

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



S.O. OPERE CIVILI

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA

LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA
NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA
LOTTO 1 BATTIPAGLIA – PRAIA
LOTTO 1C BUONABITACOLO – PRAIA

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione Idraulica e di compatibilità idraulica modelli bidimensionali

SCALA:

-

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

RC2A C1 R 09 RI ID0002 002 B

| Rev. | Descrizione | Redatto | Data | Verificato | Data | Approvato | Data | Autorizzato Data |
|------|---------------------|---------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|--|
| A | Emissione esecutiva | L. Nani | Dic. 2021 | A. Cappelli | Dic. 2021 | I. D'Amore | Dic. 2021 | A. Vittozzi Luglio 2023 |
| B | Emissione esecutiva | Sellari | Luglio 2023 | A. Cappelli | Luglio 2023 | I. D'Amore | Luglio 2023 | ITALFERR S.p.A. U.O. Opere Civili e gestione delle varianti Data: 18/07/2023 Firma degli Ingegneri della Provincia di Roma N. 142078 |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

File: RC2AC1R09RIID0002002B.doc

n. Elab.:

INDICE

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | PREMESSA | 5 |
| 2 | INQUADRAMENTO GENERALE..... | 7 |
| 2.1 | INQUADRAMENTO IDROGRAFICO | 7 |
| 3 | INQUADRAMENTO NORMATIVO | 8 |
| 3.1 | PIANO DI GESTIONE RISCHIO DI ALLUVIONI (PGRA)..... | 8 |
| 3.2 | NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI (DECRETO 17 GENNAIO 2018 DEL MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI) | 10 |
| 3.3 | CIRCOLARE 21 GENNAIO 2019, N. 7 C.S.LL.PP. (ISTRUZIONI PER L'APPLICAZIONE DELL'AGGIORNAMENTO DELLE NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI DI CUI AL DECRETO MINISTERIALE 17 GENNAIO 2018)..... | 10 |
| 3.4 | MANUALE DI PROGETTAZIONE DELLE OPERE FERROVIARIE (RFI DTC SI CS MA IFS 001 D)..... | 11 |
| 4 | STUDIO IDRAULICO..... | 13 |
| 4.1 | METODOLOGIA | 13 |
| 4.2 | MODELLO NUMERICO DEL FIUME NOCE PK 26+671 | 15 |
| 4.2.1 | <i>Geometria di calcolo</i> | 15 |
| 4.2.2 | <i>Condizioni al contorno</i> | 16 |
| 4.2.3 | <i>Scabrezze</i> | 17 |
| 4.3 | RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE – FIUME NOCE PK 26+671 | 18 |
| 4.4 | MODELLO NUMERICO FIUME NOCE PK 38+429..... | 22 |
| 4.4.1 | <i>Geometria di calcolo</i> | 22 |
| 4.4.2 | <i>Condizioni al contorno</i> | 23 |
| 4.4.3 | <i>Scabrezze</i> | 24 |
| 4.4.4 | <i>Risultati delle simulazioni numeriche – Fiume Noce pk 38+429</i> | 25 |
| 4.5 | DETERMINAZIONE DELLO SCAVO LOCALIZZATO PER LE PILE | 30 |
| 4.5.1 | <i>HEC 18 - CSU</i> | 30 |
| 4.5.2 | <i>FDOT (Florida Department Of Transportation)</i> | 32 |
| 4.5.3 | <i>Ulteriori considerazioni sul calcolo della profondità di scavo</i> | 33 |
| 4.6 | PROTEZIONI DELLE PILE DALLO SCALZAMENTO..... | 39 |

| | | | | | | |
|--|--|------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA LOTTO 1 BATTIPAGLIA – PRAIA LOTTO 1C BUONABITACOLO – PRAIA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| | Relazione Idraulica e di compatibilità idraulica modelli bidimensionali | COMMESSA RC2A | LOTTO C1 R 09 | CODIFICA RI | DOCUMENTO ID0002 002 | REV. B |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.6.1 | Verifiche di stabilità massi a protezione delle pile..... | 39 |
| 5 | COMPATIBILITÀ IDRAULICA | 42 |

INDICE DELLE FIGURE

| | | |
|------------|---|----|
| Figura 7 | Lotto 1c Buonabitacolo – Praia. Corografia dell'intervento | 6 |
| Figura 8 | – Inquadramento territoriale del fiume Noce rispetto al tracciato ferroviario in progetto (in rosso) | 8 |
| Figura 9 | – Fasce del PGRA del fiume Noce nei tratti di attraversamento e tracciato ferroviario in progetto. | 10 |
| Figura 10 | – Modello idraulico fiume Noce pk 26+671: estensione del dominio di calcolo..... | 16 |
| Figura 11 | – Modello idraulico fiume Noce pk 26+671: idrogrammi di piena TR200..... | 17 |
| Figura 12 | – Modello idraulico fiume Noce pk 26+671, TR200 anni stato di fatto: altezze d'acqua massime (m)... | 18 |
| Figura 13 | – Modello idraulico fiume Noce pk 26+671, TR200 anni stato di fatto: velocità massime (m/s)..... | 19 |
| Figura 14 | – Modello idraulico fiume Noce pk 26+671, TR200 anni stato di progetto: altezze d'acqua massime (m). | 19 |
| Figura 15 | – Modello idraulico fiume Noce pk 26+671, TR200 anni stato di progetto: velocità massime (m/s)..... | 20 |
| Figura 16 | – Modello idraulico fiume Noce pk 26+671, TR200 anni: confronto campo di velocità nello stato di fatto (a sinistra) e nello stato di progetto (a destra)..... | 20 |
| Figura 17 | – Modello idraulico fiume Noce pk 26+671, TR200 anni: confronto velocità lungo la sezione del tracciato ferroviario nello stato di fatto e nello stato di progetto..... | 21 |
| Figura 18 | – Modello idraulico fiume Noce pk 38+429 estensione del dominio di calcolo. | 23 |
| Figura 19 | – Modello idraulico fiume Noce pk 38+429: idrogrammi di piena alla sezione dell'attraversamento. | 24 |
| Figura 20 | – Modello idraulico fiume Noce pk 88+200: mappa dell'indice di Manning. | 24 |
| Figura 21 | – Modello idraulico fiume Noce, TR200 anni stato di fatto: altezze d'acqua massime (m). | 25 |
| Figura 22 | – Modello idraulico fiume Noce, TR200 anni stato di fatto: velocità massime (m/s)..... | 26 |
| Figura 23 | – Modello idraulico fiume Noce, TR200 anni stato di progetto: altezze d'acqua massime (m). | 27 |
| Figura 24 | – Modello idraulico fiume Noce, TR200 anni stato di progetto: velocità massime (m/s)..... | 27 |
| Figura 25 | – Modello idraulico fiume Noce pk 38+429, TR200 anni: campo di velocità in prossimità delle pile..... | 28 |
| Figura 26 | – Modello idraulico fiume Noce pk 38+429, TR200 anni: confronto velocità lungo la sezione del tracciato ferroviario BP nello stato di fatto e nello stato di progetto. | 28 |
| Figura 27: | Calcolo della larghezza equivalente, Melville e Raudkivi (1996)..... | 34 |
| Figura 28: | Più pile affiancati ed inclinate rispetto alla corrente (da HEC18 – Evaluating Scour at Bridges-5th edition). | 35 |

| | | | | | | |
|--|--|------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA LOTTO 1 BATTIPAGLIA – PRAIA LOTTO 1C BUONABITACOLO – PRAIA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| | Relazione Idraulica e di compatibilità idraulica modelli bidimensionali | COMMESSA RC2A | LOTTO C1 R 09 | CODIFICA RI | DOCUMENTO ID0002 002 | REV. B |

| | |
|---|----|
| Figura 29 – Calcolo della larghezza equivalente, Melville e Raudkivi (1996)..... | 35 |
| Figura 30 – Definition sketch for scour components for a complex pier, FHWA HEC 18, Figure 7.5..... | 36 |
| Figura 31 –Equazioni secondo la FHWA HEC 18. | 36 |
| Figura 32 –Principali variabili secondo la FHWA HEC 18..... | 37 |
| Figura 33 – Disposizione raccomandata dei massi di protezione attorno alle pile, fonte HEC23. | 40 |

INDICE DELLE TABELLE

| | |
|---|----|
| Tabella 1 – Livelli idrici ottenuti in corrispondenza della sezione fluviale immediatamente a monte dell'attraversamento ferroviario sul Fiume Noce pk 26+671 nello stato di fatto e nello stato di progetto per i diversi tempi di ritorno. | 21 |
| Tabella 2 – Livelli idrici ottenuti in corrispondenza della sezione fluviale immediatamente a monte dell'attraversamento ferroviario sul Fiume Noce pk 38+429 nello stato di fatto e nello stato di progetto..... | 29 |
| Tabella 4:Coefficiente correttivo K_1 | 30 |
| Tabella 5:Coefficiente correttivo K_3 | 31 |
| Tabella 6:Coefficiente correttivo K_S | 33 |
| Tabella 5 – Viadotti Lotto 1.C, massima profondità di escavazione-Noce 86..... | 38 |
| Tabella 6 – Viadotti Lotto 1.C, massima profondità di escavazione-Noce 95..... | 38 |
| Tabella 7 – Calcolo delle protezioni Bacino 86..... | 41 |
| Tabella 8 – Calcolo delle protezioni Bacino 95..... | 41 |

|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA LOTTO 1 BATTIPAGLIA – PRAIA LOTTO 1C BUONABITACOLO – PRAIA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</p> | | | | | | | | | | | | |
|---|--|----------|------------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|------------|---|---------|
| <p>Relazione Idraulica e di compatibilità idraulica modelli bidimensionali</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RC2A</td> <td>C1 R 09</td> <td>RI</td> <td>ID0002 002</td> <td>B</td> <td>5 di 43</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | RC2A | C1 R 09 | RI | ID0002 002 | B | 5 di 43 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| RC2A | C1 R 09 | RI | ID0002 002 | B | 5 di 43 | | | | | | | | |

1 PREMESSA

La presente relazione è parte integrante degli elaborati specialistici relativi al Progetto di fattibilità tecnica ed economica della Linea ferroviaria Salerno-Reggio Calabria.

La presente progettazione di fattibilità tecnica ed economica ha ad oggetto il lotto 1c Buonabitacolo – Praia, parte finale del lotto 1.

Il progetto ferroviario del lotto 1C ha origine in corrispondenza del precedente lotto 1B (punta scambi estrema della stazione di Buonabitacolo lato Reggio Calabria). L'estesa complessiva dell'intervento è di circa 44,7 km con una velocità di tracciato di 300 km/h, mentre il collegamento a Praia a Mare è caratterizzato da una velocità di tracciato pari a 100km/h.

Il tracciato attraversa i territori di:

- Montesano sulla Marcellana, Casalbuono e Casaletto Spartano nella provincia di Salerno;
- Lagonegro, Rivello, Trecchina e Maratea nella provincia di Potenza;
- Tortora e Praia a Mare nella provincia di Cosenza.



Figura 1 Lotto 1c Buonabitacolo – Praia. Corografia dell'intervento

La presente relazione illustra lo studio idraulico, effettuato con modellazione numerica bidimensionale, dei tratti del fiume Noce interferiti dall'attraversamento ferroviario.

Le analisi sono state condotte al fine di definire e verificare le opere di protezione idraulica della linea ferroviaria stessa e successivamente valutare la compatibilità idraulica delle opere in progetto.

|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA LOTTO 1 BATTIPAGLIA – PRAIA LOTTO 1C BUONABITACOLO – PRAIA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</p> | | | | | | | | | | | | |
|---|--|----------|------------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|------------|---|---------|
| <p>Relazione Idraulica e di compatibilità idraulica modelli bidimensionali</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RC2A</td> <td>C1 R 09</td> <td>RI</td> <td>ID0002 002</td> <td>B</td> <td>7 di 43</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | RC2A | C1 R 09 | RI | ID0002 002 | B | 7 di 43 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| RC2A | C1 R 09 | RI | ID0002 002 | B | 7 di 43 | | | | | | | | |

2 INQUADRAMENTO GENERALE

2.1 Inquadramento idrografico

Il fiume Noce ha origine dalle propaggini settentrionali della dorsale del Monte Sirino, nel settore occidentale della Regione Basilicata. Ha una lunghezza di circa 49 km e sfocia nel Mar Tirreno, dopo aver attraversato la Piana di Castrocuoco, al confine tra i territori comunali di Tortora (CS) e di Maratea (PZ).

Sulla base dei dati altimetrici e granulometrici, lungo il corso del Noce è possibile individuare due principali tratti morfologici:

- tratto iniziale inciso, avente una lunghezza di circa 38 km, pendenza media pari a 3.2% e larghezza delle sezioni d'alveo di circa 6 m;
- tratto alluvionato avente una lunghezza di circa 21 km, con pendenza media di 1.15% e larghezza dell'alveo variabile da qualche metro fino a 200 m nel tratto di valle.

All'interno del secondo tratto è comunque possibile individuare tronchi meno più ampi cui la corrente defluisce a pieni bordi occupando l'intera sezione, e tronchi dove le acque riescono ad impegnare una sola porzione del greto. I tratti alluvionali con larghezza media d'alveo di 120-150 m si trovano al limite tra tratti alluvionati unicursali e pluricursali.

Lungo il corso del Noce sono presenti diverse opere di sistemazione, longitudinale e trasversale; nel tratto terminale del fiume sono stati realizzati interventi finalizzati all'abbassamento delle quote delle briglie per consentire la riattivazione del trasporto solido verso l'area di foce, nella Piana di Castrocuoco, mitigando il processo di arretramento della linea di costa.

Il tracciato ferroviario in progetto attraversa il fiume Noce in due punti, il primo a sud dell'abitato di Rivello, il secondo a monte di Castrocuoco, indicati nelle seguenti figure.

