

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO

NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA

U.O. OPERE CIVILI E GESTIONE DELLE VARIANTI

PROGETTO DEFINITIVO

TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)

IDROLOGIA E IDRAULICA

RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA

Modello bidimensionale del Fiume Dittaino, del Torrente Calderari e del corso d'acqua alla pk 10+050

SCALA:

-

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


RS3V 40 D 09 RI ID0002 001 D

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autore	Disegnato	Data
A	EMISSIONE ESECUTIVA	C.Cesali	Dic. 2019	F.Cabas	Dic. 2019	F.Sparacino	Dic. 2019		Vittozzi	
B	EMISSIONE ESECUTIVA	C.Cesali	Gennaio 2020	F.Cabas	Gennaio 2020	F.Sparacino	Gennaio 2020			
C	EMISSIONE ESECUTIVA	C.Cesali	Aprile 2020	F.Cabas	Aprile 2020	F.Sparacino	Aprile 2020			
D	EMISSIONE ESECUTIVA	C.Cesali	Ottobre 2020	F.Cabas	Ottobre 2020	F.Sparacino	Ottobre 2020			

ITALFERR S.p.A.
U.O. Opere Civili e Gestione delle varianti
Dott. Ing. Angelo Vittozzi
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Palermo
N° A20783

INDICE

1. PREMESSA	5
1.1 RIFERIMENTI NORMATIVI.....	6
2. INQUADRAMENTO GENERALE E OBIETTIVI DELLO STUDIO.....	7
2.1. PERICOLOSITA' IDRAULICA NELL'AREA DI INTERVENTO.....	7
2.2. OBIETTIVI DELLO STUDIO IDRAULICO.....	9
3. STUDIO IDRAULICO	12
3.1. GENERALITA'	12
3.2. DATI DI BASE	12
3.2.1. <i>Operedi attraversamento esistenti e in progetto</i>	13
3.3. IMPLEMENTAZIONE DEI MODELLI NUMERICI IDRAULICI	17
3.3.1. <i>Modello bidimensionale</i>	17
3.3.2. <i>Modello monodimensionale</i>	21
3.3.3. <i>Fiume Dittaino e Torrente Calderari</i>	25
3.3.4. <i>Corso d'acqua alla pk 10+050</i>	41
3.4. VERIFICA DEL FRANCO DI PROGETTO	47
3.4.1. <i>Torrente Calderari (viadotto VI05)</i>	47
3.4.2. <i>Corso d'acqua alla pk 10+050 (viadotto VI04)</i>	48
3.5. VERIFICA DELLA FASE DI CANTIERE.....	49
3.5.1. <i>Viadotto VI05 (Torrente Calderari)</i>	49
3.5.2. <i>Viadotto VI04 (corso d'acqua alla pk 10+050)</i>	63
4. VERIFICA ALLO SCALZAMENTO	65
5. SISTEMAZIONI IDRAULICHE.....	73
5.1. TORRENTE CALDERARI: VIADOTTO VI05	74
5.2. CORSO D'ACQUA ALLA PK 10+050: VIADOTTO VI04.....	77
5.3. ULTERIORI OPERE DI SISTEMAZIONE SUL TORRENTE CALDERARI.....	77
6. ANALISI DELL'EVOLUZIONE DELLE CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE DEL TORRENTE CALDERARI ALLA CONFLUENZA NEL FIUME DITTAINO.....	80
7. CONSIDERAZIONI SUL TRASPORTO DI MATERIALI GALLEGGIANTI.....	89
8. COMPATIBILITA' IDRAULICA DELLE OPERE IN PROGETTO	93
9. BIBLIOGRAFIA.....	95

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 3 di 95


INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 – Fiume Dittaino, aree a pericolosità idraulica (P.A.I.): inquadramento generale dell'intervento in progetto.....	8
Figura 2 – Fiume Dittaino, aree a pericolosità idraulica (P.A.I.): dettaglio in zona “Stazione di Dittaino”.	8
Figura 3 – Corso d’acqua alla pk 10+050: attraversamento in progetto (viadotto VI04).....	14
Figura 4 –Viadotto VI04: sezione trasversale.	14
Figura 5 – Torrente Calderari: foto dell’attraversamento esistente.	15
Figura 6 – Torrente Calderari: rilievo dell’opera di attraversamento esistente.	15
Figura 7 – Torrente Calderari: attraversamento in progetto (viadotto VI05).	16
Figura 8 – Viadotto VI05 (Torrente Calderari): sezione trasversale.	17
Figura 9 – Software Hec Ras 5.0.7: sistema di riferimento.....	19
Figura 10 – 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 Hec Ras sulle facce del bordo della cella.	21
Figura 11– Schema di calcolo per la determinazione del profilo del pelo libero nei corsi d’acqua.....	22
Figura 12 - Sezione schematica di un corso d'acqua.	23
Figura 13 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: dominio di calcolo.	26
Figura 14 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: implementazione delle opere di attraversamento in Hec Ras.	27
Figura 15 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: condizioni al contorno.	28
Figura 16 –F. Dittaino: idrogrammi di piena di progetto.	29
Figura 17 – T. Calderari: idrogrammi di piena di progetto.	29
Figura 18 – Confronto tra le aree di pericolosità idraulica P1 (P.A.I.) e le aree di esondazione Tr 300 da modello 2D“Dittaino-Calderari”.	31
Figura 19 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: aree di esondazione Tr 200, ante operam.....	32
Figura 20 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: aree di esondazione Tr 100, ante operam.....	33
Figura 21 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: aree di esondazione Tr 50, ante operam.....	34
Figura 22 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: implementazione della configurazione post operam.....	36
Figura 23 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: aree di esondazione Tr 300, post operam.....	37
Figura 24 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: aree di esondazione Tr 200, post operam.....	38
Figura 25 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: aree di esondazione Tr 100, post operam.....	39
Figura 26 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: aree di esondazione Tr 50, post operam.....	40

Figura 27 – Modello 2D del corso d’acqua alla pk 10+050: dominio di calcolo e condizioni al contorno.....	42
Figura 28 – Corso d’acqua alla pk 10+050, sottobacino 1: idrogrammi di piena di progetto, per differenti tempi di ritorno.....	43
Figura 29 – Corso d’acqua alla pk 10+050, sottobacino 2: idrogrammi di piena di progetto, per differenti tempi di ritorno.....	43
Figura 30 – Modello 2D del corso d’acqua alla pk 10+050: aree di esondazione Tr 300 e Tr200, ante operam. .	44
Figura 31 – Modello 2D del corso d’acqua alla pk 10+050: aree di esondazione Tr 100 e Tr50, ante operam. ...	45
Figura 32 – Modello 2D del corso d’acqua alla pk 10+050: aree di esondazione Tr 100 e Tr50, post operam. ...	45
Figura 33 – Modello 2D del corso d’acqua alla pk 10+050: aree di esondazione Tr 300 e Tr200, post operam. .	46
Figura 34 – Modello 2D ”Dittaino-Calderari”: mappa dei vettori velocità in corrispondenza del VI05.	48
Figura 35–Differenti tipologie di pile non uniformi dotate di fondazioni.....	68
Figura 36 – Calcolo dello scalzamento in corrispondenza delle spalle.	71
Figura 37 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: campo di velocità in corrispondenza del viadotto VI05 (configurazione post operam).....	75
Figura 38 –Viadotto VI05: sezione tipo delle opere di sistemazione idraulica.	76
Figura 39 –Viadotto VI05: particolare delle opere di sistemazione idraulica.	76
Figura 40 – Viadotto VI04: sezione tipo delle opere di sistemazione idraulica.	77
Figura 41 – Ulteriori opere di sistemazione sul Torrente Calderari.	78
Figura 42 – Ulteriori opere di sistemazione sul Torrente Calderari: dettaglio costruttivo.	79
Figura 43 – Bacino del Torrente Calderari: coperture boschive.....	89
Figura 44 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: campo di velocità nella configurazione con diametro pila pari a 4.5 m.....	92
Figura 45 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: campo di velocità nella configurazione con diametro pila pari a 11 m.....	92

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 – Classi di pericolosità idraulica (PAI).....	7
Tabella 2 – Viadotto VI05: verifica del franco idraulico.	47
Tabella 3 – Viadotto VI04: verifica del franco idraulico.	49
Tabella 4- Formulazione CSU: valori dei fattori correttivi K_1 , K_2 , K_3	66

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 5 di 95

1. PREMESSA

La presente relazione è parte integrante della progettazione definitiva dei lavori riguardanti la prima macrofase funzionale della tratta *Nuova Enna – Dittaino* (denominata anche lotto 4b), ricompresa tra la Stazione di Nuova Enna (inclusa) e la stazione di Dittaino (inclusa), dal km 0+315 al km 14+935 (coincidente con la pk 172+871 circa della linea storica Palermo Catania), nell’ambito dell’itinerario *Messina-Catania-Enna-Palermo*.


L’intervento è realizzato in variante di tracciato rispetto alla linea esistente e si sviluppa all’interno del bacino del Fiume Dittaino, attraversando una serie di corsi d’acqua maggiori e minori, affluenti del F. Dittaino stesso. Non sono previste opere di attraversamento sul F. Dittaino; il tracciato di progetto si sviluppa in stretto affiancamento al F. Dittaino soltanto nel tratto finale. Di maggiore rilievo, gli attraversamenti del Torrente Calderari alla pk 14+750 e del corso d’acqua alla pk 10+050, tramite i “*nuovi*” viadotti in progetto denominati VI05 e VI04, rispettivamente.

E’ stato condotto quindi lo studio idraulico del Fiume Dittaino, del Torrente Calderari e del corso d’acqua alla pk 10+050, finalizzato alla valutazione della propagazione delle onde di piena, per vari tempi di ritorno, e alla determinazione delle aree potenzialmente inondabili, tramite simulazioni numeriche bidimensionali (2D).

Le analisi svolte sono state condotte in conformità a quanto previsto ed effettuato nell’ambito del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (P.G.R.A., 2015) e del Piano Stralcio di Assetto Idrologico (P.A.I., 2004) della Regione Siciliana (rif. *Monografia del bacino del Fiume Simeto*, 2015), nonché nel Manuale di Progettazione RFI e nelle NTC2018.

Con riferimento ai viadotti in progetto sul T. Calderari (viadotto VI05) e sul corso d’acqua alla pk 10+050 (viadotto VI04), è stata inoltre valutata la profondità massima di erosione attesa attorno alle pile interessate dall’esonazione delle piene di progetto, in accordo alle indicazioni riportate nelle NTC2018.

E’ stata studiata anche la fase di realizzazione (o cantiere) dei viadotti VI04 (corso d’acqua alla pk 10+050) e VI05 (Torrente Calderari), tramite simulazioni numeriche secondo modello monodimensionale per la cosiddetta “*portata di cantiere*”. Infine, in relazione alle velocità della corrente in alveo e nelle zone golenali, al fine di ripristinare lo stato dei luoghi “*ante operam*” (con riferimento al VI04) e di migliorare le attuali condizioni di deflusso e quindi di pericolosità nell’area di intervento (con riferimento al VI05), sono state definite anche le opportune opere di protezione e sistemazione in alveo in corrispondenza delle nuove opere di attraversamento in progetto.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 6 di 95

1.1 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 E OBIETTIVI DELLO STUDIO

2.1. PERICOLOSITA' IDRAULICA NELL'AREA DI INTERVENTO

Il quadro conoscitivo di riferimento per la caratterizzazione idrologica del bacino del Fiume Dittaino e dei suoi affluenti (T. Calderari e corso d'acqua alla pk 10+050) e la definizione delle aree di pericolosità idraulica è attualmente riportato 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 un'aprobabilità di accadimento $Tr \leq 50$ anni e/o all'instaurarsi di condizioni di lama d'acqua massimarraggiunta sul piano campagna superiore ad 1 metro.

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

La classe di pericolosità **bassa (P1)** fariferimento 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.

Di seguito, una tabella riepilogativa delle classi di pericolosità adottate nel PAI/PGRA.

<i>TR (anni)</i>	<i>Pericolosità</i>
50	P3
100	P2
300	P1

Tabella 1 – Classi di pericolosità idraulica (PAI).

Come illustrato nelle figure seguenti, il tracciato ferroviario in progetto si sviluppa all'esterno delle aree classificate a pericolosità idraulica del Fiume Dittaino, definite nell'ambito delP.A.I./P.G.R.A..

Lungo il Torrente Calderari è evidenziato un sito di attenzione (i.e. criticità idraulica) che corrisponde all'opera di attraversamento stradale (S.S. 192), collocata subito a monte dell'attraversamento ferroviario esistente.

Per il corso d'acqua alla pk 10+050 non sono invece definite/disponibili aree di pericolosità idraulica PAI/PGRA.

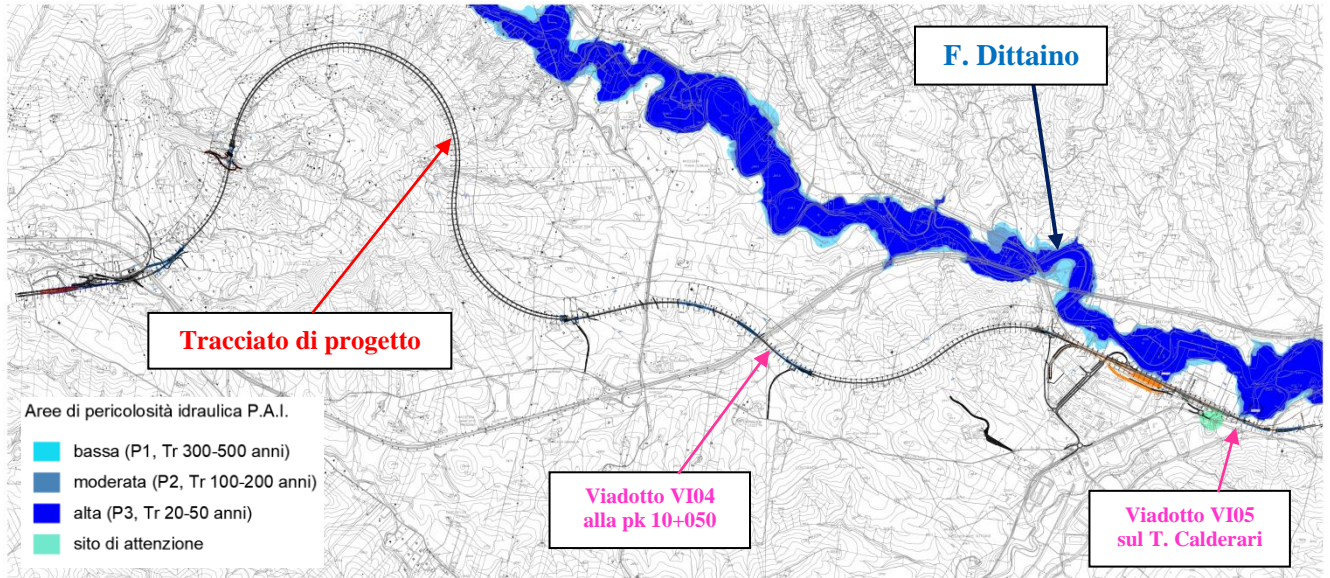


Figura 1 – Fiume Dittaino, aree a pericolosità idraulica (P.A.I.): inquadramento generale dell'intervento in progetto.

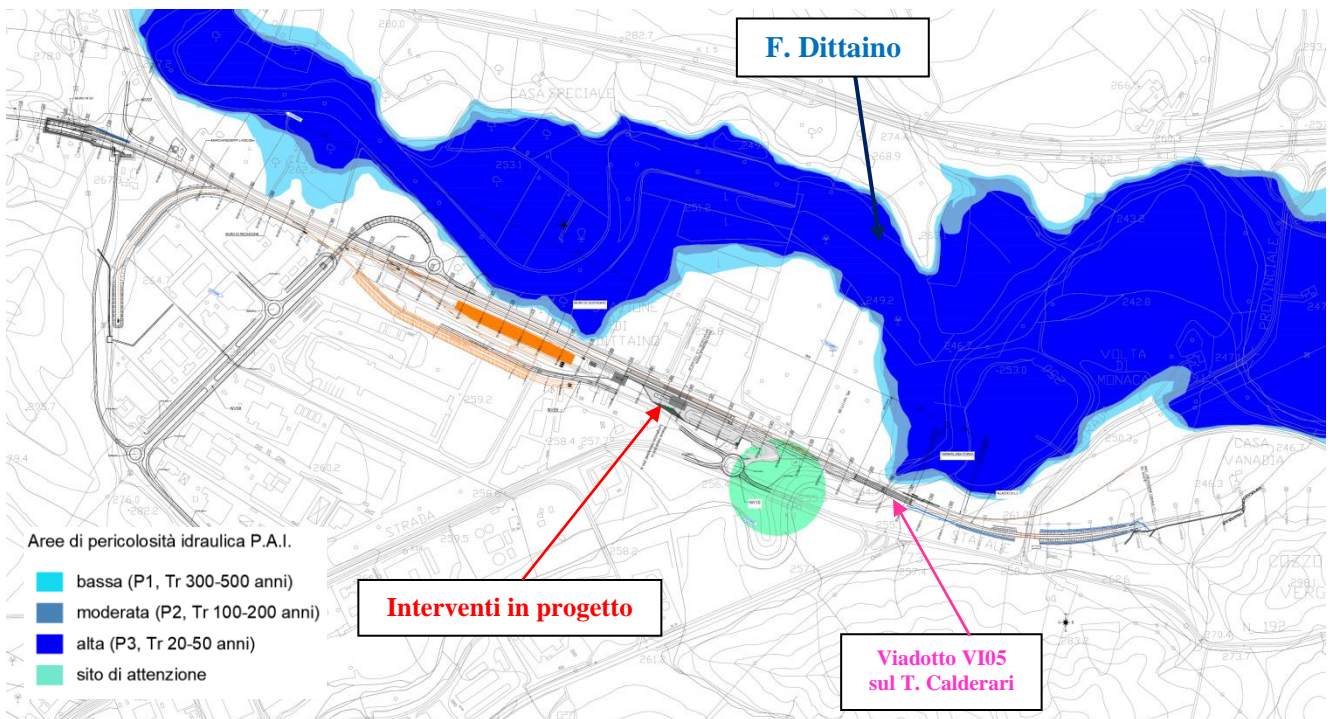



Figura 2 – Fiume Dittaino, aree a pericolosità idraulica (P.A.I.): dettaglio in zona “Stazione di Dittaino”.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 9 di 95

2.2. OBIETTIVI DELLO STUDIO IDRAULICO

Obiettivo del presente studio idraulico è quello di valutare la compatibilità idraulica dei nuovi attraversamenti/viadotti VI04 (corso d’acqua alla pk 10+050) e VI05 (sul T. Calderari alla pk 14+750) della linea ferroviaria Palermo-Catania, tratta *Nuova Enna – Dittaino* (Lotto 4b), nonché del tracciato in progetto (comprese le opere accessorie), nel tratto (finale) di stretto affiancamento al Fiume Dittaino.

Per la sicurezza idraulica della linea, le opere d’arte di attraversamento devono osservare le prescrizioni del Manuale di Progettazione RFI (MdP), nonché le indicazioni riportate nelle NTC2018 (normativa di riferimento del presente progetto) e nella relativa circolare esplicativa n. 7 del 21 gennaio 2019. In sintesi, con riferimento al MdP, le opere idrauliche di attraversamento devono essere verificate per eventi di massima piena caratterizzati dai seguenti tempi di ritorno (Tr):

- $Tr = 300$ anni per $S \geq 10 \text{ km}^2$ (come nel caso in esame)
- $Tr = 200$ anni per $S < 10 \text{ km}^2$

avendo indicato con S la superficie del bacino (o del sottobacino) 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 la quota di intradosso del manufatto ed il livello idrico corrispondente alla piena di progetto ($Tr = 300$ anni) non deve essere inferiore a 1.5 m nella sezione immediatamente a monte dell’attraversamento;
- il franco minimo tra la quota di intradosso del manufatto e la quota di carico idraulico totale deve essere almeno pari a 50 cm.

Inoltre, nel caso di rilevati vulnerabili per esondazione di corsi d’acqua, “*dovrà essere garantito 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; le scarpate dovranno essere protette da apposite opere di difesa progettate sulla base dei parametri indicati nei piani di bacino o negli studi idraulici di progetto.*”

Con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC2018), l’opera deve rispondere ai seguenti requisiti:



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

PROGETTO DEFINITIVO
TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)

RELAZIONE IDRAULICA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 09 RI	ID 00 02 001	D	10 di 95

“..... Deve in ogni caso essere definita una piena di progetto caratterizzata da un tempo di ritorno T_r pari a 200 anni ($T_r=200$).....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.** Nel caso di pile e/o spalle in alveo, cura particolare è da dedicare al problema delle escavazioni in corrispondenza delle fondazioni e alla protezione delle fondazioni delle pile e delle spalle tenuto anche conto del materiale galleggiante che il corso d’acqua può trasportare. In tali situazioni, una stima anche speditiva dello scalzamento è da sviluppare fin dai primi livelli di progettazione. **Il franco idraulico, definito come la distanza fra la quota liquida di progetto immediatamente a monte del ponte e l’intradossodelle 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 e il fondo alveo.** Quando l’intradosso delle strutture non sia costituito da un’unica linea orizzontale tra gli appoggi, il franco idraulico deve essere assicurato per una ampiezza centrale di $2/3$ della luce, e comunque non inferiore a 40 m.”

Nella relativa circolare applicativa n.7 del 21 gennaio 2019, si asserisce inoltre:

“Quando, per caratteristiche del territorio e del corso d’acqua, si possa verificare nella sezione oggetto dell’attraversamento il transito di tronchi di rilevanti dimensioni, in aggiunta alla prescrizione di un franco normale minimo di 1,50 m, è da raccomandare che il dislivello tra fondo e sottotrave sia indicativamente non inferiore a $6 \div 7$ m. Nel caso di corsi di acqua arginati, la quota di sottotrave sarà comunque non inferiore alla quota della sommità arginale per l’intera luce. Per tutti gli attraversamenti è opportuno che sia garantito il transito dei mezzi di manutenzione delle sponde e/o delle arginature.”

Con riferimento alle NTA del P.A.I. della Regione Sicilia (art.11, comma 1 e 4.h):


“Nelle aree a pericolosità idraulica P4 e P3 sono vietate tutte le opere e le attività di trasformazione dello stato dei luoghi e quelle di carattere urbanistico ed edilizio, relativamente agli elementi individuati in E4 ed E3.....In queste aree sono esclusivamente consentiti.....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. A tal fine i progetti dovranno essere corredati da uno studio di compatibilità idraulica redatto secondo gli indirizzi contenuti nell’Appendice “B”.....”

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 11 di 95

Con riferimento invece alle NTA del P.G.R.A. della Regione Sicilia (art.10):

“Le nuove opere di attraversamento stradale o ferroviario, o comunque le infrastrutture interessanti il reticolo idrografico, le fasce fluviali, o le aree pericolosità devono essere progettate nel rispetto dei criteri e delle prescrizioni tecniche per la verifica idraulica di cui ad apposita direttiva come indicata all’art. 3, comma 1, lett.g.”

In definitiva, in accordo al MdP e alle NTC2018, nonché alle indicazioni riportate nelle NTA del P.A.I. e del P.G.R.A. della Sicilia, è stato sviluppato uno studio di compatibilità idraulica in cui sono state effettuate le simulazioni numeriche idrauliche dei corsi d’acqua interferenti (nel caso specifico del corso d’acqua alla pk 10+050 e del T. Calderari), per i tempi di ritorno di **50, 100, 200, 300 anni**, secondo la definizione delle classi di pericolosità idraulica riportate in Tabella 1.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 12 di 95

3. STUDIO IDRAULICO

3.1. GENERALITA'

Con riferimento ai sottobacini individuati nello studio idrologico annesso:

- 1) *Fiume Dittaino e Torrente Calderari*
- 2) *Corso d'acqua alla pk 10+050 (sottobacini 1 e 2)*

sono stati sviluppati i modelli (numerici) idraulici bidimensionali (2D), in regime di moto vario, del F. Dittaino e del T. Calderari alla confluenza, e del corso d'acqua alla pk 10+050, tramite il software HecRas 5.0.7, finalizzati alla determinazione delle aree potenzialmente inondabili (per le portate di piena di riferimento) in corrispondenza delle opere di attraversamento in progetto VI04 (corso d'acqua alla pk 10+050) e VI05 (T. Calderari), nonché della Stazione di Dittaino.


Nello specifico, relativamente al *Fiume Dittaino* e al *Torrente Calderari*, è stato sviluppato un unico modello numerico che comprende i tratti fluviali di entrambi i corsi d'acqua, in ragione della loro confluenza in prossimità della zona di intervento. Inoltre, si precisa che le simulazioni sono state condotte a parità di tempo di ritorno delle piene dei due corsi d'acqua.

Sono stati inoltre implementati i modelli idraulici (numerici) monodimensionali (1D) del Torrente Calderari e del corso d'acqua alla pk 10+050, in regime di moto permanente, tramite sempre il software HecRas 5.0.7, finalizzati allo studio delle fasi di cantiere relative alla realizzazione dei viadotti VI05 e VI04, rispettivamente.

3.2. DATI DI BASE

I dati cartografici e topografici a disposizione per l'implementazione dei modelli numerici sopra introdotti 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;

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 13 di 95

- rilievo di sezioni (batimetriche) trasversali del F. Dittaino, del T. Calderari e del corso d’acqua alla pk 10+050 e delle relative opere di attraversamento esistenti;
- sezioni trasversali del F. Dittaino 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 campagnetopografiche ed i rilievi LiDAR, ha permesso, nell’implementazione dei modelli numerici sviluppati, di utilizzare i dati più aggiornati, che riproducessero maggiormente le attuali condizioni in alveo e nelle aree golenali, potenzialmente inondabili.

3.2.1. *Opere di attraversamento esistenti e in progetto*

3.2.1.1. *Corso d’acqua alla pk 10+050*

La linea ferroviaria in progetto attraversa il corso d’acqua alla pk 10+050 tramite il viadotto VI04, costituito di 10 campate; nello specifico:

- da Spalla A a pila P01, campata di luce pari a 25 metri
- da pila P01 a pila P02, campata di luce pari a 50 metri (scavalco autostrada A19 Palermo – Catania)
- da pila P02 a pila P04, campate di luce pari a 40 metri
- da pila P04 a pila P05, campata di luce pari a 50 metri (scavalco corso d’acqua)
- da pila P05 a pila P07, campate di luce pari a 40 metri
- da pila P07 a Spalla B, campate di luce pari a 25 metri

Tutte le pile sono pseudo-rettangolari con larghezza e lunghezza pari rispettivamente a 3.4 e 8.6 metri; le pile di scavalco del corso d’acqua alla pk 10+050 sono P04-P05 (campata da 50 m); la quota di intradosso dell’impalcato in corrispondenza del corso d’acqua si attesta a +308.50 m s.l.m.

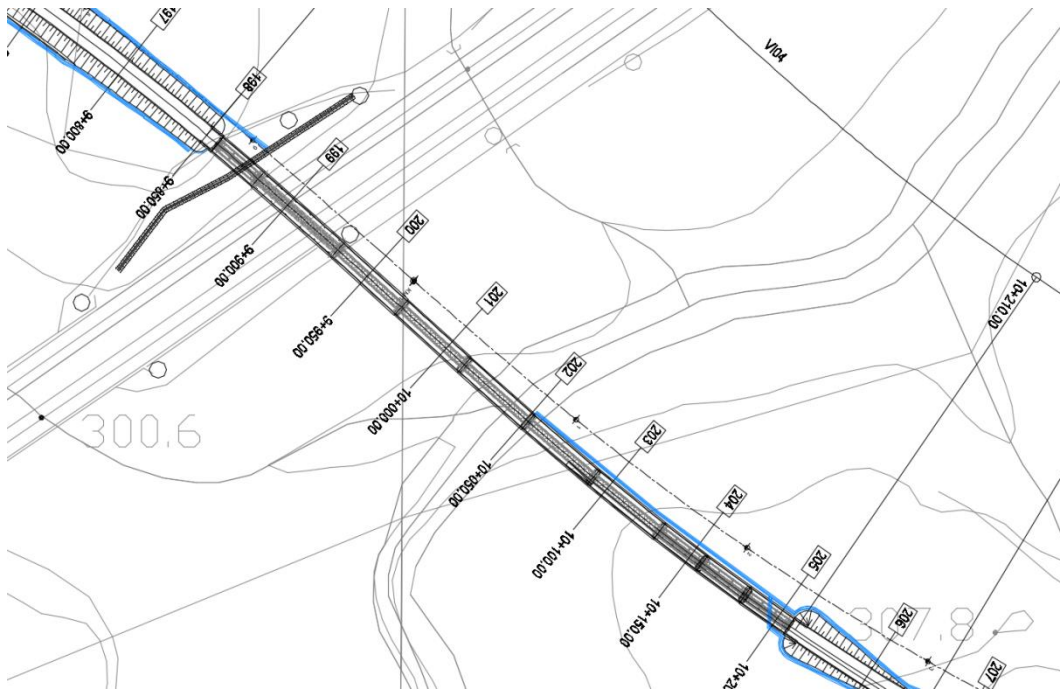


Figura 3 – Corso d'acqua alla pk 10+050: attraversamento in progetto (viadotto VI04).

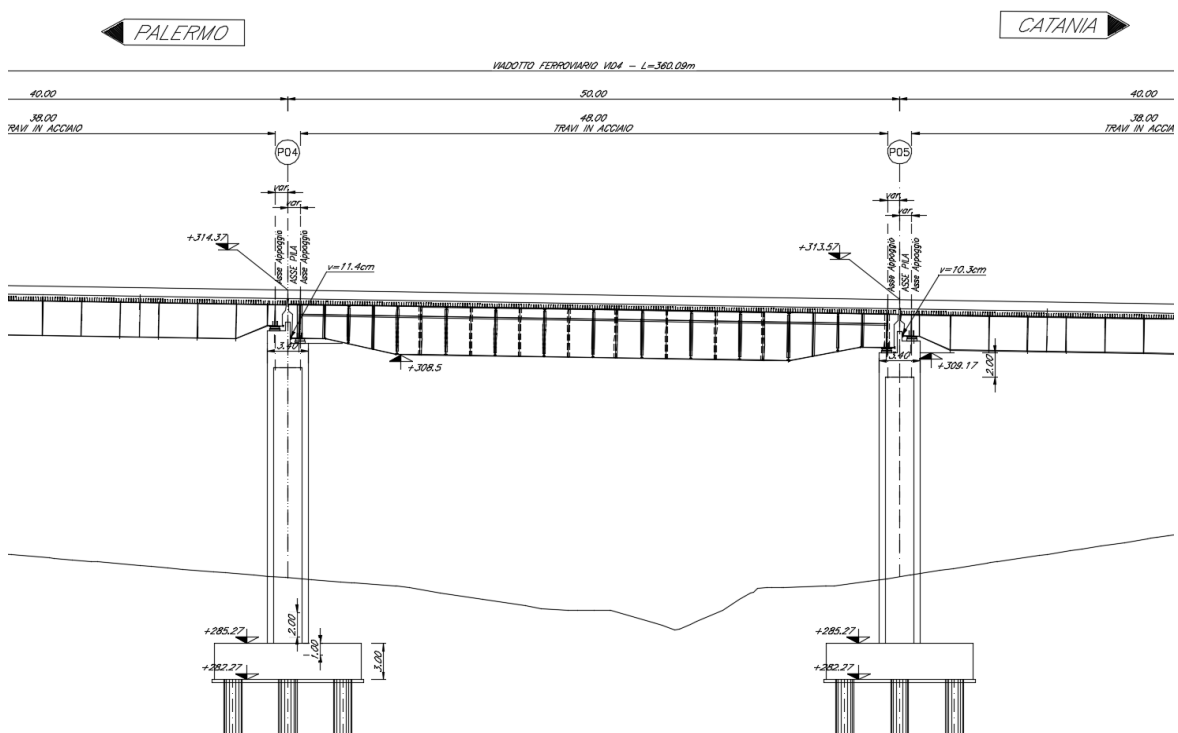


Figura 4 –Viadotto VI04: sezione trasversale.

3.2.1.2. Torrente Calderari

Il Torrente Calderari è attualmente attraversato dalla linea ferroviaria esistente mediante un ponte a singola campata, con luce netta pari a circa 29 metri, come mostrato nelle figure seguenti.



Figura 5 – Torrente Calderari: foto dell’attraversamento esistente.

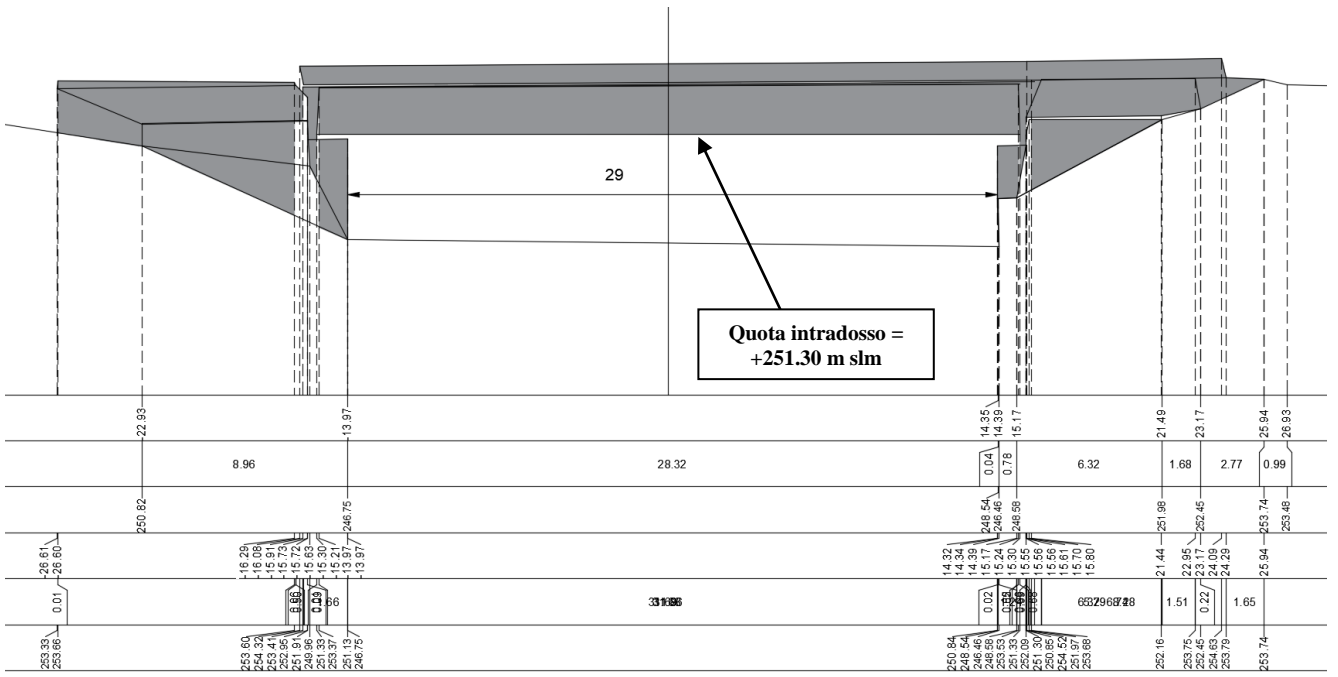


Figura 6 – Torrente Calderari: rilievo dell’opera di attraversamento esistente.

