, in alcuni casi, fa da sbarramento laterale all'esondazione, riducendo di conseguenza l'estensione delle aree allagate ai margini della valle, senza aumento significativo dei livelli idrici rispetto allo stato di fatto, in ragione delle seguenti motivazioni:

- modesta riduzione del volume di espansione dell'allagamento,
- possibilità per le acque di esondazione di continuare a propagarsi verso valle.

Per meglio valutare gli effetti dell'assetto idraulico nello stato di progetto, rispetto allo stato di fatto, si possono prendere a riferimento alcune sezioni fluviali significative su cui confrontare i livelli idrici nei due scenari. Due sezioni importanti da considerare sono quelle in corrispondenza del ponte ferroviario esistente sul Fiume Torto poco prima dell'inizio dell'intervento in progetto, ubicate come riportato nello stralcio planimetrico della seguente Figura 4-1. La Figura 4-2 e la Figura 4-3 mostrano il relativo livello idrico per l'evento con Tr300 anni che, come si può facilmente notare, non differisce tra i due scenari in modo apprezzabile.



Figura 4-1: ubicazione planimetrica delle sezioni di interesse in corrispondenza del ponte ferroviario esistente

<sup>3</sup> Tale valore risulta in linea con quelli assunti per la perimetrazione delle aree di pericolosità idraulica P3 del PAI Sicilia (Tabella 7.3 della metodologia completa, Relazione generale del PAI)

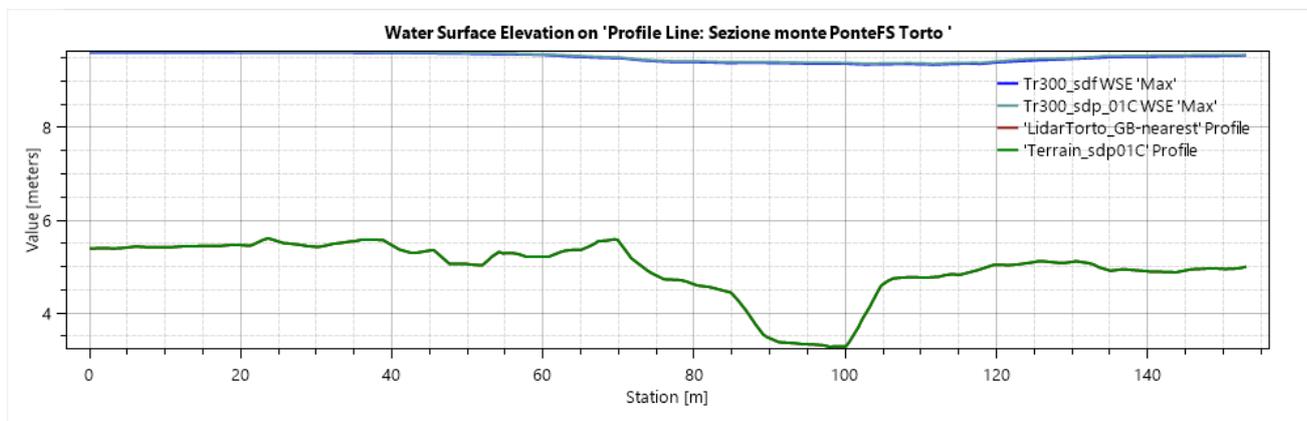


Figura 4-2: confronto tra i livelli idrici ante e post operam per l'evento con Tr 300 anni in corrispondenza della sezione immediatamente a monte del ponte della ferrovia esistente sul Fiume Torto