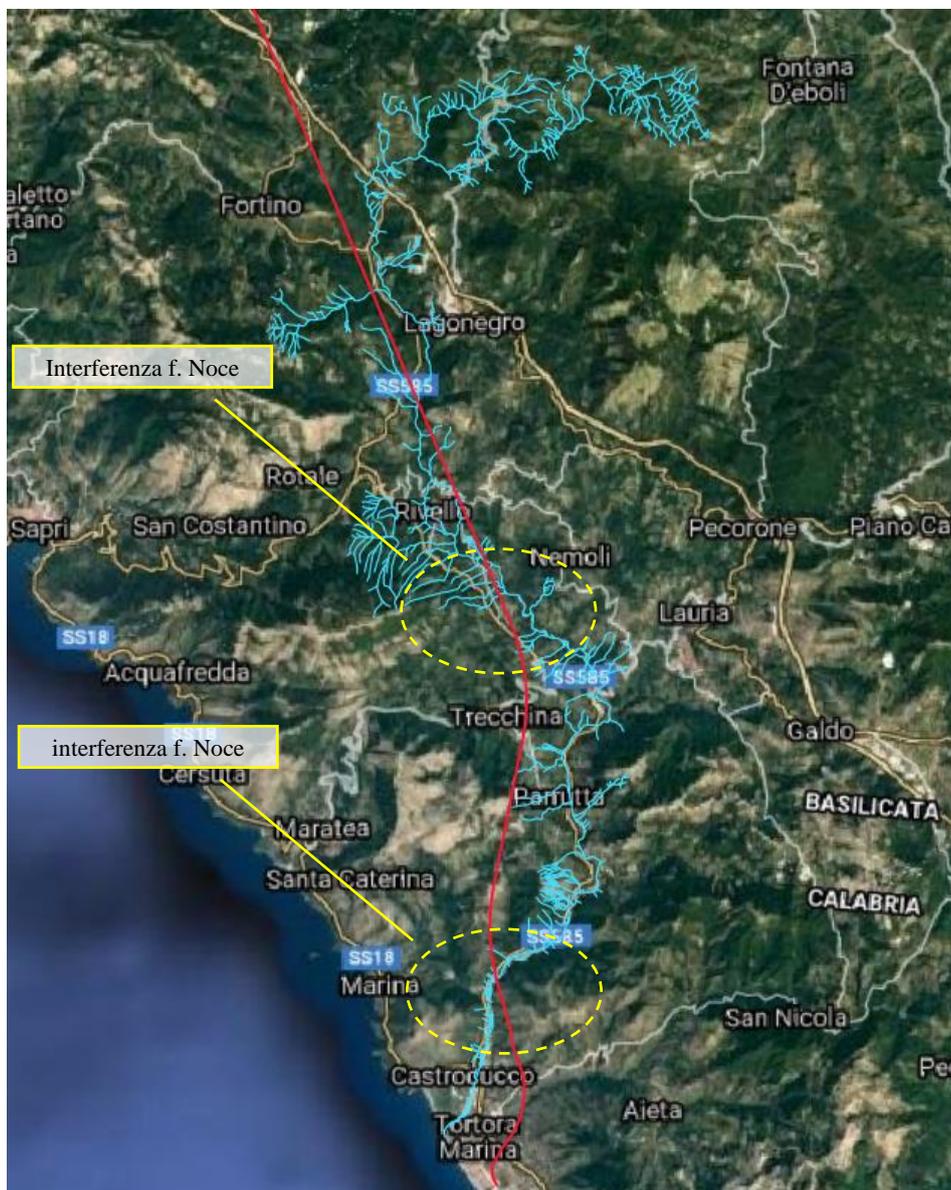


Figura 2 – Inquadramento territoriale del fiume Noce rispetto al tracciato ferroviario in progetto (in rosso)

3 INQUADRAMENTO NORMATIVO

3.1 Piano di Gestione Rischio di Alluvioni (PGRA)

La Direttiva 2007/60/CE (cd. Direttiva alluvioni) derivata dalla più generale Direttiva quadro sulle acque 2000/60/CE, ha introdotto il concetto di un quadro per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni volto a ridurre le conseguenze negative per la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche connesse con le alluvioni all'interno della Comunità. Tale Direttiva, nell'incipit, recita: "Le alluvioni possono provocare vittime, l'evacuazione di persone e danni all'ambiente, compromettere gravemente lo sviluppo economico

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA LOTTO 1 BATTIPAGLIA – PRAIA LOTTO 1C BUONABITACOLO – PRAIA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| | Relazione Idraulica e di compatibilità idraulica modelli bidimensionali | COMMESSA RC2A | LOTTO C1 R 09 | CODIFICA RI | DOCUMENTO ID0002 002 | REV. B |

e mettere in pericolo le attività economiche della Comunità. Alcune attività umane (come la crescita degli insediamenti umani e l'incremento delle attività economiche nelle pianure alluvionali, nonché la riduzione della naturale capacità di ritenzione idrica del suolo a causa dei suoi vari usi) e i cambiamenti climatici contribuiscono ad aumentarne la probabilità e ad aggravarne gli impatti negativi. Ridurre i rischi di conseguenze negative derivanti dalle alluvioni soprattutto per la vita e la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale, l'attività economica e le infrastrutture, connesse con le alluvioni, è possibile e auspicabile ma, per essere efficaci, le misure per ridurre tali rischi dovrebbero, per quanto possibile, essere coordinate a livello di bacino idrografico.”

La direttiva alluvioni è stata recepita in Italia dal D.Lgs. 49/2010, che ha introdotto il Piano di Gestione Rischio Alluvioni (PGRA), da predisporre per ciascuno dei distretti idrografici individuati nell'art. 64 del D.Lgs. 152/2006, contiene il quadro di gestione delle aree soggette a pericolosità e rischio individuate nei distretti, delle aree dove possa sussistere un rischio potenziale significativo di alluvioni e dove si possa generare in futuro, nonché delle zone costiere soggette ad erosione.

Le due direttive europee evidenziano l'approccio integrato della gestione che si fonda su alcuni pilastri:

- l'unità geografica di riferimento caratterizzata da un'ampia porzione di territorio raggruppante più bacini individuata come distretto idrografico;
- la pianificazione ai fini e per il raggiungimento degli obiettivi della direttiva 2000/60/CE per l'azione comunitaria in materia di acque; nonché la pianificazione per la gestione e la riduzione del rischio da alluvioni che la direttiva 2007/60/CE introduce (codificando, disciplinando ed ampliando quanto già contenuto nella legge 183/89);
- l'individuazione dei soggetti a cui è demandata la redazione dei piani.

Il Primo Piano di Gestione Rischio di Alluvioni del Distretto idrografico Appennino Meridionale PGRA DAM è stato adottato, ai sensi dell'art. 66 del d.lgs. 152/2006, con Delibera n° 1 del Comitato Istituzionale Integrato del 17 dicembre 2015, è stato approvato dal Comitato Istituzionale Integrato in data 3 marzo 2016. Con l'emanazione del DPCM in data 27/10/2016 si è concluso il I ciclo di Gestione.

Le fasce di pericolosità idraulica riprendono la mappatura dei PSAI; i tempi di ritorno che definiscono le fasce fluviali sono:

- Periodo di ritorno $T = 30$ anni, per la perimetrazione della Fascia P1
- Periodo di ritorno $T = 200$ anni, per la perimetrazione della Fascia P2;
- Periodo di ritorno $T = 500$ anni, per la perimetrazione della Fascia P3.

La seguente figura riporta le fasce fluviali del PGRA lungo il fiume Noce, con indicazione del tracciato ferroviario in progetto.

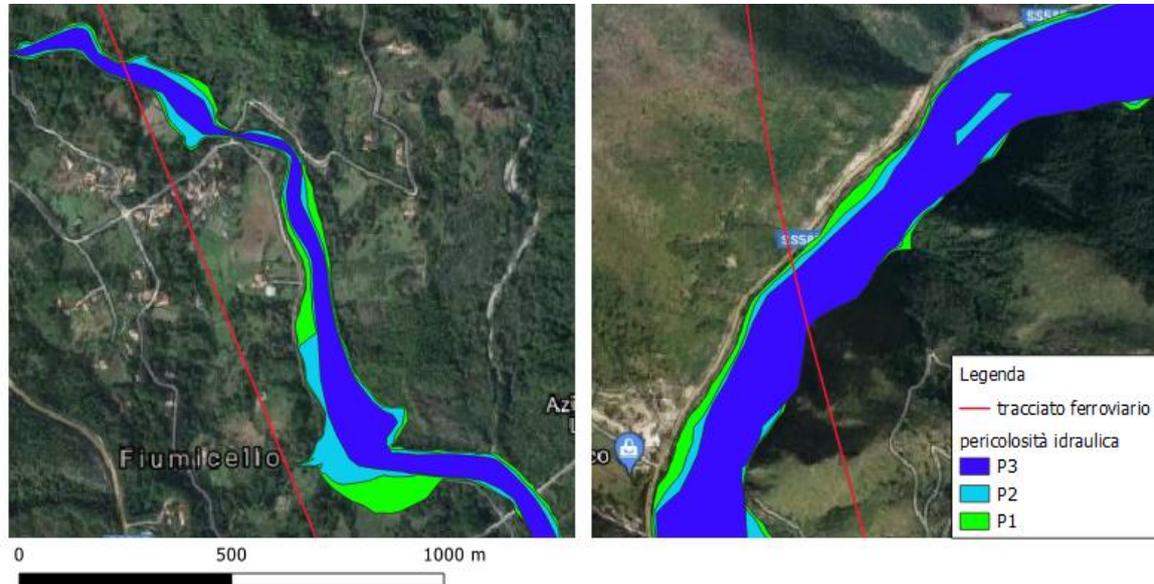


Figura 3 – Fasi del PGRA del fiume Noce nei tratti di attraversamento e tracciato ferroviario in progetto.

3.2 Norme tecniche per le costruzioni (Decreto 17 gennaio 2018 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti)

All'interno dell'«Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»» (Decreto 17 gennaio 2018 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti), al punto 5.1.2.3, si definiscono gli argomenti principali dello studio di «Compatibilità idraulica» relativo ai ponti stradali. Le stesse prescrizioni si estendono poi ai ponti ferroviari, secondo il paragrafo 5.2.1.2.

Si riporta un estratto della normativa:

5.1.2.3 Compatibilità Idraulica

[...]

Quando il ponte interessa un corso d'acqua naturale o artificiale, il progetto deve essere corredato da uno studio di compatibilità idraulica costituito da una relazione idrologica e da una relazione idraulica riguardante le scelte progettuali, la costruzione e l'esercizio del ponte.

[...]

3.3 Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP. (Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018)

Le «Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.» propongono al punto C5.1.2.3 «Compatibilità Idraulica» ulteriori prescrizioni:

[...]

|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA LOTTO 1 BATTIPAGLIA – PRAIA LOTTO 1C BUONABITACOLO – PRAIA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</p> | | | | | | | | | | | | |
|---|---|----------|------------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|------------|---|----------|
| <p>Relazione Idraulica e di compatibilità idraulica modelli bidimensionali</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RC2A</td> <td>C1 R 09</td> <td>RI</td> <td>ID0002 002</td> <td>B</td> <td>11 di 43</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | RC2A | C1 R 09 | RI | ID0002 002 | B | 11 di 43 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| RC2A | C1 R 09 | RI | ID0002 002 | B | 11 di 43 | | | | | | | | |

*Ai fini dell'applicazione del punto 5.1.2.3 della Norma, s'intende per alveo la sezione occupata dal deflusso della portata di piena di progetto. Quest'ultima è a sua volta caratterizzata da un tempo di ritorno pari a **Tr = 200 anni**, dovendosi intendere tale valore quale il più appropriato da scegliere, non escludendo tuttavia valori anche maggiori che devono però essere adeguatamente motivati e giustificati.*

[...]

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

[...]

Per i ponti esistenti sono ammessi gli interventi per l'incremento della sicurezza strutturale in analogia a quanto prescritto al § 8.4 della Norma, solo nel caso in cui siano esclusi incrementi, rispetto all'attuale, del livello di traffico di progetto e gli stessi interventi non vadano in alcun modo a peggiorare le condizioni di sicurezza idraulica esistenti. Poiché in questi casi sono possibili fenomeni di instabilità locale, in applicazione del §8.3 della Norma, è opportuno effettuare la verifica delle fondazioni, e quindi la valutazione dello scalzamento di eventuali spalle o pile in alveo. Anche gli interventi necessari per l'incremento della sicurezza strutturale devono essere accompagnati dallo studio di compatibilità idraulica dove sia messa in evidenza la frequenza probabile (1/Tr) degli eventi che garantiscono il franco previsto da Norma.

[...]

Restano esclusi dal punto 5.1.2.3 della Norma i tombini, intendendosi per tombino un manufatto totalmente rivestito in sezione, eventualmente suddiviso in più canne, in grado di condurre complessivamente portate fino a 50 m³/s. L'evento da assumere a base del progetto di un tombino ha comunque tempo di ritorno uguale a quello da assumere per i ponti. La scelta dei materiali deve garantire la resistenza anche ai fenomeni di abrasione e urto causati dai materiali trasportati dalla corrente.

[...]

3.4 Manuale di progettazione delle opere ferroviarie (RFI DTC SI CS MA IFS 001 D)

In accordo a quanto previsto dal Manuale di Progettazione delle opere ferroviarie, ogni tipo di manufatto idraulico deve essere verificato utilizzando i seguenti tempi di ritorno Tr:

- **linea ferroviaria Tr= 200 anni**
- **deviazioni stradali Tr=200 anni**

[...]

3.7.2.1.2 Attraversamenti corsi d' acqua principali

[...]

*definizione di una procedura di trasferimento dei dati caratteristici di portata alle sezioni di calcolo; **per le verifiche di opere esistenti sarà utile calcolare le portate con tempo di ritorno di 30, 50, 100, 200 e 500 anni.** Per gli*

| | | | | | | |
|---|---|--------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------|
|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA LOTTO 1 BATTIPAGLIA – PRAIA LOTTO 1C BUONABITACOLO – PRAIA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</p> | | | | | |
| | <p>Relazione Idraulica e di compatibilità idraulica modelli bidimensionali</p> | <p>COMMESSA RC2A</p> | <p>LOTTO C1 R 09</p> | <p>CODIFICA RI</p> | <p>DOCUMENTO ID0002 002</p> | <p>REV. B</p> |

attraversamenti più importanti si calcolerà una portata di piena estrema, per eventuali verifiche di uno scenario di superamento della portata di progetto;

[...]

calcolo dei profili di piena in condizioni di moto permanente nel tronco fluviale in esame per valori di portata corrispondenti ai valori assegnati dei tempi di ritorno e definizione dei corrispondenti livelli di piena alla sezione degli attraversamenti, ante e post operam; valutazione della compatibilità idraulica delle fasi costruttive;

[...]

3.7.2.1.4 Studio idraulico

[...]

Lo studio dovrà fornire tutte le indicazioni possibili circa l'ampiezza ed importanza del fenomeno, le quote idriche assolute, le indicazioni progettuali per mitigare l'interferenza del rilevato ferroviario con il normale deflusso delle acque di esondazione.

Qualora l'infrastruttura ferroviaria provochi una diminuzione del volume di invaso dell'area, dovranno essere valutate le modificazioni indotte sui livelli a monte ed a valle.

[...]

3.7.2.2.1 Attraversamenti principali

[...]

Per tali categorie di opere, relative a bacini con superficie $S > 10 \text{ km}^2$, si dovrà verificare la sezione di attraversamento in relazione alle caratteristiche dimensionali del manufatto in modo da minimizzare le modificazioni all'attuale deflusso nelle fasce fluviali, indotte dalla esecuzione delle opere.

Relativamente ai requisiti idraulici nei confronti dei livelli di massima piena si specifica quanto segue:

Il franco rispetto all'intradosso dell'opera dovrà essere:

-non inferiore a 1,5 m sopra al livello idrico nella sezione immediatamente a monte dell'attraversamento, per la portata con tempo di ritorno prescritto dalla normativa nazionale o locale vigente;

- non inferiore a 0,50 m sopra la quota del carico idraulico totale per la portata con tempo di ritorno 200 anni.

[...]

3.8.1.2.1.2 Geometria del rilevato

[...]

Nel caso di rilevati vulnerabili per esondazione di corsi d'acqua, dovrà essere garantito un franco non inferiore a 1 m tra la quota della piattaforma ferroviaria (piano di regolamento) e la massima altezza raggiungibile dalla quota

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA LOTTO 1 BATTIPAGLIA – PRAIA LOTTO 1C BUONABITACOLO – PRAIA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| | Relazione Idraulica e di compatibilità idraulica modelli bidimensionali | COMMESSA RC2A | LOTTO C1 R 09 | CODIFICA RI | DOCUMENTO ID0002 002 | REV. B |

di massima piena di progetto; le scarpate dovranno essere protette da apposite opere di difesa progettate sulla base dei parametri indicati nei piani di bacino o negli studi idraulici di progetto

[...]

I rilevati per i quali durante le piene possa instaurarsi una differenza di battente idrico tra un lato e l'altro, dovranno avere un adeguato coefficiente di sicurezza nei confronti di fenomeni di sifonamento o di sfiancamento per perdita di stabilità globale, anche nello scenario di assenza di battente idrico, ma rilevato saturo.

4 STUDIO IDRAULICO

4.1 Metodologia

Lo studio idraulico del fiume Noce che comprende i due attraversamenti ferroviari in progetto è stato eseguito mediante modellazione idrodinamica bidimensionale.

Il software utilizzato per l'implementazione dei modelli è HEC-RAS 6.1 sviluppato dal *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE).