Tale opera, come evidenziato nelle simulazioni idrauliche effettuate descritte nei paragrafi successivi, risulta idraulicamente insufficiente. Pertanto, se ne prevede la demolizione.

Sulla base dei risultati delle modellazioni idrauliche sono state dimensionate opportune opere di sistemazione e riprofilatura dell'alveo, nonché il nuovo viadotto VI05 previsto in progetto, costituito di due campate da 70 metri, con pila (circolare, diametro = 4.5 metri) in alveo.

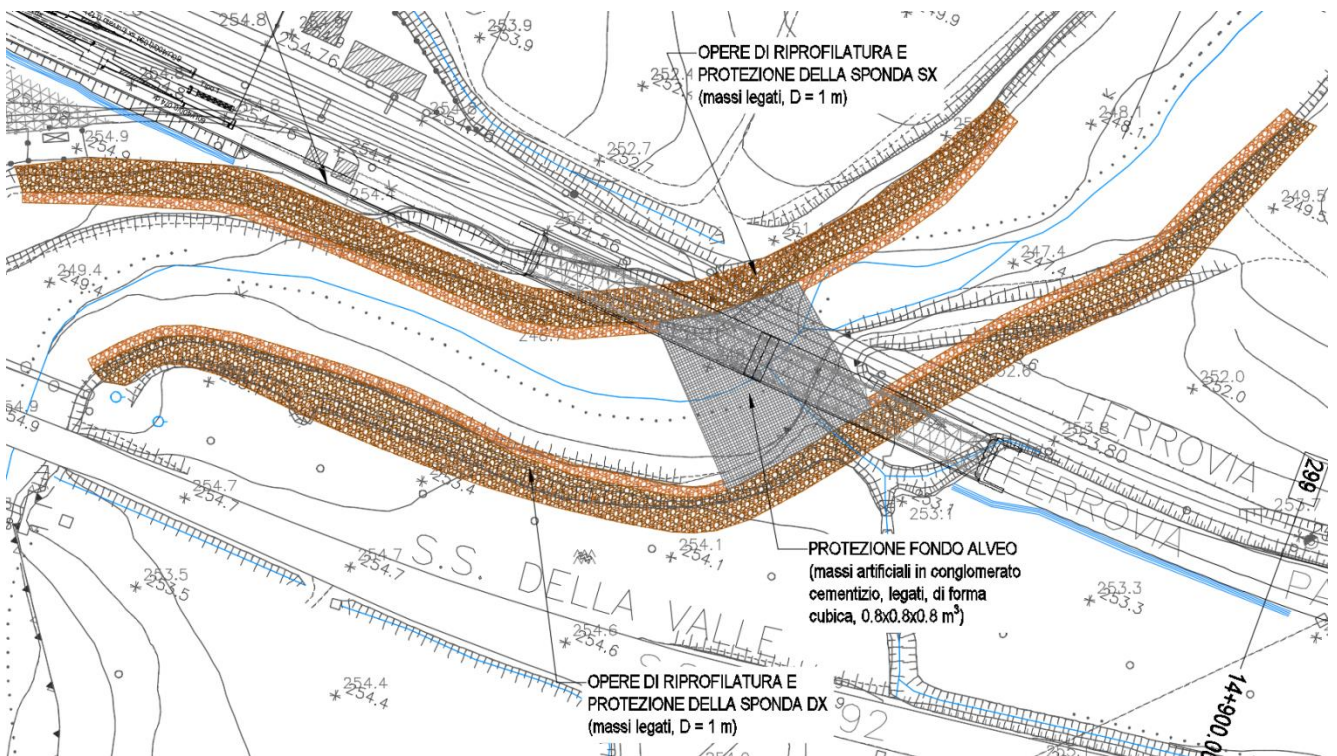


Figura 7 – Torrente Calderari: attraversamento in progetto (viadotto VI05).

La quota minima di intradosso dell'impalcato del nuovo viadotto si attesta a +254.0 m slm.

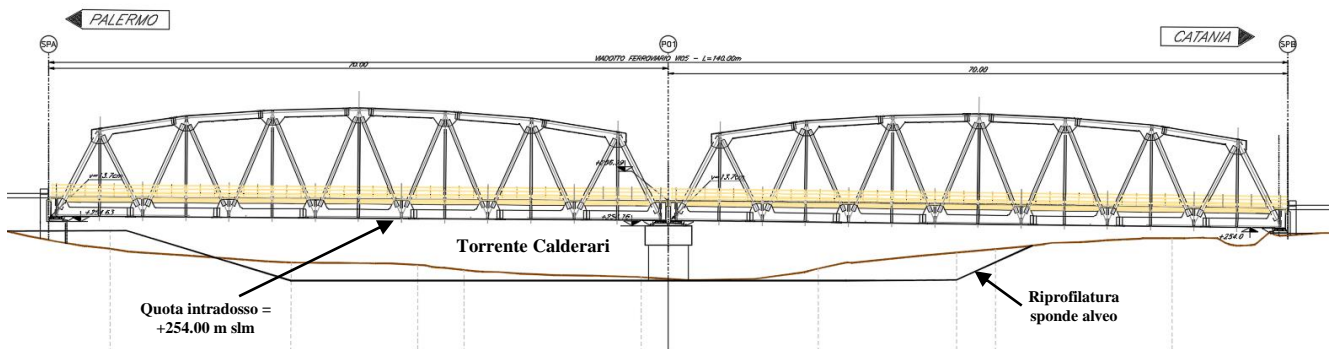


Figura 8 – Viadotto VI05 (Torrente Calderari): sezione trasversale.

3.3. IMPLEMENTAZIONE DEI MODELLI NUMERICI IDRAULICI

3.3.1. Modello bidimensionale

Il codice di calcolo utilizzato per l'implementazione dei modelli bidimensionale del Fiume Dittaino e del Torrente Calderari, e del corso d'acqua alla pk 10+050 è il software Hec-Ras 5.0.7 sviluppato dall'Hydrologic Center del Corpo degli Ingegneri dell'Esercito degli Stati Uniti d'America.

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 stramazzo è utilizzata per calcolare il deflusso al di sopra dell'argine o attraverso la breccia.
- Maglie computazionali strutturate e non strutturate: Il software è stato progettato per utilizzare mesh computazionali strutturate o non strutturate. Ciò significa che le cellule computazionali possono essere triangoli, quadrati, rettangoli o anche elementi a cinque e sei facce. La maglia può essere una miscela di forme e dimensioni delle celle. Il contorno esterno della maglia computazionale è definito con un poligono.
- Tabella dettagliata delle proprietà idrauliche per le celle di calcolo: All'interno di HEC-RAS le celle e le facce delle celle si basano sui dati del terreno sottostante (DTM). Ogni cella della maglia computazionale è pre-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.

- 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

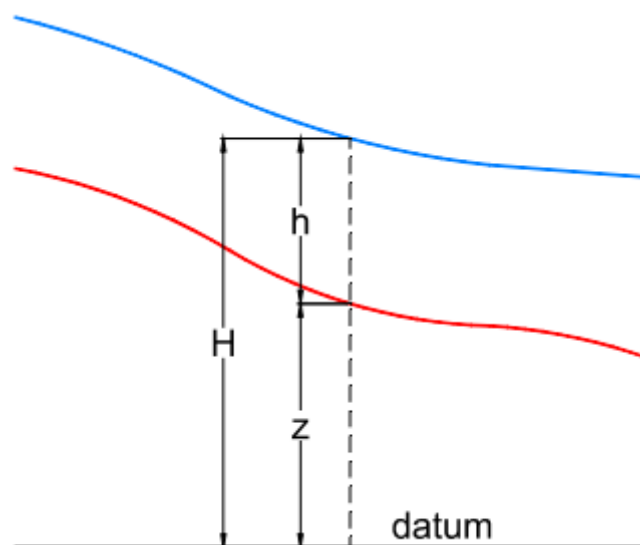



Figura 9 – Software Hec Ras 5.0.7: sistema di riferimento.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 20 di 95

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 9).

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:

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

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

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

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

in cui g è l'accelerazione di gravità, $|V|$ è il modulo del vettore velocità, C è il coefficiente di Chézy 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:

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

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.

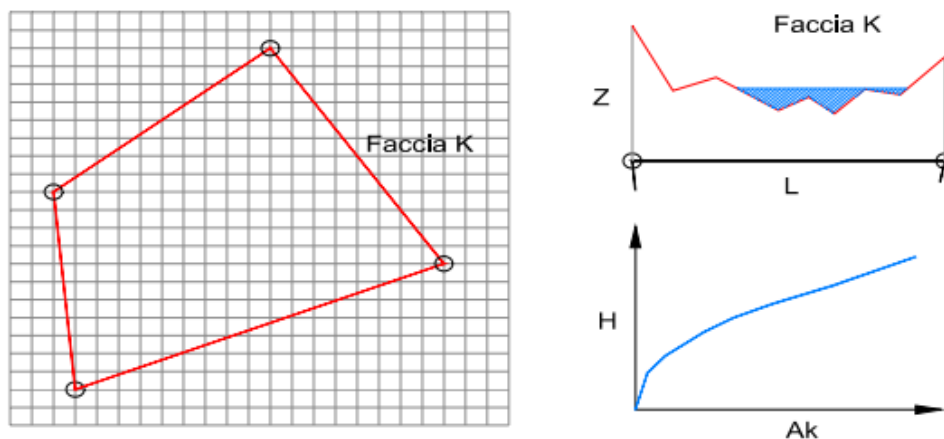


Figura 10 – Software Hec Ras 5.0.7: in grigio il dato della griglia DTM, in rosso la cella di calcolo del modello idraulico. A destra la schematizzazione effettuata da Hec Ras sulle facce del bordo della cella.

3.3.2. Modello monodimensionale

Come anticipato, per la simulazione e la verifica delle fasi di cantiere dei viadotti in progetto VI04 (corso d'acqua alla pk 10+050) e VI05 (Torrente Calderari) è stato implementato un modello idraulico numerico monodimensionale del corso d'acqua alla pk 10+050 e del Torrente Calderari, in regime di moto permanente,

tramite sempre il software Hec Ras 5.0.7., sviluppato dall'Hydrologic Center del Corpo degli Ingegneri dell'Esercito degli Stati Uniti d'America.

Il calcolo del profilo di corrente in condizioni di moto permanente fra due sezioni successive è effettuato dal software mediante la soluzione dell'equazione dell'energia, attraverso un processo iterativo denominato 'standard step method'. Indicate con 1 e 2 rispettivamente le sezioni di valle e di monte, l'equazione dell'energia è espressa dalla seguente relazione:

$$Y_2 + Z_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + h_e$$

dove Y_1 , Y_2 sono i tiranti idrici di monte e di valle; Z_1 , Z_2 le quote topografiche; v_1 , v_2 le velocità medie (portata totale/area di flusso totale); α_1 , α_2 i coefficienti di ragguglio delle altezze cinetiche o di Coriolis; g l'accelerazione di gravità; h_e la perdita di carico totale nel tratto.

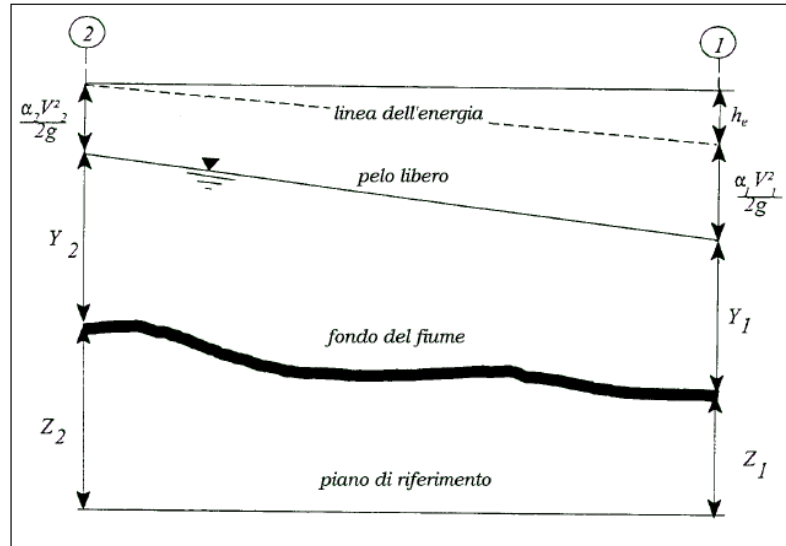


Figura 11– Schema di calcolo per la determinazione del profilo del pelo libero nei corsi d'acqua.

Le perdite di energia complessive h_e tra le due sezioni sono dovute alle perdite distribuite per attrito ed a quelle localizzate dovute a fenomeni di espansione e contrazione della vena fluida; in particolare si ha:

$$h_e = L\bar{j} + C \left| \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} - \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} \right|$$

dove L è la distanza tra le due sezioni; \bar{j} è la perdita di carico media distribuita tra le due sezioni e C è il coefficiente che correla le perdite, dovute all'espansione ed alla contrazione della vena, in funzione dell'andamento piano – altimetrico del corso d'acqua, alla differenza dei carichi cinetici delle due sezioni. La distanza L tra le due sezioni è calcolata mediante la relazione:

$$L = \frac{L_{lob} \bar{Q}_{lob} + L_{ch} \bar{Q}_{ch} + L_{rob} \bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}}$$

in cui L_{lob} , L_{ch} , L_{rob} sono le lunghezze del tratto relative all'area golenale sinistra, al canale principale e all'area golenale destra rispettivamente; \bar{Q}_{lob} , \bar{Q}_{ch} , \bar{Q}_{rob} sono le portate medie attraverso la sezione rispettivamente in golena sinistra, canale principale e golena destra. Per la valutazione delle perdite di carico è utilizzata la formula di Manning:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} \sqrt{j}$$

dove Q rappresenta la portata, A la sezione bagnata, R il raggio idraulico, n il coefficiente di scabrezza secondo Manning. Nel caso di sezioni composte, tipiche dei corsi d'acqua naturali, è necessario suddividere la sezione in parti in modo da trattare separatamente sezioni in cui la velocità media può essere ritenuta, ai fini pratici, costante.

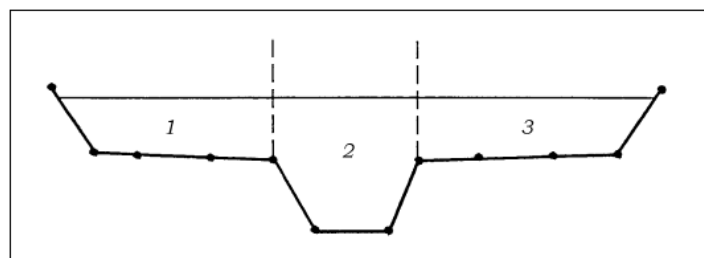



Figura 12 - Sezione schematica di un corso d'acqua.

Con riferimento alla figura precedente, definito $K_i = Q_i / \sqrt{j}$ la capacità di portata di ogni singola parte i -esima in cui è stata suddivisa la sezione, in accordo alla formula di Manning, è:

$$\bar{j} = \left(\frac{Q}{\sum_i K_i} \right)^2$$

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 24 di 95

Questo risultato può essere facilmente ricavato osservando che la portata di ogni singola area $Q_i = K_i \sqrt{j}$ è proporzionale al rispettivo coefficiente di portata e che la portata totale vale:

$$Q = \sum_i Q_i$$

Il programma HEC-RAS implementa quattro modalità distinte per valutare \bar{j} ; in particolare:

- $\bar{j} = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2$ (*average conveyance equation*)
- $\bar{j} = \frac{j_1 + j_2}{2}$ (*average friction slope equation*)
- $\bar{j} = \sqrt{j_1 \cdot j_2}$ (*geometric mean friction slope equation*)
- $\bar{j} = \frac{2j_1 \cdot j_2}{j_1 + j_2}$ (*harmonic mean friction slope equation*)

Il programma utilizza per default la prima delle quattro opzioni proposte, per quanto sia possibile adottare automaticamente la formula che meglio si adatta a ciascun tipo di profilo (corrente lenta o veloce). Calcolata la capacità di portata di ogni singola sezione, è possibile, da queste, valutare il coefficiente di Coriolis. Questo coefficiente è pari al rapporto tra l'energia cinetica reale della corrente, proporzionale a

$$\sum_i Q_i^3 / A_i^2$$

e l'energia cinetica calcolata facendo uso del valore medio della velocità, proporzionale a Q^3/A^2 . Espresse le portate delle singole parti i -esime in funzione del rispettivo coefficiente di portata si perviene con qualche semplice passaggio alla seguente espressione:

$$\alpha_k = \left(\sum_{i=1}^3 \frac{K_i^3}{A_i^2} \right) \frac{\left(\sum_{i=1}^3 A_i \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^3 K_i \right)^3} \quad (k = 1, 2)$$

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 25 di 95

Calcolate tramite le rispettive equazioni le perdite di energia h_e ed i coefficienti di Coriolis α_k , l'equazione

$$Y_2 + Z_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + h_e$$

associata all'equazione di continuità, permette di calcolare, mediante un procedimento iterativo, l'altezza idrica alla sezione di calcolo. La procedura è la seguente:

- 1) Si assume un valore di tentativo per il livello idrico sulla sezione di monte (o di valle nel caso in cui si ipotizzi una corrente di tipo veloce).
- 2) Si calcola il valore della capacità di portata totale $K (= \sum_{i=1}^3 K_i)$ e l'altezza cinetica per il livello di tentativo.
- 3) In base ai valori calcolati al passo 2, si calcola \bar{j} e si risolve l'equazione seguente per il valore di h_e .

$$h_e = L\bar{j} + C \left| \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} - \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} \right|$$

- 4) Con i valori calcolati ai passi 2 e 3, si calcola $Y_2 + Z_2$ mediante la relazione


$$Y_2 + Z_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + h_e$$

- 5) Si confronta il valore calcolato $Y_2 + Z_2$ con quello di tentativo del passo 1.

Si ripetono i passi dall'1 al 5 fino a che i due valori non differiscono per meno di 0.003 m o di una soglia specificata dall'utente.

3.3.3. Fiume Dittaino e Torrente Calderari

Come anticipato, relativamente al *Fiume Dittaino* e al *Torrente Calderari*, è stato sviluppato un unico modello numerico che comprende i tratti fluviali di entrambi i corsi d'acqua, in ragione della loro confluenza in prossimità della zona di intervento. Inoltre, si precisa che le simulazioni sono state condotte a parità di tempo di ritorno delle piene dei due corsi d'acqua.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 26 di 95

3.3.3.1. Geometria del modello

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 piano 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.

Nello specifico, il modello idraulico relativo alla confluenza “Dittaino-Calderari” ha una estensione massima di circa 8 km.

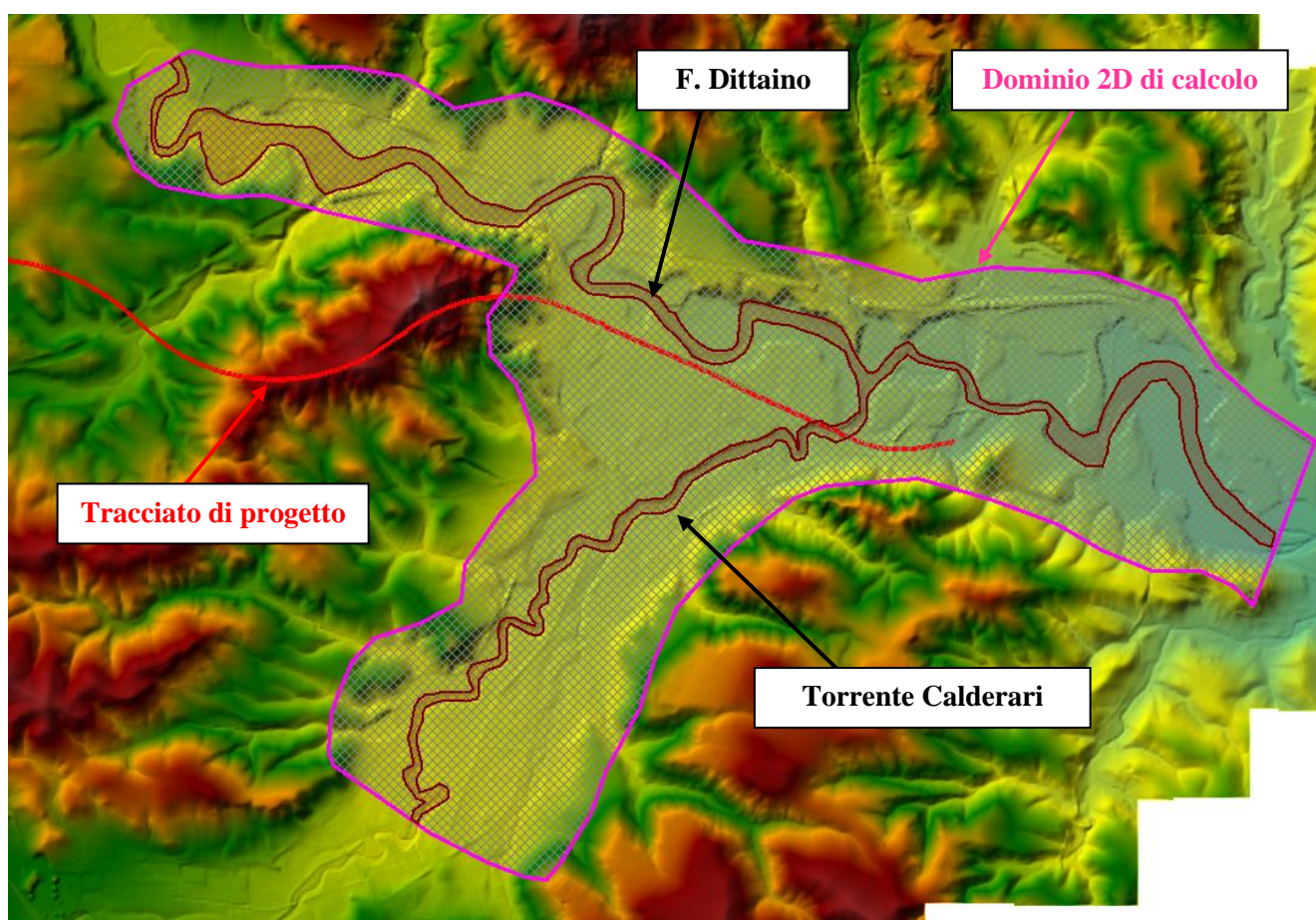



Figura 13 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: dominio di calcolo.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 27 di 95

In particolare, il modello si estende per circa 5.5 km lungo il Fiume Dittaino, a monte della confluenza del T. Calderari; per circa 4 km lungo il T. Calderari, a monte della confluenza nel F. Dittaino; per circa 2.5 km lungo il Fiume Dittaino, a valle della confluenza del T. Calderari. Il dominio di calcolo ha una superficie di circa 14 km². 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; questa 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 230 m² e che le dimensioni minime non fossero inferiori ad un'area di 0.30 m² (per una dimensione media di circa 30 m²). Gli infittimenti della mesh (alveo e opere esistenti in alveo) sono stati sviluppati imponendo una dimensione degli elementi pari a 2.5x2.5 m².

Il viadotto in progetto è stato simulato modificando il DTM di base introducendo l'ingombro in pianta della pila in alveo; anche le opere di sistemazione e riprofilatura dell'alveo sono state implementate modificando opportunamente il DTM, come meglio illustrato nei paragrafi successivi. Le opere di attraversamento esistenti sul Fiume Dittaino e sul T. Calderari, 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*).

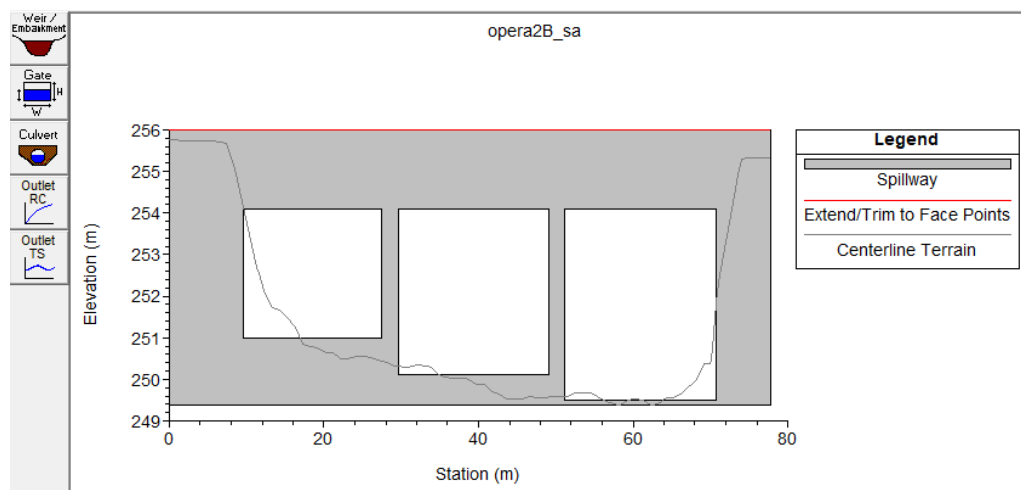



Figura 14 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: implementazione delle opere di attraversamento in Hec Ras.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 28 di 95

3.3.3.2. 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, $n = 0.045 \text{ s/m}^{1/3}$;
- per le aree golenali e/o esterne, potenzialmente inondabili, $n = 0.060 \text{ s/m}^{1/3}$.

3.3.3.3. Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno assegnate sono schematicamente rappresentate in figura. Nello specifico, gli idrogrammi di riferimento imposti come condizione al contorno di monte sono quelli ricavati nello studio idrologico annesso, al quale si rimanda per maggiori dettagli.

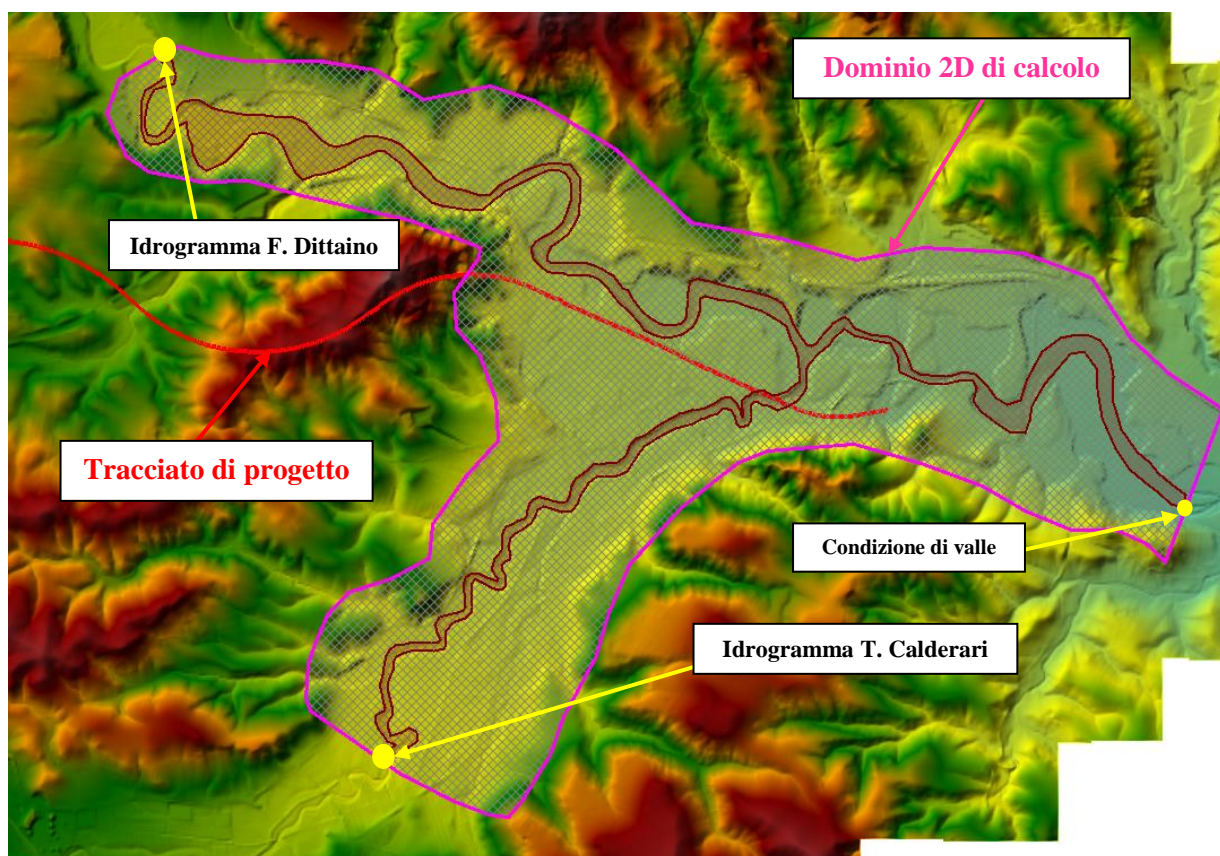


Figura 15 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: condizioni al contorno.

Come condizione di valle, in ragione di una sufficiente estensione del modello (a valle della confluenza), cioè tale da non influenzare al variare di essa la propagazione delle piene del Fiume Dittaino, è stata imposta la condizione di *moto uniforme*.

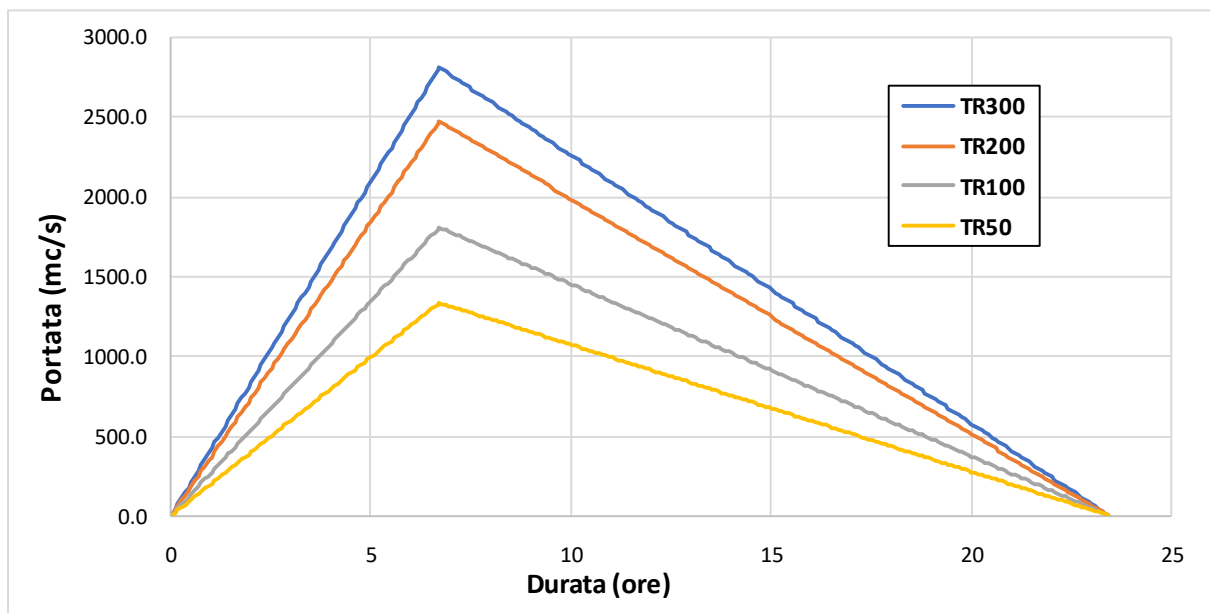


Figura 16 –F. Dittaino: idrogrammi di piena di progetto.

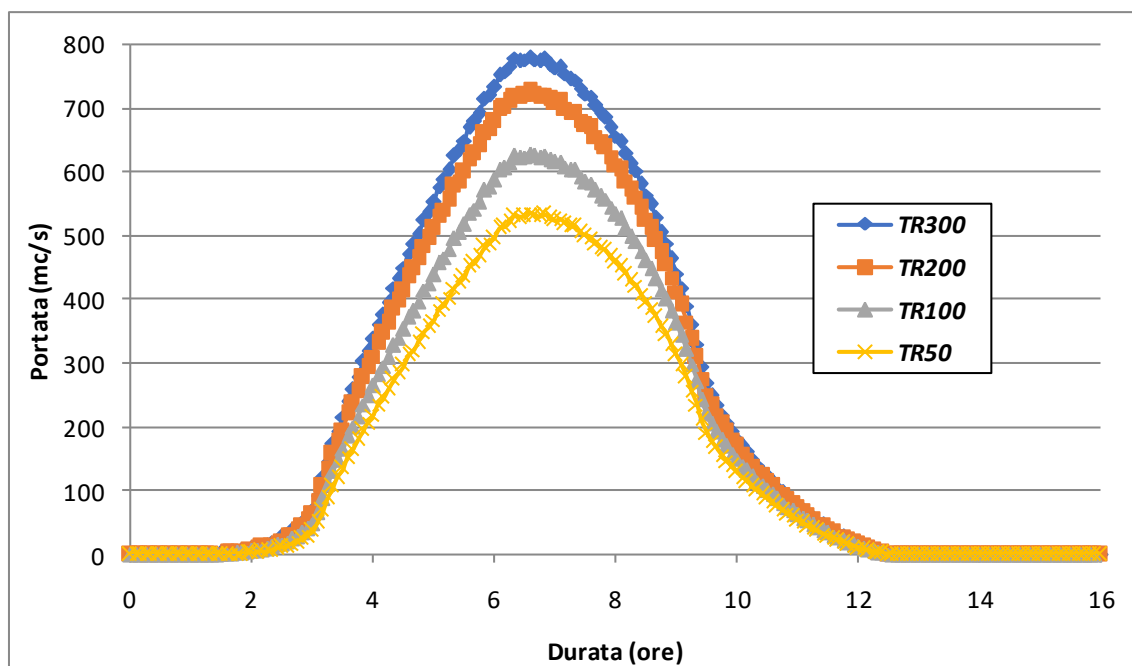



Figura 17 – T. Calderari: idrogrammi di piena di progetto.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 30 di 95

3.3.3.4. Scenari simulati

Come precedentemente introdotto, si è proceduto alla simulazione delle onde di piena del Fiume Dittaino e del T. Calderari (a parità di Tr) riferite ai tempi di ritorno (Tr) di 50, 100, 200, 300 anni, nelle seguenti configurazioni geometriche:

- *ante operam*: si intende la geometria ottenuta dal modello del terreno nello stato di fatto, unitamente alle opere di attraversamento esistenti;
- *post operam*: si intende la geometria ottenuta dall'inserimento delle opere in progetto che possono modificare l'attuale espansione delle piene, nonché di interventi di risoluzione di eventuali criticità di natura idraulica (i.e. opere di sistemazione/riprofilatura, argini,.....)

