

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE



DIREZIONE PROGETTAZIONE

S.O. IDRAULICA

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA

POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE-FALCONARA

RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228-CASTELPLANIO

LOTTO 1

RELAZIONE IDRAULICA

Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Esino – Opere Maggiori

SCALA:

-

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

IR0F 01 R 09 RI ID0002 001 B

| Rev. | Descrizione          | Redatto   | Data          | Verificato | Data          | Approvato   | Data          | Autorizzato Data                                                          |
|------|----------------------|-----------|---------------|------------|---------------|-------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------|
| A    | EMISSIONE DEFINITIVA | C. Cesali | Febbraio 2022 | F. Cabas   | Febbraio 2022 | C. Urciuoli | Febbraio 2022 | F. Cabas                                                                  |
| B    | EMISSIONE DEFINITIVA | C. Cesali | Feb 2024      | C. Cesali  | Feb 2024      | C. Urciuoli | Feb 2024      | Feb 2024                                                                  |
|      |                      |           |               |            |               |             |               | ITALFERR S.p.A.                                                           |
|      |                      |           |               |            |               |             |               | Iscrizione all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma al n. 15744 |
|      |                      |           |               |            |               |             |               | Ing. Fabrizio Cabas                                                       |

File: IR0F01R09RIID0002001B

n. Elab.:

|                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                              |                  |                |                         |           |                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|-------------------|
|  <b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA<br/>         RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO<br/>         Lotto 1</b><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                   |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                                                                              | COMMESSA<br>IR0F                                                                                                                                                                             | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>2 di 42 |

## INDICE

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. PREMESSA .....                                                                             | 5  |
| 2. INQUADRAMENTO GENERALE DELLA TRATTA FERROVIARIA IN PROGETTO .....                          | 6  |
| 2.1 PERICOLOSITÀ IDRAULICA .....                                                              | 6  |
| 3. ANALISI IDRAULICHE.....                                                                    | 8  |
| 3.1 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE 2D .....                                            | 9  |
| 3.1.1 Scenario ante operam e confronto con le aree di pericolosità idraulica da P.G.R.A. .... | 9  |
| 3.1.2 Scenario post operam e confronto con scenario ante operam.....                          | 10 |
| 3.2 VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO DI PROGETTO .....                                           | 13 |
| 3.3 ULTERIORI VERIFICHE IDRAULICHE.....                                                       | 15 |
| 3.3.1. Fasi provvisorie di realizzazione delle fondazioni delle pile .....                    | 15 |
| 4. VALUTAZIONE DELLO SCALZAMENTO ATTESO .....                                                 | 19 |
| 5. OPERE DI SISTEMAZIONE IDRAULICA .....                                                      | 30 |
| 6. ANALISI MULTITEMPORALE DELLE CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE DEL FIUME ESINO.....             | 34 |
| 7. CONSIDERAZIONI SUGLI EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI.....                                | 39 |
| 8. VALUTAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA DELLE OPERE IN PROGETTO.....                       | 40 |
| 9. BIBLIOGRAFIA .....                                                                         | 42 |

|                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                        |                  |                |                         |           |                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|-------------------|
|  <b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA</b><br><b>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO</b><br><b>Lotto 1</b><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                   |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA</b>                                                                                               | COMMESSA<br>IR0F                                                                                                                                                                       | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>3 di 42 |

## INDICE DELLE FIGURE

|                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 1 – Lotto 1: pericolosità idraulica da P.G.R.A. (2019), alla progr. 6+600 circa. ....                                                                                                                              | 6  |
| Fig. 2 – Fiume Esino: modello numerico bidimensionale, tratto fluviale di interesse, relativo al Lotto 1.....                                                                                                           | 8  |
| Fig. 3 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: aree potenzialmente inondabili, Tr = 200 anni, ante operam, e confronto con aree di pericolosità idraulica P2 da P.G.R.A.A.C. (2021), in quel di Bivio Nord Albacina..... | 9  |
| Fig. 4 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: aree potenzialmente inondabili, Tr = 200 anni, ante operam, in quel di PM228. ....                                                                                        | 10 |
| Fig. 5 – Viadotto VI01 (lotto 1): stralcio della planimetria di progetto.....                                                                                                                                           | 11 |
| Fig. 6 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: aree potenzialmente inondabili, Tr = 200 anni, post operam, in quel di PM228. ....                                                                                        | 12 |
| Fig. 7 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: aree potenzialmente inondabili, Tr = 200 anni, post operam, in quel di Bivio Nord Albacina. ....                                                                          | 13 |
| Fig. 8 – Modello numerico 2D del Fiume Esino, configurazione post operam: stralcio della mappa dei vettori velocità in corrispondenza del viadotto VI01.....                                                            | 14 |
| Fig. 9 – Modello numerico 1D del Fiume Esino, livello idrico “ di cantiere”, a monte della sezione di attraversamento del VI01, allo stato attuale. ....                                                                | 16 |
| Fig. 10 – Modello numerico 1D del Fiume Esino, livello idrico “ di cantiere”, a monte della sezione di attraversamento del VI01, nella configurazione provvisoria, di realizzazione delle pile/fondazioni. ....         | 17 |
| Fig. 11 – Opere provvisorie per la realizzazione delle opere di fondazione del viadotto VI01 sul Fiume Esino. ..                                                                                                        | 18 |
| Fig. 12 – Differenti tipologie di pile non uniformi dotate di fondazioni. ....                                                                                                                                          | 22 |
| Fig. 13 – Modello numerico 1D del Fiume Esino, livello idrico per la portata Tr = 1,001, in corrispondenza della sezione di attraversamento del VI01.....                                                               | 23 |
| Fig. 14 – Calcolo dello scalzamento in corrispondenza delle spalle: definizione dei parametri.....                                                                                                                      | 26 |
| Fig. 15 – Stralcio del profilo geotecnico lungo il viadotto VI01. ....                                                                                                                                                  | 29 |
| Fig. 16 – Particolare sistemazione spondale in massi sciolti/legati. ....                                                                                                                                               | 32 |
| Fig. 17 – Tratta Castelplanio-Montecarotto: opere di protezione realizzate in corrispondenza dell’attraversamento del F. Esino.....                                                                                     | 33 |
| Fig. 18 – Tratta Castelplanio-Montecarotto: opere di sistemazione spondale realizzate sul Fiume Esino.....                                                                                                              | 33 |
| Fig. 19 – Stralcio di foto aerea 1952: tratto fluviale del Fiume Esino in corrispondenza del nuovo viadotto VI01. ....                                                                                                  | 34 |
| Fig. 20 – Stralci di foto aerea 1985: tratto fluviale del Fiume Esino in corrispondenza del nuovo viadotto VI01. ....                                                                                                   | 35 |

|                                                                                   |                                                                                                                                                                                        |                  |                |                         |           |                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|-------------------|
|  | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA</b><br><b>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO</b><br><b>Lotto 1</b><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                   |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                      | COMMESSA<br>IR0F                                                                                                                                                                       | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>4 di 42 |

*Fig. 21 – Stralcio di foto aerea 1991: tratto fluviale del Fiume Esino in corrispondenza del nuovo viadotto VI01. 36*

*Fig. 22 – Stralcio di foto aerea 2004: tratto fluviale del Fiume Esino in corrispondenza del nuovo viadotto VI01. 37*

*Fig. 23 – Stralcio di foto aerea 2023: tratto fluviale del Fiume Esino in corrispondenza del nuovo viadotto VI01. 38*

## INDICE DELLE TABELLE

*Tabella 1 – Viadotto VI01 (attraversamento del Fiume Esino): verifica del franco idraulico di progetto.....13*

*Tabella 2 - Formulazione CSU: valori dei fattori correttivi K1, K2, K3. ....20*

|                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                        |                  |                |                         |           |                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|-------------------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA</b><br><b>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO</b><br><b>Lotto 1</b><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                   |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                                                                                 | COMMESSA<br>IR0F                                                                                                                                                                       | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>5 di 42 |

## 1. PREMESSA

Il presente elaborato è parte integrante del Progetto di Fattibilità Tecnico Economica “*Potenziamento infrastrutturale Orte-Falconara. Raddoppio della tratta PM228-Castelplanio*”. Tale progetto è suddiviso nei 3 Lotti Funzionali di seguito elencati:

- **Lotto 1: da PM228 a Bivio Nord Albacina da progressiva Km 0+00 (Km 228+014 della LS) alla progressiva Km 7+200 di progetto**
- Lotto 2: da Bivio Nord Albacina a Serra San Quirico (i) da progressiva Km 0+00 (Km 237+589 della LS) alla progressiva Km 8+889 (Km 246+958 della LS)
- Lotto 3: da Serra San Quirico (e) a Castelplanio (e) da progressiva Km 0+00 a progressiva Km 6+272 (Km 252+578 della LS).

La presente relazione è riferita nello specifico al **Lotto 1 (PM228 – Bivio Nord Albacina)**. In tale tratta, ad inizio intervento, in quel di PM228, il tracciato in progetto si sviluppa in affiancamento al Torrente Giano (affluente in sinistra idraulica del F. Esino); nella parte finale, prima del Bivio Nord Albacina, la “nuova” linea ferroviaria attraversa il Fiume Esino tramite il viadotto VI01.

Sono attraversati anche alcuni corsi d’acqua minori (tributari del T. Giano e del F. Esino), nei tratti allo scoperto, agli imbocchi della lunga galleria “Le Cone”, la cui trattazione è riportata nella relazione idraulica IR0F01R09RIID0002002.

Sulla scorta delle analisi “generali” idrologiche (rif. IR0F00R09RIID0001001) e idrauliche (rif. IR0F00R09RIID0002001) annesse, nella presente relazione sono esaminati in dettaglio i risultati delle simulazioni numeriche bidimensionali della propagazione delle piene di riferimento ( $Tr = 200$  anni) del Fiume Esino nel tratto fluviale di principale interesse, i.e. da **PM228 a Bivio Nord Albacina**.

E’ riportata la verifica di compatibilità idraulica delle opere di attraversamento in progetto sul Fiume Esino (i.e. viadotto VI01), nonché della nuova linea ferroviaria nel suo complesso, relativamente al **Lotto 1**, ai sensi delle normative nazionali (i.e. NTC2018) e della pianificazione di bacino (P.G.R.A.A.C., 2021) in vigore.

Sono trattati anche i temi relativi al massimo scalzamento atteso attorno alle pile in alveo (o interessate dalla piena di progetto, TR200) nonché il dimensionamento delle relative opere di sistemazione al fine di inibire possibili fenomeni di erosione, anche dopo i rimaneggiamenti dovuti alle fasi di realizzazione delle nuove opere.

|                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                        |                  |                  |                |                         |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA</b><br><b>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO</b><br><b>Lotto 1</b><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                  |                |                         |           |
|                                                                                                                                              | <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                                                                                                                           | COMMESSA<br>IR0F | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B |

## 2. INQUADRAMENTO GENERALE DELLA TRATTA FERROVIARIA IN PROGETTO

### 2.1 Pericolosità idraulica

Come già descritto nella relazione idraulica annessa IR0F00R09RIID0002001, nell'ambito del **Lotto 1** (da progr. 0+000 a progr. 6+272), le principali criticità e interferenze idrauliche (e/o con aree a pericolosità idraulica da P.G.R.A.A.C. 2021) sono rappresentate dall'attraversamento del Fiume Esino in un tratto in cui sono definite aree a pericolosità P2, tra l'imbocco lato Castelplanio della Galleria "Le Cone" e il Bivio Nord Albacina.

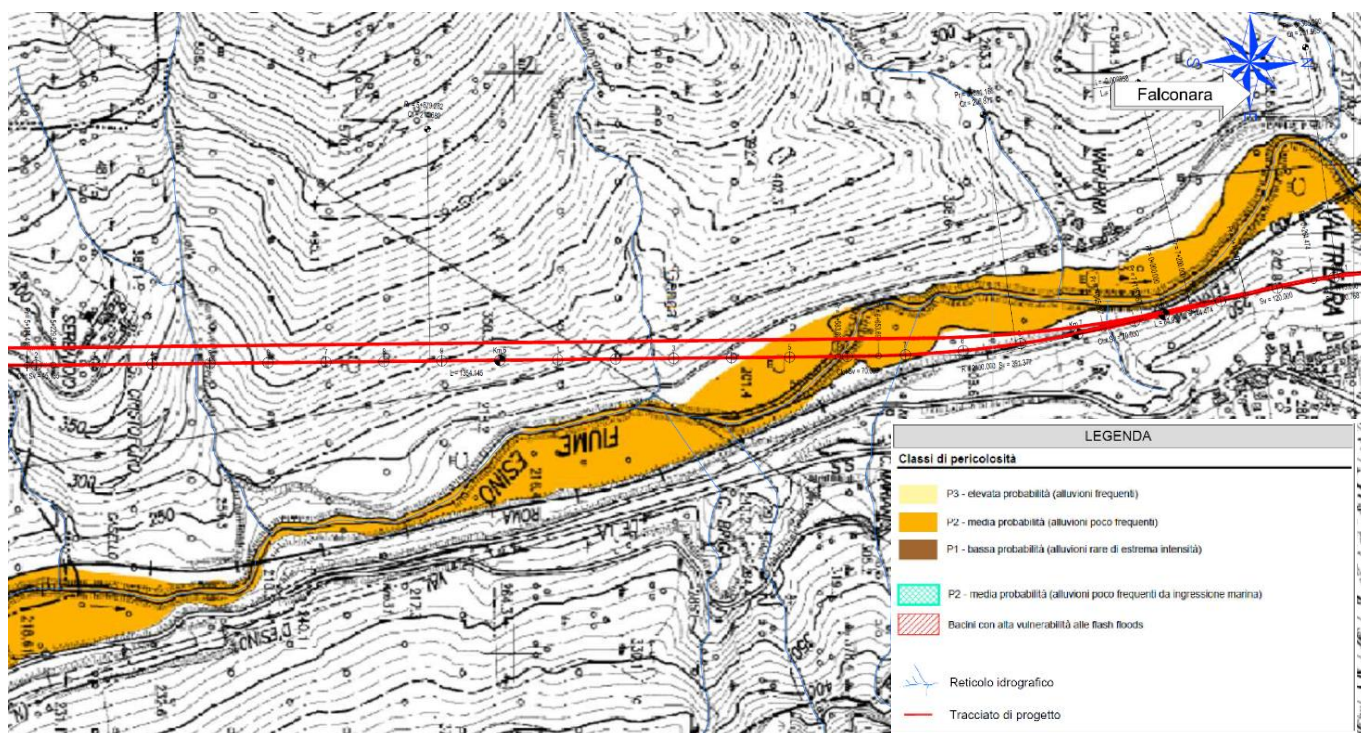


Fig. 1 – Lotto 1: pericolosità idraulica da P.G.R.A. (2019), alla progr. 6+600 circa.