La modellazione bidimensionale del corso d'acqua permette di rappresentare con accuratezza il flusso generato dalle portate di piena all'interno dell'asta fluviale e nelle aree ripariali attigue con la peculiarità di mettere in evidenza il comportamento della corrente in prossimità di bruschi restringimenti/allargamenti e forti curvature. È inoltre possibile valutare con un elevato grado di dettaglio gli effetti sulla propagazione del moto in prossimità di attraversamenti o di eventuali interferenze presenti lungo lo sviluppo del tratto fluviale verso valle.

L'algoritmo di modellazione bidimensionale a volumi finiti implicito in HEC-RAS utilizza come equazioni disponibili le *Shallow Water Equations* (SWE) o le *Diffusion Wave Equations* (DWE). L'algoritmo di soluzione implicita consente tempi di calcolo più rapidi rispetto ai metodi espliciti.

La formulazione delle SWE utilizzate nel software HEC RAS si basa sull'equazione di conservazione della massa (continuità):

$$q = \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y}$$

Dove i termini rappresentano:

q la portata

h il tirante idrico della corrente

u e v rispettivamente le componenti della velocità lungo le direzioni x e y

t il tempo

In forma vettoriale, l'equazione di continuità prende la forma:

| | | | | | | |
|--|--|------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA LOTTO 1 BATTIPAGLIA – PRAIA LOTTO 1C BUONABITACOLO – PRAIA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| | Relazione Idraulica e di compatibilità idraulica modelli bidimensionali | COMMESSA RC2A | LOTTO C1 R 09 | CODIFICA RI | DOCUMENTO ID0002 002 | REV. B |

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla (hV) = q$$

Dove

$V=(u,v)^T$ è il vettore velocità

∇ è il gradiente $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)^T$

Integrando su una regione orizzontale con confine perpendicolare al vettore n , usando il teorema della divergenza di Gauss, l'equazione assume la forma integrale:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} d\Omega + \iint_S (V n) dS = Q$$

Dove

Ω è il volume fluido e n è il vettore unitario perpendicolare al contorno S .

La formulazione conservativa delle SWE è essenziale al fine di preservare la massa e la quantità di moto. Questo tipo di formulazione permette di rappresentare le discontinuità nel flusso e i cambiamenti tra moto gradualmente e rapidamente vario (gradually varied flow e rapidly varied flow).

La turbolenza è modellata come processo di diffusione del gradiente. La viscosità è calcolata come somma di due fattori, che rappresentano la turbolenza prodotta dal taglio verticale e la turbolenza prodotta dal taglio orizzontale nel flusso e deriva dal modello di viscosità di Smagorinsky-Lilly (1963, 1970). Il modello di Smagorinsky-Lilly assume che l'energia turbolenta produzione e dissipazione su piccola scala sono in equilibrio. Il modello Smagorinsky-Lilly è piuttosto costoso da calcolare perché richiede il calcolo dei gradienti di velocità. Tuttavia, è più accurato dal punto di vista fisico, specialmente nelle regioni ad alto taglio come vicino a confini solidi/asciutti.

Per ciascun elemento di calcolo il timestep (Δt) richiesto è calcolato utilizzando le condizioni di Courant-Friedrichs-Lewy al fine di raggiungere la stabilità numerica. La formulazione della condizione di Courant-Friedrichs-Lewy è la seguente:

$$\Delta t \leq \frac{CFL \Delta x}{(\sqrt{u^2 + v^2} + c)}$$

dove: CFL è il numero di Courant (il valore di default è 0.95), Δx è la dimensione caratteristica dell'elemento appartenente alla griglia di calcolo, u e v sono le componenti piane del vettore velocità, c è la celerità dell'onda, Δt è il time step.

Le caratteristiche geometriche del dominio di calcolo sono riportate all'interno del modello idraulico tramite una rappresentazione semplificata del territorio ad elementi generalmente poligonali, nota come mesh. La mesh di calcolo è di tipo non strutturato, con celle ortogonali tra loro (la faccia tra due celle è perpendicolare a una linea che collega i due centri delle celle che possono avere un numero di lati fino a 8), in grado di riprodurre l'andamento piano altimetrico del territorio è riprodotto con un livello di accuratezza adeguato.

|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA LOTTO 1 BATTIPAGLIA – PRAIA LOTTO 1C BUONABITACOLO – PRAIA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</p> | | | | | | | | | | | | |
|---|---|----------|------------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|------------|---|----------|
| <p>Relazione Idraulica e di compatibilità idraulica modelli bidimensionali</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RC2A</td> <td>C1 R 09</td> <td>RI</td> <td>ID0002 002</td> <td>B</td> <td>15 di 43</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | RC2A | C1 R 09 | RI | ID0002 002 | B | 15 di 43 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| RC2A | C1 R 09 | RI | ID0002 002 | B | 15 di 43 | | | | | | | | |

Ogni cella computazionale e faccia di cella si basa sui dettagli del terreno sottostante. Questo tipo di modello è spesso indicato in letteratura come “modello sottogriglia ad alta risoluzione” (Casulli, 2008). Il termine "sottogriglia" significa che utilizza il terreno sottostante dettagliato (sottogriglia) per sviluppare le tabelle delle proprietà geometriche e idrauliche che rappresentano le celle e le facce delle celle. HEC-RAS dispone di un pre-processore dell'area di flusso 2D che elabora le celle e le facce delle celle in tabelle dettagliate delle proprietà idrauliche in base al terreno sottostante utilizzato nel processo di modellazione. Pertanto, una cella può essere parzialmente bagnata con il volume d'acqua corretto per la data elevazione della superficie dell'acqua in base ai dati della griglia; inoltre, ogni faccia di cella computazionale viene valutata in modo simile a una sezione trasversale.

4.2 Modello numerico del fiume Noce pk 26+671

4.2.1 Geometria di calcolo

Le caratteristiche geometriche del dominio di calcolo sono riportate all'interno del modello idraulico tramite una rappresentazione semplificata del territorio ad elementi generalmente poligonali, nota come mesh. La mesh di calcolo è di tipo non strutturato, con celle ortogonali tra loro, in grado di riprodurre l'andamento piano altimetrico del territorio è riprodotto con un livello di accuratezza adeguato.

La seguente immagine mostra l'estensione del dominio di calcolo delimitato da un poligono di colore verde. Nella stessa immagine sono visibili l'asse della linea ferroviaria (in nero), le condizioni a contorno (in azzurro) e le breaklines (in rosso) inserite per ottimizzare la definizione della mesh di calcolo. Il dominio si estende su una superficie di circa 2 km² (29621 celle di risoluzione media 8 m). All'interno del dominio di calcolo il Fiume Noce si estende per una lunghezza di 4km.

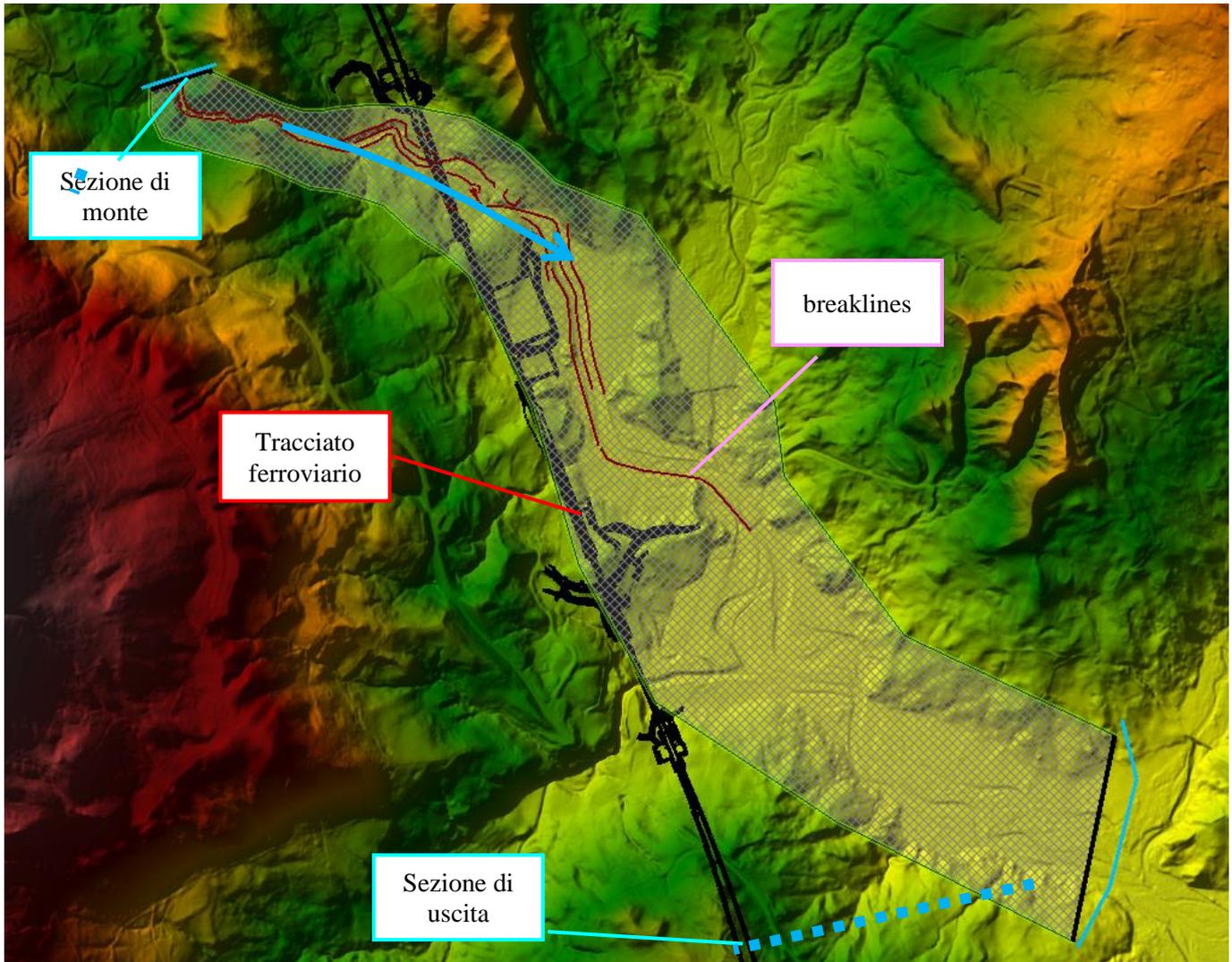


Figura 4 – Modello idraulico fiume Noce pk 26+671: estensione del dominio di calcolo.

L'andamento piano altimetrico del dominio di calcolo è basato sull'utilizzo del DTM con cella 1m fornito dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. Le risoluzioni del DTM sono adeguate a rappresentarne le caratteristiche piano altimetriche delle aree indagate.

La creazione della mesh è stata sviluppata inserendo delle breaklines che descrivono aree con differenze di quota significative di cui tener conto, quali sommità di rilevati, sponde fluviali ecc.

La geometria di calcolo dello stato di progetto prevede l'inserimento delle pile del viadotto, che sono state introdotte come elementi all'interno del DTM e della mesh di calcolo.

4.2.2 Condizioni al contorno

Le condizioni a contorno introdotte nel modello di calcolo sono:

- gli idrogrammi di piena (Figura 5), inseriti nella sezione di monte in ingresso alla mesh di calcolo;
- la condizione di moto uniforme a valle.

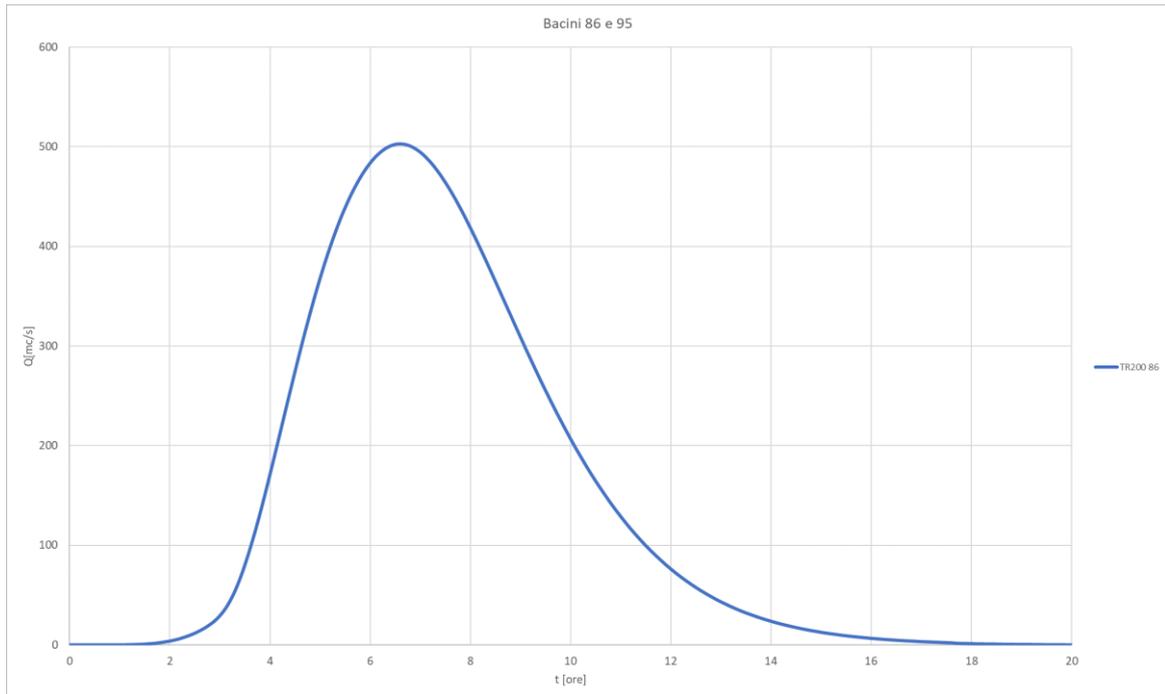


Figura 5 – Modello idraulico fiume Noce pk 26+671: idrogrammi di piena TR200.

4.2.3 Scabrezze

L'area in esame è caratterizzata da boschi e vegetazione arbustiva mediamente densa. Viste le caratteristiche delle aree perifluviali e dell'alveo caratterizzato da presenza di vegetazione, le condizioni dell'area di studio e dei corsi d'acqua, con presenza diffusa di vegetazione anche in alveo, è stata assunta una scabrezza uniforme di 0.05 su tutto il dominio di calcolo.

| | | | | | | |
|---|--|------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|
|  | LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA LOTTO 1 BATTIPAGLIA – PRAIA LOTTO 1C BUONABITACOLO – PRAIA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| | Relazione Idraulica e di compatibilità idraulica modelli bidimensionali | COMMESSA RC2A | LOTTO C1 R 09 | CODIFICA RI | DOCUMENTO ID0002 002 | REV. B |

4.3 Risultati delle simulazioni numeriche – fiume Noce pk 26+671

Le simulazioni numeriche hanno consentito di analizzare livelli e velocità, nonché la propagazione della piena per diversi tempi di ritorno, sia nello stato di fatto che di progetto, verificando l'influenza delle opere previste.

Per l'evento duecentennale, in corrispondenza dell'attraversamento ferroviario, l'altezza d'acqua raggiunge un massimo di circa 6.5 m, mentre le velocità in alveo raggiungono 3.8 m/s in alveo (Figura 7).