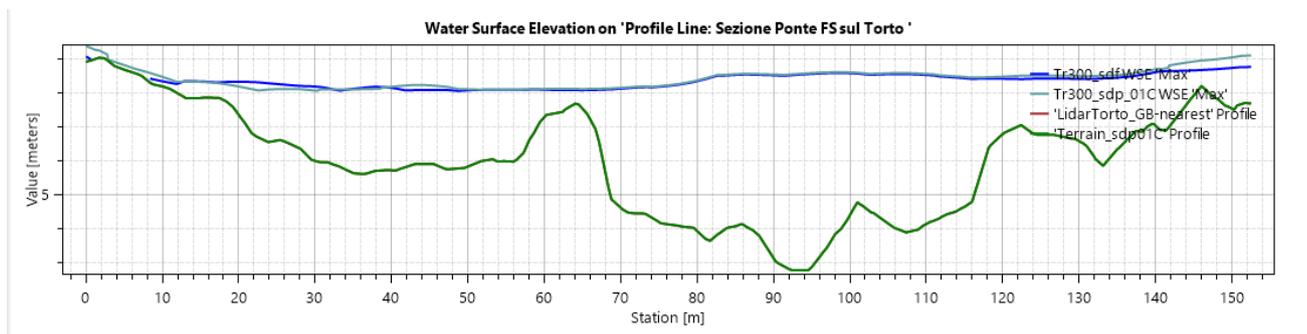


Figura 4-3: confronto tra i livelli idrici ante e post operam per l'evento con Tr 300 anni in corrispondenza della sezione immediatamente a valle del ponte della ferrovia esistente sul Fiume Torto

In conclusione, si ritiene di poter affermare che l'intervento in progetto risulta compatibile con l'assetto idraulico del territorio attraversato, in quanto rientra tra quelli consentiti dalle Norme di Attuazione del PAI e non determina peggioramento delle attuali condizioni di pericolosità idraulica.

## 5 CALCOLO DELLE EROSIONI LOCALIZZATE

### 5.1 METODOLOGIA DI ANALISI

#### 5.1.1 Scelta della formula di calcolo

Per la valutazione dello scalzamento prodotto dalla corrente in prossimità delle pile dei ponti, al fine di definire la quota d'imposta delle fondazioni, non esiste una teoria univoca che consenta di interpretare il fenomeno nella sua complessità. Nel presente studio è stata utilizzata l'equazione S/M di Sheppard-Melville trattata nel successivo paragrafo 5.1.3.

Si riporta in seguito un abaco in cui vengono messi a confronto, per un fissato valore del numero di Froude, diversi metodi per il calcolo dello scavo localizzato cui sono interessate le pile in alveo. In ascissa è indicato il rapporto tra tirante e larghezza della pila mentre sull'asse delle ordinate è rappresentato il rapporto tra la profondità di scavo e la larghezza della pila.

Per questo studio la teoria di Bruesers è stata scartata dal momento che, come si evince dal grafico sotto riportato, fornisce valori di scavo poco variabili rispetto a diverse condizioni in input. Inoltre, studi sperimentali confermano la maggiore attendibilità dei risultati che si ottengono applicando la teoria di Melville rispetto alle altre.

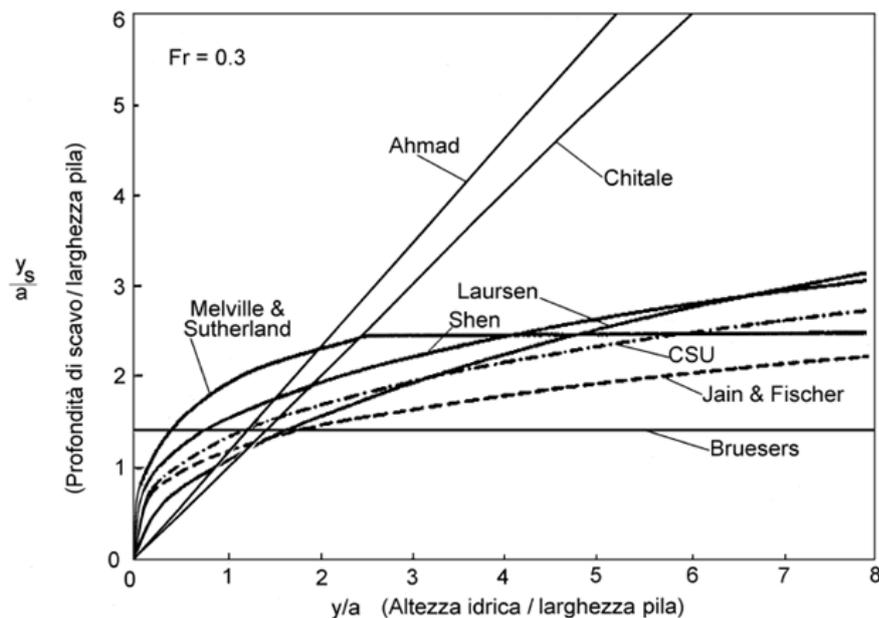


Figura 5-1 – Abaco di confronto.

