

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



## DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO

### U.O. INFRASTRUTTURE SUD

### PROGETTO DEFINITIVO

## RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-FIUMEFREDDO

Lotto 1: Fiumefreddo (i) – Taormina (i) / Letojanni

### IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica opere maggiori

SCALA:

-

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

RS2S 01 D 78 RI ID0002 001 B

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
B	Consegna CSLLPP	M. Carlino	Ott. 2017	A. TORTORA	Ott. 2017	P. CARLESIMO	Gen. 2018	 ITAFERR S.p.A. Gruppo Ferrovie dello Stato Direzione Generale UO Infrastrutture Sud Dott. Ing. Danilo Tiberti Ordine degli Ingegneri Prov. di Napoli 431875
A	Emissione Esecutiva	M. Carlino	Ott. 2017	A. TORTORA	Ott. 2017	P. CARLESIMO	Ott. 2017	

File:RS2S01D78RIID0002001B.doc

n. Elab.: 349

## INDICE

1	PREMESSA .....	6
1.1	ELENCO ELABORATI DI PROGETTO RELATIVI ALLA FASE 01 .....	8
2	INQUADRAMENTO GENERALE DELL' AREA .....	9
3	ANALISI IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI MAGGIORI .....	11
3.1	METODOLOGIA DI CALCOLO E CRITERI DI VERIFICA .....	11
3.1.1	<i>Manuale di progettazione ferroviario .....</i>	<i>11</i>
3.1.2	<i>NTC 2008 e relativa Circolare Applicativa.....</i>	<i>12</i>
3.1.3	<i>Criteri di verifica.....</i>	<i>14</i>
3.1.4	<i>Metodologia di verifica idraulica mediante simulazioni idrauliche su modello matematico in schema di moto permanente.....</i>	<i>14</i>
3.1.4.1	Caratteristiche modello matematico.....	14
3.1.4.2	Calcolo del profilo a moto permanente.....	21
3.1.4.3	Equazione della conservazione della quantità di moto.....	24
3.1.4.4	Equazione di Yarnell.....	28
3.1.4.5	Calcolo del rigurgito dovuto ai tombini/ponticelli.....	31
3.2	VERIFICA IDRAULICA OPERE.....	35
3.2.1	<i>Geometria degli alvei .....</i>	<i>36</i>
3.2.2	<i>Portate di progetto .....</i>	<i>36</i>
3.2.3	<i>Taratura dei modelli.....</i>	<i>37</i>
3.2.4	<i>Rappresentazione dei risultati delle simulazioni numeriche .....</i>	<i>39</i>
3.3	TORRENTE MINISSALE .....	40
3.3.1	<i>Messa a punto del modello idrodinamico monodimensionale.....</i>	<i>40</i>
3.3.1.1	Schematizzazione del corso d'acqua.....	40
3.3.1.2	Geometria del modello.....	41
3.3.1.3	Scabrezza idraulica .....	44
3.3.1.4	Condizioni al contorno.....	45
3.3.2	<i>Risultati delle simulazioni .....</i>	<i>45</i>
3.3.2.1	Simulazione Ante Operam .....	47
3.3.2.2	Simulazione Post Operam.....	49
3.3.3	<i>Livelli idrici calcolati .....</i>	<i>52</i>
3.3.3.1	Confronto tra gli scenari di simulazione .....	52

3.3.4	<i>Fasi realizzative</i> .....	53
3.3.5	<i>Immissione collettore 3.50x2.00</i> .....	56
<b>3.5</b>	<b>CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE PROTEZIONI DEL FONDO E DELLE SPONDE</b> .....	<b>58</b>
3.5.1	<i>Metodo delle tensioni di trascinamento</i> .....	58
3.5.2	<i>Resistenza al trascinamento</i> .....	61
3.5.3	<i>Verifica delle tensioni di trascinamento sui rivestimenti in pietrame</i> .....	65
3.5.4	<i>Applicazione ai casi in esame</i> .....	66
3.5.4.1	<i>Verifica rivestimento localizzato in prossimità del torrente Minissale</i> .....	66
<b>4</b>	<b>COMPATIBILITA' IDRAULICA</b> .....	<b>71</b>
4.1	<i>ANALISI DEL TRACCIATO FERROVIARIO</i> .....	72
4.2	<i>STUDIO IDROLOGICO</i> .....	72
4.3	<i>VERIFICHE IDRAULICHE</i> .....	73
4.4	<i>SISTEMAZIONI IDRAULICHE</i> .....	74
4.5	<i>L'ANALISI DI COMPATIBILITA' IDRAULICA</i> .....	75
<b>5</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>77</b>
<b>6</b>	<b>APPENDICE A – RISULTATI DEL MODELLO MATEMATICO HEC-RAS</b> .....	<b>78</b>
6.1	<i>MODELLO DI SIMULAZIONE IDRAULICA PER IL TORRENTE MINISSALE</i> .....	78
6.1.1	<i>Scenario ante-operam</i> .....	78
6.1.2	<i>Scenario post-operam</i> .....	90

## INDICE DELLE FIGURE

<i>Figura 1 - Inquadramento geografico della zona in esame.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2 - Schema di calcolo per la determinazione del profilo liquido nei corsi d'acqua.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3 - Sezione schematica di un corso d'acqua naturale.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 4 – Schema di calcolo.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 5 – Pianta schematica di un attraversamento fluviale.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 6 – Sezione schematica di un attraversamento fluviale.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 7 – Sezione schematica di un ponte – Schema di calcolo.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 8 – Diagramma per la stima del coefficiente di deflusso Cd.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 9 –Sezione schematica di un ponte – Schema di calcolo.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 10 – Sezione schematica di un ponte – Schema di calcolo.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 11 – Schema idraulico tombino/ponticello.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 12 – Diagramma di funzionamento del tombino/ponticello.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 13– Rappresentazione generale dell'estensione planimetrica del modello.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 14– Alcune evidenze fotografiche dello stato dell'alveo del vallone Minissale e delle opere interferenti.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 15– Profilo di rigurgito ANTE OPERAM.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 16 – Sezione a monte del manufatto in progetto ANTE OPERAM.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 17 – Sezione a valle del manufatto in progetto ANTE OPERAM.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 18 – Profilo di rigurgito POST OPERAM.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 19– Sezione a monte del manufatto in progetto POST OPERAM.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 20 – Sezione a valle del manufatto in progetto POST OPERAM.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 21 - Sezione parzializzate FASE 1.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 22 – Sezione parzializzate FASE 2.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 23 – Livello idrico per Tr = 5 anni del torrente Minissale.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 24- Andamento degli sforzi tangenziali per sezione trapezia.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 25- Valori del coefficiente K, in funzione del rapporto d'aspetto L/ h della sezione.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 26 - Valori del coefficiente K, in funzione del rapporto raggio curvatura- larghezza pelo libero.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 27- Abaco di Shields.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 28 – Schema planimetrico ante operam del torrente Minissale.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 29 – Profilo ante operam del torrente Minissale.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 30 – Sezioni ante operam del torrente Minissale.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 31 – Schema planimetrico post operam del torrente Minissale.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 32 – Profilo post operam del torrente Minissale.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 33 – Sezioni trasversali post operam del torrente Minissale.....</i>	<i>100</i>



LINEA MESSINA - CATANIA  
**PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
 FIUMEFREDDO**  
**LOTTO 01**

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	5 di 101

## INDICE DELLE TABELLE

<i>Tabella 1 – Elenco elaborati di progetto della Fase 01.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabella 2 – Coefficiente di resistenza idrodinamico <math>C_D</math>.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabella 3 – Coefficiente di Yarnell .....</i>	<i>29</i>
<i>Tabella 4 – Manufatti di attraversamento della linea ferroviaria (FASE 01).....</i>	<i>35</i>
<i>Tabella 5 – Portate di progetto per la verifica degli attraversamenti maggiori della Fase 01.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabella 6 - Tabella riepilogativa per la scelta del coefficiente di Manning (Chow, 1959). .....</i>	<i>38</i>
<i>Tabella 7 - Tabella riepilogativa dei risultati delle simulazioni del torrente Minissale POST OPERAM .....</i>	<i>51</i>
<i>Tabella 8 – Stralcio della tabella di confronto dei risultati delle simulazioni del torrente Minissale .....</i>	<i>53</i>
<i>Tabella 9 – Tensioni massime di trascinamento Portata piena (<math>Tr = 300</math> anni) sui rivestimenti Torrente Minissale - .....</i>	<i>67</i>
<i>Tabella 10- Tensioni resistenti al trascinamento - Portata piena (<math>Tr = 300</math> anni) sui rivestimenti Torrente Minissale - .....</i>	<i>69</i>
<i>Tabella 11 – Stabilità dei rivestimenti come rapporto tensioni resistenti/tensioni trascinamento - Portata piena (<math>Tr = 300</math> anni) Torrente Minissale .....</i>	<i>70</i>
<i>Tabella 12 – Risultati della simulazione numerica del torrente Minissale nella configurazione ante operam .....</i>	<i>89</i>
<i>Tabella 13 Risultati della simulazione numerica del torrente Minissale nella configurazione post operam.....</i>	<i>101</i>



LINEA MESSINA - CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
FIUMEFREDDO  
LOTTO 01

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	6 di 101

## 1 PREMESSA

Scopo del presente lavoro è lo studio idrologico-idraulico delle interferenze della linea ferroviaria Catania – Messina, nella tratta che si sviluppa tra Fiumefreddo e Taormina, con la rete idrografica locale. L'attività è comprensiva della valutazione delle portate dei corsi d'acqua intersecanti per la verifica idraulica delle opere di attraversamento in progetto.

La tratta della linea ferroviaria interessata dal presente studio è compresa tra la stazione di Fiumefreddo e quella di Giampileri, per uno sviluppo complessivo di oltre 42 km tutti in variante rispetto al tracciato ferroviario esistente. Il tratto indagato è compreso tra la progressiva km 0+000 e la km 13+843.

La linea ferroviaria esistente Catania – Messina è stata interessata in passato da una serie di importanti eventi alluvionali. Tra questi si cita l'alluvione di Messina del 2009, che è stata una calamità naturale verificatasi in un'area ristretta della Sicilia Nord-orientale, causata da un violento nubifragio iniziato nel pomeriggio del 1° ottobre 2009 e terminato in serata, dopo circa 6 ore; le piogge sono quindi proseguite debolmente fino a notte inoltrata. Il nubifragio ha provocato l'esondazione di numerosi corsi d'acqua e numerosissimi eventi franosi, a cui è seguito lo scivolamento a valle di colate di fango e di detriti. Tali fenomeni hanno causato la perdita di vite umane, numerosi feriti, l'interruzione della viabilità stradale e ferroviaria, delle linee elettriche e telefoniche, nonché gravi danni alle infrastrutture, e agli edifici pubblici e privati.

Scopo dello studio idrologico-idraulico è di verificare il funzionamento di una serie di manufatti di attraversamento della linea ferroviaria, con riferimento alle portate trecentennale e duecentennale secondo il Manuale di Progettazione Ferroviario.

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

- verifica idraulica di un'opera di attraversamento maggiore mediante elaborazione di simulazione idraulica su modello matematico in schema di moto permanente;
- redazione delle planimetrie di esondazione ante e post-operam e dei profili di moto permanente con livelli idrici ed energetici dell'opera di attraversamento;
- valutazione dello scalzamento per le opere che prevedono pile in alveo;
- dimensionamento delle opere provvisorie durante la fase di cantiere per la realizzazione delle pile in alveo;
- verifica idraulica di tombini scatolari e ponticelli mediante elaborazione di simulazione idraulica su modello matematico in schema di moto permanente, per n°4 attraversamenti ferroviari minori (Tr=200

anni), (Fosso FA04; Ponticello Vallone Beatrice; Ponticello Vallone Sant’Antonio, Tombino interconnessione Letojanni);

- verifica idraulica di tombini scatolari e ponticelli in schema di moto uniforme, per 3 attraversamenti ferroviari minori (Tr=200 anni), (n°3 tombini + n°2 deviazione Fossi in DX idraulica Alcantara alla Pk 6+350);
- verifica idraulica di deviazione di fossi in schema di moto uniforme, per 2 interventi (Tr=200 anni), (Fosso + n°2 tombini zona Trappitello; Fosso FA041P Taormina; Fosso in SX vallone Sant’Antonio Taormina);
- indicazioni per la risoluzione delle interferenze di corsi d’acqua minori con il tracciato ferroviario di progetto, le viabilità complementari di raccordo e i piazzali ubicati presso le stazioni; per tali interferenze minori, qualora si rendesse necessaria la realizzazione di un tombino scatolare di attraversamento, si sono fornite le dimensioni interne dello stesso, oppure nel caso di deviazioni di incisioni si è provveduto ad individuare il nuovo tracciato di progetto del corso d’acqua. In entrambi i casi, ovvero per la determinazione della sezione del tombino o delle caratteristiche geometriche dell’alveo della nuova incisione, si è fatto riferimento alle informazioni ottenute dall’analisi della cartografia esistente.

Il seguente studio è stato redatto in accordo agli strumenti di pianificazione territoriale in vigore, in particolar modo fra gli strumenti legislativi è stato adottato il P.A.I., Piano Stralcio di Bacino per l’Assetto Idrogeologico della Regione Siciliana (dicembre 2004 e successivi aggiornamenti). Oltre al PAI, per ogni attraversamento maggiore è stato verificato il rispetto delle NTC 2008 e della relativa circolare applicativa del 2 febbraio 2009, n. 617 “Istruzioni per l’applicazione delle «Nuove norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008” (GU n. 47 del 26-2-2009 - Suppl. Ordinario n.27).



LINEA MESSINA - CATANIA  
**PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
 FIUMEFREDDO**  
**LOTTO 01**

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	8 di 101

## 1.1 ELENCO ELABORATI DI PROGETTO RELATIVI ALLA FASE 01

<i>ELENCO</i>	<i>CODIFICA</i>
Lotto 1	
Relazione idraulica opere maggiori	RS2S 01 D 78 RI ID0002 001 B
Relazione idraulica opere minori	RS2S 01 D 78 RI ID0002 002 B
Torrente Minissale - Planimetria ante e post operam con aree di esondazione Tr 300 anni	RS2S 01 D 78 P6 ID0001 001 B
Torrente Minissale - Profilo ante e post operam con indicazione dei livelli idrici Tr 300 anni	RS2S 01 D 78 FZ ID0002 001 B
Torrente Minissale - Sezioni ante operam Tr 300 anni	RS2S 01 D 78 WZ ID0002 001 B
Torrente Minissale - Sezioni post operam Tr 300 anni	RS2S 01 D 78 WZ ID0002 002 B
Torrente Minissale - Pianta, Profili sponda DX / SX e sezioni sistemazione alveo	RS2S 01 D 78 BZ ID0002 001 B
Pianta, profilo e sezioni fosso zona FA04 Pk. 4+750	RS2S 01 D 78 PZ ID0002 001 B
Pianta, profilo e sezioni Vallone Beatrice Pk. 5+450	RS2S 01 D 78 PZ ID0002 002 B
Deviazione incisioni Destra Idraulica Viadotto Alcantara Pk. 6+350	RS2S 01 D 78 PZ ID0002 003 B
Deviazione incisioni Sinistra Idraulica Viadotto Alcantara- Zona Trappitello Pk. 6+623	RS2S 01 D 78 PZ ID0002 004 B
Deviazione fosso FA01P - Taormina Pk. 13+300	RS2S 01 D 78 PZ ID0002 005 B
Pianta, profilo e sezioni Ponticello Vallone Sant'Antonio - Zona Taormina Pk. 13+700	RS2S 01 D 78 PZ ID0002 006 B
Pianta, profilo e sezioni Tombino Interconnessione Letojanni PK 1+350	RS2S 01 D 78 PZ ID0002 007 B

**Tabella 1 – Elenco elaborati di progetto della Fase 01**

## 2 INQUADRAMENTO GENERALE DELL'AREA

La tratta ferroviaria Giampileri – Fiumefreddo, compresa nella linea Catania – Messina, si estende per oltre 42 km lungo la costa ionica della provincia di Messina (Figura 1).

Il percorso ferroviario attraversa in gran parte in galleria la zona costiera, partendo da una quota di 57.98 m s.m.m. alla Fermata di Fiumefreddo per giungere ai 16.25 m s.m.m. della Fermata di Giampileri.

Nel suo tragitto, la tratta Giampileri – Fiumefreddo interseca i tratti terminali di una serie di burroni, burroncelli, torrenti, scoli e rivi. Le principali infrastrutture di trasporto, presenti nell'areale di intervento, sono l'autostrada A18 Catania – Messina e la Strada Statale n° 114 i cui tracciati risultano essere in sostanziale affiancamento all'intera tratta ferroviaria.



Figura 1 - Inquadramento geografico della zona in esame.



LINEA MESSINA - CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
FIUMEFREDDO  
LOTTO 01

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	10 di 101

Il progetto è suddiviso in due fasi funzionali:

- Fase 01 tra la progressiva km 0+000 e la km 13+843, compresa tra l'attuale stazione di Fiumefreddo e l'interconnessione di Letojanni;
- Fase 02 tra la progressiva km 13+843 e la km 42+263, ovvero tra l'interconnessione di Letojanni e la stazione di Giampilieri.

La presente relazione idraulica è relativa a tutti gli attraversamenti ricadenti all'interno della prima fase funzionale.



LINEA MESSINA - CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
FIUMEFREDDO  
LOTTO 01

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	11 di 101

### 3 ANALISI IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI MAGGIORI

#### 3.1 METODOLOGIA DI CALCOLO E CRITERI DI VERIFICA

##### 3.1.1 Manuale di progettazione ferroviario

Come previsto dal Manuale di Progettazione ferroviario ogni tipo di manufatto idraulico verrà verificato utilizzando i seguenti tempi di ritorno  $Tr$ :

...omissis...

*Manufatti di attraversamento (ponti e tombini):*

- linea ferroviaria  $Tr= 300$  anni per  $S > 10 \text{ km}^2$
- linea ferroviaria  $Tr= 200$  anni per  $S < 10 \text{ km}^2$
- deviazioni stradali  $Tr=200$  anni

...omissis...

Per la verifica idraulica delle opere di attraversamento principali il manuale prevede quanto segue:

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

- franco minimo tra l'intradosso dell'opera e la quota del carico idraulico totale corrispondente al livello idrico di massima piena, calcolato come precedentemente descritto, 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.
- Il calcolo dello scalzamento localizzato indotto dalle opere di sostegno deve essere valutato considerando le dimensioni delle pile; nel caso in cui il plinto di fondazione venga messo allo scoperto dall'erosione, le dimensioni maggiori e le forme più tozze dello stesso provocano un ulteriore scalzamento e pertanto, in tale condizione, il calcolo dell'erosione localizzata va ripetuto portando in conto la diversa geometria.”

Per la verifica idraulica delle opere di attraversamento secondarie il manuale prevede quanto segue:



LINEA MESSINA - CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
FIUMEFREDDO  
LOTTO 01

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	12 di 101

*“Le tipologie ammesse sono:*

- *tombini circolari in c.a. con diametro minimo 1.5m;*
- *tombini scatolari in c.a. con dimensione minima 2m;*

*Sono ammessi fino a due tombini affiancati.*

*In nessun caso saranno ammessi attraversamenti con opere a sifone.*

*La pendenza longitudinale del fondo dell’opera non dovrà essere inferiore al 2‰ e ciò al fine di impedire la sedimentazione di eventuale materiale solido trasportato.*

*La sezione di deflusso complessiva del tombino dovrà consentire lo smaltimento della portata massima di piena con un grado di riempimento non superiore al 70% della sezione totale.*

*Dovranno essere previsti gli opportuni accorgimenti per evitare, in corrispondenza delle fondazioni del manufatto, fenomeni di scalzamento o erosione.”*

### **3.1.2 NTC 2008 e relativa Circolare Applicativa**

Le Norme Tecniche per la Costruzione “NTC 2008” e la relativa Circolare Ministero delle Infrastrutture e Trasporti del 2 febbraio 2009, n. 617 “Istruzioni per l’applicazione delle «Nuove norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008” (GU n. 47 del 26-2-2009 - Suppl. Ordinario n.27) contengono le istruzioni per la progettazione dei ponti ferroviari interessanti corsi d’acqua naturali o artificiali, con particolare riferimento ai tempi di ritorno e ai franchi idraulici da adottare per le verifiche di compatibilità idraulica.

In particolare, al § 5.2.1.2 delle NTC 2008 “Compatibilità idraulica” si prescrive che:

*Quando il ponte interessa un corso d’acqua naturale o artificiale, il progetto dovrà essere corredato da una relazione idrologica e da una relazione idraulica riguardante le scelte progettuali, la costruzione e l’esercizio del ponte.*

*L’ampiezza e l’approfondimento della relazione e delle indagini che ne costituiscono la base saranno commisurati all’importanza del problema.*

*Di norma il manufatto non dovrà interessare con spalle, pile e rilevati il corso d’acqua attivo e, se arginato, i corpi arginali. Qualora eccezionalmente fosse necessario realizzare pile in alveo, la luce minima tra pile contigue, misurata ortogonalmente al filone principale della corrente, non dovrà essere inferiore a 40 metri. Soluzioni con*



LINEA MESSINA - CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
FIUMEFREDDO  
LOTTO 01

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	13 di 101

*luci inferiori potranno essere autorizzate dall’Autorità competente, previo parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.*

*Nel caso di pile e/o spalle in alveo cura particolare è da dedicare al problema delle escavazioni dell’alveo e alla protezione delle fondazioni delle pile e delle spalle.*

*La quota idrometrica ed il franco dovranno essere posti in correlazione con la piena di progetto riferita ad un periodo di ritorno non inferiore a 200 anni.*

*Il franco di sottotrave e la distanza tra il fondo alveo e la quota di sottotrave dovranno essere assunte tenendo conto del trasporto solido di fondo e del trasporto di materiale galleggiante.*

*Il franco idraulico necessario non può essere ottenuto con il sollevamento del ponte durante la piena.*

Al § C5.1.2.4 della Circolare applicativa si prescrive inoltre:

*Le questioni idrauliche, da trattare con ampiezza e grado di approfondimento commisurati alla natura dei problemi ed al grado di elaborazione del progetto, devono essere oggetto di apposita relazione idraulica, che farà parte integrante del progetto stesso. ... omissis.....*

*La quota idrometrica ed il franco devono essere posti in correlazione con la piena di progetto anche in considerazione della tipologia dell’opera e delle situazioni ambientali.*

*In tal senso può ritenersi normalmente che il valore della portata massima e del relativo franco siano riferiti ad un tempo di ritorno non inferiore a **200 anni**; è di interesse stimare i valori della frequenza probabile di ipotetici eventi che diano luogo a riduzioni del franco stesso. Nel caso di corsi di acqua arginati, la quota di sottotrave deve essere comunque non inferiore alla quota della sommità arginale. ....*

*A titolo di indicazione, in aggiunta alla prescrizione di un franco normale minimo di 1,50÷2,00 m, è da raccomandare che il dislivello tra fondo e sottotrave sia non inferiore a 6÷7 m quando si possa temere il transito d’alberi d’alto fusto, con l’avvertenza di prevedere valori maggiori per ponti con luci inferiori a 40 m o per ponti posti su torrenti esposti a sovralti d’alveo per deposito di materiali lapidei provenienti da monte o dai versanti.....*

*Quando l’intradosso delle strutture non sia costituito da un’unica linea orizzontale tra gli appoggi, il franco previsto deve essere assicurato per una ampiezza centrale di 2/3 della luce, e comunque non inferiore a 40 m.*

....

### 3.1.3 Criteri di verifica

Sulla base di quanto riportato nei due precedenti paragrafi, le nuove opere di attraversamento sono state progettate secondo i seguenti i criteri:

Elementi di verifica	Manuale di progettazione ferroviaria	NTC 2008 e relativa circolare applicativa
Manufatti di attraversamento principali (ponti e viadotti)	<i>linea ferroviaria <math>Tr= 300</math> anni per <math>S &gt; 10 \text{ km}^2</math>            linea ferroviaria <math>Tr= 200</math> anni per <math>S &lt; 10 \text{ km}^2</math>            deviazioni stradali <math>Tr=200</math> anni</i>	<i><math>Tr = 200</math> anni</i>
Verifica Franco di progetto ponti.	<i>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.</i>	<i>1,50÷2,00 m</i>
Dislivello tra fondo e sottotrave		<i>Non inferiore a 6÷7 m quando si possa temere il transito d'alberi d'alto fusto</i>
Posizione spalle	<i>Posizionamento delle spalle del viadotto in modo tale da non ridurre significativamente la sezione di deflusso in alveo ed in golena;</i>	<i>Di norma il manufatto non dovrà interessare con spalle, pile e rilevati il corso d'acqua attivo e, se arginato, i corpi arginali.</i>

### 3.1.4 Metodologia di verifica idraulica mediante simulazioni idrauliche su modello matematico in schema di moto permanente

#### 3.1.4.1 Caratteristiche modello matematico

Le simulazioni numeriche sono state condotte utilizzando un programma di calcolo monodimensionale a moto permanente che fornisce una adeguata rappresentazione del fenomeno, descrivendo le principali grandezze fisiche per ogni sezione idraulica di calcolo. Per la determinazione dei profili idrici nei corsi d'acqua sia nella situazione attuale, sia di progetto e per i diversi tempi di ritorno considerati è stato utilizzato il codice denominato HEC – RAS 4.1.0 River Analysis System del gennaio 2010 sviluppato dalla U.S. Army Corps of Engineers, i cui fondamenti concettuali sono di seguito riportati.

Obiettivo principale del modello, utilizzato nell'ipotesi di moto permanente, è quello di correlare l'entità della portata liquida in arrivo dal bacino di monte con le velocità e con l'altezza idrometrica raggiunta nell'alveo principale e nelle golene.

Pur operando nell'ipotesi di mono dimensionalità, il modello consente la ricostruzione dell'andamento della velocità all'interno di una stessa sezione di deflusso, distinguendo tra zone spondali e canale centrale, in funzione della variazione di scabrezza e di tirante idraulico.

Nel caso della simulazione in moto permanente il calcolo dell'andamento dei profili idraulici viene effettuato dal modello utilizzando un metodo numerico chiamato "standard step method", che risolve in modo sequenziale l'equazione monodimensionale dell'energia fra due sezioni adiacenti trasversali al moto.

In corrispondenza ad alcune tipologie di ponte, dove nascono condizioni di flusso complesse, vengono utilizzate invece specifiche equazioni dell'idraulica per determinare le variazioni di livello dovute a queste varie singolarità.

Sinteticamente, il modello funziona calcolando le variazioni di livello idrometrico tra sezioni trasversali adiacenti sulla base del calcolo delle perdite di energia. Il calcolo comincia a un'estremità del tronco d'alveo indagato, procedendo passo-passo sino all'altra estremità, e così sezione dopo sezione, cambiando il verso dell'indagine da valle verso monte per moto subcritico e da monte verso valle per moto supercritico.

Il funzionamento del modello HEC-RAS si basa su alcune semplificazioni nelle ipotesi di partenza:

- moto permanente;
- moto gradualmente vario;
- moto monodimensionale, con correzione della distribuzione orizzontale della velocità;
- perdite di fondo mediamente costanti fra due sezioni trasversali adiacenti;
- arginature fisse.

### ***Definizioni***

Il modello utilizza, all'interno dei suoi algoritmi di calcolo, elementi dell'idraulica dei canali a pelo libero. Si ritiene opportuno, quindi, prima di procedere oltre, inserire alcuni elementi per meglio chiarire il funzionamento del modello stesso.

### **Moto permanente e vario**



LINEA MESSINA - CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
FIUMEFREDDO  
LOTTO 01

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	16 di 101

Il criterio di distinzione fra i due tipi di moto è il loro andamento nei confronti della variabile “tempo”. Se profondità, velocità e portata rimangono costanti nel tempo in una determinata sezione di un corso d’acqua, il moto è permanente; se una di queste caratteristiche varia, il moto è vario. Il passaggio di un’onda di piena lungo un tronco d’alveo è un esempio di moto vario perché profondità, velocità e portata cambiano nel tempo.

La ragione per cui HEC-RAS, modello di moto permanente, può essere usato per il moto vario, come è da considerarsi a rigore un’onda di piena, sta nella lentezza con cui l’onda cresce e si esaurisce. Un ipotetico osservatore sulla sponda di un corso d’acqua non è infatti in grado di apprezzare la curvatura dell’onda e non apprezza le variazioni istantanee di livello che si verificano.

Eccetto quindi casi estremi, la variazione di portata avviene gradualmente e i risultati ottenuti usando metodi analitici per moto permanente sono ugualmente di buona qualità.

#### Moto uniforme e vario

Quando il moto è uniforme, profondità e velocità sono costanti lungo un tratto di canale. La forza di gravità provoca il movimento dell’acqua, in equilibrio con gli attriti. Il moto non è accelerato né decelerato. Per un canale naturale non si può parlare di moto uniforme in senso stretto, perché la geometria delle sezioni trasversali e l’area bagnata variano lungo il canale, causando accelerazioni e decelerazioni del moto. A rigore il moto uniforme è possibile solo in un canale prismatico con sezione e pendenza costanti. D’altra parte è considerato corretto assumere che il moto sia uniforme quanto il pelo libero è approssimativamente parallelo al fondo del canale; in tal caso si assume che anche la linea dell’energia sia parallela al fondo.

Nel caso di moto vario profondità e velocità cambiano con la distanza lungo il canale; si può distinguere tra moto “gradualmente vario” quando le variazioni nell’altezza del pelo libero avvengono in una distanza relativamente lunga e modo “rapidamente vario” se le variazioni sono brusche.

Quest’ultima distinzione è importante in quanto HEC-RAS calcola i profili solamente in situazioni di moto gradualmente vario.

#### Moto subcritico e supercritico

Il moto in un canale a pelo libero può essere classificato come subcritico, supercritico o critico.