Si è operato quindi in conformità alle *Norme Tecniche di Attuazione* del Piano di Assetto Idrogeologico – P.A.I. Regione Marche (normativa comunque rimasta in vigore e di riferimento nell'ambito della pianificazione di bacino, a seguito anche dell'emanazione del P.G.R.A.A.C.) sviluppando uno studio di compatibilità idraulica in cui si è dimostrata la coerenza delle opere in progetto con quanto proposto nella pianificazione di bacino ed in particolare che gli *“interventi previsti rispettino il vincolo di non*

|                                                                                                                           |                                                                                                                                                                |         |          |            |      |         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------|------------|------|---------|
| <br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA<br>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO<br>Lotto 1<br><br>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA |         |          |            |      |         |
| RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA                                                                                     | COMMESSA                                                                                                                                                       | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO  | REV. | FOGLIO  |
|                                                                                                                           | IR0F                                                                                                                                                           | 01 R 09 | RI       | ID0002 001 | B    | 7 di 42 |

*aumentare il livello di pericolosità e di rischio esistente e di non precludere la possibilità di eliminare o ridurre le condizioni di pericolosità e rischio mediante azioni future”.*

Lo studio idrologico-idraulico condotto (rif. IR0F00R09RIID0001001, IR0F00R09RIID0002001) ha permesso di verificare/confermare tali situazioni di pericolosità, nonché di definire le quote del piano ferro in corrispondenza delle principali interferenze idrauliche.

Nello specifico, sono stati determinati i parametri (i.e. estensione esondazione, livelli idrici, velocità) utili alla progettazione delle opere di attraversamento (viadotti) sul Fiume Esino e alla definizione della loro tipologia. Come descritto in seguito, la tipologia dominante/maggiormente adottata è quella di “reticolare/travata metallica”, in ragione delle elevate luci di scavalco necessarie per attraversare il Fiume Esino nel rispetto delle prescrizioni in materia di compatibilità idraulica riportate nelle NTC2018 (i.e. distanza minima di 40 metri tra pile contigue in alveo, in direzione ortogonale al filone principale della corrente).

Nel capitolo successivo, si riporta quindi una disamina dei risultati delle simulazioni della propagazione della piena del Fiume Esino con tempo di ritorno di 200 anni (nel tratto tra **PM228** e **Bivio Nord Albacina**), condotte secondo modello numerico bidimensionale, la cui implementazione è dettagliatamente descritta nella relazione annessa IR0F00R09RIID0002001 alla quale si rimanda per maggiori approfondimenti.

|                                                                                   |                                                                                                                                                                                        |                  |                |                         |           |                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|-------------------|
|  | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA</b><br><b>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO</b><br><b>Lotto 1</b><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                   |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                      | COMMESSA<br>IROF                                                                                                                                                                       | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>8 di 42 |

### 3. ANALISI IDRAULICHE

Come descritto nella relazione IROF00R09RIID0002001, sulla base dello studio idrologico è stato sviluppato un unico modello numerico idraulico 2D del Fiume Esino, relativamente ai tre lotti in cui è suddiviso il progetto, da PM228 a Castelplanio. Nella presente relazione sono descritti i risultati ottenuti nel tratto *PM228 – Bivio Nord Albacina* (**Lotto 1**), evidenziato in figura.

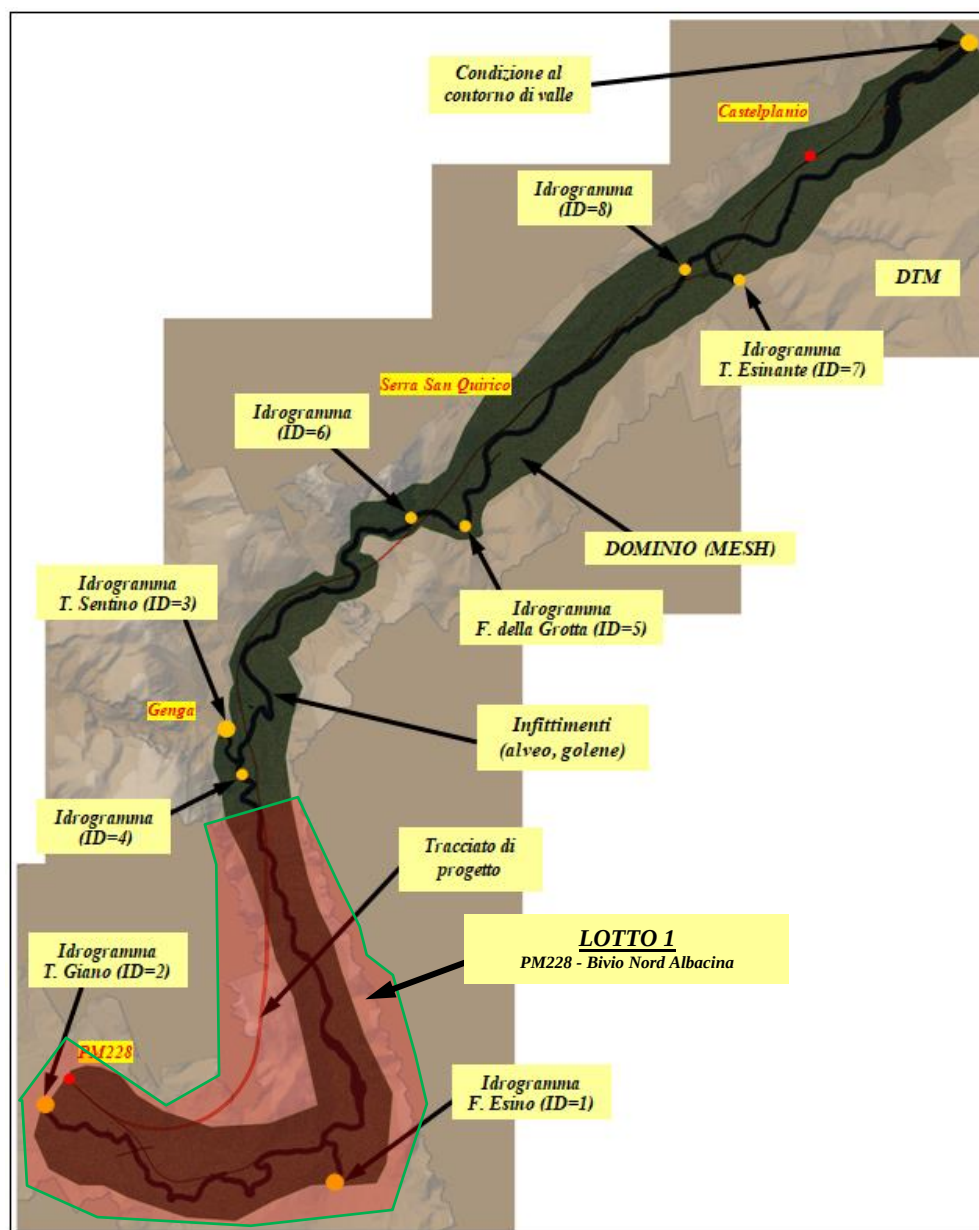


Fig. 2 – Fiume Esino: modello numerico bidimensionale, tratto fluviale di interesse, relativo al Lotto 1.



|                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                        |                  |                |                         |           |                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|-------------------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA</b><br><b>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO</b><br><b>Lotto 1</b><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                   |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                                                                                 | COMMESSA<br>IROF                                                                                                                                                                       | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>9 di 42 |

### 3.1 Risultati delle simulazioni numeriche 2D

#### 3.1.1 Scenario ante operam e confronto con le aree di pericolosità idraulica da P.G.R.A.

Nelle figure seguenti sono riportati i risultati in termini di aree potenzialmente inondabili della simulazione numerica dell'onda di piena del Fiume Esino, per un tempo di ritorno di 200 anni, nello scenario “*ante operam*”, unitamente alle aree di pericolosità idraulica P2 indicate nei documenti del P.G.R.A.A.C. (2021).

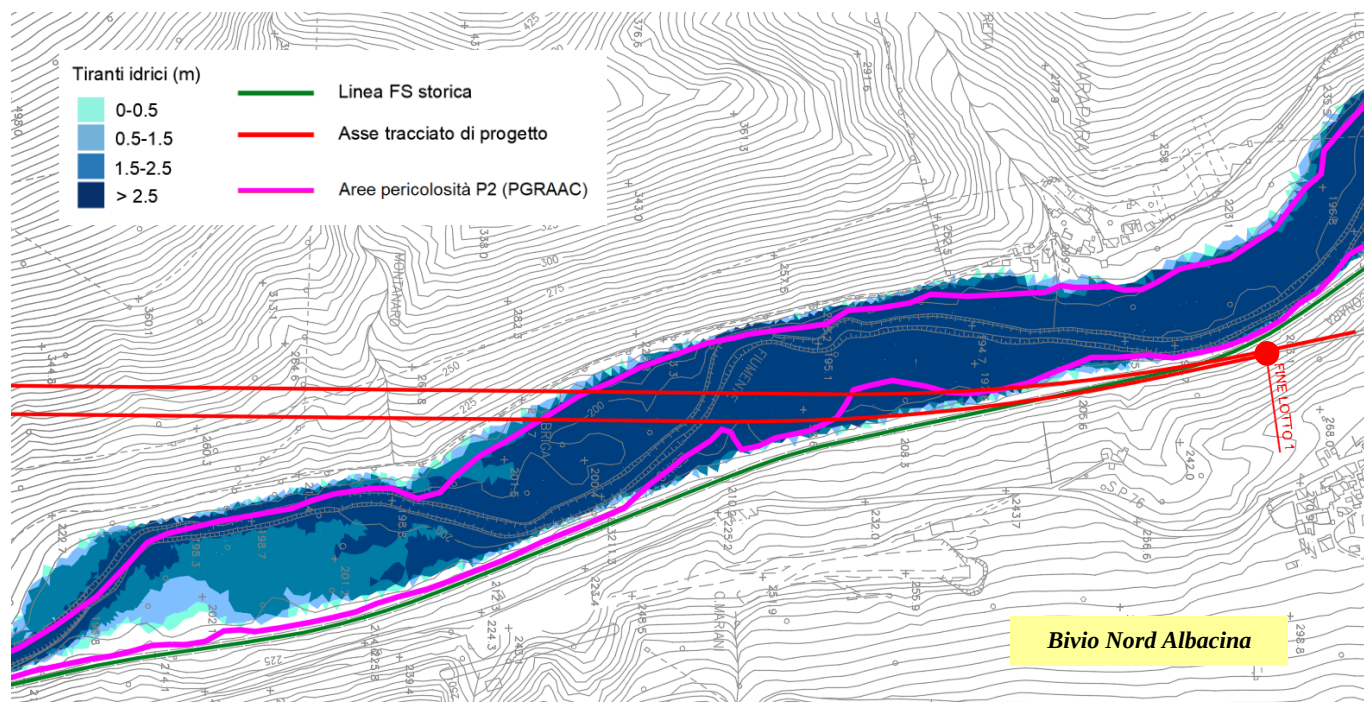


Fig. 3 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: aree potenzialmente inondabili,  $Tr = 200$  anni, ante operam, e confronto con aree di pericolosità idraulica P2 da P.G.R.A.A.C. (2021), in quel di Bivio Nord Albacina.

I risultati delle simulazioni numeriche bidimensionali riproducono (nel tratto oggetto di analisi) le aree di pericolosità idraulica del P.G.R.A.A.C. (2021), con modestissime differenze. Da precisare che nel tratto di attraversamento il Fiume Esino scorre in una valle molto stretta secondo un tracciato abbastanza inciso.

Sono stati quindi determinati i parametri (i.e. estensione esondazione, livelli idrici, velocità) utili alla progettazione delle opere di attraversamento (i.e. viadotto VI01) sul Fiume Esino, implementate quindi

|                                                                                   |                                                                                                                                                                                        |                  |                |                         |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
|  | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA</b><br><b>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO</b><br><b>Lotto 1</b><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                    |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                      | COMMESSA<br>IROF                                                                                                                                                                       | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>10 di 42 |

nello scenario “*post operam*”. Sono state definite e verificate anche le quote del piano ferro in corrispondenza dei tratti di maggiore affiancamento al Fiume Esino.

Per completezza, nella figura seguente, si riportano le aree potenzialmente inondabili (TR200) del T. Giano, in corrispondenza del tratto “allo scoperto” iniziale, a PM228. Non si evidenziano criticità; il tracciato della linea ferroviaria in progetto non è interessato dalle acque esondate. Si precisa che in tale tratto non sono state definite aree a pericolosità idraulica nell’ambito della pianificazione di bacino vigente (PGRAAC, 2021).

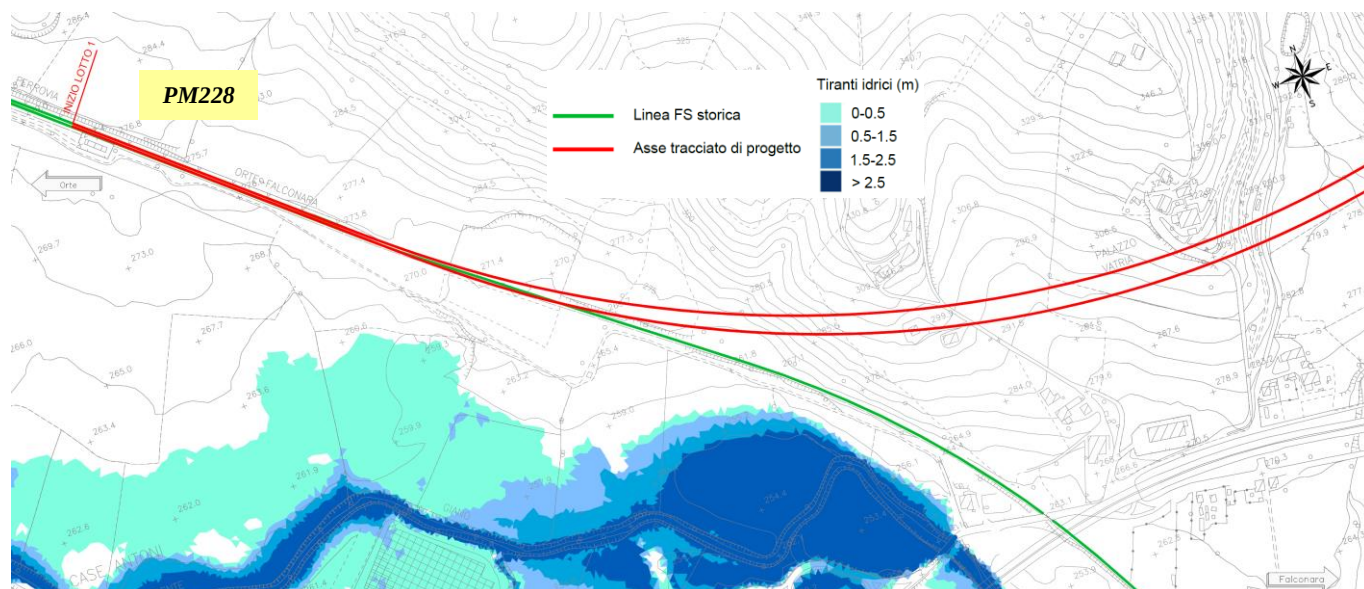


Fig. 4 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: aree potenzialmente inondabili,  $Tr = 200$  anni, ante operam, in quel di PM228.