#### 5.1.2 Metodologia di applicazione della formula scelta

In generale, è possibile riscontrare quattro differenti scenari di erosione localizzata:

- 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:

$$b_e = b \cdot \frac{h_0 + Y}{h_0 + b^*} + b^* \frac{b^* - Y}{h_0 + b^*}$$

in cui  $h_0$  è la profondità media della corrente rispetto al fondo alveo;  $Y$ , l'altezza massima della buca erosiva;  $b^*$ , la larghezza della fondazione.

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

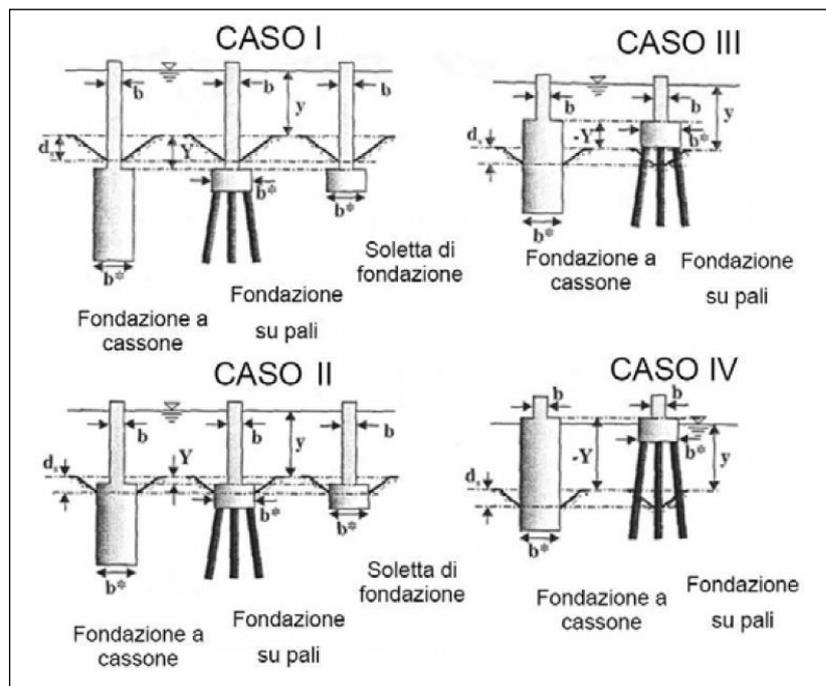


Figura 5-2 – Differenti tipologie di pile e delle corrispondenti fondazioni.

### 5.1.3 Equazione S/M di Sheppard-Melville

L'equazione di Sheppard-Melville è il risultato di diversi studi effettuati da vari ricercatori.

Nel seguente gruppo di equazioni sono riportate le relazioni per il calcolo dello scavo  $y_s$ :

$$\frac{y_s}{a^*} = 2.5f_1f_2f_3 \quad \text{per } 0.4 < \frac{V_1}{V_c} < 1.0$$

$$\frac{y_s}{a^*} = f_1 \left[ 2.2 \left( \frac{\frac{V_1}{V_c} - 1}{\frac{V_{1p}}{V_c} - 1} \right) + 2.5f_3 \left( \frac{\frac{V_{1p}}{V_c} - \frac{V_1}{V_c}}{\frac{V_{1p}}{V_c} - 1} \right) \right] \quad \text{per } 1 < \frac{V_1}{V_c} < \frac{V_{1p}}{V_c}$$

$$\frac{y_s}{a^*} = 2.2f_1 \quad \text{per } \frac{V_1}{V_c} > \frac{V_{1p}}{V_c}$$