La determinazione del tipo di moto secondo questa classificazione è di fondamentale importanza nell'utilizzo del modello, perché cambia il verso in cui si procede nello studio del profilo idraulico partendo da una delle due estremità del tratto d'alveo in esame.

Le perturbazioni che interessano la superficie liquida, infatti, si propagano verso monte nel caso di moto subcritico ma non nel caso di moto supercritico, e ciò risulta fondamentale nella scelta del punto di partenza nel calcolo del profilo idraulico.

Una delle prime operazioni da fare è quindi la determinazione del tipo di moto che si sviluppa nel tratto oggetto dell'indagine condotta con il modello.

Per definire il punto di separazione fra moto subcritico e supercritico viene utilizzato il numero adimensionale di Froude, rapporto fra le forze gravitazionali e le forze inerziali:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh_m}}$$

dove:

V = velocità media Q/A [m/s]

g = accelerazione di gravità [m/s<sup>2</sup>]

h<sub>m</sub> = altezza media della corrente [m]

Se il numero di Froude risulta minore di 1, il moto è subcritico, se invece è superiore, il moto è supercritico; se risulta uguale a 1, il moto è critico e la situazione è di particolare instabilità.

Questa definizione del numero di Froude ipotizza che ci sia una distribuzione uniforme di velocità nella sezione. Per un canale simmetrico, rettangolare, triangolare, trapezoidale, ecc., questo presupposto si realizza, ma nel caso di un canale naturale, con sezioni irregolari e aree golenali, l'espressione data non è più valida e non può essere rigorosamente utilizzata per determinare il tipo di moto; in questo caso sarebbe più corretto utilizzare dei numeri di Froude particolari, che tengano conto delle variazioni geometriche, di velocità e di portata.

La ricerca di questi particolari numeri di Froude va effettuata caso per caso, consultando eventualmente la letteratura esistente. Il modello, comunque, effettua al suo interno le necessarie approssimazioni e ridefinizioni del valore di questo parametro.

### Altezza critica

L'altezza critica è una caratteristica molto importante per il moto, dato che, come già accennato, rappresenta un criterio per discriminare i vari regimi di moto.

Il moto che si sviluppa con un'altezza pari, o vicina, all'altezza critica è chiamato moto critico; questa situazione è molto instabile poiché una piccola variazione di energia specifica causa grandi variazioni di livello.

L'energia specifica  $E$  di una sezione trasversale è l'energia riferita al punto più basso del tratto in esame; è quindi la somma della profondità  $Y$  e del termine cinetico  $V^2/2g$ :

$$E = Y + \frac{V^2}{2g}$$

La determinazione dell'altezza critica viene complicata dalla distribuzione delle velocità che ci si trova ad avere in sezioni irregolari, associate a flusso nelle golene. Il contributo cinetico nell'equazione dell'energia specifica deve quindi essere corretto tramite un moltiplicatore  $\alpha$  di Coriolis. Si ha quindi:

$$E = Y + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (0)$$

In HEC-RAS, l'altezza critica relativa ad una sezione viene determinata ricercando il minimo dell'energia specifica. La ricerca viene fatta con un procedimento iterativo partendo da un valore  $WS$  di primo tentativo al quale ne consegue un valore di energia specifica dato dalla (0), che verrà poi corretto fino alla determinazione del  $WS$  in grado di garantire il minimo valore di  $E$ .

HEC-RAS può calcolare l'andamento di profili subcritici e supercritici. Viene però richiesto all'utente di specificare il regime di moto all'atto del setup dell'applicazione.

### Procedure di calcolo per simulazioni in moto permanente

#### *Ricostruzione del campo di moto in una sezione trasversale*

Per trovare il valore del coefficiente  $\alpha$  relativo a una sezione naturale, o comunque irregolare, è necessario conoscere come si suddivide la portata, ossia quanta fluisce nel canale propriamente detto e quanta nelle zone golenali. Viene a questo scopo utilizzata l'equazione di Manning:

$$V = \frac{1.486}{n} A R^{2/3} J_f^{1/2}$$

$$Q = VA = \frac{1.486}{n} A R^{2/3} J_f^{1/2}$$

Ponendo quindi:  $K = \frac{1.486}{n} A R^{2/3}$  si ha che:  $Q = K J_f^{1/2}$

che viene scritta per ognuna delle i-esime sezioni considerate.

In HEC-RAS, il raggio idraulico R di una sub area è calcolato dividendo l'area per il perimetro bagnato. Il confine d'acqua immaginario tra due sub aree viene trascurato.

Tramite alcuni passaggi si trova che:  $\alpha = \frac{(\sum A_i)^2 (\sum K_i^3 / A_i^2)}{(\sum K_i)^3}$

#### Distribuzione delle pressioni in una sezione trasversale

Come già detto, una delle ipotesi di base nel calcolo del profilo da parte di HEC-RAS è la distribuzione idrostatica delle pressioni. Si può assumere che la pressione sia idrostatica in un fluido in movimento se le linee di corrente sono essenzialmente dritte e parallele. La maggior parte dei canali naturali con moto gradualmente vario rispetta queste condizioni, non rispettate invece nel caso di moto rapidamente vario.

#### Distribuzione delle velocità in senso trasversale alla corrente

La libreria di algoritmi di simulazione idraulica in dotazione al modello HEC-RAS include la possibilità di analizzare la distribuzione delle velocità della corrente all'interno di una stessa sezione trasversale, eliminando la limitazione della teorica del moto unidimensionale che prevede, al contrario, l'imposizione di una unica velocità media caratteristica valida per l'intera sezione di deflusso.



LINEA MESSINA - CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
FIUMEFREDDO  
LOTTO 01

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	20 di 101

Rispetto ad un vero modello bidimensionale, tale l'algoritmo di calcolo utilizzato da HEC RAS comporta l'accettazione di una serie di semplificazioni, tra cui:

- la quota idrometrica risulterà comunque orizzontale;
- non vengono considerati gli effetti della forza centrifuga.

Vengono invece considerati gli effetti della variazione del raggio idraulico locale, e la differente scabrezza del perimetro bagnato.

Questa tecnica consente di ottenere, con una certa attendibilità specie nei tratti rettilinei, l'andamento della velocità al variare della posizione del punto lungo una direttrice trasversale alla corrente che deve essere intesa come velocità media sulla verticale.

Calcolo dei profili idraulici

Il calcolo dei profili idraulici avviene in due fasi tra loro intimamente collegate: bilancio dell'energia e conseguente calcolo del profilo.

#### Bilancio dell'energia

La perdita di energia fra due sezioni trasversali, prese perpendicolarmente al flusso, è la base per il calcolo del profilo idraulico. L'energia totale, in termini di altezza, è uguale alla somma dei contributi dovuti alla quota, alla pressione e al termine cinetico. Se  $\theta$  rappresenta la pendenza del fondo si ha che:

$$E = Z + d \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g}$$

Il termine  $\cos \theta$  è comunemente assunto uguale a 1 per canali naturali. Si può comprendere come comunque si compia un errore molto basso imponendo questa semplificazione considerando che per una pendenza di fondo di 1:10, molto elevata,  $\cos \theta$  è uguale a 0.99. L'errore compiuto in questo caso, definibile estremo, considerandolo uguale a 1 è del 1%, e quindi, nel complesso, trascurabile.

Con riferimento all'equazione dell'energia appena scritta, si può riscriverla nel caso sia applicata tra due sezioni:

$$Z_1 + Y_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + Y_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_e$$

o in altri termini:

$$E_1 = E_2 + h_e$$

L'energia totale nella sezione di monte  $E_1$  è quindi uguale all'energia della sezione di valle  $E_2$  più il termine di perdita di energia  $h_e$ . Questa equazione è usata in successione da HEC-RAS spostandosi per passi da una sezione all'altra, calcolando il profilo idraulico.

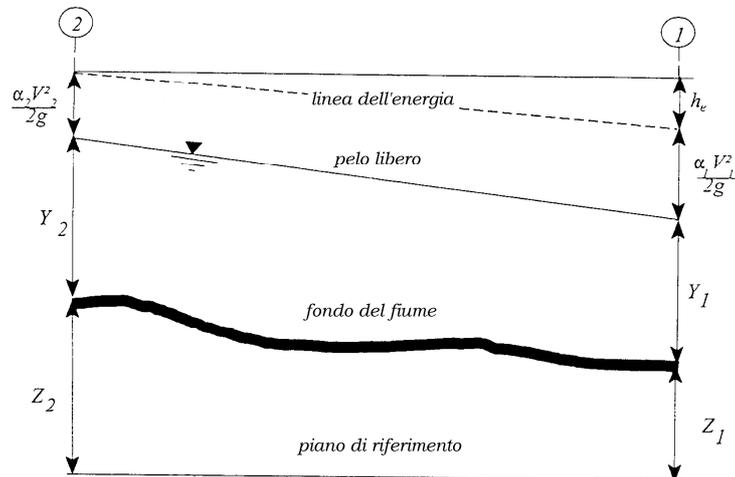
### 3.1.4.2 Calcolo del profilo a moto permanente

La determinazione del livello del pelo libero in ogni sezione è computato, nel caso di correnti lente, a partire dalla sezione di valle, risolvendo per via iterativa l'equazione della conservazione dell'energia totale, ossia:

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

Dove:  $Y_1$  e  $Y_2$  rappresentano rispettivamente le profondità del pelo libero della sezione di valle e di monte,  $Z_1$  e  $Z_2$  rappresentano rispettivamente le elevazione sul medio mare del fondo del canale della sezione di valle e di monte,  $V_1$  e  $V_2$  rappresentano rispettivamente le velocità medie nella sezione di valle e di monte,  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  i rispettivi coefficienti di Coriolis,  $g$  l'accelerazione di gravità e  $h_e$  le perdite di energia tra le due sezioni.

La Figura 2 mostra lo schema del bilancio di energia tra la sezione di valle e quella di monte; nella figura sono indicati i singoli termini di bilancio in accordo all'equazione (1).



**Figura 2 - Schema di calcolo per la determinazione del profilo liquido nei corsi d'acqua.**

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

$$h_e = L\bar{J} + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (2)$$

dove, con  $L$  è indicata la distanza tra le due sezioni, con  $\bar{J}$  le perdite di carico medie distribuite tra le due sezioni mentre il termine  $C$  correla le perdite, dovute all'espansione ed alla contrazione della vena in funzione dell'andamento piano – altimetrico del corso d'acqua, alla differenza dei carichi cinetici delle due sezioni.

Per la valutazione delle perdite di carico è utilizzata la formula di Manning, ossia:

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} \sqrt{J} \quad (3)$$

dove:  $Q$  rappresenta la portata,  $A$  l'area bagnata,  $R_H$  il raggio idraulico,  $n$  il coefficiente di scabrezza secondo Manning e  $J$  le perdite di energia per unità di lunghezza.

Nel caso di sezioni composte, tipiche dei corsi d'acqua naturali, è necessario suddividere la sezione in parti in modo da trattare separatamente sezioni in cui la velocità media può essere ritenuta, ai fini pratici, costante (Figura 3).

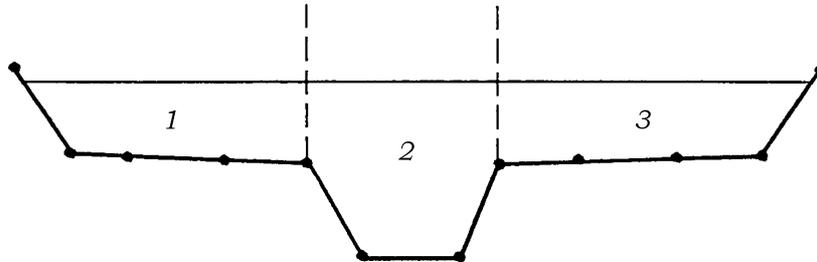


Figura 3 - Sezione schematica di un corso d'acqua naturale.

Con riferimento alla Figura 3 chiamato con  $K_i = Q_i / \sqrt{J}$  la capacità di portata di ogni singola parte  $i$ -esima in cui è stata suddivisa la sezione, si ha, in accordo alla formula di Manning:

$$K_i = \frac{1}{n_i} A_i R_{h,i}^{2/3} \quad (4)$$

Calcolata la capacità di portata per ogni singola parte in cui è stata suddivisa la sezione, la perdita di carico per unità di lunghezza  $J$  risulta pari a:

$$J = \left( \frac{Q}{\sum_i K_i} \right)^2 \quad (5)$$

Questo risultato può essere facilmente ricavato osservato che, per la costanza di  $J$ , la portata di ogni singola area  $Q_i = K_i \sqrt{J}$  è proporzionale al rispettivo coefficiente di portata e che la portata totale vale  $Q = \sum_i Q_i$ .

Calcolata la perdita di carico in corrispondenza della sezione 1 e della sezione 2 la pendenza media della linea dell'energia tra le due sezioni e fornita dalla seguente equazione:

$$\bar{J} = \frac{J_1 + J_2}{2} \quad (6)$$

Calcolata la capacità di portata di ogni singola sezione, è possibile, da queste, valutare il coefficiente di Coriolis. Questo coefficiente è pari al rapporto tra l'energia cinetica reale della corrente, proporzionale a  $\sum_i Q_i^3 / A_i^2$ , e l'energia cinetica calcolata facendo uso del valore medio della velocità, proporzionale a  $Q^3 / A^2$ .

Esprese le portate delle singole parti i-esime in funzione del rispettivo coefficiente di portata si perviene con qualche semplice passaggio alla seguente espressione:

$$\alpha = \frac{\left( \sum_i \frac{K_i^3}{A_i^2} \right) \left( \sum_i A_i \right)^2}{\left( \sum_i K_i \right)^3} \quad (7)$$

dal cui calcolo è possibile ottenere  $\alpha$ , il coefficiente di Coriolis.

Calcolate tramite le rispettive equazioni le perdite di energia  $h_e$  ed il coefficiente di Coriolis  $\alpha$  la (1), associata all'equazione di continuità, permette di calcolare la quota del pelo libero,  $Y_2 + Z_2$ , nella sezione di monte a partire dal valore dell'energia totale,  $Y_1 + Z_1 + \alpha_1 V_1^2 / 2g$ , noto in corrispondenza della sezione di valle.

Essendo la (1) un'equazione non lineare, la soluzione è ottenuta con ciclo iterativo, a partire da una soluzione iniziale, approssimata, di primo tentativo.

### 3.1.4.3 Equazione della conservazione della quantità di moto

L'equazione della conservazione dell'energia totale (1) ha validità solo nel caso di correnti variabili lentamente all'interno del ramo in esame. In particolare essa è stata applicata nel caso di corrente ovunque subcritiche o supercritiche. Qualora all'interno di un ramo si verificasse il passaggio da corrente lenta a veloce si è utilizzata l'equazione della conservazione del momento.

Applicando la seconda legge di Newton  $\sum F_x = ma$ , con x la direzione del moto, ad un elemento di fluido tra due sezioni 1-2, fig. 4, per equilibrio si ottiene:

$$P_2 - P_1 + W_x - F_f = Q\rho\Delta V_x \quad (8)$$

dove:

$P_i$ , risultante della pressione idrostatica;

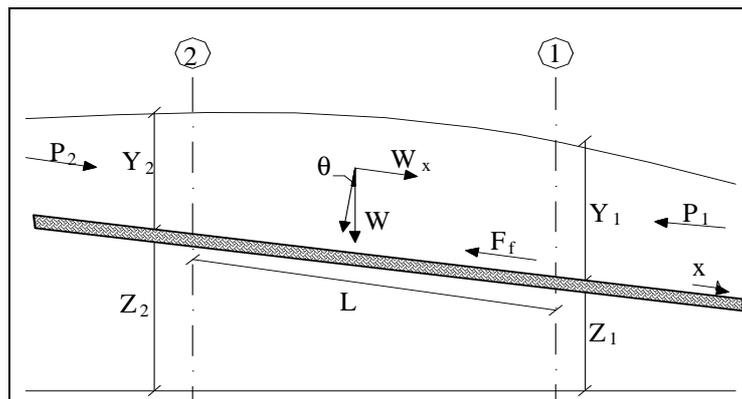
$W_x$ , componente della forza peso nella direzione del moto;

$F_f$ , forza d'attrito tra le due sezioni;

$Q$ , portata complessiva;

$\rho$ , densità del fluido;

$\Delta Vx$ , variazione della velocità tra le due sezioni.



**Figura 4 – Schema di calcolo**

La risultante della pressione idrostatica per pendenze dell'ordine di 1 a 10 è valutabile come

$$P = \gamma \bar{A} \bar{Y} \cos \theta \cong \gamma \bar{A} \bar{Y} \quad (9)$$

potendo porre, per le pendenze in esame,  $\cos \theta = 1$ .

Nella relazione (9)  $\gamma$  corrisponde al peso specifico del fluido,  $A$  l'area della sezione ed  $\bar{Y}$  l'altezza del pelo libero nel baricentro della sezione.

La componente della forza peso, noto il peso specifico del fluido, la lunghezza  $L$  del tronco e l'area totale di fluido presente, è stata valutata nel modo seguente:

$$W = \gamma \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) \cdot L \Rightarrow W_x = W \cdot \sin \theta \quad (10)$$

La forza d'attrito  $F_f$  è funzione delle caratteristiche del fluido come la densità dell'acqua, l'azione tangenziale che si esplica sul letto del fiume e la cadente piezometrica  $J$ .

In particolare, scriviamo:

$$F_f = \tau PL$$

$$\tau = \gamma R J \Rightarrow F_f = \gamma \frac{A}{P} J PL = \gamma \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) \cdot JL \quad (11)$$

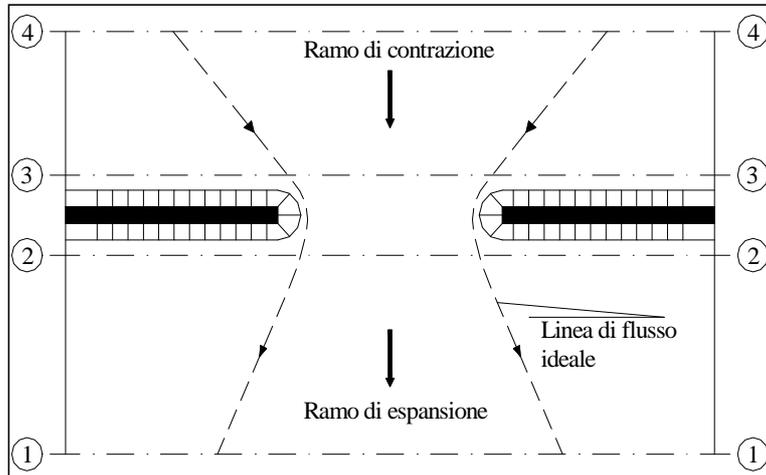
dove  $P$  ed  $R$  sono rispettivamente il perimetro bagnato ed il raggio idraulico della sezione.

La soluzione dell'equazione (8) è stata fatta per iterazioni successive.

Le equazioni (1) e (8) sono state applicate anche alle sezioni caratterizzate dalla presenza di un ponte. E' stato sufficiente suddividere il tratto interessato in più sezioni e ripetere per la successione di esse l'analisi svolta per il tratto delimitato da sole due sezioni.

Prendendo un tratto caratterizzato dalla presenza di un ponte, fig. 5 e fig. 6, si evidenziano 3 zone:

- una zona di contrazione in cui arriva la corrente;
- una zona intermedia interessata dalla presenza del ponte;
- una zona di espansione in cui esce la corrente.



**Figura 5 – Pianta schematica di un attraversamento fluviale**

L'applicazione dell'equazione della conservazione del momento tra le sezioni 1-2 e 3-4 è del tutto analoga alla situazione vista in precedenza mentre la presenza del ponte comporta termini nuovi nella valutazione dell'equilibrio tra le sezioni 2-BD (Step 1), BD-BU (Step 2) ed BU-3 (Step 3).

Step 1; definendo con  $A_{pi}$  l'area ostruita ed con  $Y_{pi}$  la distanza verticale che intercorre tra il baricentro delle pile e la superficie libera WS nella zona di valle, l'espressione del bilancio è stata scritta come

$$\frac{Q_{BD}^2 \beta_{BD}}{g A_{BD}} + A_{BD} Y_{BD} = \frac{Q_2^2 \beta_2}{g A_2} + A_2 Y_2 - A_{P_{BD}} Y_{P_{BD}} + F_f - W_x$$

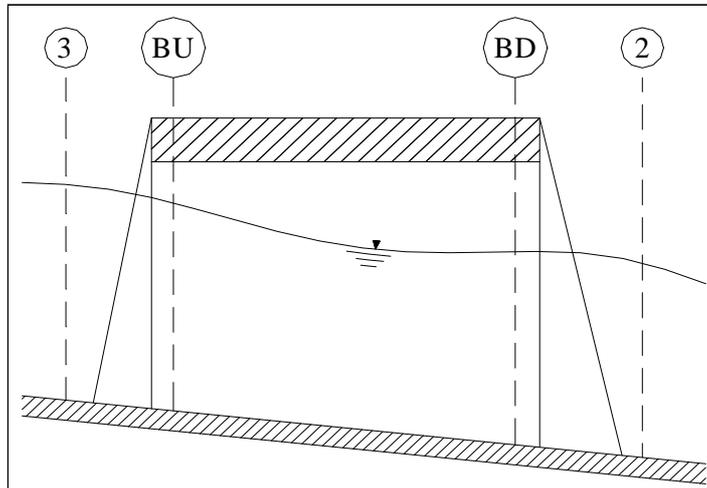
Step 2 ; equilibrio tra BU e BD

$$\frac{Q_{BD}^2 \beta_{BD}}{g A_{BD}} + A_{BD} Y_{BD} + F_f - W_x = \frac{Q_{BU}^2 \beta_{BU}}{g A_{BU}} + A_{BU} Y_{BU}$$

Step 3 ; equilibrio tra BU e 3

$$\frac{Q_3^2 \beta_3}{g A_3} + A_3 Y_3 = \frac{Q_{BU}^2 \beta_{BU}}{g A_{BU}} + A_{BU} Y_{BU} - A_{P_{BU}} Y_{P_{BU}} + F_f - W_x + \frac{1}{2} C_D \frac{A_{P_{BU}} Q_3^2}{g A_3^2}$$

con  $C_D$  coefficiente di resistenza idrodinamica intorno alla pila ricavabile dalla tab. 2 in funzione del tipo di pila presente.



**Figura 6 – Sezione schematica di un attraversamento fluviale**

<b>TIPO DI PILA</b>	<b>C<sub>D</sub></b>
Pila circolare	1.2
Pila allungata con punta semicircolare	1.33
Pila ellittica con rapporto assi 2 :1	0.6
Pila ellittica con rapporto assi 4 :1	0.32
Pila ellittica con rapporto assi 8 :1	0.29
Pila rettangolare	2.00
Pila triangolare con apertura $\alpha = 30^\circ$	1.00
Pila triangolare con apertura $\alpha = 60^\circ$	1.39
Pila triangolare con apertura $\alpha = 90^\circ$	1.60
Pila triangolare con apertura $\alpha = 120^\circ$	1.72

**Tabella 2 – Coefficiente di resistenza idrodinamico C<sub>D</sub>**

#### 3.1.4.4 Equazione di Yarnell

In alternativa all'equazione della conservazione del momento si è utilizzata l'equazione di Yarnell che permette di valutare le perdite di energia localizzate in corrispondenza di un ponte.

Con riferimento alle fig. 5 e 6, le perdite di energia tra le sezioni 2 e 3 sono state valutate nel modo seguente:

$$H_{3-2} = 2K(K + 10\omega - 0.6) \cdot (\alpha + 15\alpha^4) \cdot \frac{V_2^2}{2g} \quad (12)$$

dove  $H_{i-j}$  rappresenta appunto la perdita di energia nel passaggio della corrente attraverso la sezione ostruita e  $K$ , coefficiente di Yarnell, tiene conto delle differenti sagome di pila esistenti;

TIPO DI PILA	K
Pila semicircolare in punta	0.9
Pila cilindrica doppia collegata con diaframma	0.95
Pila cilindrica doppia senza diaframma	1.05
Pila con punta triangolare $\alpha = 90^\circ$	1.05
Pile rettangolari	1.25
Dieci pile a cavalletto inclinate	2.5

**Tabella 3 – Coefficiente di Yarnell**

$\omega$  rappresenta il rapporto tra la velocità e l'altezza della sezione 2;  $\alpha$  il rapporto tra l'area ostruita dalle pile e l'area totale ed infine  $V_2$  la velocità a valle della sezione.

Il modello elaborato prevede una corrente con un'altezza idrica minore dell'altezza di intradosso del ponte. Nel caso di correnti con altezza idrica superiore o eguale alla quota di intradosso dell'attraversamento fluviale, la valutazione delle perdite di energia è effettuata attraverso il calcolo della portata che attraversa la sezione. In particolare, in riferimento ad un caso generico, fig. 7, la portata è calcolata nel modo seguente:

$$Q = C_d A_1 \left[ 2g \left( Y_1 - \frac{Z}{2} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) \right]^{1/2} \quad (13)$$

dove:

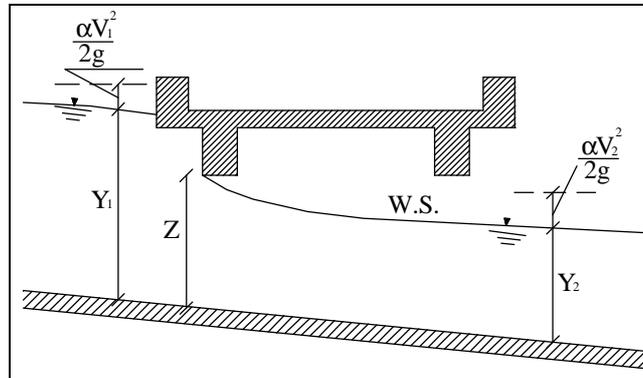
$C_d$ , coefficiente di deflusso il cui andamento è riportato nel grafico di fig. 8, assumendo valori tra 0.27 e 0.5;

$A_1$ , area della luce nella sezione di monte;

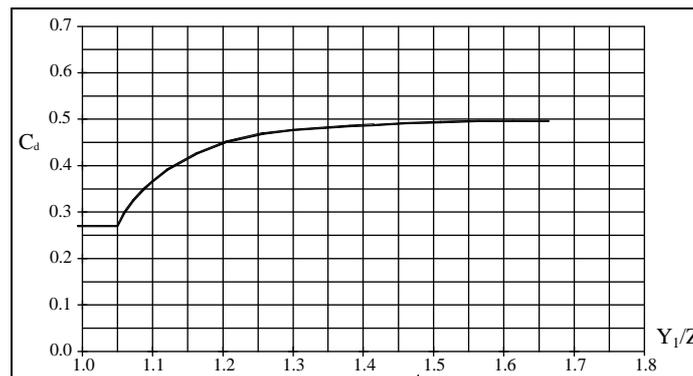
$Y_1$ , altezza idrica della sezione di monte;

$\alpha$ , coefficiente correttivo cinetico;

$V_1$ , velocità della corrente a monte.



**Figura 7 – Sezione schematica di un ponte – Schema di calcolo**



**Figura 8 – Diagramma per la stima del coefficiente di deflusso Cd**

Se il ponte è in pressione sia a monte che a valle l'equazione (13) è corretta nel modo seguente:

$$Q = CA\sqrt{2gH}$$

dove  $C$  assume il valore di 0.8 ed  $H$  coincide con la perdita di energia totale tra la sezione di monte e di valle del ponte come indicato in fig.9.

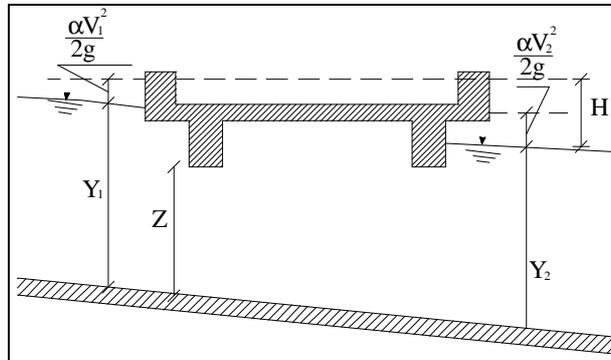


Figura 9 –Sezione schematica di un ponte – Schema di calcolo

Infine se il ponte è superato dalla corrente di piena, fig. 10, la portata si calcola nel modo seguente:

$$Q = CLH^{2/3}$$

con  $C$  si indica un coefficiente correttivo della portata,  $L$  la lunghezza del ponte ed  $H$  la differenza di energie tra monte e valle.