### 3.1.2 Scenario post operam e confronto con scenario ante operam

Come anzidetto, sulla base dei risultati (aree di esondazione e livelli idrici per  $Tr = 200$  anni) ottenuti dalla simulazione numerica “*ante operam*” precedentemente descritta, sono state individuate le quote di intradosso minime in corrispondenza delle nuove opere di attraversamento (in particolare del viadotto VI01 che attraversa il Fiume Esino poco prima di Bivio Nord Albacina), nonché la relativa estensione. Nello specifico, il nuovo viadotto (VI01) previsto sul Fiume Esino (e implementato nella configurazione geometrica “*post operam*” del modello numerico 2D) è caratterizzato dalle seguenti luci e quote di intradosso.

### Viadotto VI01

Per il nuovo attraversamento sul Fiume Esino si prevedono in realtà due viadotti affiancati, a singolo binario. Il viadotto (VI01D) sul binario dispari si estende da progressiva 6+413 a progressiva 6+813 (lunghezza = 400 m) ed è costituito di 6 campate, 4 con luce pari a 70 m e 2 (estremali) con luce pari a 60 m. Il viadotto (VI01P) sul binario pari si estende invece da progressiva 6+390 a progressiva 6+860 (lunghezza = 470 m) ed è costituito di 7 campate, 5 con luce pari a 70 m e 2 (estremali) con luce pari a 60 m.

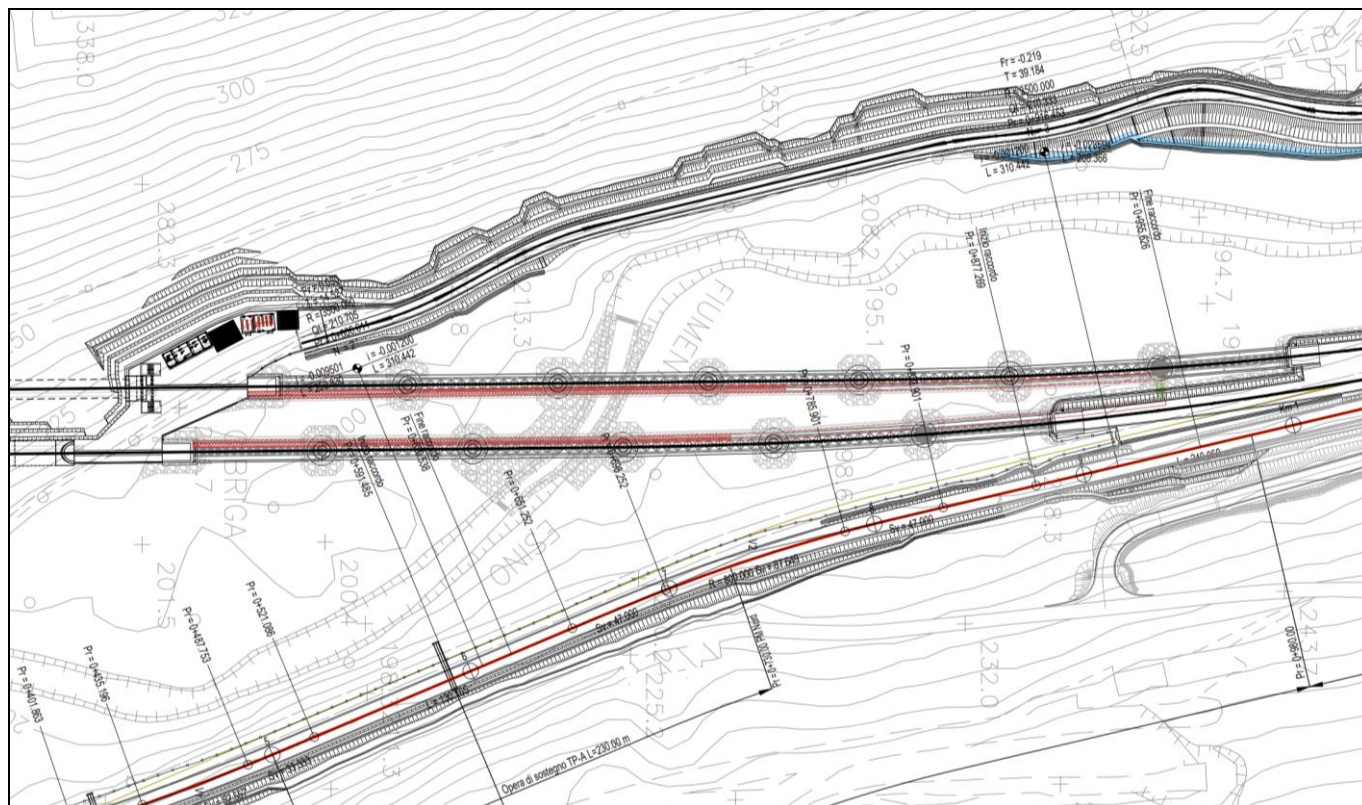


Fig. 5 – Viadotto VI01 (lotto 1): stralcio della planimetria di progetto.

La quota di intradosso in corrispondenza dello scavalco dell'alveo inciso si attesta a circa +206.8 m slm; la quota di intradosso minima, nelle ultime campate (lato Bivio Nord Albacina), si attesta a +205.18 m slm.



|                                                                                   |                                                                                                                                                                                |                  |                |                         |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
|  | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA<br/>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO<br/>Lotto 1</b><br><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                    |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                      | COMMESSA<br>IR0F                                                                                                                                                               | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>12 di 42 |

Nella configurazione “*post operam*” sono stati inoltre implementati quindi i nuovi rilevati ferroviari e le nuove viabilità.

Sono state inserite anche tutte le opere previste negli altri tre lotti adiacenti (lotti 2 e 3 di PM228-Castelplanio, e PM228-Albacina) in cui è suddiviso il progetto, che possano avere eventuale influenza sui deflussi.

Di seguito, i risultati in termini di aree potenzialmente inondabili della simulazione numerica dell’onda di piena del Fiume Esino, per un tempo di ritorno di 200 anni, nello scenario *post operam*.



Fig. 6 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: aree potenzialmente inondabili,  $Tr = 200$  anni, *post operam*, in quel di PM228.

Non si osservano incrementi/variazioni sostanziali dei livelli idrici o delle aree di esondazione nei tratti vallivi del Fiume Esino, a dimostrazione della completa trasparenza idraulica dell’infrastruttura ferroviaria in progetto. il rilevato della nuova viabilità NVP02 (di accesso al piazzale di emergenza/sicurezza della Galleria “Le Cone”) risulta marginalmente interessato dalle acque esondate, come anche i rilevati ferroviari di approccio al VI01, lato Castelplanio, di collegamento al Bivio Nord Albacina.

Si prevede la posa in opera di sistemazioni/protezioni in materassi tipo Reno e/o massi sciolti.

|                                                                                   |                                                                                                                                                                                |                  |                |                         |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
|  | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA<br/>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO<br/>Lotto 1</b><br><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                    |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                      | COMMESSA<br>IR0F                                                                                                                                                               | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>13 di 42 |

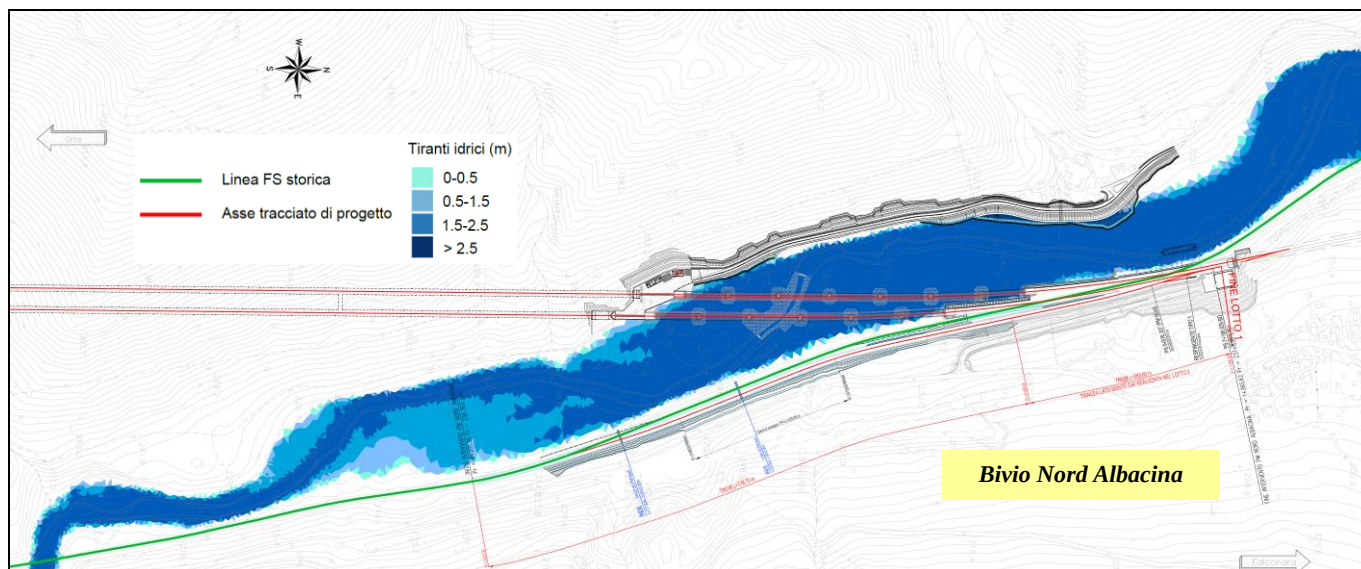


Fig. 7 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: aree potenzialmente inondabili,  $Tr = 200$  anni, post operam, in quel di Bivio Nord Albacina.

### 3.2 Verifica del franco idraulico di progetto

La verifica del franco idraulico di progetto eseguita secondo le normative vigenti (NTC2018 e MdP RFI) dimostra la compatibilità idraulica del nuovo viadotto VI01 che attraversa il Fiume Esino poco prima di Bivio Nord Albacina, come riportato nelle tabelle seguenti.

| Quota impalcato minima [m slm] | Livello di piena [m slm] | Carico totale [m slm] | Franco sul livello idrico [m] | Franco sul carico totale [m] | Verifica |
|--------------------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------------|------------------------------|----------|
| +205.18                        | +203.2                   | +203.6                | +1.98<br>(> 1.50 m)           | +1.58<br>(> 0.50 m)          | OK       |

Tabella 1 – Viadotto VI01 (attraversamento del Fiume Esino): verifica del franco idraulico di progetto.

In corrispondenza dell'alveo inciso la quota di intradosso si attesta a +206.90 m slm da cui un franco idraulico di +3.70 m e un franco sul carico idraulico di +3.30 m.

|                                                                                   |                                                                                                                                                                                        |                  |                |                         |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
|  | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA</b><br><b>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO</b><br><b>Lotto 1</b><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                    |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                      | COMMESSA<br>IR0F                                                                                                                                                                       | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>14 di 42 |

E' garantita inoltre una distanza minima di 6 - 7 m tra il fondo alveo e la quota di sottotrave (quota intradosso: +206.90 m slm, quota minima fondo alveo: +196.00 m slm, da cui una distanza "intradosso-fondo alveo" = **+10.90 m**), in ragione di eventuali fenomeni di trasporto solido di fondo e/o di materiale galleggiante.

La scansione delle pile assegnata al viadotto VI01 in progetto permette inoltre di rispettare la prescrizione di una luce netta minima di 40 metri tra pile contigue in alveo, in direzione ortogonale alla corrente, come mostrato nella figura seguente. Nello specifico, trattandosi di due viadotti affiancati in aree di esondazione, nella definizione della scansione delle campate si è posta cura alla collocazione delle pile "in ombra" nella direzione principale della corrente.

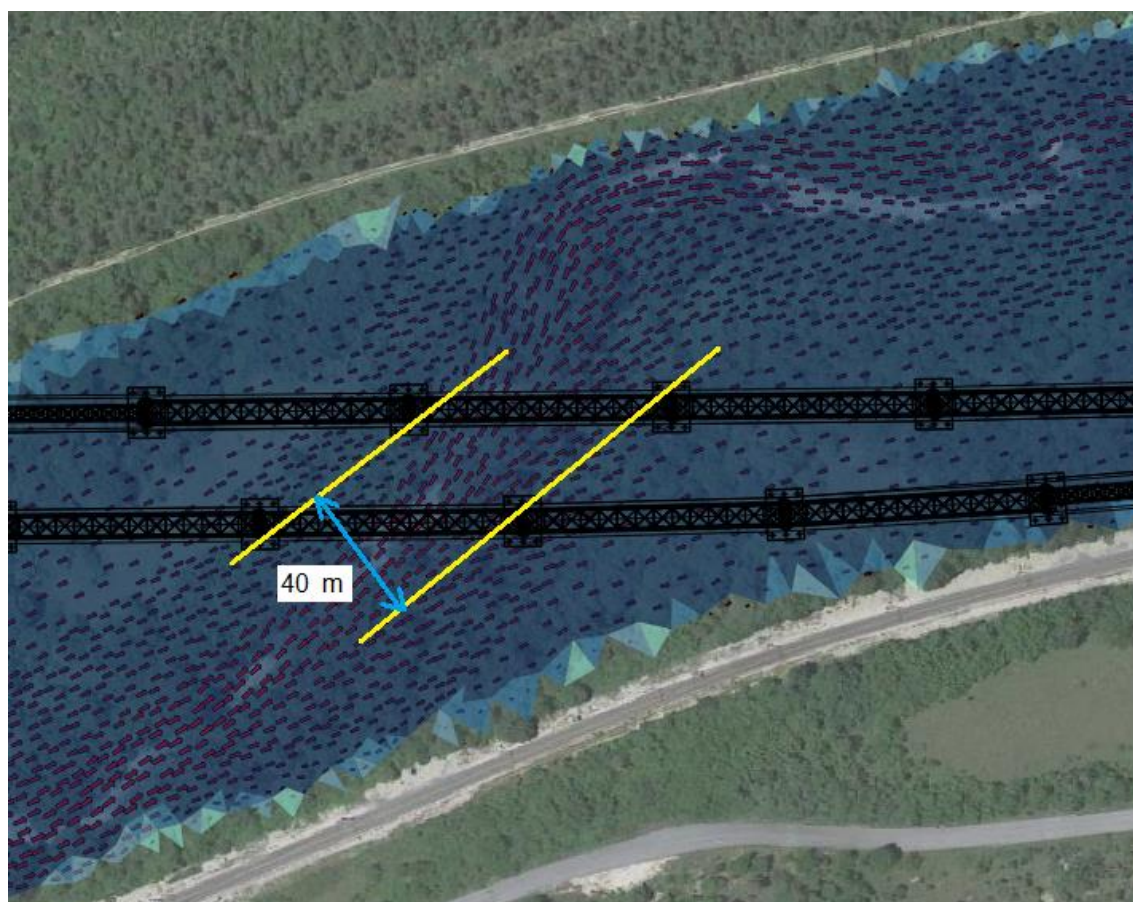


Fig. 8 – Modello numerico 2D del Fiume Esino, configurazione post operam: stralcio della mappa dei vettori velocità in corrispondenza del viadotto VI01.

|                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                        |                  |                |                         |           |                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA</b><br><b>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO</b><br><b>Lotto 1</b><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                    |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                                                                                 | COMMESSA<br>IR0F                                                                                                                                                                       | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>15 di 42 |

### 3.3 Ulteriori verifiche idrauliche

#### 3.3.1. Fasi provvisorie di realizzazione delle fondazioni delle pile

Ai fini della verifica delle fasi transitorie di cantiere, si è proceduto all'implementazione di un modello numerico monodimensionale (in regime di moto permanente) del Fiume Esino, sulla base dei rilievi batimetrici disponibili (descritti nella relazione idraulica IR0F00R09RIID0002001 e impiegati per l'implementazione del modello numerico bidimensionale), tramite l'utilizzo del codice di calcolo *HEC RAS* dell'*U.S. Army Corps of Engineers*.