Le grandezze coinvolte direttamente e indirettamente sono:

$$f_1 = \tanh \left[ \left( \frac{y_1}{a^*} \right)^{0.4} \right]$$

$$f_2 = \left\{ 1 - 1.2 \left[ \ln \left( \frac{V_1}{V_c} \right) \right]^2 \right\}$$

$$f_3 = \left[ \frac{\left( \frac{a^*}{d_{50}} \right)}{0.4 \left( \frac{a^*}{d_{50}} \right)^{1.2} + 10.6 \left( \frac{a^*}{d_{50}} \right)^{-0.13}} \right]$$

$$V_{1p} = \max (V_{1p1}; V_{1p2})$$

$$V_{1p1} = 5V_c$$

$$V_{1p2} = 0.6\sqrt{gy_1}$$

$$a^* = K_s a_p$$

$$a_p = a \cdot \cos\theta + L \cdot \sin\theta$$

$$K_s = \begin{cases} 1 & (\text{pila circolare}) \\ 0.86 + 0.97 \left( \left| \frac{\pi\theta}{180} - \frac{\pi}{4} \right| \right)^4 & (\text{pila rettangolare}) \end{cases}$$

in cui:

- a è la larghezza della pila
- L è la lunghezza della pila
- $\theta$  è l'angolo di attacco della corrente espresso in gradi.

$$V_c = \begin{cases} 2.5 \cdot u^* \ln \left( \frac{73.5y_1}{d_{50} \left[ Re(2.85 - 0.58 \ln(Re) + 0.002Re) + \frac{111}{Re} - 6 \right]} \right) & \text{per } 5 \leq Re \leq 70 \\ 2.5 \cdot u^* \ln \left( \frac{2.21y_1}{d_{50}} \right) & \text{per } Re > 70 \end{cases}$$

$$Re = \frac{u^* d_{50}}{2.32 \cdot 10^{-7}}$$

$$u^* = \left[ 16.2 \cdot d_{50} \left( \frac{9.09 \cdot 10^{-6}}{d_{50}} - d_{50} (38.76 + 9.6 \ln(d_{50})) - 0.005 \right) \right]^{0.5}$$

Si precisa, inoltre, che  $y_1$  è il tirante della corrente in arrivo,  $V_1$  è la velocità della corrente,  $V_c$  è la velocità critica e  $d_{50}$  è il diametro medio dei sedimenti.

Questa formulazione è stata ottenuta sia da risultati in laboratorio che da risultati sul campo e, confrontata con altri metodi, è quella raccomandata per situazioni di progetto in quanto fornisce risultati più precisi.

## 5.2 SCALZAMENTI CALCOLATI

Gli scalzamenti sono stati calcolati in corrispondenza delle pile interessate dalle acque di esondazione per la portata di progetto. In via cautelativa si è calcolato preliminarmente il valore dello scalzamento per le pile più sollecitate, ovvero nelle seguenti condizioni:

- Angolo di attacco più sfavorevole in base al campo di moto risultante dal modello di calcolo bidimensionale
- Valore maggiore della velocità della corrente idrica

I risultati sono riportati nella seguente tabella, in cui la larghezza e la lunghezza della pila sono misurate nel verso con cui la corrente idrica investe la pila stessa

Tabella 5-1: scalzamenti per le pile più sollecitate

WBS	Tirante sulla pila [m]	Velocità della corrente [m/s]	Angolo di attacco [°]	Larghezza pila [m]	Lunghezza pila [m]	Larghezza plinto [m]	Lunghezza plinto [m]	Scalzamento [m]
IV02	4,27	3,2	15	3	circolare	12	12	5,84
VI02	1,30	2,5	0	11,5	3,2	16,5	11,5	9,97
VI01	0,95	5,1	45	3,2	8,5	13,4	13,4	7,72
NW01	0,9	2,5	45	3	circolare	12	12	7,15
NW02	2,05(*)	2,7(*)	23	3	circolare	12	12	8,37

(\*) valore riferito al Tr200

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA RADDOPPIO TRATTA FIUMETORTO – LERCARA DIRAMAZIONE					
	PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO IDRAULICO DEL FIUME TORTO RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3Z	LOTTO 00 D 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 003	REV. B	FOGLIO 33 di 38