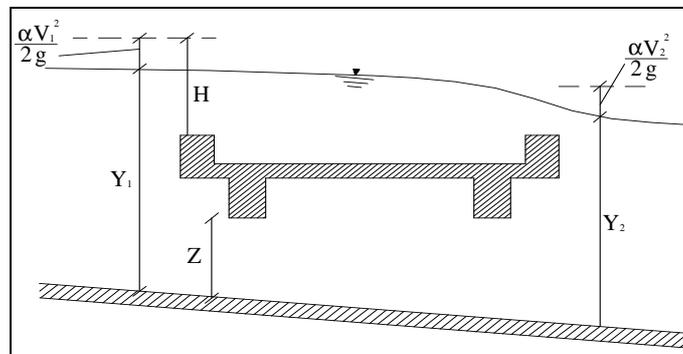
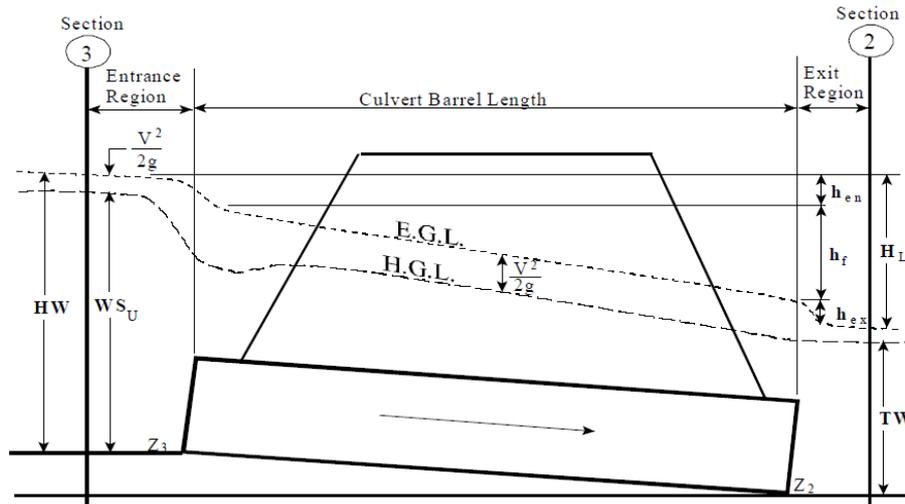


Figura 10 – Sezione schematica di un ponte – Schema di calcolo

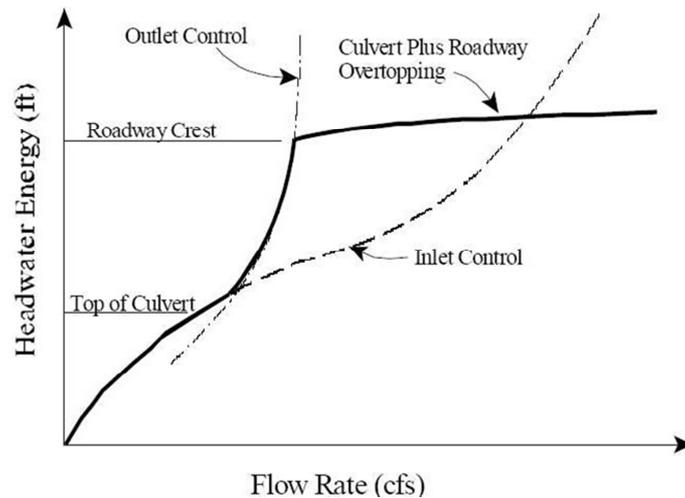
### 3.1.4.5 Calcolo del rigurgito dovuto ai tombini/ponticelli

L'analisi del deflusso attraverso un tombino si basa sul concetto di controllo all'imbuco o allo sbocco.



**Figura 11 – Schema idraulico tombino/ponticello.**

Il deflusso secondo il controllo all'imbocco si verifica quando la capacità di deflusso all'entrata del tombino è inferiore a quella interna. La sezione di controllo è collocata subito a valle dell'imbocco della struttura. L'altezza d'acqua passa per il livello critico e il regime di deflusso risulta essere rapido. L'energia richiesta a monte viene calcolata assumendo che l'imbocco del tombino agisca come uno stramazzo; di conseguenza il profilo che si ottiene secondo tale approccio dipende principalmente dalla geometria dell'entrata.



**Figura 12 – Diagramma di funzionamento del tombino/ponticello.**

Il deflusso secondo il controllo allo sbocco si verifica quando la capacità di deflusso viene limitata dalle condizioni che si instaurano a valle o dalle caratteristiche geometriche della struttura. In linea generale il livello di energia

determinato a monte controlla il tipo di deflusso nel tombino, data la portata a monte e il livello a valle. Per il controllo allo sbocco l'energia di monte viene calcolata effettuando un bilancio di energia dalla sezione di valle a quella di monte. Il modulo considera le perdite di ingresso, quelle di uscita e quelle per attrito all'interno della struttura.

### Calcolo del livello all'imbocco

Per quanto riguarda il controllo all'imbocco, la capacità della struttura è limitata dall'apertura del tombino, piuttosto che dalle condizioni che si instaurano a valle. Per il calcolo del livello vengono utilizzate le equazioni ricavate dal National Bureau of Standards e pubblicate nel "Hydraulic Design of Highway Culverts" (FHWA, 1985). Le equazioni sono:

Deflusso libero:

$$\frac{HW_i}{D} = \frac{H_c}{D} + K \left[ \frac{Q}{AD^{0.5}} \right]^M - 0.5S$$

$$\frac{HW_i}{D} = K \left[ \frac{Q}{AD^{0.5}} \right]^M$$

Deflusso rigurgitato:

$$\frac{HW_i}{D} = c \left[ \frac{Q}{AD^{0.5}} \right]^2 + Y - 0.5S$$

Dove:  $HW_i$  livello dell'energia all'imbocco

$D$  altezza interna del tombino

$H_c$  altezza critica

$Q$  portata

$A$  area della sezione interna del tombino

$S$  pendenza

$K, M, c, Y$  costanti variabili con la geometria e le condizioni di ingresso.

### Calcolo del livello allo sbocco

Per il controllo allo sbocco l'energia richiesta a monte per consentire il deflusso deve essere computata considerando diverse condizioni nel tombino e a valle di esso. Hec-Ras usa l'equazione di Bernoulli per effettuare tale calcolo:

$$Z_3 + Y_3 + \frac{\alpha_3 V_3^2}{2g} = Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + H_L$$

- dove:  $Y_3, Y_2$  tirante d'acqua nelle sezioni di monte e di valle;  
 $Z_3, Z_2$  quota del fondo del tombino a monte e a valle;  
 $\alpha_3, \alpha_2$  coefficiente di Coriolis nella sezione 1 e 2;  
 $g$  accelerazione di gravità;  
 $H_L$  perdita di carico attraverso il tombino.

### Equazioni per il deflusso in pressione

Nel caso in cui si verifichi moto in pressione all'interno del tombino, la perdita totale di energia viene calcolata seconda la:

$$HL = h_{en} + h_f + h_{ex}$$

- Dove:  $h_{en}$  perdite in entrata  
 $h_f$  perdite per attrito  
 $h_{ex}$  perdite in uscita.

Le perdite per attrito vengono considerate mediante la formulazione di Manning:

$$h_f = L \left( \frac{Qn}{1.486AR^{3/2}} \right)^2$$

- Dove:  $h_f$  perdite per attrito

- $L$  lunghezza del tombino
- $Q$  portata
- $n$  coefficiente di scabrezza di Manning
- $A$  area della sezione di flusso
- $R$  raggio idraulico.

#### Perdite in entrata e uscita

Le perdite di ingresso sono calcolate come frazione del carico cinetico a monte, e analogamente per quelle di uscita, secondo il carico cinetico di valle. Tali coefficienti dipendono fortemente dalla geometria che caratterizza l'imbocco e lo sbocco dell'opera.

### 3.2 VERIFICA IDRAULICA OPERE

Gli attraversamenti principali della prima fase funzionale, oggetto delle seguenti verifiche idrauliche, vengono elencati nella tabella sottostante, dove viene riportato per ogni manufatto il codice identificativo, la progressiva chilometrica da profilo, il toponimo e la tipologia di manufatto.

Codice	Progressiva da profilo di progetto	Toponimo	Tipologia Manufatto
ID	Pk		
VI01	2 +962	Torrente Minissale	Ponte

**Tabella 4 – Manufatti di attraversamento della linea ferroviaria (FASE 01).**

Le simulazioni numeriche sono state condotte utilizzando un programma di calcolo monodimensionale a moto permanente che fornisce una adeguata rappresentazione del fenomeno, descrivendo le principali grandezze fisiche per ogni sezione idraulica di calcolo. Per la determinazione dei profili idrici nei corsi d'acqua sia nella situazione attuale, sia di progetto e per i diversi tempi di ritorno considerati è stato utilizzato il codice denominato HEC – RAS 4.1.0 River Analysis System del gennaio 2010, sviluppato dalla U.S. Army Corps of Engineers.



LINEA MESSINA - CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
FIUMEFREDDO  
LOTTO 01

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	36 di 101

Si riportano nei seguenti paragrafi le caratteristiche dei parametri implementati nei modelli numerici dei vari corsi d'acqua.

### 3.2.1 Geometria degli alvei

I modelli matematici sono stati sviluppati riproducendo la geometria degli alvei naturali mediante l'implementazione delle sezioni trasversali dei corsi d'acqua, ricavate utilizzando il rilievo celerimetrico di campagna e rilievo topografico realizzato con tecnica LIDAR dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, reperito dagli scriventi.

Tale rilievo, che permette di descrivere con altissima precisione e copertura spaziale le caratteristiche dell'area di indagine e delle aree limitrofe, consente l'applicazione della modellistica matematica e la successiva mappatura delle aree a rischio di allagamento. I dati grezzi sono trattati, mediante opportune procedure di classificazione ed analisi, per distinguere i punti "ground" (terreno) da quelli "over ground" (vegetazione, edifici, ecc.) e ricostruire così i modelli digitali del terreno (TIN) dell'area di indagine.

Per i corsi d'acqua per i quali non era disponibile la copertura LIDAR, la geometria dell'asta fluviale e le sezioni trasversali sono state ricavate a partire dalla cartografia in scala 1:5000 e 1:1000.

Ulteriori informazioni sono state reperite mediante specifici sopralluoghi, effettuati in data 26.03.14 e 27.03.14, nel corso dei quali sono state acquisite informazioni sullo stato degli alvei nell'area di studio e sulla geometria degli attraversamenti esistenti. Nelle pagine seguenti si riportano alcune delle foto effettuate durante i sopralluoghi.

In seguito alla campagna di rilievi celerimetrici di campo, le simulazioni idrauliche sono state elaborate in relazione alle effettive geometrie dei corsi d'acqua analizzati e delle opere interferite.

I corsi d'acqua oggetto di studio sono tutti a regime torrentizio caratterizzati da una notevole variazione delle portate nel corso dell'anno. Ovviamente la concomitanza di piene stagionali e di velocità elevate è legata ad una azione erosiva, viceversa nel periodo di magra si verificano fenomeni di sedimentazione.

### 3.2.2 Portate di progetto

Per ogni manufatto è stata utilizzata la portata di progetto determinata con la metodologia descritta nell'elaborato RS2S00D 78 R II D0001 001 A "Relazione idrologica" alla quale si rimanda, relativamente ad un tempo di ritorno di 200 o 300 anni a seconda dell'estensione del bacino sotteso.



LINEA MESSINA - CATANIA  
**PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
 FIUMEFREDDO**  
**LOTTO 01**

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	37 di 101

Codice	Progressiva da profilo di progetto	Tipologia Manufatto	Sezione calcolo idraulico	Corso d'acqua	Portata di piena	Tempo di Ritorno
ID	Pk		ID		Q [mc/s]	Tr [anni]
VI01	2 +962	Ponte	A	Vallone Minissale	897,60	300

**Tabella 5 – Portate di progetto per la verifica degli attraversamenti maggiori della Fase 01.**

### 3.2.3 Taratura dei modelli

Come per ogni modello matematico, anche nel caso del modello monodimensionale HEC-RAS la taratura ricopre un aspetto particolarmente delicato.

Il modello dovrebbe cioè essere tarato e validato prima di essere usato a scopo revisionale. In questo caso la taratura del modello numerico consiste nella valutazione dei coefficienti di scabrezza da adottare nelle differenti sezioni.

Tale operazione è caratterizzata da un notevole grado di incertezza dal momento che questi parametri presentano un ampio spettro di valori in dipendenza dello stato dell'alveo, dal grado di manutenzione e pulizia detto stesso, dalla presenza e dal tipo di vegetazione, dai cicli stagionali, dalla granulometria del fondo, ecc.

La relazione di piano del PAI della Sicilia per il bacino idrografico del torrente Fiumedinisi riporta una tabella riepilogativa (Chow, 1959) per la scelta del coefficiente di Manning in funzione delle condizioni dell'alveo (Tabella 6).

Nella valutazione dei coefficienti di scabrezza occorre tener presente che questi sono comunque suscettibili di modificazioni per tenere conto degli effetti dissipativi legati a:

- perdite localizzate prodotte dall'interazione della corrente con irregolarità geometriche come presenza di ostacoli di vario genere, espansioni brusche, incisioni nelle golene, brusche variazioni di larghezza;
- perdite energetiche dovute alla modificazione del fondo dell'alveo, alla risospensione e trasporto solido, allo sradicamento e al trasporto di materiale vegetale.

Si preferisce dunque optare per dei coefficienti di scabrezza che tengano mediamente conto (vista la grande variabilità dei parametri) delle condizioni ambientali e restino moderatamente a favore di sicurezza.

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	38 di 101

<b>A. CORSI D'ACQUA NATURALI</b> <i>Corsi d'acqua minori (tirante inferiore a 3,5m)</i>			
<b>1. Corsi d'acqua di pianura</b>			
a. Puliti, rettilinei, in piena senza scavi localizzati	0.025	0.030	0.033
b. Puliti, rettilinei, in piena senza scavi localizzati, con sassi e sterpaglia	0.030	0.035	0.040
c. Puliti, ondulati, con alcune buche e banchi	0.033	0.040	0.045
d. Puliti, ondulati, con alcune buche e banchi, con cespugli e pietre	0.035	0.045	0.050
e. Puliti, ondulati, con alcune buche e banchi, in magra	0.040	0.048	0.055
f. Puliti, ondulati, con alcune buche e banchi, con cespugli e più pietrame	0.045	0.050	0.060
g. Tratti lenti, sterpaglia e buche profonde	0.050	0.070	0.080
h. Tratti molto erbosi, buche profonde e grossi arbusti e cespugli	0.070	0.100	0.150
<b>2. Aree golenali</b>			
a. A pascolo senza vegetazione arbustiva	0.025	0.030	0.050
b. Aree coltivate	0.020	0.035	0.050
c. Con vegetazione arbustiva spontanea	0.035	0.070	0.160
d. Con vegetazione arborea coltivata	0.030	0.060	0.120
<b>3. Corsi d'acqua montani, senza vegetazione in alveo, sponde ripide alberi e cespugli lungo le sponde sommergibili durante le piene</b>			
a. Fondo: ghiaia, ciottoli e massi sparsi	0.030	0.040	0.050
b. Fondo: ciottoli e massi grossi	0.040	0.050	0.070
<b>B. CANALI ARTIFICIALI</b>			
<b>1. Canali in terra lisciata ed uniforme</b>			
a. Puliti, scavata di recente	0.016	0.018	0.020
b. Puliti, dopo prolungata esposizione	0.018	0.022	0.025
c. Ghiaia, sezione uniforme, pulita	0.022	0.025	0.030
d. Erba corta, pochi cespugli	0.022	0.027	0.033
<b>2. Canali in terra con ondulazioni o irregolari</b>			
a. Senza vegetazione	0.023	0.025	0.030
b. Con erba e pochi cespugli	0.025	0.030	0.033
c. Cespugli o piante acquatiche in canali profondi	0.030	0.035	0.040
d. Fondo in terra e sponde in pietrisco	0.028	0.030	0.035
e. Fondo in pietrame e sponde in cespugli	0.025	0.035	0.040
f. Fondo in ciottoli e sponde pulite	0.030	0.040	0.050
<b>3. Canali scavati o dragati</b>			
a. Senza vegetazione	0.025	0.028	0.033
b. Cespugli sparsi sulle sponde	0.035	0.050	0.060
<b>4. Canali in roccia</b>			
a. Lisci ed uniformi	0.025	0.035	0.040
b. Frastagliati ed irregolari	0.035	0.040	0.050
<b>5. Canali senza manutenzione, sterpaglia e cespugli</b>			
a. Sterpaglia densa, alta quanto il tirante idrico	0.040	0.050	0.080
b. Fondo pulito cespugli sulle sponde	0.045	0.070	0.110
c. Fondo pulito, cespugli sulle sponde, in piena	0.050	0.080	0.120
d. Cespugli densi ed acque profonde	0.080	0.100	0.140

Tabella 6 - Tabella riepilogativa per la scelta del coefficiente di Manning (Chow, 1959).

### 3.2.4 Rappresentazione dei risultati delle simulazioni numeriche

Per ogni corso d'acqua i risultati delle simulazioni sono riassunti in una tabella contenente:

- sezione di riferimento (*River station*);
- tempo di ritorno (*Profile*);
- portata ( $Q\ Total - m^3/s$ );
- distanza parziale tra le sezioni in asse (*Length Chanel- m*);
- quota assoluta del punto più depresso della sezione (*Min Ch El – m s.m.m.*);
- quota assoluta del pelo libero (*W.S. Elev - m s.m.m.*);
- quota assoluta del livello critico (*Crit W.S. - m s.m.m.*);
- quota assoluta del livello energetico (*E.G. Elev - m s.m.m.*);
- cadente energetica (*E.G. Slope – m/m*);
- velocità media nel canale (*Vel Chnl – m/s*);
- area della sezione fluida (*Flow area – m<sup>2</sup>*);
- larghezza del pelo libero (*Top Width - m*);
- numero di Froude (*Froude Channel*);
- tensione di trascinamento (*Shear Total – N/ m<sup>2</sup>*);
- contorno bagnato (*W.P. Total - m*).

In accordo con il manuale di progettazione Italferr la verifica idraulica degli attraversamenti maggiori prevede:

- la verifica del franco di progetto, il valore minimo tra l'intradosso dell'opera e la quota del carico idraulico totale corrispondente al livello idrico di massima piena deve essere pari a 0.50 m e comunque non inferiore ad 1.5 m sul livello idrico;
- ogni tipo di manufatto idraulico deve essere verificato utilizzando un diverso tempo di ritorno sulla base dell'estensione del bacino. Per bacini con una superficie inferiore ai 10 km<sup>2</sup> la verifica deve essere condotta per una portata associata ad un tempo di ritorno pari a 200 anni, per quelli con un'estensione superiore ai 10 km<sup>2</sup> per un tempo di ritorno pari a 300 anni.

In accordo con le norme NTC e relativa circolare applicativa la verifica idraulica degli attraversamenti maggiori prevede:

- la verifica del franco di progetto non inferiore ad 1.5 m sul livello idrico corrispondente alla piena con  $T_R$  200 anni;

- scavalco completo dell'alveo attivo;
- la verifica che il dislivello tra fondo e sottotrave dell'opera sia non inferiore a  $6\div 7$  m, qualora sussista il rischio di trasporto di alberi d'alto fusto.

Gli elaborati grafici allegati alla presente relazione (Appendice A) riportano i seguenti risultati:

- geometria del modello;
- profilo idrico longitudinale di rigurgito;
- sezioni trasversali con livelli idrici ed energetici.

Di seguito si riportano le implementazioni numeriche ed i risultati dei modelli matematici sviluppati per ogni corso d'acqua.

### **3.3 TORRENTE MINISSALE**

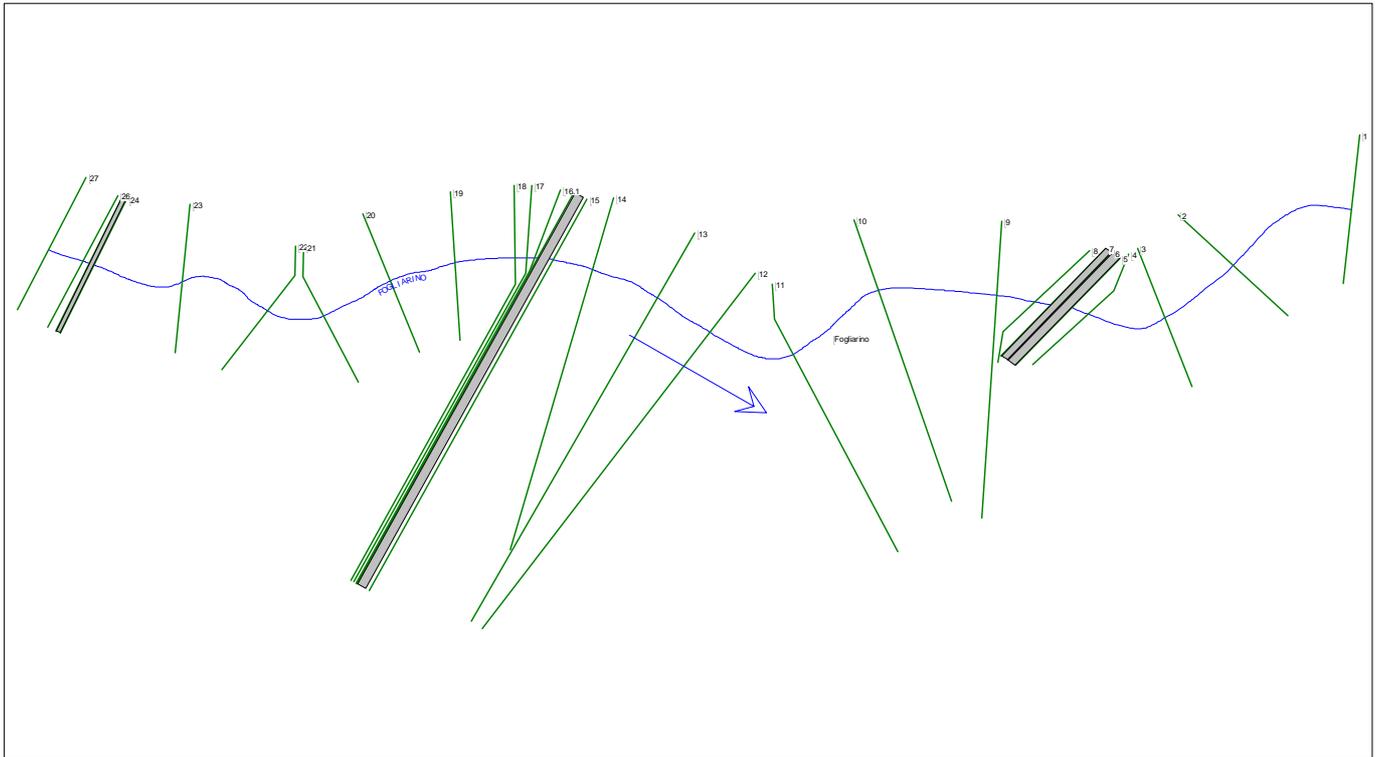
#### **3.3.1 *Messa a punto del modello idrodinamico monodimensionale***

##### **3.3.1.1 Schematizzazione del corso d'acqua**

Allo scopo di indagare la reale configurazione delle aree, è stato messo a punto un modello idrodinamico monodimensionale, a cavallo dell'interferenza ferroviaria in progetto, esteso al tratto di torrente che si sviluppa per circa 1,9 Km a valle dall'autostrada A18.

L'alveo del corso d'acqua, caratterizzato da una larghezza pressoché costante costituito, dal canale di magra e dalle sue aree golenali di espansione, è stato modellato con approccio monodimensionale attraverso l'inserimento delle sezioni trasversali e delle geometrie degli attraversamenti ferroviari e stradali presenti lungo il tratto simulato.

Nella sottostante Figura 13 è riportata una rappresentazione schematica generale che illustra l'estensione planimetrica del modello numerico applicato nel presente studio.



**Figura 13– Rappresentazione generale dell'estensione planimetrica del modello**

### 3.3.1.2 Geometria del modello

La geometria del modello di calcolo per lo stato di fatto (ante operam) è stata implementata con 28 sezioni trasversali ed è stata realizzata integrando le sezioni topografiche, appositamente rilevate in corrispondenza di punti di particolare interesse lungo il corso d'acqua, a monte/valle degli attraversamenti ferroviari e stradali e in zone ritenute critiche sulla base dei sopralluoghi preventivamente condotti, con le sezioni trasversali d'alveo ricavate sia dai dati LIDAR che dalla cartografia tecnica regionale. La quota di fondo alveo, di queste ultime, è stata opportunamente corretta tenendo conto delle informazioni ricavate dai rilievi topografici eseguiti, più recenti, appositamente per il presente lavoro.

I manufatti sono stati rappresentati nell'ambito del modello con strutture sia di tipo "Bridge" che di tipo "Culvert" di forma geometrica variabile secondo i rilievi effettuati sull'infrastruttura stessa.

La geometria di calcolo dello scenario di progetto (post operam) è stata costruita a partire da quella dello stato di fatto, inserendo nelle sezioni di interesse il nuovo manufatto (ponte) del tipo “Bridge”.

Nell’elaborato grafico RS2S01D78P6ID0001001B “*Torrente Minissale - Planimetria ante e post operam con aree di esondazione Tr 300 anni*” è riportata la traccia planimetrica delle sezioni idrauliche considerate nelle simulazioni.

I manufatti di attraversamento fluviale presenti lungo il tratto d’asta indagato e considerate nelle simulazioni sono:

- l’attraversamento stradale ubicato subito a valle dell’autostrada A18;
- il viadotto ferroviario in progetto;
- il ponte ferroviario esistente sulla Catania-Messina;
- il ponte della strada statale S.S. 114.

La portata di progetto corrispondente ad un tempo di ritorno di **300** anni ha un valore di **897,60** m<sup>3</sup>/s.

Le immagini seguenti riportano alcune delle foto effettuate durante i sopralluoghi sul vallone Minissale.



Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	43 di 101





**Figura 14– Alcune evidenze fotografiche dello stato dell’alveo del vallone Minissale e delle opere interferenti**

### 3.3.1.3 Scabrezza idraulica

Il modello di simulazione oltre alla descrizione geometrica e alle condizioni al contorno, descritte nel paragrafo seguente, ha bisogno di un altro parametro quale il coefficiente di scabrezza che rappresenta, all’interno delle equazioni del moto, il parametro che regola le perdite di energia distribuite, in primo luogo quelle per attrito sul fondo di scorrimento e sulle sponde dell’alveo attivo.

Molti sono i fattori che influenzano la scabrezza di un corso d’acqua. Tra essi i maggiori responsabili sono le caratteristiche granulometriche dell’alveo, la geometria delle sezioni trasversali (grado irregolarità), il profilo longitudinale (pendenza e forme di fondo), l’andamento planimetrico (tipo di meandri). Il valore “n” di Manning è un parametro che descrive la scabrezza di un corso d’acqua, ovvero la resistenza al moto. Il valore che assume



LINEA MESSINA - CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
FIUMEFREDDO  
LOTTO 01

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	45 di 101

dunque dipende dalla rugosità della superficie su cui scorre l'acqua, dal tipo di vegetazione, dalle irregolarità del canale, dalla presenza di ostacoli, dalla granulometria dei sedimenti, ecc.

Questo valore è direttamente proporzionale alla resistenza al moto, con valori che oscillano tra  $0,012 \text{ [m}^{1/3}/\text{s]}$  quando la resistenza è molto bassa (ad esempio superfici in acciaio) e  $0,50 \text{ [m}^{1/3}/\text{s]}$  per alvei nel cui fondo sono presenti grossi ciottoli.

Per ogni sezione trasversale è possibile assegnare tre valori di  $n$ , rispettivamente per la golena sinistra, il canale di magra e la golena destra. Per rendere la simulazione più reale possibile, il valore di scabrezza è stato scelto in seguito a sopralluoghi, dalle analisi delle ortofoto e dal tipo di superficie presente nelle varie sezioni trasversali.

Nelle simulazioni in esame, in funzione dello sviluppo più o meno rigoglioso della vegetazione e della tortuosità dell'alveo, si è considerato in generale un valore medio del coefficiente di scabrezza di Manning. I sopralluoghi hanno evidenziato la presenza di una folta vegetazione in corrispondenza delle aree golenali e un notevole deposito di ciottoli e ghiaia nell'alveo inciso pertanto i coefficienti di Manning utilizzati nella modellazione sono:

- $0,07 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  per l'alveo inciso;
- $0,09 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  per le aree golenali.

#### 3.3.1.4 Condizioni al contorno

Per quanto riguarda l'imposizione delle condizioni al contorno (Steady Flow Boundary Conditions), non avendo altri dati a disposizione, le condizioni imposte, oltre al valore di portata a monte, sono state l'altezza critica (Critical Depth) sia nella sezione di valle che in quella di monte. Le simulazioni numeriche, quindi, sono state condotte in condizione di "mixed flow".

#### 3.3.2 Risultati delle simulazioni

Definito il modello idrodinamico per il tratto di torrente individuato, si sono effettuate le verifiche idrauliche per i due regimi di calcolo ipotizzati.



LINEA MESSINA - CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
FIUMEFREDDO  
LOTTO 01

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	46 di 101

Il bacino oggetto di studio risulta avere una superficie di 82,18 km<sup>2</sup>, pertanto, in accordo con il manuale di progettazione ferroviaria, la verifica idraulica viene condotta con riferimento ad un evento di tempo di ritorno pari a 300 anni.

L'alveo del torrente risulta essere notevolmente inciso e, sulla base di quanto emerge dalla simulazione idraulica ante operam, le portate sono sempre contenute nell'alveo, ad eccezione della zona in prossimità del futuro attraversamento in progetto e a valle di questa. Infatti, a partire dalla sezione 19 del modello, si evidenzia un'ampia zona di esondazione in destra idraulica.

Per analizzare la condizione post operam è stato modificato in prima battuta il modello idraulico simulando anche il ponte di progetto che è presente tra le sezioni 16 e 15. Il ponte è costituito da un unico impalcato di luce 30 m, spessore 2,75 m e quota minima di intradosso pari a 65,71 m s.m.m..

Il viadotto è inclinato rispetto alla direzione della corrente di un angolo di circa 26°.