3.3.3.5. Risultati delle simulazioni numeriche 2D

SCENARIO ANTE OPERAM E CONFRONTO CON PERIMETRAZIONE PAI

Nella figura seguente è riportato il confronto tra le aree di esondazione, corrispondenti ad un tempo di ritorno di 300 anni ottenute nel presente studio, e le aree di pericolosità idraulica P1 (bassa) derivanti dallo studio condotto nell'ambito del P.A.I./P.G.R.A. della Regione Siciliana.

Si osservano modeste/sensibili differenze, imputabili principalmente alla diversa base cartografica (più dettagliata) utilizzata per l'implementazione del modello numerico idraulico 2D, nonché alla simulazione contemporanea della propagazione delle piene del Torrente Calderari, non contemplate negli studi del PAI/PGRA.

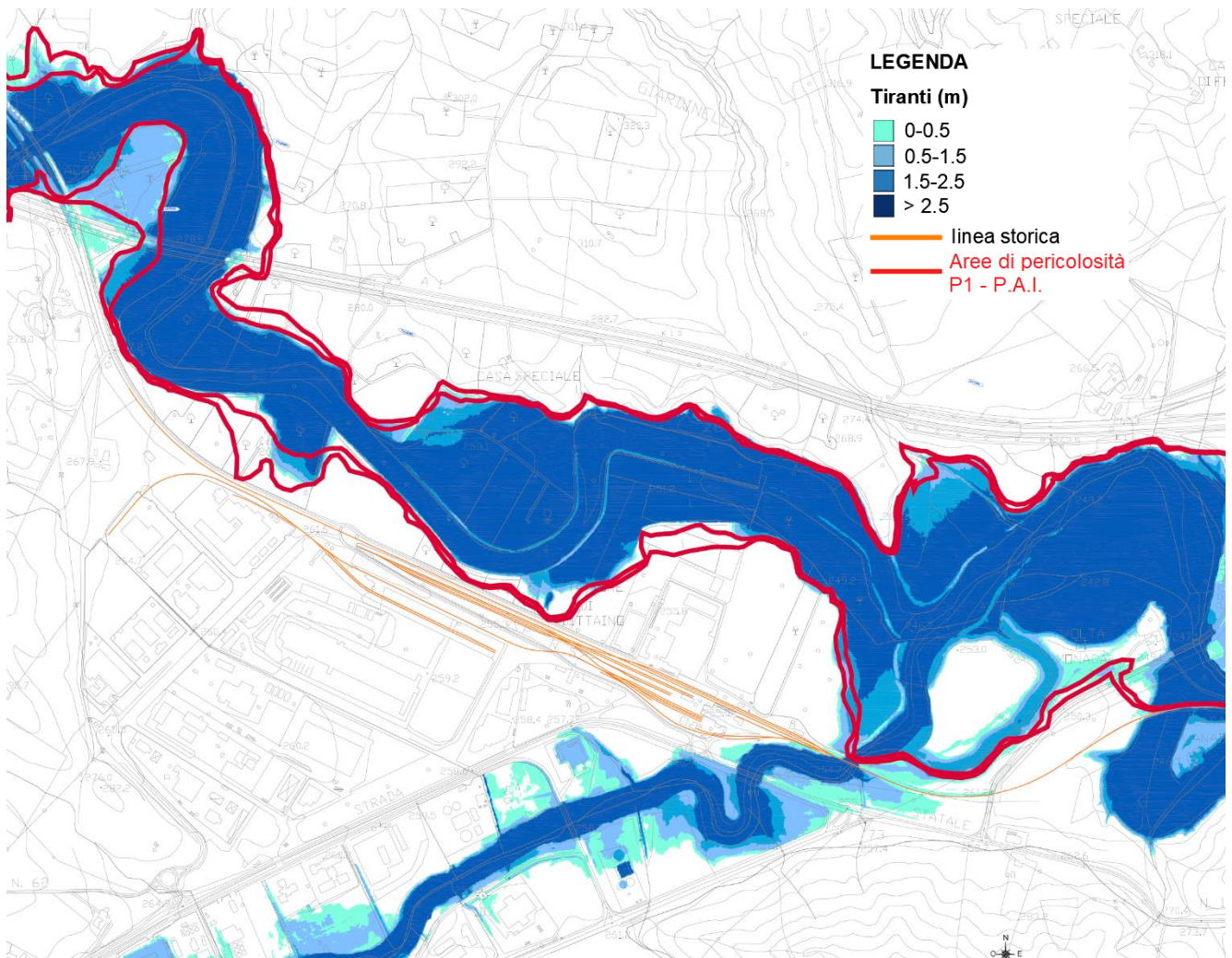


Figura 18 – Confronto tra le aree di pericolosità idraulica P1 (P.A.I.) e le aree di esondazione Tr 300 da modello 2D “Dittaino-Calderari”.

Di seguito, le aree di esondazione nelle condizioni *ante operam*, per i rimanenti tempi di ritorno considerati.

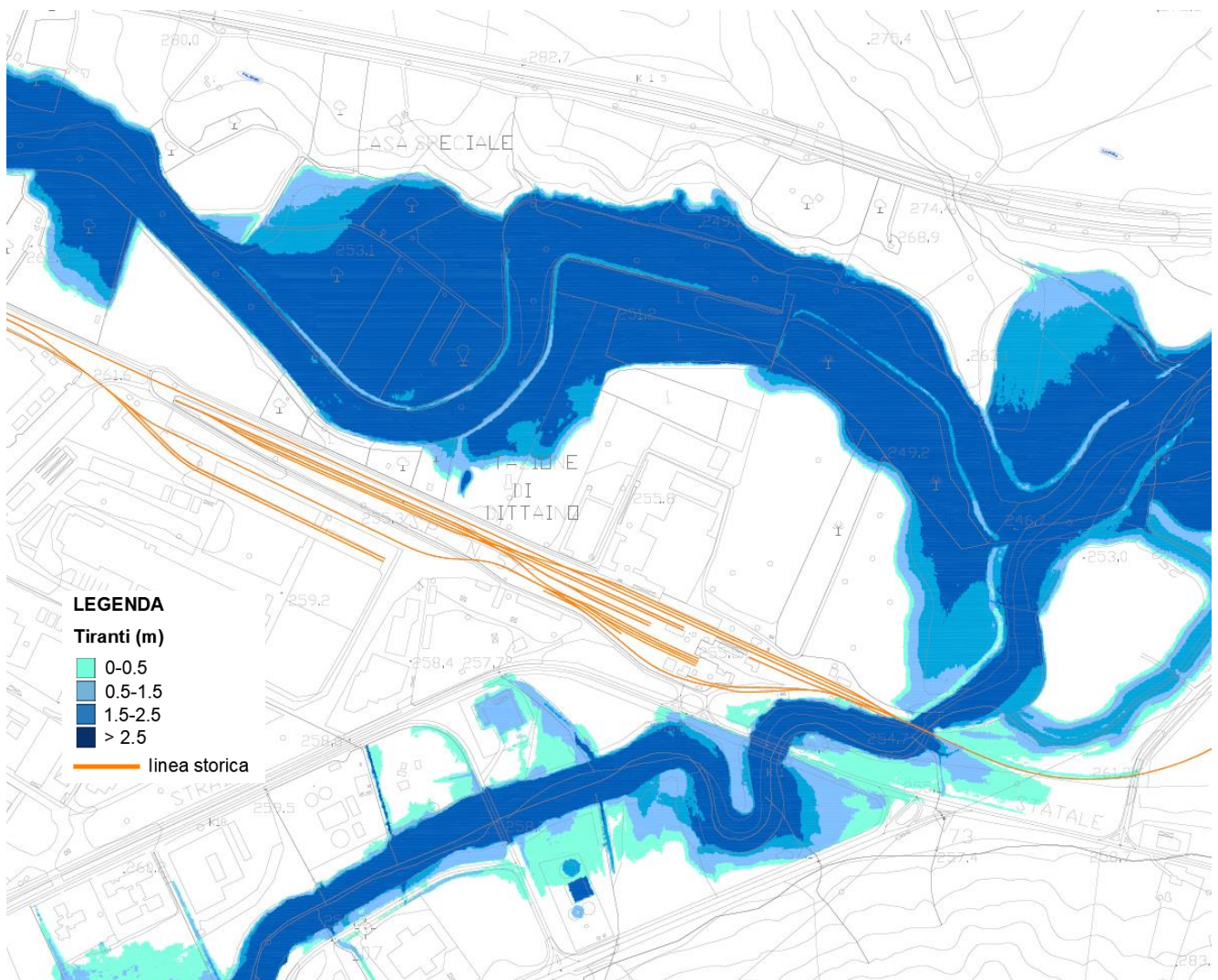


Figura 19 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: aree di esondazione Tr 200, ante operam.

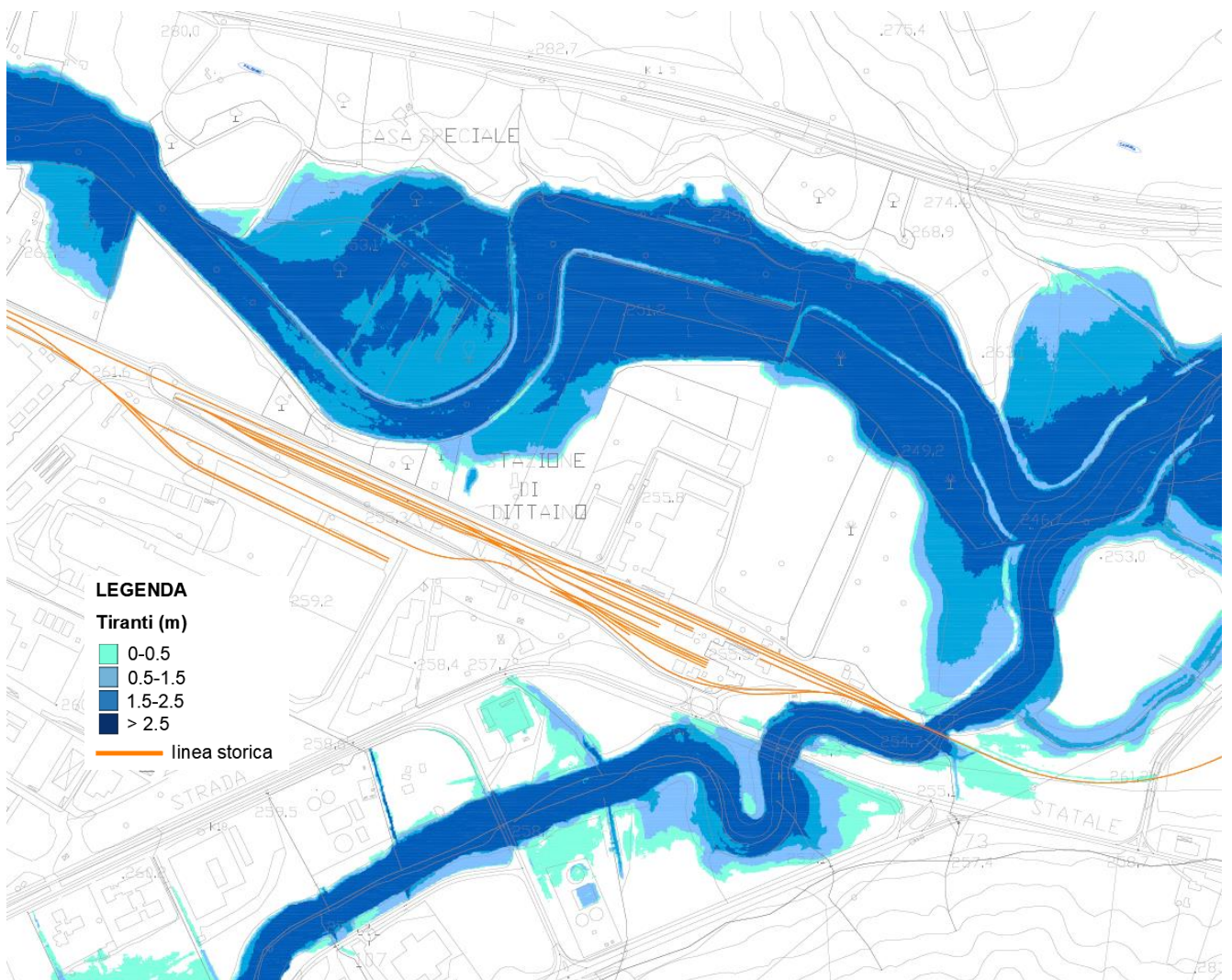


Figura 20 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: aree di esondazione Tr 100, ante operam.

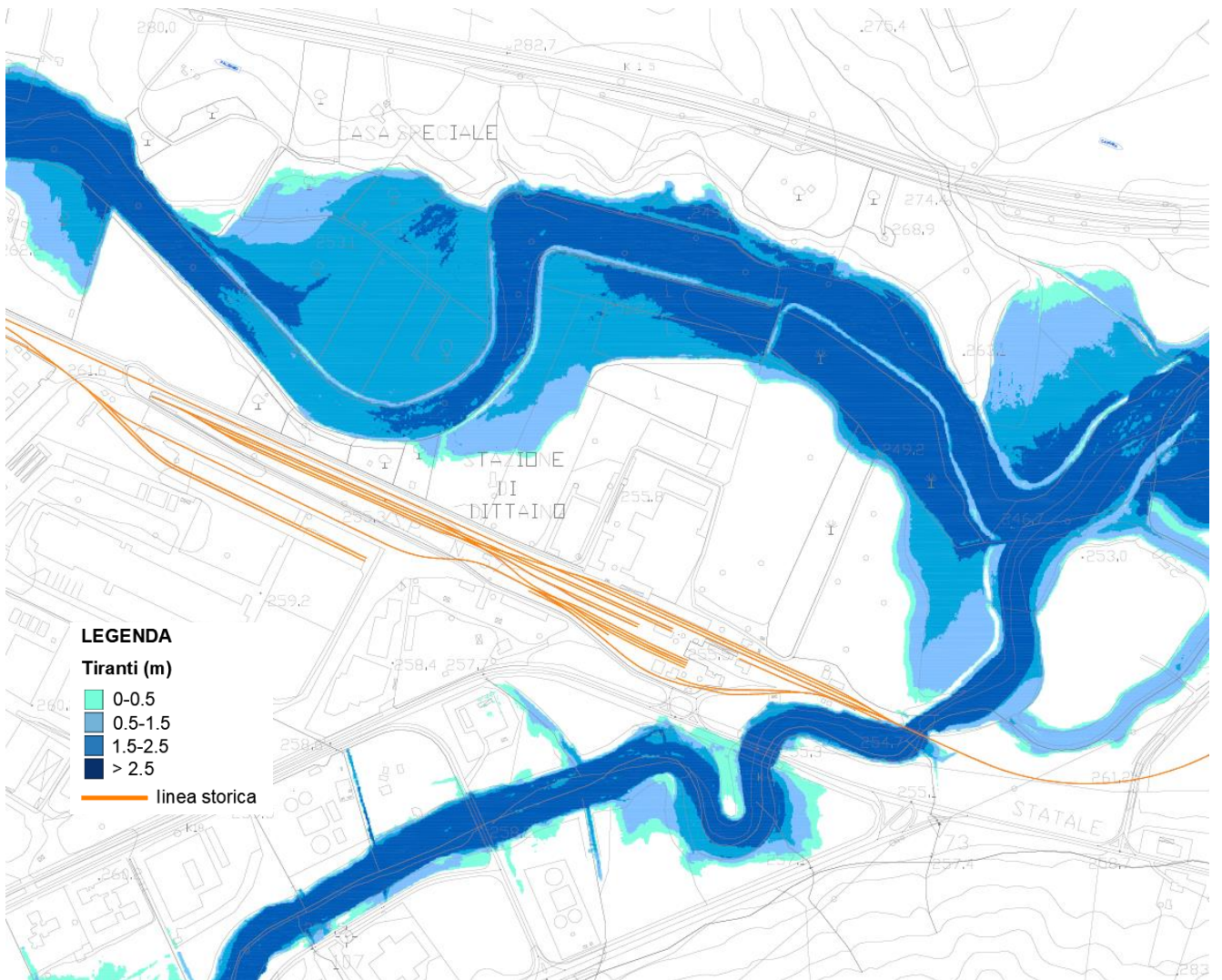



Figura 21 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: aree di esondazione Tr 50, ante operam.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 35 di 95

I risultati delle modellazioni numeriche mostrano l'insufficienza idraulica del ponte ferroviario esistente; nello specifico, la quota di intradosso dell'impalcato si attesta a +251.3 m slm, a fronte di una quota del livello idrico per la portata di progetto $Tr300$ pari a +254.60 m slm. L'attuale ponte ferroviario risulta in realtà insufficiente anche per la portata $Tr50$ anni (quota del livello idrico pari a +253.10 m slm).

Sono evidenti gli effetti di rigurgito indotti dall'opera di attraversamento esistente che (a causa del restringimento della sezione di deflusso) provoca l'esondazione delle piene del T. Calderari nelle aree sede dei "futuri" interventi (previsti in progetto) presso la stazione di Dittaino, nonché l'allagamento della strada statale (SS 192), a monte della linea ferroviaria esistente.

Ai fini della compatibilità idraulica dei "nuovi" interventi, nonché della riduzione della pericolosità idraulica nell'area in esame, si prevedono quindi:

- la demolizione dell'attuale ponte FS
- opere di sistemazione e riprofilatura spondale dell'alveo (per un tratto fluviale di circa 300 metri)
- la realizzazione del nuovo viadotto VI05 sul T. Calderari

L'implementazione di tali opere (interventi di riprofilatura e nuovo viadotto) nel modello numerico 2D sviluppato è di seguito descritta.

SCENARIO POST OPERAM E CONFRONTO CON SCENARIO ANTE OPERAM

Gli interventi previsti (i.e. viadotto VI05 o pila in alveo e opere di riprofilatura spondale) per la risoluzione delle criticità idrauliche evidenziate dalle simulazioni numeriche nello stato "*ante operam*" sono stati implementati mediante opportune modifiche (con geometrie 1D "*ausiliare*" costruite appositamente nel software Hec Ras) del DTM di base.

Di seguito, il confronto tra il DTM nello stato attuale e nella configurazione di progetto, in corrispondenza dell'attraversamento del Torrente Calderari.

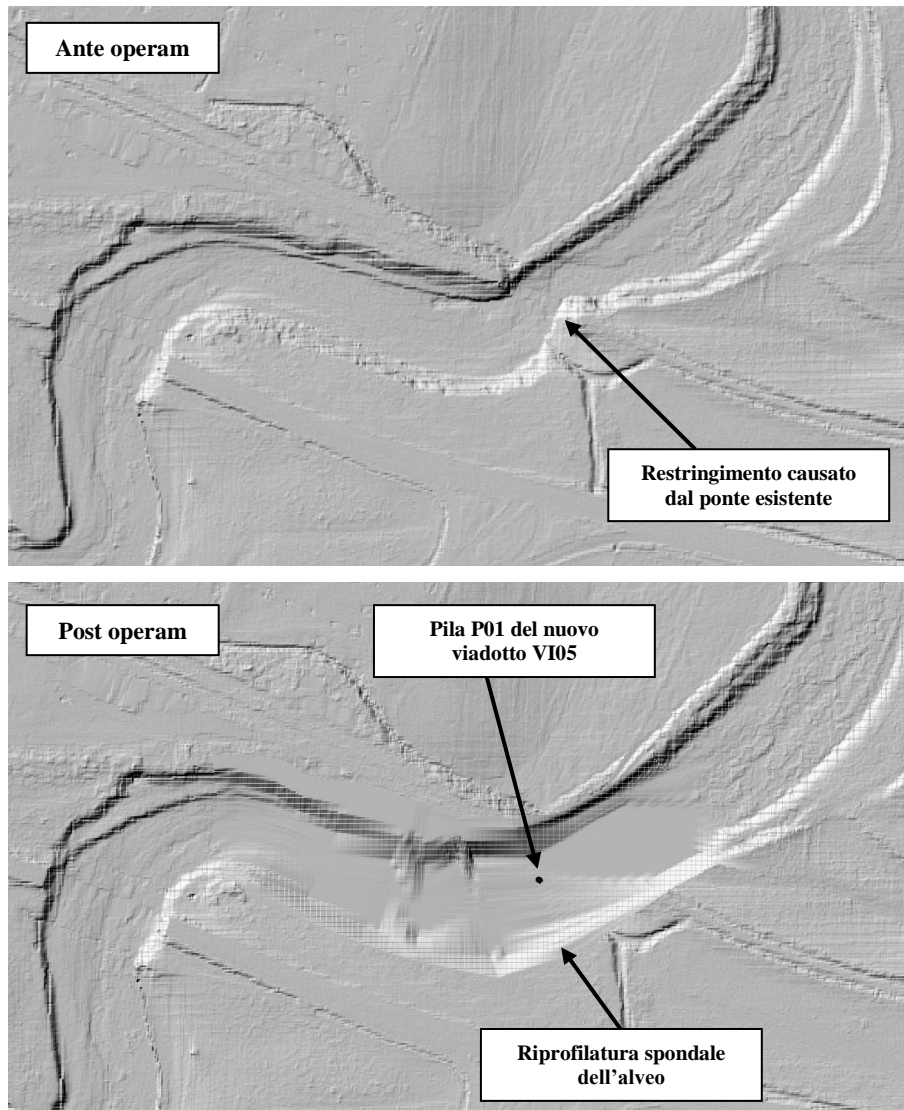


Figura 22 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: implementazione della configurazione post operam.

Nelle figure seguenti si riportano le aree di allagamento nelle condizioni *post operam* per i vari tempi di ritorno considerati.

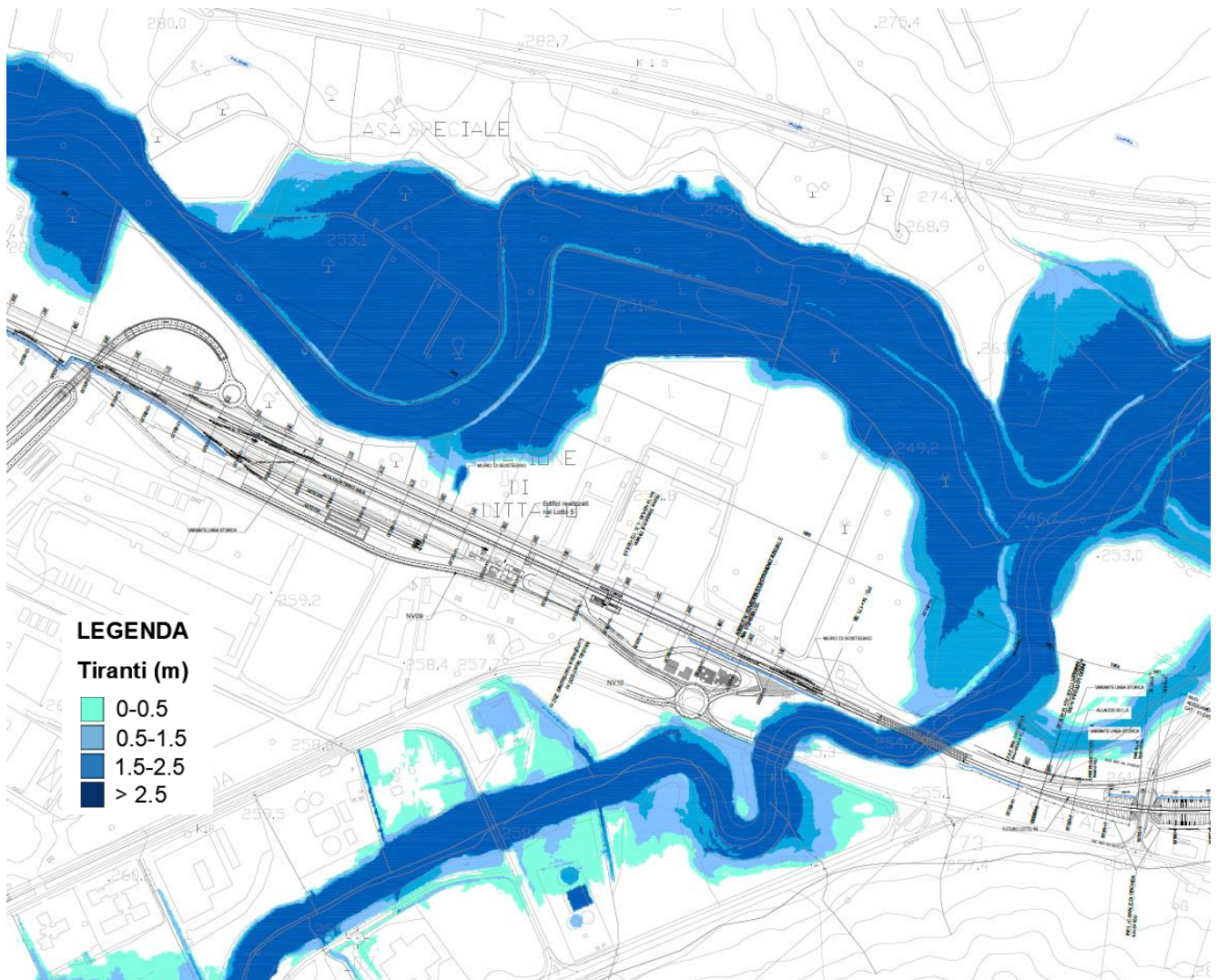


Figura 23 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: aree di esondazione Tr 300, post operam.

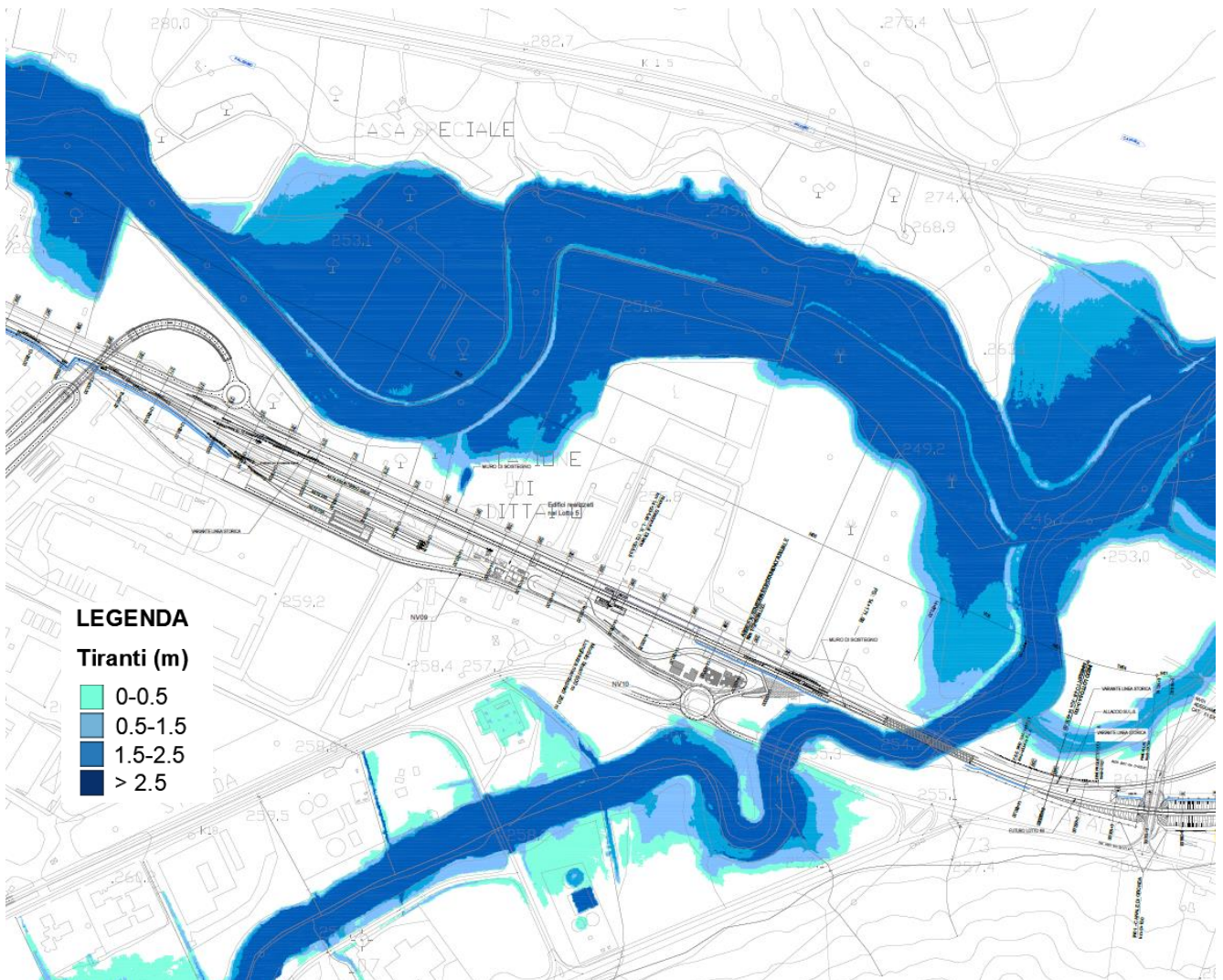


Figura 24 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: aree di esondazione Tr 200, post operam.

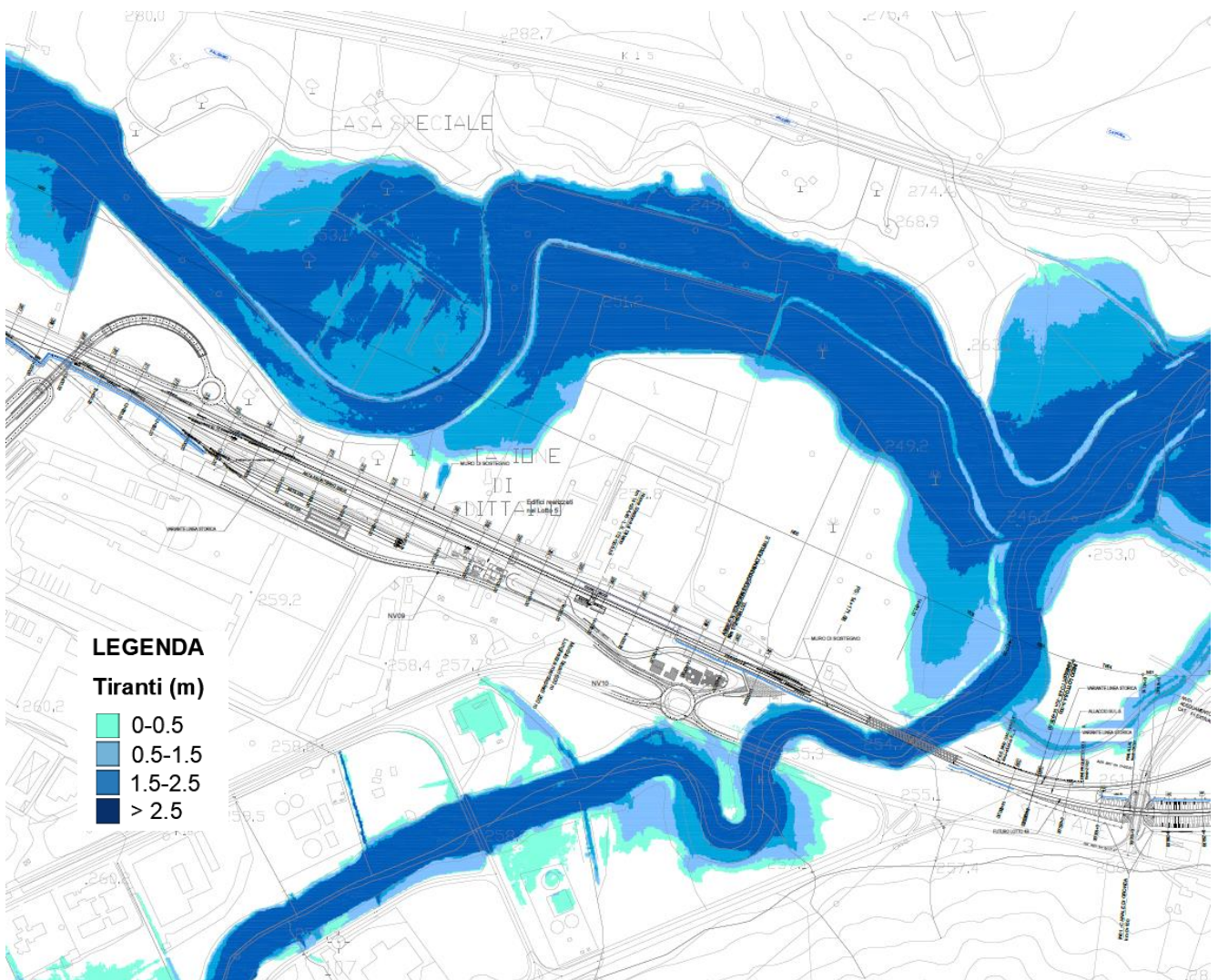


Figura 25 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: aree di esondazione Tr 100, post operam.