## 6 SISTEMAZIONI IDRAULICHE

### 6.1 PROTEZIONI DELLE FONDAZIONI DEI VIADOTTI

#### 6.1.1 Tipologia di intervento

Le protezioni delle fondazioni dei viadotti dagli effetti delle possibili erosioni localizzate intorno alle pile vengono realizzate con materiali naturali e con modalità che le rendano quanto più adattabili alla morfologia del terreno di posa. Sono state scelte per questi scopi sistemazioni con massi naturali di idonea pezzatura, in grado appunto di contrastare i fenomeni erosivi causati dalla corrente idrica.

Gli elaborati RS3Z00D09PZID0002019A, RS3Z00D09PZID0002020A, RS3Z00D09PZID0002023A, RS3Z00D09PZID0002024A e RS3Z00D09PZID0002025A mostrano le soluzioni adottate.

#### 6.1.2 Metodologia di riferimento

Per il dimensionamento delle opere di protezione idraulica attorno alle pile si può impiegare la recente formulazione proposta nel Rapporto HEC-18 “Evaluating Scour at bridge - Fifth Edition” del FHWA (2009), che consente di tenere conto (tramite opportuni coefficienti correttivi) anche di eventuali vortici che possono generarsi, localmente, attorno agli “ostacoli” (rappresentati dalle pile stesse) presenti in alveo:

$$d_{50} = \frac{0.692 \cdot (V_{des})^2}{(S_g - 1)2g}$$

in cui

- $d_{50}$  = diametro medio dei massi (m);
- $V_{des}$  = velocità di progetto locale intorno alla pila (m/s);
- $S_g$  = peso specifico dei massi ( $t/m^3$ ).

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

$$V_{des} = K_1 K_2 V_{avg}$$

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

$$V_{des} = K_1 V_{max}$$

in cui

- $V_{des}$  = velocità di progetto locale intorno alla pila (m/s);
- $K_1$  = fattore di forma pari a 1,5 per pile circolari “round-nose” o 1,7 per pile a spigoli vivi;

- $K_2$  = fattore di correzione della velocità per l'ubicazione nell'alveo (varia da 0,9 per pile vicino alle sponde in alveo rettilineo, fino a 1,7 per pile immerse nel filone principale della corrente);
- $V_{avg}$  = velocità media nell'alveo in corrispondenza del ponte (m/s);
- $V_{max}$  = velocità massima nell'alveo attivo (m/s).

### 6.1.3 Dimensionamento delle protezioni in massi

L'applicazione della formula proposta dal FHWA (2009) ha fornito i risultati riportati nella seguente tabella. Quando la dimensione minima richiesta è risultata maggiore o uguale a 1 m, si è optato per la sistemazione in massi di diametro 1 m legati con fune di acciaio. Negli altri casi si è comunque fissato un diametro minimo pari a 0,8 m, che favorisca la corretta messa in opera della protezione in massi.

Tabella 6-1: dimensioni minime delle protezioni in massi

WBS	Velocità della corrente [m/s]	$d_{50}$ minimo [m]
IV02	4,5	1
VI02	2,35	0,3
VI01	4	0,8
NW01	2,35	0,3
NW02	2,7(*)	0,35

(\*) valore riferito al Tr200

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO          NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA          RADDOPPIO TRATTA FIUMETORTO – LERCARA DIRAMAZIONE</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>STUDIO IDRAULICO DEL FIUME TORTO</b>  <b>RELAZIONE IDRAULICA</b>	COMMESSA <b>RS3Z</b>	LOTTO <b>00 D 09</b>	CODIFICA <b>RI</b>	DOCUMENTO <b>ID0002 003</b>	REV. <b>B</b>	FOGLIO <b>35 di 38</b>