Nella configurazione di progetto iniziale le simulazioni non hanno ravvisato un potenziale sormonto dell'attraversamento ferroviario ma, stante le caratteristiche veloci della corrente, non era rispettato il franco sul livello energetico totale che, anzi, era posto ad una quota superiore rispetto all'intradosso del ponte. Inoltre questa situazione di criticità potrebbe essere fortemente aggravata qualora durante il deflusso della piena si abbia, con molta probabilità, il trasporto in sospensione di materiale, quale arbusti, alberi, massi e quant'altro che possa causare un'occlusione della luce del ponte. Per ovviare a ciò si è reso necessario ricorrere ad una sistemazione del torrente nella zona a cavallo del manufatto ferroviario in progetto, prevedendo un abbassamento del fondo alveo del torrente di circa 3,00 proprio in corrispondenza del ponte. Viene così a formarsi uno scivolo realizzato mediante una platea in calcestruzzo, ben ancorata a monte mediante un taglione di adeguata profondità, e collegata alla soletta di fondazione del ponte in progetto. A valle dell'attraversamento è prevista un'ulteriore platea, di lunghezza ridotta rispetto a monte, anch'essa collegata alla fondazione del ponte in modo da garantire la stabilità di tutta l'opera, e dotata di taglione di valle. Al di sopra della superficie in calcestruzzo costituita dalla soletta di fondazione e dalle platee di monte e di valle ad essa collegate, è previsto un rivestimento in massi intasati da calcestruzzo dello spessore di 1 metro. Il fondo alveo del torrente è stato inoltre riprofilato per una lunghezza di circa 230 m a valle del ponte, dandogli una pendenza dello 0,8%. In aggiunta a questi interventi, è stata ampliata la sezione di deflusso del torrente per tutto il tratto interessato dalla sistemazione, cioè per circa 100 m a monte, 240 m a valle, per un tratto complessivo di circa 360 m. In questo modo, la simulazione idraulica post operam ha evidenziato un notevole abbassamento delle velocità della corrente in piena, garantendo pertanto il rispetto, oltre



LINEA MESSINA - CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
FIUMEFREDDO  
LOTTO 01

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	47 di 101

che del franco sul livello idrico, anche del franco sul livello energetico che si è attestato sul valore minimo previsto dal Manuale di Progettazione Ferroviario.

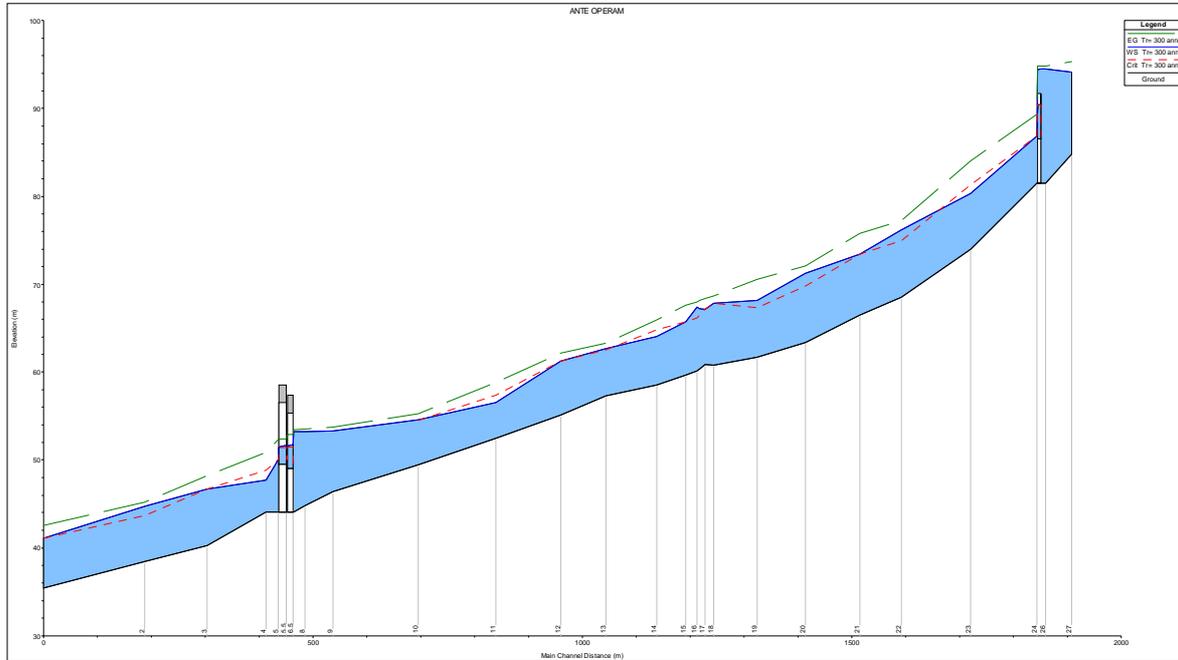
Le spalle del viadotto nella nuova configurazione di progetto, sono posti lungo la linea delle sistemazioni spondali e non interessano l'alveo attivo; inoltre non sono interessate da fenomeni di scalzamento, essendo collegate alla soletta di fondazione del ponte in modo tale da realizzare una struttura scatolare.

I risultati delle simulazioni ottenuti con il modello monodimensionale (evento con  $T_r = 300$  anni) sono illustrati nei paragrafi successivi mediante l'ausilio di elaborati grafici esplicativi, in particolare mediante sezioni e profili di rigurgito con rappresentazione delle massime altezze d'acqua e degli elementi geometrici delle interferenze trasversali (ponti e tombini).

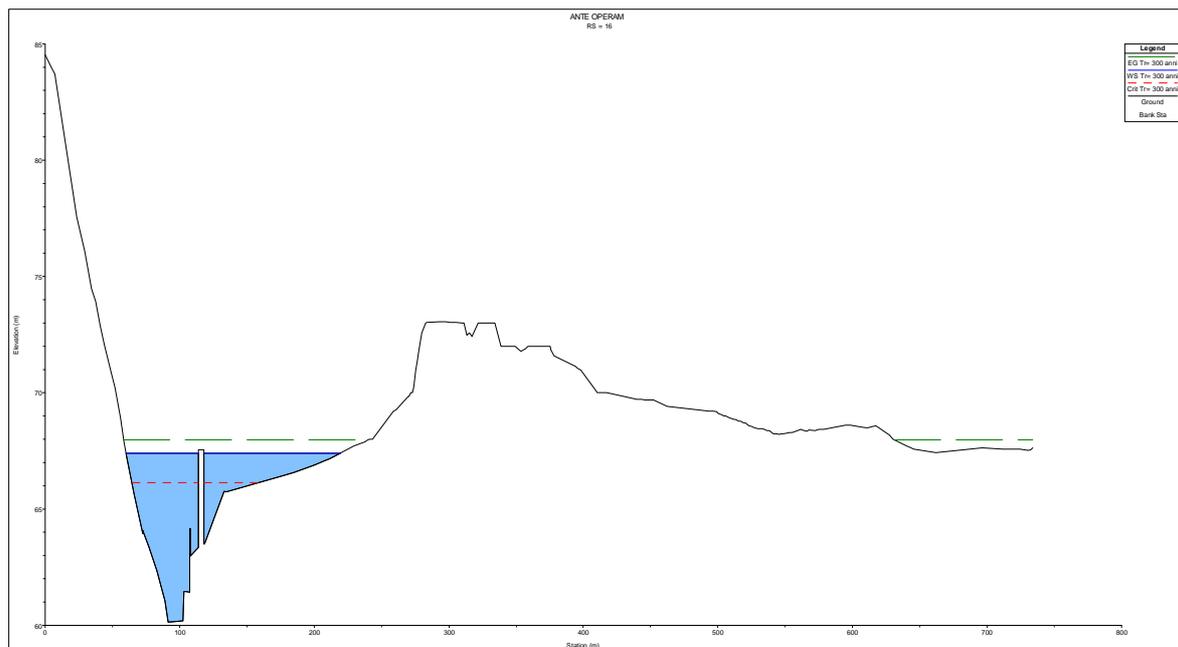
### 3.3.2.1 Simulazione Ante Operam

Per la simulazione dell'evento idrologico con tempo di ritorno 300 anni, si è ipotizzato il deflusso di portate liquide, senza trasporto solido, con alveo e opere idrauliche nelle condizioni attuali, osservate nel corso dei sopralluoghi condotti.

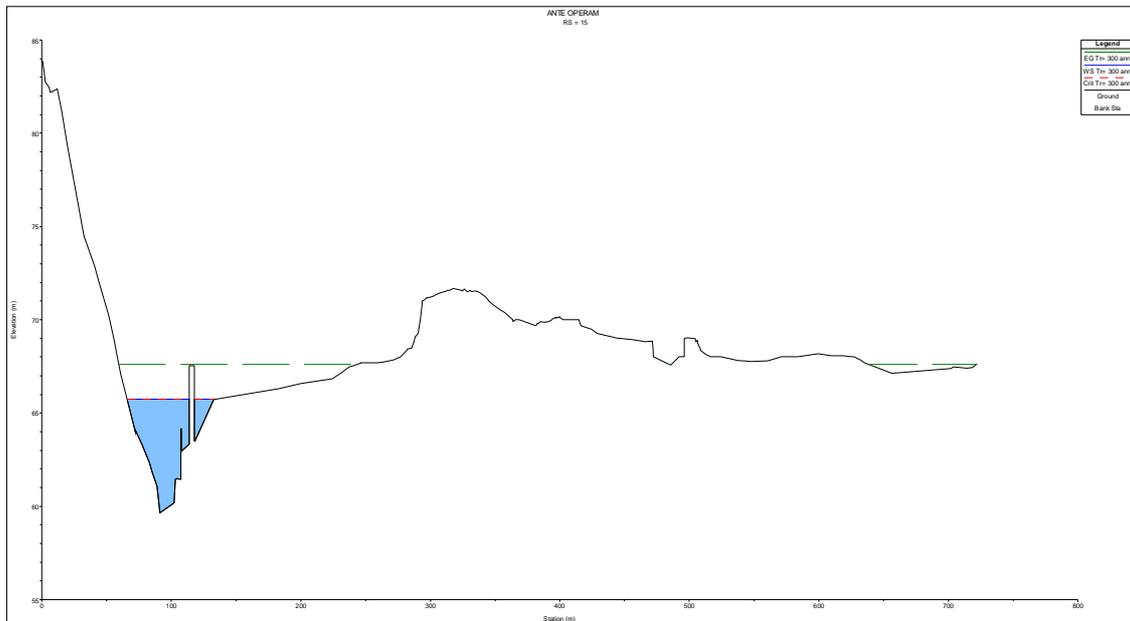
Nelle figure seguenti si riportano, rispettivamente, il profilo di rigurgito e le sezioni in corrispondenza del manufatto in progetto.



**Figura 15– Profilo di rigurgito ANTE OPERAM**



**Figura 16 – Sezione a monte del manufatto in progetto ANTE OPERAM**

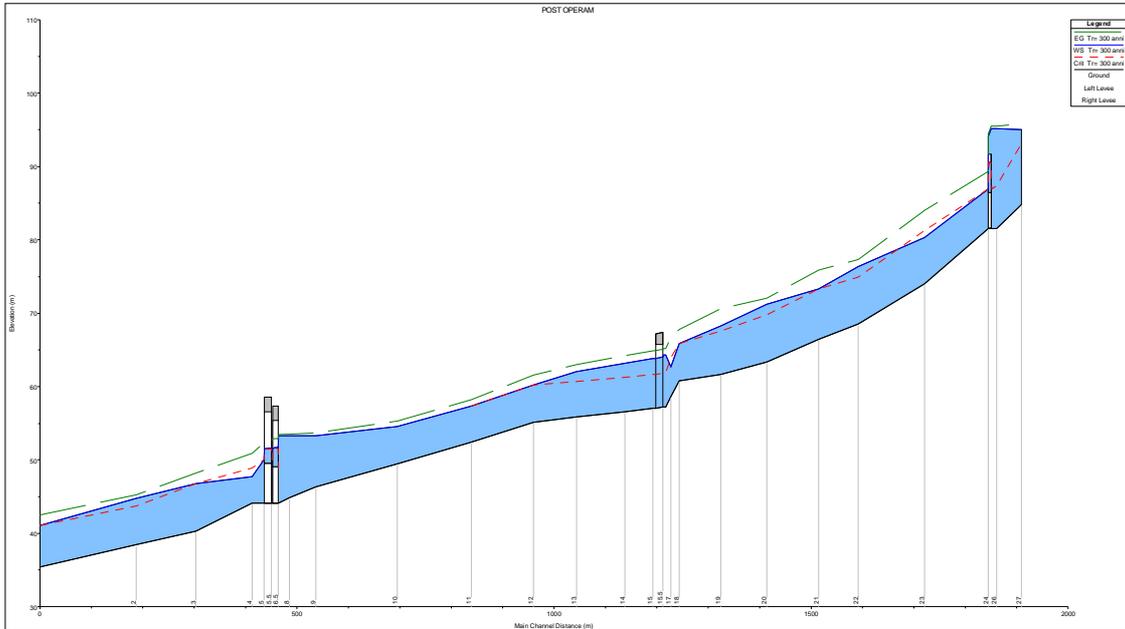


**Figura 17 – Sezione a valle del manufatto in progetto ANTE OPERAM**

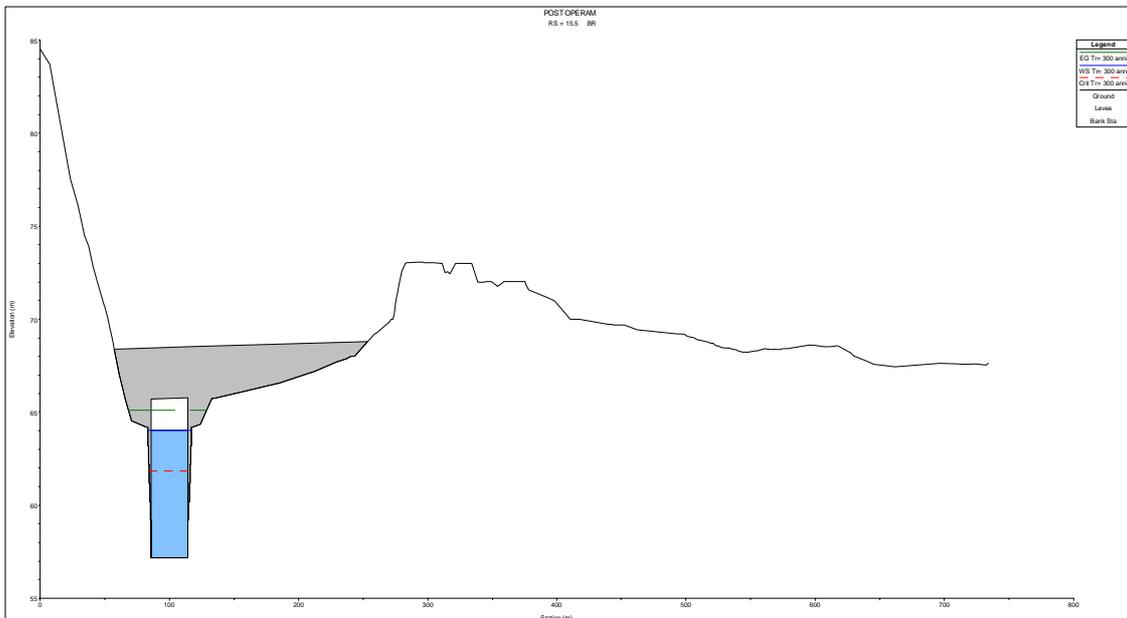
### 3.3.2.2 Simulazione Post Operam

Per la simulazione dell'evento idrologico con tempo di ritorno 300 anni, si è ipotizzato il deflusso di portate liquide, senza trasporto solido, con alveo e opere idrauliche nelle condizioni attuali, osservate nel corso dei sopralluoghi condotti, con l'inserimento del ponte ferroviario previsto in progetto e con la sistemazione del fondo alveo descritta precedentemente.

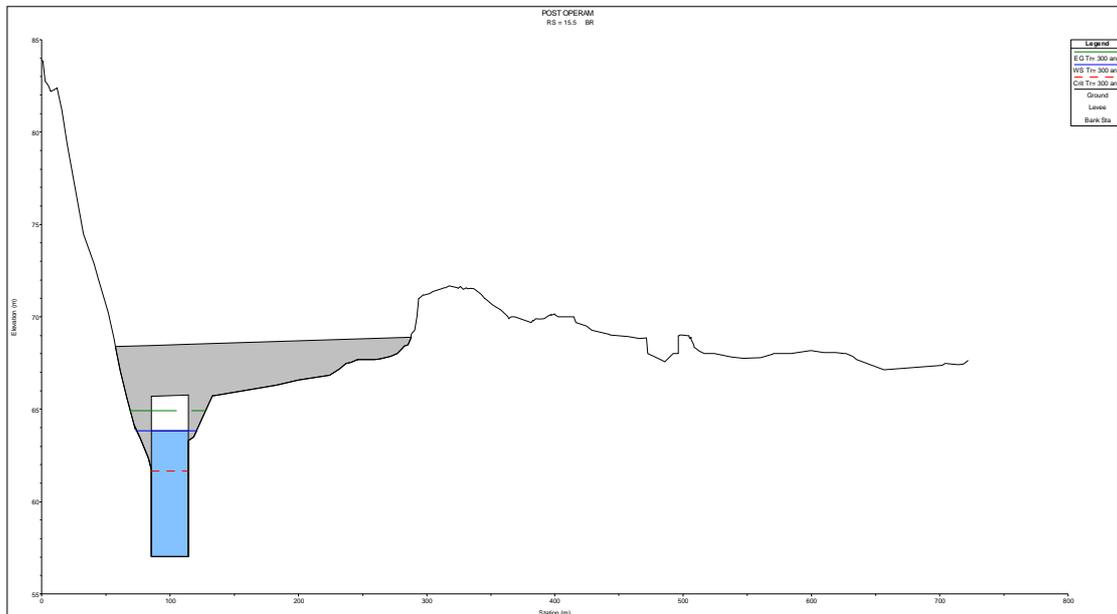
Nelle figure seguenti si riportano, rispettivamente, il profilo di rigurgito e le sezioni in corrispondenza del manufatto in progetto.



**Figura 18 – Profilo di rigurgito POST OPERAM**



**Figura 19- Sezione a monte del manufatto in progetto POST OPERAM**



**Figura 20 – Sezione a valle del manufatto in progetto POST OPERAM**

Si evidenzia come il passaggio dell'acqua da un lato a l'altro del ponte ferroviario, non essendoci esondazione alcuna, avviene esclusivamente al disotto dello stesso e che il livello idrico, che si instaura al disotto dell'intradosso delle travi dell'impalcato, resta sempre nettamente inferiore a valori che permettono un franco rispondente alle vigenti normative.

Nella tabella sottostante vengono riassunti i risultati ottenuti dall'applicazione del modello idraulico:

<i>Tempo di ritorno</i>	<i>Portata di piena</i>	<i>Quota fondo alveo</i>	<i>Livello idrico</i>	<i>Livello energetico</i>	<i>Quota intradosso trave</i>	<i>Luce libera sottotrave-fondo</i>	<i>Franco sul livello idrico</i>	<i>Franco sul livello energetico</i>
<i>Tr</i>	<i>Q</i>	<i>Min Ch El</i>	<i>W.S. Elev.</i>	<i>EG Elev</i>				
<i>(anni)</i>	<i>(m<sup>3</sup>/s)</i>	<i>(m.s.m.m)</i>	<i>(m.s.m.m)</i>	<i>(m.s.m.m)</i>	<i>(m.s.m.m)</i>	<i>(m)</i>	<i>(m)</i>	<i>(m)</i>
300	897,6	57,19	64,17	65,06	65,71	<b>8,52</b>	<b>1,54</b>	<b>0,65</b>

**Tabella 7 - Tabella riepilogativa dei risultati delle simulazioni del torrente Minissale POST OPERAM**



LINEA MESSINA - CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
FIUMEFREDDO  
LOTTO 01

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	52 di 101

La verifica idraulica evidenzia come l'opera in progetto soddisfi i requisiti sia delle prescrizioni ferroviarie, sia della circolare NTC 2008 relativamente ai criteri generali e le indicazioni tecniche per la progettazione e l'esecuzione dei ponti ferroviari.

La verifica del franco sul livello idrico, pari a 1,54 m, evidenzia infatti sia il superamento della prescrizione ferroviaria pari a 1,50 m, sia quella di 1,50÷2,00 m prevista dalle NTC. La verifica del franco sul carico totale, pari a 0,65 m, soddisfa il requisito delle prescrizioni tecniche ferroviarie imposto pari ad almeno 0,50 m.

Infine l'opera è stata progettata al fine di assicurare una luce libera tra sottotrave del manufatto e fondo alveo, pari a 8,52 m, superiore al valore di 6÷7 m previsto dalle NTC.

Si ricorda che le verifiche idrauliche sono state condotte in condizioni particolarmente cautelative, in quanto la portata di progetto è stata valutata con tempo di ritorno di 300 anni, rispetto al tempo minimo di 200 anni consigliato dalle NTC.

### 3.3.3 Livelli idrici calcolati

#### 3.3.3.1 Confronto tra gli scenari di simulazione

La tabella seguente riporta uno stralcio del confronto tra le varie grandezze idrauliche, negli scenari "Ante Operam" e "Post Operam", per l'evento con tempo di ritorno  $T_r = 300$  anni.

Come si può vedere lo scenario di progetto garantisce, livelli idrici di piena pressoché uguali a quelli dello stato di fatto, se non inferiori in alcune sezioni. Nella tabella sono evidenziati in verde quelli corrispondenti al ponte ferroviario.

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	53 di 101

River Station (Sezione)	Plan (Piano)	Q Total (Portata) [m³/s]	Length Chanel (Parziale) [m]	Min Ch El (Q.ta fondo) [m.s.m.]	W.S. Elev. (Pelo libero) [m.s.m.]	Crit. W.S. (Alt.critica) [m.s.m.]	EG Elev (Q.ta Energia) [m.s.m.]	E.G. Slope (Pend. Energia) [m/m]	Vel Chnl (Velocità) [m/s]	Flow Area (Area sez. liq.) [m²]	Top Width (Largh. Sup.) [m]	Froude # Chl (n° Froude)	Shear Total (Tens. Trascinam.) [N/m²]	W.P. Total (Cont. Bagn.) [m]
20	A.O.	897.60	89.82	63.35	71.26	69.76	72.08	0.01	4.91	291.51	85.07	0.59	293.85	88.22
20	P.O.	897.60	89.91	63.35	71.21	69.76	72.04	0.01	4.94	287.30	82.78	0.59	303.85	85.92
Variazione		0.00	0.09	0.00	-0.05	0.00	-0.04	0.00	0.03	-4.21	-2.29	0.00	10.00	-2.30
Variazioni % = (PO - AO)/AO		0.00	0.10	0.00	-0.07	0.00	-0.06	2.19	0.61	-1.44	-2.69	0.00	3.40	-2.61
19	A.O.	897.60	80.11	61.66	68.20	67.33	70.58	0.03	7.67	161.20	48.41	0.98	870.68	54.53
19	P.O.	897.60	80.19	61.66	68.27	67.33	70.56	0.03	7.54	164.70	48.92	0.96	836.87	55.07
Variazione		0.00	0.08	0.00	0.07	0.00	-0.02	0.00	-0.13	3.50	0.51	-0.02	-33.81	0.54
Variazioni % = (PO - AO)/AO		0.00	0.10	0.00	0.10	0.00	-0.03	-4.98	-1.69	2.17	1.05	-2.04	-3.88	0.99
18	A.O.	897.60	15.81	60.77	67.81	67.81	68.69	0.01	5.47	333.09	244.11	0.68	164.50	246.82
18	P.O.	897.60	15.81	60.77	65.86	65.86	67.79	0.04	6.14	146.09	38.58	1.01	1235.21	46.13
Variazione		0.00	0.00	0.00	-1.95	-1.95	-0.90	0.03	0.67	-187.00	-205.53	0.33	1070.71	-200.69
Variazioni % = (PO - AO)/AO		0.00	0.00	0.00	-2.88	-2.88	-1.31	219.94	12.25	-56.14	-84.20	48.53	650.89	-81.31
17	A.O.	897.60	10.30	60.88	67.12	67.12	68.38	0.02	5.65	256.53	121.74	0.75	300.99	129.47
17	P.O.	897.60	10.30	58.63	62.74	64.00	66.68	0.09	8.78	102.19	27.01	1.44	2594.89	35.05
Variazione		0.00	0.00	-2.25	-4.38	-3.12	-1.70	0.08	3.13	-154.34	-94.73	0.69	2293.90	-94.42
Variazioni % = (PO - AO)/AO		0.00	0.00	-3.70	-6.53	-4.65	-2.49	485.86	55.40	-60.16	-77.81	92.00	762.12	-72.93
16.1	A.O.	897.60	5.15	60.38	67.19	66.47	68.16	0.01	5.31	307.43	143.61	0.67	232.51	155.24
16.1	P.O.	897.60	5.15	57.23	64.32	61.94	65.21	0.01	4.18	215.72	41.59	0.53	439.67	55.52
Variazione		0.00	0.00	-3.15	-2.87	-4.53	-2.95	0.00	-1.13	-91.71	-102.02	-0.14	207.16	-99.72
Variazioni % = (PO - AO)/AO		0.00	0.00	-5.22	-4.27	-6.82	-4.33	-3.62	-21.28	-29.83	-71.04	-20.90	89.10	-64.24
16	A.O.	897.60	20.24	60.13	67.40	66.12	67.98	0.01	4.43	375.37	155.07	0.53	164.95	168.82
16	P.O.	897.60	20.24	57.19	64.29	61.80	65.15	0.01	4.11	219.11	42.37	0.51	411.31	56.11
Variazione		0.00	0.00	-2.94	-3.11	-4.32	-2.83	0.00	-0.32	-156.26	-112.70	-0.02	246.36	-112.71
Variazioni % = (PO - AO)/AO		0.00	0.00	-4.89	-4.61	-6.53	-4.16	41.98	-7.22	-41.63	-72.68	-3.77	149.35	-66.76
15	A.O.	897.60	54.00	59.65	65.73	65.73	67.59	0.03	7.16	188.44	62.69	0.96	688.23	73.06
15	P.O.	897.60	54.00	57.02	63.81	64.85	64.85	0.01	4.55	206.84	46.11	0.56	431.73	57.35
Variazione		0.00	0.00	-2.63	-1.92	-65.73	-2.74	-0.02	-2.61	18.40	-16.58	-0.40	-256.50	-15.71
Variazioni % = (PO - AO)/AO		0.00	0.00	-4.41	-2.92	-100.00	-4.05	-55.14	-36.45	9.76	-26.45	-41.67	-37.27	-21.50
14	A.O.	897.60	94.72	58.55	64.04	64.80	65.93	0.03	7.00	212.11	154.38	1.02	438.42	159.65
14	P.O.	897.60	94.72	56.59	63.19	61.29	64.19	0.01	4.47	215.60	58.89	0.58	368.83	67.42
Variazione		0.00	0.00	-1.96	-0.85	-3.51	-1.74	-0.02	-2.53	3.49	-95.49	-0.44	-69.59	-92.23
Variazioni % = (PO - AO)/AO		0.00	0.00	-3.35	-1.33	-5.42	-2.64	-65.05	-36.14	1.65	-61.85	-43.14	-15.87	-57.77
13	A.O.	897.60	83.83	57.32	62.67	62.53	63.29	0.01	4.16	364.14	208.95	0.60	193.97	213.22
13	P.O.	897.60	83.83	55.82	62.07	60.73	63.01	0.01	4.56	283.34	191.12	0.60	181.98	199.21
Variazione		0.00	0.00	-1.50	-0.60	-1.80	-0.28	0.00	0.40	-80.80	-17.83	0.00	-11.99	-14.01
Variazioni % = (PO - AO)/AO		0.00	0.00	-2.62	-0.96	-2.88	-0.44	12.66	9.62	-22.19	-8.53	0.00	-6.18	-6.57
12	A.O.	897.60	120.15	55.14	61.25	61.25	62.17	0.02	5.36	308.26	171.56	0.72	264.41	176.11
12	P.O.	897.60	120.15	55.14	60.26	60.26	61.55	0.02	5.15	203.33	108.89	0.79	395.71	115.87
Variazione		0.00	0.00	0.00	-0.99	-0.99	-0.62	0.01	-0.21	-104.93	-62.67	0.07	131.30	-60.24
Variazioni % = (PO - AO)/AO		0.00	0.00	0.00	-1.62	-1.62	-1.00	49.29	-3.92	-34.04	-36.53	9.72	49.66	-34.21
11	A.O.	897.60	144.13	52.44	56.52	57.33	58.80	0.06	7.91	169.49	107.88	1.33	940.10	110.13
11	P.O.	897.60	144.13	52.44	57.34	57.33	58.27	0.02	5.40	269.06	135.48	0.82	421.44	137.88
Variazione		0.00	0.00	0.00	0.82	0.00	-0.53	-0.04	-2.51	99.57	27.60	-0.51	-518.66	27.75
Variazioni % = (PO - AO)/AO		0.00	0.00	0.00	1.45	0.00	-0.90	-64.64	-31.73	58.75	25.58	-38.35	-55.17	25.20
10	A.O.	897.60	158.68	49.50	54.60	54.49	55.27	0.02	4.94	314.13	160.05	0.74	362.93	163.19
10	P.O.	897.60	158.68	49.50	54.60	54.60	55.27	0.02	4.94	314.13	160.05	0.74	362.93	163.19
Variazione		0.00	0.00	0.00	0.00	-54.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Variazioni % = (PO - AO)/AO		0.00	0.00	0.00	0.00	-100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabella 8 – Stralcio della tabella di confronto dei risultati delle simulazioni del torrente Minissale

### 3.3.4 Fasi realizzative

Con riferimento alla portata di 324,74 m³/s relativa ad un tempo di ritorno di 5 anni, è stato sviluppato il profilo in moto permanente del torrente Minissale al fine di valutare la necessità di realizzazione di opere provvisorie, eventualmente da prevedere durante le fasi costruttive delle strutture in alveo.

Nella prima fase (Figura 21) si realizza una parzializzazione tra le sezioni 18÷12 del corso d'acqua per la realizzazione della spalla destra del ponte di progetto. Successivamente (Figura 22) il cantiere si sposta in corrispondenza della sponda sinistra parzializzando l'alveo di piena.