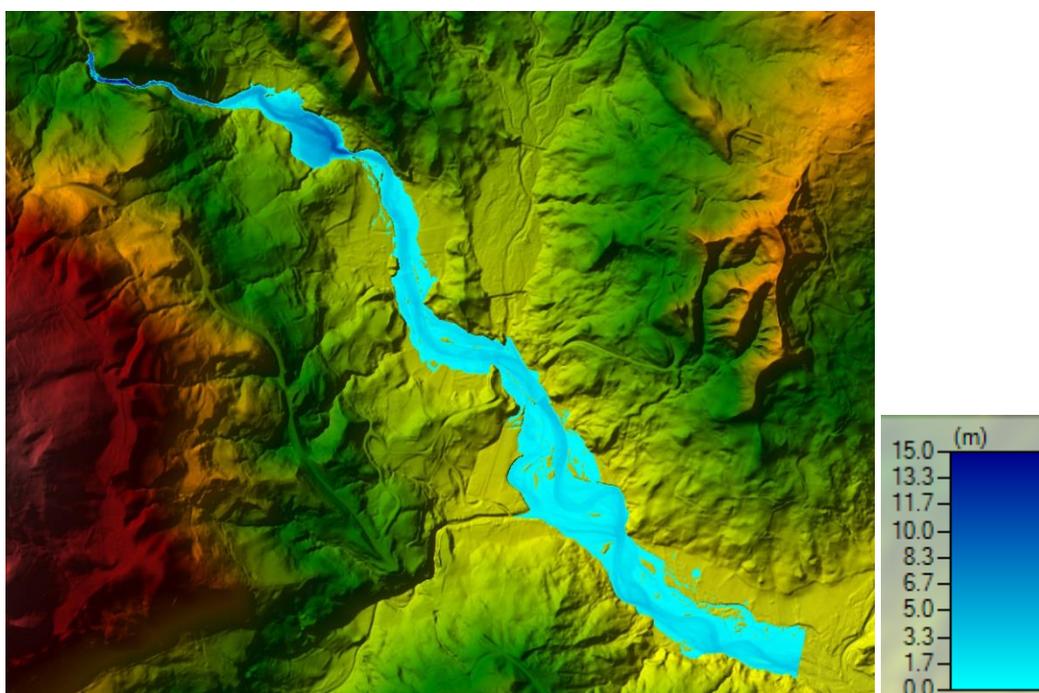


Figura 6 – Modello idraulico fiume Noce pk 26+671, TR200 anni stato di fatto: altezze d'acqua massime (m).

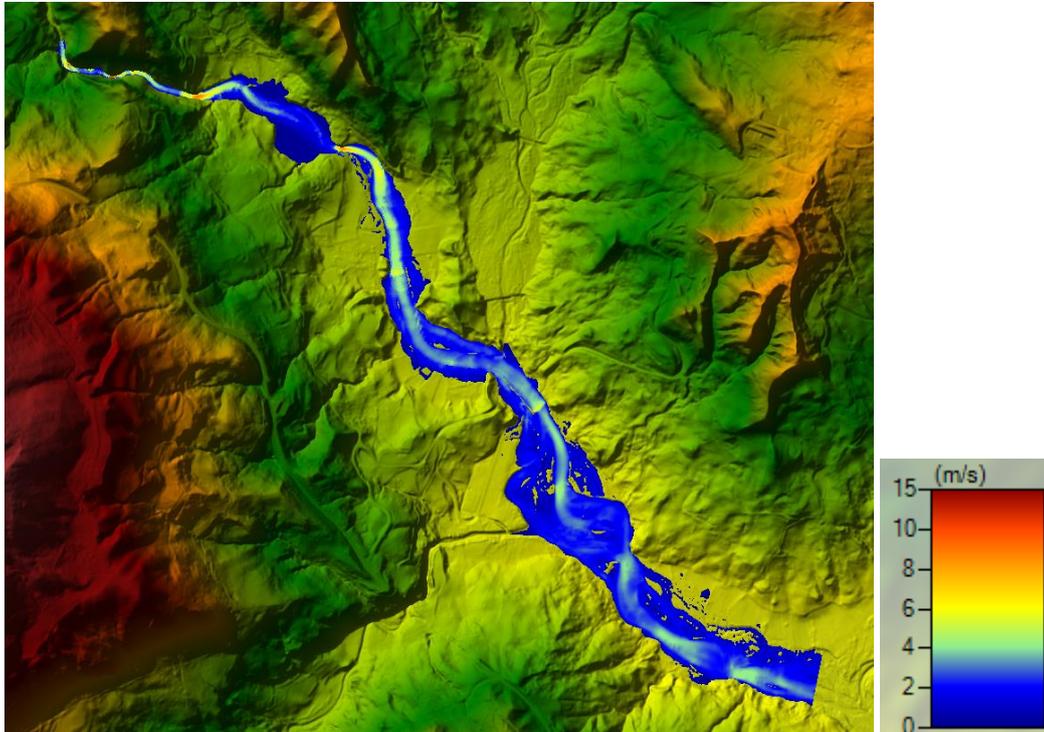


Figura 7 – Modello idraulico fiume Noce pk 26+671, TR200 anni stato di fatto: velocità massime (m/s).

I livelli ottenuti nello stato di progetto differiscono di una quantità del tutto trascurabile (4 cm) in prossimità dell'attraversamento; inoltre, non si registrano variazioni di velocità significative (Figura 10).

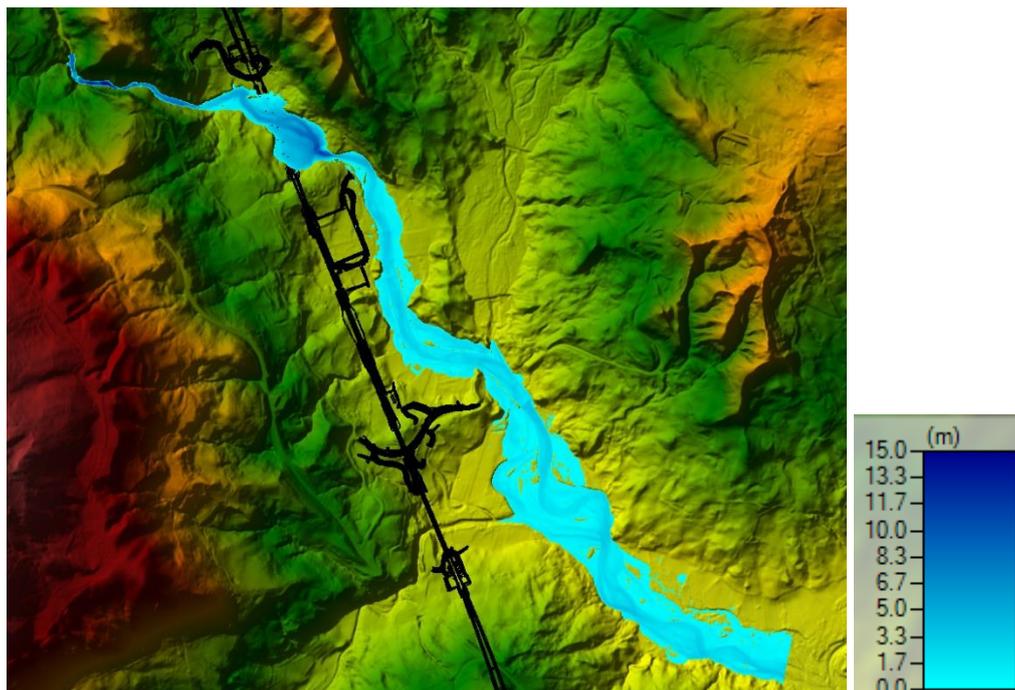


Figura 8 – Modello idraulico fiume Noce pk 26+671, TR200 anni stato di progetto: altezze d'acqua massime (m).

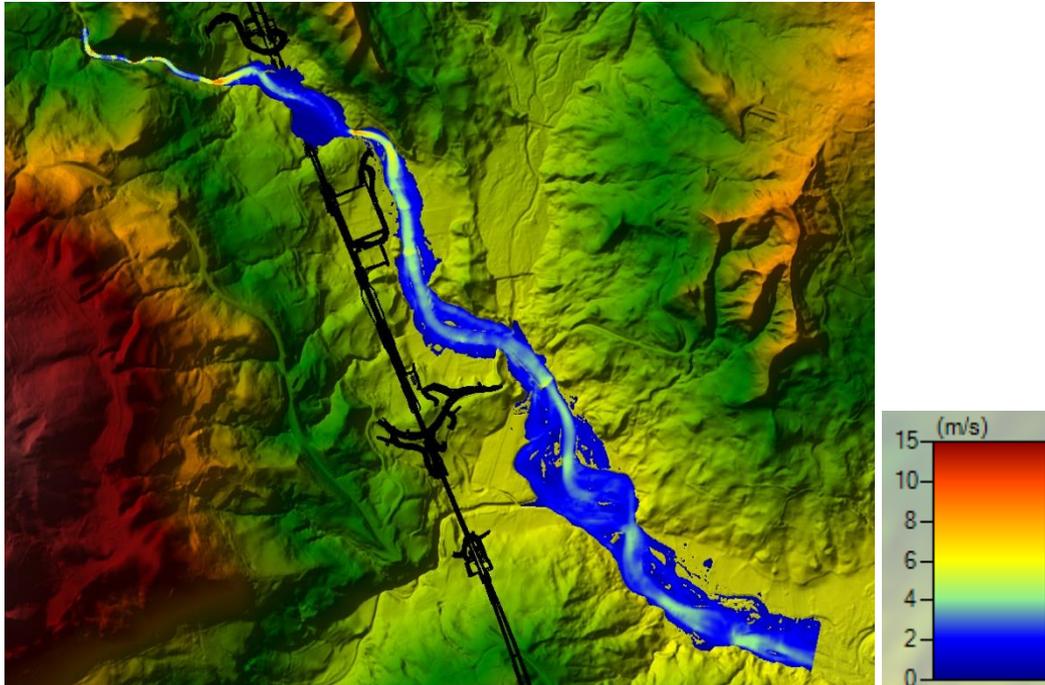


Figura 9 – Modello idraulico fiume Noce pk 26+671, TR200 anni stato di progetto: velocità massime (m/s).

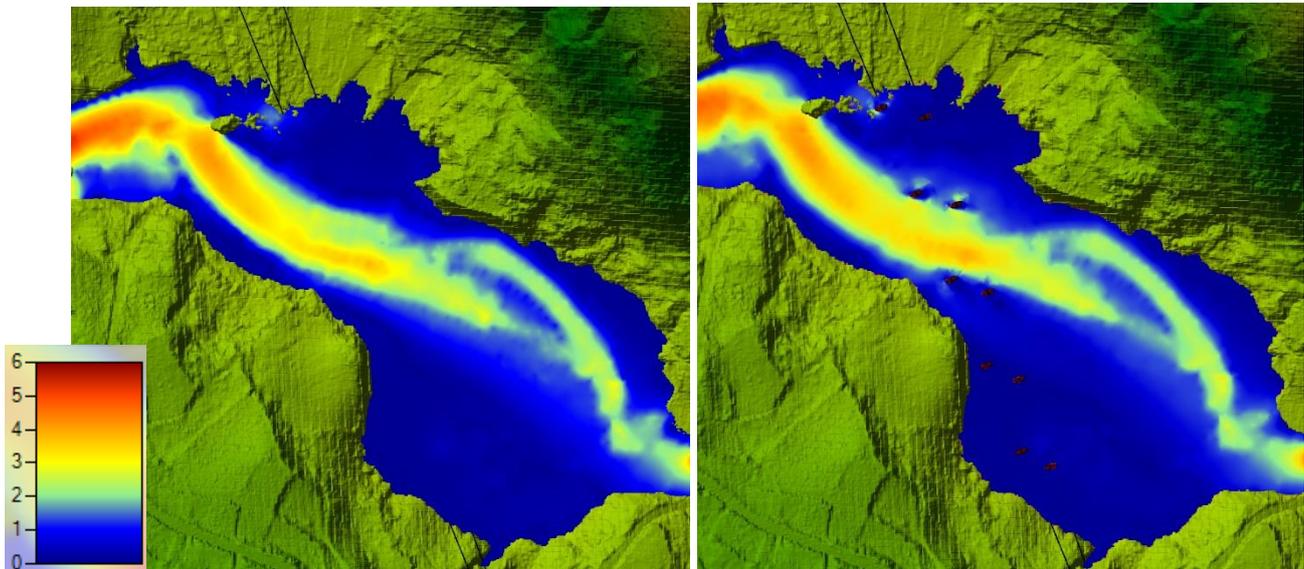


Figura 10 – Modello idraulico fiume Noce pk 26+671, TR200 anni: confronto campo di velocità nello stato di fatto (a sinistra) e nello stato di progetto (a destra).

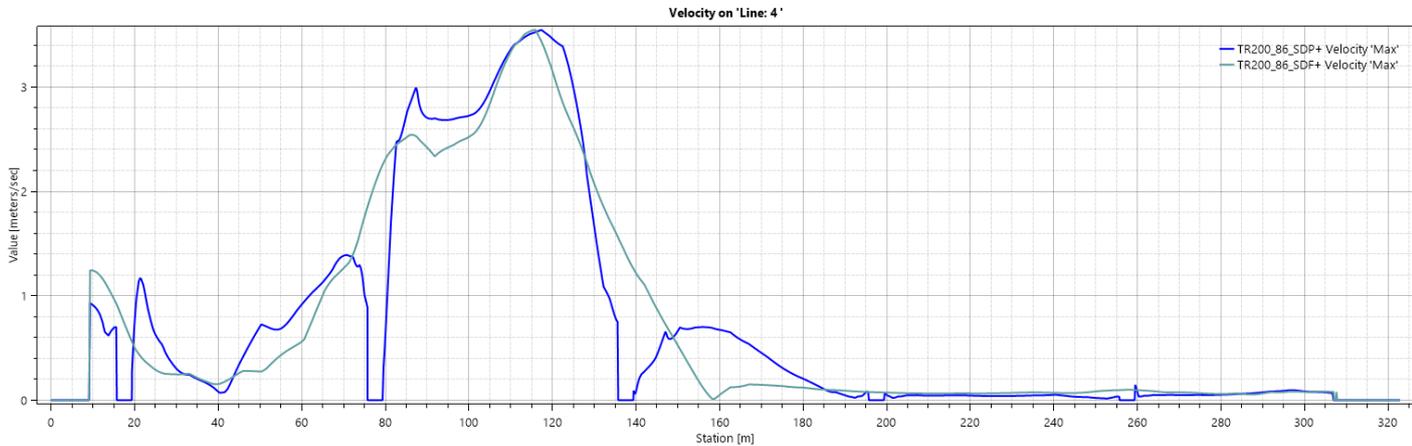


Figura 11 – Modello idraulico fiume Noce pk 26+671, TR200 anni: confronto velocità lungo la sezione del tracciato ferroviario nello stato di fatto e nello stato di progetto.

La seguente tabella riassume i livelli idrici ottenuti alla sezione fluviale in corrispondenza dell'attraversamento ferroviario sul Fiume Nove alla pk 26+671 nello stato di fatto e nello stato di progetto per i diversi tempi di ritorno.

| | Livelli idrici ante operam [m s.m.m.] | Livelli idrici post operam [m s.m.m.] |
|--------------|--|--|
| TR200 | 234.28 | 234.36 |

Tabella 1 – Livelli idrici ottenuti in corrispondenza della sezione fluviale immediatamente a monte dell'attraversamento ferroviario sul Fiume Noce pk 26+671 nello stato di fatto e nello stato di progetto per i diversi tempi di ritorno.

|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA LOTTO 1 BATTIPAGLIA – PRAIA LOTTO 1C BUONABITACOLO – PRAIA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</p> | | | | | | | | | | | | |
|---|---|----------|------------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|------------|---|----------|
| <p>Relazione Idraulica e di compatibilità idraulica modelli bidimensionali</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RC2A</td> <td>C1 R 09</td> <td>RI</td> <td>ID0002 002</td> <td>B</td> <td>22 di 43</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | RC2A | C1 R 09 | RI | ID0002 002 | B | 22 di 43 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| RC2A | C1 R 09 | RI | ID0002 002 | B | 22 di 43 | | | | | | | | |

4.4 Modello numerico fiume Noce pk 38+429

4.4.1 Geometria di calcolo

Le caratteristiche geometriche del dominio di calcolo sono riportate all'interno del modello idraulico tramite una rappresentazione semplificata del territorio ad elementi generalmente poligonali, nota come mesh. La mesh di calcolo è di tipo non strutturato, con celle ortogonali tra loro, in grado di riprodurre l'andamento piano altimetrico del territorio è riprodotto con un livello di accuratezza adeguato.