## 6.2 PROTEZIONE DELLA SCARPATA FERROVIARIA

I risultati del modello idraulico bidimensionale mostrano che nello scenario dello stato di progetto il nuovo rilevato ferroviario è esposto alle acque di esondazione, come riportato nella seguente tabella, per cui si prevede di proteggere la scarpata ferroviaria dall'erosione, mediante rivestimenti in materassi tipo Reno® estesi fino a 1 m sopra il livello idrico della piena con Tr 300 anni, secondo la tipologia illustrata nella Tavola RS3Z00D09PAID0002001A. Anche tutti i piazzali esposti alle acque di esondazione avranno la stessa protezione. Negli altri casi in cui la sede ferroviaria è lambita dalle acque di esondazione, il progetto già prevede, per motivi costruttivi, la realizzazione di un muro di sottoscarpa, opportunamente dimensionato in base al livello idrico della piena con Tr 300 anni.

Lato destro (da PA verso CT)	
Pk	livello idrico [m slm]
Da 0+250 a 0+800	Da 9,75 a 10,10
Da 2+550 a 2+750	28
Da 2+750 a 3+300	Da 28 a 32,06
Da 3+600 a 3+800	Da 35,78 a 36,36
Da 4+300 a 4+375	42,95

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>RADDOPPIO TRATTA FIUMETORTO – LERCARA DIRAMAZIONE</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	<b>STUDIO IDRAULICO DEL FIUME TORTO</b>  <b>RELAZIONE IDRAULICA</b>	COMMESSA <b>RS3Z</b>	LOTTO <b>00 D 09</b>	CODIFICA <b>RI</b>	DOCUMENTO <b>ID0002 003</b>	REV. <b>B</b>

## 7 BIBLIOGRAFIA

- AA. VV. *Manuale di Ingegneria Civile e Ambientale*, Zanichelli ESAC, Bologna, 2003.
- Cannarozzo M., D'Asaro F., Ferro V., *Valutazione delle piene in Sicilia*, Istituto di Idraulica dell'Università di Palermo e GNDCI (Gruppo Nazionale per la difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche), Palermo, 1993.
- Caroni E., D'Alpaos L., Fattorelli S., Rossi F., Ubertini L., Versace P., Marchi E., *Valutazione delle piene*, C.N.R. °165, 1982.
- Da Deppo L., Datei C., Salandin P., *Sistemazione dei corsi d'acqua*, Edizioni Libreria Cortina, Padova, 2004.
- Escarameria M. (1995). Channel protection: gabion mattresses and concrete blocks. HR Wallingford, Report SR427, July, 1995.
- Ferro V., *La sistemazione dei bacini idrografici*, McGraw-Hill, Milano, 2006.
- FHWA, "Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures: Experience, Selection, and Design Guidance-Third Edition - Volume 2", Publication No. FHWA-NHI-09-112 (Hydraulic Engineering Circular No. 23, September 2009).
- Ghetti A., *Idraulica*, Edizioni Libreria Cortina, Padova, 1996.
- Maione U., *Appunti di idrologia 3. Le piene fluviali*, La Goliardica Pavese, 1977
- Marani M., *Processi e modelli dell'Idrometeorologia*, Dispense, 2005.
- Manuale di progettazione RFI.
- Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni, 2018 (circolare applicativa n.7, 21 gennaio 2019),
- Regione Siciliana, Assessorato Territorio e Ambiente, *Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico della Regione Siciliana – Relazione Generale*, 2004.
- Regione Siciliana, Assessorato Territorio e Ambiente, *Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) – Bacino idrografico del Fiume Simeto – Relazione*, 2005.
- Regione Siciliana, Osservatorio delle Acque dell'Agenzia Regionale per i Rifiuti e le Acque (ARRA), *Annali Idrologici*, disponibili presso [www.osservatorioacque.it](http://www.osservatorioacque.it).
- Rossi F., Fiorentino M., Versace P., *Two component extreme value distribution for Flood Frequency Analysis*, Water Resources Research, Vol. 20, N.7, 1984.
- Surendra, K. M., Vijay., P. S. [Soil Conservation Service Curve Number \(SCS-CN\) Methodology](#). Springer, pp. 84-146, 2003.
- VenTe Chow, *Open-channel hydraulics*, McGraw-Hill Book Company, USA, 1959.