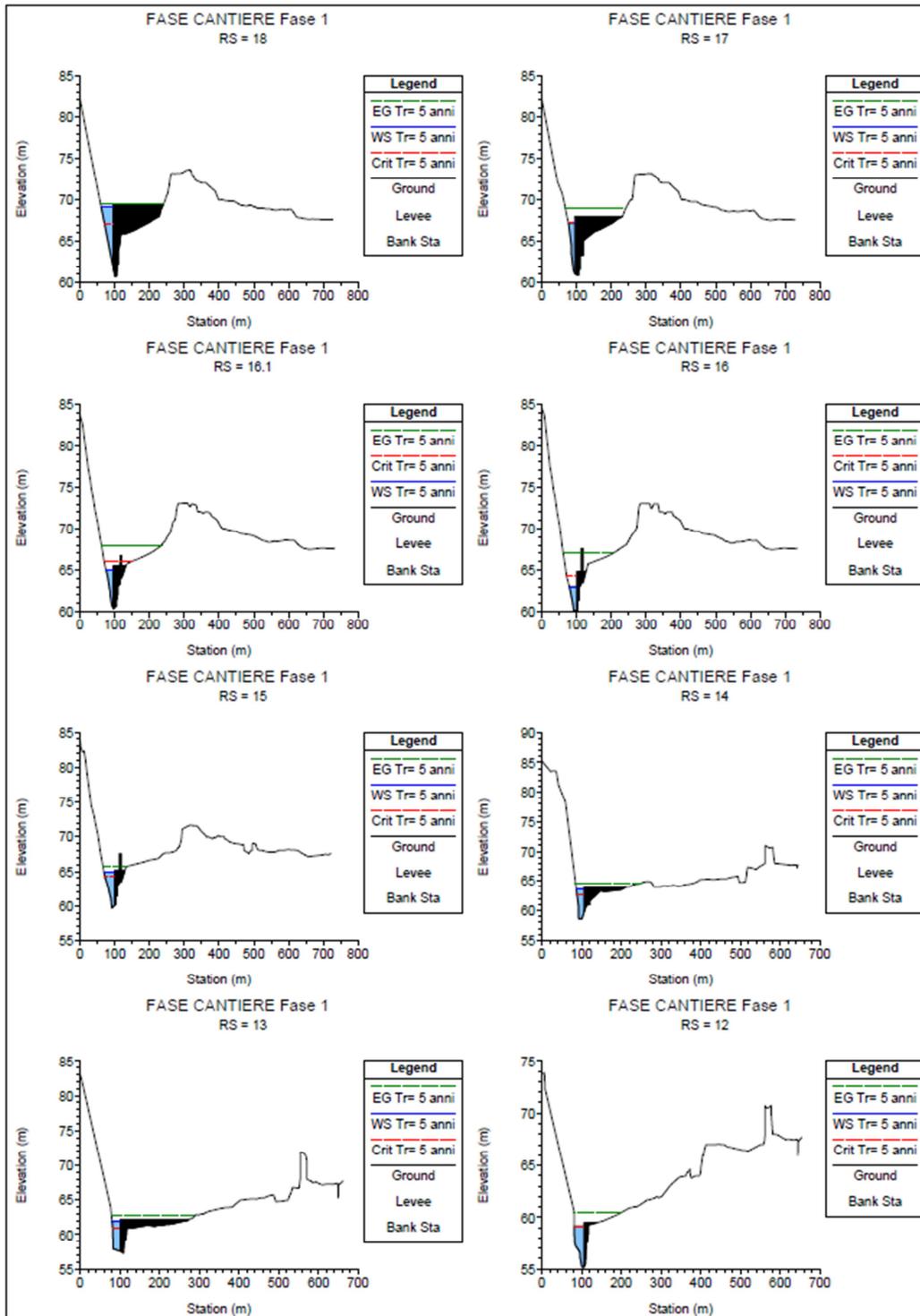


Figura 21 - Sezione parzializzate FASE 1

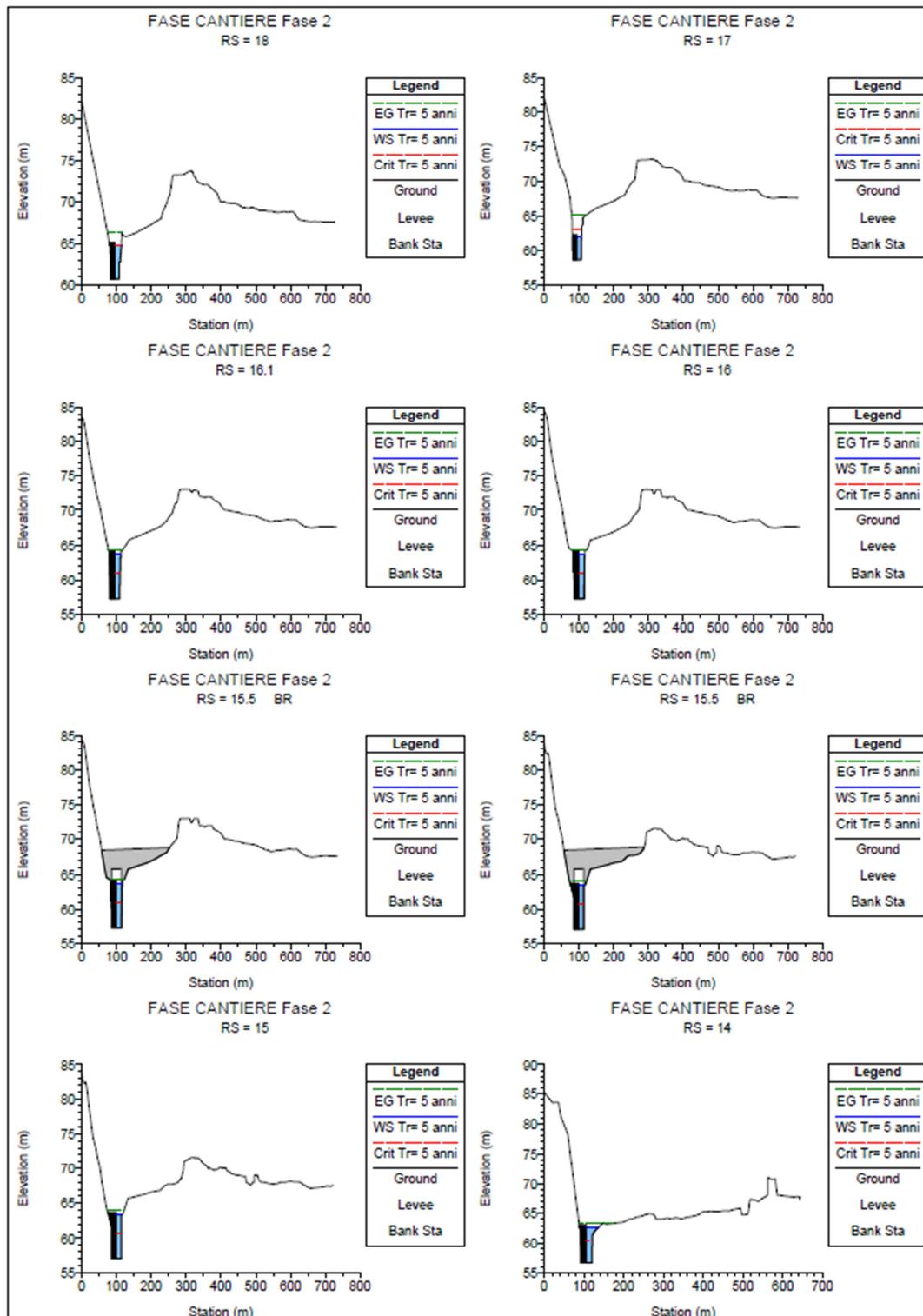
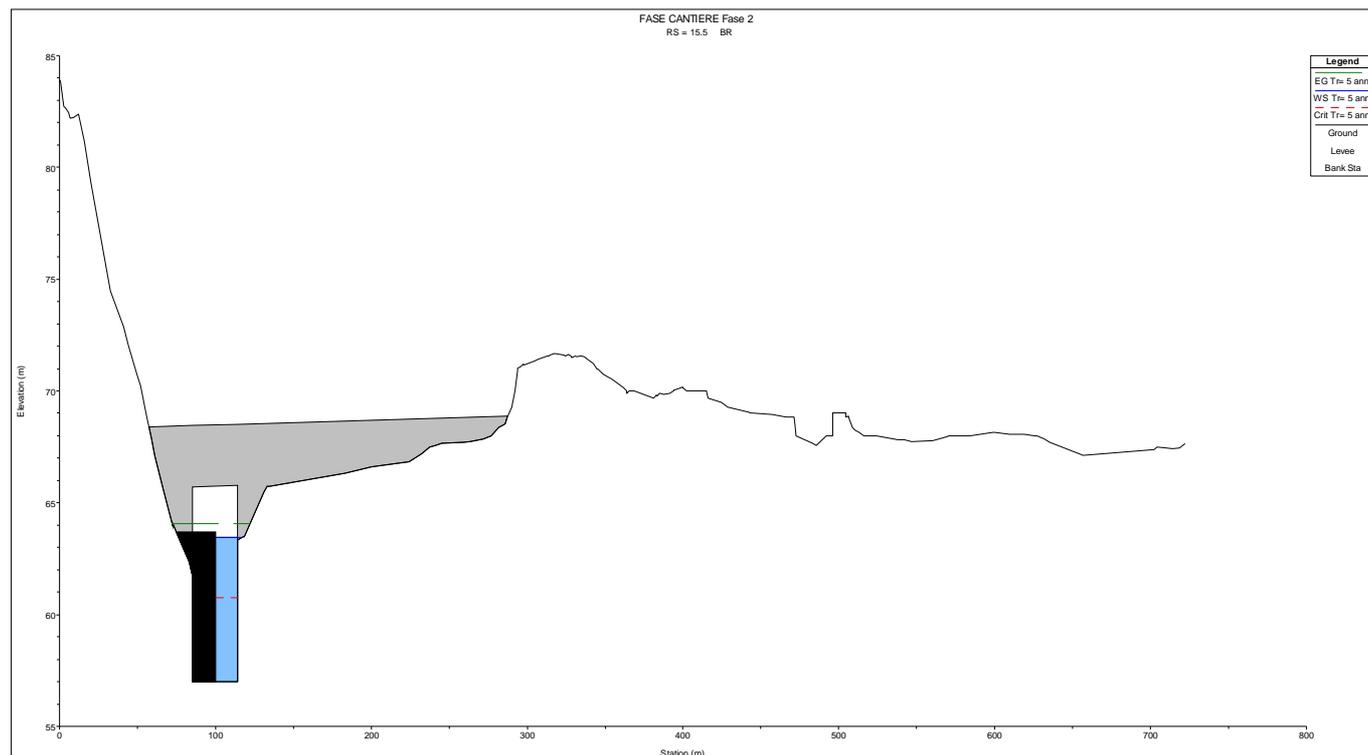


Figura 22 – Sezione parzializzate FASE 2

I risultati delle simulazioni, con riferimento ai livelli idrici in corrispondenza del restringimento (sez. 15), pongono la sicurezza del cantiere a quota **65.20 m s.m.m.**



**Figura 23** – Livello idrico per  $Tr = 5$  anni del torrente Minissale

Per la incolumità del personale è necessario prevedere un sistema continuo di monitoraggio dei livelli del corso d’acqua al fine di inviare gli opportuni allarmi in tempo utile per lo sgombero del cantiere.

### 3.3.5 Immissione collettore 3.50x2.00

Il progetto di drenaggio della piattaforma ferroviaria prevede la predisposizione, a monte della trincea tra le Pk. 2+000 e 2+925, di uno scatolare 3.50x2.00 per la raccolta e lo scarico nel Torrente Minissale delle acque di ruscellamento superficiale del versante a monte della ferrovia. Questo bacino drenato dal collettore va ad aggiungersi al bacino naturale drenato dal Minissale a monte dell’interferenza con la linea ferroviaria.



LINEA MESSINA - CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
FIUMEFREDDO  
LOTTO 01

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	57 di 101

Considerando questo bacino aggiuntivo la portata corrispondente ad un Tr di 300 anni è pari a circa 900 mc/s, valore che determina un innalzamento medio dei livelli idrici pari a 2 cm.

Questo valore non determina in alcun modo un aumento della pericolosità idraulica a valle della linea in quanto le aree di esondazione post operam restano invariate.



LINEA MESSINA - CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
FIUMEFREDDO  
LOTTO 01

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	58 di 101

### 3.5 CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE PROTEZIONI DEL FONDO E DELLE SPONDE

Stante il carattere torrentizio dei corsi d'acqua e la presenza di elementi d'opera in aree golenali o prossime all'alveo, è necessario prevedere in prossimità dei manufatti di progetto, appositi rivestimenti con massi sciolti, legati o intasati con calcestruzzo ovvero con gabbioni e/o materassi tipo "Reno" riempiti con pietrame.

Nel calcolo di dimensionamento dei rivestimenti e delle protezioni radenti, si fa riferimento a metodologie basate sull'ammissibilità del pietrame e dei massi ad essere utilizzati attuando un confronto tra le tensioni di trascinamento attivate dalla corrente e le tensioni resistenti massime di moto incipiente che il materiale costituente il fondo alveo è capace di mobilitare, al passaggio della portata al colmo di piena.

Altro elemento di valutazione per alcuni materiali o tecniche è infine anche il riferimento alla durata della sollecitazione stessa: in ambito fluviale oltre al picco di piena è di fondamentale importanza considerare la durata complessiva dell'evento.

Tale fattore non riguarda le protezioni spondali in cui la resistenza al trascinamento è garantita dal peso del materiale costituente la protezione: per una scogliera non si ha crisi della protezione finché non viene raggiunta la tensione tangenziale critica di inizio movimento, che dipende esclusivamente dalla forma del pietrame e dalle sue dimensioni; per materassi reno e gabbioni in pietrame l'azione di contenimento della rete incrementa tale resistenza, permettendo che avvenga un movimento parziale all'interno delle tasche senza crisi della protezione ed inoltre con il tempo la progressiva naturalizzazione e colonizzazione del pietrame da parte delle radici della vegetazione instauratasi, permette un aumento della resistenza al trascinamento della protezione.

#### 3.5.1 Metodo delle tensioni di trascinamento

In questo caso il problema di progetto consiste nello stabilire, per una nota sezione geometrica del canale, la dimensione caratteristica minima che permette al singolo blocco, realizzato con materiale di assegnato peso specifico (pietrame, calcestruzzo), di rimanere fermo sul fondo e sulle sponde dell'alveo sotto l'azione della spinta idrodinamica della corrente di nota portata  $Q$ . Pertanto si deve verificare che le tensioni tangenziali massime di trascinamento generate dalla corrente idrica, in una data sezione, risultino inferiori a quelle resistenti ammissibili, che il rivestimento riesce a mobilitare.

La tensione tangenziale massima di trascinamento al fondo, in una generica sezione, in riferimento al raggio idraulico  $R$ , alla pendenza del pelo libero della corrente, al peso specifico del liquido costituente la corrente vale :

$$\tau_f = R_t \gamma_w R i$$

avendo posto :

$\tau_f$  (kg/mq) = tensione di trascinamento al fondo;

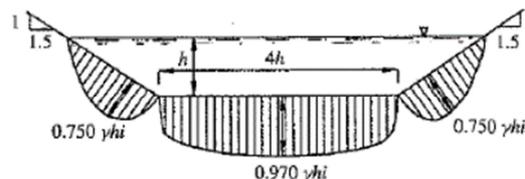
$\gamma_w$  (kg/mc) = Peso specifico dell'acqua;

$R$  (m) = Raggio idraulico della corrente;

$i$  (m/m) = Pendenza del pelo libero della corrente;

$R_t$  = Coefficiente dipendente dalla forma della sezione, dal suo rapporto d'aspetto  $L/h$  e dalla zona di interesse (sponda, fondo) tensione di trascinamento al fondo.

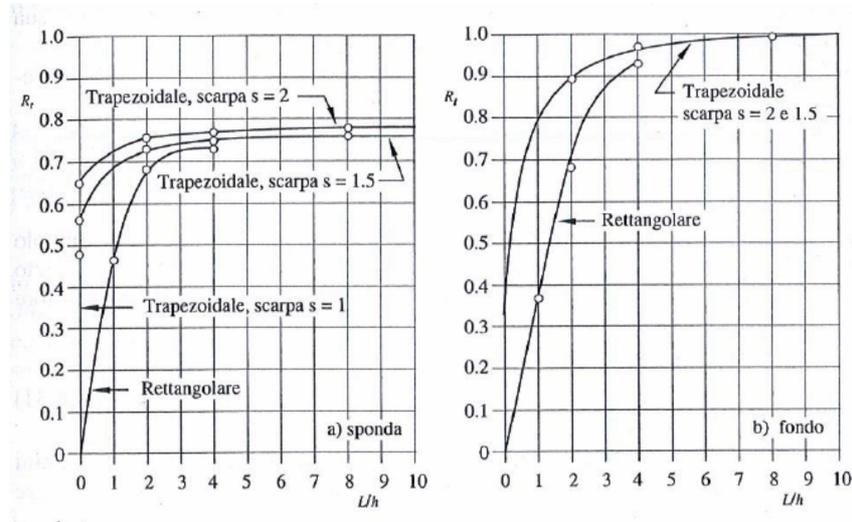
La figura 13 ( *La sistemazione dei bacini idrografici. Edizione McGraw-Hill – V.Ferro*), riporta l'andamento degli sforzi tangenziali sul fondo e sulle sponde per il caso di una sezione trapezia di scarpa 1,5 (1/1,5). Dall'esame della figura si evince che il massimo sforzo tangenziale sul fondo, prossimo al valore medio  $\gamma hi$ , si verifica in asse alla sezione e diminuisce debolmente spostandosi dall' asse verso le sponde.



**Figura 24-** Andamento degli sforzi tangenziali per sezione trapezia

Sulla sponda, invece, il valore massimo dello sforzo tangenziale si verifica in prossimità dell'unghia. L'andamento descritto si può ritenere valido anche per sezioni trapezie di differente geometria.

La Figura 14 dimostra che per valori di  $L/h$  maggiori di 3, sulla sponda si può assumere un valore di  $R_t$ , pari a 0.75 mentre sul fondo per  $L/h$  maggiori di 4 risulta  $R_t = 0.95-0.97$ .



**Figura 25-** Valori del coefficiente K, in funzione del rapporto d'aspetto  $L/h$  della sezione

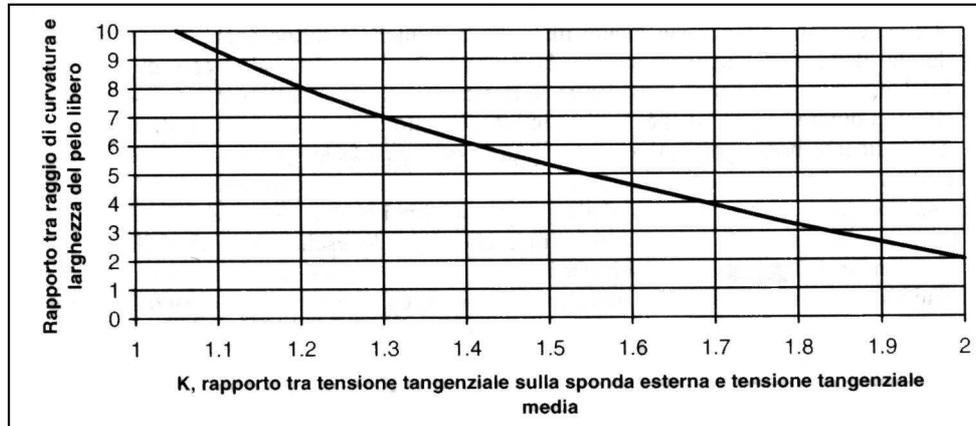
A favore della sicurezza si considera per le sezioni in alveo, riconducibili a sezioni trapezie, un valore di  $R_t$  pari all'unità per il fondo alveo ed un valore  $R_t = 0,75$  per le sponde.

In relazione alla posizione del punto nella sezione dell'alveo in un tratto planimetricamente rettilineo, la tensione tangenziale massima vale dunque :

$$\text{fondo alveo rettilineo} \quad \tau_f = \gamma_w R i$$

$$\text{sponda alveo rettilineo} \quad \tau_s = 0,75 \gamma_w R i.$$

Diversamente, se l'asta è in curva si ha un aumento della tensione tangenziale sulla sponda concava (esterna), di cui si tiene conto attraverso un coefficiente K, funzione del rapporto tra il raggio di curvatura e la larghezza del pelo libero dell'acqua.



**Figura 26** - Valori del coefficiente K, in funzione del rapporto raggio curvatura- larghezza pelo libero

Ne consegue che la tensione tangenziale massima sulla sponda concava, in curva, assume la seguente espressione:

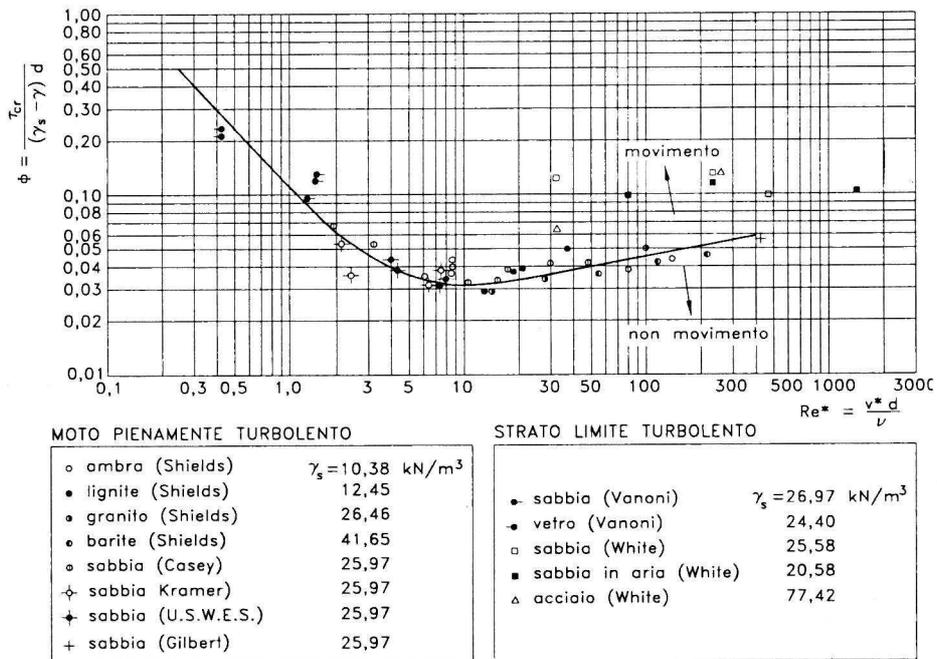
$$\text{sponda concava in curva} \quad \tau_{sc} = 0,75 K \gamma_w R i.$$

### 3.5.2 Resistenza al trascinamento

Per quanto riguarda la resistenza al trascinamento si definisce tensione massima di trascinamento  $\tau_{cr}$  la massima forza a partire dalla quale il materiale al fondo comincia a muoversi.

La condizione di equilibrio limite del masso può essere studiata facendo ricorso per il calcolo della tensione tangenziale critica all'abaco di Shields introducendo eventualmente delle correzioni per tenere conto di una eventuale condizione di macrocabrezza (bassa sommergenza idraulica), della pendenza fondo o dell'inclinazione delle sponde nel caso in cui il blocco considerato è un elemento del rivestimento spondale.

Sperimentalmente Shields, nell'ipotesi di fondo alveo formato da particelle uniformi non coesive di diametro  $d$  e peso specifico  $\gamma_s$ , imponendo la condizione di equilibrio alla traslazione, nel senso del moto, tra le forze agenti e resistenti propone la seguente curva:



**Figura 27- Abaco di Shields.**

In essa viene espressa la condizione di equilibrio o moto incipiente, con riferimento ad una funzione del numero di Reynolds, detto parametro critico di mobilità :

$$\frac{\tau_{cr}}{(\gamma_s - \gamma_w) d} = \Phi(R_e^*)$$

essendo :

$\tau_{cr}$  (kg/mq) = Tensione massima di trascinamento del materiale di diametro d;

$\gamma_s$  (kg/mc) = Peso specifico del materiale di fondo;

$\gamma_w$  (kg/mc) = Peso specifico dell'acqua;

d (m) = Diametro dei grani costituenti il materiale di fondo;

$Re^* = (\tau_{cr} / \rho)^{0,5} d / \nu$  = Numero di Reynolds

$\rho$  (Kg s<sup>2</sup>/ m<sup>4</sup>) = 101,94 (10°C) Densita dell'acqua;

$\nu$  (m<sup>2</sup>/s) = 1,31 10<sup>-6</sup> (10°C), Viscosità cinematica dell'acqua.

In regime turbolento per  $Re^* > 1000$ , l'equazione si particolarizza nella:

$$\frac{\tau_{cr}}{(\gamma_s - \gamma_w)d} = 0,06$$

Nel caso di miscugli non omogenei del materiale costituente il fondo alveo, nel campo del regime turbolento, J.V. Egiazaroff propone la seguente espressione :

$$\frac{\tau_{cr}}{(\gamma_s - \gamma_w)d} = \frac{0,1}{\left[ \log_{10} \left( \frac{19d}{d_{50}} \right) \right]^2}$$

Essa consente, per  $Re^* > 1000$ , di determinare direttamente la  $\tau_{cr}$  per una particella di diametro  $d$  appartenente ad un miscuglio di diametro medio  $d_{50}$ .

La tensione di trascinamento per materassi tipo Reno, gabbioni metallici e scogliere in pietrame sciolto tipo rip-rap, si scrive, sempre secondo l'espressione sperimentalmente di Shields,

$$\frac{\tau_{cr}}{(\gamma_s - \gamma_w)d_m} = \Phi(R_e^*)$$

con :  $d_m$  (m) = Diametro medio del pietrame costituente i gabbioni o le scogliere,

$\Phi(R_e^*) = 0,061$  per pietrame sciolto tipo rip-rap; 0,1 per pietrame contenuto da rete metallica.

In particolare per un alveo con pendenza del fondo  $i$  e a sezione trapezia, molto diffusa nelle pratiche applicazioni, di larghezza al fondo  $L$  e scarpa  $s$ , in cui deve essere convogliata una corrente di assegnata portata  $Q$ , bisogna innanzi individuare le caratteristiche idrauliche utili per la valutazione del numero Reynolds della corrente di fondo  $Re^*$ .



LINEA MESSINA - CATANIA  
**PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
 FIUMEFREDDO**  
**LOTTO 01**

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	64 di 101

Fissato un diametro  $d$  e  $d_{50}$  per il rivestimento, si calcola con la formula di Egiazaroff, ipotizzando il regime turbolento, la tensione di trascinamento di primo tentativo e con questa il numero di Reynolds (dalla relazione  $Re^* = (\tau_{cr} / \rho)^{0.5} d / \nu$ ), se il regime risulta effettivamente turbolento ( $Re^* > 1000$ ) la tensione di trascinamento di primo tentativo è la tensione di equilibrio, se il valore è minore, si entra nell'abaco di Shields con questo valore di  $Re^*$  e si determina il valore del parametro critico  $\Phi(Re^*)$  e quindi la tensione che si confronta con quella di primo tentativo, ripetendo ciclicamente il procedimento fino alla coincidenza dei valori della tensione che risulta essere quella di equilibrio.

Nel calcolo di valore del parametro critico di mobilità  $\Phi(Re^*)$ , bisogna tenere conto che per valori di  $Re^* \geq 400$  si può assumere  $\Phi(Re^*)$  costante e pari a 0.056, mentre se si verifica la condizione di bassa sommergenza ( $h/d \leq 6$  con  $h$  tirante idrico della corrente di moto uniforme e  $d$  diametro del materiale di fondo alveo) Armanini e Scotton propongono di utilizzare la seguente relazione empirica per il calcolo del valore critico del parametro di Shields:

$$\Phi(R_e^*) = 0,06 * \left[ 1 + 0,67 * \left( \frac{d}{h} \right)^{0,5} \right]$$

Per il caso di un blocco adagiato sulla sponda Lane, ha introdotto un fattore correttivo  $F_c$  della tensione resistente secondo la seguente relazione :  $\tau_{crs} = F_c * \tau_{cr}$

$$F_c = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2 \varphi}}$$

in cui  $\alpha$  è l'angolo di inclinazione della sponda,  $\varphi$  è l'angolo d'attrito interno del materiale costituente la sponda,  $\tau_{cr}$  la tensione massima di trascinamento che il materiale  $d$  costituente il fondo alveo riesce a mobilitare in condizione di equilibrio e  $\tau_{crs}$  la tensione massima resistente sulla sponda.

### 3.5.3 *Verifica delle tensioni di trascinamento sui rivestimenti in pietrame*

Le opere in gabbioni, materassi e scogliere in pietrame hanno trovato ampia applicazione nella costituzione di difese spondali radenti dimostrando una spiccata capacità alla rinaturalizzazione del sito. Vegetazione e scogliere-gabbioni-materassi hanno dimostrato di poter convivere ed offrire vicendevolmente condizioni ottimali di sviluppo, rappresentando una reale esemplificazione del concetto di base della ingegneria naturalistica che si propone di analizzare e verificare l'abbinamento tra materiali vivi ed inerti per le opere di difesa contro l'erosione.

Sulla base di tali considerazioni si può assumere che per le resistenze a trascinamento di materassi e gabbioni, una volta "vegetati", non vi siano differenze in funzione dello spessore del rivestimento, in quanto l'intreccio che si viene a creare tra pietrame, rete, terreno di riempimento, apparato radicale e terreno sottostante alla protezione costituisce una struttura unica la cui resistenza è dovuta alla mobilitazione dei vari elementi che la costituiscono.

Per quanto riguarda gli aspetti progettuali, in generale si definisce stabile un rivestimento in pietrame, sia esso costituito da materassi e/o gabbioni (per i quali si ha presenza di rete metallica di contenimento) sia da massi o pietrame sciolto (rip-rap) costituito da soli inerti, quando non si ha spostamento degli elementi litoidi. La condizione di inizio del movimento di questi elementi definisce il limite di stabilità del rivestimento.