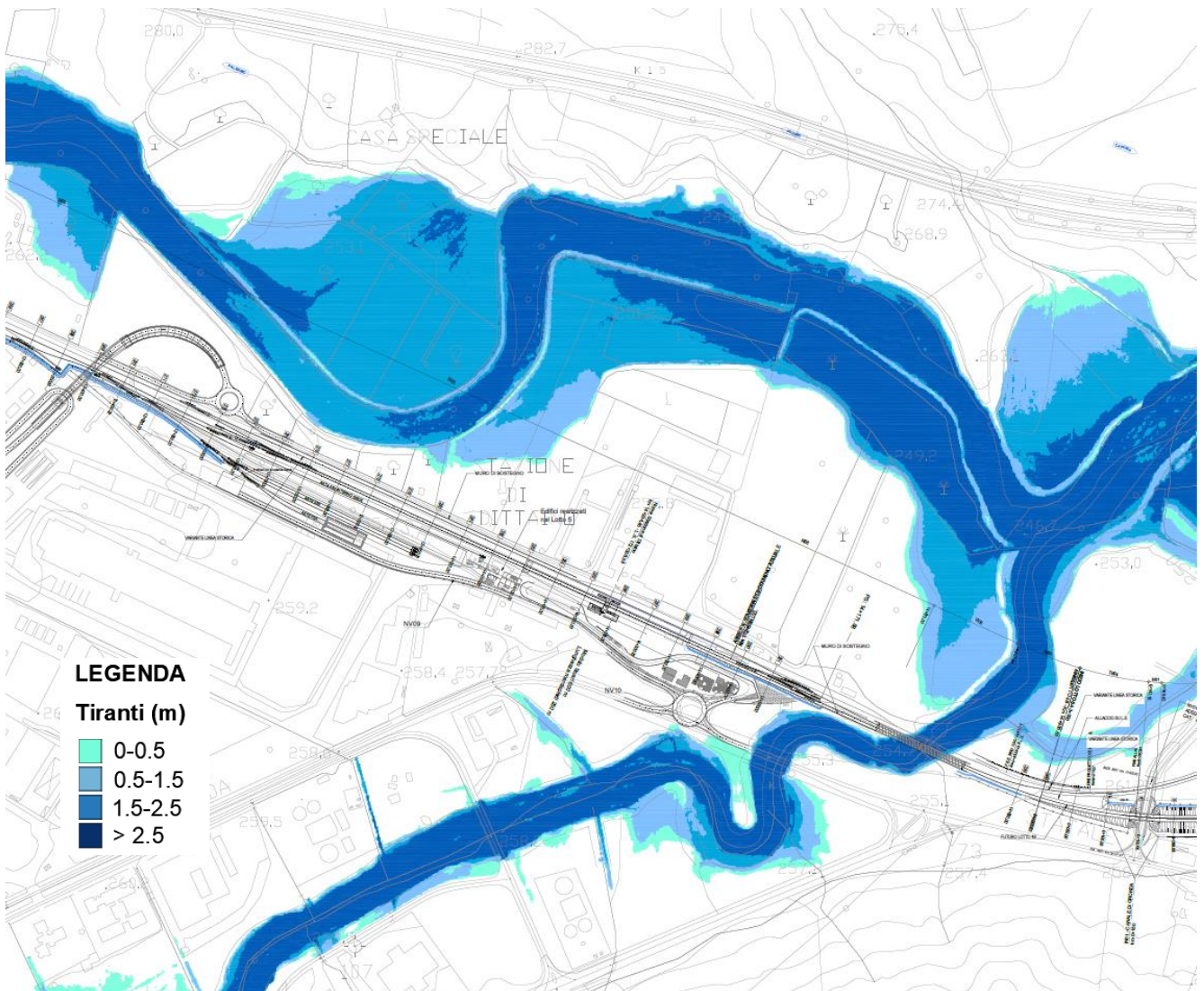



Figura 26 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: aree di esondazione Tr 50, post operam.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 41 di 95

E' evidente il miglioramento dal punto di vista della pericolosità idraulica nell'area di intervento. Le opere previste in progetto consentono di "eliminare" le esondazioni delle piene del T. Calderari in corrispondenza dell'attraversamento ferroviario, nonché l'allagamento della strada statale SS 192 a monte della linea FS.

Nello specifico, le opere di riprofilatura spondale consentono di abbassare i livelli idrici in alveo (la quota del livello idrico *Tr300* si attesta a +252.3 m slm, a fronte di una quota di +254.60 m slm nello stato attuale) e il nuovo viadotto non provoca alcun effetto di rigurgito.

3.3.4. Corso d'acqua alla pk 10+050

Anche per il corso d'acqua alla pk 10+050 è stato implementato un modello numerico bidimensionale tramite il software Hec Ras 5.0.7.

Nello specifico, il modello idraulico relativo al corso d'acqua attraversato dal nuovo viadotto VI04 ha una estensione di circa 1 km e il dominio di calcolo ha una superficie di circa 1 km².


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; questa 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 m² e che le dimensioni minime non fossero inferiori ad un area di 25 m².

Gli infittimenti della mesh (alveo e opere esistenti in alveo) sono stati sviluppati imponendo una dimensione massima degli elementi è pari a 25 m² e una dimensione minima di 10 m².

Il viadotto in progetto, vista l'elevata distanza tra la quota di intradosso e il fondo alveo, è stato simulato modificando opportunamente il DTM di base, introducendo l'ingombro in pianta delle pile di scavalco del corso d'acqua, potenzialmente inondabili.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 42 di 95

Per quanto concerne il coefficiente di scabrezza (Manning, n), come per il modello “Dittaino-Calderari”, 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, $n = 0.045 \text{ s/m}^{1/3}$;
- per le aree golenali e/o esterne, potenzialmente inondabili, $n = 0.060 \text{ s/m}^{1/3}$.

Le condizioni al contorno assegnate sono schematicamente rappresentate in figura, in accordo alle analisi idrologiche annesse, alle quali si rimanda per maggiori dettagli.

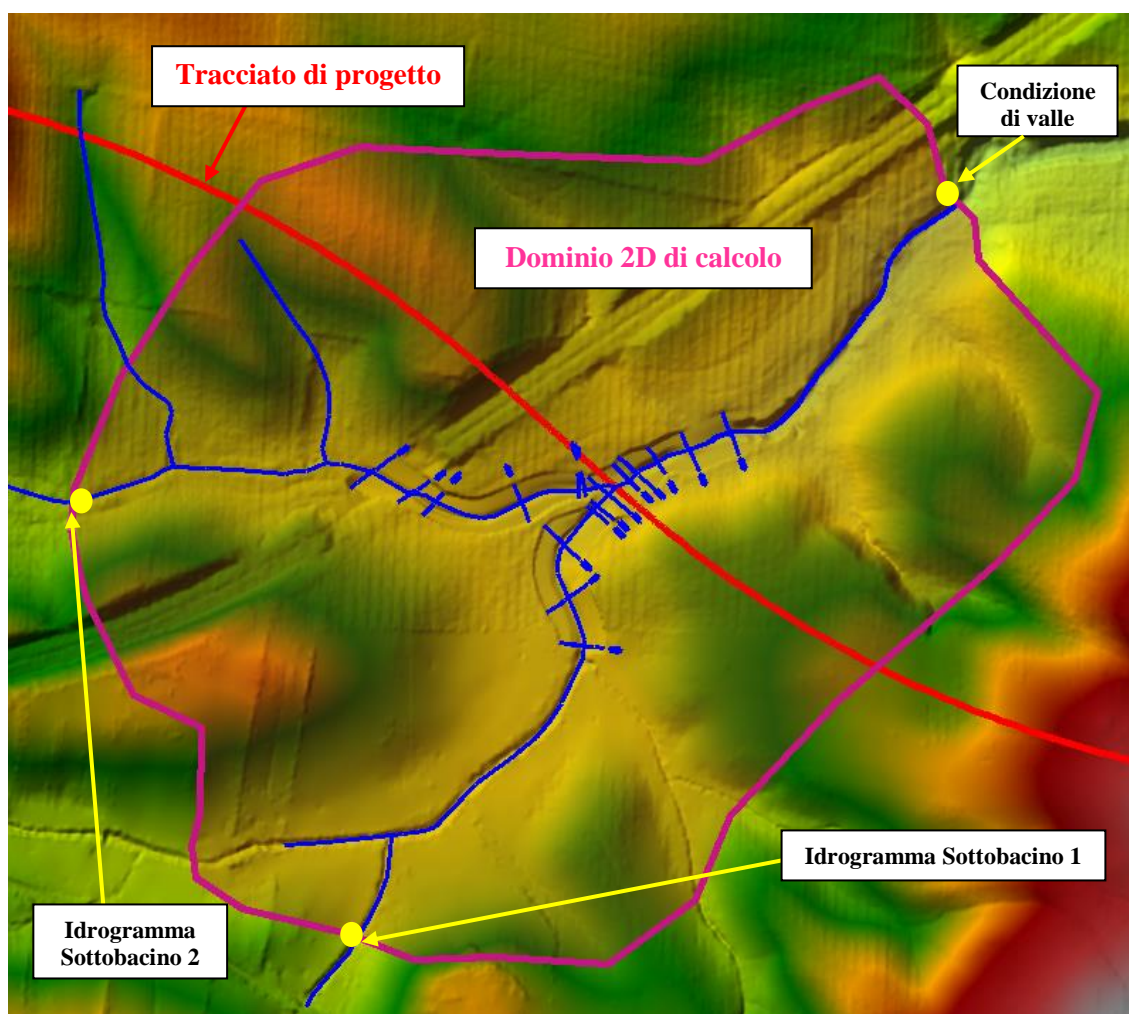


Figura 27 – Modello 2D del corso d’acqua alla pk 10+050: dominio di calcolo e condizioni al contorno.

Nello specifico, per via della biforcazione del corso d'acqua in corrispondenza del nuovo attraversamento, il relativo bacino è stato suddiviso in due sottobacini. Gli idrogrammi di riferimento imposti come condizione al contorno di montesono di seguito riportati. Come condizione di valle, è stata imposta la condizione di *moto uniforme*.

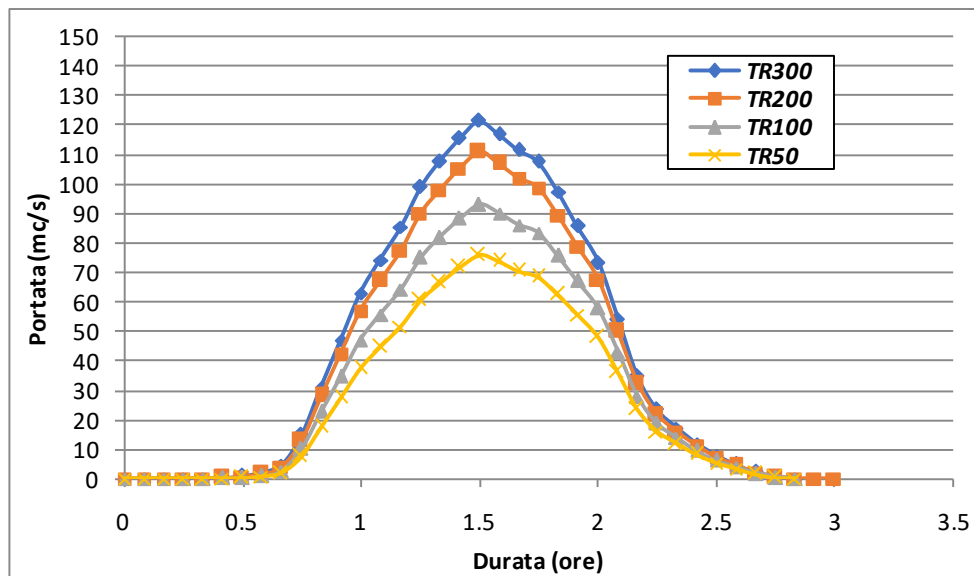


Figura 28 – Corso d'acqua alla pk 10+050, sottobacino 1: idrogrammi di piena di progetto, per differenti tempi di ritorno.

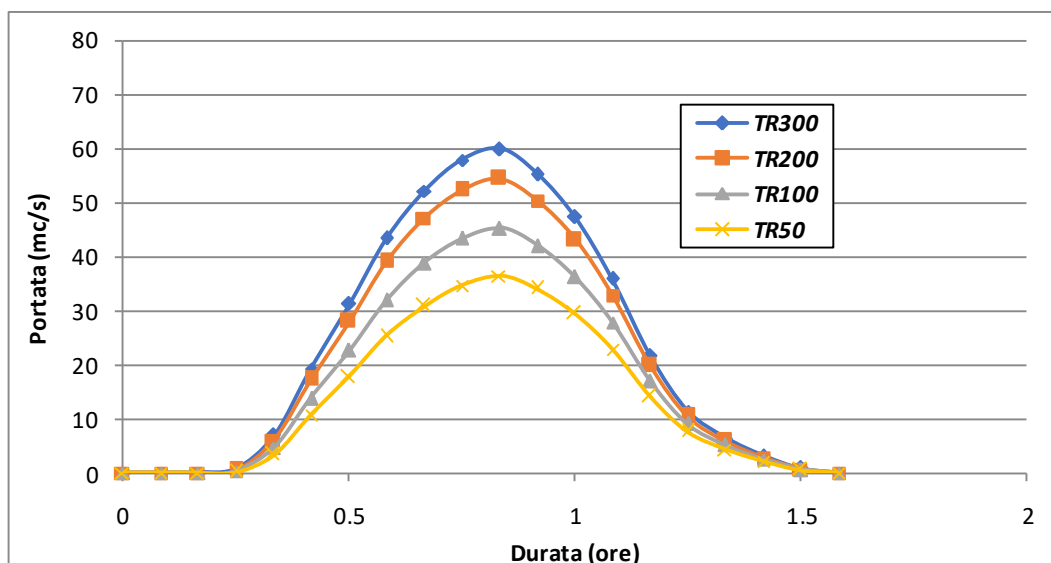


Figura 29 – Corso d'acqua alla pk 10+050, sottobacino 2: idrogrammi di piena di progetto, per differenti tempi di ritorno.

Si è proceduto quindi alla simulazione delle onde di piena riferite ai tempi di ritorno di 50, 100, 200, 300 anni, con riferimento alle configurazioni geometriche *ante operam* (geometria ottenuta dal modello del terreno nello stato di fatto) e *post operam* (geometria ottenuta dall’inserimento delle opere in progetto che possono modificare l’attuale espansione delle piene, nonché di interventi di risoluzione di eventuali criticità di natura idraulica).

3.3.4.1. Risultati delle simulazioni numeriche 2D

Nelle figure seguenti si riportano le aree di allagamento nelle condizioni *ante operame post operamin* corrispondenza del nuovo viadotto VI04, per i differenti tempi di ritorno simulati.

Non si riscontrano differenze tra le due configurazioni geometriche considerate. L’opera di attraversamento in progetto risulta quindi totalmente “*trasparente*” dal punto di vista idraulico.

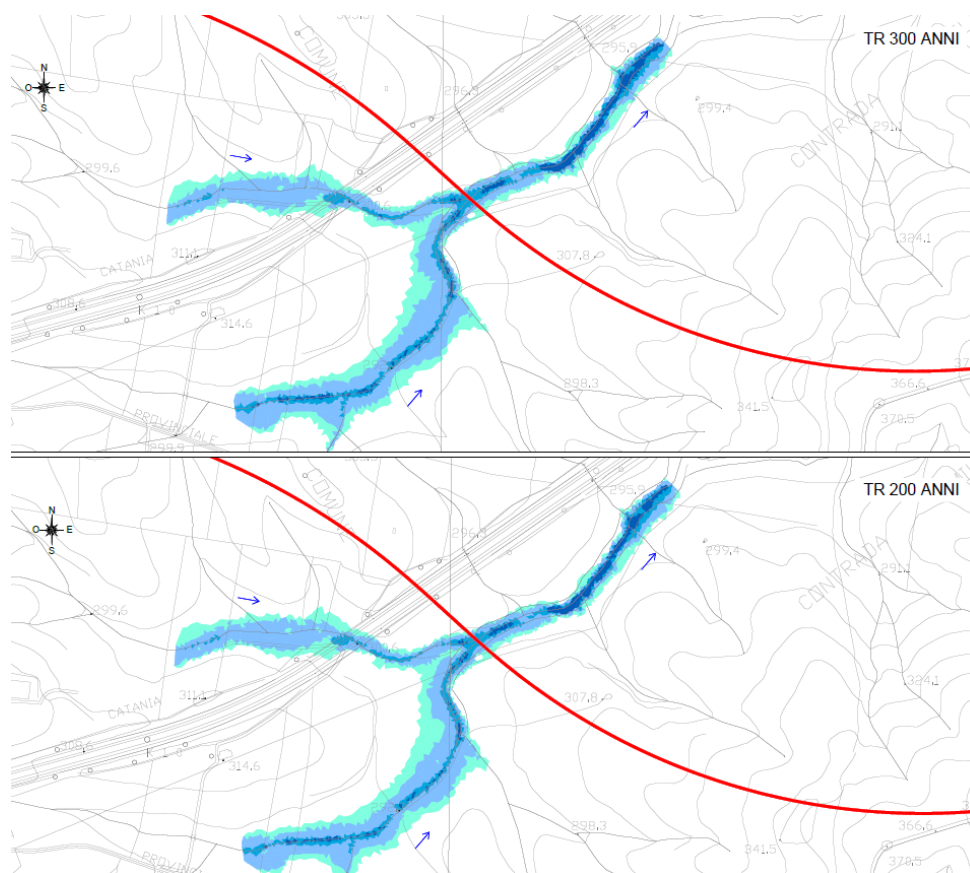


Figura 30 – Modello 2D del corso d’acqua alla pk 10+050: aree di esondazione Tr 300 e Tr200, ante operam.

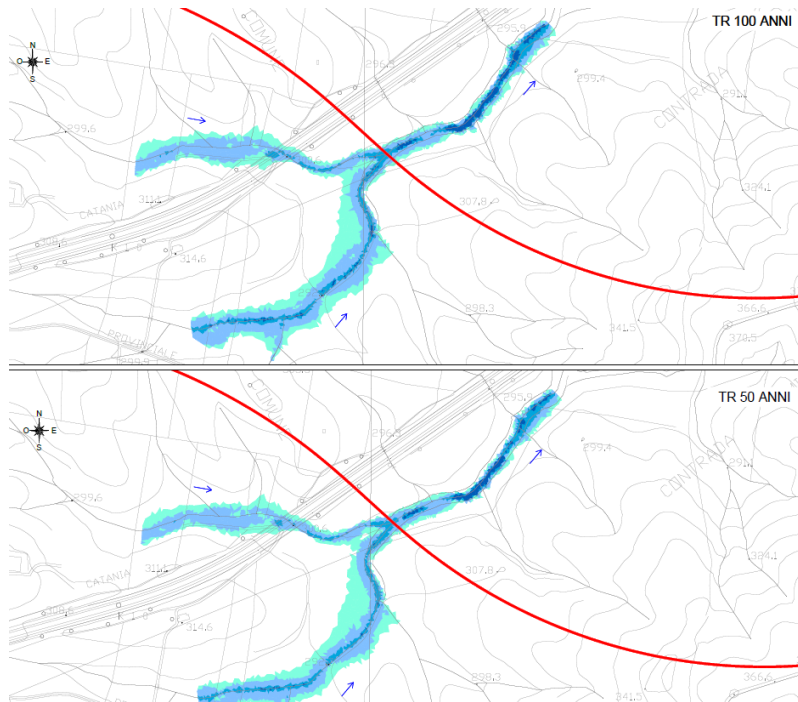


Figura 31 – Modello 2D del corso d’acqua alla pk 10+050: aree di esondazione Tr 100 e Tr50, ante operam.

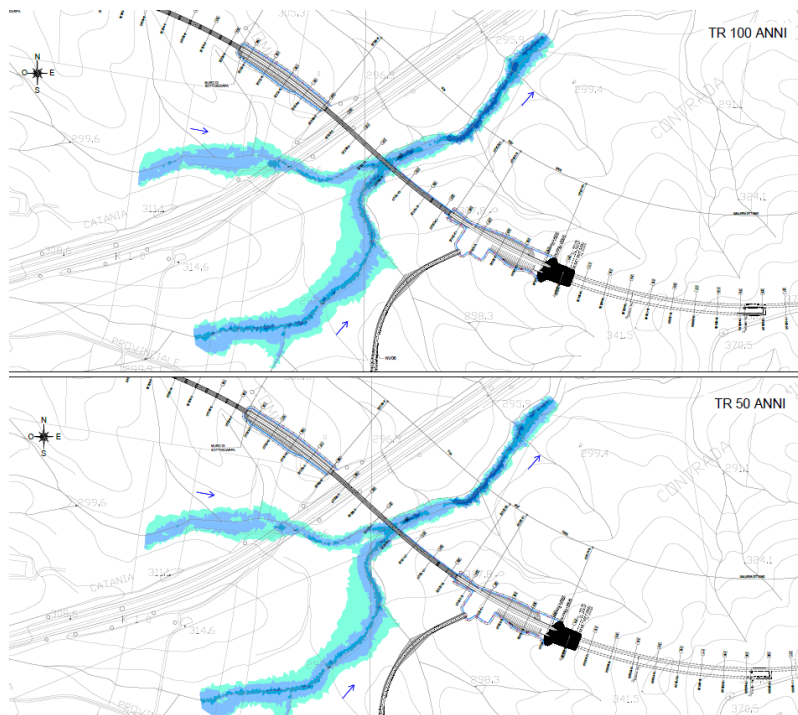


Figura 32 – Modello 2D del corso d’acqua alla pk 10+050: aree di esondazione Tr 100 e Tr50, post operam.

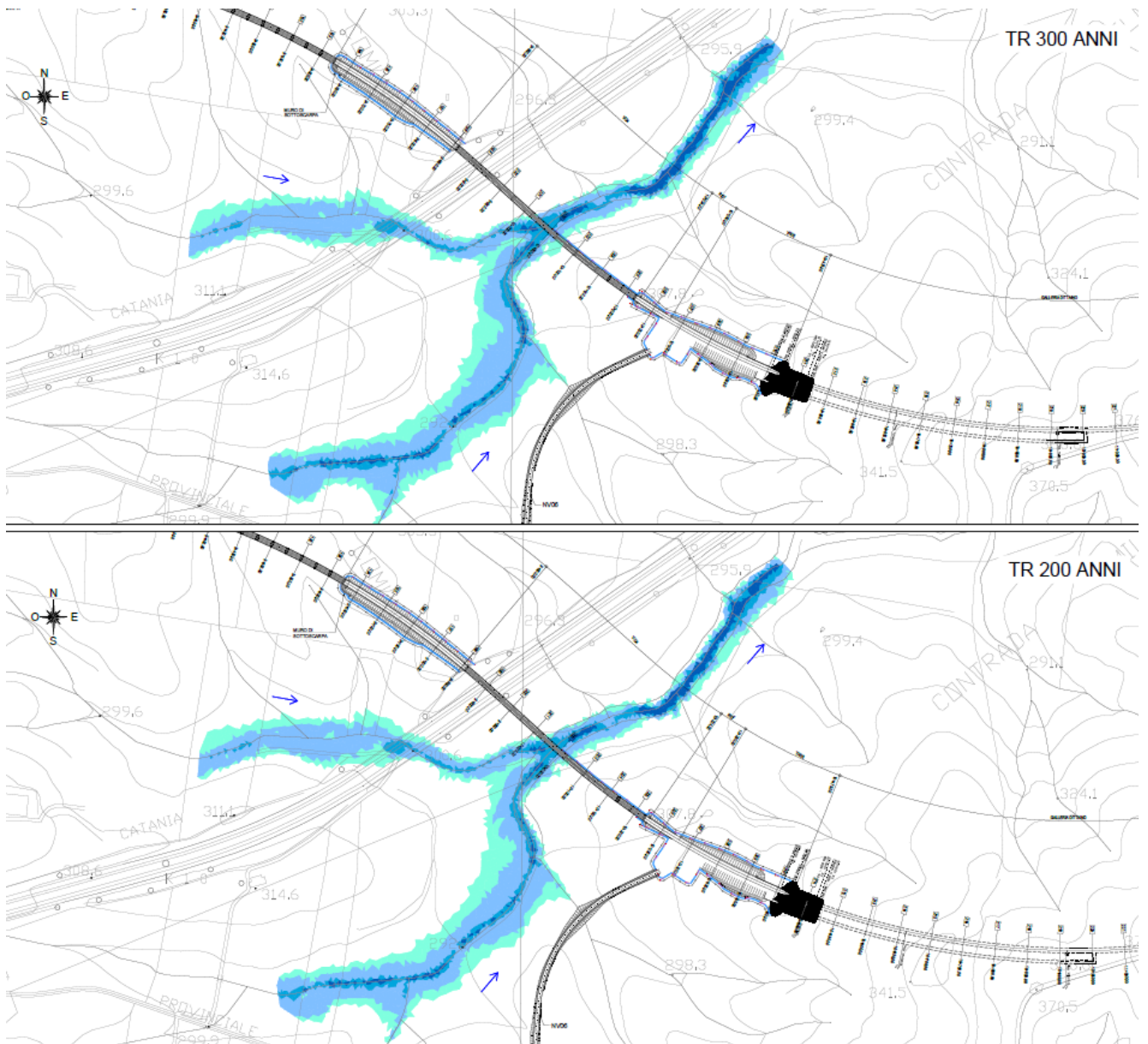


Figura 33 – Modello 2D del corso d’acqua alla pk 10+050: aree di esondazione Tr 300 e Tr200, post operam.

3.4. VERIFICA DEL FRANCO DI PROGETTO

3.4.1. Torrente Calderari (viadotto VI05)

La verifica del franco di progetto eseguita secondo le normative vigenti, con riferimento alle piene *Tr300e* *Tr200* del Torrente Calderari, dimostra la compatibilità idraulica del nuovo viadotto VI05 come riportato nella tabella seguente.

	Quota minima impalcato [m slm]	Livello di piena [m slm]	Carico totale [m slm]	Franco sul livello idrico [m]	Franco sul carico totale [m]	Verifica
Manuale di Progettazione RFI – TR300	254.00	252.30	253.10	+1.70 (> 1.50 m)	+0.90 (> 0.50 m)	OK
NTC2018 TR200		252.20	-	+1.80 (> 1.50 m)	-	OK

Tabella 2 – Viadotto VI05: verifica del franco idraulico.

Inoltre, è garantita una distanza minima di 6 - 7 m tra il fondo alveo e la quota di sottotrave, in ragione di eventuali fenomeni di trasporto solido di fondo e/o di materiale galleggiante.

In particolare, la distanza tra la quota di intradosso e quella di fondo alveo in corrispondenza del viadotto VI05, si attesta a 6.1 m ($q. \text{ intradosso} = 254.0 \text{ m slm}$; $q. \text{ fondo alveo} = 247.9 \text{ m slm}$).

Come descritto in precedenza, il viadotto VI05 è costituito di 2 campate da 70 metri (di luce netta pari a 65 m). La scansione assegnata consente di rispettare la prescrizione di una luce netta minima di 40 metri in direzione ortogonale alla corrente, per pile all'interno della sezione interessata dalla piena di progetto, come riportato nelle NTC2018.

Con riferimento alla figura seguente, riportante la mappa dei vettori velocità in corrispondenza dell'attraversamento in progetto, la luce netta minima in direzione ortogonale alla corrente (rispetto alla quale il nuovo viadotto ha una inclinazione di 41°) si attesta a 43 metri.

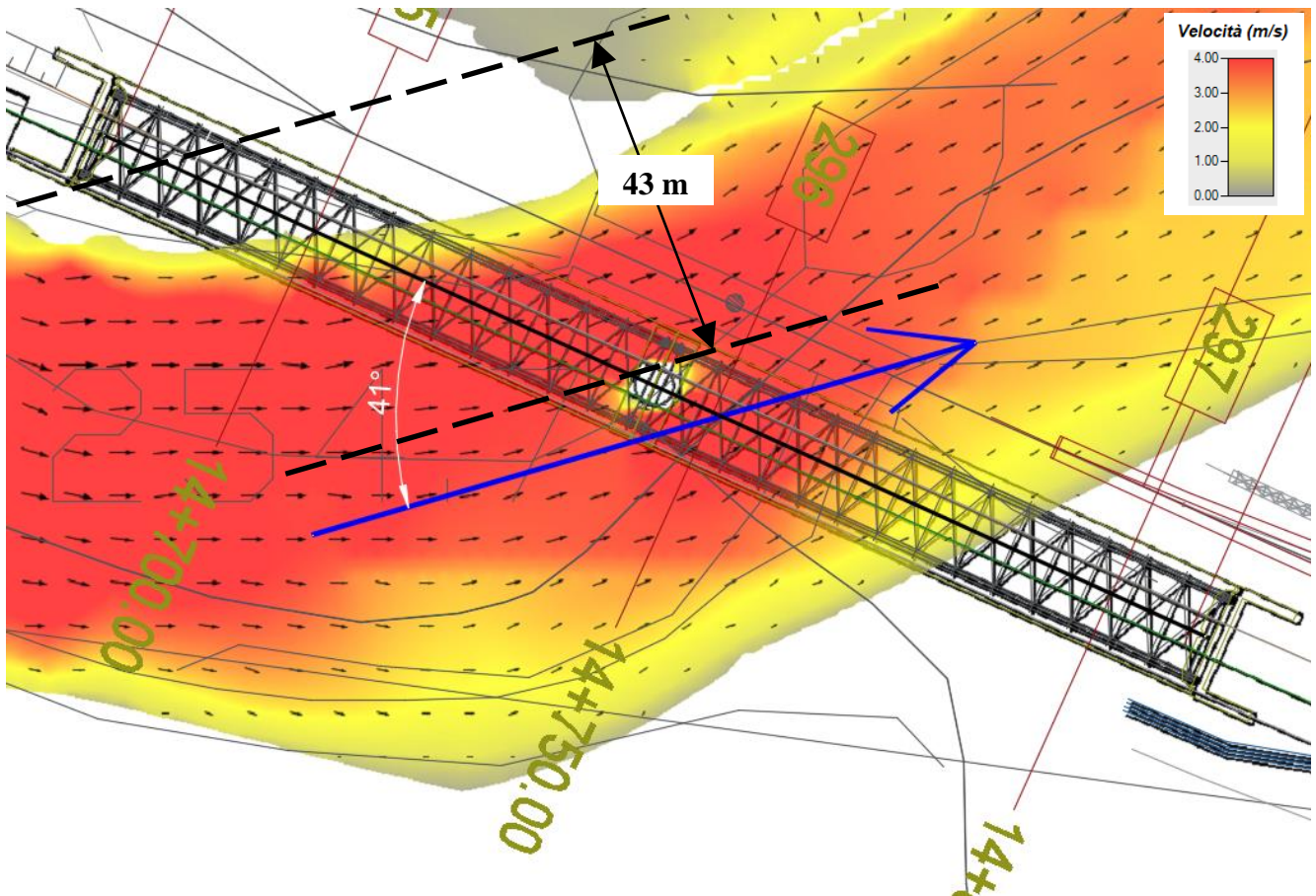


Figura 34 – Modello 2D "Dittaino-Calderari": mappa dei vettori velocità in corrispondenza del VI05.

3.4.2. Corso d'acqua alla pk 10+050 (viadotto VI04)

La verifica del franco di progetto eseguita secondo le normative vigenti, con riferimento alle piene *Tr300* e *Tr200* del corso d'acqua alla pk 10+050, dimostra la compatibilità idraulica del nuovo viadotto VI05 come riportato nella tabella seguente.

Inoltre, è garantita una distanza minima di 6 - 7 m tra il fondo alveo e la quota di sottotrave, in ragione di eventuali fenomeni di trasporto solido di fondo e/o di materiale galleggiante.

	Quota minima impalcato [m slm]	Livello di piena [m slm]	Carico totale [m slm]	Franco sul livello idrico [m]	Franco sul carico totale [m]	Verifica
Manuale di Progettazione RFI – TR300	308.5	290.80	291.30	+17.70 (> 1.50 m)	+17.20 (> 0.50 m)	OK
NTC2018 TR200		290.7	-	+17.80 (> 1.50 m)	-	OK

Tabella 3 – Viadotto VI04: verifica del franco idraulico.

In particolare, la distanza tra la quota di intradosso e quella di fondo alveo in corrispondenza del viadotto VI05, si attesta a 22.1 m ($q. intradosso = 308.5$ m slm; $q. fondo alveo = 286.40$ m slm), a dimostrazione che la necessità di tale opera sia legata a motivi di natura morfologica piuttosto che idraulica.


Come descritto in precedenza, la campata di scavalco del corso d’acqua ha una luce netta pari a circa 47 metri, che consente di scavalcare completamente la sezione d’alveo interessata dalla piena di progetto e quindi di rispettare le prescrizioni riportate nelle NTC 2018, in materia di luce minima tra pile contigue di 40 m.

3.5. VERIFICA DELLA FASE DI CANTIERE

Come anticipato, per la simulazione e la verifica delle fasi di cantiere dei viadotti in progetto VI04 e VI05 (finalizzata al dimensionamento delle opere provvisoriale) è stato implementato un modello idraulico numerico monodimensionale (tramite il software Hec Ras), in regime di moto permanente, del corso d’acqua alla pk 10+050 e del Torrente Calderari.

3.5.1. Viadotto VI05 (Torrente Calderari)

Il modello idraulico numerico 1D (in regime di moto permanente) del Torrente Calderari è stato sviluppato sulla base dei rilievi batimetrici disponibili (descritti nei precedenti capitoli) e ha una estensione di circa 1.5 km. In analogia alle analisi sviluppate in precedenza e nell’ambito del P.A.I./P.G.R.A., per quanto concerne il coefficiente di scabrezza (Manning), per l’alveo inciso è stato adottato il valore $0.045 \text{ s/m}^{1/3}$, mentre alle aree golenali è stato attribuito il valore di $0.060 \text{ s/m}^{1/3}$. Come condizione al contorno di valle, è stata imposta la “Normal Depth” (condizione di moto uniforme).

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 50 di 95

Come precisato anche nello studio idrologico annesso, sul Torrente Calderari, oltre alla realizzazione del nuovo viadotto, ed in particolare della pila centrale in alveo (e della relativa fondazione), sono previsti anche interventi di sistemazione spondale e protezione del fondo. Di seguito, sono quindi trattate separatamente le due tipologie di lavorazioni (i.e. costruzione della pila e realizzazione delle opere di sistemazione/protezione), specificandone/definendone le relative fasi di esecuzione.