In Figura 12 è riportata l'estensione del dominio di calcolo delimitato da un poligono di colore verde. Nella stessa immagine sono visibili l'asse della linea ferroviaria (in nero), le condizioni a contorno (in azzurro) e le breaklines (in rosso) inserite per ottimizzare la definizione della mesh di calcolo. Il dominio si estende su una superficie di circa 2 km² (20753 celle di risoluzione media 10 m). All'interno del dominio di calcolo, il Fiume Noce si sviluppa per una lunghezza di circa 3.5 km.

L'andamento piano altimetrico del dominio di calcolo è basato sull'utilizzo del DTM con cella 0.5m fornito dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. Le risoluzioni del DTM sono adeguate a rappresentarne le caratteristiche piano altimetriche delle aree indagate.

La creazione della mesh è stata sviluppata inserendo delle breaklines che descrivono aree con differenze di quota significative di cui tener conto, quali sommità di rilevati, sponde fluviali ecc.

La geometria di calcolo dello stato di progetto prevede l'inserimento delle pile del viadotto, che sono state introdotte come elementi all'interno del DTM e della mesh di calcolo.

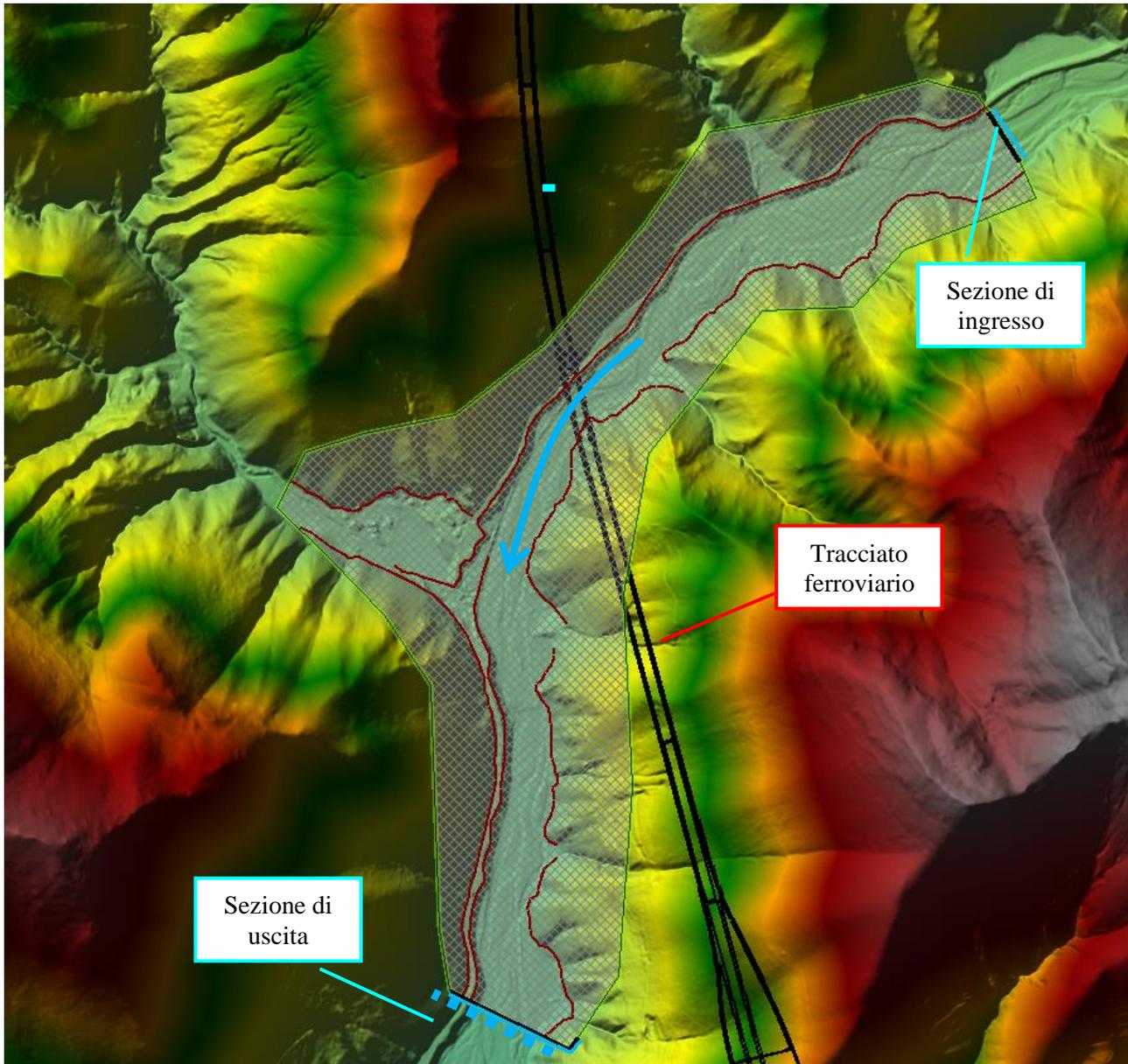


Figura 12 – Modello idraulico fiume Noce pk 38+429 estensione del dominio di calcolo.

4.4.2 Condizioni al contorno

Le condizioni a contorno introdotte nel modello di calcolo sono:

- gli idrogrammi di piena associati ad eventi con TR200anni, calcolati mediante modello idrologico, come condizione di monte;
- la condizione di moto uniforme a valle.

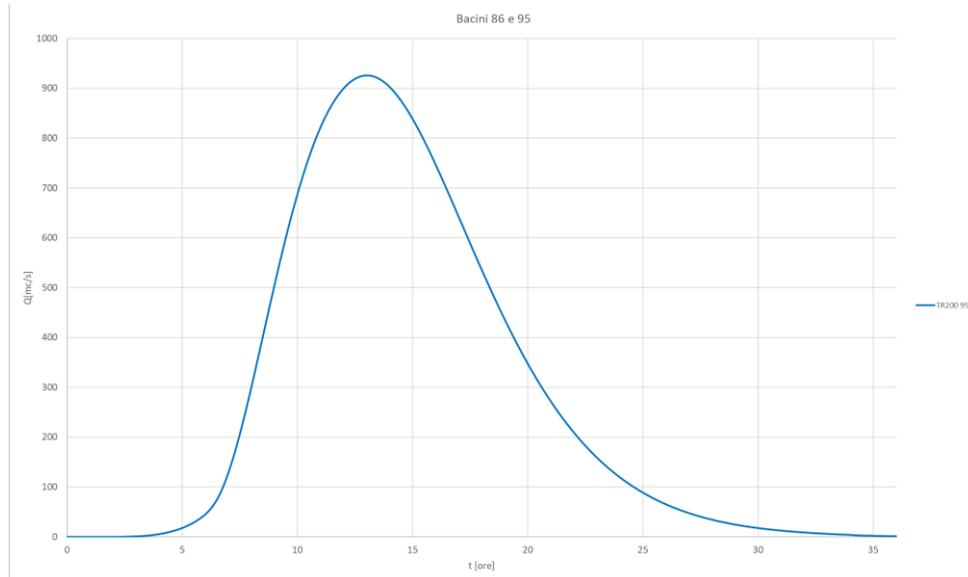


Figura 13 – Modello idraulico fiume Noce pk 38+429: idrogrammi di piena alla sezione dell’attraversamento.

4.4.3 Scabrezze

L’area in esame è caratterizzata dall’ampio alveo del fiume Noce e da vegetazione arborea ed arbustiva a diversa densità. La seguente Figura 14 riporta la mappa dell’indice di Manning digitalizzata sulla base dell’immagine satellitare dell’area di studio.

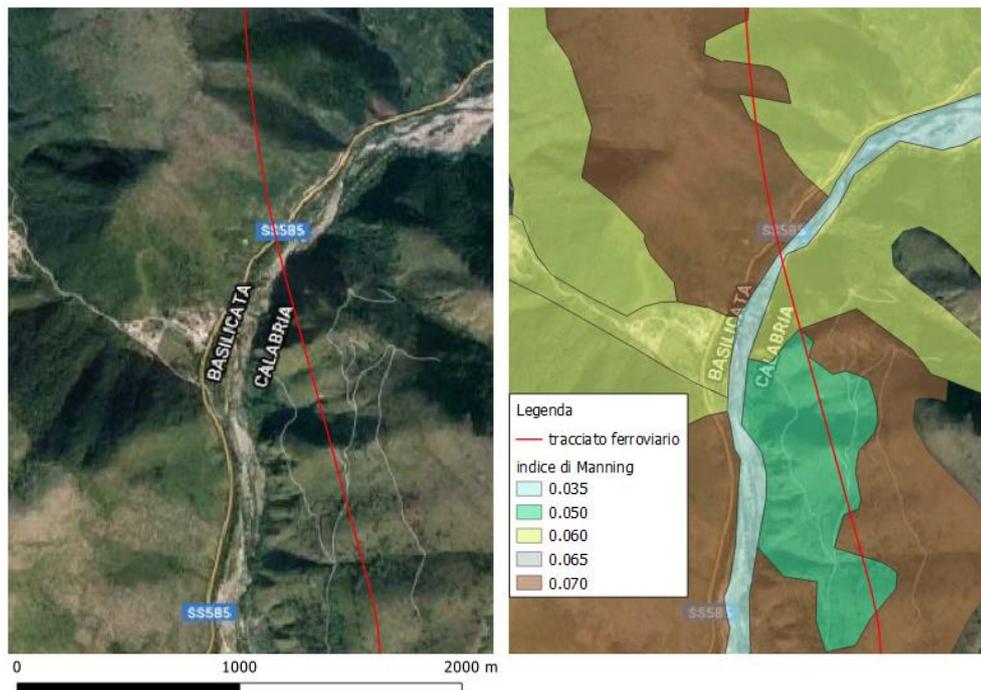


Figura 14 – Modello idraulico fiume Noce pk 88+200: mappa dell’indice di Manning.

4.4.4 Risultati delle simulazioni numeriche – Fiume Noce pk 38+429

Le simulazioni numeriche hanno consentito di analizzare livelli e velocità, nonché la propagazione della piena per diversi tempi di ritorno, sia nello stato di fatto che di progetto, verificando l'influenza delle opere previste.

L'estensione delle aree allagate per diversi tempi di ritorno è rappresentata nella seguente figura. Le aree allagabili risultano avere un'estensione molto paragonabile, vista la conformazione geomorfologica del fiume e della valle in questo tratto.

Per l'evento duecentennale, in corrispondenza dell'attraversamento ferroviario, l'altezza d'acqua raggiunge un tirante massimo di circa 4.3 m, mentre le velocità in alveo raggiungono 4.5 m/s in alveo (Figura 15).

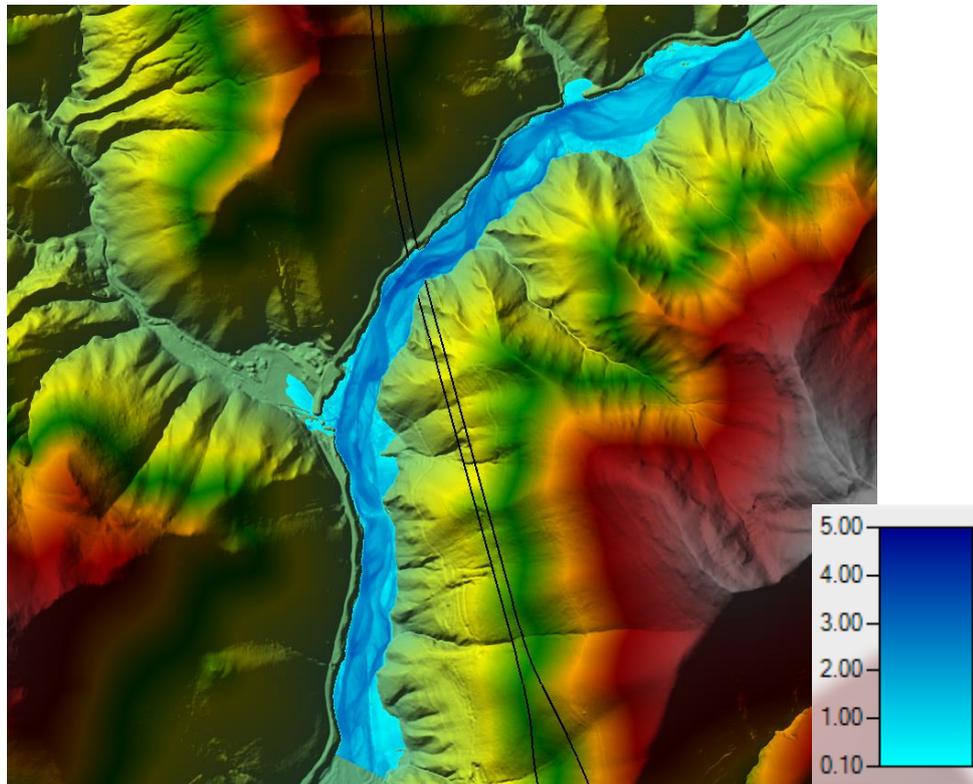


Figura 15 – Modello idraulico fiume Noce, TR200 anni stato di fatto: altezze d'acqua massime (m).

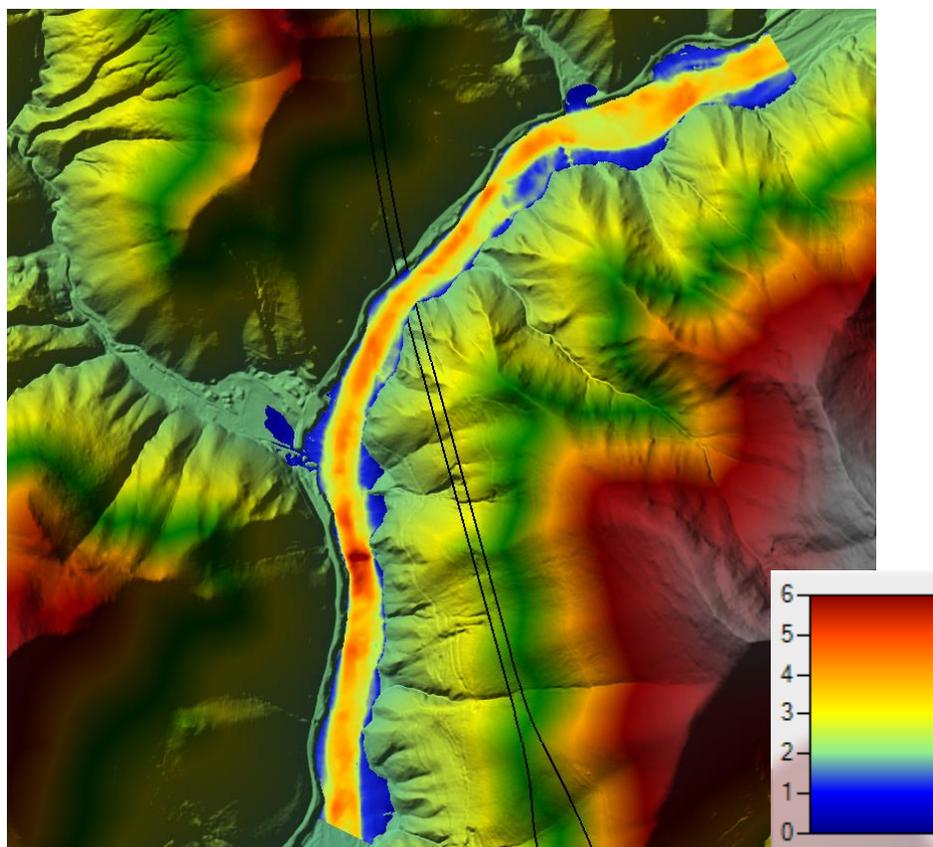


Figura 16 – Modello idraulico fiume Noce, TR200 anni stato di fatto: velocità massime (m/s)

I risultati ottenuti nello stato di progetto differiscono di circa 80cm in termini di livelli idrici in prossimità dell'attraversamento; le velocità aumentano in alveo a causa dell'ingombro delle pile, passando da un massimo di 4.2 m/s a 4.5 m/s (Figura 19, Figura 20).