Il rivestimento risulta stabile se il rapporto tra le tensioni resistenti e le tensioni destabilizzanti indotte dalla corrente sul fondo o sulla sponda, risulta maggiore dell'unità.

$$\frac{\tau_{cr}(resistenti)}{\tau_f(destabilizzanti)} \geq 1$$



LINEA MESSINA - CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
FIUMEFREDDO  
LOTTO 01

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	66 di 101

### 3.5.4 Applicazione ai casi in esame

I parametri idraulici impiegati per le verifiche, sono stati estratti dai tabulati di calcolo restituiti dalla elaborazione delle simulazioni idrauliche, di ciascun corso d'acqua esaminato, in condizione post – operam, considerando la portata di progetto al colmo di piena assunta per le verifiche dell'opera (Ponte, Viadotto).

#### 3.5.4.1 Verifica rivestimento localizzato in prossimità del torrente Minissale

L'attraversamento del Torrente Minissale, è previsto con un ponte, compreso le sezioni 16 e 15, costituito da un unico impalcato di luce 30 m, quota minima di intradosso trave a 65,71 m s.m.m., con fondazione continua unica tra le due spalle, ammorsata nel fondo alveo su pali, con estradosso fondazione a quota 56,02 m s.m.m. e quota sistemazione fondo alveo a 57,17 m s.m.m. .

L'intervento di sistemazione prevede, subito a monte dell'attraversamento ferroviario sul torrente Minissale, la realizzazione di una rampa, che consente alla corrente di passare da quota fondo alveo 60,77 m s.m.m., nella sezione 18 (testa rampa) alla quota 57,23 m s.m.m. nella sezione 16.1 (piede rampa) e attraversare in condizioni di sicurezza idraulica, nel rispetto del franco idraulico, energetico e della luce libera sotto-trave, il ponte ferroviario. In queste condizioni nella rampa subito a monte si verifica un tratto a forte pendenza, con corrente veloce, mentre nel secondo tratto, dal piede rampa fino alla sezione 12, si determina un tratto a debole pendenza con corrente lenta.

Tutto il primo tratto della rampa dalla sezione 18 alla 16.1, ed un tratto del secondo ramo, a debole pendenza, fino ad attestarsi al lato di monte della fondazione del ponte, è costituito da un solettone in calcestruzzo armato dello spessore di 1 metro, ammorsato con taglione a monte, e coperto e protetto nella faccia superiore esposta alla corrente, con uno strato spesso circa un metro, di massi emergenti del diametro medio di un metro e peso di circa 1400 Kg, intasati con calcestruzzo. Il solettone continua ancora per un tratto di circa 12,0 m a valle della fondazione del ponte ferroviario e nella parte terminale viene ammorsato con un taglione finale di circa 3,0 m. La protezione con massi intasati viene estesa dalla rampa a monte fino al taglione di valle, interessando anche l'estradosso della fondazione del ponte.

Il tratto a monte della sezione 18, per una lunghezza di circa 80 m, viene riprofilato e raccordato fino alla sezione 19, non interessata dai lavori, con l'interposizione sul fondo alveo di uno strato di massi sciolti dalla dimensione media di 400 mm con peso di circa 90 kg e spessore medio di un metro.

Anche il tratto a valle viene riprofilato e raccordato, secondo una sezione trapezia di larghezza alla base variabile da 28,0m fino a 25,0 m nel tratto a valle in corrispondenza della sezione 12 (sezione terminale).

Sia in destra che in sinistra vengono ricostruite le sponde con diversi ordini di gabbioni sovrapposti in più file, fino ad altezze di 6,0 – 7,0 m, in maniera da assicurare, nella quasi totalità dei casi, il contenimento del livello di massima piena relativo alla portata trecentennale.

Il fondo del canale di raccordo, nel tratto a valle del ponte ferroviario, dalla sezione di ammassamento del solettone fino alla sezione terminale n° 12, viene riprofilato e protetto da uno strato di massi sciolti della dimensione media di 400 mm con peso di circa 90 kg e spessore medio di un metro, poggiati su un telo di tessuto non tessuto con grammatura minima 400 gr/mq.

Per la verifica dei rivestimenti posti in alveo si sono valutate le tensioni di trascinamento indotte dalla corrente nelle condizioni peggiori, al momento del passaggio del picco dell'onda di piena con portata relativa a 300 anni.

Nella tabella seguente vengono riportate le grandezze caratteristiche che intervengono nella definizione delle tensioni e le tensioni di trascinamento massime sul fondo e sulle sponde con i coefficienti di amplificazione per i tratti in curva.

Sezione	Peso spec. acqua $g_w$ (kg/mc)	Raggio Idraulico R (m)	Pendenza Pelo libero i (m/m)	Raggio curv. alveo r (m)	Larghezza pelo libero L (m)			Tensione di trascinamento		
								Fondo $t_f$ (kg/mq)	Sponda $t_s$ (kg/mq)	Sponda curva $t_{sc}$ (kg/mq)
18	1.000,0	2,880	0,055679	423,25	35,59	11,89	1,05	160,368	120,276	126,650
17	1.000,0	2,866	0,083594	423,25	27,00	15,68	1,05	239,593	179,695	189,219
16,1	1.000,0	4,171	0,010633	423,25	36,71	11,53	1,05	44,351	33,263	35,026
16	1.000,0	4,538	0,009835	423,25	33,60	12,60	1,05	44,635	33,476	35,250
15	1.000,0	3,608	0,011132	423,25	44,83	9,44	1,09	40,167	30,125	32,910
14	1.000,0	3,231	0,010201	423,25	58,10	7,28	1,27	32,960	24,720	31,308
13	1.000,0	1,344	0,014685	423,25	167,95	2,52	1,91	19,735	14,801	28,241
12	1.000,0	1,754	0,020658	423,25	106,66	3,97	1,68	36,241	27,181	45,706

**Tabella 9 – Tensioni massime di trascinamento** Portata piena (Tr = 300 anni) sui rivestimenti Torrente Minissale -

La tensione di trascinamento massima di 240 Kg/mq si verifica in corrispondenza della sezione 17, sulla rampa a monte dell'attraversamento ferroviario, per effetto del ramo di corrente veloce. Mentre su tutto il tratto a valle del



LINEA MESSINA - CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
FIUMEFREDDO  
LOTTO 01

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	68 di 101

ponte, per effetto della corrente lenta, si instaurano tensioni di trascinamento di gran lunga inferiori, con valori variabili da 36 a 20 Kg/mq.

Con riferimento ai vari tratti delle sezioni di sistemazione del Torrente Minissale vengono di seguito riportate le tensioni massime resistenti che i rivestimenti sono in grado di mobilitare (Tabella 16) in ragione delle condizioni idrodinamiche di macro scabrezza o bassa sommergenza tra materiale costituente il fondo alveo e corrente fluviale di piena ed i rapporti tra tensioni resistenti e tensioni di trascinamento nella successiva Tabella 17, che assumono valori maggiori dell'unità in tutte le sezioni, assicurando la stabilità dei rivestimenti proposti in progetto.

Per le sezioni in cui vengono inseriti massi intasati con calcestruzzo, come tensione resistente, viene assunta a favore della sicurezza, la tensione minima di trazione del calcestruzzo assunta pari a 17 kg/cmq.

Per il tratto maggiormente sollecitato dalla corrente veloce, nel tratto di rampa a monte del ponte, i massi intasati, poggiati per maggiore sicurezza su di un solettone in c.a., assicurano un rapporto di stabilità di gran lunga superiore all'unità.

Nel tratto di corrente lenta a valle dell'attraversamento ferroviario in progetto, si instaurano tensioni resistenti dell'ordine di 40 kg/mq che determinano un rapporto di stabilità sempre maggiore dell'unità.

Sezione n°	Sezione elemento	Geometria sponda		Sezione n°	Sezione tipo	Peso specifico		Diametro materiale d <sub>m</sub> (mm)	Peso Massi P Kg	Tirante corrente h max (m)	Bassa Sommergenza		Micro Scabrezza Φ	Valore adottato Φ	Forze resistenti	
		Angolo attrito φ (°)	inclinaz. sponda α (°)			protezione	materiale γ <sub>s</sub> (kg/mc)				acqua γ <sub>w</sub> (kg/mc)	h/d ≤ 6			Φ	Fondo τ <sub>cr</sub> (kg/mq)
18	fondo	45,00	34,00		Massi cement	2.650	1.000	1.000,00	1387,5	4,45	4,45	0,079			170000,00	104048,69
17	fondo	45,00	34,00		Massi cement	2.650	1.000	1.000,00	1387,5	4,03	4,03	0,080			170000,00	104048,69
16,1	fondo	45,00	34,00		Massi cement	2.650	1.000	1.000,00	1387,5	6,97	6,97	0,075			170000,00	104048,69
16	fondo	45,00	34,00		Massi cement	2.650	1.000	1.000,00	1387,5	6,98	6,98	0,075			170000,00	104048,69
15	fondo	45,00	34,00		Massi cement	2.650	1.000	1.000,00	1387,5	6,69	6,69	0,076			170000,00	104048,69
14	fondo	45,00	34,00		scogli a	2.650	1.000	400,00	88,8	6,60	16,50	0,070	0,061	0,061	40,26	24,64
13	fondo	45,00	34,00		scogli a	2.650	1.000	400,00	88,8	5,99	14,98	0,070	0,061	0,061	40,26	24,64
12	fondo	45,00	34,00		scogli a	2.650	1.000	400,00	88,8	5,08	12,70	0,071	0,061	0,061	40,26	24,64

**Tabella 10- Tensioni resistenti al trascinamento - Portata piena (Tr = 300 anni) sui rivestimenti Torrente Minissale -**



LINEA MESSINA - CATANIA  
**PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
 FIUMEFREDDO**  
**LOTTO 01**

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
<b>RS2S</b>	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	70 di 101

Sezione		Forze destabilizzanti			Sezione		Peso specifico		Diametro	Peso	Tirante	Forze resistenti		Grado sicurezza del rivestimento		
n°	elemento	Tensione di trascinamento			n°	tipo	materiale	acqua	materiale	Massi	corrente	Tensione resistente al trascinamento		fondo	sponda	curva
		Fondo	Sponda	Sponda curva								Fondo	Sponda			
		τ <sub>f</sub> (kg/mq)	τ <sub>s</sub> (kg/mq)	τ <sub>sc</sub> (kg/mq)	protezione	γ <sub>s</sub> (kg/mc)	γ <sub>w</sub> (kg/mc)	d <sub>m</sub> (mm)	P Kg	h max (m)	τ <sub>cr</sub> (kg/mq)	τ <sub>crs</sub> (kg/mq)	>= 1	>= 1	>= 1	
18	fondo	160,37			Massi cementati	2.650	1.000	1.000,00	1387,5	4,45	170000,00	104048,69	1.060,06			
17	fondo	239,59			Massi cementati	2.650	1.000	1.000,00	1387,5	4,03	170000,00	104048,69	709,54			
16,1	fondo	44,35	33,26	35,03	Massi cementati	2.650	1.000	1.000,00	1387,5	6,97	170000,00	104048,69	3.833,07	3.128,05	2.970,61	
16	fondo	44,63	33,48	35,25	Massi cementati	2.650	1.000	1.000,00	1387,5	6,98	170000,00	104048,69	3.808,67	3.108,14	2.951,70	
15	fondo	40,17	30,12	32,91	Massi cementati	2.650	1.000	1.000,00	1387,5	6,69	170000,00	104048,69	4.232,38	3.453,91	3.161,57	
14	fondo	32,96				scogli a	2.650	1.000	400,00	88,8	6,60	40,26	24,64	1,22		
13	fondo	19,74				scogli a	2.650	1.000	400,00	88,8	5,99	40,26	24,64	2,04		
12	fondo	36,24				scogli a	2.650	1.000	400,00	88,8	5,08	40,26	24,64	1,11		

**Tabella 11 – Stabilità dei rivestimenti come rapporto tensioni resistenti/tensioni trascinamento - Portata piena (Tr = 300 anni) Torrente Minissale -**

#### **4 COMPATIBILITA' IDRAULICA**

Le opere in progetto sono tese al raddoppio della linea ferroviaria Messina – Catania nel tratto compreso tra la stazione di Fiumefreddo e di Giampileri per una lunghezza complessiva di circa 42 km.

Il tracciato della linea si sviluppa su un territorio percorso da vie d'acqua a regime prevalentemente torrentizio, con diversi attraversamenti in viadotto.

Nello studio effettuato si è 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:

- *Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) – Area Territoriale tra i bacini del F. Simeto e del F. Alcantara (095) – Relazione*, redatto dalla Regione Siciliana, Assessorato Territorio e Ambiente nel 2006;
- *Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) – Bacino idrografico del Fiume Alcantara (096) – Relazione*, redatto dalla Regione Siciliana, Assessorato Territorio e Ambiente nel 2006;
- *Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) – Area tra Fiume Alcantara e Fiumara d'Agrò (097) – Bacino idrografico della Fiumara d'Agrò ed area tra Fiumara d'Agrò e Torrente Savoca (098) – Relazione*, redatto dalla Regione Siciliana, Assessorato Territorio e Ambiente nel 2006;
- *Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) – Bacino idrografico del T.te Savoca (099) – Bacino idrografico del T.te Pagliara e area intermedia T.te Pagliara e T.te Fiumedinisi (100) – Relazione*, redatto dalla Regione Siciliana, Assessorato Territorio e Ambiente nel 2006;
- *Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) – Bacino idrografico del Torrente Fiumedinisi (101) – Relazione*, redatto dalla Regione Siciliana, Assessorato Territorio e Ambiente nel 2006;
- *Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) – Area Territoriale tra il bacino del Torrente Fiumedinisi e Capo Peloro (102) – Relazione*, redatto dalla Regione Siciliana, Assessorato Territorio e Ambiente nel 2006;



LINEA MESSINA - CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
FIUMEFREDDO  
LOTTO 01

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	72 di 101

- *Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico della Regione Siciliana – Relazione Generale*, redatto dalla Regione Siciliana, Assessorato Territorio e Ambiente nel 2004;
- *Piano di Gestione Rischio Alluvioni della Regione Siciliana*, redatto dalla Regione Siciliana, Assessorato Territorio e Ambiente nel 17/12/2015 ed in corso di approvazione da parte del Consiglio dei Ministri.

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

Per i tratti ricadenti nelle aree di allagamento si è cercato, in accordo con i vincoli presenti sul territorio, di posizionare il piano ferro ad una quota superiore, con adeguato franco di sicurezza, rispetto alla quota di allagamento presumibile dalla cartografia.

#### 4.1 ANALISI DEL TRACCIATO FERROVIARIO

La tratta della linea ferroviaria interessata dal presente studio è compresa tra la stazione di Fiumefreddo e quella di Giampilieri, per uno sviluppo complessivo di oltre 42 km tutti in variante rispetto al tracciato ferroviario esistente. Il tratto indagato è compreso tra la progressiva km 0+000 e la km 42+263.34.

Nel suo tragitto, la tratta Giampilieri – Fiumefreddo interseca i tratti terminali di una serie di burroni, burroncelli, torrenti, scoli e rivi.

Il percorso ferroviario attraversa in gran parte in galleria la zona costiera, limitando così al minimo le interferenze con i corsi d'acqua superficiali.

#### 4.2 STUDIO IDROLOGICO

Lo studio idrologico è stato condotto con l'obiettivo di valutare, con i modelli recentemente proposti in letteratura, le portate al colmo di piena nei tronchi torrentizi interessati dalle opere in progetto nonché individuare le portate prese a riferimento nel Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) redatto dalla Regione Siciliana.

Per le aste torrentizie, le stime sono state effettuate secondo tre differenti metodologie:

- analisi statistica di Gumbel;

- procedimento di calcolo VAPI messo a punto a livello regionale dall’Istituto di Idraulica dell’Università di Palermo e GNDCI;
- indicazioni fornite dall’Ufficio del Commissario Delegato ex O.P.C.M. 10 ottobre 2009, n.3815, “*Strumenti a supporto della progettazione di massima delle opere per la mitigazione del rischio idrogeologico nelle fiumare del messinese*”.

Le stime condotte sono riportate nella *Relazione Idrologica* annessa.

### 4.3 VERIFICHE IDRAULICHE

Gli attraversamenti sui corsi d’acqua sono stati verificati sulla base delle prescrizioni tecniche Italferr e delle NTC 2008.

Il Manuale di Progettazione Italferr distingue tra attraversamenti di corsi d’acqua principali e secondari a seconda che il bacino afferente agli attraversamenti sia superiore o inferiore ai 10 kmq. Per i suddetti attraversamenti si prevede che: “*Sulla base dei dati idrometrici ovvero dello studio idrologico, ad ogni tipo di manufatto idraulico verranno associati i seguenti tempi di ritorno  $Tr$ :*

[...]

c) *Manufatti di attraversamento (ponti e tombini):*

– *linea ferroviaria  $Tr = 300$  anni per  $S \geq 10$  km<sup>2</sup>.*

– *linea ferroviaria  $Tr = 200$  anni per  $S < 10$  km<sup>2</sup>.*

*(essendo  $S$  la superficie del bacino)*

Per gli attraversamenti principali, il Manuale prevede che:

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

– *franco minimo tra l'intradosso dell'opera e la quota del carico idraulico totale corrispondente al livello idrico di massima piena, calcolato come precedentemente descritto, pari a 0.50 m e comunque non inferiore ad 1.5 m sul livello idrico*



LINEA MESSINA - CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
FIUMEFREDDO  
LOTTO 01

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	74 di 101

– *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.*

– *Il calcolo dello scalzamento localizzato indotto dalle opere di sostegno deve essere valutato considerando le dimensioni delle pile; nel caso in cui il plinto di fondazione venga messo allo scoperto dall'erosione, le dimensioni maggiori e le forme più tozze dello stesso provocano un ulteriore scalzamento e pertanto, in tale condizione, il calcolo dell'erosione localizzata va ripetuto considerando le dimensioni del plinto invece che quelle della pila.”*

Per gli attraversamenti secondari, il Manuale prevede che:

*“La sezione di deflusso complessiva del tombino dovrà consentire lo smaltimento della portata di massima piena con un grado di riempimento non superiore al 70% della sezione totale.*

*Dovranno essere previsti gli opportuni accorgimenti per evitare, in corrispondenza delle fondazioni del manufatto, fenomeni di scalzamento o erosione.”*

#### **4.4 SISTEMAZIONI IDRAULICHE**

Gli interventi previsti in alveo sono stati definiti applicando criteri di ingegneria naturalistica ed utilizzando laddove possibile, opere di protezione di tipo “elastico” quali massi sciolti, gabbioni e materassi tipo Reno, che costituiscono un’affidabile protezione degli stessi dall’azione erosiva della corrente di piena.

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.

Gli interventi di sistemazione ripropongono la sagoma delle sezioni attuali d’alveo, e incidono solo localmente sulle pendenze longitudinali dei corsi d’acqua.

Le sistemazioni idrauliche hanno in generale lo scopo di:

- assicurare con il periodo di ritorno previsto la sicurezza dell’infrastruttura ferroviaria;
- diminuire le eventuali condizioni di rischio, eliminando o riducendo eventuali esondazioni nella zona di intervento;

- non alterare le condizioni di deflusso idrico e solido nel tratto oggetto di studio;
- impedire divagazioni che possano andare ad interessare le opere di fondazione delle pile o delle spalle;
- assicurarsi che l'evoluzione della livelletta d'alveo, non approfondisca l'incisione esistente in corrispondenza dell'opera di attraversamento;
- evitare le conseguenze derivanti dai fenomeni di erosione localizzata.

Sulla base delle risultanze della stima dell'erosione localizzata, si è proceduto a porre l'estradosso delle fondazioni delle pile ad una profondità maggiore dell'erosione stimata.

Particolari accorgimenti sono stati adottati per una corretta manutenzione delle opere, onde poter ridurre al minimo gli interventi atti a garantirne l'efficienza ed, in ogni caso, a ridurre a livelli minimi i costi delle opere.

#### **4.5 L'ANALISI DI COMPATIBILITA' IDRAULICA**

Sulla base delle risultanze dello studio idrologico ed i risultati delle verifiche idrauliche riportate nei paragrafi precedenti, sono stati definiti:

- adeguamenti della livelletta ferroviaria ai franchi minimi richiesti per il transito delle portate con periodo di ritorno di 200/300 anni, nel rispetto dei criteri ferroviari, in riferimento agli attraversamenti idraulici principali;
- presidi idraulici sulle aste fluviali;
- le protezioni del rilevato ferroviario;
- forma e disposizione delle pile dei viadotti;
- la definizione del piano di posa delle fondazioni delle pile a seguito della stima dell'erosione localizzata.

Le soluzioni prescelte seguono gli indirizzi indicati nelle norme nazionali ed in quelle riportate nelle norme di attuazione del PAI, in quanto:

- il potenziamento della linea ferroviaria in progetto risponde a specifiche esigenze di sviluppo ed è legata a fattori di pubblico interesse;
- che eventuali alternative alla soluzione di progetto comportano oneri tecnici, finanziari ed ambientali difficilmente sostenibili;
- che l'intervento proposto è tale da non aggravare la funzionalità idraulica dell'area;
- che gli interventi non aumentano il livello di rischio idraulico non comportando significativo ostacolo al



LINEA MESSINA - CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
FIUMEFREDDO  
LOTTO 01

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	76 di 101

deflusso o riduzione della capacità di invaso delle aree interessate;

- che le opere di progetto non precludono la possibilità di eliminare le cause che determinano le attuali condizioni di rischio.
- gli interventi di deviazione presenti in progetto ripropongono le sezioni attuali dei canali e le opere di attraversamento non creano restringimenti e rigurgiti.

Inoltre, come si evidenzia dalle tavole di progetto e dall'analisi di sintesi sviluppata nei paragrafi precedenti, le opere in progetto:

- non aumentano l'estensione delle aree di esondazione e non aumentano, quindi, il rischio idraulico;
- non modificano significativamente i livelli idrici rispetto alla configurazione ante operam.

Con riferimento alle verifiche idrauliche effettuate, sintetizzate nelle tabelle dei paragrafi precedenti e negli elaborati grafici dove sono riportate le sezioni di calcolo con i relativi livelli idrici ed energetici post operam per le portate con tempo di ritorno di progetto, in corrispondenza dei vari attraversamenti si evidenziano franchi ampiamente cautelativi.

Alla luce delle precedenti considerazioni, la configurazione finale di progetto risulta idraulicamente compatibile con le norme della legislazione vigente di protezione dai rischi idraulici e con la conformazione odierna dei luoghi.



LINEA MESSINA - CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
FIUMEFREDDO  
LOTTO 01

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	77 di 101

## 5 BIBLIOGRAFIA

AA. VV. *Manuale di Ingegneria Civile e Ambientale*, Zanichelli ESAC, Bologna, 2003.

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.

Prescrizioni generali per la progettazione di RFI (PTP).

Regione Siciliana, Assessorato Territorio e Ambiente, *Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico della Regione Siciliana – Relazione Generale*, 2004.

Regione Siciliana, Assessorato Territorio e Ambiente, *Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) - Area Territoriale tra i bacini del F. Simeto e del F. Alcantara (095) – Relazione*, 2006.

Regione Siciliana, Assessorato Territorio e Ambiente, *Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) – Bacino idrografico del Fiume Alcantara (096) – Relazione*, 2006.

Regione Siciliana, Assessorato Territorio e Ambiente, *Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) - Area tra Fiume Alcantara e Fiumara d'Agrò (097) – Bacino idrografico della Fiumara d'Agrò ed area tra Fiumara d'Agrò e Torrente Savoca (098) – Relazione*, 2006.

Regione Siciliana, Assessorato Territorio e Ambiente, *Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) – Bacino idrografico del T.te Savoca (099) – Bacino idrografico del T.te Pagliara e area intermedia T.te Pagliara e T.te Fiumedinisi (100) – Relazione*, 2006.

Regione Siciliana, Assessorato Territorio e Ambiente, *Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) – Bacino idrografico del Torrente Fiumedinisi (101) – Relazione*, 2006.

Regione Siciliana, Assessorato Territorio e Ambiente, *Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) - Area Territoriale tra il bacino del Torrente Fiumedinisi e Capo Peloro (102) – Relazione*, 2006.

Regione Siciliana, Osservatorio delle Acque dell'Agenzia Regionale per i Rifiuti e le Acque (ARRA), *Annali Idrologici*, disponibili presso [www.osservatorioacque.it](http://www.osservatorioacque.it).

Regione Siciliana, Osservatorio delle Acque dell'Agenzia Regionale per i Rifiuti e le Acque (ARRA), *Piano di Gestione Rischio Alluvioni della Regione Siciliana*.

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

## 6 APPENDICE A – RISULTATI DEL MODELLO MATEMATICO HEC-RAS

Si riportano di seguito i risultati grafici e numerici ottenuti in corrispondenza delle sezioni di calcolo per i corsi d'acqua analizzati nella presente relazione.