Costruzione della pila P1 (VI05) in alveo e delle relative opere di fondazione

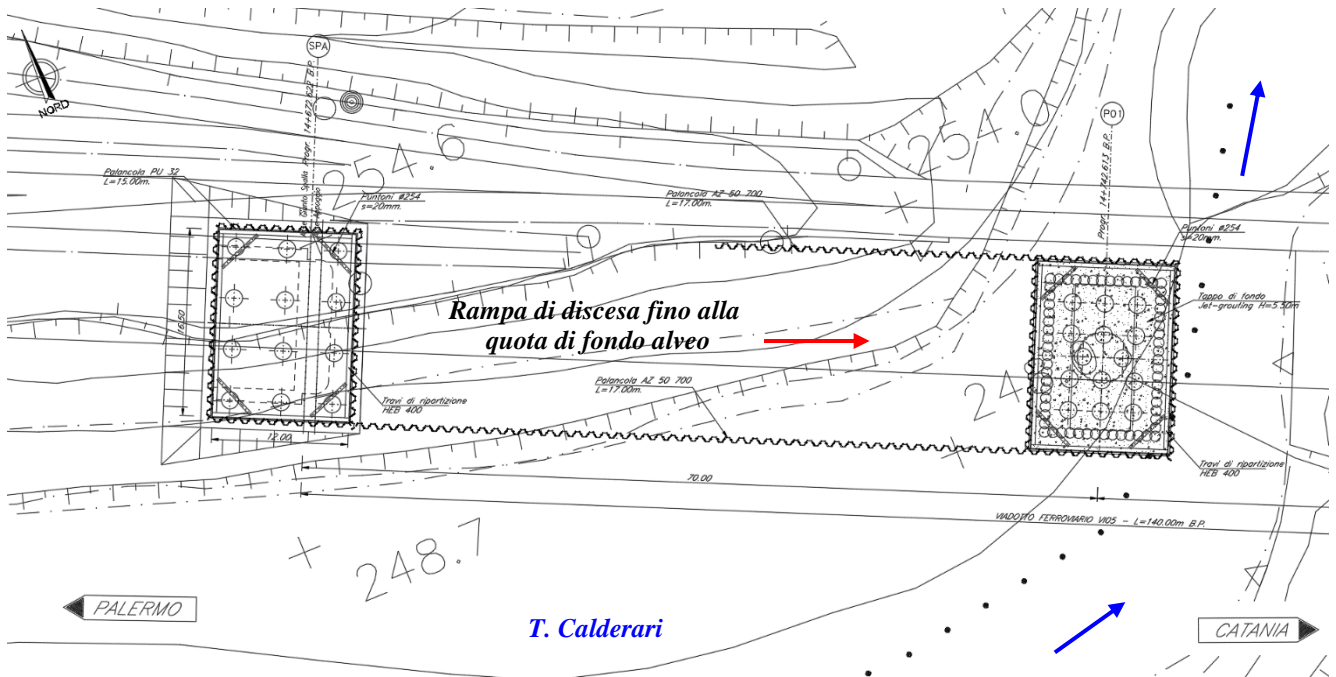
Per la pila P1 (in alveo) del viadotto VI05 sul T.Calderari si prevede la realizzazione di una fondazione a “*pozzo equivalente*” su pali, costituita da una corona esterna di 62 pali secanti (CSP), con diametro $D=920$ mm ed interasse 0.75m, e 14 pali interni trivellati classici di diametro $D=1500$ mm. La lunghezza dei pali è di 35.0 m; lo spessore del plinto è di 3.0 m (per maggiori dettagli si rimanda agli elaborati specialistici di geotecnica).

In ragione della peculiarità delle condizioni in cui verranno realizzate la pila e le relative opere di fondazione (i.e. *in alveo, a monte del ponte ferroviario esistente che rimarrà/dovrà rimanere in funzione durante la costruzione del nuovo viadotto, garantendo la continuità dell'esercizio, prima di essere demolito dopo l'attivazione della realizzanda linea FS*), l'esecuzione delle lavorazioni dovrà essere necessariamente subordinata alle seguenti prescrizioni:

- limitazione delle attività lavorative in alveo (soltanto) nel periodo estivo (durata massima $D = 3$ mesi);
- conseguente suddivisione dei lavori di costruzione della pila P1 e delle relative fondazioni in più fasi, su più anni (in relazione alla durata complessiva dell'intero intervento);
- predisposizione di un sistema di allerta/allarme, sotto il coordinamento della Protezione Civile, per l'interruzione preventiva e temporanea (cioè necessaria a garantire la sicurezza idraulica della linea durante l'evento di piena) dell'esercizio e per la salvaguardia del cantiere.

Sotto tali condizioni/prescrizioni, le lavorazioni relative alla costruzione della pila possono essere suddivise nelle seguenti fasi:

- **Fase A1** - realizzazione (in alveo, nel periodo di secca/magra) dei 14 pali interni trivellati di diametro $D=1500$ mm, in assenza di opere provvisorie (durata stimata = 15 giorni)
- **Fase A2** - realizzazione della corona esterna di 62 pali secanti (con diametro $D=920$ mm ed interasse 0.75m), del plinto (spessore di 3 m) e del fusto pila, previa installazione/infissione di palancole metalliche provvisorie in alveo, come mostrato nella figura seguente (durata stimata = 3 mesi)



Si è proceduto quindi alla verifica idraulica del Torrente Calderari finalizzata al dimensionamento delle palancole provvisorie, necessarie per la fase di cantiere denominata “**Fase A2**”.

Con riferimento allo studio idrologico annesso, ed in particolare ad una durata massima dei lavori in alveo $D = 3$ mesi (soltanto nel periodo estivo, di magra/secca), la “portata di cantiere” da considerare ammonta a 161.2 mc/s ($Tr = 1$ anno). Le opere provvisionali (palancolato) sono state simulate nel modello 1D Hec Ras tramite l’opzione “Obstructions”.

Di seguito, si riportano i risultati in termini di livelli idrici nelle sezioni

- immediatamente a monte del ponte FS esistente e quindi in corrispondenza del palancolato
- in corrispondenza del ponte FS esistente

e di profilo di rigurgito (per la portata $Q = 161.2$ mc/s).

Il livello idrico massimo atteso (immediatamente a monte del ponte FS esistente), in corrispondenza del palancolato, si attesta a **+251.6 m slm** (per il dimensionamento e le verifiche strutturali del palancolato è stato considerato cautelativamente un franco di **+0.80 m** al di sopra del livello idrico da modello idraulico, da cui **una quota del livello idrico “di cantiere” di riferimento di +252.40 m slm**; per maggiori dettagli si rimanda all’elaborato specialistico RS3V40D09CLVI0503001A).



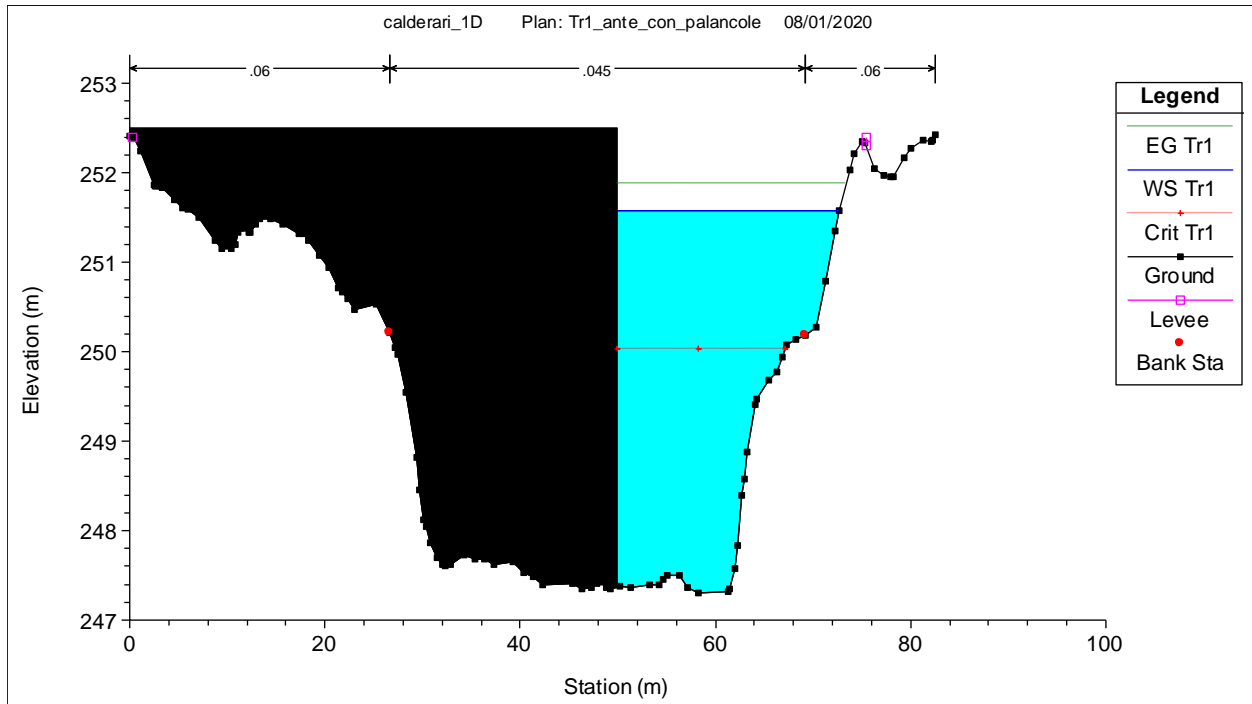
DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO
 NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA

PROGETTO DEFINITIVO
 TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)

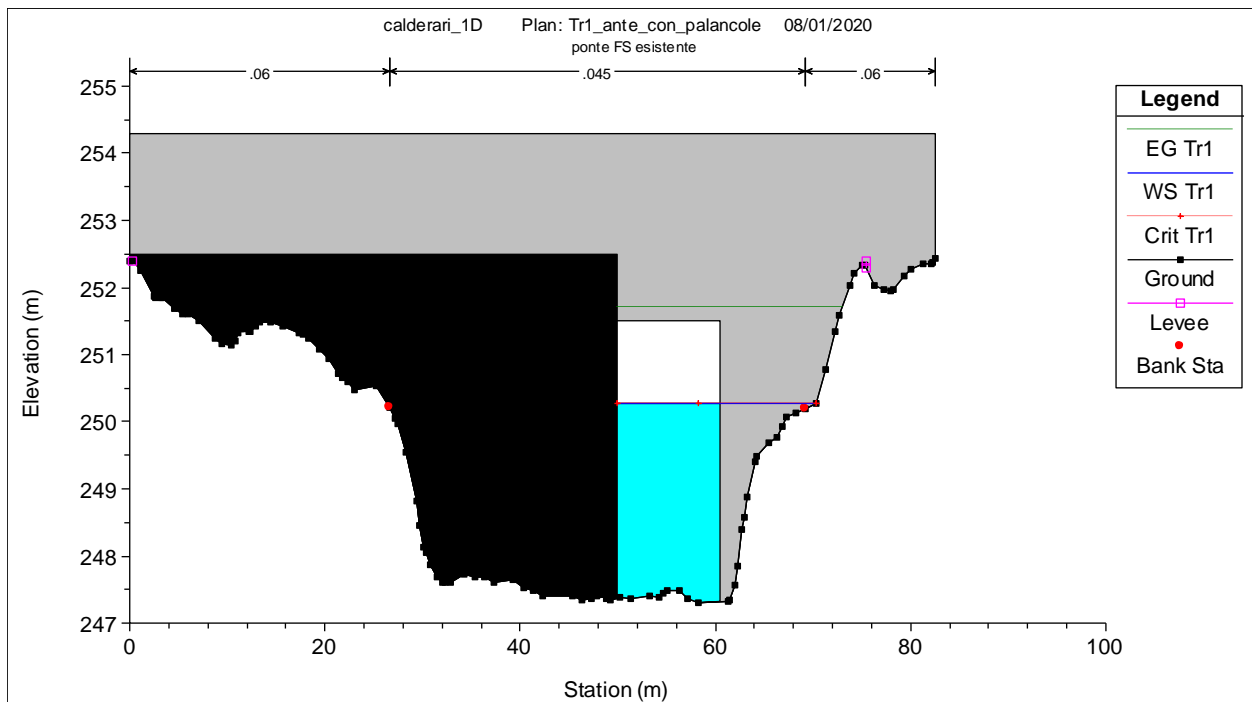
RELAZIONE IDRAULICA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 09 RI	ID 00 02 001	D	52 di 95

Sezione immediatamente a monte del ponte FS esistente

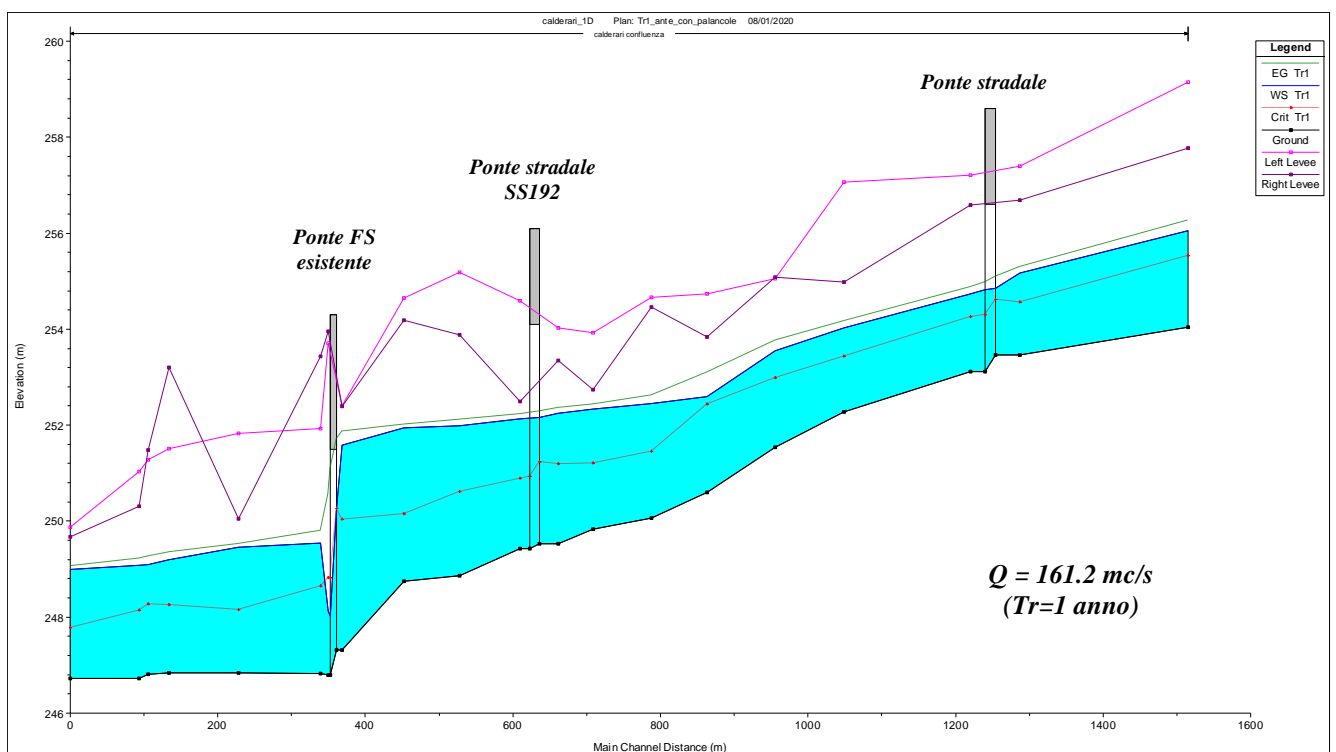


Sezione in corrispondenza del ponte FS esistente

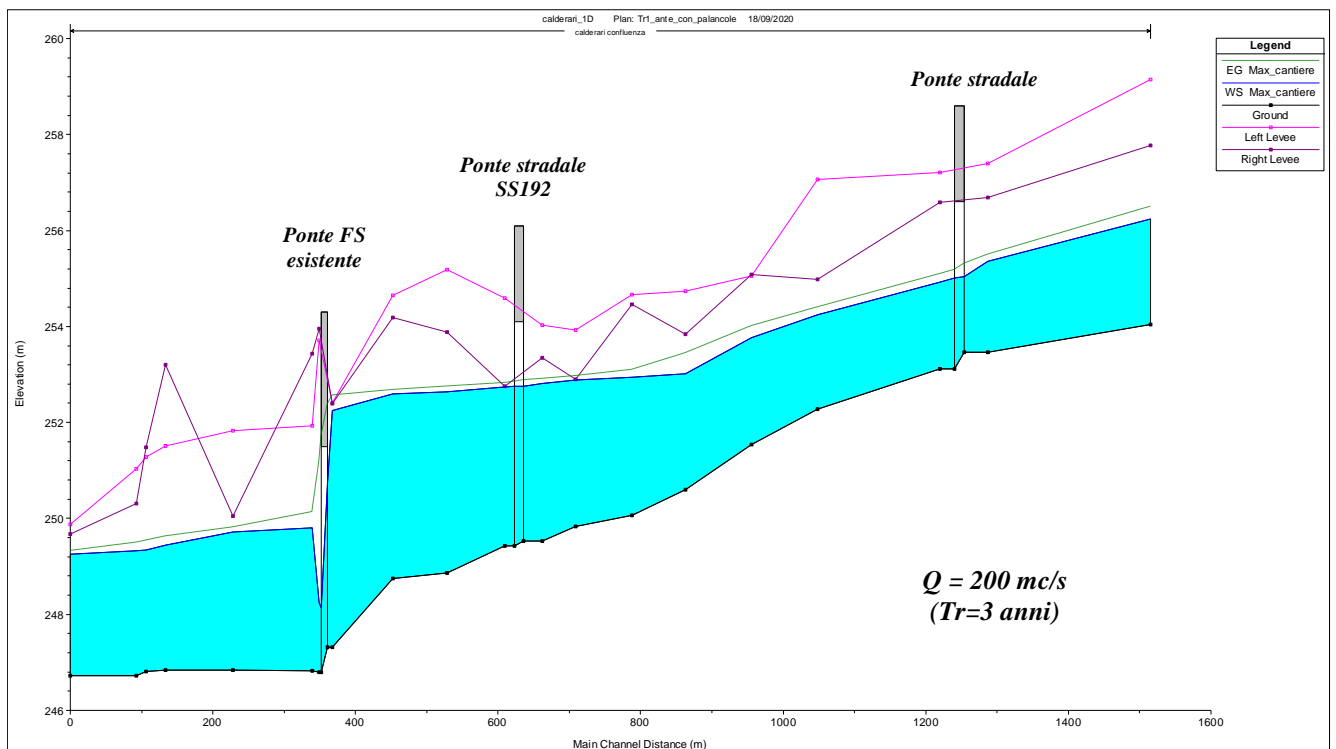


In corrispondenza del ponte FS esistente la corrente idrica, a causa del restringimento della sezione idraulica (dovuto sia all'opera provvisoria sia al ponte esistente stesso), defluisce attraversando le condizioni di stato critico, alla quota di +250.3 m slm, a fronte di una quota di intradosso minima di +251.3 m slm, e comunque una quota del piano ferro di +253.50 m slm.


Con riferimento alla quota del livello idrico nella sezione immediatamente a monte del ponte FS esistente, precedentemente indicata (+251.6 m slm), si precisa che l'impalcato dell'attuale opera di attraversamento (a quota minima +251.3 m slm) non è a corpo/getto pieno, ma a travata reticolare, in carpenteria metallica, e comunque, su segnalazione preventiva del sistema di allarme (da installare necessariamente come sopra prescritto), in tale situazione sarà interrotto temporaneamente l'esercizio ferroviario, a salvaguardia della sicurezza idraulica della linea FS. Inoltre, come mostrato nella figura seguente, l'effetto di rigurgito provocato dal restringimento della sezione, dovuto all'opera provvisoria in alveo e all'attuale ponte FS, **non** determina esondazioni della piena di cantiere e non ne influenza il deflusso in corrispondenza delle opere di attraversamento immediatamente a monte della linea FS. Nello specifico, con riferimento alla portata considerata ($T_r = 1$ anno), il livello idrico in corrispondenza del ponte stradale a monte della linea FS si attesta +252.20 m slm, a fronte di una quota di intradosso di +254.10 m slm.



Alla portata di riferimento per il dimensionamento delle opere provvisionali (**161.2 mc/s**), corrispondente ad un tempo di ritorno di 1 anno, è associato un **rischio idraulico pari al 30% circa** (per una permanenza in alveo o durata dei lavori di 3 mesi), così come valutato nella relazione idrologica annessa (rif. RS3V40D09RIID0001001B). Come sopra descritto, tale portata transita nel tratto fluviale di interesse (nella configurazione di cantiere prevista in progetto, i.e. con opere provvisionali - palancole - in alveo) con un discreto franco rispetto al ciglio superiore delle sponde. In tale configurazione di cantiere, la portata massima transitabile senza esondazioni nel tratto fluviale di interesse (i.e. livelli idrici inferiori o uguali al ciglio superiore delle sponde) ammonta a **200 mc/s circa**, come mostrato dal profilo di rigurgito riportato nella figura seguente, corrispondente ad un **tempo di ritorno di 3 anni**, da cui una riduzione del rischio idraulico dal 28% (come sopra dichiarato) al **9.5%** (a parità di durata dei lavori).



Usualmente, nella determinazione del tempo di ritorno dell'evento di riferimento per il dimensionamento di opere provvisionali in alveo, si assume una probabilità di accadimento o rischio pari al 5-10% (rif. Da Deppo et al., 2004). Inoltre, per tale portata ($Tr = 3 \text{ anni}$), il livello idrico in corrispondenza del ponte FS esistente, delle opere provvisionali (palancole) e del ponte stradale a monte della linea FS si attesta rispettivamente a +250.7 m slm (da cui un franco idraulico di 60 cm, a fronte di 1 m per la portata con $Tr = 1 \text{ anno}$), +252.3 m slm (contro

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 55 di 95

una quota di sommità delle palancole di +253.4 m slm) e +252.80 m slm (a fronte comunque di una quota di intradosso di +254.10 m slm). Pertanto, sebbene dimensionate per una portata con tempo di ritorno di 1 anno, le opere provvisionali previste in progetto risultano in realtà verificate (*in termini sia di franco idraulico sia di effetti sulle condizioni di deflusso in alveo*) per un portata corrispondente ad un tempo di ritorno di 3 anni, sufficientemente cautelativa in relazione al valore del rischio idraulico ad essa associato, conforme a quello generalmente assunto nella pratica ingegneristica.

Realizzazione delle opere di sistemazione idraulica

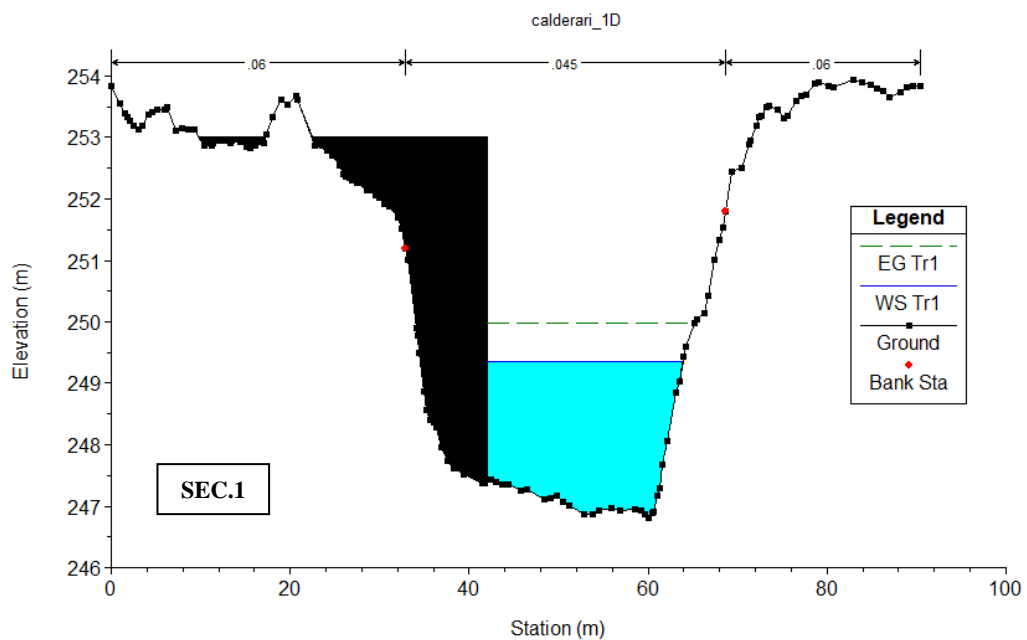
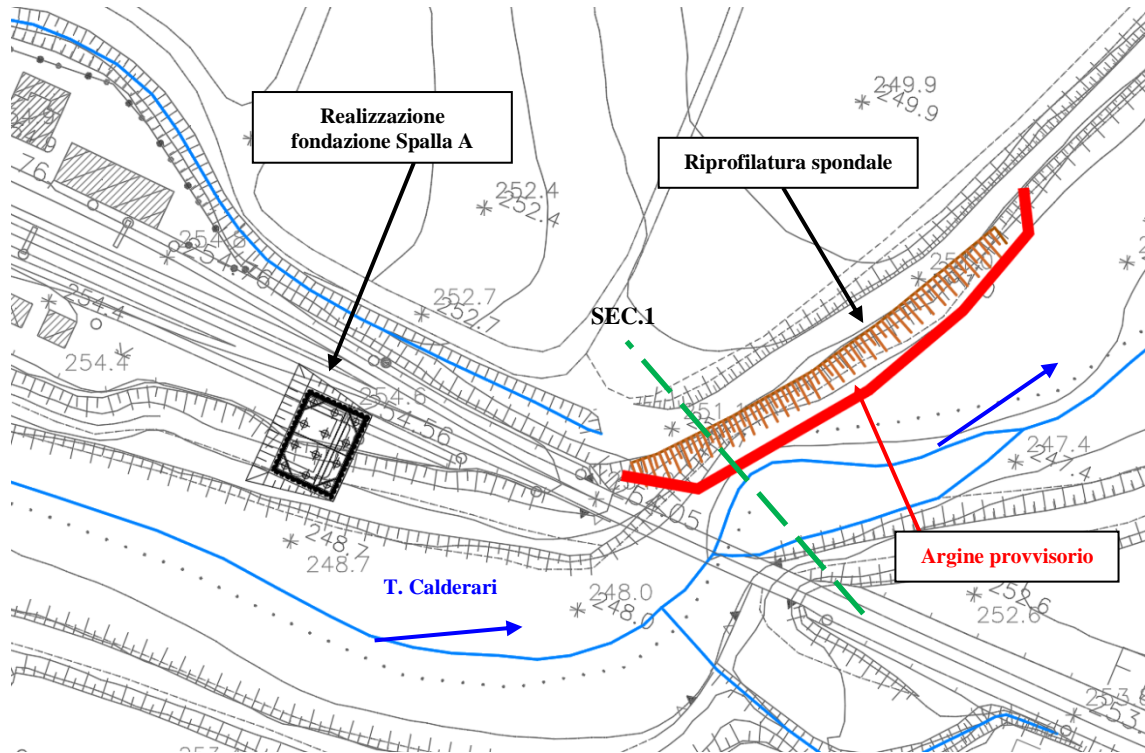
Gli interventi di sistemazione idraulica previsti in progetto consistono in opere di riprofilatura spondale, che interessano un tratto fluviale di circa 300 m, e di protezione del fondo alveo in corrispondenza del nuovo viadotto, per una estensione massima di circa 50 m (per maggiori dettagli si rimanda al paragrafo successivo e agli elaborati grafici annessi). Tali opere saranno realizzate per tratti di corso d'acqua di circa 100 m, da cui una durata massima delle lavorazioni (per tratto di intervento) di *3 mesi*. Pertanto, anche in questo caso, con riferimento allo studio idrologico annesso, la portata “*di cantiere*” da considerare per il dimensionamento delle opere provvisionali (i.e. argini provvisori) ammonta a 161.2 mc/s ($T_r=1$ anno). In analogia al caso precedente, le opere provvisionali (i.e. argini) sono state simulate nel modello 1D Hec Ras tramite l'opzione “*Obstructions*”. Di seguito, la sequenza temporale dei lavori di riprofilatura dell'alveo.

Fase B1

- realizzazione di un argine provvisorio (con blocchi in cls da 1 mc, sovrapposti) in sinistra idraulica, per una lunghezza di 100 metri circa, a valle dell'attraversamento ferroviario esistente
- realizzazione delle opere di **riprofilatura spondale** in alveo (e.g. scavo, ringrosso al piede, messa in opera dei materiali – strato di ghiaia, massi, legatura,
- dismissione argine provvisorio

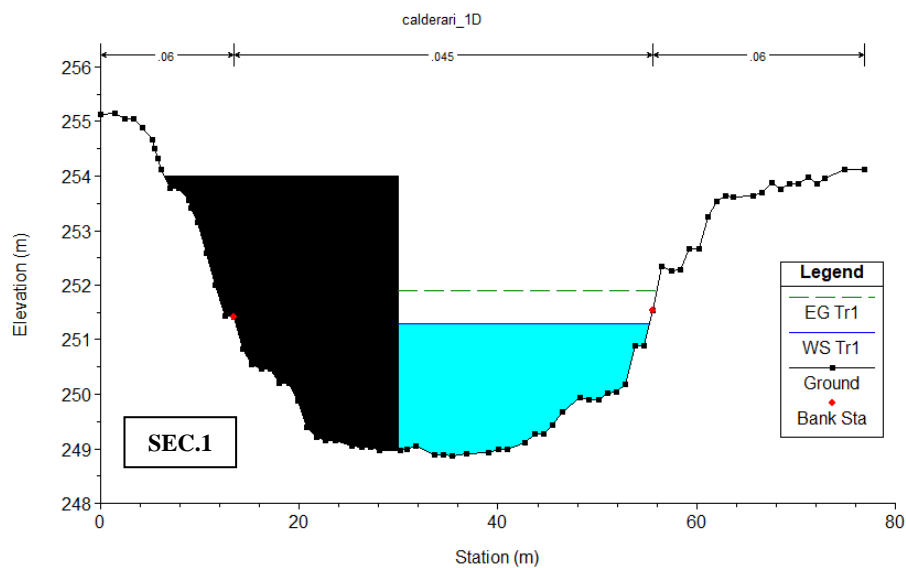
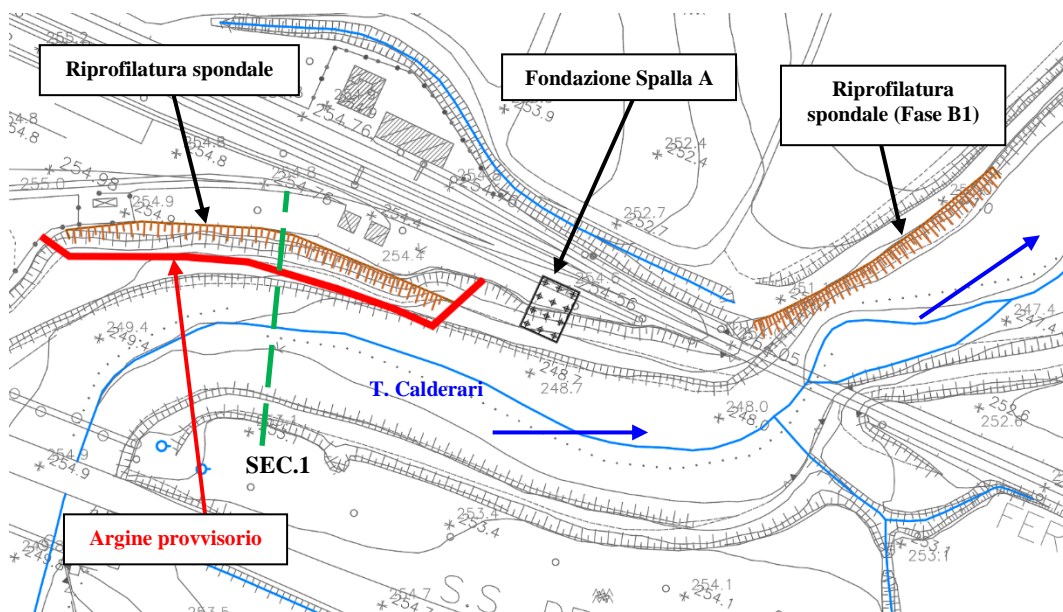
Gli scavi necessari per la costruzione della Spalla A del nuovo viadotto VI05 interferiscono parzialmente con le opere di sistemazione in sinistra idraulica. Le lavorazioni relative alla realizzazione della Spalla A devono quindi essere eseguite prima delle opere di riprofilatura spondale, nel tratto di interesse, e possono essere svolte ad esempio contestualmente ai lavori di riprofilatura in altri tratti, come mostrato in figura. Il livello idrico massimo atteso nella *Fase B1* (per $Q = 161.2$ mc/s), nel tratto di intervento, si attesta a +249.40 m slm, a fronte di una quota del fondo alveo di +247.20 m slm, da cui un tirante idrico di 2.2 m. L'argine provvisorio dovrà

quindi avere un'altezza di 3 metri, realizzabile mediante la messa in opera di 3 blocchi (in cls da 1 mc) sovrapposti, per la lunghezza sopra indicata.