In analogia alle analisi numeriche 2D sviluppate, per quanto concerne il coefficiente di scabrezza (Manning), per l'alveo inciso è stato adottato il valore  $0.04 \text{ s/m}^{1/3}$ , mentre alle aree golenali è stato attribuito il valore di  $0.060 \text{ s/m}^{1/3}$ .

In ipotesi di regime di corrente mista, come condizioni al contorno di monte e di valle, è stata imposta la condizione "*Normal Depth*" (condizione di moto uniforme).

In particolare, è stato verificato, per le portate di riferimento definite nello studio idrologico annesso (rif. IR0F00R09RIID0001001), se le lavorazioni necessarie per la realizzazione delle opere di fondazione delle pile del nuovo viadotto VI01 possano essere interessate dalle piene del Fiume Esino.

Nello specifico, la durata delle lavorazioni necessarie alla realizzazione di una fondazione si attesta generalmente a circa 6 mesi. Con riferimento allo studio idrologico annesso, a tale durata delle lavorazioni corrisponde un tempo di ritorno della portata di riferimento per le verifiche delle fasi di cantiere pari a **5 anni**, da cui, per il Fiume Esino nel tratto prima della confluenza del T. Sentino, un colmo di piena pari a **388.8 mc/s**.

Di seguito, i risultati ottenuti (in termini di tiranti idrici) nelle sezioni a monte delle opere di attraversamento in progetto, allo stato attuale, per le portate sopra indicate.



|                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                        |                  |                |                         |           |                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
|  <b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA</b><br><b>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO</b><br><b>Lotto 1</b><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                    |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                                                                              | COMMESSA<br>IR0F                                                                                                                                                                       | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>16 di 42 |

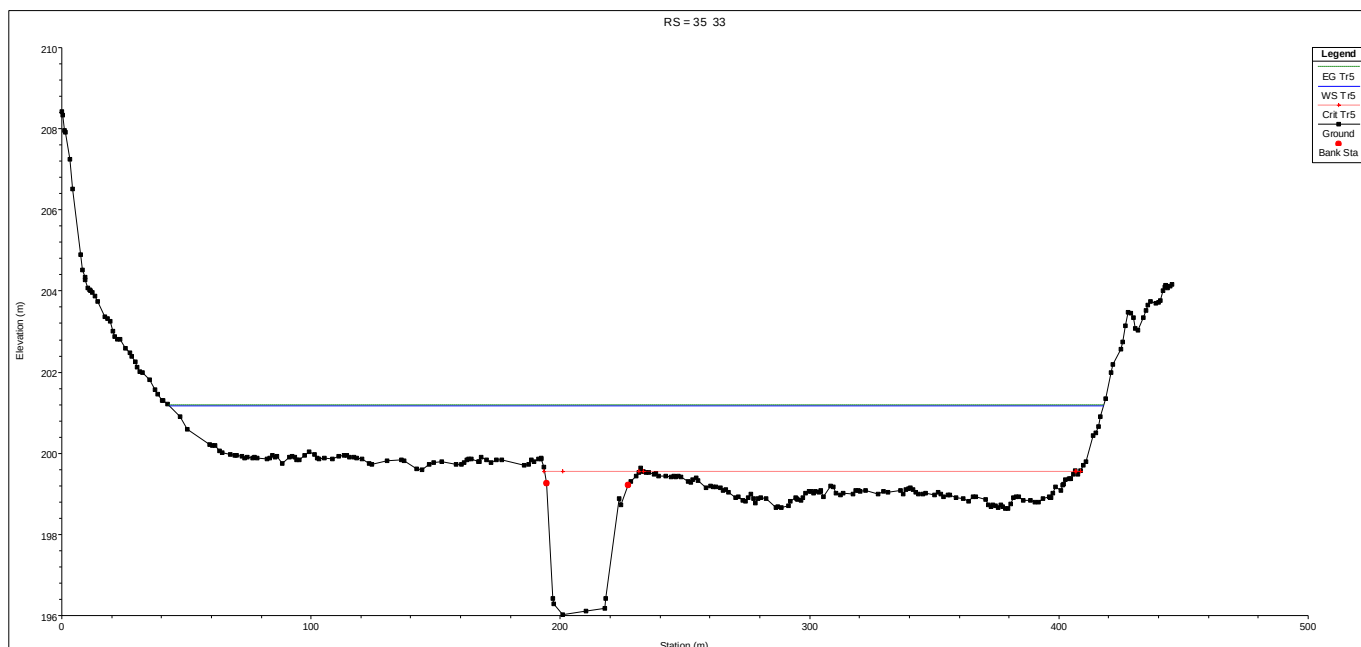


Fig. 9 – Modello numerico 1D del Fiume Esino, livello idrico “di cantiere”, a monte della sezione di attraversamento del VI01, allo stato attuale.

I risultati evidenziano esondazioni anche della portata di cantiere di riferimento ( $Tr = 5$  anni) in corrispondenza della sezione di attraversamento del viadotto VI01, tali da interessare le aree di lavoro e/o le opere provvisorie previste per gli scavi necessari alla realizzazione delle opere di fondazione delle relative pile.

Nello specifico, per la realizzazione degli scavi necessari alla costruzione delle fondazioni saranno impiegate palancole puntonate di idonea altezza/lunghezza, in relazione ai livelli idrici di riferimento ( $Tr=5$  anni) che si attestano nelle aree golenali.

A tal proposito, è stata eseguita di nuovo la simulazione della propagazione dell'onda di piena  $Tr=5$  anni, nella configurazione di cantiere, implementando nel modello numerico monodimensionale sviluppato le palancole suddette, tramite l'opzione “Obstructions”, in relazione al relativo ingombro.

Di seguito, i risultati delle verifiche sviluppate, finalizzate alla determinazione della quota di sommità dei rilevati provvisori previsti.



|                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                        |                  |                |                         |           |                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA</b><br><b>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO</b><br><b>Lotto 1</b><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                    |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                                                                                 | COMMESSA<br>IR0F                                                                                                                                                                       | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>17 di 42 |

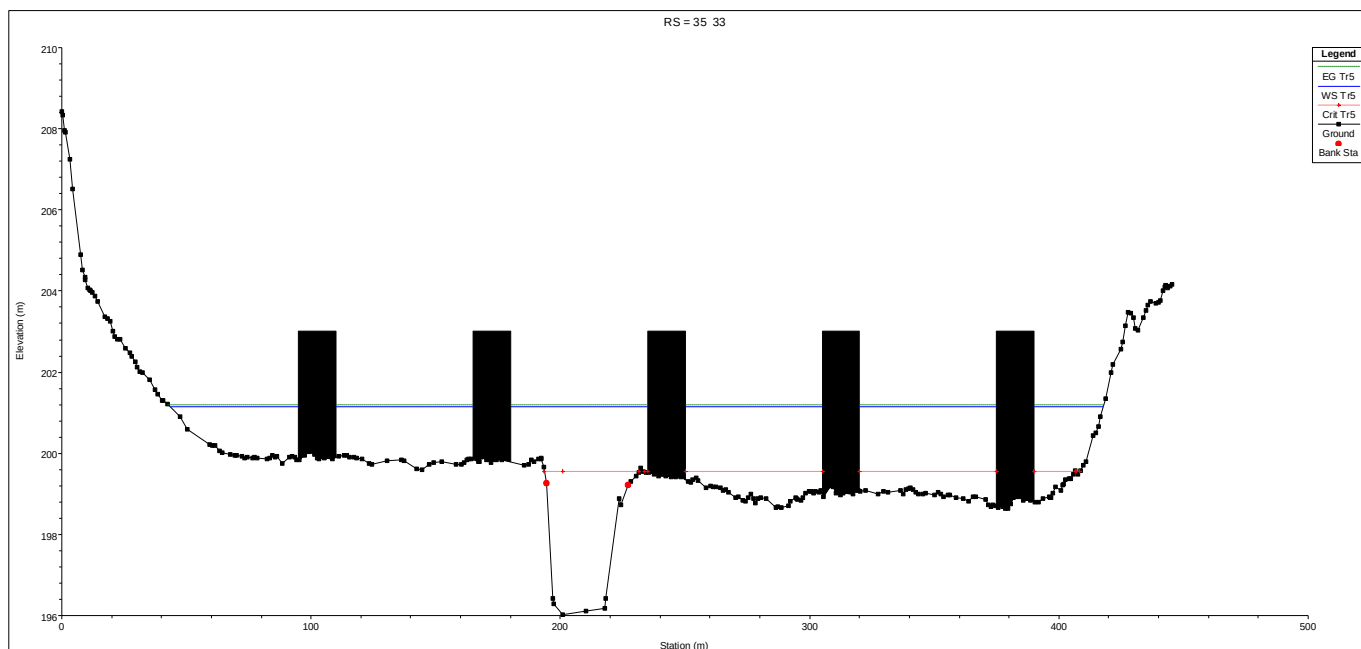


Fig. 10 – Modello numerico 1D del Fiume Esino, livello idrico “di cantiere”, a monte della sezione di attraversamento del VI01, nella configurazione provvisoria, di realizzazione delle pile/fondazioni.

Nello specifico, in corrispondenza del VI01 il livello idrico di cantiere si attesta a +201.15 m slm (livello idrico pressoché inalterato rispetto allo stato attuale).

Assumendo un franco idraulico di almeno 50 cm, la sommità delle palancole da prevedersi dovrà attestarsi ad almeno a quota +201.65 m slm.

Per maggiori dettagli, si rimanda agli elaborati grafici specialistici di *Strutture*, di cui se ne riporta uno stralcio nella figura seguente.

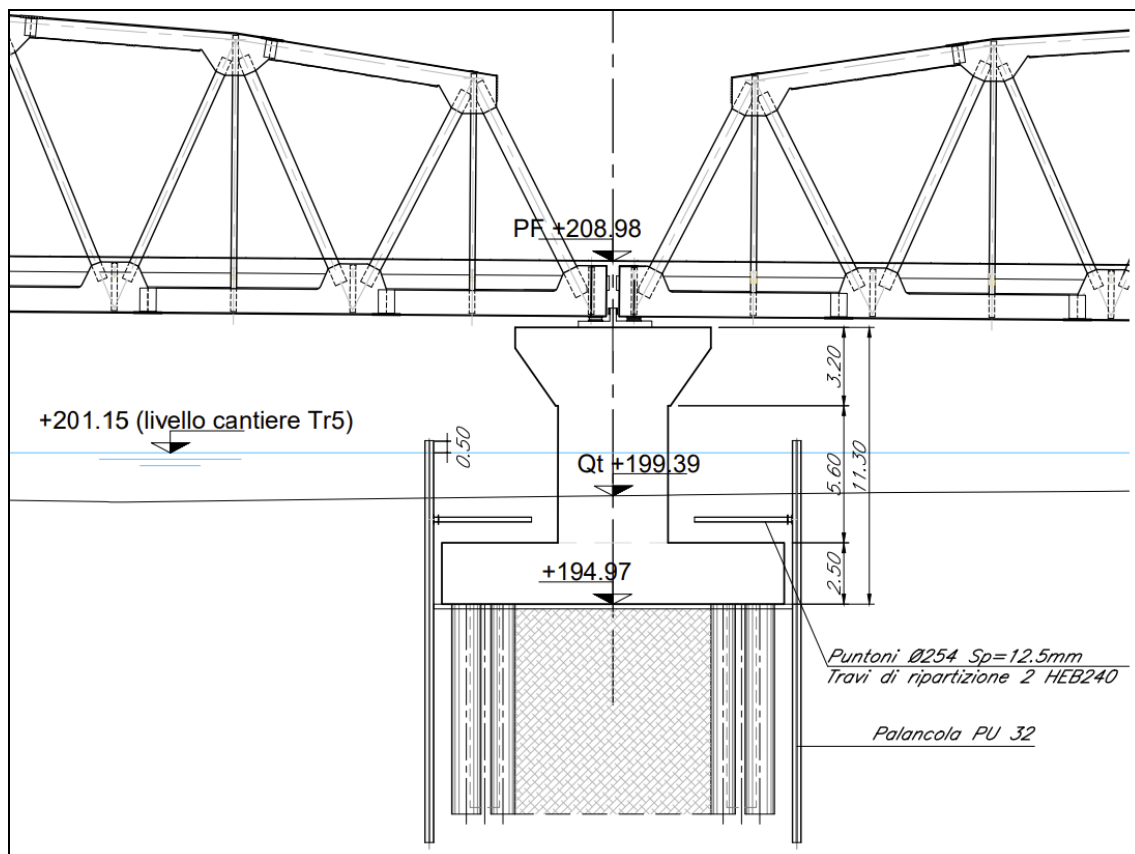


Fig. 11 – Opere provvisorie per la realizzazione delle opere di fondazione del viadotto VI01 sul Fiume Esino.

|                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                        |                  |                |                         |           |                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA</b><br><b>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO</b><br><b>Lotto 1</b><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                    |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                                                                                 | COMMESSA<br>IR0F                                                                                                                                                                       | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>19 di 42 |

#### 4. VALUTAZIONE DELLO SCALZAMENTO ATTESO

Si è proceduto alla valutazione della profondità massima di erosione attesa attorno alle pile del nuovo viadotto VI01, interessate dalla piena di riferimento ( $Tr_{200}$ ) del Fiume Esino.