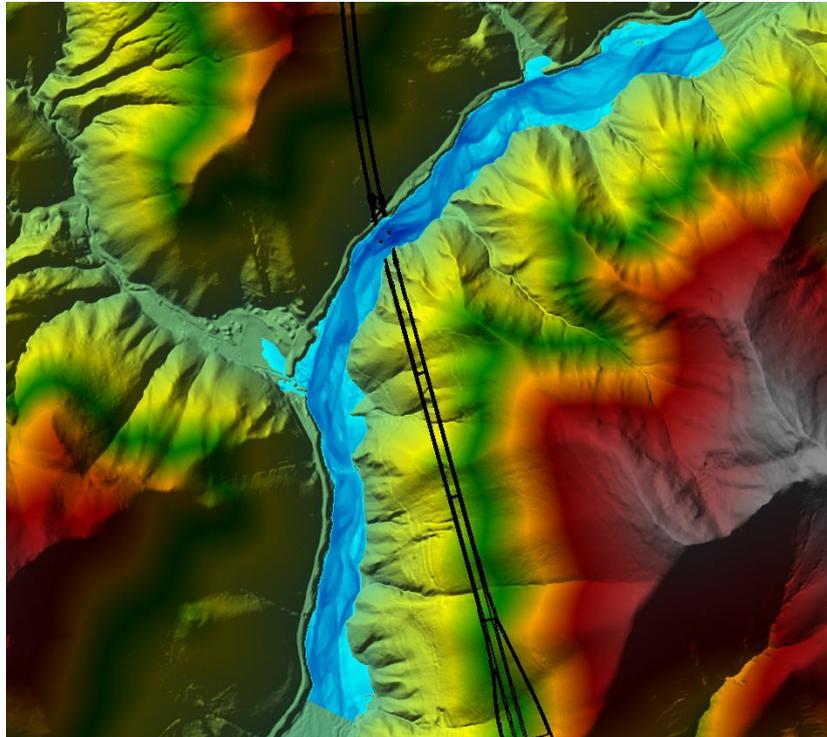


Figura 17 – Modello idraulico fiume Noce, TR200 anni stato di progetto: altezze d'acqua massime (m).

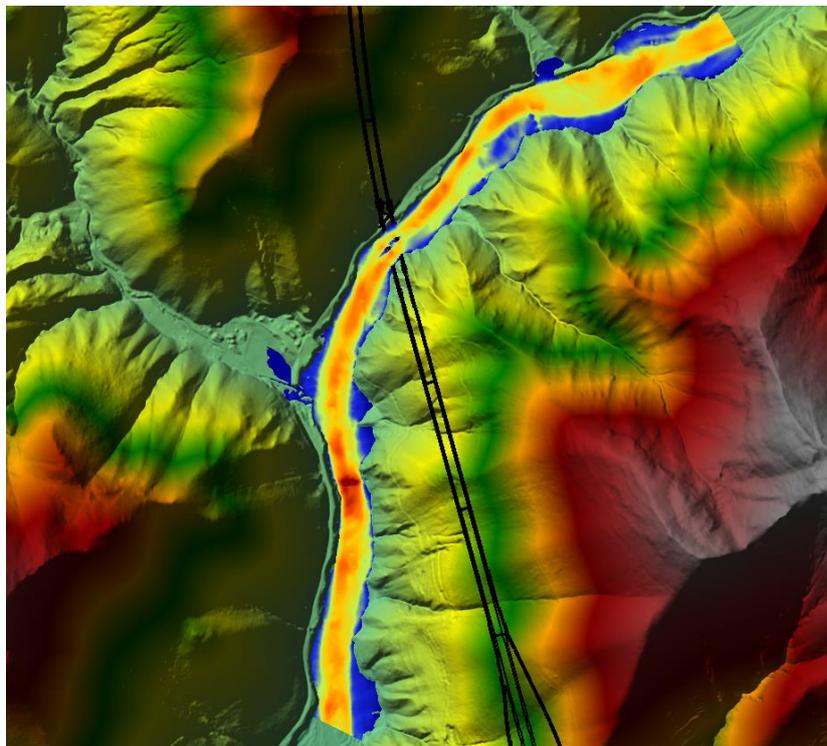


Figura 18 – Modello idraulico fiume Noce, TR200 anni stato di progetto: velocità massime (m/s).

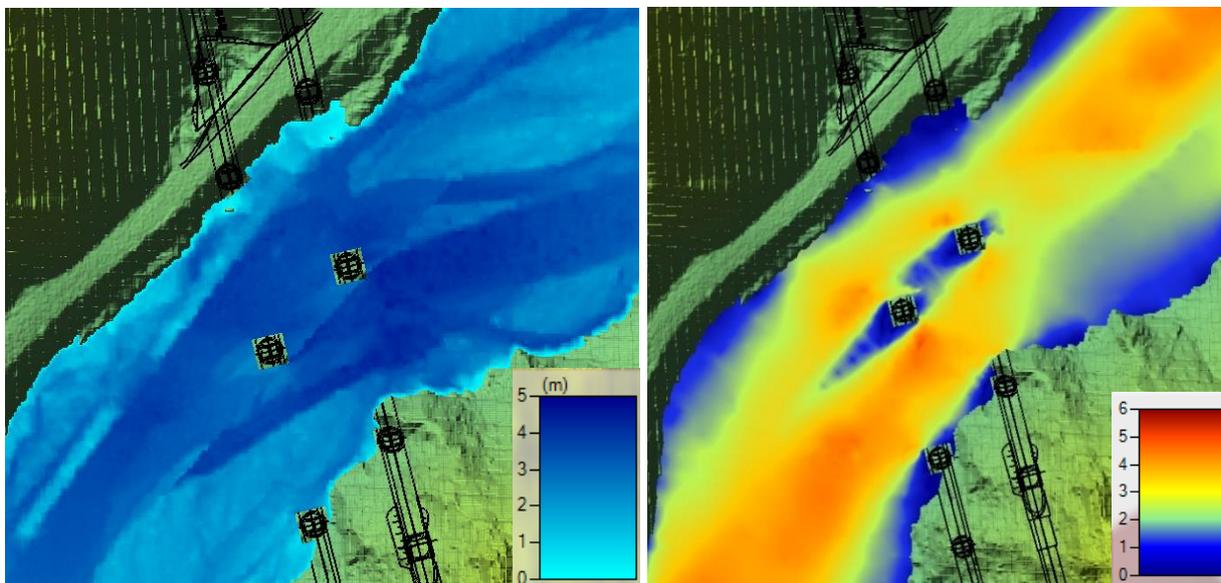


Figura 19 – Modello idraulico fiume Noce pk 38+429, TR200 anni: campo di velocità in prossimità delle pile.

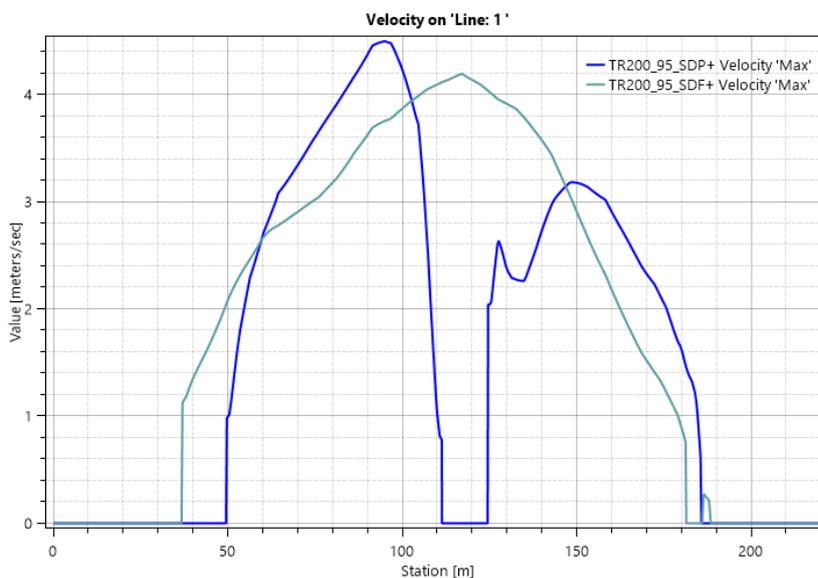


Figura 20 – Modello idraulico fiume Noce pk 38+429, TR200 anni: confronto velocità lungo la sezione del tracciato ferroviario BP nello stato di fatto e nello stato di progetto.

La seguente Tabella 2 riassume i livelli idrici ottenuti in corrispondenza dell'attraversamento ferroviario sul Fiume Noce nello stato di fatto e nello stato di progetto per i diversi tempi di ritorno, in golena sinistra dove i livelli sono maggiori.

| | Livelli idrici ante operam [m s.m.m.] | Livelli idrici post operam [m s.m.m.] |
|----------|--|--|
| BP TR200 | 42.36 | 42.84 |
| BD TR200 | 42.50 | 43.30 |

Tabella 2 – Livelli idrici ottenuti in corrispondenza della sezione fluviale immediatamente a monte dell'attraversamento ferroviario sul Fiume Noce pk 38+429 nello stato di fatto e nello stato di progetto.

| | | | | | | |
|--|--|------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA LOTTO 1 BATTIPAGLIA – PRAIA LOTTO 1C BUONABITACOLO – PRAIA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| | Relazione Idraulica e di compatibilità idraulica modelli bidimensionali | COMMESSA RC2A | LOTTO C1 R 09 | CODIFICA RI | DOCUMENTO ID0002 002 | REV. B |

4.5 Determinazione dello scavo localizzato per le pile

Per la valutazione dello scalzamento prodotto dalla corrente in prossimità delle pile dei ponti, necessario a definire la quota di imposta delle fondazioni, non esiste una teoria univoca che consenta di interpretare il fenomeno nella sua complessità. Di conseguenza, per poter ottenere delle stime il più verosimili possibili, nel presente studio sono state utilizzate più metodologie di calcolo, di seguito riportate.

4.5.1 HEC 18 - CSU

L'equazione HEC-18 riportata nella monografia "Evaluating Scour at bridge - Fifth Edition" edita dalla Federal Highway Administration è basata sull'equazione CSU ed è raccomandata sia in presenza che in assenza di trasporto solido. L'equazione, di seguito riportata, calcola la massima profondità di scavo per pile semplici in canali con fondo sabbioso.

$$y_s = 2.0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \left(\frac{a}{y_1} \right)^{0.65} \cdot y_1 \cdot Fr_1^{0.43}$$

Dove:

K_1 fattore correttivo legato alla forma della pila;

K_2 fattore correttivo dipendente dall'angolo di attacco della corrente;

K_3 fattore correttivo legato alle condizioni del fondo;

a larghezza della pila [m];

y_1 profondità della corrente subito a monte della pila [m];

Fr_1 numero di Froude in corrispondenza della pila.

Per pile allineate con la corrente esistono delle limitazioni nella profondità di erosione ricavate sperimentalmente:

$$y_s \leq 2.4 \cdot a \quad \text{se } Fr_1 \leq 0.80;$$

$$y_s \leq 3 \cdot a \quad \text{se } Fr_1 \geq 0.80;$$

Le tabelle seguenti riportano invece i fattori correttivi K_1 e K_3 :

| Forma della pila | K_1 |
|------------------|-------|
| Squadrata | 1.10 |
| Arrotondata | 1.00 |
| Circolare | 1.00 |
| Gruppo di pali | 1.00 |
| Triangolare | 0.90 |

Tabella 3: Coefficiente correttivo K_1 .

| Configurazione fondo alveo | Altezza dune (m) | K ₃ |
|----------------------------|------------------|----------------|
| Clear – water | - | 1.10 |
| Piatto | - | 1.10 |
| Piccole dune | 0.60 ≤ H < 3.00 | 1.10 |
| Dune medie | 3.00 ≤ H < 9.00 | 1.10 ÷ 1.20 |
| Dune grandi | H ≥ 9.00 | 1.30 |

Tabella 4: Coefficiente correttivo K₃.

Il coefficiente K₂ è stimato attraverso l'espressione seguente:

$$K_2 = \left(\cos \theta + \frac{L}{a} \sin \theta \right)^{0.65}$$

dove L è la lunghezza della pila in direzione della corrente e θ angolo di attacco della corrente.

Se $\frac{L}{a} > 12$ il rapporto assume il valore massimo pari a 12.

Nel caso di “pile tozze” con basse profondità della corrente tale relazione può essere utilizzata introducendo un fattore correttivo inferiore all'unità.

Infatti l'applicazione delle formule usuali a casi con tiranti comparabili con la larghezza della pila fornirebbero risultati eccessivi, rispetto a quanto riscontrato nella realtà.

L'applicazione di tali fattori è vincolata al soddisfacimento delle seguenti condizioni:

- Il rapporto tra la profondità della corrente e la larghezza della pila deve essere inferiore a 0.8 ($y/a < 0.8$);
- Il rapporto tra la larghezza della pila e il diametro mediano dei sedimenti è maggiore di 50 ($a/d_{50} > 50$);
- Il numero di Froude è inferiore a 1.

Il fattore correttivo da applicare all'equazione precedente può essere calcolato nel modo seguente:

$$K_w = 2.58 \cdot \left(\frac{y}{a} \right)^{0.34} \cdot F_{r1}^{0.65} \text{ per } V/V_c < 1$$

$$K_w = 1.0 \cdot \left(\frac{y}{a} \right)^{0.13} \cdot F_{r1}^{0.25} \text{ per } V/V_c > 1$$

Dove V_c è la velocità critica di incipiente di movimento dei sedimenti.

4.5.2 FDOT (Florida Department Of Transportation)

L'equazione FDOT è anch'essa citata nella monografia "Evaluating Scour at bridge - Fifth Edition". Come suggerito dalla monografia HEC18, la formulazione FDOT può essere considerata un'alternativa al metodo CSU, in particolar modo per le "pile tozze" con bassi tiranti e materiale fine al fondo. Tale approccio è del tutto confrontabile, anzi, sovrapponibile con l'equazione di Sheppard-Melville.

La profondità di scalzamento attesa può essere valutata come:

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

con

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

$$V_{1p1} = 5V_c; \quad V_{1p2} = 0.6\sqrt{gy_1}$$

Dove: y_s è la profondità di scavo, a^* è il diametro effettivo della pila, g è l'accelerazione di gravità, V_1 è la velocità della corrente in approccio alla pila, y_1 è il tirante, V_c è la velocità critica di incipiente di movimento dei sedimenti.

Inoltre

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

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

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

$$a^* = K_s a_p$$

Dove K_s è il fattore di forma e a_p è la larghezza proiettata della pila, calcolata come:

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

a e L rispettivamente larghezza e profondità della pila, θ angolo di attacco della corrente, d_{50} è il diametro mediano dei sedimenti.