Fase B2

- realizzazione di un argine provvisorio (con blocchi in cls da 1 mc, sovrapposti) in sinistra idraulica, per una lunghezza di 100 metri circa, a monte dell'attraversamento ferroviario in progetto
- realizzazione delle opere di **riprofilatura spondale** in alveo (e.g. scavo, ringrosso al piede, messa in opera dei materiali – strato di ghiaia, massi, legatura,
- dismissione argine provvisorio

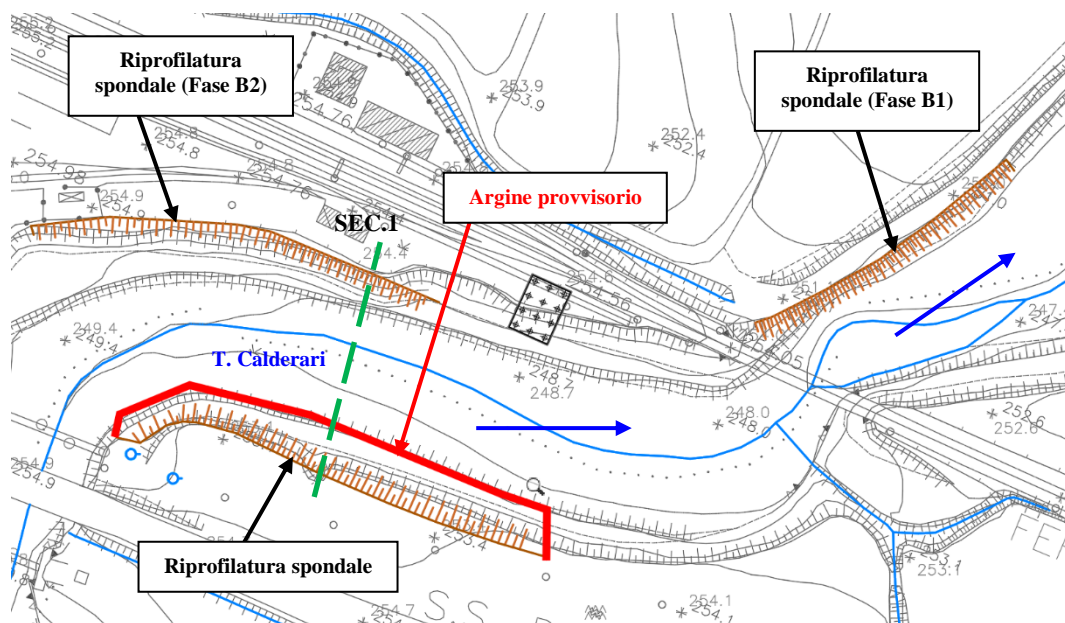


Il livello idrico massimo atteso in tale fase (per $Q = 161.2$ mc/s), nel tratto di intervento, si attesta a +251.30 m slm, a fronte di una quota del fondo alveo di +249.0 m slm, da cui un tirante idrico di 2.30 m.

L'argine provvisorio dovrà quindi avere un'altezza di 3 metri, realizzabile mediante la messa in opera di 3 blocchi (in cls da 1 mc) sovrapposti, per la lunghezza sopra indicata.

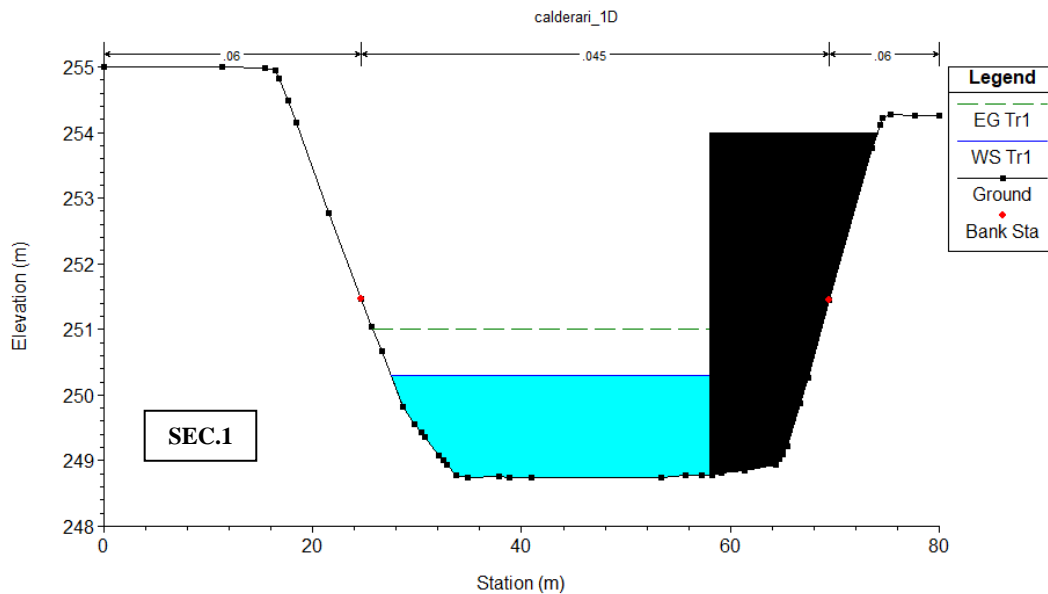
Fase B3

- realizzazione di un argine provvisorio (con blocchi in cls da 1 mc, sovrapposti) in destra idraulica, per una lunghezza di 100 metri circa, a monte dell'attraversamento ferroviario in progetto
- realizzazione delle opere di **riprofilatura spondale** in alveo (e.g. scavo, ringrosso al piede, messa in opera dei materiali – strato di ghiaia, massi, legatura,
- dismissione argine provvisorio



Il livello idrico massimo atteso in tale fase (per $Q = 161.2$ mc/s), nel tratto di intervento, si attesta a +250.30 m slm, a fronte di una quota del fondo alveo di +248.80 m slm, da cui un tirante idrico di 1.50 m.

L'argine provvisorio dovrà quindi avere un'altezza di 2 metri, realizzabile mediante la messa in opera di 2 blocchi (in cls da 1 mc) sovrapposti, per la lunghezza sopra indicata.



Fase B4

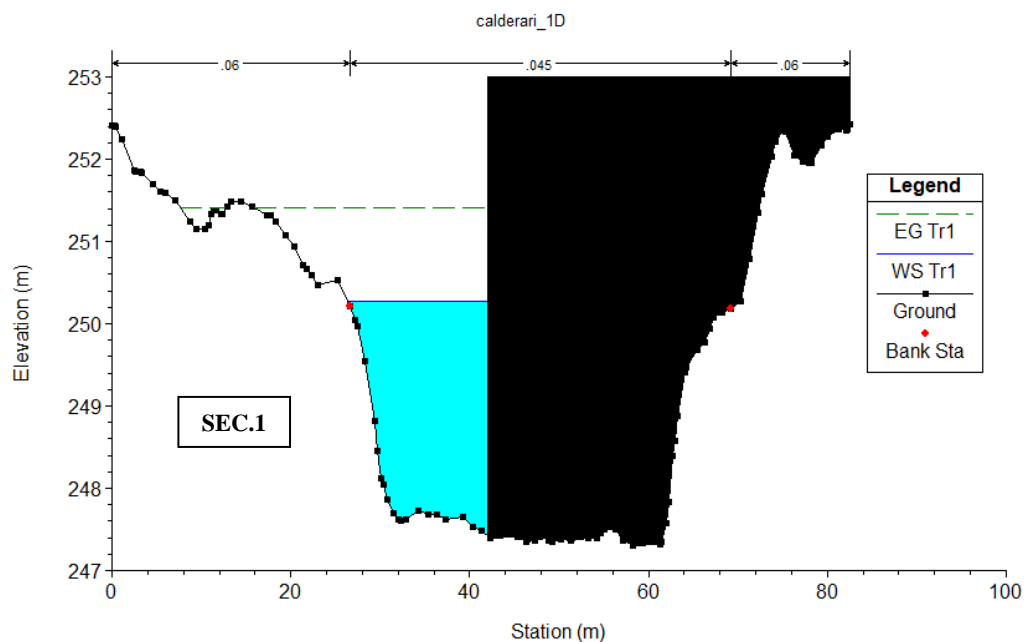
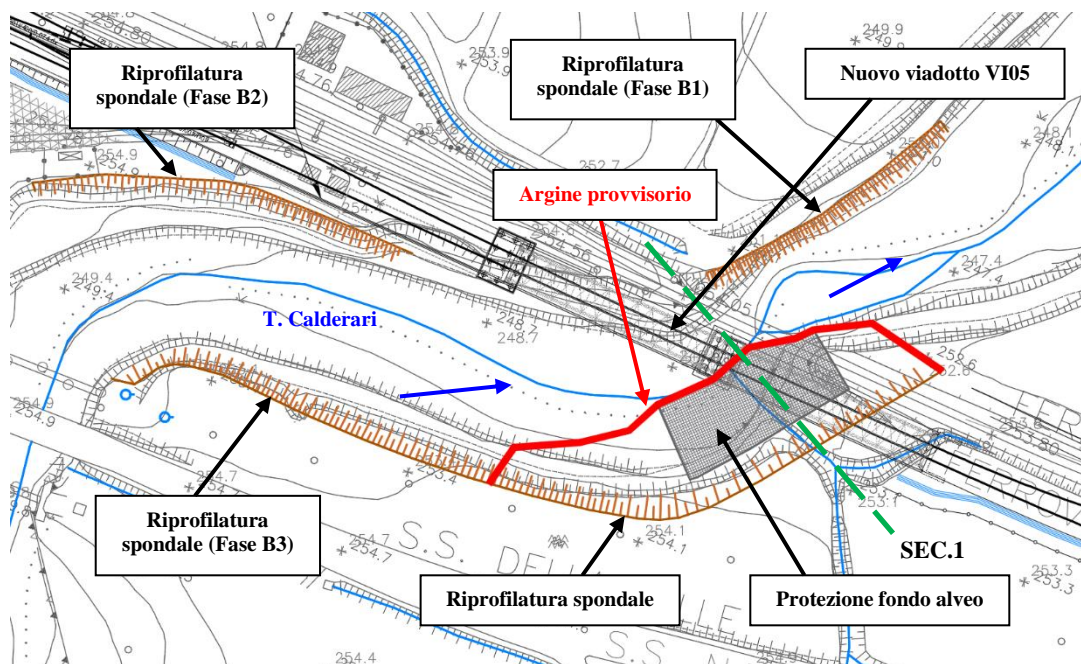
- demolizione del ponte ferroviario esistente e contestuale scavo e rimozione di parte della sponda destra
- realizzazione di un argine provvisorio (con blocchi in cls da 1 mc, sovrapposti) in destra idraulica, per una lunghezza di 100 metri circa, in corrispondenza dell'attraversamento ferroviario in progetto
- realizzazione delle opere di **protezione del fondo alveo e riprofilatura spondale** (e.g. scavo, ringrosso al piede, messa in opera dei materiali – strato di ghiaia, massi, legatura,
- dismissione argine provvisorio

La “Fase B4” dovrà essere necessariamente eseguita **dopo** la realizzazione del nuovo viadotto VI05 (e quindi il completamento della “Fase A2”, precedentemente descritta, ovvero la realizzazione della pila P1 in alveo e la rimozione delle relative palancole provvisorie), e del varo delle due nuove campate metalliche) e l'attivazione della nuova linea FS.

Nell'implementazione dell'opera provvisoria (argine) tramite l'elemento “Obstructions” (Hec Ras) è stato considerato anche l'ingombro della nuova pila del VI05.

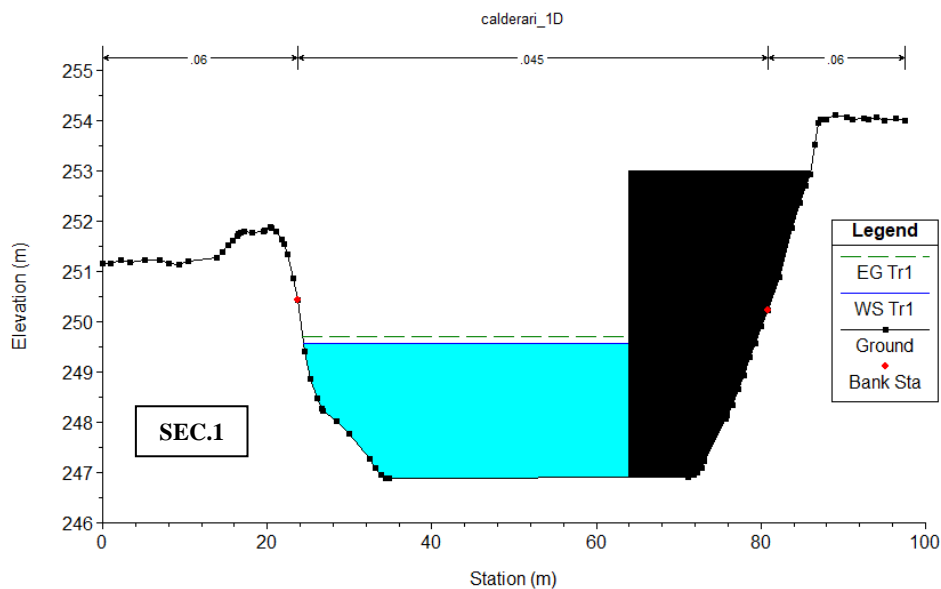
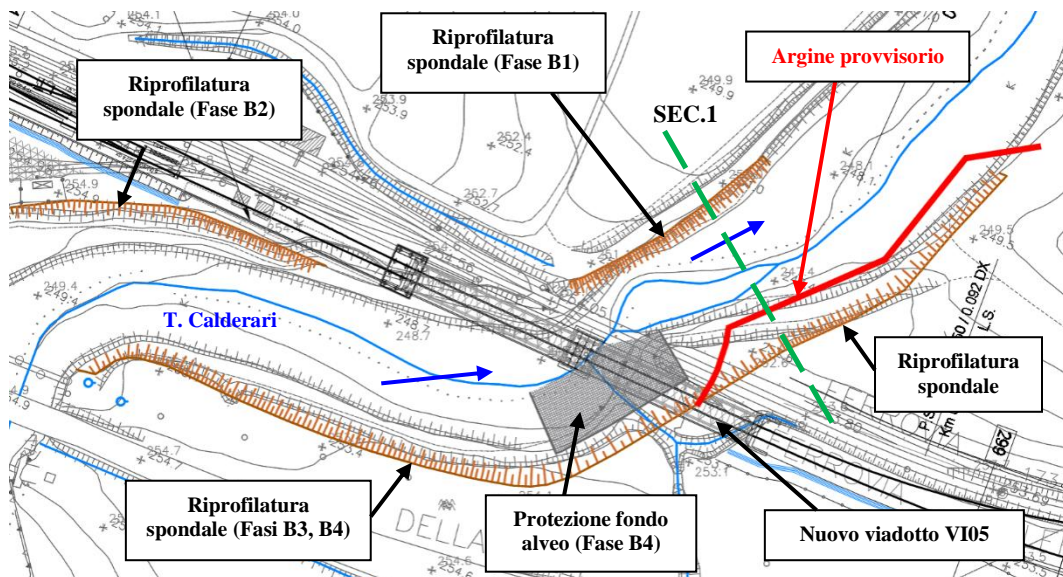
In tale situazione, il livello idrico massimo atteso (per $Q = 161.2$ mc/s), nel tratto di intervento, si attesta a +250.3 m slm, a fronte di una quota di fondo alveo di +247.7 m slm, da cui un tirante idrico di 2.6 m.

L'argine provvisorio, anche in questo caso, dovrà quindi avere un'altezza di 3 metri (da cui una quota di sommità dell'argine di 250.7 m slm, a fronte di una quota minima del nuovo impalcato di +254.0 m slm), realizzabile mediante la messa in opera di 3 blocchi (in cls da 1 mc) sovrapposti, per la lunghezza sopra indicata.



Fase B5 (completamento delle opere di protezione/sistemazione in destra idraulica)

- realizzazione di un argine provvisorio (con blocchi in cls da 1 mc, sovrapposti) in destra idraulica, per una lunghezza di 100 metri circa, a valle dell'attraversamento ferroviario in progetto
- realizzazione delle opere di **riprofilatura spondale** in alveo (e.g. scavo, ringrosso al piede, messa in opera dei materiali – strato di ghiaia, massi, legature, ecc.....)
- dismissione argine provvisorio

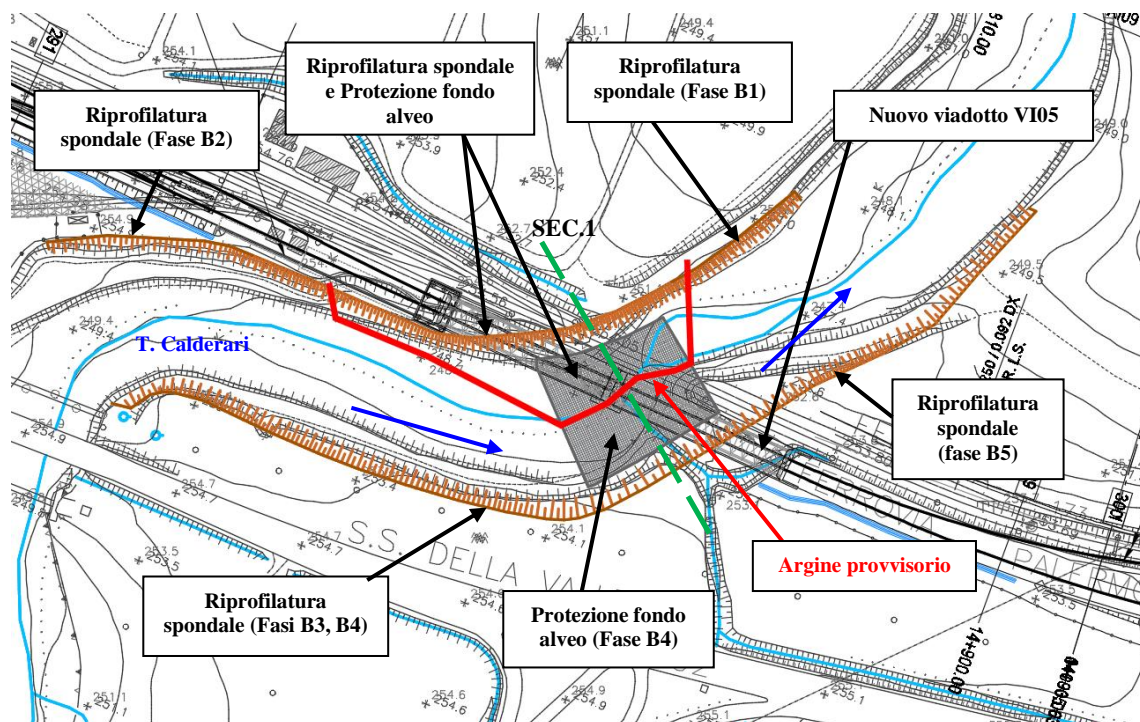


Il livello idrico massimo atteso in tale fase (per $Q = 161.2$ mc/s), nel tratto di intervento, si attesta a +249.50 m slm, a fronte di una quota del fondo alveo di +246.90 m slm, da cui un tirante idrico di 2.60 m.

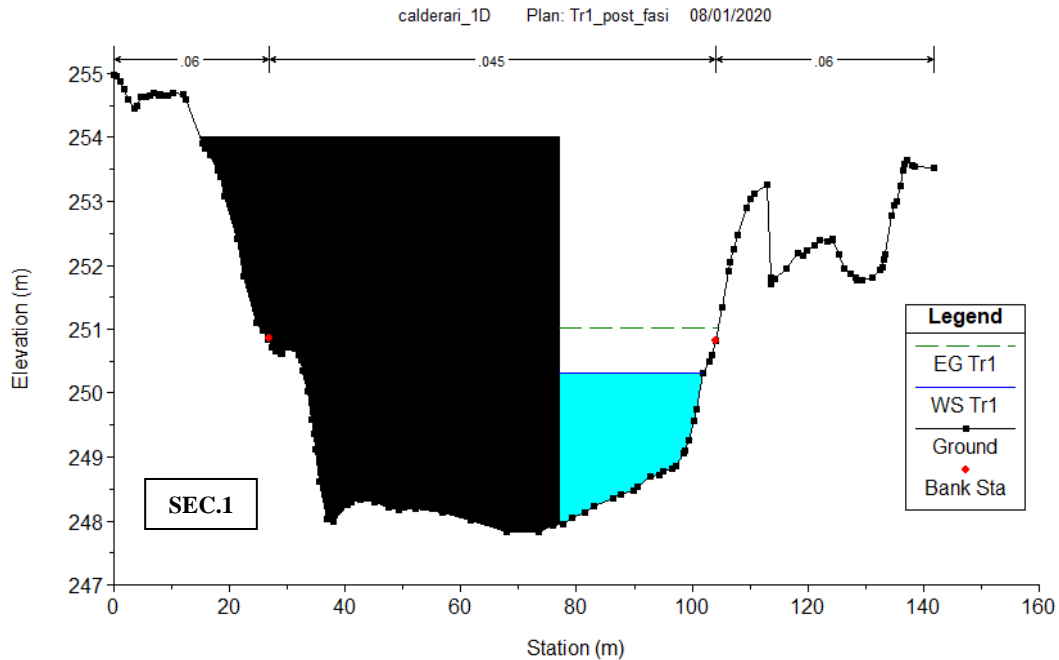
L'argine provvisorio dovrà quindi avere un'altezza di 3 metri, realizzabile mediante la messa in opera di 3 blocchi (in cls da 1 mc) sovrapposti, per la lunghezza sopra indicata.

Fase B6 (completamento delle opere di protezione/sistemazione in sinistra idraulica)

- realizzazione di un argine provvisorio (con blocchi in cls da 1 mc, sovrapposti) in sinistra idraulica, per una lunghezza di 100 metri circa, in corrispondenza dell'attraversamento ferroviario in progetto
- realizzazione (con ponte ferroviario esistente già demolito) delle opere di **protezione del fondo alveo** e **riprofilatura spondale** (e.g. scavo, ringrosso al piede, messa in opera dei materiali – strato di ghiaia, massi, legatura,
- dismissione argine provvisorio



Il livello idrico massimo atteso in tale fase (per $Q = 161.2$ mc/s), nel tratto di intervento, si attesta a +250.3 m slm, a fronte di una quota del fondo alveo di +247.80 m slm, da cui un tirante idrico di 2.5 m.



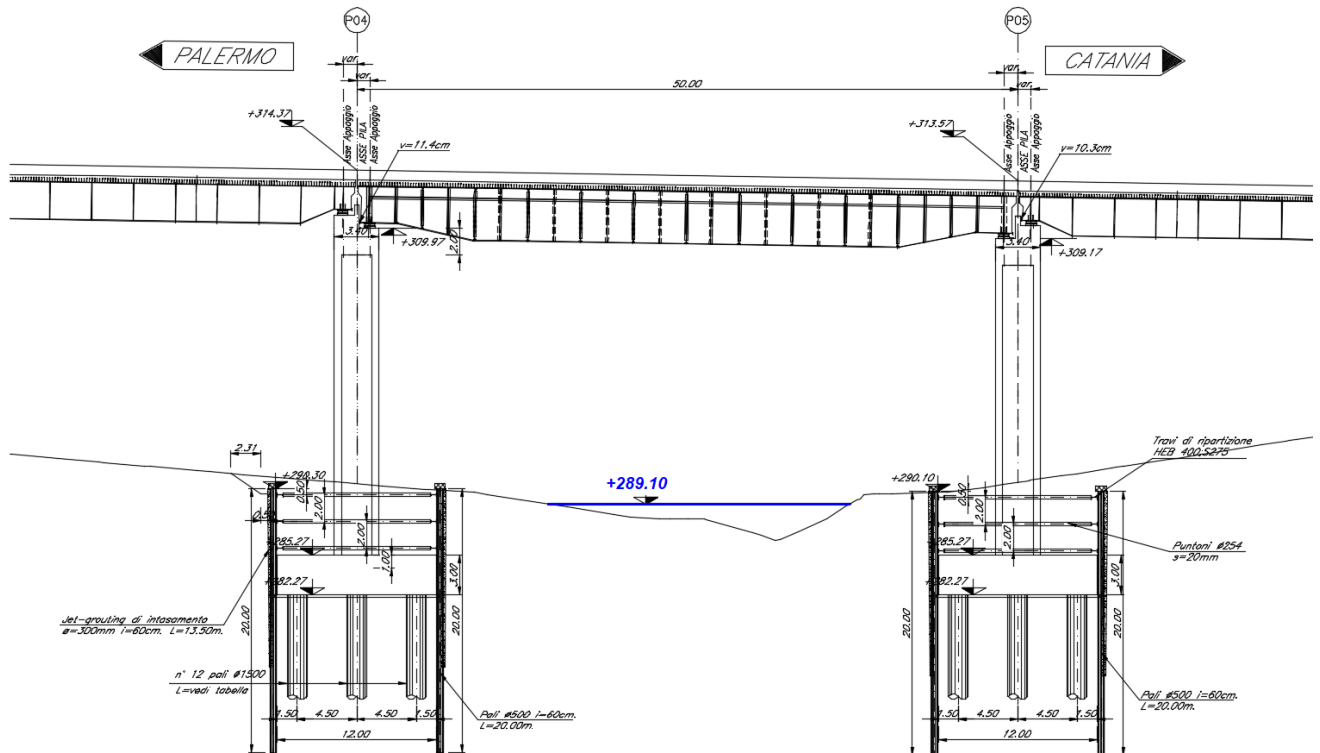
L'argine provvisorio, anche in questo caso, dovrà quindi avere un'altezza di 3 metri, realizzabile mediante la messa in opera di 3 blocchi (in cls da 1 mc) sovrapposti, per la lunghezza sopra indicata.

In definitiva, per quanto concerne la realizzazione delle opere di sistemazione idraulica, le fasi più critichesono quelle denominate “Fase B4” e “Fase B6”, che riguardano gli interventi di riprofilatura spondale e di protezione del fondo alveo in corrispondenza del nuovo attraversamento, che sono subordinate alla demolizione preventiva del ponte esistente e quindi al completamento delle lavorazioni relative alla costruzione del nuovo viadotto e all’attivazione della nuova linea FS (per garantire la continuità dell’esercizio ferroviario). Le rimanenti fasi, indipendenti dalla realizzazione del nuovo viadotto, possono essere eseguite anche secondo sequenze temporali diverse da quella sopra descritta, a discrezione dell’impresa appaltatrice, esecutrice dei lavori, in relazione alla disponibilità e manovrabilità dei macchinari necessari.

3.5.2. Viadotto VI04 (corso d’acqua alla pk 10+050)


Il modello idraulico numerico 1D (in regime di moto permanente) del corso d’acqua alla pk 10+050 è stato sviluppato sulla base dei rilievi batimetrici disponibili e ha una estensione di circa 1.0 km. In analogia alle

analisi sviluppate in precedenza e nell’ambito del P.A.I./P.G.R.A., per quanto concerne il coefficiente di scabrezza (Manning), per l’alveo inciso è stato adottato il valore $0.045 \text{ s/m}^{1/3}$, mentre alle aree golenali è stato attribuito il valore di $0.060 \text{ s/m}^{1/3}$. Come condizione al contorno di valle, è stata imposta la “Normal Depth” (condizione di moto uniforme). In analogia al modello 2D, anche nel modello monodimensionale sono stati simulati i due rami confluenti in corrispondenza del nuovo viadotto (VI04) in progetto. Con riferimento allo studio idrologico annesso, la portata di cantiere ammonta a 11.5 mc/s ($Tr = 3$ anni) per il sottobacino 1 e a 4.9 mc/s ($Tr = 3$ anni) per il sottobacino 2.



In corrispondenza del realizzando viadotto VI04, il livello idrico di cantiere si attesta a +289.10 m slm (senza esondazioni), a fronte di una quota minima di testa dei pali provvisori (necessari alla realizzazione delle fondazioni delle pile P4 e P5) di +290.10 m slm.

Anche in corrispondenza del viadotto VI04 sono previste opere di sistemazione idraulica, ma di minore entità rispetto a quelle sul T. Calderari, tali da poter essere realizzate durante i periodi di magra, per lo più di secca che caratterizzano il corso d’acqua alla pk 10+050 (per maggiori dettagli si rimanda al paragrafo successivo e agli elaborati grafici annessi).

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 65 di 95

4. VERIFICA ALLO SCALZAMENTO

In ragione dei risultati delle simulazioni numeriche idrauliche 2D, si è proceduto alla valutazione della profondità massima di erosione attesa attorno alle pile dei viadotti VI04 e VI05 in progetto, interessate dalle piene del corso d'acqua alla pk 10+050 e del Torrente Calderari, rispettivamente. Nello specifico, si è fatto riferimento a quanto indicato nelle NTC2018:

“Lo scalzamento e le azioni idrodinamiche associate al livello idrico massimo che si verifica mediamente ogni anno (si assuma $Tr = 1,001$) devono essere combinate con le altre azioni variabili adottando valori del coefficiente $\Psi 0$ unitario. Lo scalzamento e le azioni idrodinamiche associati all'evento di piena di progetto devono essere combinate esclusivamente con le altre azioni variabili da traffico, adottando per queste ultime i coefficienti di combinazione $\Psi 1$.”

Sono state applicate le seguenti due formulazioni disponibili nella letteratura. Come valore di progetto dello scalzamento è stato considerato il valore massimo ottenuto dalle due relazioni.

Formulazione CSU

La profondità di scalzamento attesa può essere stimata come:

$$\frac{Y_s}{Y_1} = 2 \cdot K_1 K_2 K_3 K_4 \left(\frac{a}{Y_1} \right)^{0.65} FR^{0.43}$$

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 (vedi tabella seguente)
- K_4 è un fattore correttiva legato al materiale di fondo alveo, valutabile come:

$$K_4 = [1 - 0.89(1 - V_r)^{0.053}]^{0.5}$$

dove $V_r = \frac{V_0 - V_i}{V_{c90} - V_i}$, $V_i = 0.645(d_{50}/a)^{0.053} V_{c50}$, $V_{c90} = 10.95(Y_1)^{1/6} d_{90}^{1/3}$, $V_{c50} = 10.95(Y_1)^{1/6} d_{50}^{1/3}$, d_{50}, d_{90} = diametro corrispondente al 50% e al 90 % di passante in peso

- Y_s , la profondità di scalzamento;
- Y_1 , l'altezza della corrente;

- a , la larghezza della pila;
- FR , il numero di Froude ($FR = V_0/(gh_m)^{1/2}$)

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

Bed Condition	Dune Height ft	K_3
Clear-Water Scour	N/A	1.1
Plane bed and Antidune flow	N/A	1.1
Small Dunes	$10 > H \geq 2$	1.1
Medium Dunes	$30 > H \geq 10$	1.2 to 1.1
Large Dunes	$H \geq 30$	1.3

Tabella 4- Formulazione CSU: valori dei fattori correttivi K_1 , K_2 , K_3 .

Formulazione di Sheppard – Melville

La profondità di scalzamento attesa può essere valutata come:

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

con

- $V_{1p} = \max(V_{1p1}; V_{1p2})$
- $V_{1p1} = 5V_c$; $V_{1p2} = 0.6\sqrt{gy_1}$

- $$V_c = \begin{cases} 2.5 \cdot u^* \ln \left(\frac{73.5y_1}{d_{50} [Re(2.85 - 0.58 \ln(Re) + 0.002Re) + \frac{111}{Re} - 6]} \right) & \text{for } 5 \leq Re \leq 70 \\ 2.5 \cdot u^* \ln \left(\frac{2.21y_1}{d_{50}} \right) & \text{for } Re > 70 \end{cases}$$
- $$Re = \frac{u^* d_{50}}{2.32 \cdot 10^{-7}}; u^* = \left[16.2 \cdot d_{50} \left(\frac{9.09 \cdot 10^{-6}}{d_{50}} - d_{50} (38.76 + 9.6 \ln(d_{50})) - 0.005 \right) \right]^{0.5}$$
- $y_1 = \text{tirante idrico (m)}$
- $$f_1 = \tanh \left[\left(\frac{y_1}{a^*} \right)^{0.4} \right]; f_2 = \left\{ 1 - 1.2 \left[\ln \left(\frac{V_1}{V_c} \right) \right]^2 \right\}; f_3 = \left[\frac{\left(\frac{a^*}{d_{50}} \right)}{0.4 \left(\frac{a^*}{d_{50}} \right)^{1.2} + 10.6 \left(\frac{a^*}{d_{50}} \right)^{-0.13}} \right]$$
- $$a^* = K_s a_p; a_p = a \cdot \cos \theta + L \cdot \sin \theta; K_s = \begin{cases} 1 & (\text{pilacircolare}) \\ 0.86 + 0.97 \left(\left| \frac{\pi \theta}{180} - \frac{\pi}{4} \right| \right)^4 & (\text{pilarettangolare}) \end{cases}$$

(a = larghezza della pila; L = lunghezza della pila; θ = angolo di attacco [°])

Secondo gli studi condotti da Sheppard et al. (2013), riguardanti il confronto tra i valori di scalzamento osservati in laboratorio e in sito e quelli valutati secondo le più comuni ed utilizzate formule per il calcolo dello scalzamento (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:

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

all'interno dei quali ricadono i valori dei parametri (tirante, velocità, d_{50} , ...), relativi ai corsi d'acqua oggetto di studio (T. Calderari e corso d'acqua alla pk 10+050).

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.

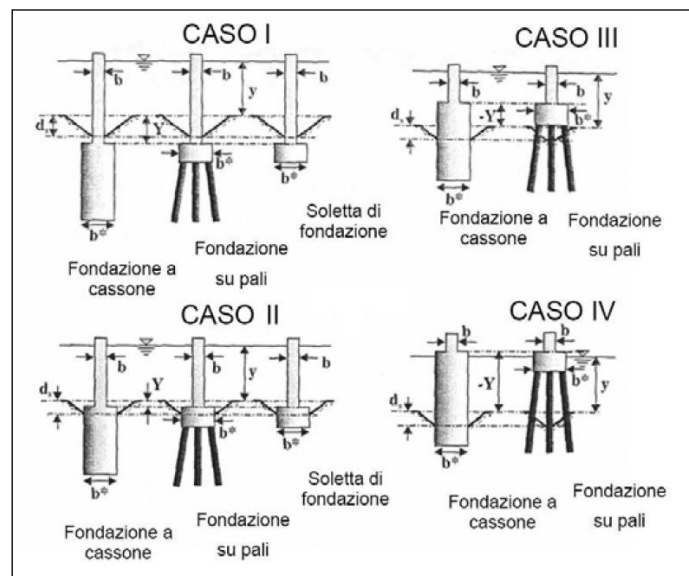


Figura 35–Differenti tipologie di pile non uniformi dotate di fondazioni.

Nel CASO I l’erosione localizzata viene calcolata facendo riferimento alla larghezza della pila b in quanto la presenza della fondazione risulta essere ininfluyente 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.

E’ stato effettuato dunque il calcolo dello scalzamento, relativo alla piena di progetto, $Tr = 300$ anni, e alla piena che si verifica mediamente ogni anno ($Tr = 1,001$), considerando dapprima le dimensioni delle pile. Per quanto concerne il materiale potenzialmente erodibile, si è fatto riferimento alle analisi granulometriche effettuate su

campioni estratti durante i sondaggi geognostici e apposite campagne topografiche, nello strato più superficiale (fino a 10 m dal p.c.), nonché su campioni prelevati direttamente in alveo; in particolare, per i viadotti presi in esame, il materiale considerato è caratterizzato dalla seguente granulometria:

- VI04 (corso d'acqua alla pk 10+050), $d_{50} = 0.002$ mm, $d_{90} = 0.1$ mm;
- VI05 (Torrente Calderari), $d_{50} = 0.012$ mm, $d_{90} = 0.08$ mm.