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 in 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 2 - 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

|                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                        |                  |                |                         |           |                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA</b><br><b>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO</b><br><b>Lotto 1</b><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                    |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                                                                                 | COMMESSA<br>IROF                                                                                                                                                                       | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>21 di 42 |

- $V_{1p} = \max(V_{1p1}; V_{1p2})$
- $V_{1p1} = 5V_c; V_{1p2} = 0.6\sqrt{gy_1}$
- $$V_c = \begin{cases} 2.5 \cdot u^* \ln\left(\frac{73.5y_1}{d_{50}[Re(2.85-0.58\ln(Re)+0.002Re)+\frac{111}{Re}-6]}\right) & \text{for } 5 \leq Re \leq 70 \\ 2.5 \cdot u^* \ln\left(\frac{2.21y_1}{d_{50}}\right) & \text{for } Re > 70 \end{cases}$$
- $Re = \frac{u^* d_{50}}{2.32 \cdot 10^{-7}}; u^* = \left[16.2 \cdot d_{50} \left(\frac{9.09 \cdot 10^{-6}}{d_{50}} - d_{50}(38.76 + 9.6\ln(d_{50})) - 0.005\right)\right]^{0.5}$
- $y_1 = \text{tirante idrico (m)}$
- $f_1 = \tanh\left[\left(\frac{y_1}{a^*}\right)^{0.4}\right]; f_2 = \left\{1 - 1.2 \left[\ln\left(\frac{V_1}{V_c}\right)\right]^2\right\}; f_3 = \left[\frac{\left(\frac{a^*}{d_{50}}\right)}{0.4\left(\frac{a^*}{d_{50}}\right)^{1.2} + 10.6\left(\frac{a^*}{d_{50}}\right)^{-0.18}}\right]$
- $a^* = K_s a_p; a_p = a \cdot \cos\theta + L \cdot \sin\theta; K_s = \begin{cases} 1 & (\text{pilacircolare}) \\ 0.86 + 0.97 \left(\left|\frac{\pi\theta}{180} - \frac{\pi}{4}\right|\right)^4 & (\text{pilarettangolare}) \end{cases}$

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

Secondo gli studi condotti da Sheppard et al. (2013), riguardanti il confronto tra i valori di scalzamento osservati in laboratorio e in sito e quelli valutati secondo le più comuni ed utilizzate formule per il calcolo dello scalzamento (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 al corso d'acqua oggetto di studio (*Fiume Esino*).

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.

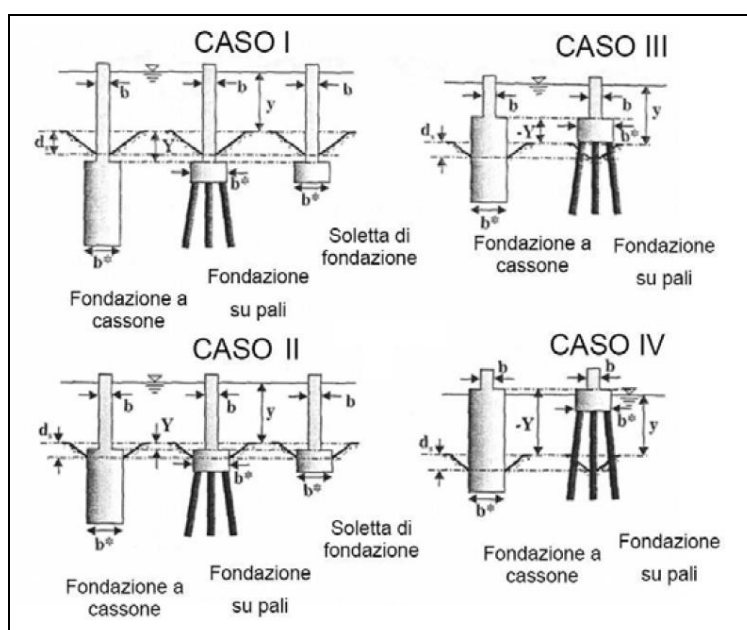


Fig. 12 – Differenti tipologie di pile non uniformi dotate di fondazioni.

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.

|                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                 |         |          |            |      |          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------|------------|------|----------|
| <div><div>ITALFERR</div><div>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</div></div> | <div>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA<br/>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO<br/>Lotto 1</div> <div>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</div> |         |          |            |      |          |
| RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA                                                                                                                          | COMMESSA                                                                                                                                                                        | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO  | REV. | FOGLIO   |
|                                                                                                                                                                | IR0F                                                                                                                                                                            | 01 R 09 | RI       | ID0002 001 | B    | 23 di 42 |

Per quanto riguarda il CASO IV, infine, l'erosione localizzata può essere 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,  $Tr = 200$  anni, e alla piena che si verifica mediamente ogni anno ( $Tr = 1,001$ ), considerando dapprima le dimensioni delle sole pile.

Per quanto concerne il calcolo dello scalzamento per la piena  $Tr = 1,001$  del Fiume Esino, si è fatto riferimento direttamente al modello numerico monodimensionale HECRAS, sviluppato per le fasi di cantiere o provvisorie eseguendo la simulazione per una portata di 89.90 mc/s (corrispondente ad un tempo di ritorno di 1 anno, per il tratto fluviale di interesse, come da elaborato IR0F00R09RIID0001001). In tal caso, la piena  $Tr = 1,001$  del Fiume Esino è contenuta in alveo e le pile del nuovo viadotto VI01 non sono interessate dalle esondazioni, pertanto lo scalzamento per  $Tr = 1,001$  per il VI01 è da ritenersi nullo.

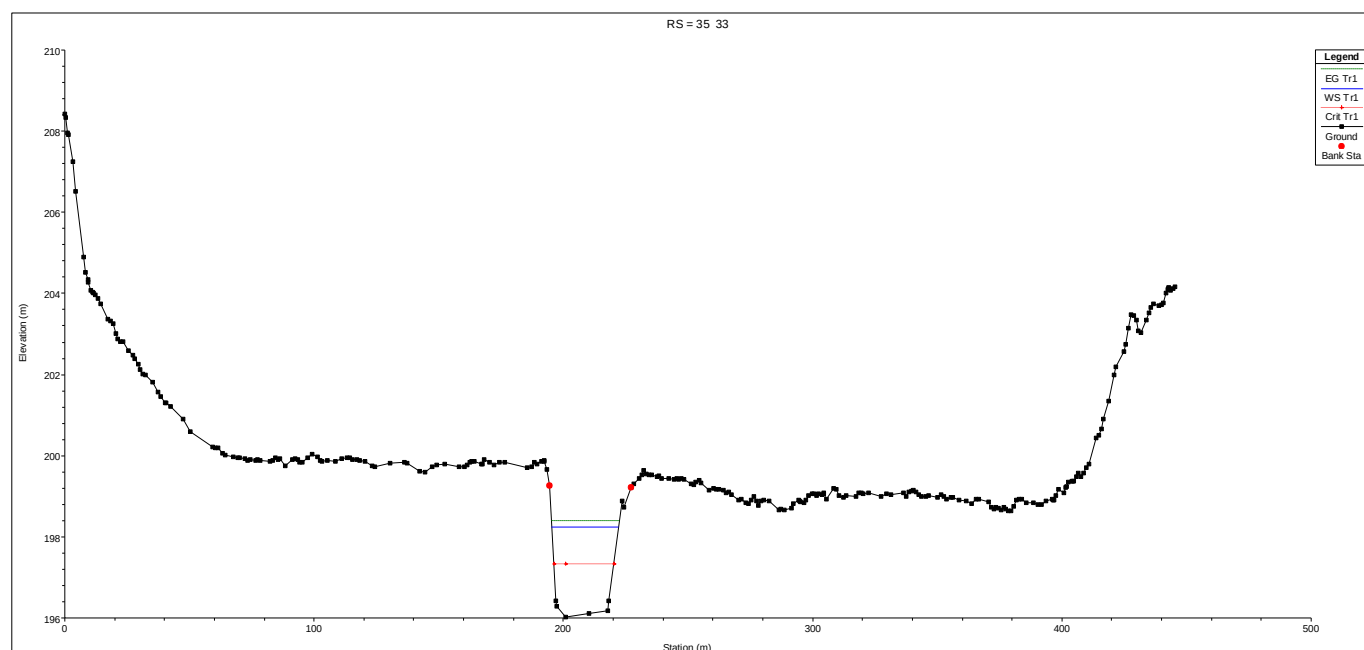


Fig. 13 – Modello numerico 1D del Fiume Esino, livello idrico per la portata  $Tr = 1,001$ , in corrispondenza della sezione di attraversamento del VI01.

|                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                        |                  |                  |                |                         |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA</b><br><b>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO</b><br><b>Lotto 1</b><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                  |                |                         |           |
|                                                                                                                                              | <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                                                                                                                           | COMMESSA<br>IR0F | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B |

Per quanto concerne il materiale potenzialmente erodibile sul fondo alveo, si è fatto riferimento alle analisi granulometriche effettuate su campioni di materiale prelevati durante i sondaggi, nonché su campioni di materiale prelevato nell'alveo del Fiume Esino, in corrispondenza della nuova sezione di attraversamento. In particolare, il materiale prelevato è caratterizzato dalla seguente granulometria  $d_{50} = 0.85$  mm,  $d_{90} = 12.5$  mm.

Nella tabella seguente si riportano i valori di scalzamento attesi per  $Tr = 200$  anni, in corrispondenza delle pile del nuovo viadotto VI01 interessate dalla piena di riferimento.

#### **Viadotto VI01 (binario dispari)**

##### **Valori scalzamento ( $Tr = 200$ anni)**

| ID PILA | Forma pila       | D (m) [pila] | L (m) [pila] | h (m) | v (m/s) | Fr ( ) | Skew Angle | Ys (m) Sheppard & Melville | Ys (m) CSU | Ys (m) Pila |
|---------|------------------|--------------|--------------|-------|---------|--------|------------|----------------------------|------------|-------------|
| P1 (BD) | <i>circolare</i> | 4.5          | 4.5          | 3.3   | 1.4     | 0.246  | 60         | 5.7                        | 5.95       | <b>6.0</b>  |
| P2 (BD) | <i>circolare</i> | 4.5          | 4.5          | 3.2   | 1.3     | 0.232  | 60         | 5.5                        | 5.74       | <b>5.7</b>  |
| P3 (BD) | <i>circolare</i> | 4.5          | 4.5          | 3.7   | 1.6     | 0.266  | 60         | 6.1                        | 6.4        | <b>6.4</b>  |
| P4 (BD) | <i>circolare</i> | 4.5          | 4.5          | 4.1   | 1.3     | 0.205  | 60         | 5.7                        | 5.9        | <b>5.9</b>  |
| P5 (BD) | <i>circolare</i> | 4.5          | 4.5          | 4.1   | 0.8     | 0.126  | 60         | 5                          | 4.8        | <b>5.0</b>  |

#### **Viadotto VI01 (binario pari)**

##### **Valori scalzamento ( $Tr = 200$ anni)**

| ID PILA | Forma pila       | D (m) [pila] | L (m) [pila] | h (m) | v (m/s) | Fr ( ) | Skew Angle | Ys (m) Sheppard & Melville | Ys (m) CSU | Ys (m) Pila |
|---------|------------------|--------------|--------------|-------|---------|--------|------------|----------------------------|------------|-------------|
| P1 (BP) | <i>circolare</i> | 4.5          | 4.5          | 3.5   | 1.2     | 0.205  | 60         | 5.4                        | 5.6        | <b>5.6</b>  |
| P2 (BP) | <i>circolare</i> | 4.5          | 4.5          | 3.5   | 1.3     | 0.222  | 60         | 5.6                        | 5.8        | <b>5.8</b>  |
| P3 (BP) | <i>circolare</i> | 4.5          | 4.5          | 3.8   | 1.4     | 0.229  | 60         | 5.8                        | 6.1        | <b>6.1</b>  |
| P4 (BP) | <i>circolare</i> | 4.5          | 4.5          | 4.3   | 1.3     | 0.200  | 60         | 5.7                        | 6          | <b>6.0</b>  |
| P5 (BP) | <i>circolare</i> | 4.5          | 4.5          | 4.7   | 1       | 0.147  | 70         | 5.2                        | 5.2        | <b>5.2</b>  |
| P6 (BP) | <i>circolare</i> | 4.5          | 4.5          | 5.1   | 1       | 0.141  | 70         | 5.2                        | 5.2        | <b>5.2</b>  |

|                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                        |                  |                |                         |           |                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA</b><br><b>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO</b><br><b>Lotto 1</b><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                    |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                                                                                 | COMMESSA<br>IR0F                                                                                                                                                                       | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>25 di 42 |

Confrontando i valori di scalzamento atteso con quelli di ricoprimento dei plinti di fondazione (minimo 1 m circa) si evince che in corrispondenza delle pile del viadotto VI01 i fenomeni di erosione (innescati dalla piena con  $Tr=200$  anni) possono interessare anche le fondazioni (scalzamento atteso maggiore del ricoprimento). Il calcolo è quindi ripetuto considerando le dimensioni equivalenti del sistema “*pila – plinto*”, valutate con la formulazione proposta da Melville e Raudkivi (1996), precedentemente introdotta.

Di seguito, i valori definitivi di scalzamento, per le pile del VI01 interessate dalla piena di riferimento del Fiume Esino, considerati nel dimensionamento delle fondazioni.

#### **Viadotto VI01 (binario dispari)**

Valori scalzamento definitivi ( $Tr = 200$  anni)

| ID PILA | B (m) [plinto] | L (m) [plinto] | Deq (m) | Leq (m) | Ys (m)<br>Sheppard &<br>Melville | Ys (m)<br>CSU | Ys (m)<br>Pila-<br>Plinto |
|---------|----------------|----------------|---------|---------|----------------------------------|---------------|---------------------------|
| P1 (BD) | 14.0           | 14.0           | 11.64   | 11.64   | 10.00                            | 11.00         | 11.0                      |
| P2 (BD) | 14.0           | 14.0           | 11.68   | 11.68   | 9.6                              | 10.6          | 10.6                      |
| P3 (BD) | 14.0           | 14.0           | 11.48   | 11.48   | 10.8                             | 11.8          | 11.8                      |
| P4 (BD) | 14.0           | 14.0           | 11.32   | 11.32   | 9.8                              | 10.8          | 10.8                      |
| P5 (BD) | 14.0           | 14.0           | 11.32   | 11.32   | 8.2                              | 8.8           | 8.8                       |

#### **Viadotto VI01 (binario pari)**

Valori scalzamento definitivi ( $Tr = 200$  anni)

| ID PILA | B (m) [plinto] | L (m) [plinto] | Deq (m) | Leq (m) | Ys (m)<br>Sheppard &<br>Melville | Ys (m)<br>CSU | Ys (m)<br>Pila-<br>Plinto |
|---------|----------------|----------------|---------|---------|----------------------------------|---------------|---------------------------|
| P1 (BP) | 14.0           | 14.0           | 11.56   | 11.56   | 9.4                              | 10.4          | 10.4                      |
| P2 (BP) | 14.0           | 14.0           | 11.56   | 11.56   | 9.8                              | 10.8          | 10.8                      |
| P3 (BP) | 14.0           | 14.0           | 11.44   | 11.44   | 10.1                             | 11.1          | 11.1                      |
| P4 (BP) | 14.0           | 14.0           | 11.25   | 11.25   | 9.9                              | 10.9          | 10.9                      |
| P5 (BP) | 14.0           | 14.0           | 11.10   | 11.10   | 8.7                              | 9.3           | 9.3                       |
| P6 (BP) | 14.0           | 14.0           | 10.97   | 10.97   | 8.8                              | 9.4           | 9.4                       |

|                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                        |                  |                |                         |           |                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA</b><br><b>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO</b><br><b>Lotto 1</b><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                    |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                                                                                 | COMMESSA<br>IR0F                                                                                                                                                                       | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>26 di 42 |

Anche entrambe le spalle dei due viadotti affiancati del nuovo viadotto VI01 risultano interessate (sebbene marginalmente) dall'esondazione della piena con  $Tr = 200$  anni del Fiume Esino.