Per il calcolo di K_s si è fatto riferimento alle seguenti specifiche:

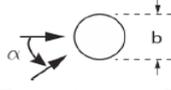
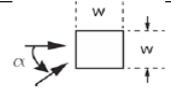
| Structure Shape (Plan View) | Shape Coefficient, K_s |
|--|--|
| General Constraints $10.0 \geq \left(\frac{w}{L}\right) \geq 0.1$; $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$ | If $\left(\frac{w}{L}\right) < 0.1$ set $\left(\frac{w}{L}\right) = 0.1$; If $\left(\frac{w}{L}\right) > 10.0$ set $\left(\frac{w}{L}\right) = 10.0$ |
|  | $K_s = 1.0$ |
|  | $K_s = 0.9 + 1.21 \left(\alpha - \frac{\pi}{4}\right)^4$ |
|  | $0 \leq \alpha \leq (\pi / 4)$ $K_s = 0.9 + (2.63K_1 - 2.37) \left[\left(\alpha - \frac{\pi}{4}\right)^4 - 0.38 \right]$ $K_1 = 1.23 + 0.13 \left(\frac{w}{L}\right)^{0.3}$ $(\pi / 4) < \alpha \leq (\pi / 2)$ $K_s = 0.9 + (2.63K_2 - 2.37) \left(\alpha - \frac{\pi}{4}\right)^4$ $K_1 = 1.23 + 0.13 \left[\frac{1}{\left(\frac{w}{L}\right)} \right]^{0.3}$ |

Tabella 5: Coefficiente correttivo K_s .

4.5.3 Ulteriori considerazioni sul calcolo della profondità di scavo

Calcolo della velocità critica

La velocità critica di incipiente di movimento dei sedimenti può essere calcolata con differenti equazioni che ben approssimano quanto riscontrato nelle prove sperimentali in canaletta. Si è scelto di adottare una formula di carattere generale, proposta da Soulsby nel 1997.

$$V_c = 5.75 \left[\text{LOG} \left(\frac{12h}{6D_{50}} \right) \right] [\theta_c (s - 1) g D_{50}]^{0.5}$$

$$\theta_c = \frac{0.3}{1 + 1.2 D_*} + 0.055 [1 - \exp(-0.02 D_*)]$$

$$D_* = D_{50} [(s - 1) g / \nu^2]^{1/3}$$

dove h è il tirante idrico, D_{50} è il diametro medio dei sedimenti, θ_c è il coefficiente di Shields calcolato alla condizione di inizio di movimento, s è il rapporto la densità dei sedimenti è quella dell'acqua, g è l'accelerazione di gravità, ν è la viscosità cinematica dell'acqua.

Calcolo dello scalzamento nel caso di plinto di fondazione scoperto – Pila equivalente

Le equazioni sopra proposte, CSU e FDOT, legano la profondità di scavo con la larghezza della pila. Nel presente elaborato si è fatto riferimento alla larghezza della pila equivalente, nel caso in cui lo scavo non scoprisse il plinto di fondazione, la larghezza equivalente deriva da quella della pila di progetto. Con profondità di scavo tali da scoprire il plinto, la larghezza equivalente considera anche le dimensioni del plinto. La larghezza equivalente viene calcolata secondo l'approccio proposto da Melville e Raudkivi (1996), schematizzato in Figura 21.

Nel caso di due pile accostate, il valore di Y (ricoprimento del plinto), è assunto pari al minimo dei due ricoprimenti.

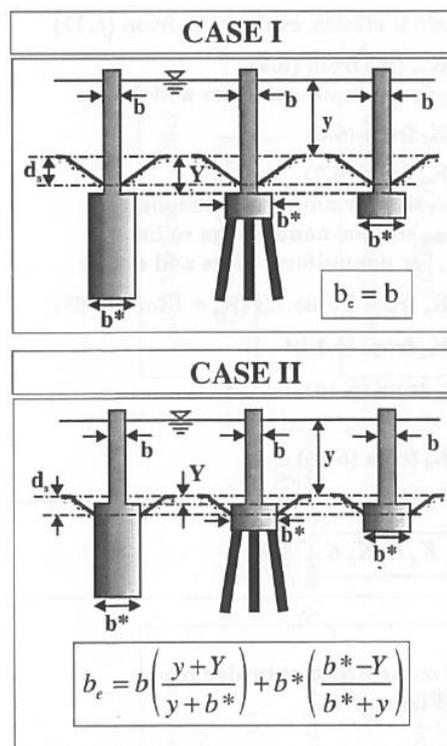


Figura 21: Calcolo della larghezza equivalente, Melville e Raudkivi (1996).

Calcolo dello scalzamento per pile e plinti affiancati

Nel caso di più pile inclinate rispetto alla direzione della corrente (Figura 22), la profondità di scavo dipende dalla distanza tra le pile. Come riportato nel manuale HEC-18 (Evaluating Scour at Bridges-5th edition) nel caso di pile cilindriche la cui spaziatura è inferiore a 5 volte il diametro del singolo elemento, il calcolo della profondità di scavo va eseguito considerando le dimensioni di una "pile equivalente" ottenuta accostando idealmente le pile (Figura 22).

Il metodo CSU può essere applicato con due modalità equivalenti:

1. Definita la pila equivalente calcolo il coefficiente K_2 considerando l'angolo di incidenza tra l'asse longitudinale della pila composta e la direzione del flusso principale (Figura 22);
2. Proietto su piano ortogonale alla corrente i contorni della pila composta, quantificando la larghezza della pila. Diversamente dall'approccio precedente il coefficiente K_2 è posto pari a 1.

Poiché anche la pila composta presenta le estremità circolari, allora $K_1=1$.

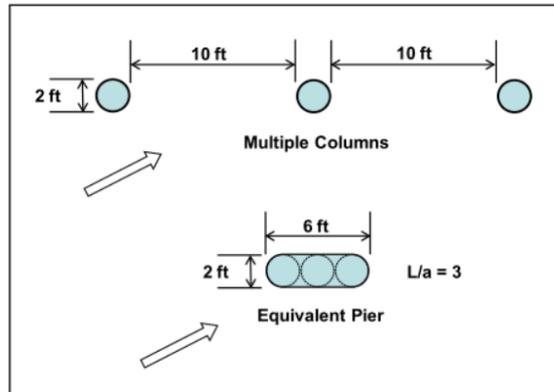


Figura 22: Più pile affiancati ed inclinate rispetto alla corrente (da HEC18 – Evaluating Scour at Bridges-5th edition).

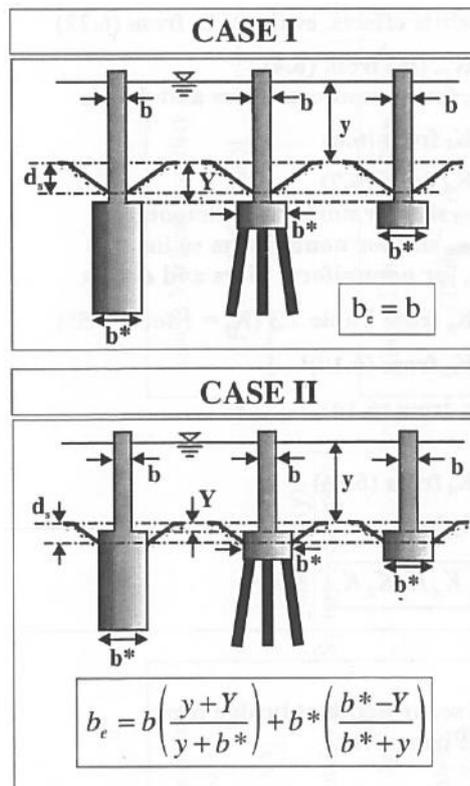


Figura 23 – Calcolo della larghezza equivalente, Melville e Raudkivi (1996).

HEC 18 – COMPLEX PIERS

Il metodo delle “complex piers” proposto dalla FHWA e riportato in HEC18 si dedica alla trattazione dello scavo localizzato in condizioni di fondazione complesse. Nello specifico, l’equazione proposta esprime lo scavo totale in funzione dei tre contributi che descrivono la complessità della pila: pier stem, pile cap e pile group.

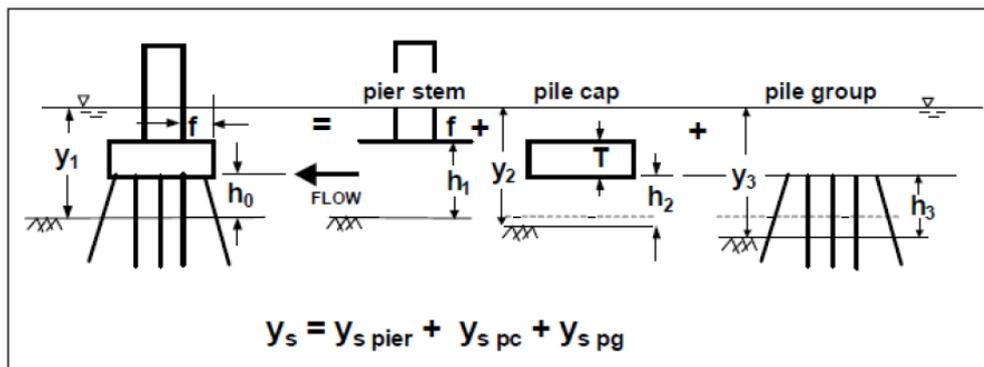


Figura 24 – Definition sketch for scour components for a complex pier, FHWA HEC 18, Figure 7.5.

$$\frac{y_{s \text{ pier}}}{y_1} = K_h \text{ pier} \left[2.0 K_1 K_2 K_3 \left(\frac{a_{\text{pier}}}{y_1} \right)^{0.65} \left(\frac{V_1}{\sqrt{g y_1}} \right)^{0.43} \right] \quad (\text{HEC 18, Equation 7.23 - pier stem scour component})$$

$$\frac{y_{s \text{ pc}}}{y_2} = 2.0 K_1 K_2 K_3 K_w \left(\frac{a_{\text{pg}}^*}{y_2} \right)^{0.65} \left(\frac{V_2}{\sqrt{g y_2}} \right)^{0.43} \quad (\text{HEC 18, Equation 7.24) - case 1, pile cap in flow field})$$

$$\frac{y_{s \text{ pc}}}{y_f} = 2.0 K_1 K_2 K_3 K_w \left(\frac{a_{\text{pc}}}{y_f} \right)^{0.65} \left(\frac{V_f}{\sqrt{g y_f}} \right)^{0.43} \quad (\text{HEC 18, Equation 7.26 - case 2, pile cap on or below bed})$$

$$\frac{y_{s \text{ pg}}}{y_2} = K_h \text{ pg} \left[2.0 K_1 K_3 \left(\frac{a_{\text{pg}}^*}{y_2} \right)^{0.65} \left(\frac{V_2}{\sqrt{g y_2}} \right)^{0.43} \right] \quad (\text{HEC 18, Equation 7.31 - scour for a pile group})$$

Figura 25 –Equazioni secondo la FHWA HEC 18.

Le principali variabili utilizzate nelle formule sono riportate nella seguente figura:

- f = Distance between front edge of pile cap or footing and pier, ft (m)
 h_o = Height of the pile cap above bed at beginning of computation, ft (m)
 h_1 = $h_o + T$ = height of the pier stem above the bed before scour, ft (m)
 h_2 = $h_o + y_{s \text{ pier}}/2$ = height of pile cap after pier stem scour component has been computed, ft (m)
 h_3 = $h_o + y_{s \text{ pier}}/2 + y_{s \text{ pc}}/2$ = height of pile group after the pier stem and pile cap scour components have been computed, ft (m)
 S = Spacing between columns of piles, pile center to pile center, ft (m)
 T = Thickness of pile cap or footing, ft (m)
 y_1 = Approach flow depth at the beginning of computations, ft (m)
 y_2 = $y_1 + y_{s \text{ pier}}/2$ = adjusted flow depth for pile cap computations ft (m)
 y_3 = $y_1 + y_{s \text{ pier}}/2 + y_{s \text{ pc}}/2$ = adjusted flow depth for pile group computations, ft (m)
 V_1 = Approach velocity used at the beginning of computations, ft/sec (m/sec)
 V_2 = $V_1(y_1/y_2)$ = adjusted velocity for pile cap computations, ft/sec (m/sec)
 V_3 = $V_1(y_1/y_3)$ = adjusted velocity for pile group computations, ft/sec (m/sec)

Figura 26 –Principali variabili secondo la FHWA HEC 18.

Limiti nell'uso del metodo FDOT

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 proposte da Melville, Froehlich, Breusers e CSU), la formulazione FDOT fornisce valori più attendibili (e prossimi a quelli misurati) rispetto alle altre, per i seguenti campi di valori:

$$\frac{V_1}{V_c} = 0.4 \div 7.6$$

$$\frac{y_1}{a} = 0.05 \div 10$$

$$\frac{a}{d_{50}} = 3.65 \div 65047$$

$$FR = 0.03 \div 1.95$$

Per ogni pila è stato valutato se le grandezze coinvolte rientrassero all'interno dei range di valori raccomandati. Spesso la condizione a/d_{50} è fortemente limitante; generalmente, il rapporto tra la larghezza della pila e il diametro mediano dei sedimenti supera il valore di 65047, quindi "a rigore" il metodo FDOT - Sheppard Melville andrebbe escluso. Nonostante questo, i risultati mostrano come le due formulazioni diano risultati del tutto allineati.

Si è deciso di fare riferimento principalmente alla formulazione CSU, utilizzando FDOT come stima utile ad un confronto quantitativo.

Considerazioni finali

Le caratteristiche della corrente incidente su ogni singola pila sono state ottenute attraverso la modellazione bidimensionale dei corsi d'acqua, facendo riferimento alle massime piene di progetto.

Per ogni pila lambita dalla corrente è stata calcolata la profondità di scavo, confrontando volta per volta quale delle due equazioni (HEC18 e FDOT) forniva il valore massimo.

Il calcolo della profondità di scavo non tiene conto della presenza di materiale flottante accumulato attorno alle pile dei viadotti.

Le caratteristiche della corrente incidente su ogni singola pila sono state ottenute attraverso la modellazione idraulica del corso d'acqua, facendo riferimento alla piena duecentennale.