Nelle tabelle seguenti si riportano i valori di scalzamento attesi per $Tr = 300$ anni (per entrambi i corsi d'acqua in esame) e $Tr = 1,001$ anni (soltanto per il Torrente Calderari; come dimostrato nel paragrafo precedente, il corso d'acqua alla pk 10+050 non è soggetto ad esondazione per le basse portate, già per $Tr = 3$ anni, quindi le pile di scavalco del VI04 non sono interessate dalla piena con $Tr = 1.001$), ottenuti mediante le formulazioni sopra descritte, considerando le dimensioni delle sole pile. I valori delle variabili idrauliche sono estratti dalle simulazioni numeriche secondo i modelli 2D (per $Tr = 300$ anni) e 1D (per $Tr = 1.001$ anni) sviluppati.

VI04– corso d'acqua alla pk 10+050 (Tr 300 anni)

ID PILA	D (m) [pila]	L (m) [pila]	Forma pila	h (m)	v (m/s)	Fr ()	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU	Ys (m) Pila	Yp (m) profondità estradosso plinto
4	3.4	8.6	<i>pseudo - rettangolare</i>	0.35	0.57	0.308	1.2	2.0	2.0	4.9
5	3.4	8.6	<i>pseudo - rettangolare</i>	1.9	2.05	0.475	4.5	3.1	4.6	4.7

VI05 – T. Calderari (Tr 300 anni)

ID PILA	D (m) [pila]	Forma pila	h (m)	v (m/s)	Fr ()	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU	Ys (m) Pila	Yp (m) profondità estradosso plinto
1	4.5	<i>circolare</i>	4.5	4	0.602	7.5	5.6	7.5	3.0

VI05 – T. Calderari (Tr 1.001 anni)

ID PILA	D (m) [pila]	Forma pila	h (m)	v (m/s)	Fr ()	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU	Ys (m) Pila	Yp (m) profondità estradosso plinto
1	4.5	<i>circolare</i>	2.8	2	0.382	4.6	3.9	4.6	3.0

Confrontando i valori di scalzamento atteso con quelli di ricoprimento dei plinti di fondazione si evince che in corrispondenza delle pile del VI04 i fenomeni di erosione (innescati dalla piena *Tr300 anni*) non interessano le fondazioni (scalzamento atteso minore del ricoprimento); mentre in corrispondenza della pila P01 del VI05 nell'alveo del T. Calderari, i fenomeni di scalzamento potrebbero interessare anche il plinto di fondazione (scalzamento atteso maggiore del ricoprimento), sia per *Tr300 annis* sia per *Tr = 1.001 anni*.

Per tale pila (P01 – VI05), il calcolo quindi è stato ripetuto considerando le dimensioni equivalenti del sistema “pila – plinto”, in realtà “pila - pozzo di fondazione”, valutate con la formulazione proposta da *Melville e Raudkivi (1996)*, precedentemente introdotta.

VI05 – T. Calderari (*Tr 300 anni*)

ID PILA	L (m) [pozzo]	B (m) [pozzo]	L equivalente (m)	B equivalente (m)	Ys (m) Sheppard & Melville “pila-pozzo”	Ys (m) CSU “pila-pozzo”	Ys (m) “Pila-pozzo”
1	12	16.5	7.3	9	12.6	7.6	12.6

VI05 – T. Calderari (*Tr 1.001 anni*)

ID PILA	L (m) [pozzo]	B (m) [pozzo]	L equivalente (m)	B equivalente (m)	Ys (m) Sheppard & Melville “pila-pozzo”	Ys (m) CSU “pila-pozzo”	Ys (m) “Pila-pozzo”
1	12	16.5	6.1	7.1	6.5	4.7	6.5

Con riferimento al paragrafo precedente e in particolare alle fasi di cantiere previste, anche le opere provvisorie (i.e. palancole) necessarie per la realizzazione delle pile P01 del VI05 sul T. Calderari potrebbero essere interessate da fenomeni di erosione, durante la loro temporanea (*al massimo 3 mesi*) presenza in alveo.

In ragione delle dimensioni e dell'ubicazione di tale opera, lo scalzamento atteso è stato valutato applicando le formulazioni per la determinazione della profondità di scavo attorno alle spalle di ponti/viadotti. Nello specifico, si è fatto riferimento alla metodologia della FHWA. In particolare, considerato lo schema riportato nella figura seguente, si definiscono le seguenti variabili:

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

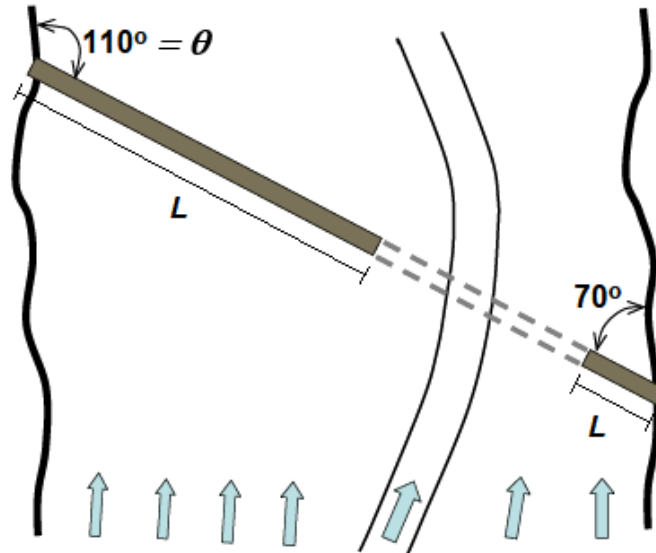


Figura 36 – Calcolo dello scalzamento in corrispondenza delle spalle.


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 le formulazioni di Froehlich e di Hire, in accordo alle seguenti indicazioni:

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

Formulazione di Froehlich

$$\frac{Y_s}{Y_1} = 2.27 K_1 K_2 \left(\frac{L'}{Y_1} \right)^{0.43} FR^{0.61} + 1$$

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

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 72 di 95

Formulazione di Hire

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

K_1 e K_2 , come sopra definiti.

Di seguito, i risultati ottenuti (i valori delle variabili idrauliche sono estratti dalle simulazioni numeriche secondo modello 1D, per la “portata di cantiere” $Q = 161.20$ mc/s).

VI05 – Opere provvisionali

ID PILA	L (opera provvisionale)[m]	θ (°)	h (m)	v (m/s)	Y_s (m)
1	60	41	4.1	2	9.0

Il valore dello scalzamento atteso attorno alle opere provvisionali (i.e. palancoato) della pila P01 del VI05 si attesta a 9 metri (tale valore è stato utilizzato nelle verifiche strutturali del palancoato; per maggiori dettagli si rimanda all’elaborato specialistico RS3V40D09CLVI0503001A).

5. SISTEMAZIONI IDRAULICHE

Si è proceduto al dimensionamento delle opere di sistemazione e protezione idraulica atte a ripristinare e/o mantenere la sezione d'alveo in una configurazione (attuale o di progetto) inalterata e quindi proteggerla da possibili fenomeni di erosione e scalzamento, dopo i rimaneggiamenti dovuti alle fasi di realizzazione dei viadotti VI04 e VI05, nonché contribuire alla stabilità dell'alveo inciso in corrispondenza delle opere di attraversamento in progetto. Nello specifico, per il dimensionamento delle opere di sistemazione spondale, nonché attorno alle pile nelle aree esterne, è stata applicata la relazione (FHWA, 1989):


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

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, $\in [1,2]$); $K_1 = [1 - \sin^2(\theta)/\sin^2(\phi)]^{0.5}$; θ = inclinazione delle sponde; ϕ = angolo di attrito interno del 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*

Per il dimensionamento delle opere di protezione idraulica attorno alle pile nell'alveo inciso, è stata adottata invece la seguente formulazione (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:

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

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 74 di 95

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).

5.1. TORRENTE CALDERARI: VIADOTTO VI05

Sul Torrente Calderari, come precedentemente descritto, sono previsti interventi di riprofilatura spondale, per un tratto fluviale (in corrispondenza del nuovo viadotto VI05) di circa 300 metri, atti a garantire il deflusso delle piene di progetto, evitandone/limitandone l'esonazione. Per maggiori dettagli circa la riprofilatura delle sponde si rimanda all'elaborato grafico RS3V40D09WZID0002004A. Per mantenere inalterata nel tempo tale configurazione di progetto, sono previste opere di protezione delle sponde in massi legati.

Con riferimento alla formulazione (*), considerando i seguenti parametri: $S_g = 2.0 t/mc$; $SF = 2$ (in via cautelativa), $\theta = 34^\circ$ (2/3); $\phi = 40^\circ$, $h = 4.5$ m e $v = 3$ m/s (per la portata di progetto, $Tr300$, in corrispondenza della sponde, da modello 2D), si ottiene $d_{50} = 1$ m. Se ne prevede comunque anche la legatura con funi di acciaio, per una maggiore stabilità (il calcolo effettuato prescinde dalla legatura dei massi, non contemplata nelle formulazioni adottate).

A protezione della pila in alveo è prevista inoltre la realizzazione di un rivestimento del fondo in massi artificiali in conglomerato cementizio, anch'essi legati con funi di acciaio. Per quanto concerne il dimensionamento, con riferimento alla formulazione (**), adottando il valore di velocità massima $V_{max} = 4$ m/s (per $Tr = 300$ anni) nella sezione di attraversamento, unitamente ai seguenti parametri: $S_g = 2.5$ t/m³; $K_I = 1.5$, si ottiene un diametro medio di tali massi pari a $d_{50} = 0.80$ m. Nello specifico, i massi dovranno avere forma cubica (0.8x0.8x0.8 m³) e dovranno essere già dotati di golfari per il sollevamento e la messa in opera, nonché per il relativo ancoraggio.

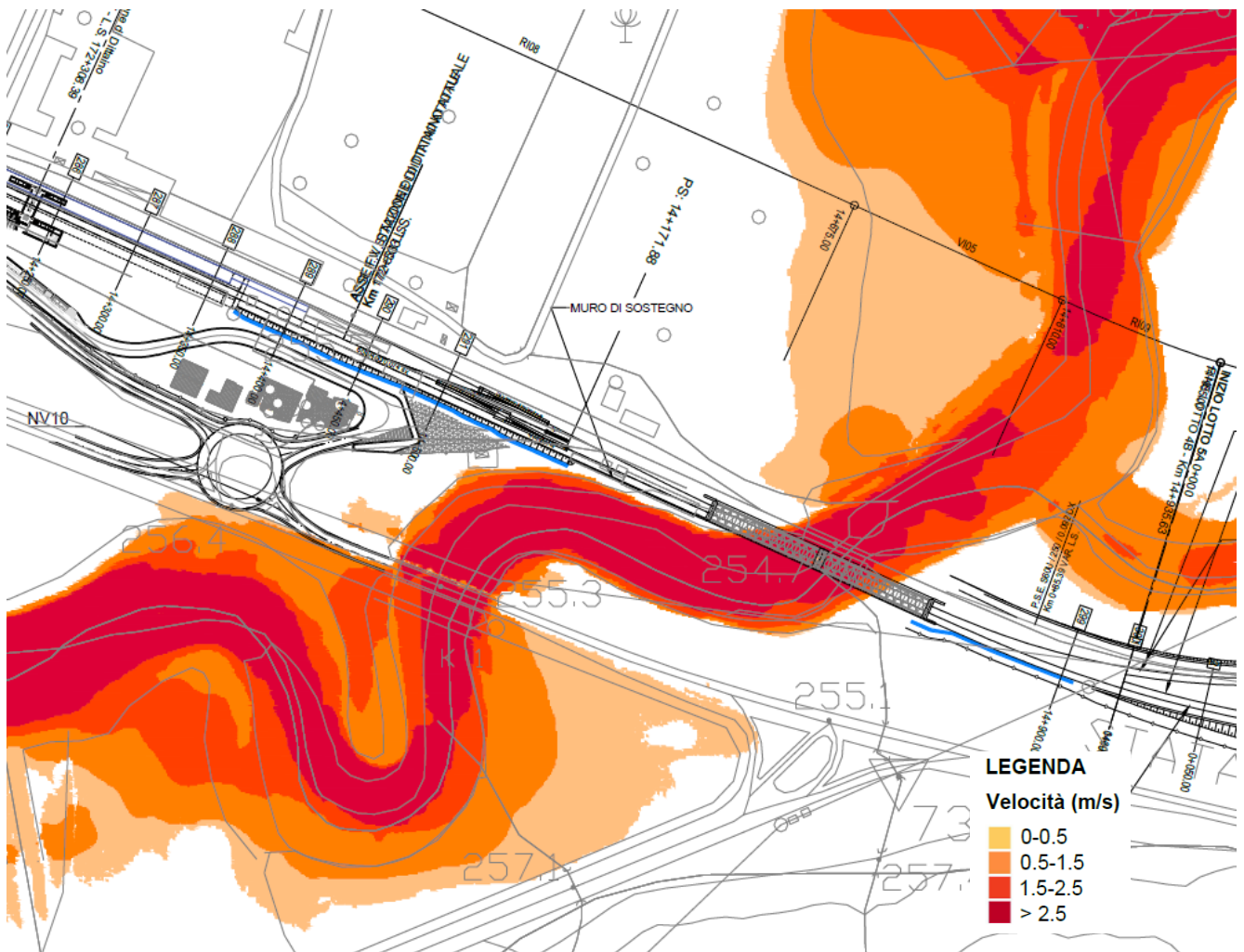


Figura 37 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: campo di velocità in corrispondenza del viadotto VI05 (configurazione post operam).

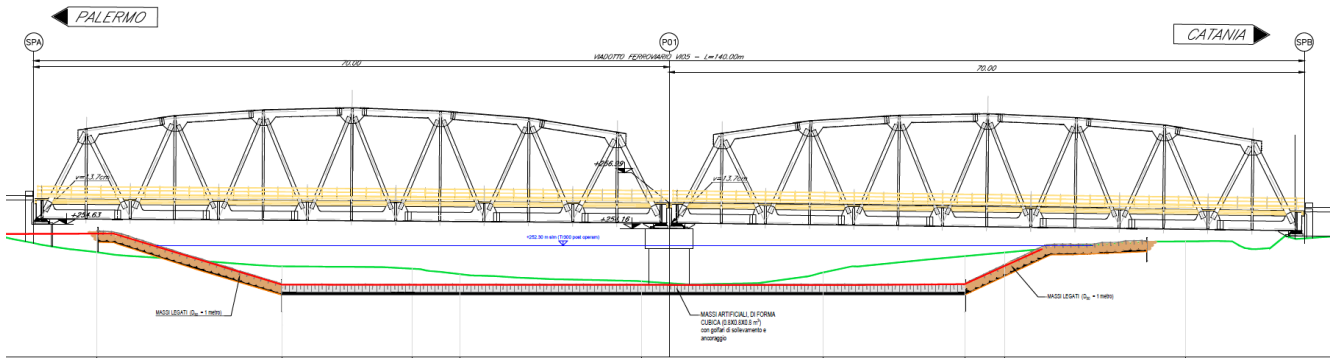


Figura 38 –Viadotto VI05: sezione tipo delle opere di sistemazione idraulica.

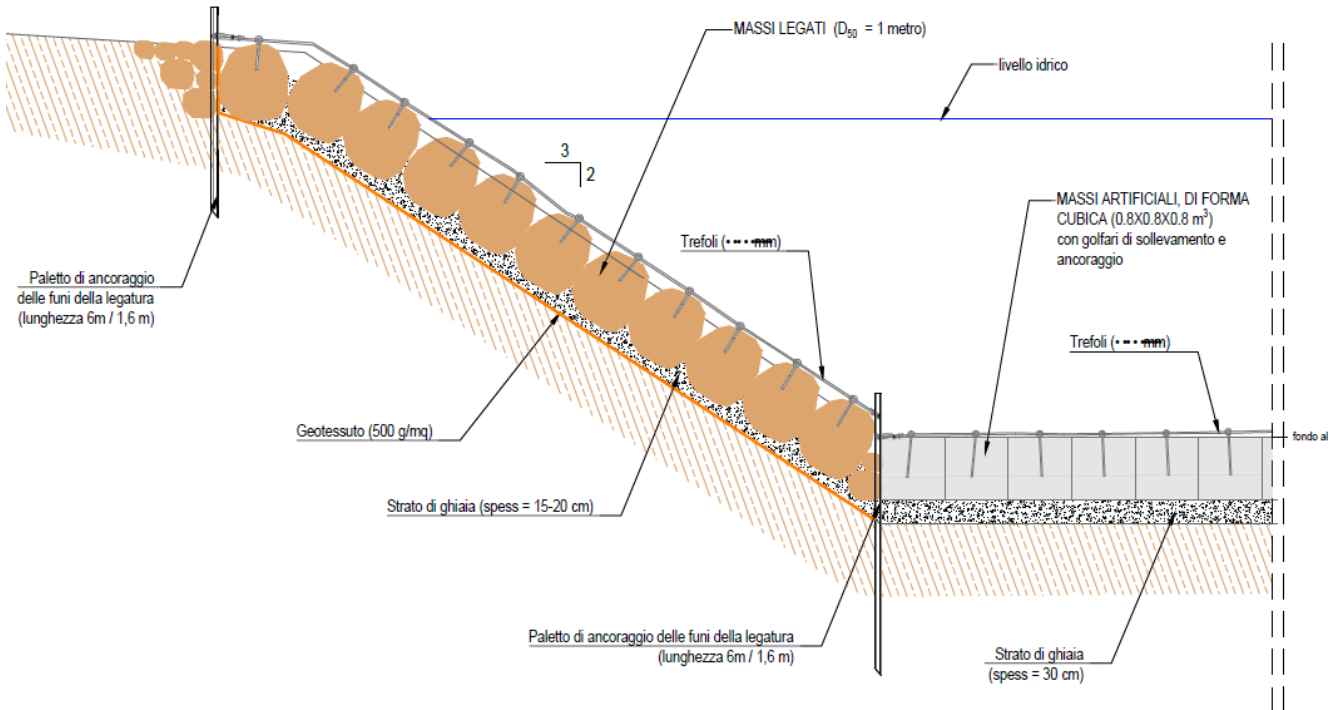


Figura 39 –Viadotto VI05: particolare delle opere di sistemazione idraulica.

5.2. CORSO D'ACQUA ALLA PK 10+050: VIADOTTO VI04

Con riferimento al viadotto VI04, si prevedono opere di sistemazione idraulica in massi sciolti, atte a ripristinare e mantenere l'attuale configurazione dell'alveo e proteggere le pile interessate delle piene del corso d'acqua alla pk 10+050 (ossia quelle della campata di scavalco), da eventuali fenomeni di erosione.

Applicando quindi la formulazione (*) con i parametri $S_g = 2.0$ t/mc; $SF = 2$ (in via cautelativa), $\theta = 34^\circ$ (2/3); $\phi = 40^\circ$, $h = 2$ m; $v = 2.4$ m/s, si ottiene $d_{50} = 0.70$ m (per la portata di progetto, $Tr300$, in corrispondenza dell'incisione, da modello 2D).

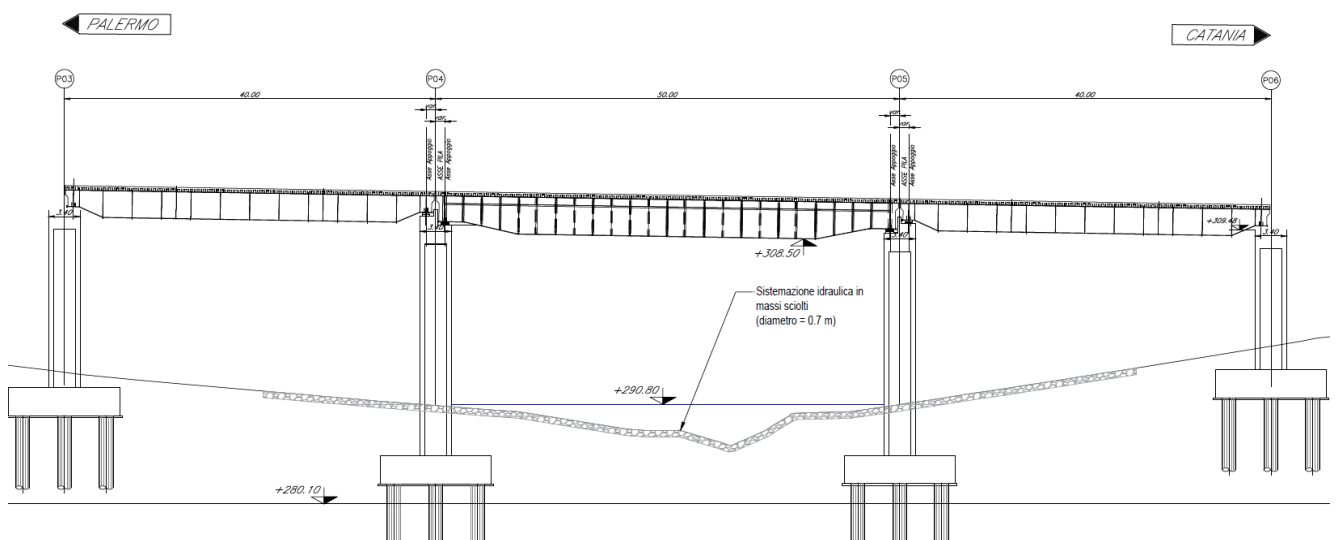


Figura 40 – Viadotto VI04: sezione tipo delle opere di sistemazione idraulica.

5.3. ULTERIORI OPERE DI SISTEMAZIONE SUL TORRENTE CALDERARI

Con riferimento all'elaborato codificato RS3V40D69RGGE0003002A "Analisi multitemporale della zona di confluenza del Torrente Calderari con il Fiume Dittaino" e alle relative considerazioni di sintesi riportate nel capitolo successivo, si prevedono interventi di sistemazione spondale sul Torrente Calderari anche nel tratto fluviale a monte dell'attraversamento della Strada Statale SS192, nello specifico nel tratto di maggiore vicinanza della nuova viabilità NV10 al corso d'acqua, come mostrato nella figura seguente.

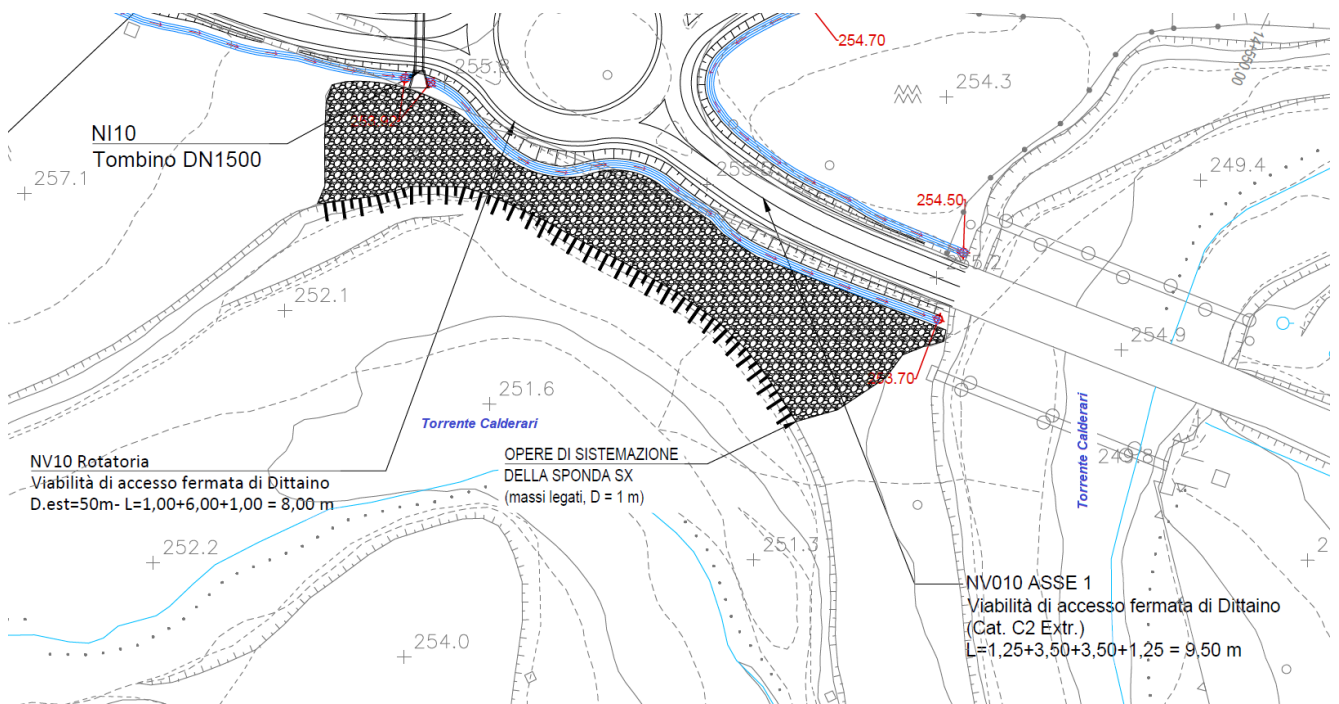


Figura 41 – Ulteriori opere di sistemazione sul Torrente Calderari.

Lo studio sopra citato ha evidenziato, nel tratto fluviale a monte della SS192, la tendenza del corso d’acqua alla migrazione verso destra, ossia verso sud (innescata a seguito dell’antropizzazione dell’area e dello sviluppo del polo industriale “Dittaino”), con la conseguente, presumibile, formazione di una “barra”. Le opere previste hanno quindi lo scopo di limitare tale tendenza, stabilizzando l’attuale conformazione dell’alveo. In ogni caso, il controllo delle condizioni di funzionalità dell’opera nel tempo contribuirà al monitoraggio, da parte del “territorio, dell’eventuale fenomeno di erosione della sponda adiacente alla strada statale SS192, ai fini della definizione di eventuali ulteriori interventi di sistemazione idraulica atti a salvaguardare le infrastrutture stradali limitrofe.

Le opere previste in progetto in tale area si configurano come interventi di salvaguardia della sponda sinistra del T. Calderari nel tratto di maggiore vicinanza della SS192 e non sono prettamente funzionali alle opere ferroviarie in progetto (in particolare il nuovo viadotto VI05). Come evidenziato dalle analisi geomorfologiche svolte, il tratto fluviale tra il ponte stradale della SS192 e l’attraversamento ferroviario **non è interessato** da fenomeni di migrazione dell’alveo.

Tuttavia, in tale tratto, come descritto nei paragrafi precedenti sono state comunque previste, a maggiore sicurezza e tutela della linea ferroviaria (nonché per il ripristino della sezione di deflusso a seguito dei lavori di realizzazione del nuovo viadotto), specifiche opere di sistemazione spondale e protezione del fondo alveo.

Il dimensionamento delle ulteriori opere di sistemazione idraulica previste sul torrente Calderari, a monte del ponte della SS192, è stato effettuato, in analogia alle opere previste in corrispondenza del VI05, ricorrendo alla formulazione (*). Considerando i seguenti parametri: $S_g = 2.0$ t/mc; $SF = 2$, $\theta = 34^\circ$ (2/3); $\phi = 40^\circ$, $h = 4.0$ m e $v = 3.0$ m/s (per la portata di progetto, $Tr300$, in via cautelativa in corrispondenza del ciglio superiore della sponda, da modello 2D), si ottiene $d_{50} = 1$ m. Se ne prevede comunque anche la legatura con funi di acciaio, per una maggiore stabilità (il calcolo effettuato prescinde dalla legatura dei massi, non contemplata nelle formulazioni adottate).

Le opere previste a monte del ponte della SS192 saranno quindi della stessa tipologia di quelle previste nel tratto fluviale di valle, come da particolare riportato nella figura seguente. Per maggiori dettagli, si rimanda comunque anche agli elaborati specialistici di OO.CC. relativi alla nuova viabilità NV10.

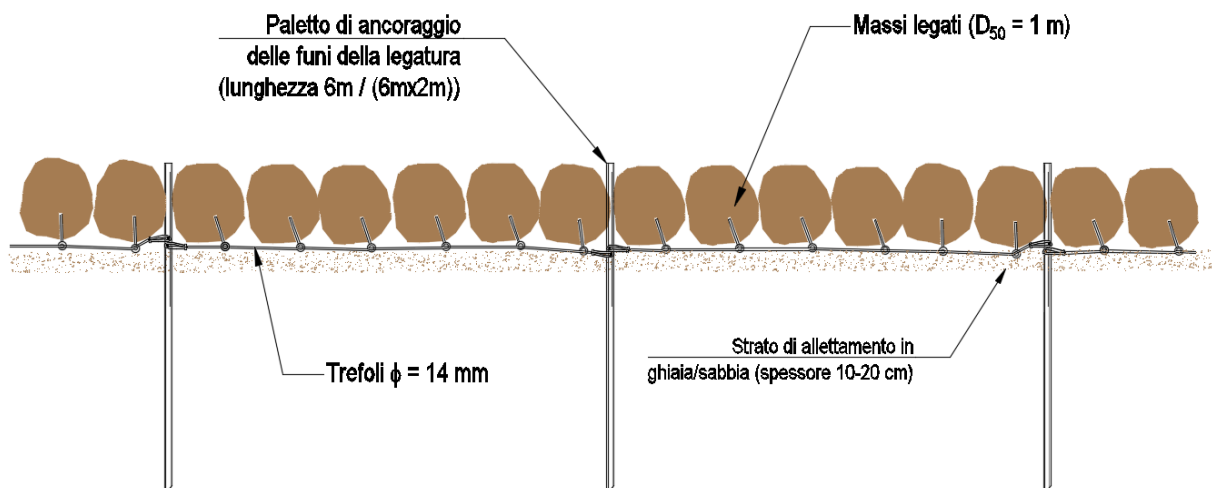



Figura 42 – Ulteriori opere di sistemazione sul Torrente Calderari: dettaglio costruttivo.

Si precisa infine che il dimensionamento dei massi naturali di protezione previsti in progetto è stato eseguito considerando in via cautelativa un peso specifico di 2000 kg/mc; in fase esecutiva, come da capitolato RFI (RFI DTC SI CS SP IFS 007 D), il peso specifico dei massi dovrà essere maggiore o uguale a 2600 kg/mc.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 80 di 95

6. ANALISI DELL'EVOLUZIONE DELLE CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE DEL TORRENTE CALDERARI ALLA CONFLUENZA NEL FIUME DITTAINO

E' stato condotto uno studio di dettaglio, di carattere geomorfologico, volto all'analisi della conformazione dell'alveo del Torrente Calderari e delle sue forme, nel tratto di confluenza con il Fiume Dittaino. I risultati di tale studio sono riportati nell'elaborato specialistico RS3V40D69RGGE0003002A.

Nella presente relazione si riporta una sintesi degli studi svolti, analizzando nel dettaglio, sulla base di foto aeree e ortofoto recuperate dall'archivio dell'Esercito Italiano (fonte: https://www.igmi.org/it/geoprodotti#b_start=0) ed estratte da Google Earth, le variazioni morfologiche e planimetriche dell'alveo del Torrente Calderari, alla confluenza nel Fiume Dittaino, che si sono susseguite nel tempo nel tratto di interesse. Le foto (o ortofoto) recuperate, di seguito mostrate, spaziano dal 1955 al 2018 (orizzonte temporale di 63 anni).



Torrente Calderari nel 1955 (fotogramma n. 6000-268-31A-8013).



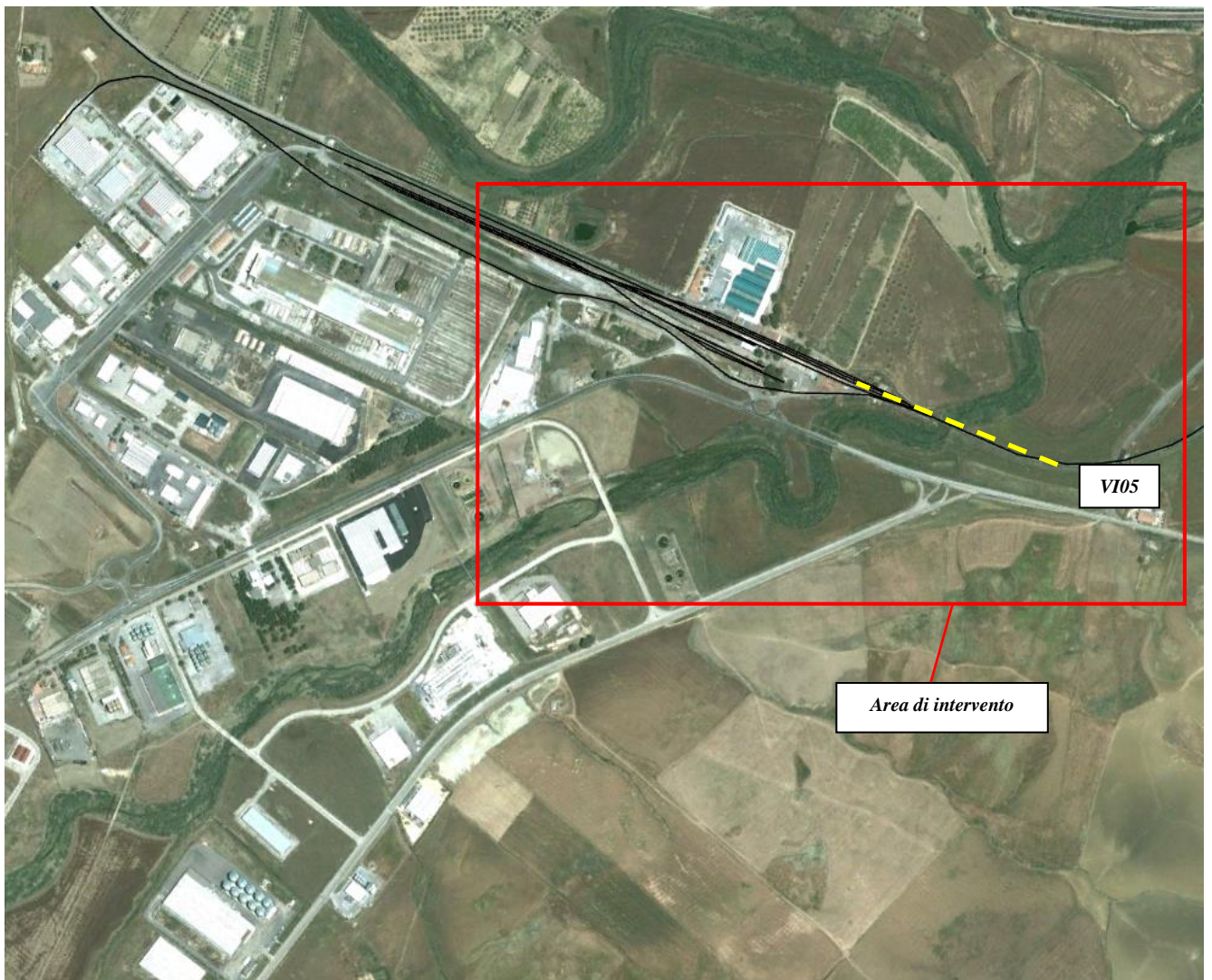
Torrente Calderari nel 1967 (fotogramma n. 4900 - 269-XXVI-583).