### 6.1 MODELLO DI SIMULAZIONE IDRAULICA PER IL TORRENTE MINISSALE

#### 6.1.1 Scenario ante-operam

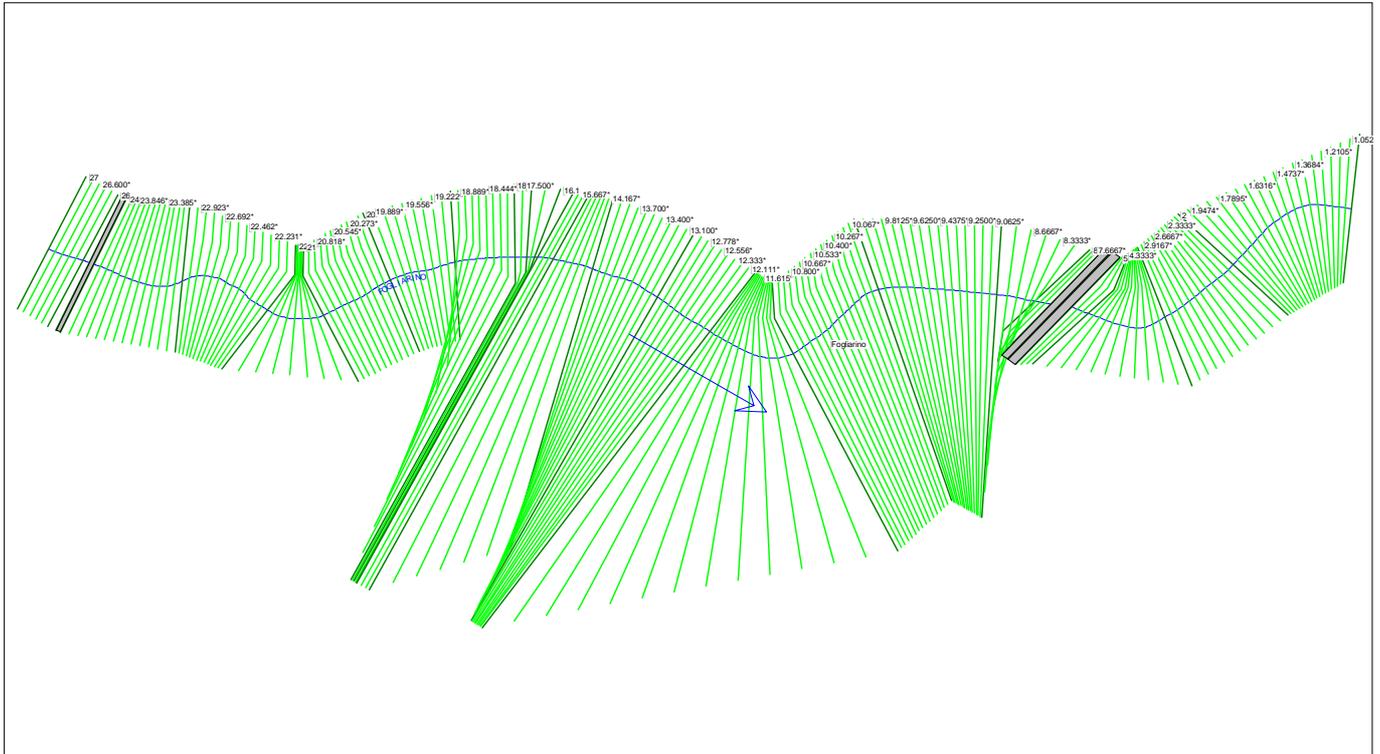
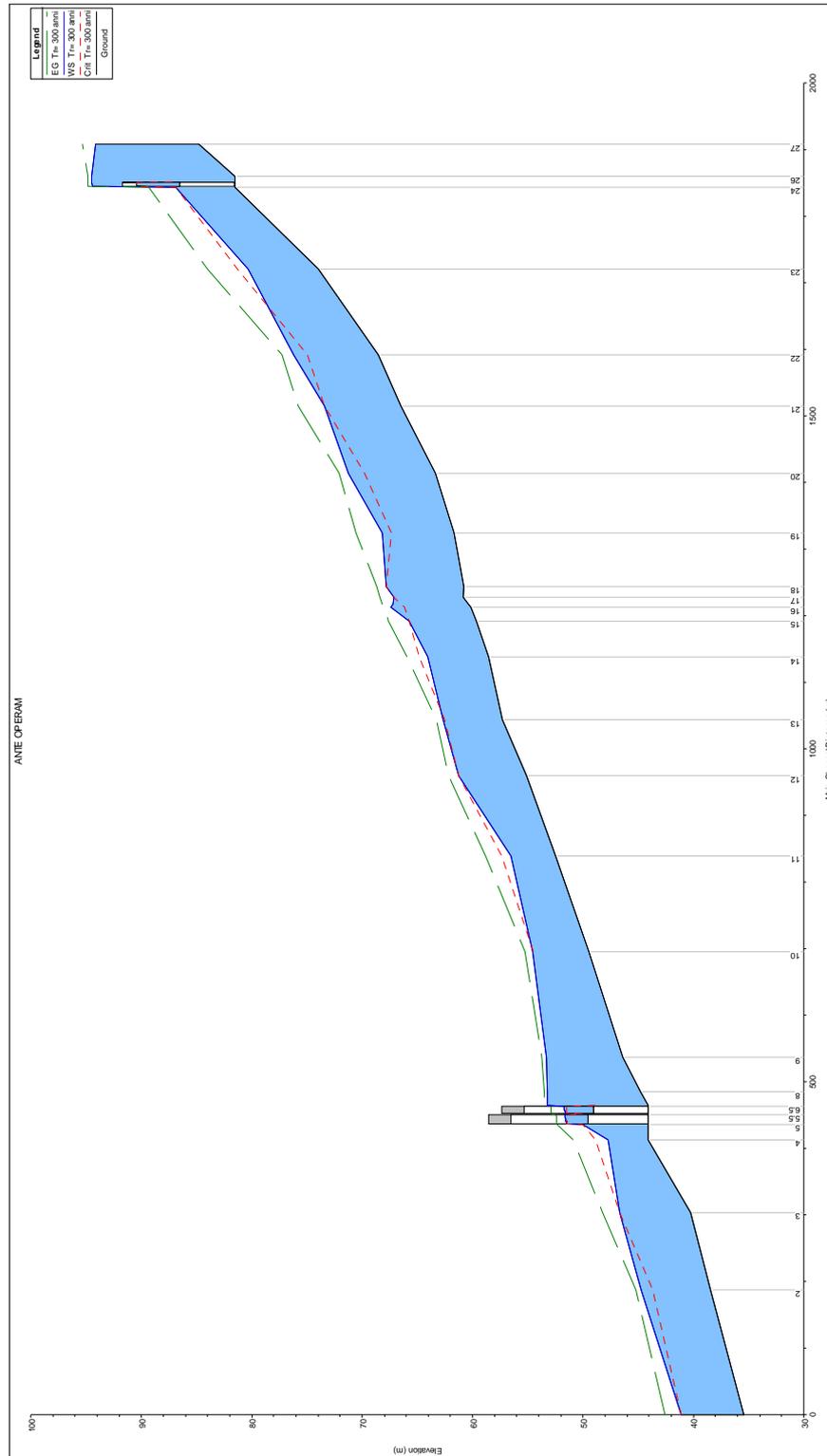
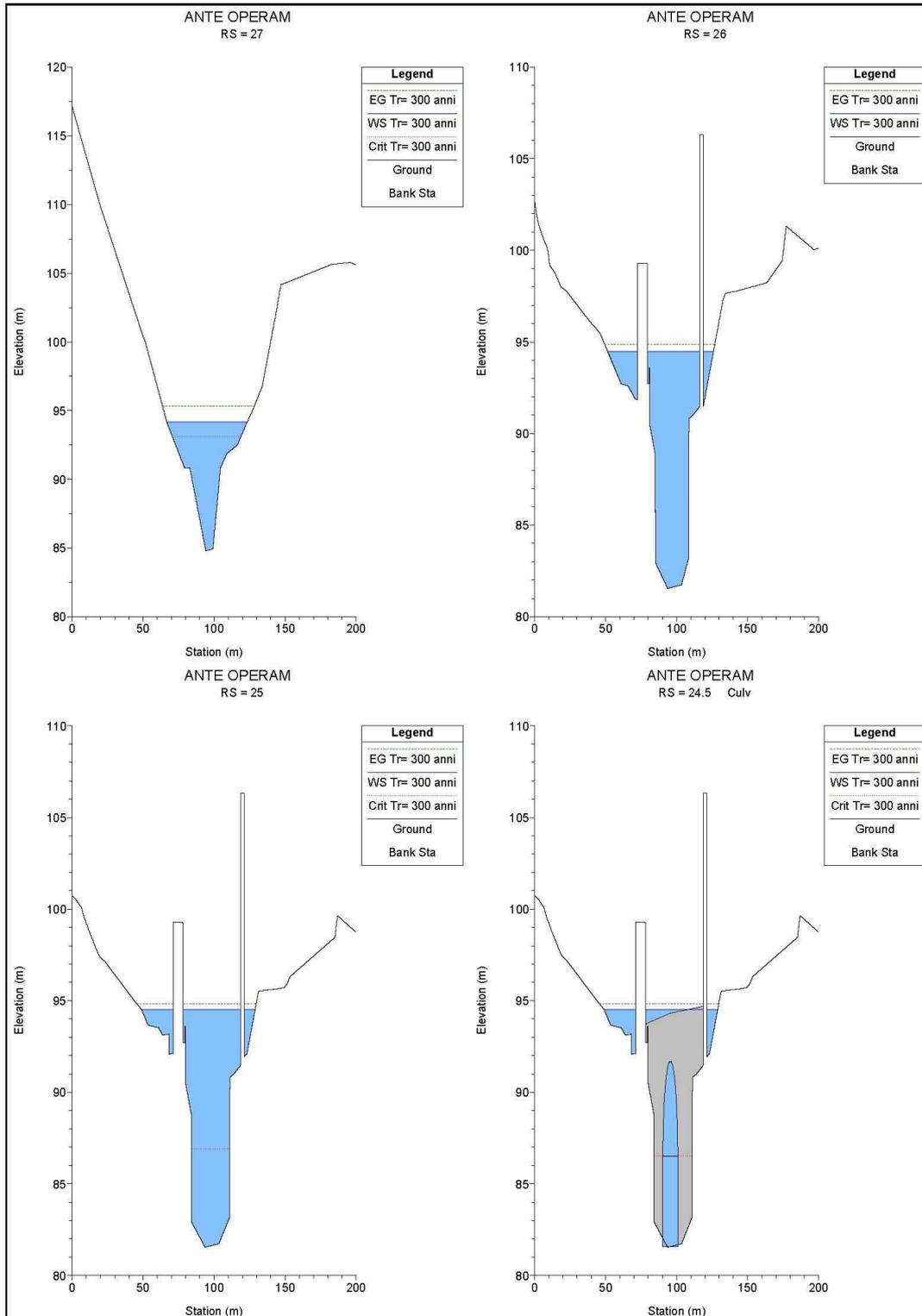
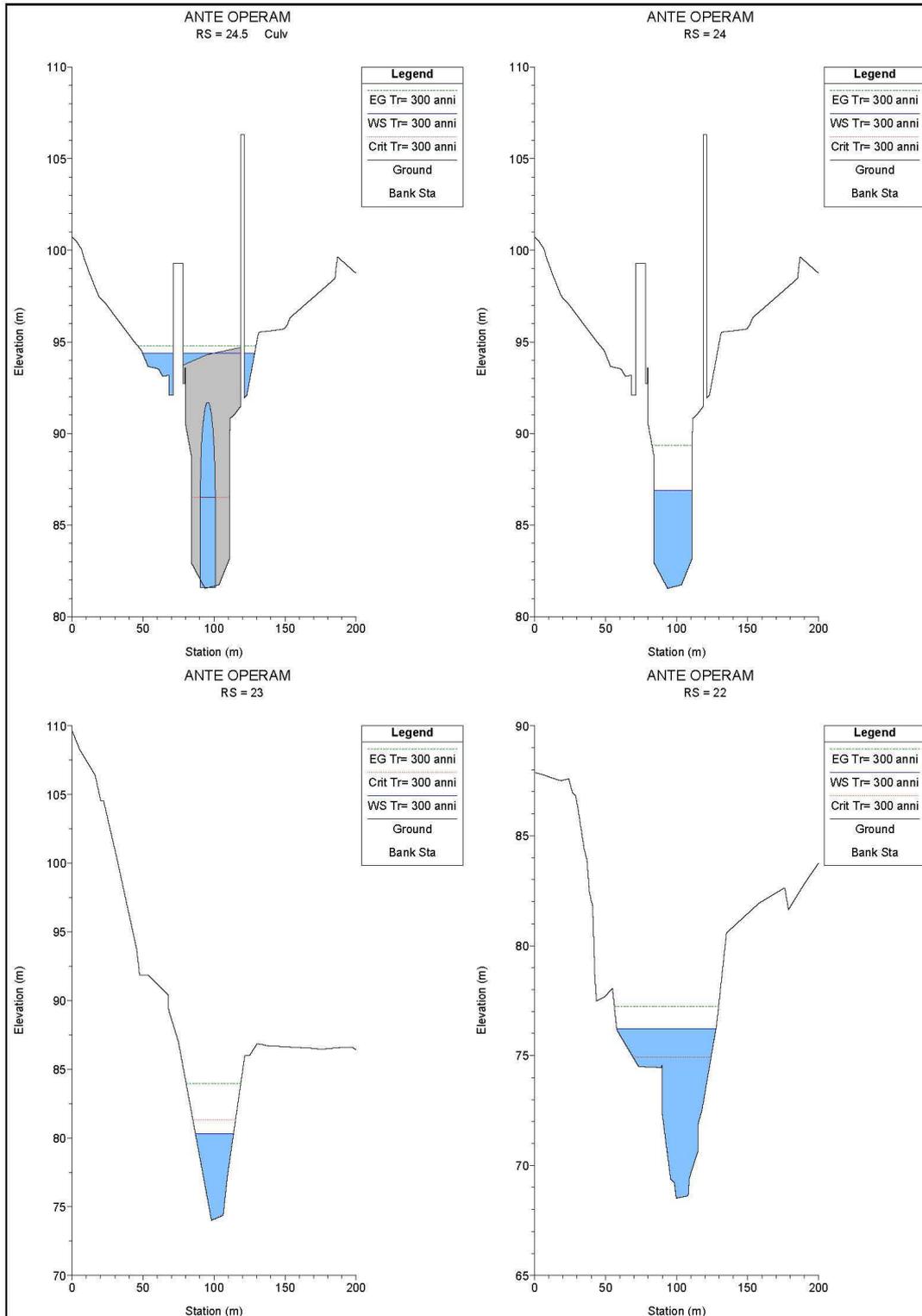


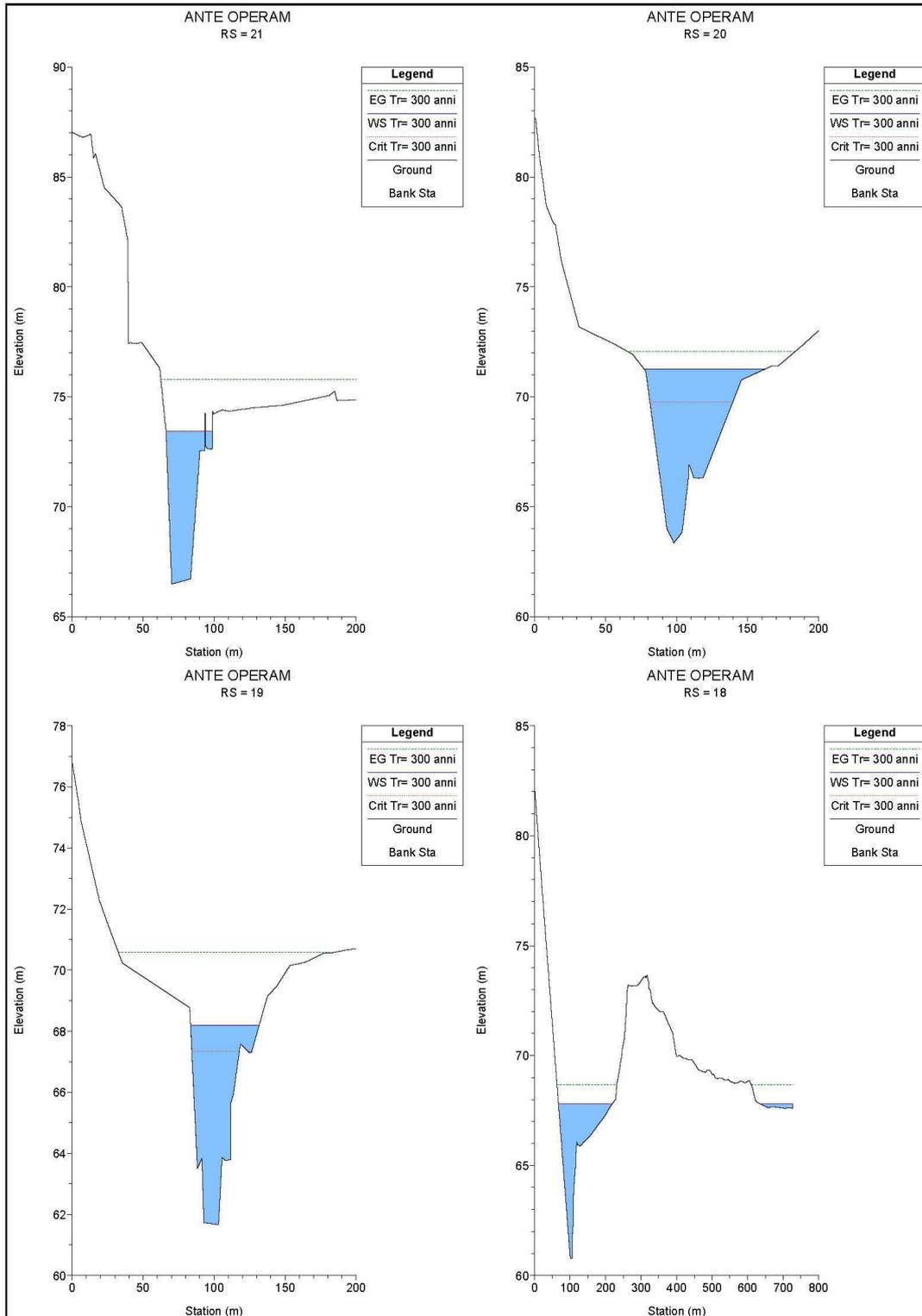
Figura 28 – Schema planimetrico ante operam del torrente Minissale