Le caratteristiche granulometriche dei sedimenti sono state ricavate a partire dalle informazioni geologiche fornite. In particolare, è stato usato un d_{50} pari a 10mm.

| Viadotto | Pila | Tirante idraulico [m] | Velocità [m/s] | Incidenza pila-corrente [°] | Base pila [m] | Lunghezza pila [m] | Base plinto [m] | Lunghezza plinto [m] | Scavo max CSU [m] | Scavo max FDOT [m] | Scavo Max | Tipo di scavo | Viadotto |
|----------|------|-----------------------|----------------|-----------------------------|---------------|--------------------|-----------------|----------------------|-------------------|--------------------|-----------|---------------|-----------------|
| VI02BP | P01 | 0.60 | 1.30 | 45 | 3.6 | 8.60 | 13.0 | 13.0 | 5.7 | - | 5.59 | 5.67 | plinto scoperto |
| | P02 | 5.00 | 1.60 | 40 | 3.6 | 8.60 | 13.0 | 13.0 | 10.7 | 12.0 | 12.90 | 12.90 | plinto scoperto |
| | P03 | 3.50 | 1.00 | 40 | 3.6 | 8.60 | 13.0 | 13.0 | 6.1 | 8.0 | 8.00 | 8.04 | plinto scoperto |
| | P04 | 2.10 | 0.05 | 90 | 3.6 | 8.60 | 13.0 | 13.0 | 0.2 | - | 0.90 | 0.90 | plinto scoperto |
| | P05 | 4.00 | 0.10 | 0 | 3.6 | 8.60 | 13.0 | 13.0 | 0.4 | - | 0.76 | 0.76 | plinto scoperto |
| VI02BD | P01d | 1.20 | 0.10 | 45 | 3.6 | 8.60 | 13.0 | 13.0 | 0.4 | - | 1.22 | 1.22 | plinto scoperto |
| | P02d | 5.00 | 1.60 | 40 | 3.6 | 8.60 | 13.0 | 13.0 | 10.7 | 11.8 | 12.80 | 12.80 | plinto scoperto |
| | P03d | 4.00 | 1.00 | 40 | 3.6 | 8.60 | 13.0 | 13.0 | 6.2 | 8.1 | 8.10 | 8.10 | plinto scoperto |
| | P04d | 4.00 | 0.05 | 90 | 3.6 | 8.60 | 13.0 | 13.0 | 0.2 | - | 0.97 | 0.97 | plinto scoperto |
| | P05d | 4.30 | 0.30 | 0 | 3.6 | 8.60 | 13.0 | 13.0 | 1.3 | - | 1.73 | 1.73 | plinto scoperto |

Tabella 6 – Viadotti Lotto 1.C, massima profondità di escavazione-Noce 86.

| Viadotto | Pila | Tirante idraulico [m] | Velocità [m/s] | Incidenza pila-corrente [°] | Base pila [m] | Lunghezza pila [m] | Base plinto [m] | Lunghezza plinto [m] | Scavo max CSU [m] | Scavo max FDOT [m] | Scavo Max | Tipo di scavo |
|----------|------|-----------------------|----------------|-----------------------------|---------------|--------------------|-----------------|----------------------|-------------------|--------------------|-----------|-----------------|
| VI02 BP | P02 | 2.00 | 1.00 | 35 | 13.0 | 13.00 | 13.0 | 13.0 | 5.5 | 7.8 | 7.8 | plinto scoperto |
| | P03 | 3.60 | 2.50 | 35 | 13.0 | 13.00 | 13.0 | 13.0 | 11.7 | 12.4 | 12.4 | plinto scoperto |
| | P04 | 2.50 | 2.00 | 35 | 13.0 | 13.00 | 13.0 | 13.0 | 9.5 | 10.6 | 10.6 | plinto scoperto |
| VI02BD | P01d | 1.00 | 0.50 | 35 | 13.0 | 13.00 | 13.0 | 13.0 | 2.4 | - | 2.4 | plinto scoperto |
| | P02d | 3.60 | 2.50 | 35 | 13.0 | 13.00 | 13.0 | 13.0 | 11.7 | 12.4 | 12.4 | plinto scoperto |
| | P03d | 2.00 | 1.00 | 35 | 13.0 | 13.00 | 13.0 | 13.0 | 5.5 | 7.8 | 7.8 | plinto scoperto |

Tabella 7 – Viadotti Lotto 1.C, massima profondità di escavazione-Noce 95.

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA LOTTO 1 BATTIPAGLIA – PRAIA LOTTO 1C BUONABITACOLO – PRAIA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| | Relazione Idraulica e di compatibilità idraulica modelli bidimensionali | COMMESSA RC2A | LOTTO C1 R 09 | CODIFICA RI | DOCUMENTO ID0002 002 | REV. B |

4.6 Protezioni delle pile dallo scalzamento

Il calcolo delle escavazioni localizzate attorno alle pile ha evidenziato la vulnerabilità delle opere di attraversamento ai fenomeni di scalzamento. Si provvede perciò al dimensionamento degli elementi di protezione delle pile, per le verifiche si terrà conto delle caratteristiche della corrente incidente, calcolate per le piene di progetto.

La tipologia di protezioni adottate è quella in massi.

4.6.1 Verifiche di stabilità massi a protezione delle pile

Il dimensionamento delle protezioni attorno alle pile è stato effettuato valutando la condizione di incipiente di moto dei massi posti a protezione delle pile. Nello specifico è stata confrontata la velocità critica degli elementi di protezione con la velocità della corrente in approccio alla singola pila.

La valutazione della velocità critica di incipiente movimento è stata effettuata seguendo due modi.

Il primo è proposto all'interno della monografia "*Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures: Experience, Selection, and Design Guidance-Third Edition*", VOL.2, Hydraulic Engineering Circular No.23 (HEC23), pubblicato dal US Department of Transportation, Federal Highway Administration.

Il secondo è basato sul criterio di stabilità di Shields.

Secondo le linee guida HEC23 il diametro mediano dei massi di protezione D_{50} viene definito secondo l'equazione:

$$D_{50} = \frac{0.692V_{des}^2}{(s-1)2g}$$

Dove V_{des} è la velocità della corrente in approccio alla pila, s è il rapporto tra la densità dei sedimenti e quella dell'acqua, g è l'accelerazione di gravità. Alla critica $V_c = V_{des}$, assunto $s = 2.65$, la precedente relazione può essere così riscritta:

$$V_{c,1} = 6.84\sqrt{D_{50}}$$

Una deduzione può farsi anche a partire dalla relazione di Shields ottenendo:

$$V_{c,2} = K_S y^{1/6} \sqrt{\theta(s-1)} \sqrt{D_{50}}$$

Dove K_S è il coefficiente di scabrezza di Gauckler-Strickler del fondo alveo, y è il tirante della corrente in approccio alla pila, θ è il coefficiente adimensionale di Shields, posto pari a 0.06.

Nel presente studio il valore della velocità critica è stato assunto pari al minore tra i due calcolati con le due metodologie precedentemente descritte.

Stimata la velocità critica dei massi di protezione, funzione del diametro D_{50} e delle caratteristiche del flusso, si ritiene la protezione verificata se $FV = V/V_c \geq 2$ (FV fattore di sicurezza, V velocità della corrente in arrivo alla pila).

Il fattore di sicurezza tiene conto delle varie incertezze sia sulla stima della V_c che sulla definizione dell'effettiva corrente in arrivo.

Secondo tali linee guida HEC23, il terreno attorno ad ogni pila soggetta ad escavazione deve essere “armato” con massi che occupano un rettangolo di lato almeno pari a 5-6 volte il diametro della pila. Lo spessore minimo raccomandato per le protezioni è pari a tre volte D_{50} . È bene prevedere uno strato filtrante al di sotto dei massi di protezione. Per completezza si riporta in Figura seguente uno schema estratto dalla monografia HEC23.

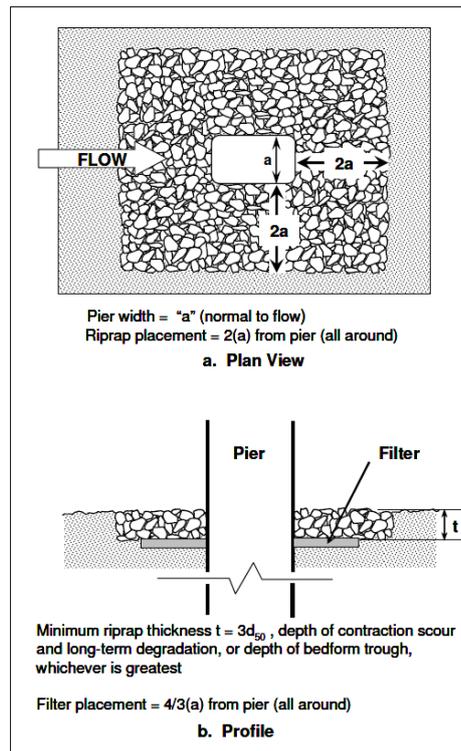


Figura 27 – Disposizione raccomandata dei massi di protezione attorno alle pile, fonte HEC23.

In genere, sono stati adottati massi sciolti fino ad un diametro medio pari a 0.70 – 0.80 m; per diametri superiori, è stata prevista anche la legatura.

Nella tabella seguente si riportano i risultati del calcolo di dimensionamento dei massi, così come la tipologia di protezione adottata.

**Relazione Idraulica e di compatibilità idraulica
modelli bidimensionali**

| | | | | | |
|----------|---------|----------|------------|------|----------|
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| RC2A | C1 R 09 | RI | ID0002 002 | B | 41 di 43 |

| Pila | Tirante idraulico [m] | V - Velocità corrente [m/s] | Scavo localizzato (senza protezioni) [m] | Ks alveo | D50 protez [m] | Vcr1 protez [m/s] | Vcr2 protez [m/s] | Fv | Tipologia di protezione |
|------|-----------------------|-----------------------------|--|----------|----------------|-------------------|-------------------|-------|-------------------------|
| P01 | 0.60 | 1.30 | 5.67 | 33 | 0.30 | 3.75 | 5.22 | 2.88 | massi sciolti |
| P02 | 5.00 | 1.60 | 12.90 | 33 | 0.50 | 4.84 | 9.60 | 3.02 | massi sciolti |
| P03 | 3.50 | 1.00 | 8.04 | 33 | 0.30 | 3.75 | 7.01 | 3.75 | massi sciolti |
| P04 | 2.10 | 0.05 | 0.90 | 33 | 0.30 | 3.75 | 6.44 | 74.93 | - |
| P05 | 4.00 | 0.10 | 0.76 | 33 | 0.30 | 3.75 | 7.17 | 37.46 | - |
| P01d | 1.20 | 0.10 | 1.22 | 33 | 0.30 | 3.75 | 5.86 | 37.46 | - |
| P02d | 5.00 | 1.60 | 12.80 | 33 | 0.30 | 3.75 | 7.44 | 2.34 | massi sciolti |
| P03d | 4.00 | 1.00 | 8.10 | 33 | 0.30 | 3.75 | 7.17 | 3.75 | massi sciolti |
| P04d | 4.00 | 0.05 | 0.97 | 33 | 0.30 | 3.75 | 7.17 | 74.93 | - |
| P05d | 4.30 | 0.30 | 1.73 | 33 | 0.30 | 3.75 | 7.25 | 12.49 | - |

Tabella 8 – Calcolo delle protezioni Bacino 86.

| Pila | Tirante idraulico [m] | V - Velocità corrente [m/s] | Scavo localizzato (senza protezioni) [m] | Tipo di scavo (senza protezioni) | Ks alveo | D50 protez [m] | Vcr1 protez [m/s] | Vcr2 protez [m/s] | Fv | Tipologia di protezione |
|------|-----------------------|-----------------------------|--|----------------------------------|----------|----------------|-------------------|-------------------|------|-------------------------|
| P02 | 2.00 | 1.00 | 5.55 | plinto scoperto | 33 | 0.30 | 3.75 | 6.38 | 3.75 | massi sciolti |
| P03 | 3.60 | 2.50 | 11.69 | plinto scoperto | 33 | 1.00 | 6.84 | 12.85 | 2.74 | massi sciolti |
| P04 | 2.50 | 2.00 | 9.55 | plinto scoperto | 33 | 0.70 | 5.72 | 10.12 | 2.86 | massi sciolti |
| P01d | 1.00 | 0.50 | 2.36 | plinto scoperto | 33 | 0.30 | 3.75 | 5.69 | 7.49 | - |
| P02d | 3.60 | 2.50 | 11.69 | plinto scoperto | 33 | 1.00 | 6.84 | 12.85 | 2.74 | massi sciolti |
| P03d | 2.00 | 1.00 | 5.55 | plinto scoperto | 33 | 0.30 | 3.75 | 6.38 | 3.75 | massi sciolti |

Tabella 9 – Calcolo delle protezioni Bacino 95.

| | | | | | | |
|--|--|------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA SALERNO – REGGIO CALABRIA NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA LOTTO 1 BATTIPAGLIA – PRAIA LOTTO 1C BUONABITACOLO – PRAIA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| | Relazione Idraulica e di compatibilità idraulica modelli bidimensionali | COMMESSA RC2A | LOTTO C1 R 09 | CODIFICA RI | DOCUMENTO ID0002 002 | REV. B |

5 COMPATIBILITÀ IDRAULICA

Nello studio effettuato è stata valutata la compatibilità idraulica dell'infrastruttura di progetto con il territorio ed è stata analizzata la sicurezza del corpo ferroviario, identificando in termini di funzionalità e sicurezza i manufatti di presidio idraulico più opportuni, garantendo la minima interferenza delle opere ferroviarie con il normale deflusso delle acque.

Gli strumenti normativi presi a riferimento nella valutazione della compatibilità idraulica delle opere di progetto sono:

- NTC 2018 “Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni” di cui al D.M. 17 gennaio 2018 e relativa circolare applicativa del 21 gennaio 2019, n. 7 “Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni”;
- Manuale di Progettazione RFI 2019;
- “Piani per l'Assetto Idrogeologico relativamente ai bacini idrografici regionali in Destra, in Sinistra Sele e al Bacino Interregionale del Sele” (PSAI Sele, 2016), ed in particolare l'Allegato G “Indirizzi tecnici per la redazione degli studi di compatibilità idraulica per il bacino idrografico interregionale Sele” delle Norme di Attuazione.

All'interno del PSAI Sele sono perimetrate aree di “Pericolosità idraulica” e “Rischio idraulico”. Il viadotto sul Fiume Sele rientra all'interno di tali perimetrazioni.

Tra gli elaborati annessi al progetto di fattibilità tecnica ed economica è stata predisposta la “Relazione idrologica generale” all'interno della quale sono trattate in modo completo le varie tematiche di carattere idrologico.

I risultati delle simulazioni numeriche hanno consentito di valutare i franchi minimi rispetto alle piene di riferimento.

L'attraversamento è stato verificato in termini di:

- franco minimo tra l'intradosso dell'opera e la quota del carico idraulico totale corrispondente al livello idrico di massima piena, pari a 0.50 m e comunque non inferiore ad 1.5 m sul livello idrico;
- posizionamento delle spalle del viadotto in modo tale da non ridurre significativamente la sezione di deflusso in alveo ed in golena;
- posizionamento e geometria delle pile in alveo ed in golena in modo da non provocare significativi fenomeni di rigurgito ovvero fenomeni di erosione localizzati sulle sponde ed in alveo.

Nella progettazione di ponti e viadotti si è cercato di minimizzare la realizzazione di pile nell'alveo di magra dei corsi d'acqua in modo da variare il meno possibile le caratteristiche del moto della corrente di piena ed evitare un conseguente peggioramento dei livelli di piena.

Nel caso in esame, non si è resa necessaria l'introduzione di sistemazioni idrauliche dell'alveo, che rimane intatto rispetto allo stato attuale.

Nel presente studio è stata condotta in modo approfondito l'analisi degli scavi localizzati nell'intorno delle pile, considerando anche le condizioni di scavo con i plinti di fondazione esposti alla corrente. Per le pile più esposte all'azione erosiva della corrente sono state dimensionate adeguate opere di protezione.

Il confronto con lo stato di fatto, mostra che l'opera non determina una modifica significativa in termini di livelli e velocità.

La seguente tabella riassume la valutazione della compatibilità idraulica delle opere in progetto, con riferimento alla normativa vigente, in termini di:

- distanza tra fondo alveo e quota di sotto-trave: questa prescrizione viene messa in relazione al possibile trasporto di tronchi di importanti dimensioni lungo il corso d'acqua. Infatti, per gli attraversamenti idraulici, altezze libere ridotte e luci di ampiezza limitata possono comportare, in presenza di trasporto di sedimenti galleggianti, occlusioni o limitazioni delle aperture dei viadotti a causa degli ammassi detritici che si possono formare attorno alle pile dei ponti,
- franco rispetto al livello idrico ed al gradiente energetico.

| | Fiume Noce pk 26+671 | Fiume Noce pk 38+429 |
|---|-----------------------------|-----------------------------|
| | TR200 | TR200 |
| Quota intradosso (m s.m.m.) | 239.12 | 74.17 |
| Distanza minima tra fondo alveo e quota di sotto-trave (m) | 6.50 | 34.29 |
| Livello max (m s.m.m.) | 234.4 | 43.3 |
| Velocità (m/s) | 3.8 | 4.5 |
| Franco idraulico (m) | 4.72 | 30.87 |
| Franco EG (m) | 3.0 | 29.80 |

Alla luce dei risultati ottenuti, anche in caso di accumulo o trasporto di materiale flottante, l'altezza libera è più che sufficiente a mantenere i franchi.

Le luci nette dei viadotti, misurate nella direzione ortogonale al filone principale della corrente soddisfano le indicazioni della normativa che prescrivono una distanza netta ed ortogonale minima di 40 m, anche al fine di evitare l'accumulo attorno alle pile di specie vegetali ad alto fusto.