Per la valutazione dello scalzamento atteso in corrispondenza delle spalle, si è fatto riferimento alla metodologia della FHWA. In particolare, considerato lo schema riportato nella figura seguente, si definiscono le seguenti variabili:  $\theta$  = angolo compreso tra la direzione principale della corrente e l'asse dell'opera di attraversamento;  $L$  = lunghezza di influenza della spalla/rilevato di approccio.

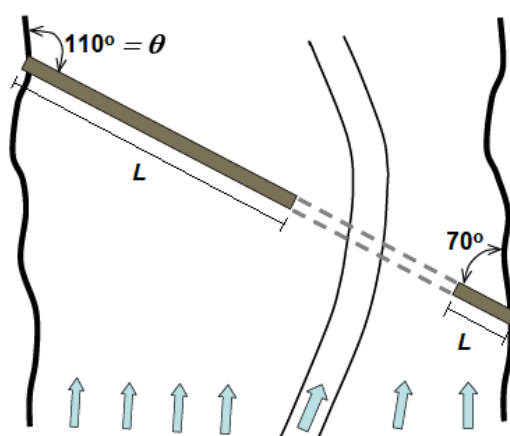


Fig. 14 – Calcolo dello scalzamento in corrispondenza delle spalle: definizione dei parametri.

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.

|                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                        |                  |                |                         |           |                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
|  <b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA</b><br><b>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO</b><br><b>Lotto 1</b><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                    |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                                                                              | COMMESSA<br>IR0F                                                                                                                                                                       | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>27 di 42 |

### 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 2D, per la “portata di progetto”,  $Tr_{200}$ ).

| Viadotto       | ID Spalla                    | L [m] | $\theta$ (°) | h (m) | v (m/s) | $Y_s$ (m)  |
|----------------|------------------------------|-------|--------------|-------|---------|------------|
| VI01 (dispari) | Spalla A (lato PM228)        | 25    | 25           | 2.2   | 1.1     | <b>2.8</b> |
| VI01 (dispari) | Spalla B (lato Castelplanio) | 155   | 20           | 2.3   | 0.5     | <b>2.1</b> |
| VI01 (pari)    | Spalla A (lato PM228)        | 25    | 50           | 3     | 0.5     | <b>2.6</b> |
| VI01 (pari)    | Spalla B (lato Castelplanio) | 155   | 11           | 2     | 0.7     | <b>1.9</b> |

Come analizzato nel paragrafo precedente, anche le palancole provvisorie necessarie per la realizzazione delle pile e delle relative fondazioni del viadotto VI01 sono interessate dalle esondazioni del Fiume Esino, in particolare della portata di cantiere. In ottemperanza di quanto indicato nelle NTC2018 (“.....Coerentemente al livello di progettazione, lo studio di compatibilità idraulica deve riportare: [ ].....la valutazione dello scavo localizzato con riferimento alle forme ed alle dimensioni di pile, spalle e relative fondazioni, nonché di altre opere in alveo provvisionali e definitive, .....[ ]...”, cfr. cap. 5.1.2.3), si è proceduto quindi alla stima dello scalzamento massimo atteso attorno alle palancole provvisorie, adottando le formulazioni sopra introdotte. In particolare, le palancole avranno una forma quadrangolare, 15 m x 15 m, e le variabili idrauliche relative alla piena  $Tr=5$  anni si attestano a: tirante = 2 m; velocità = 0.5 m/s (estratte dalle simulazioni numeriche monodimensionali precedentemente descritte), da cui uno scalzamento massimo atteso pari a circa 8 m.

Stante la stabilità morfologica d'alveo del Fiume Esino nel tratto fluviale di interesse (in ragione dei trascorsi storici e dei processi di antropizzazione del territorio, come argomentato nel capitolo successivo), le massime profondità di scavo sono da intendersi / considerarsi da p.c. limitrofo alla pila di interesse, a meno delle pile di scavalco dell'alveo inciso per le quali la quota di scavo / scalzamento sarà conteggiata a partire da quella di talweg o minima di fondo alveo (+196.00 m slm).



|                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                 |                  |                |                         |           |                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
|  <b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA</b><br><b>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO</b><br>Lotto 1<br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                    |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                                                                              | COMMESSA<br>IR0F                                                                                                                                                                | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>28 di 42 |

Nello specifico, nella tabella seguente si riportano per ogni pila la quota di riferimento (p.c. o fondo alveo) a partire dalle quale dovrà essere conteggiato lo scalzamento, unitamente alla quota assoluta della profondità di scavo atteso.

| ID PILA | Ys (m)<br>Pila-<br>Plinto | Quota di<br>riferimento<br>[m slm] | Quota assoluta<br>scalzamento atteso<br>[m slm] |
|---------|---------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------|
| P1 (BD) | <b>11.0</b>               | 200.50                             | 189.50                                          |
| P2 (BD) | <b>10.6</b>               | 196.00                             | 185.40                                          |
| P3 (BD) | <b>11.8</b>               | 196.00                             | 184.20                                          |
| P4 (BD) | <b>10.8</b>               | 199.39                             | 188.59                                          |
| P5 (BD) | <b>8.8</b>                | 199.79                             | 190.99                                          |
| P1 (BP) | <b>10.4</b>               | 202.44                             | 192.04                                          |
| P2 (BP) | <b>10.8</b>               | 196.00                             | 185.20                                          |
| P3 (BP) | <b>11.1</b>               | 196.00                             | 184.90                                          |
| P4 (BP) | <b>10.9</b>               | 200.37                             | 189.47                                          |
| P5 (BP) | <b>9.3</b>                | 201.09                             | 191.79                                          |
| P6 (BP) | <b>9.4</b>                | 200.59                             | 191.19                                          |

Anche per le spalle, lo scalzamento atteso dovrà essere conteggiato a partire dal p.c..

Da segnalare che lungo il nuovo viadotto VI01 la stratigrafia del sottosuolo (come mostrato nello stralcio del profilo geotecnico riportato nella figura seguente) presenta uno strato di calcari (*a partire dalla quota +188.00÷190.00 m slm*) non erodibile.

La profondità di scavo atteso pertanto si attesterà al massimo fino a tale quota, in particolare per le pile di scavalco P2, P3.

Per maggiori dettagli, si rimanda in ogni caso agli elaborati specialistici di geotecnica.

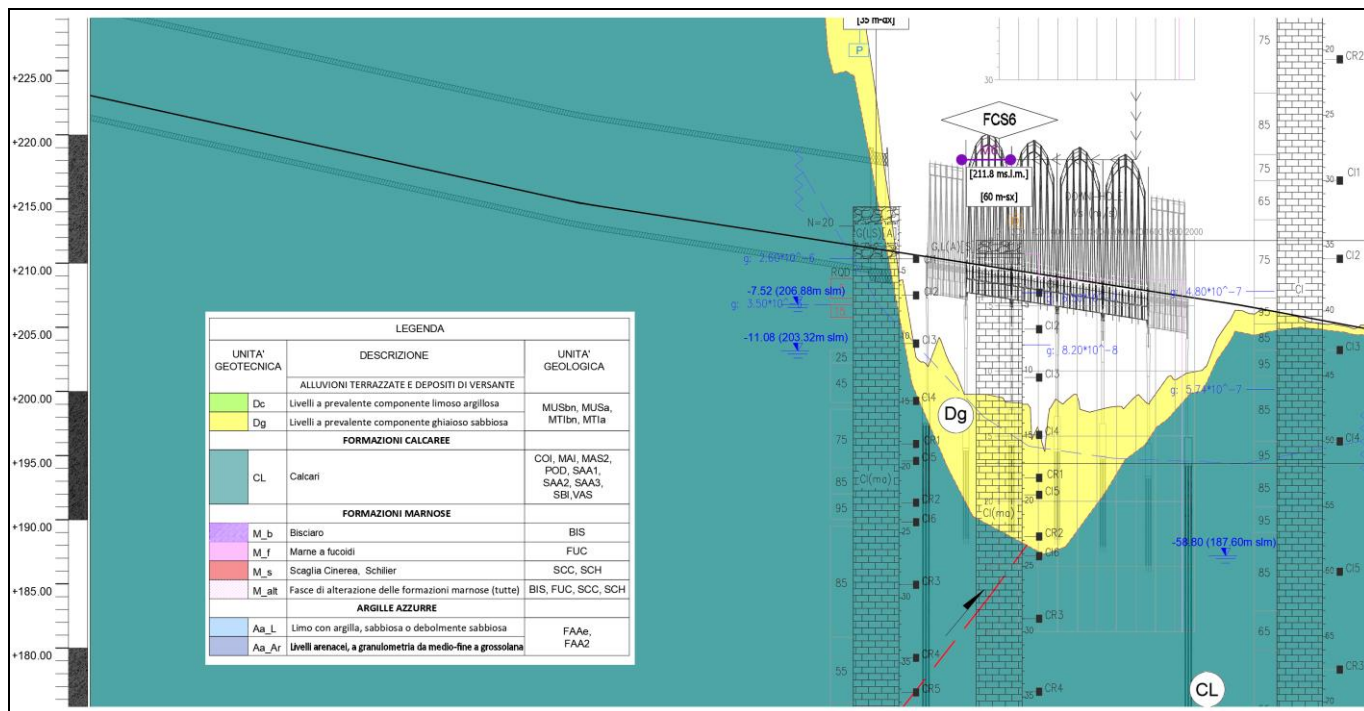


Fig. 15 – Stralcio del profilo geotecnico lungo il viadotto VI01.

|                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                        |                  |                |                         |           |                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
|  <b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA</b><br><b>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO</b><br><b>Lotto 1</b><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                    |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                                                                              | COMMESSA<br>IR0F                                                                                                                                                                       | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>30 di 42 |

## 5. OPERE DI SISTEMAZIONE IDRAULICA

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, dopo i rimaneggiamenti dovuti alle fasi di realizzazione delle nuove opere di attraversamento e della linea ferroviaria nel suo complesso, nonché a contribuire alla stabilità dell'alveo inciso in corrispondenza delle opere di attraversamento in progetto.

Nello specifico, si prevedono rivestimenti in massi naturali, sciolti o legati, in corrispondenza delle sponde e/o sul fondo alveo del Fiume Esino (nelle sezioni di attraversamento in progetto), e delle pile del VI01 interessate dalla piena di riferimento ( $Tr = 200$  anni).

Per il dimensionamento delle opere di sistemazione idraulica (in massi naturali, sciolti o legati) attorno alle pile interessate dalla piena di riferimento ( $Tr = 200$  anni), è stata adottata 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:

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

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:

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

|                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                        |                  |                |                         |           |                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA</b><br><b>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO</b><br><b>Lotto 1</b><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                    |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                                                                                 | COMMESSA<br>IR0F                                                                                                                                                                       | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>31 di 42 |

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).

Ai fini del dimensionamento delle opere di sistemazione spondale è stata applicata invece la seguente 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,  $\in [1,2]$ );  $K_1 = [1 - \sin^2(\theta)/\sin^2(\phi)]^{0.5}$ ;  $\theta$ =inclinazione delle sponde;  $\phi$  = angolo di attrito interno del materiale, applicabile per i seguenti valori dei parametri (simili a quelli caratteristici del Fiume Esino):

- *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*

Con riferimento alla formulazione (\*) per il dimensionamento delle opere di protezione in massi sciolti/legati attorno alle pile, adottando i valori di velocità ( $Tr = 200$  anni) massima  $V_{max}$  (estratti dalle modellazioni numeriche 2D, unitamente ai seguenti parametri:  $S_g = 2.0$  t/m<sup>3</sup>;  $K_1 = 1.5$ , si ottiene un diametro medio dei massi pari a  **$d_{50} = 0.80$  m (per le pile del VI01 di scavalco dell'alveo) e 0.60 m (per le pile del VI01 nelle aree esterne).**

Con riferimento alla formulazione (\*\*) per il dimensionamento delle opere di sistemazione spondale, considerando i seguenti parametri:  $S_g = 2.0$  t/mc;  $SF = 2$  (in via cautelativa),  $\theta = 34^\circ$  (2/3);  $\phi = 36^\circ$ , e i

|                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                        |                  |                |                         |           |                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA</b><br><b>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO</b><br><b>Lotto 1</b><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                    |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                                                                                 | COMMESSA<br>IR0F                                                                                                                                                                       | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>32 di 42 |

valori di tirante e velocità per la portata di progetto,  $Tr_{200}$ , in corrispondenza delle sponde nei tratti di scavalco, estratte dal modello 2D, si ottiene un diametro medio dei massi pari a  $d_{50} = 0.80$  m.

Per le pile in prossimità delle sponde e/o dell'alveo inciso, si prevede inoltre la legatura dei massi, a favore di sicurezza, per una maggiore stabilità (rif. IR0F01R09PZID0002001).

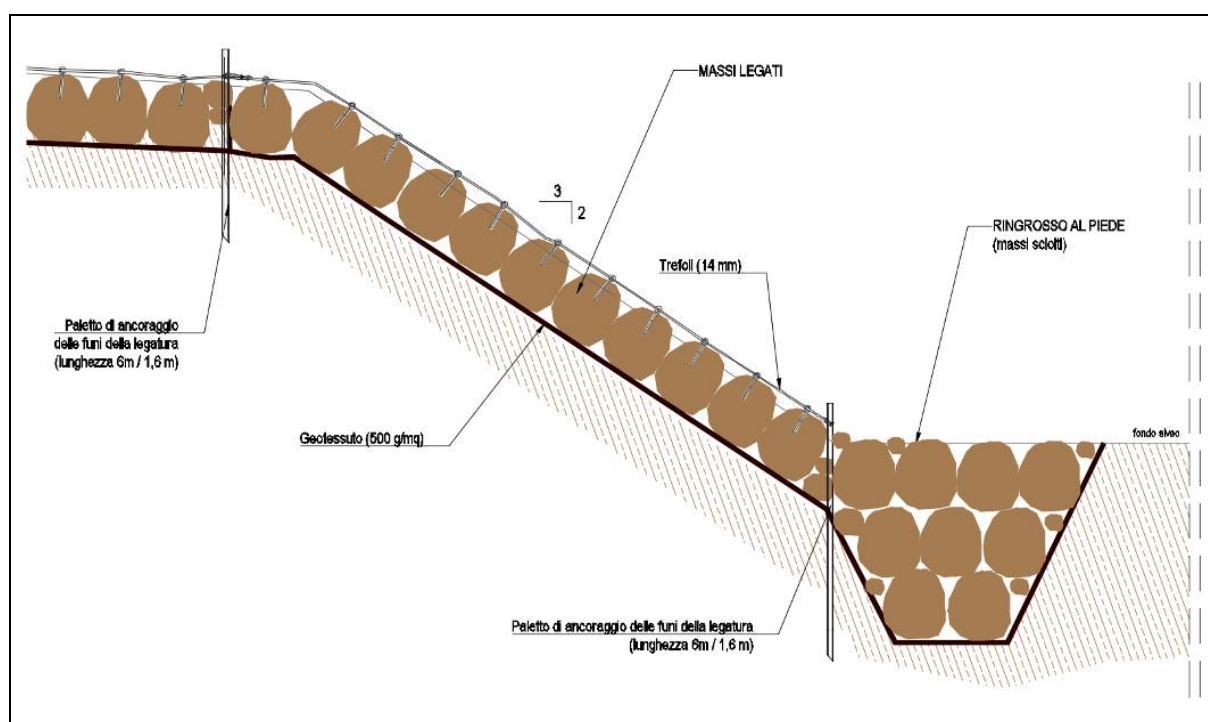


Fig. 16 – Particolare sistemazione spondale in massi sciolti/legati.