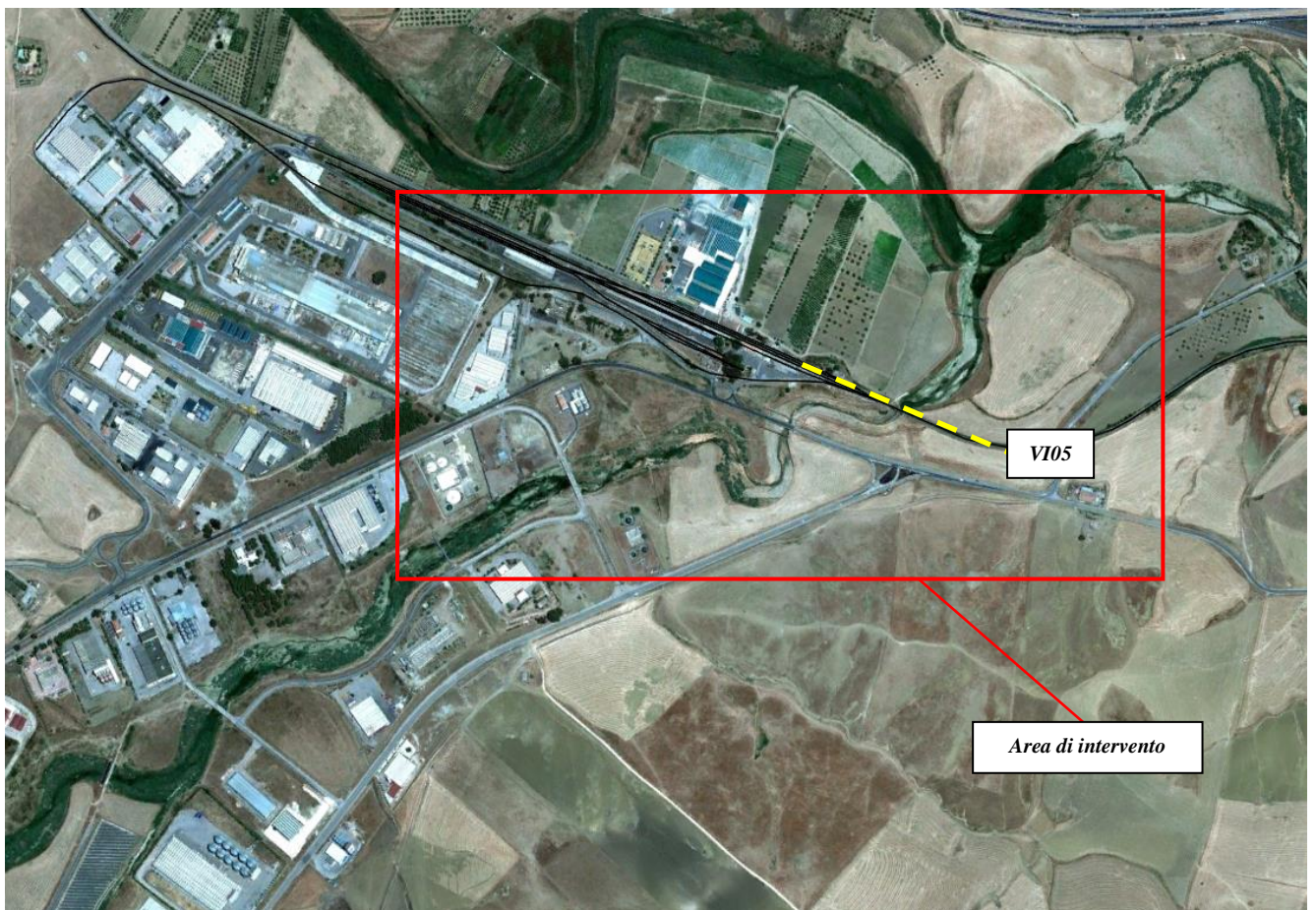
Torrente Calderari nel 1992 (fotogramma n. 6040 - 268-28-1167).



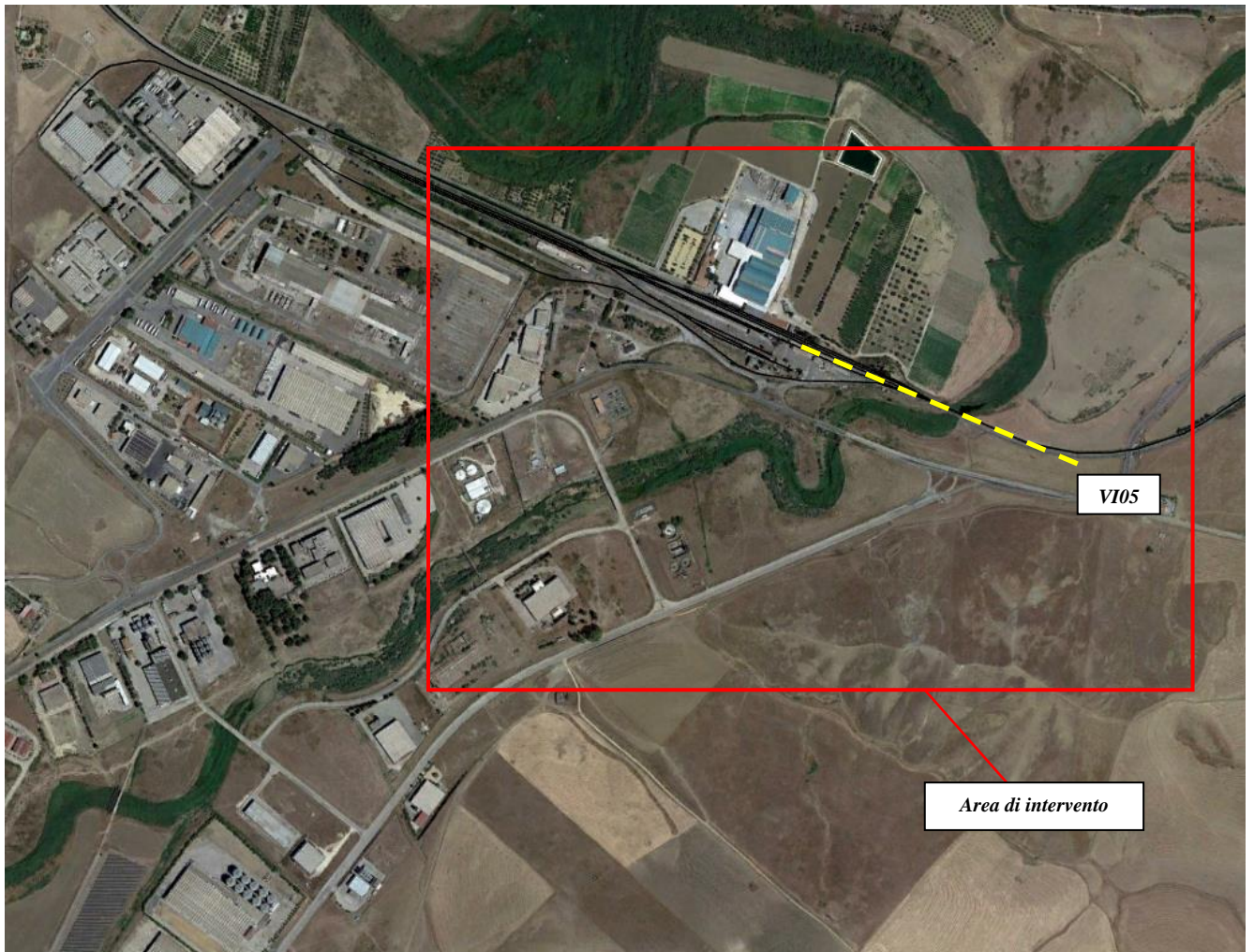
Torrente Calderari nel 2000 (fotogramma n. 4800 - 269-44-1539)



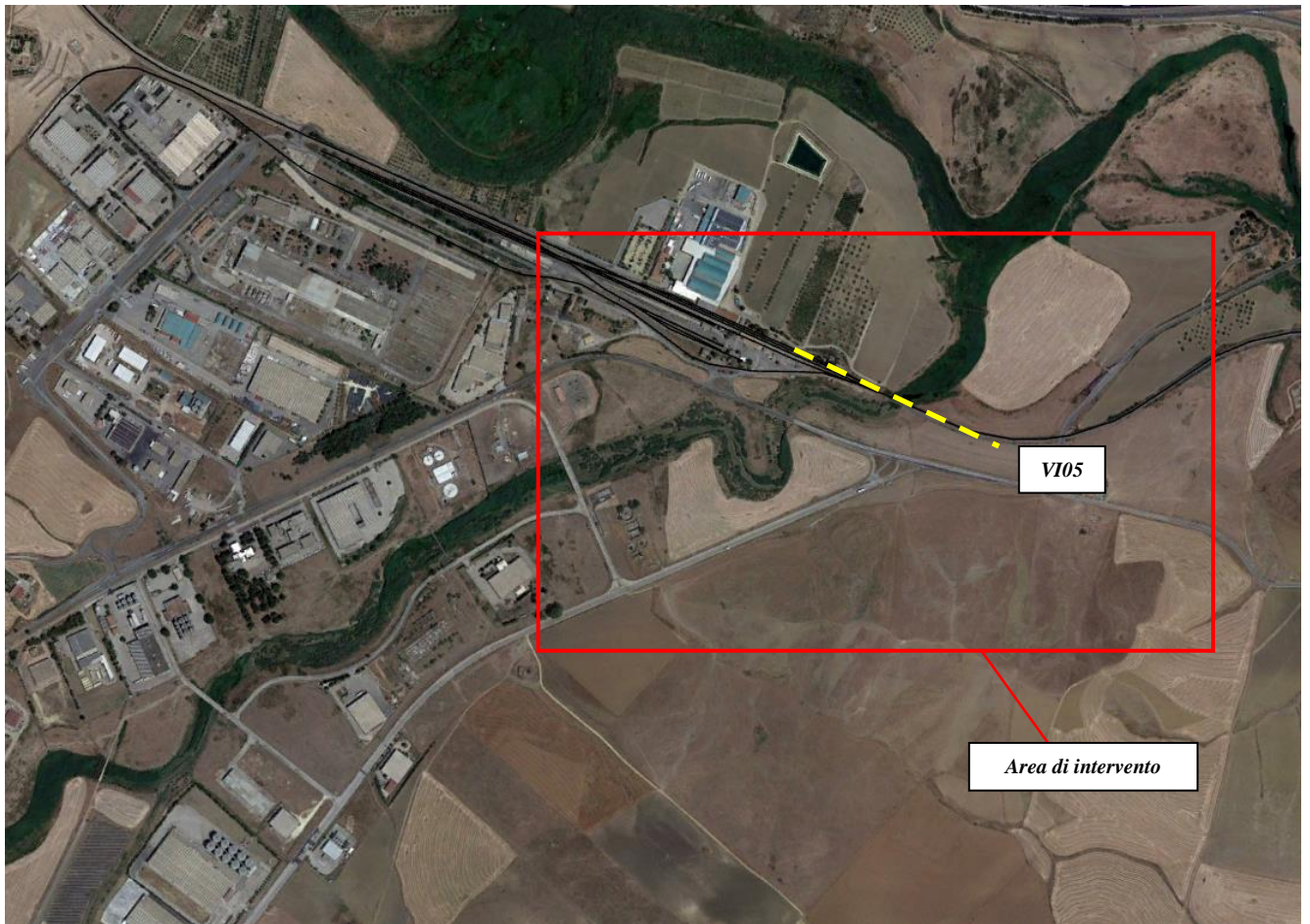
Torrente Calderari nel 2005 (Google Earth).




Torrente Calderari nel 2010 (Google Earth)



Torrente Calderari nel 2016 (Google Earth).



Torrente Calderari nel 2018 (Google Earth).

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 88 di 95

Allo stato attuale il T. Calderari è caratterizzato da un marcato andamento meandriforme e sinuoso, soprattutto nel tratto fluviale immediatamente a monte dell’attraversamento ferroviario esistente (e in progetto).

Come si osserva dalle foto sopra riportate, tale andamento ha caratterizzato la dinamica morfo-evolutiva del corso d’acqua fin dagli anni ’50.

Nello specifico, a partire dagli anni 70’, a seguito dello sviluppo della zona industriale “Dittaino”, l’alveo del Torrente Calderari è stato caratterizzato da forti variazioni planimetriche (legate alla realizzazione di numerose viabilità nell’area) nel tratto a monte dell’attraversamento della strada statale SS 192.

Il tratto fluviale tra il ponte stradale della SS 192 e il ponte ferroviario (attuale) non è stato mai interessato da fenomeni di migrazione dell’alveo, essendo “confinato”, “fissato” proprio tra queste due opere di scavalco.

A partire dagli anni ’90, il Torrente Calderari, nel tratto fluviale a monte dell’attraversamento della SS 192, ha assunto l’andamento plano-altimetrico attuale, ma le analisi svolte (rif. RS3V40D69RGGE0003002A) evidenziano la tendenza a migrare verso destra (verso sud), portando presumibilmente alla formazione di una barra. Tale tendenza alla migrazione non è riscontrabile nel tratto fluviale di interesse, i.e. di attraversamento ferroviario, che, come sopra specificato, non è mai stato interessato da variazioni morfologiche-planimetriche, almeno a partire dal 1955 ad oggi.

In ogni caso, le opere di sistemazione/protezione previste in corrispondenza del nuovo attraversamento (VI05) e a monte del ponte della SS192 contribuiranno comunque a mantenere inalterata la configurazione planimetrica “attuale” del corso d’acqua.

Infine, con riferimento allo studio di geomorfologia fluviale (elaborato RS3V40D09RGID0002001A), nel tratto di attraversamento, i risultati delle simulazioni numeriche (1D) “a fondo mobile” del Torrente Calderari, hanno evidenziato una tendenza evolutiva di “erosione” nella sezione immediatamente a monte del nuovo VI05 e di “deposizione” a valle, con modeste variazioni altimetriche del fondo alveo, tali da non influenzare significativamente i livelli idrici e di conseguenza il franco di sicurezza idraulica.

7. CONSIDERAZIONI SUL TRASPORTO DI MATERIALI GALLEGGIANTI

In merito al tema “*trasporto di materiali galleggianti*”, con riferimento al nuovo viadotto sul T. Calderari (VI05), innanzitutto risulta soddisfatto anche il requisito relativo al dislivello tra fondo alveo e sottotrave (non inferiore a 6÷7 m), come riportato nella circolare esplicativa n.7/2019 (NTC2018) e dimostrato in precedenza.

Inoltre, per le caratteristiche del bacino del T. Calderari, non è da temersi il transito di tronchi di rilevanti dimensioni nella sezione di attraversamento di progetto. Nello specifico, come mostrato nella figura seguente, soltanto il 10% della superficie del bacino del T. Calderari è caratterizzato da “*boschi misti di conifere e latifoglie*”, “*boschi di conifere*”, “*macchia mediterranea*”, “*formazioni vegetali basse*” (fonte: *Corine Land Cover*, Ispra 2012), e per lo più nella parte alta del bacino o in prossimità dello spartiacque, dove la sezione di deflusso del corso d’acqua è caratterizzata da modeste dimensioni (al massimo 6-7 metri come larghezza superficiale), tali da non consentire il trasporto verso valle di tronchi dalle non trascurabili dimensioni.

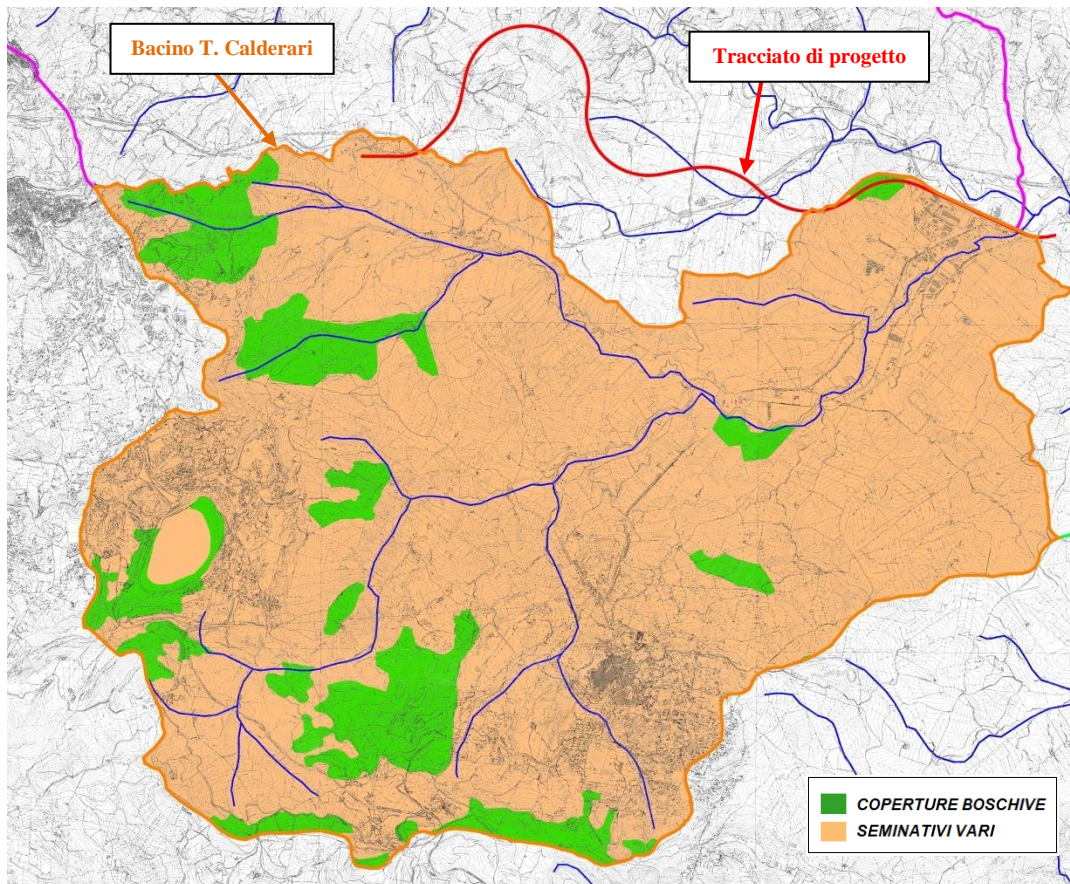


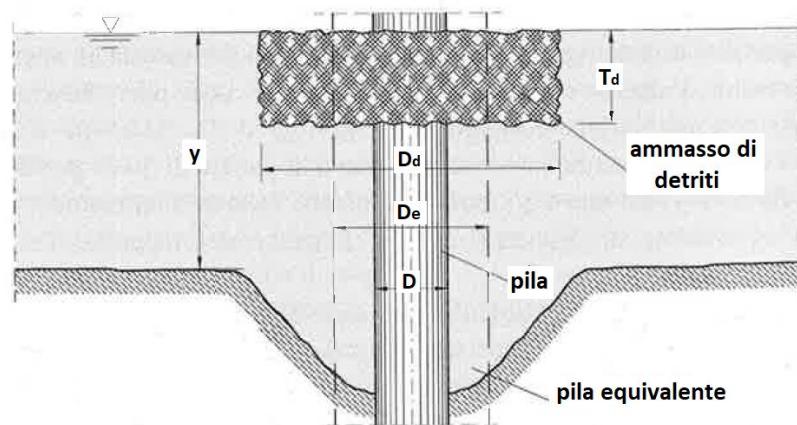
Figura 43 – Bacino del Torrente Calderari: coperture boschive.

Da considerare inoltre anche le decine di opere di attraversamento (la maggior parte con luci ridotte rispetto a quanto previsto attualmente dalla normativa nazionale) presenti nel tratto fluviale a monte della sezione di attraversamento in progetto, nonché l'andamento meandriforme del corso d'acqua (come illustrato nel precedente capitolo), che possono influenzare/ostacolare il trasporto di materiali galleggianti di dimensioni significative verso valle, fino al nuovo viadotto ferroviario.

In ragione della presenza della pila nell'alveo inciso, comunque nel rispetto delle prescrizioni della normativa nazionale attualmente in vigore (NTC2018), si è proceduto tuttavia alla verifica degli effetti sul franco idraulico di progetto dell'eventuale accumulo di detriti attorno alla pila stessa. A tal proposito, si è fatto riferimento alla metodologia descritta in Da Deppo et al. (2004). Nello specifico, il diametro equivalente (D_e) di una pila interessata dall'accumulo di detriti può valutarsi tramite la seguente espressione:

$$D_e = \frac{0.52 \cdot T_d \cdot D_d + (y - 0.52 \cdot T_d) \cdot D}{y}$$

Le variabili che compaiono in detta equazione sono definiti nella figura seguente (T_d e D_d sono le dimensioni dell'accumulo di detriti; D , il diametro della pila; y , il tirante idrico associato alla piena di progetto).




Le variabili T_d e D_d sono correlate tra loro dalla seguente relazione (dedotta da analisi di carattere sperimentale):

$$\frac{T_d}{D_d} = 0.17$$

D_d (larghezza dell'ammasso di detriti) può valutarsi come:

$$D_d = \frac{B}{4} + L$$

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 91 di 95

con B = larghezza del corso d'acqua a monte della sezione di attraversamento e L = lunghezza dei tronchi. Con riferimento alla grandezza L , per poter essere trasportato dalla corrente e non rimanere bloccato sulle sponde, il tronco deve avere comunque una lunghezza $L \leq B/2$.

Pertanto, nel caso in cui non siano note le caratteristiche del materiale trasportato in alveo, si può assumere in via cautelativa $L = B/2$, da cui $D_d = (3/4) \cdot B$, oppure fare riferimento ad indicazioni suggerite dalla pratica progettuale (ad esempio, in Australia, $D_d = 20$ metri).

Nel caso in esame, la larghezza della sezione d'alveo del T. Calderari, a monte dell'attraversamento in progetto, ammonta a $B = 50$ metri, da cui $D_d = (3/4) \cdot B = 37.5$ m. Applicando la relazione $\frac{T_d}{D_d} = 0.17$, si ottiene $T_d = 6.4$ metri. Quest'ultimo valore non sembra però realistico, visto che l'altezza idrica della corrente, al passaggio della piena con $Tr = 300$ anni, si attesta a 4.5 metri.

Si è proceduto quindi imponendo $D_d = 20$ metri (come nella pratica progettuale australiana), ricavando a ritroso (per confronto) la larghezza "effettiva" della sezione di monte, "utile" al trasporto di materiali galleggianti ($B = 27$ metri). In tal modo si ha $T_d = 3.4$ metri, da cui (per $y = 4.5$ metri, $D = 4.5$ metri) un diametro equivalente della pila $D_e = 11$ metri.

E' stata quindi modificata la geometria della pila nel modello numerico sviluppato ed effettuata di nuovo la simulazione (per la configurazione "post operam") per il tempo di ritorno di progetto, $Tr = 300$ anni.

I risultati ottenuti mostrano un incremento massimo dei livelli idrici, nella sezione di attraversamento, di 10 cm (rispetto alla configurazione con diametro della pila $D = 4,5$ m), da cui un franco idraulico, per la piena trecentennale pari a 1.60 m (contro 1.70 m, come determinato in precedenza), ancora superiore rispetto al minimo stabilito dalla normativa vigente.

Interessante la modifica del campo dei vettori velocità attorno alla pila, con un incremento (massimo) delle velocità stesse di 0.5 m/s, trascurabile nei confronti sia dei valori di scalzamento sopra valutati (e quindi per il dimensionamento delle opere di fondazione della pila in alveo) sia delle opere di protezione/sistemazione previste, per le quali ne è stata comunque prevista la legatura (non contemplata nei calcoli di dimensionamento).

Di seguito, si riporta il confronto tra i campi di velocità attorno alla pila con diametro pari a quello di progetto (4.5 metri) e al diametro equivalente sopra valutato (11 metri).

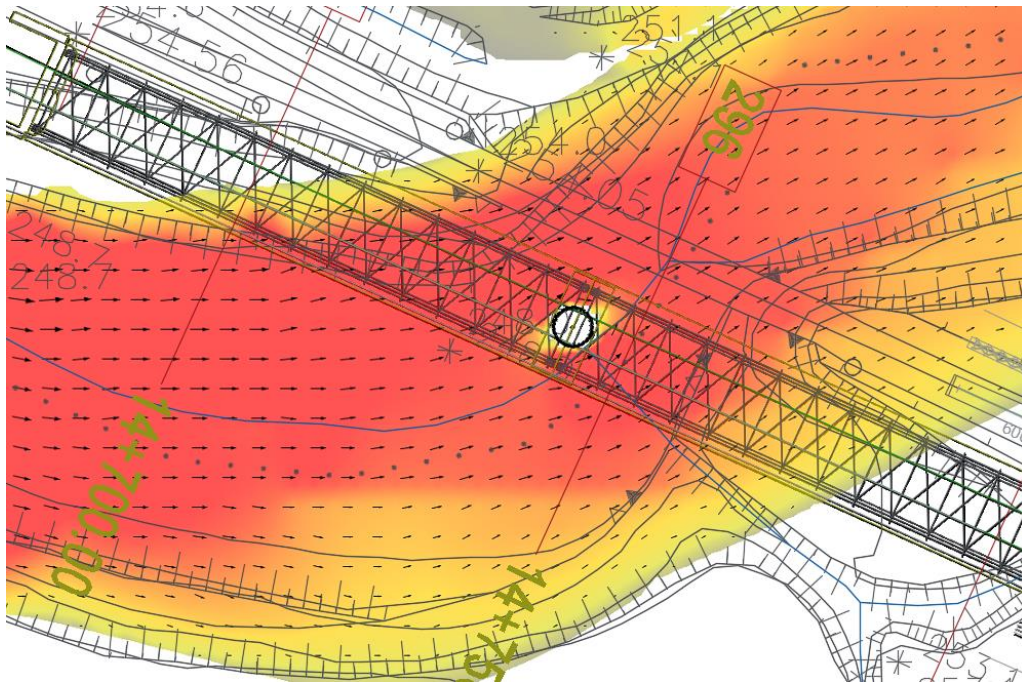


Figura 44 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: campo di velocità nella configurazione con diametro pila pari a 4.5 m.

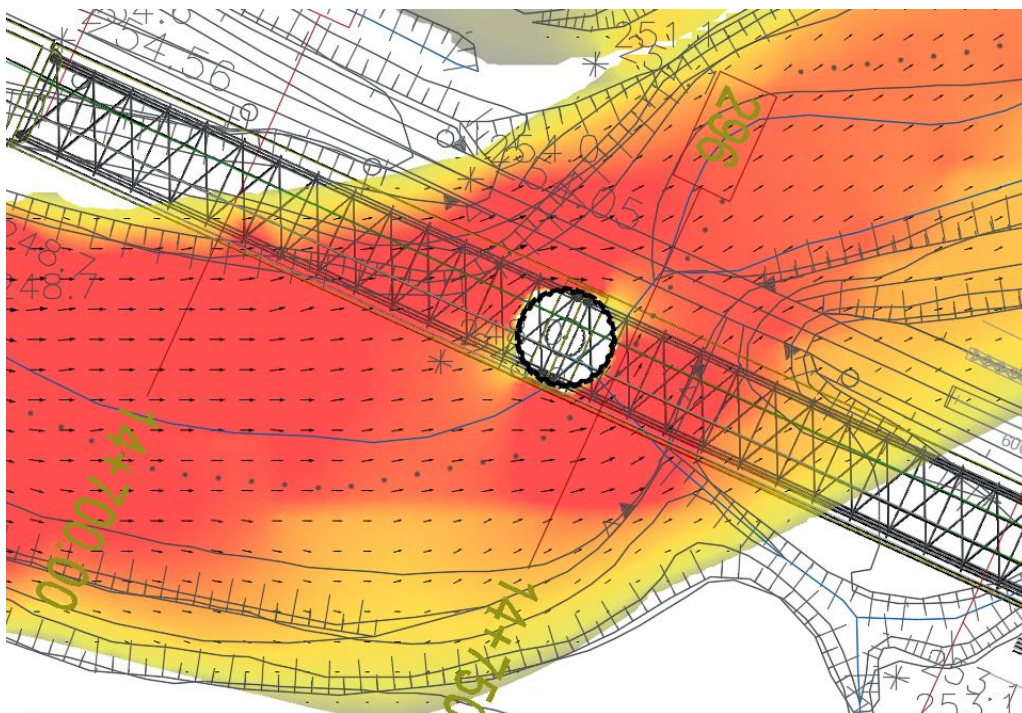


Figura 45 – Modello 2D “Dittaino-Calderari”: campo di velocità nella configurazione con diametro pila pari a 11 m.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 93 di 95

8. COMPATIBILITA' IDRAULICA DELLE OPERE IN PROGETTO

Con riferimento alle NTC 2018, al Cap. 5, si asserisce:

“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. Nel caso di pile e/o spalle in alveo, cura particolare è da dedicare al problema delle escavazioni in corrispondenza delle fondazioni e alla protezione delle fondazioni delle pile e delle spalle tenuto anche conto del materiale galleggiante che il corso d’acqua può trasportare. In tali situazioni, una stima anche speditiva dello scalzamento è da sviluppare fin dai primi livelli di progettazione. 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 e il fondo alveo. Quando l’intradosso delle strutture non sia costituito da un’unica linea orizzontale tra gli appoggi, il franco idraulico deve essere assicurato per una ampiezza centrale.”

I viadotti in progetto (VI04 e VI05) analizzati nel presente studio sono caratterizzati da luci e franchi nel rispetto della normativa vigente. E’ rispettato infatti il franco minimo di 1,5 metri rispetto al livello idrico corrispondente alla piena di progetto (Tr_{300}), nonché la distanza minima tra pile contigue (o tra pila e spalla) in alveo (40 metri).

E’ stato trattato il tema relativo alle escavazioni in corrispondenza delle fondazioni delle pile interessate dalla piena di progetto e alle protezioni delle fondazioni delle pile.

Con riferimento al T. Calderari, per quanto concerne la necessità di realizzare la pila in alveo ovvero all’interno della sezione del corso d’acqua interessata dalla piena di progetto, si precisa che la soluzione adottata discende da esigenze di natura economica e di “tracciato”; nello specifico:

- per scavalcare completamente l’alveo (ovvero la sezione del corso d’acqua interessata dalla piena di progetto) è necessaria una campata con luce netta di 120 metri, dai costi notevolmente superiori a quelli del viadotto a due campate (luce = 70 metri) previsto in progetto (VI05);


- il piano ferro in corrispondenza dell'attraversamento sul T. Calderari è stato già innalzato il più possibile, compatibilmente con i vincoli plano-altimetrici presenti, derivanti dalla vicina stazione di Dittaino e dal raccordo con il successivo Lotto 5 (tratta "Dittaino-Catenanuova"). La soluzione ad unica campata (luce netta = 120 metri) comporterebbe la scelta di una tipologia strutturale di viadotto/ponte differente da quella adottata (ad esempio ad arco metallico), con uno spessore di impalcato superiore, ovvero (fissata la quota del piano ferro di progetto) una quota di intradosso inferiore tale da non consentire il rispetto del franco idraulico minimo di 1.5 m, a meno di ulteriori interventi in alveo e/o opere idrauliche di difesa (e.g. casse di espansione), con un incremento ancora dei costi (sia di realizzazione dell'opera che di gestione del territorio);
- da considerare inoltre anche gli effetti sul paesaggio/territorio e sull'impatto visivo di un'opera (ad unica campata con luce netta = 120 metri) più imponente di quella prevista in progetto.

In ragione della presenza della pila nell'alveo inciso, comunque nel rispetto delle prescrizioni della normativa nazionale attualmente in vigore (NTC2018), si è proceduto inoltre alla verifica degli effetti sul franco idraulico di progetto dell'eventuale accumulo di detriti attorno alla pila stessa, anche se non è da temersi per le caratteristiche di copertura del suolo del bacino, il trasporto di materiali galleggianti di rilevanti dimensioni. Nello specifico, gli incrementi di tirante e velocità ottenuti in simulazioni con pila caratterizzata da un diametro maggiorato, opportunamente valutato, non hanno effetti significativi sulle verifiche nei confronti del franco idraulico, dello scalzamento e delle opere di protezione in alveo.

Negli ultimi decenni, non si riscontrano, come mostrato dalle ortofoto precedentemente descritte, variazioni planimetriche del corso d'acqua nel sezione di attraversamento. Il Torrente Calderari ha mantenuto negli anni l'attuale assetto morfologico, senza "spostamenti" dell'alveo inciso.

E' da sottolineare, con riferimento alla pianificazione di bacino, che le opere in progetto non interferiscono con le aree di pericolosità idraulica PAI/PGRA. Infine, lo studio idraulico del T. Calderari ha dimostrato che le opere di riprofilatura e sistemazione dell'alveo previste in progetto (unitamente alla demolizione del ponte ferroviario esistente) consentono di ridurre le esondazioni del Torrente Calderari, attenuando la pericolosità/rischio idraulico attualmente presente nell'area di intervento.

In definitiva, le analisi e le verifiche idrauliche svolte dimostrano la compatibilità idraulica delle opere in progetto (viadotto VI05, VI04), nonché delle opere annesse (i.e. viabilità e fabbricati presso la stazione di Dittaino), in termini sia di franco di sicurezza sia di possibile interferenza con le aree potenzialmente inondabili.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA					
	PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4b)					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. D	FOGLIO 95 di 95

9. 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.
- Escarameia 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.
- 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.