Si precisa che nella definizione delle opere di sistemazione e protezione idraulica sono state prese in considerazione le soluzioni già adottate e “in esercizio” sul fiume Esino nell’ambito dell’intervento di raddoppio della tratta Castelplanio – Montecarotto (successiva a quella in progetto), terminata e attivata nel 2017/2018.

Di seguito, alcune foto degli interventi di sistemazione/protezione idraulica realizzati.





*Fig. 17 – Tratta Castelplanio-Montecarotto: opere di protezione realizzate in corrispondenza dell'attraversamento del F. Esino.*



*Fig. 18 – Tratta Castelplanio-Montecarotto: opere di sistemazione spondale realizzate sul Fiume Esino.*



|                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                              |                  |                |                         |           |                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA<br/>         RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO<br/>         Lotto 1</b><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                    |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                                                                                 | COMMESSA<br>IR0F                                                                                                                                                                             | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>34 di 42 |

## 6. ANALISI MULTITEMPORALE DELLE CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE DEL FIUME ESINO

Si è proceduto all'analisi delle eventuali variazioni morfologiche e planimetriche dell'alveo fluviale nel tempo, soprattutto in corrispondenza delle nuove opere di attraversamento previste in progetto, in particolare il nuovo viadotto VI01.

Nello specifico, è stata condotta una serie di analisi multi-temporali su foto aeree e ortofoto, di differenti voli. Le foto spaziano dal 1952 al 2022. Sulle foto aeree dei diversi voli regionali e nazionali analizzati sono stati individuati tutti i principali elementi geomorfologici, con particolare riferimento alle forme connesse al deflusso delle acque correnti superficiali, alla gravità e all'azione dell'uomo sul territorio.

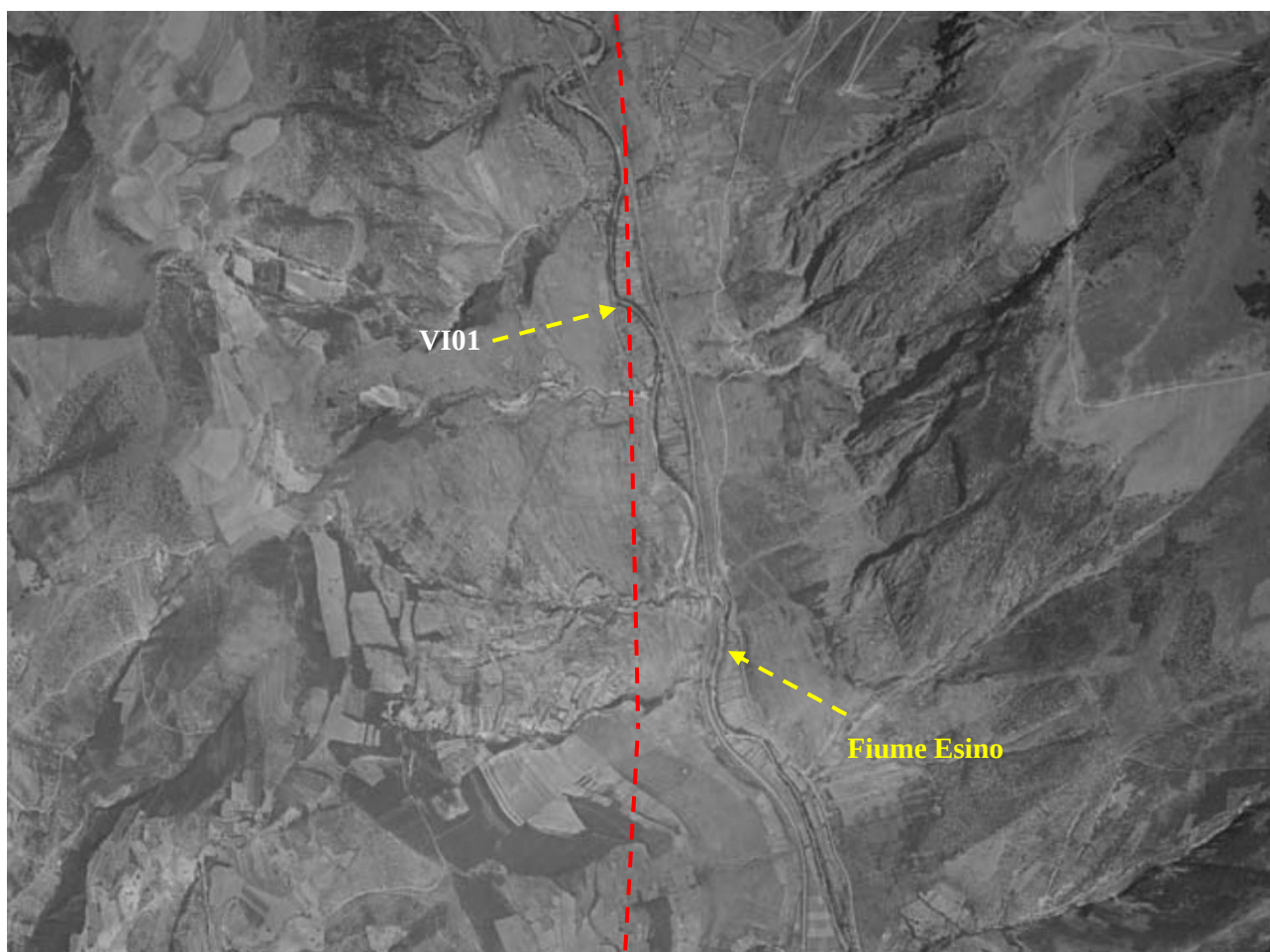


Fig. 19 – Stralcio di foto aerea 1952: tratto fluviale del Fiume Esino in corrispondenza del nuovo viadotto VI01.

|                                                                                   |                                                                                                                                                                                |                  |                |                         |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
|  | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA<br/>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO<br/>Lotto 1</b><br><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                    |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                      | COMMESSA<br>IR0F                                                                                                                                                               | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>35 di 42 |

Dal punto di vista della dinamica morfologica, da quanto esposto nelle foto storiche risulta evidente che l'alveo del Fiume Esino è stato caratterizzato da una debole, se non quasi assente, tendenza evolutiva, connessa sia alle caratteristiche geomorfologiche dell'area che alla forte attività antropica sviluppatasi sul territorio a partire dalla metà del secolo scorso.

Il tratto fluviale del F. Esino in esame è fortemente inciso, all'interno di una valle particolarmente "stretta" e delimitata anche da infrastrutture esistenti (e.g. SS76, linea ferroviaria esistente), che limitano eventuali evoluzioni plano-altimetriche del corso d'acqua stesso.

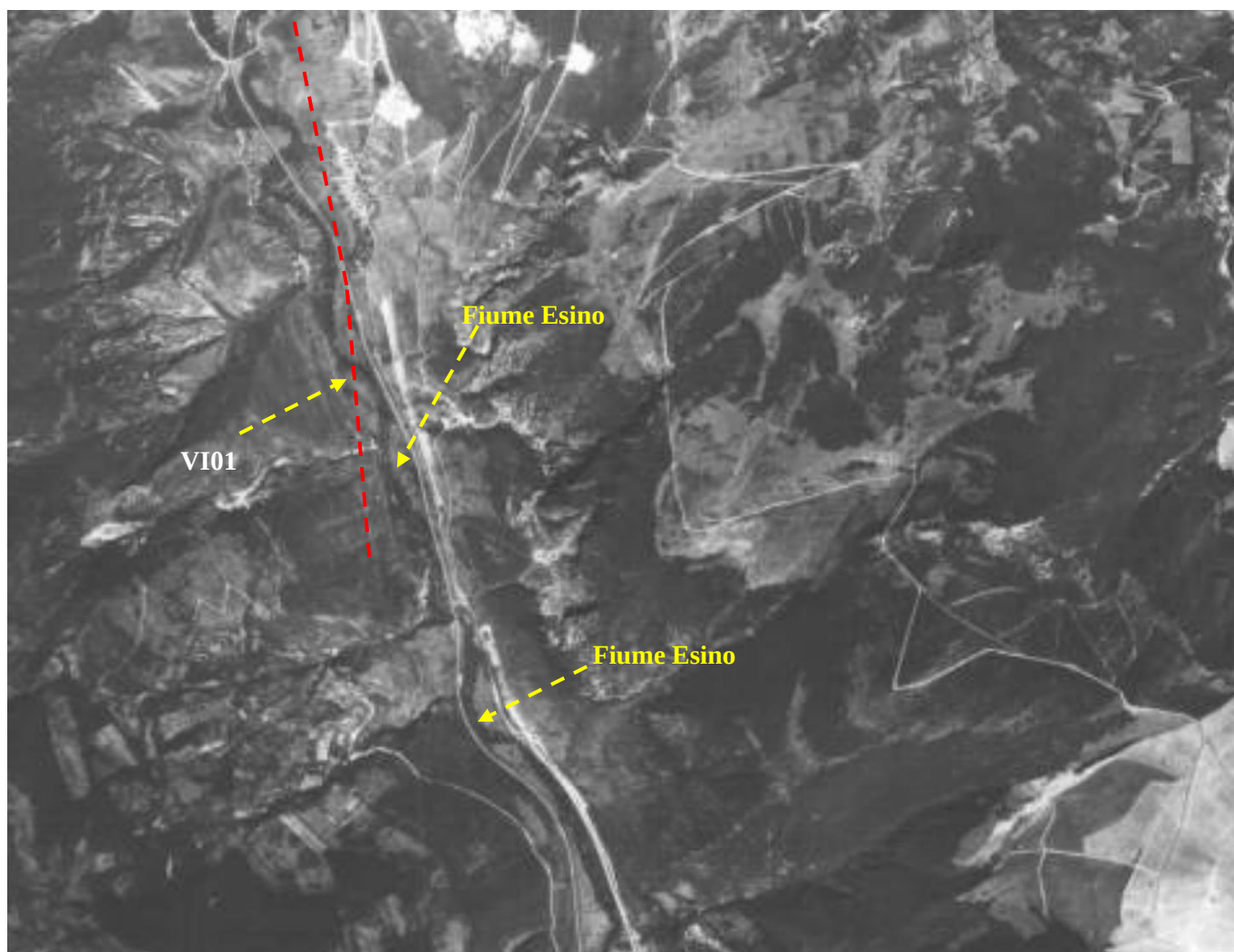


Fig. 20 – Stralci di foto aerea 1985: tratto fluviale del Fiume Esino in corrispondenza del nuovo viadotto VI01.

|                                                                                   |                                                                                                                                                                                |                  |                |                         |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
|  | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA<br/>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO<br/>Lotto 1</b><br><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                    |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                      | COMMESSA<br>IR0F                                                                                                                                                               | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>36 di 42 |

Allo stato attuale, gli unici fenomeni fluviali che si registrano sono connessi all'erosione puntuale delle sponde e a sporadici fenomeni di alluvionamento delle zone più depresse, mentre non si registrano importanti fenomeni erosivi o marcate variazioni di forma dei meandri che lo costituiscono.

Medesime considerazioni possono essere attribuite specificamente al tratto fluviale in cui ricadono le “nuove” sezioni di attraversamento, ovvero il viadotto VI01.

Pertanto, si può asserire che la nuova sezione di attraversamento non è soggetta a possibili evoluzioni della conformazione d'alveo, in ragione delle condizioni e dei processi di urbanizzazione passati e presenti in atto o che comunque hanno caratterizzato l'area negli ultimi 70 anni.

In ultimo, a seguito degli eventi alluvionali del 2013, l'alveo del Fiume Esino nel tratto fluviale di interesse è stato oggetto di interventi di riprofilatura e rivestimento delle sezioni di deflusso che sicuramente contribuiscono ancor di più a fissare ulteriore l'alveo lungo l'attuale conformazione.

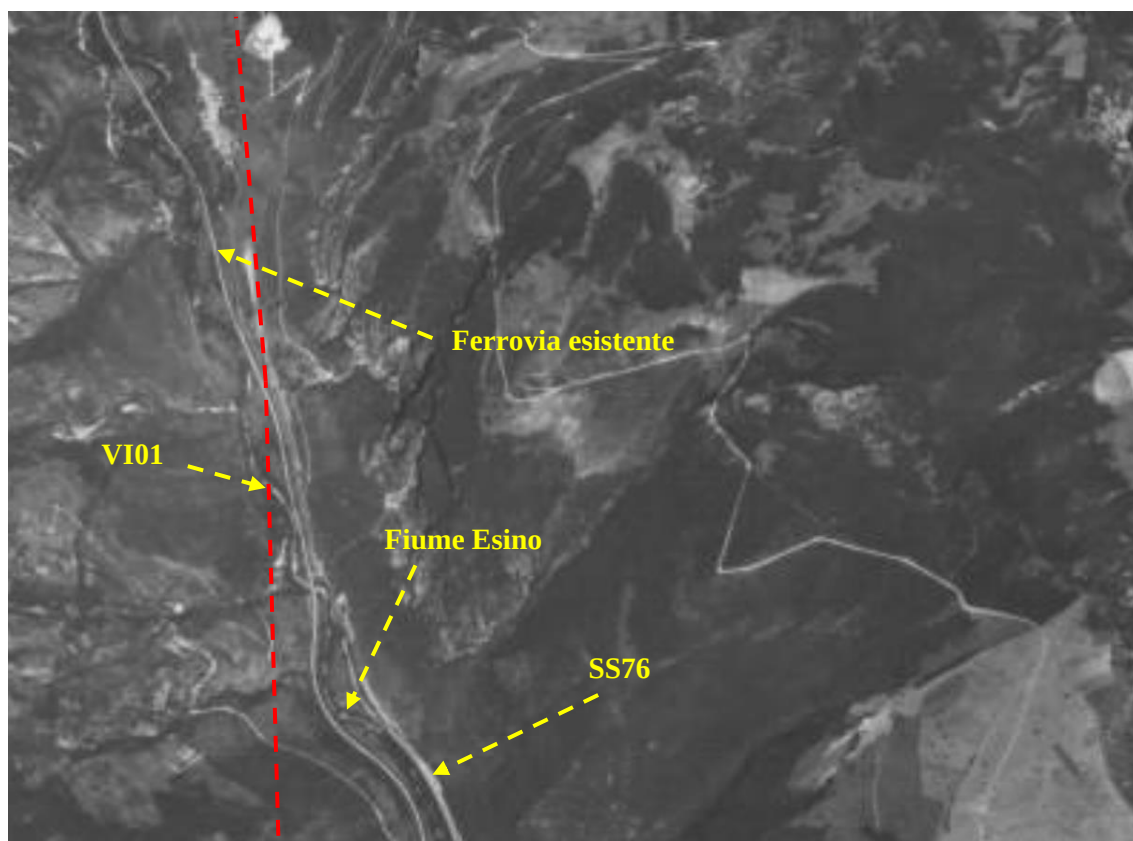


Fig. 21 – Stralcio di foto aerea 1991: tratto fluviale del Fiume Esino in corrispondenza del nuovo viadotto VI01.



|                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                 |                  |                |                         |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
|  <div>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</div> | <div>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA<br/>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO<br/>Lotto 1</div> <div>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</div> |                  |                |                         |           |                    |
| RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA                                                                                             | COMMESSA<br>IR0F                                                                                                                                                                | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>37 di 42 |

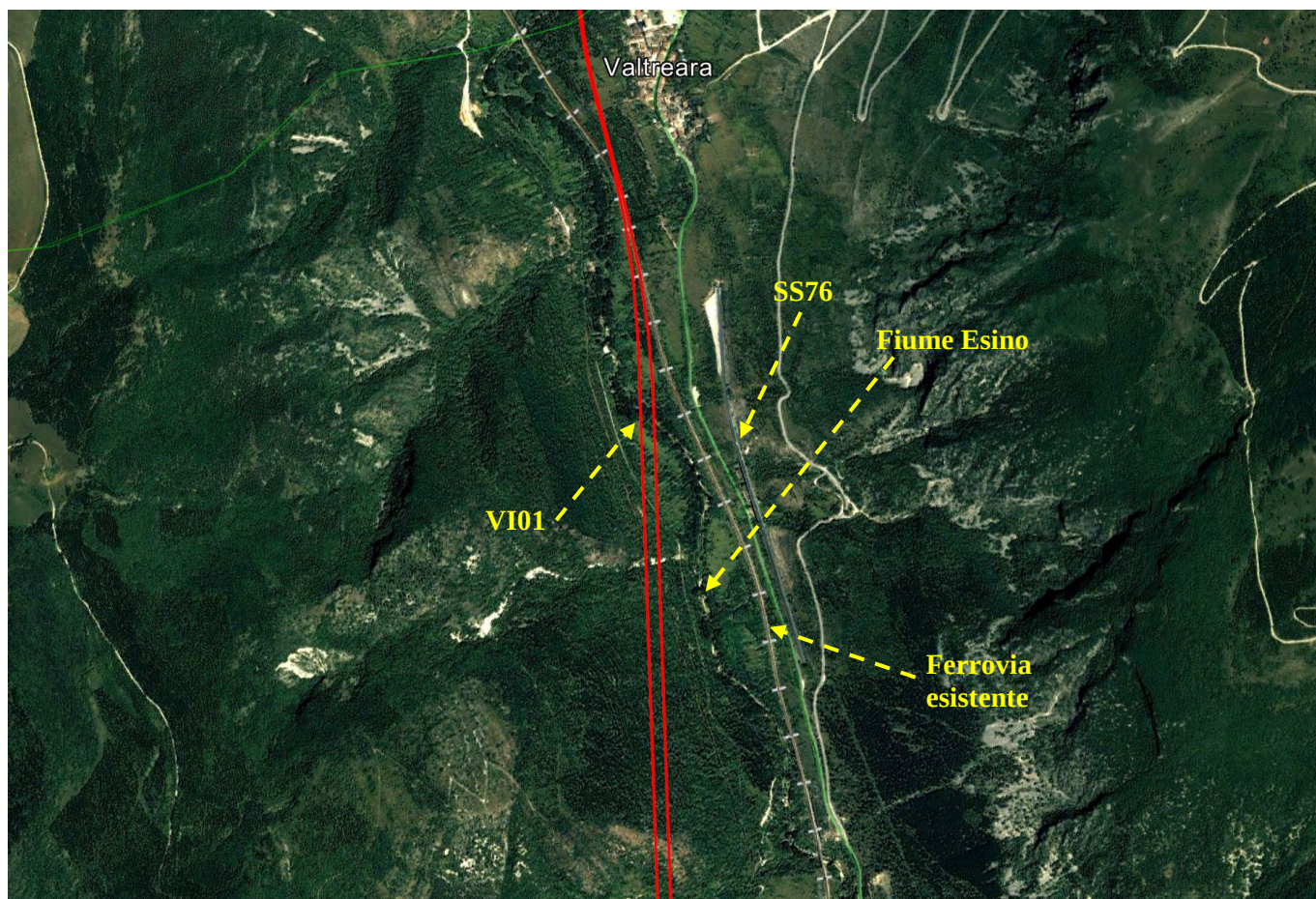


Fig. 22 – Stralcio di foto aerea 2004: tratto fluviale del Fiume Esino in corrispondenza del nuovo viadotto VI01.

Da evidenziare anche la presenza di numerose soglie/traverse/opere di derivazione che hanno “consolidato” negli anni l’attuale corso del fiume.

Per maggiori dettagli circa l’inquadramento geomorfologico e idrogeologico dell’area di intervento, si rimanda anche agli elaborati specialistici di geologia.



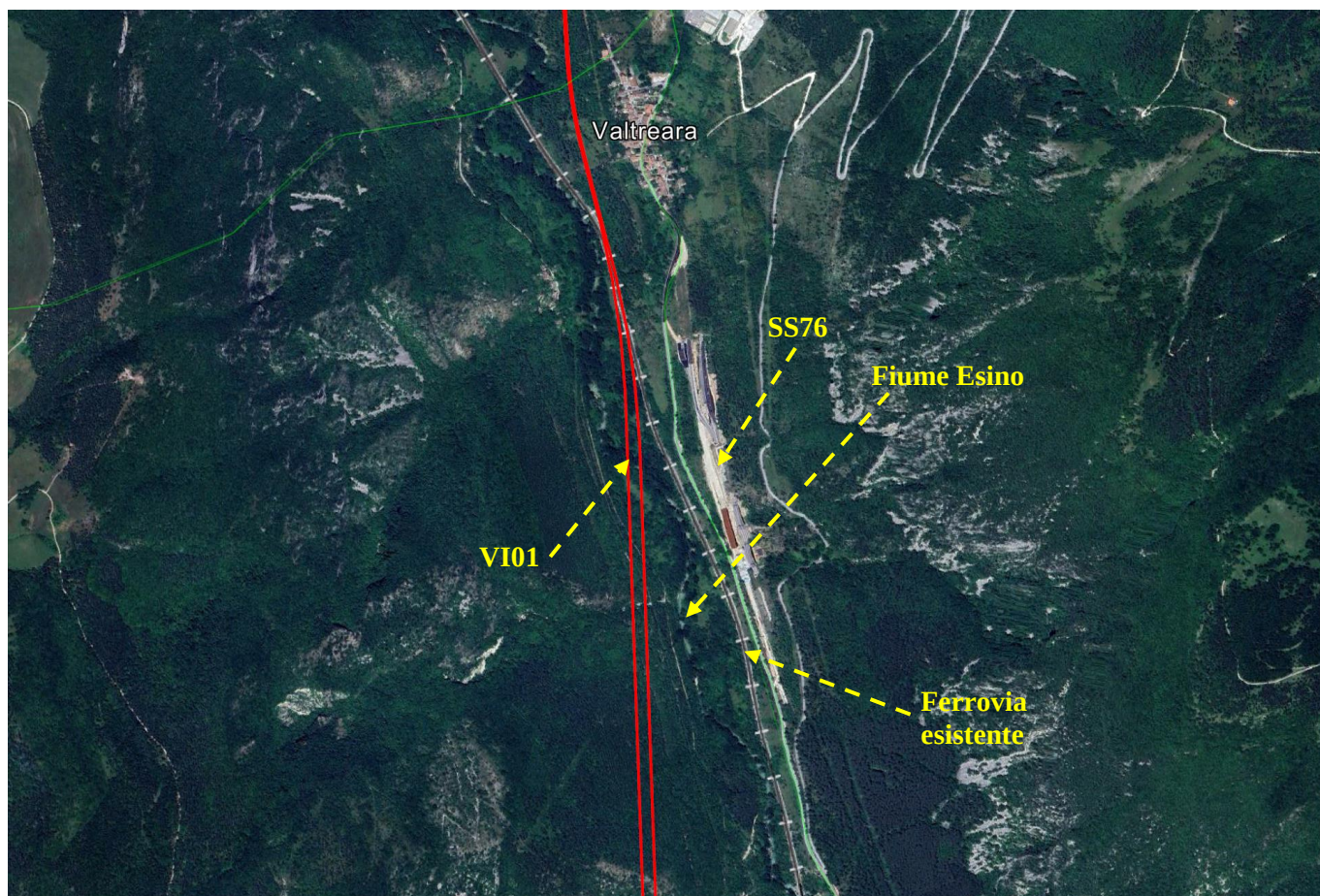


Fig. 23 – Stralcio di foto aerea 2023: tratto fluviale del Fiume Esino in corrispondenza del nuovo viadotto VI01.

|                                                                                   |                                                                                                                                                                                |                  |                |                         |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
|  | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA<br/>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO<br/>Lotto 1</b><br><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                    |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                      | COMMESSA<br>IR0F                                                                                                                                                               | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>39 di 42 |

## 7. CONSIDERAZIONI SUGLI EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI

Con riferimento allo studio idrologico annesso (rif. IR0F00R09RIID0001001), per effetto dei cambiamenti climatici nel periodo 2061-2090 si prevede (sulla base dell'elaborazione dei risultati dei modelli meteorologici sviluppati dall'IPCC) un incremento delle precipitazioni, e quindi delle portate al colmo.

Applicando tale incremento stimato alle portate di progetto (ad oggi stimate con  $Tr = 200$  anni) del Fiume Esino e dei suoi principali affluenti, ovvero nel modello idrologico sviluppato, si ottengono valori di portata al colmo di riferimento per il periodo 2061-2090 che corrisponderebbero circa ai valori di portata al colmo ad oggi stimati con  $Tr = 500$  anni.

Di seguito, si riportano quindi i valori di livello idrico e franco idraulico relativo allo scenario  $Tr500$  (di progetto al 2090), in corrispondenza del viadotto VI01.

| Opera                                    | Quota impalcato<br>[m slm] | Livello di<br>piena<br>$Tr\ 500$ [m slm] | Franco sul livello<br>idrico $Tr\ 500$ [m] |
|------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------|
| <b>VI01 (alveo inciso)</b>               | 206.90                     | 203.30                                   | 3.60                                       |
| <b>VI01 (quota minima<br/>impalcato)</b> | 205.18                     | 203.30                                   | 1.88                                       |

Le relative mappe di esondazione per il tempo di ritorno di 500 anni, come per gli altri tempi di ritorno previsti dalla pianificazione di bacino, saranno fornite nella successiva fase progettuale.

In definitiva, sulla base delle proiezioni climatiche ad oggi disponibili, le opere previste in progetto garantirebbero (al 2090) il passaggio a pelo libero di eventuali “portate incrementate” per effetto dei cambiamenti climatici, con franchi idraulici ancora ampiamente elevati.



|                                                                                   |                                                                                                                                                                                |                  |                |                         |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
|  | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA<br/>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO<br/>Lotto 1</b><br><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                    |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                      | COMMESSA<br>IR0F                                                                                                                                                               | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>40 di 42 |

## 8. VALUTAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA DELLE OPERE IN PROGETTO

Lo studio di compatibilità idraulica è stato redatto secondo quanto previsto dalla Norme di Attuazione del Piano di Assetto Idrogeologico (P.A.I.) della Regione Marche, nonché dalle normative nazionali di riferimento. 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.....”*

Il viadotto VI01 in progetto sul Fiume Esino è caratterizzato da luci e franchi nel rispetto della normativa vigente. E’ rispettato infatti il franco minimo di 1,5 metri nei confronti del livello idrico corrispondente alla piena di progetto (Tr200), nonché la distanza minima tra pile contigue in alveo (40 metri), e tra il fondo alveo e la quota di intradosso di impalcato (6-7 m).

E’ stato trattato il tema relativo alle escavazioni in corrispondenza delle fondazioni delle pile interessate dalla piena di progetto e alle sistemazioni idrauliche in alveo e in corrispondenza delle fondazioni delle pile soggette ad esondazione.

E’ da sottolineare che i risultati numerici da modello 2D (in termini di aree potenzialmente inondabili e livelli idrici), ottenuti per le configurazioni “attuale” e di “progetto”, non hanno evidenziato variazioni/differenze sostanziali tra i due scenari.

|                                                                                   |                                                                                                                                                                                |                  |                |                         |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
|  | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA<br/>RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO<br/>Lotto 1</b><br><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                    |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                      | COMMESSA<br>IR0F                                                                                                                                                               | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>41 di 42 |

E' rispettata la prescrizione di *“un franco non inferiore a 1 m tra la quota della piattaforma ferroviaria (piano di regolamento) e la massima altezza raggiungibile dalla quota di massima piena di progetto”* per i rilevati vulnerabili per le esondazioni (Tr200) del Fiume Esino. Si prevede inoltre la posa in opera di adeguate protezioni delle scarpate e del piede dei muri di sostegno o sottoscarpa (in particolare per la viabilità di accesso al piazzale di emergenza, lato Castelplanio, della galleria prevista in progetto).

In definitiva, è dimostrata la compatibilità idraulica dell'infrastruttura ferroviaria in progetto, nonché delle opere annesse (i.e. fabbricati, nuove viabilità, piazzali,...), in termini sia di franco di sicurezza sia di possibile interferenza con le aree potenzialmente inondabili (Tr200) del Fiume Esino.

Le opere in progetto inoltre *“rispettano il vincolo di non aumentare il livello di pericolosità e di rischio esistente e di non precludere la possibilità di eliminare o ridurre le condizioni di pericolosità e rischio mediante azioni future”*.

Infine, allo scopo di mantenere la configurazione dell'alveo il più possibile inalterata tra *ante* e *post operam*, sono previste anche adeguate sistemazioni idrauliche (in massi sciolti/legati) in corrispondenza dell'opera di attraversamento in progetto.

|                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                              |                  |                |                         |           |                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA<br/>         RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO<br/>         Lotto 1</b><br><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b> |                  |                |                         |           |                    |
| <b>RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</b>                                                                                                 | COMMESSA<br>IR0F                                                                                                                                                                             | LOTTO<br>01 R 09 | CODIFICA<br>RI | DOCUMENTO<br>ID0002 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>42 di 42 |

## 9. BIBLIOGRAFIA

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

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

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

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

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

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

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

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