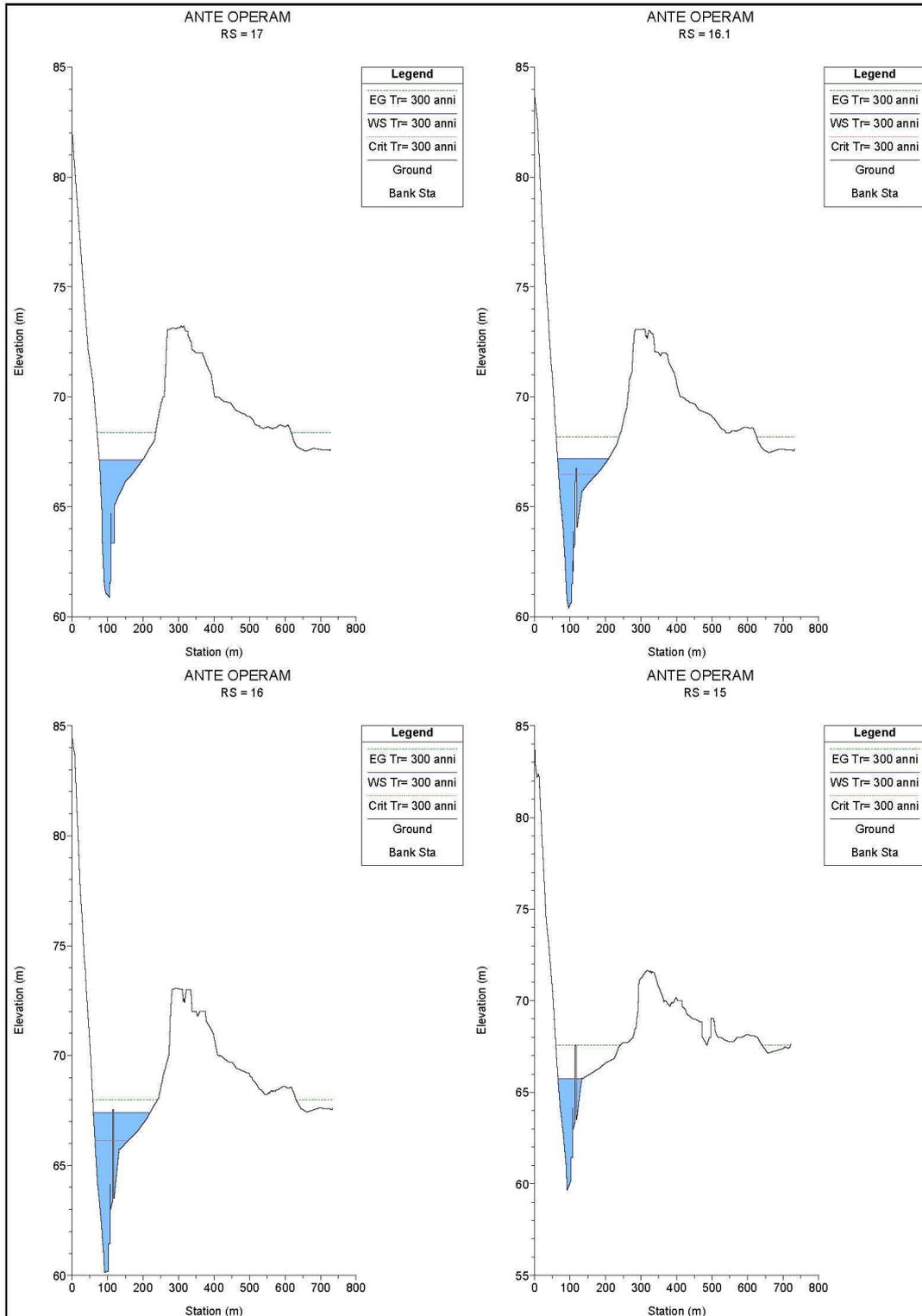


**Figura 29 – Profilo ante operam del torrente Minissale**



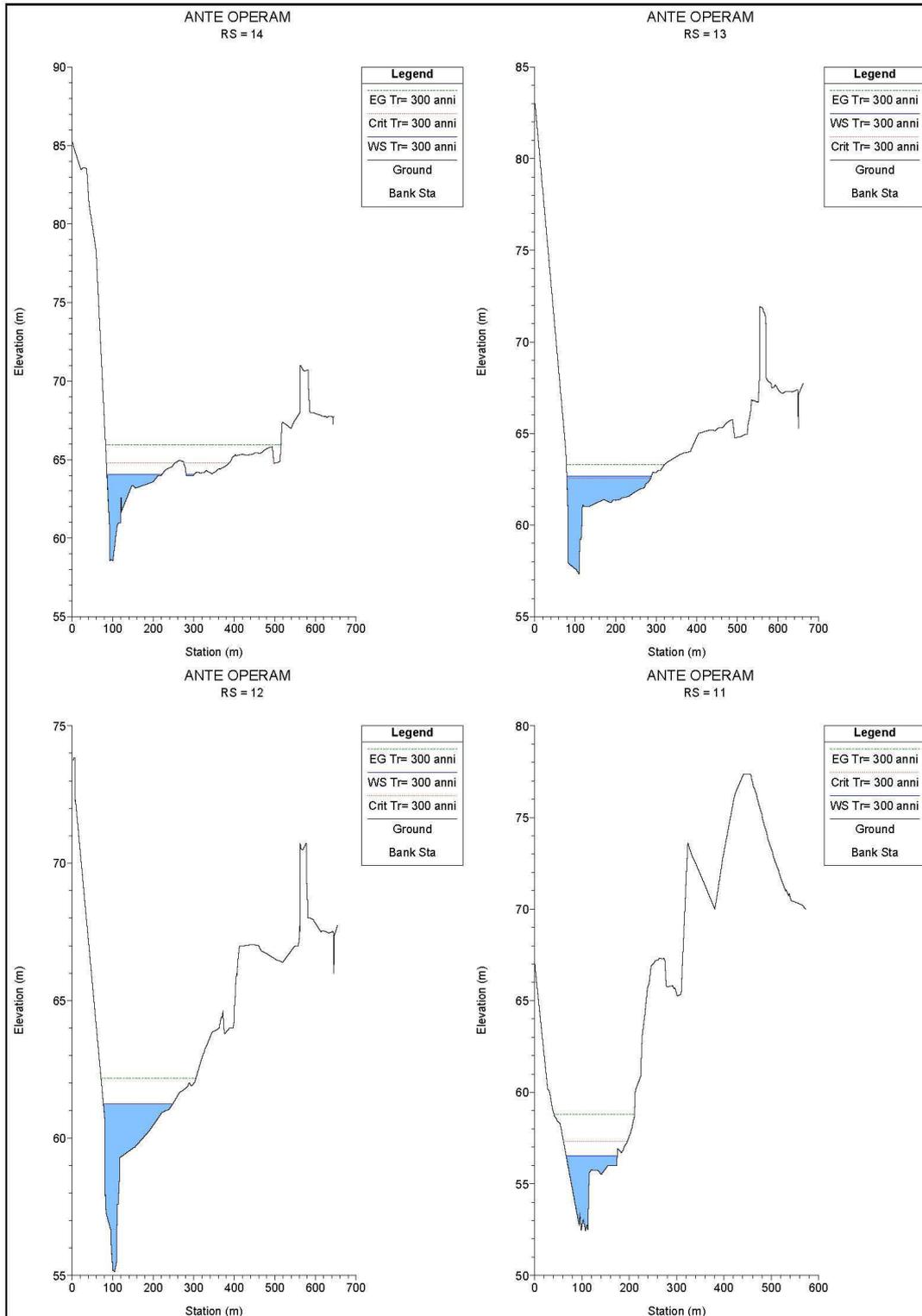


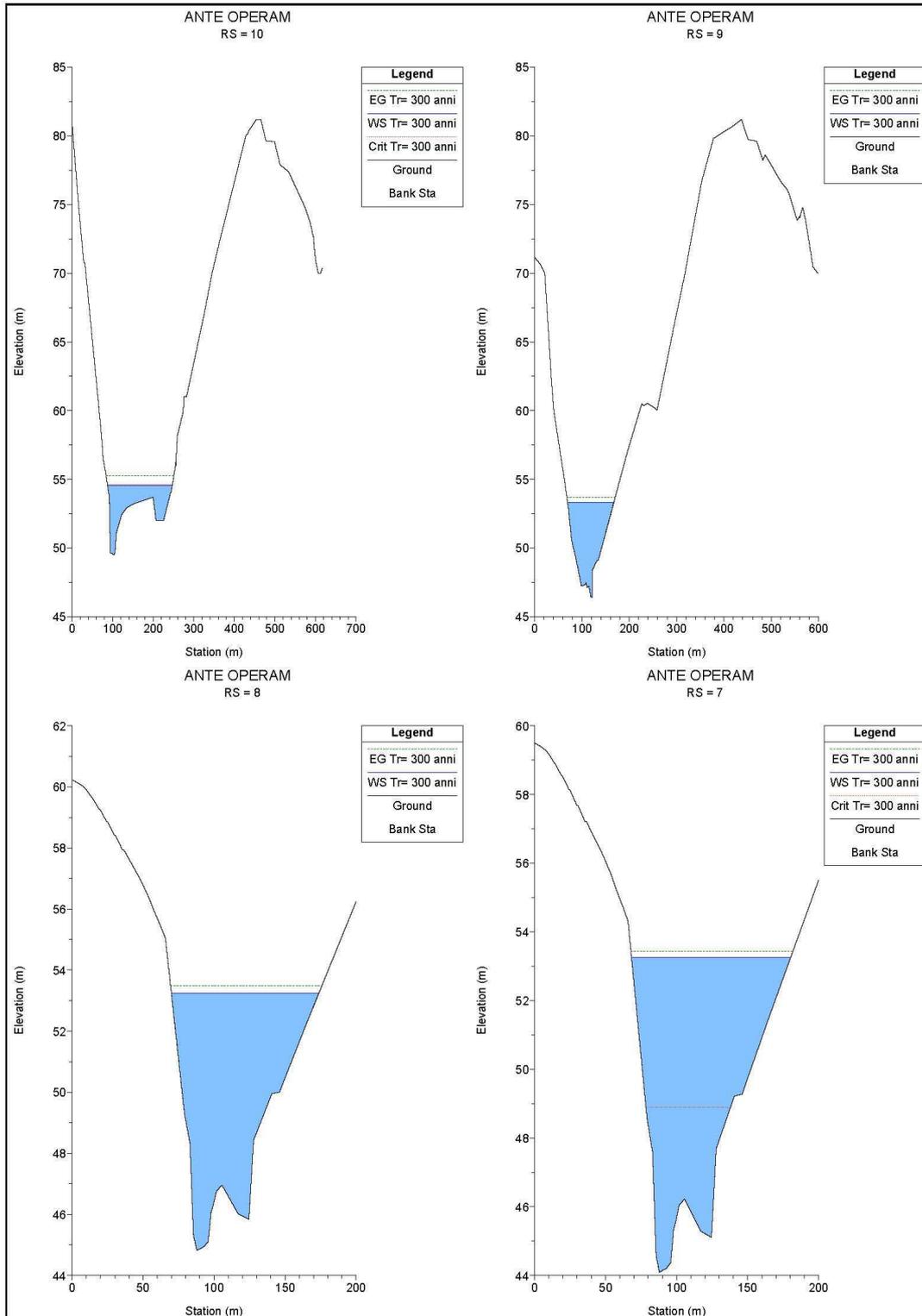


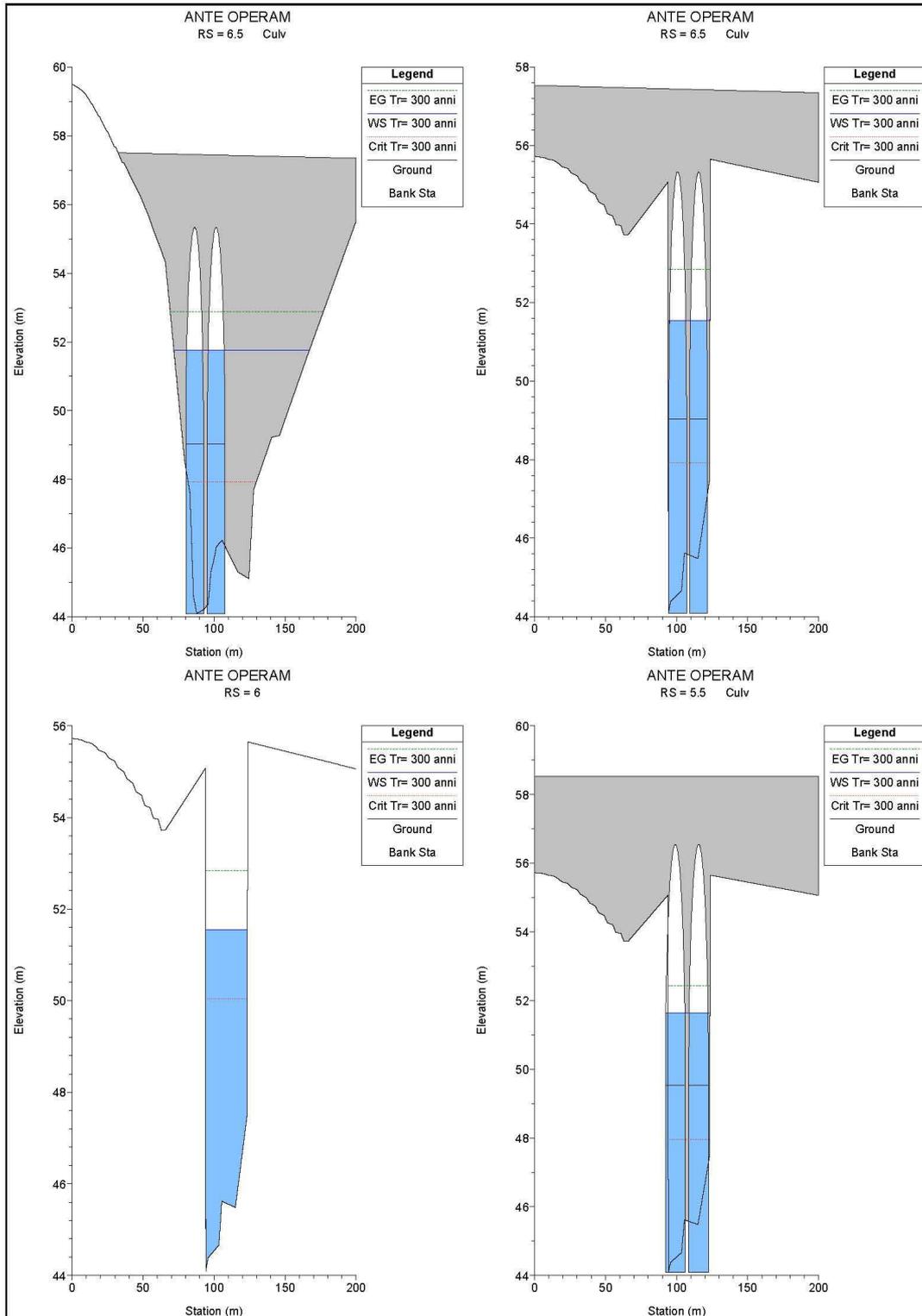


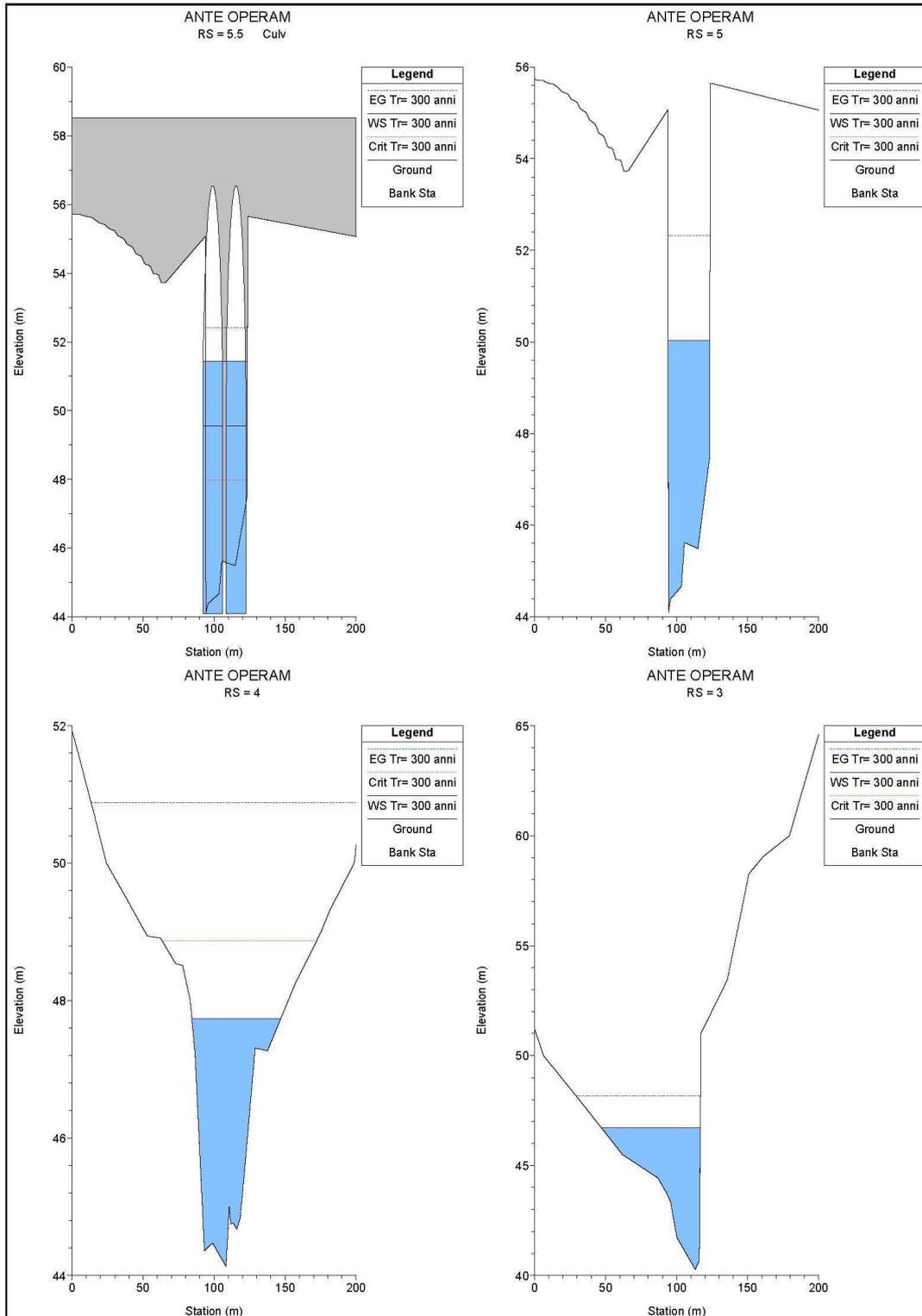
Relazione idraulica opere maggiori

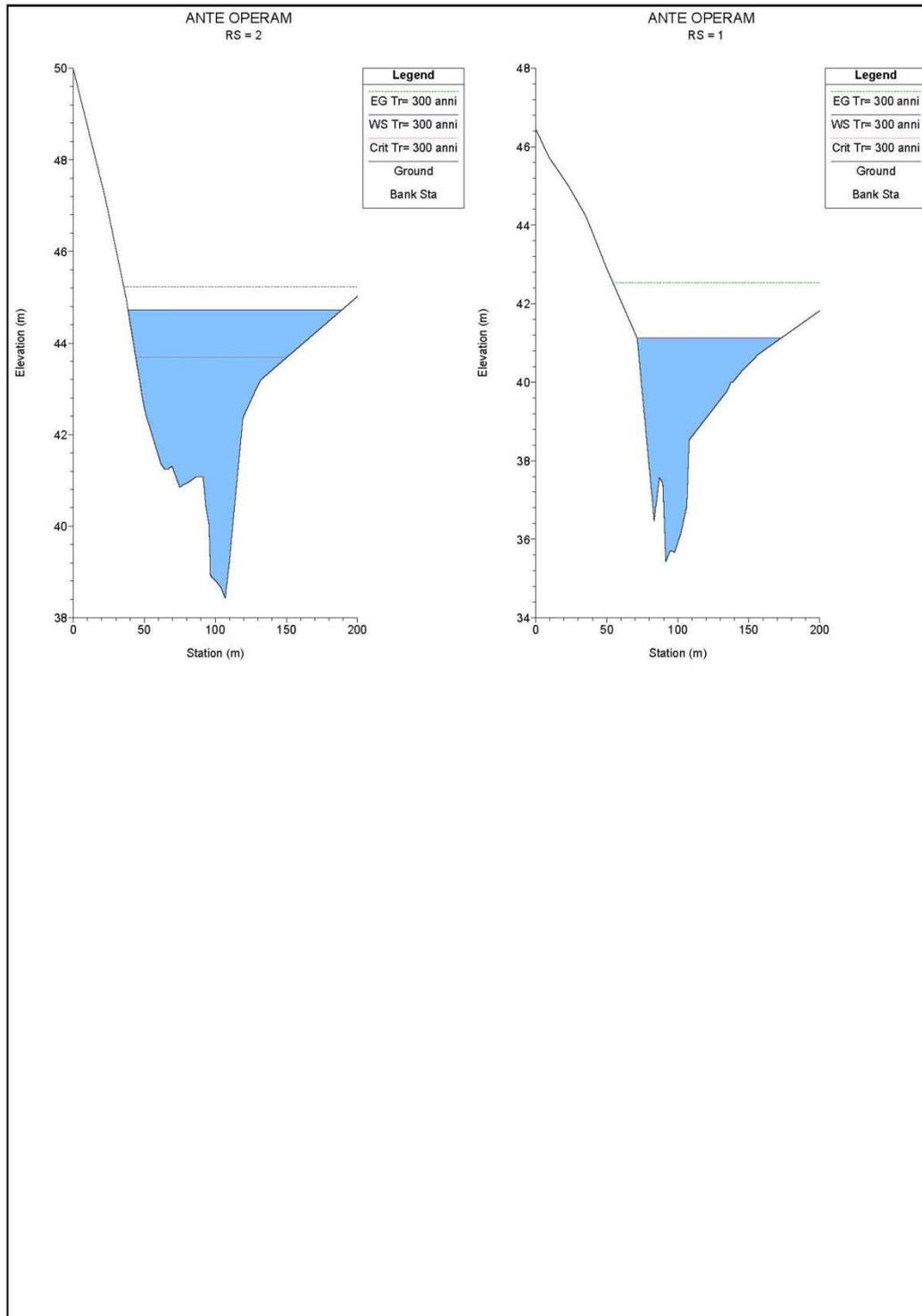
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	84 di 101











**Figura 30 – Sezioni ante operam del torrente Minissale**

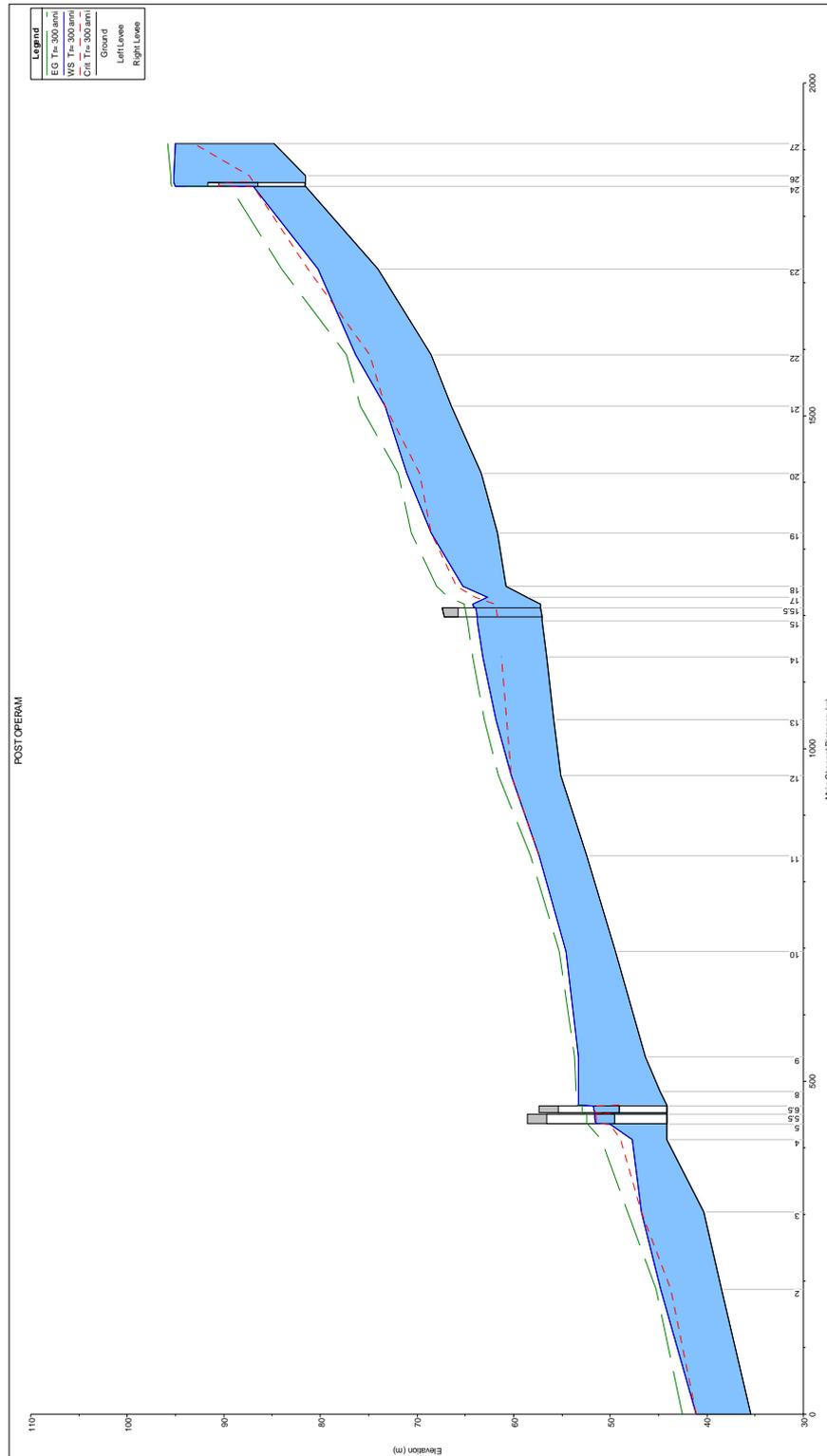
Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	89 di 101

River Station (Sezione)	Q Total (Portata) [m <sup>3</sup> /s]	Length Chanel (Parziale) [m]	Min Ch El (Q.ta fondo) [m.s.m.]	W.S. Elev. (Pelo libero) [m.s.m.]	Crit. W.S. (Quota altezza critica) [m.s.m.]	EG Elev (Quota Energia) [m.s.m.]	E.G. Slope (Pend. Energia) [m/m]	Vel Chnl (Velocità) [m/s]	Flow Area (Area sez. liq.) [m <sup>2</sup> ]	Top Width (Largh. Sup.) [m]	Froude # Chl (n° Froude)	Shear Total (Tens. Trascinam.) [N/m <sup>2</sup> ]	W.P. Total (Cont. Bagn.) [m]
27	897.60	48.36	84.79	94.15	93.11	95.33	0.012111	5.12	217.62	56.50	0.62	420.52	61.46
26	897.60	8.43	81.54	94.48		94.86	0.002421	2.84	383.47	65.10	0.26	96.96	93.88
25	897.60	7.54	81.54	94.51	86.91	94.83	0.001142	2.58	422.15	70.39	0.23	47.65	99.21
24	897.60	123.75	81.54	86.91	86.91	89.36	0.029049	6.92	129.99	26.99	1.01	1064.73	34.78
23	897.60	128.61	74.00	80.30	81.32	83.98	0.067604	8.50	105.63	26.74	1.37	2294.08	30.53
22	897.60	77.30	68.51	76.22	74.92	77.22	0.009866	4.69	239.92	69.72	0.58	308.13	75.33
21	897.60	101.00	66.48	73.43	73.43	75.80	0.032929	6.86	136.30	32.35	0.94	1078.42	40.81
20	897.60	89.82	63.35	71.26	69.76	72.08	0.009068	4.91	291.51	85.07	0.59	293.85	88.22
19	897.60	80.11	61.66	68.20	67.33	70.58	0.030032	7.67	161.20	48.41	0.98	870.68	54.53
18	897.60	15.73	60.77	67.81	67.81	68.69	0.012430	5.47	333.09	244.11	0.68	164.50	246.82
17	897.60	10.33	60.88	67.12	67.12	68.38	0.015491	5.65	256.53	121.74	0.75	300.99	129.47
16.1	897.60	5.16	60.38	67.19	66.47	68.16	0.011973	5.31	307.43	143.61	0.67	232.51	155.24
16	897.60	20.24	60.13	67.40	66.12	67.98	0.007565	4.43	375.37	155.07	0.53	164.95	168.82
15	897.60	54.00	59.65	65.73	65.73	67.59	0.027212	7.16	188.44	62.69	0.96	688.23	73.06
14	897.60	94.72	58.55	64.04	64.80	65.93	0.033651	7.00	212.11	154.38	1.02	438.42	159.65
13	897.60	83.83	57.32	62.67	62.53	63.29	0.011581	4.16	364.14	208.95	0.60	193.97	213.22
12	897.60	120.15	55.14	61.25	61.25	62.17	0.015404	5.36	308.26	171.56	0.72	264.41	176.11
11	897.60	144.13	52.44	56.52	57.33	58.80	0.062290	7.91	169.49	107.88	1.33	940.10	110.13
10	897.60	158.68	49.50	54.60	54.49	55.27	0.019226	4.94	314.13	160.05	0.74	362.93	163.19
9	897.60	51.32	46.39	53.30		53.71	0.005814	3.48	369.90	97.62	0.45	209.48	100.67
8	897.60	21.00	44.82	53.25		53.50	0.002129	2.36	471.07	103.92	0.28	91.23	107.80
7	897.60	12.70	44.09	53.26	48.89	53.44	0.001434	2.06	550.64	112.08	0.23	66.67	116.16
6	897.60	15.70	44.09	51.55	50.04	52.84	0.017447	5.03	178.52	29.50	0.65	744.17	41.05
5	897.60	23.66	44.09	50.04	50.04	52.32	0.040980	6.70	134.01	29.38	1.00	1416.52	38.02
4	897.60	109.23	44.13	47.74	48.87	50.88	0.085970	7.89	119.05	62.63	1.55	1573.65	63.78
3	897.60	115.19	40.27	46.71	46.71	48.18	0.026271	5.69	190.37	69.71	0.85	648.26	75.65
2	897.60	187.81	38.43	44.72	43.69	45.23	0.008386	3.88	361.36	150.70	0.54	195.16	152.27
1	897.60		35.43	41.12	41.12	42.54	0.024894	6.10	217.68	101.38	0.89	510.74	104.04

**Tabella 12 – Risultati della simulazione numerica del torrente Minissale nella configurazione ante operam**





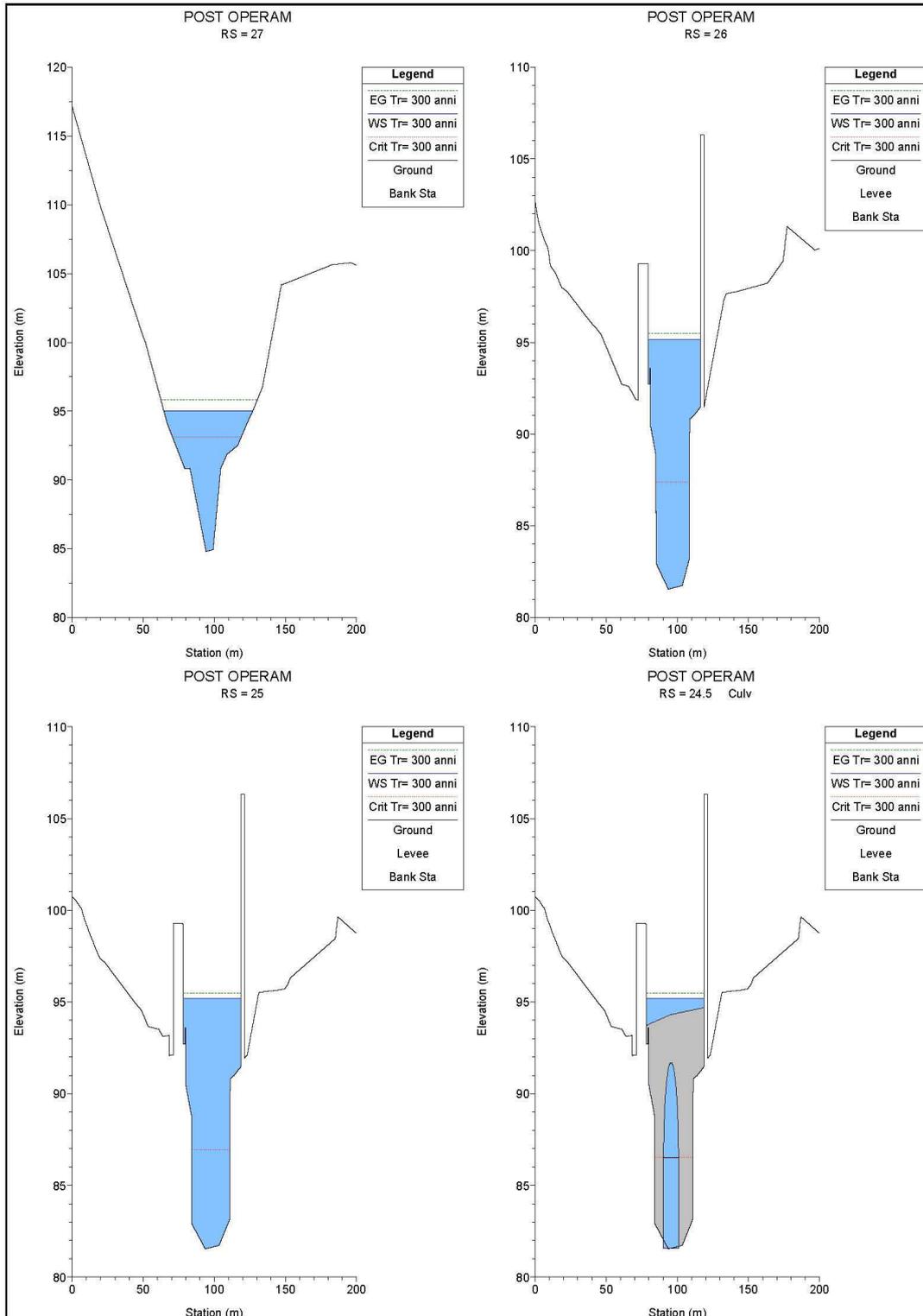
**Figura 32 – Profilo post operam del torrente Minissale**

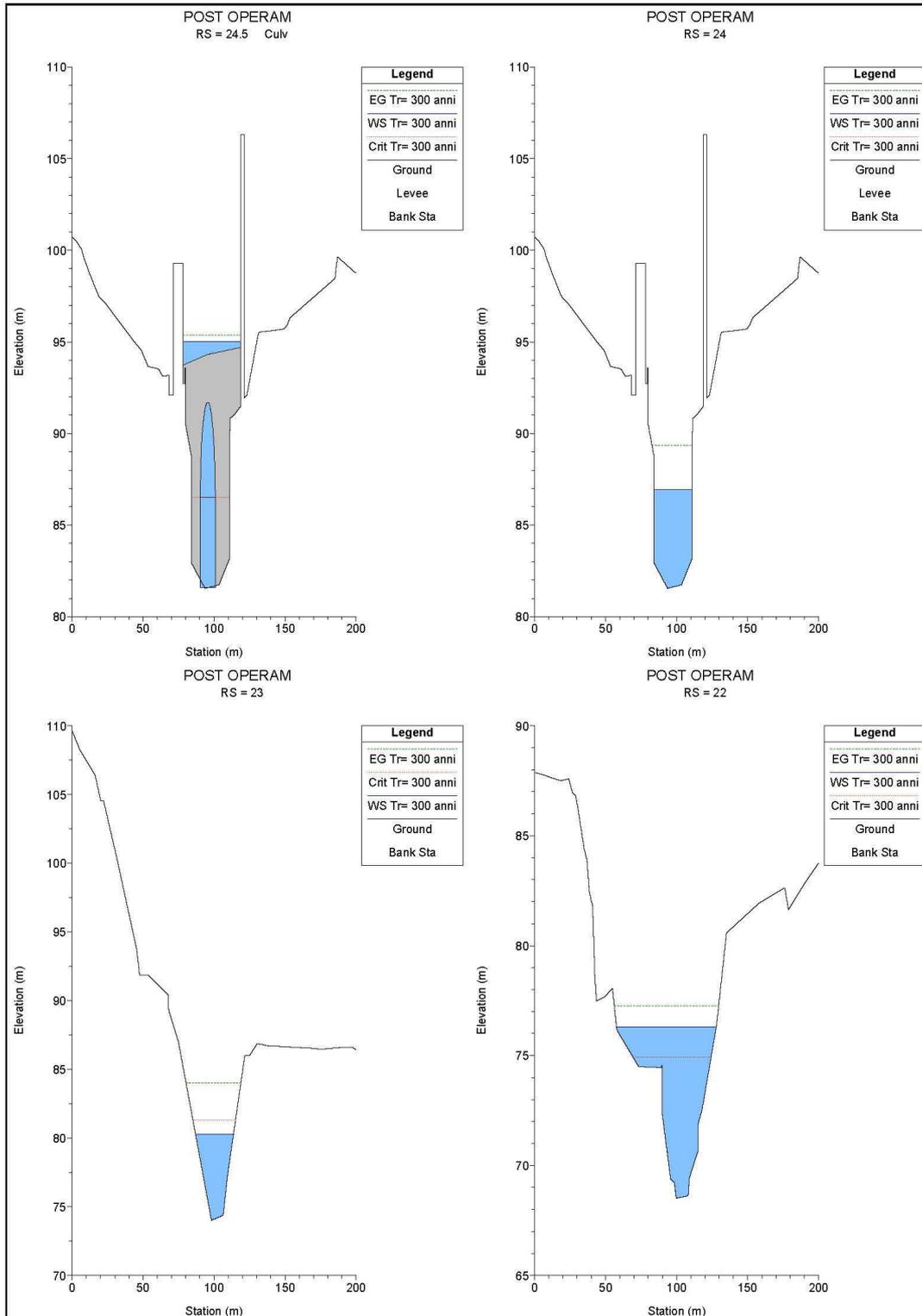


LINEA MESSINA - CATANIA  
**PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
 FIUMEFREDDO**  
**LOTTO 01**

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	92 di 101



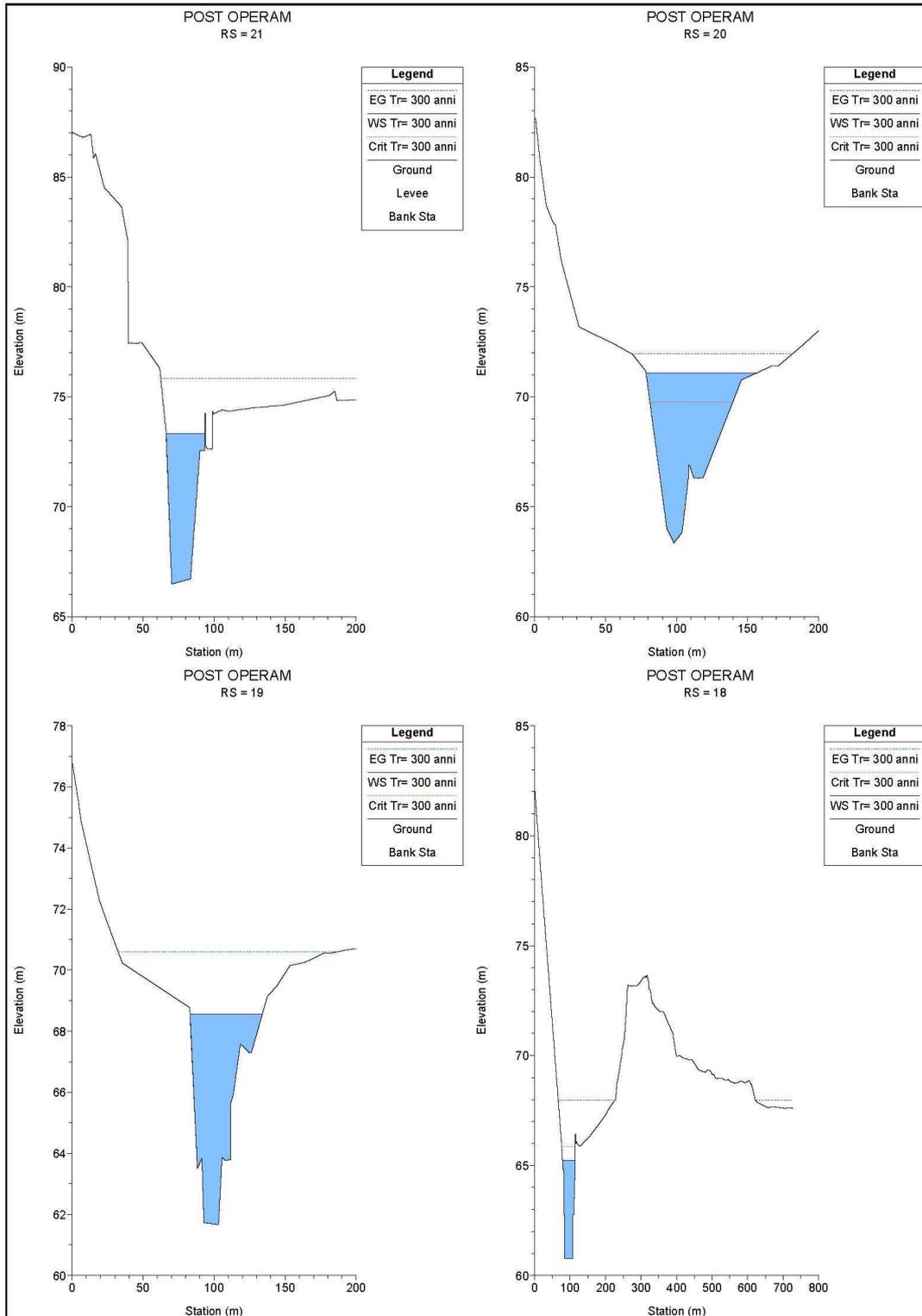


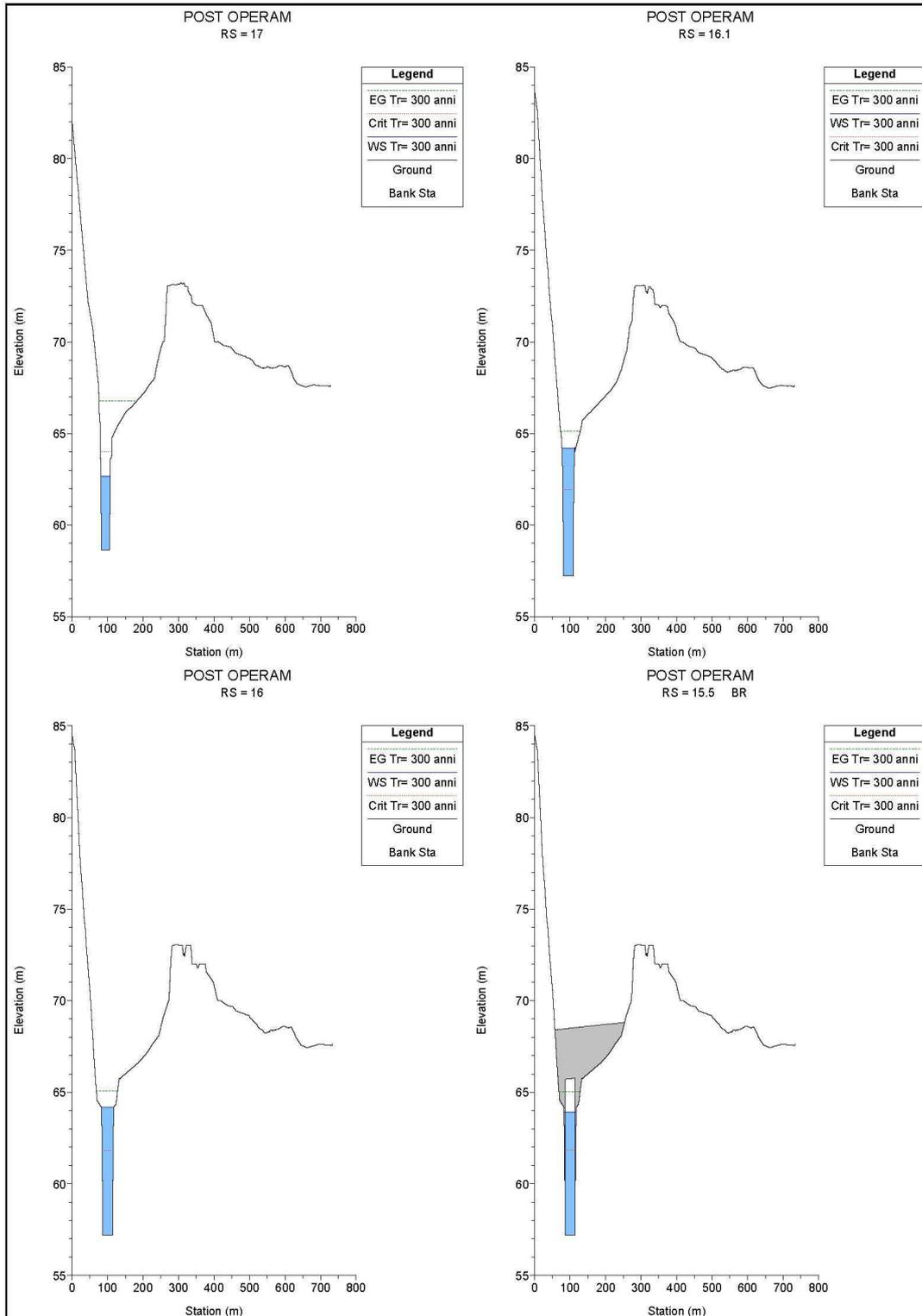


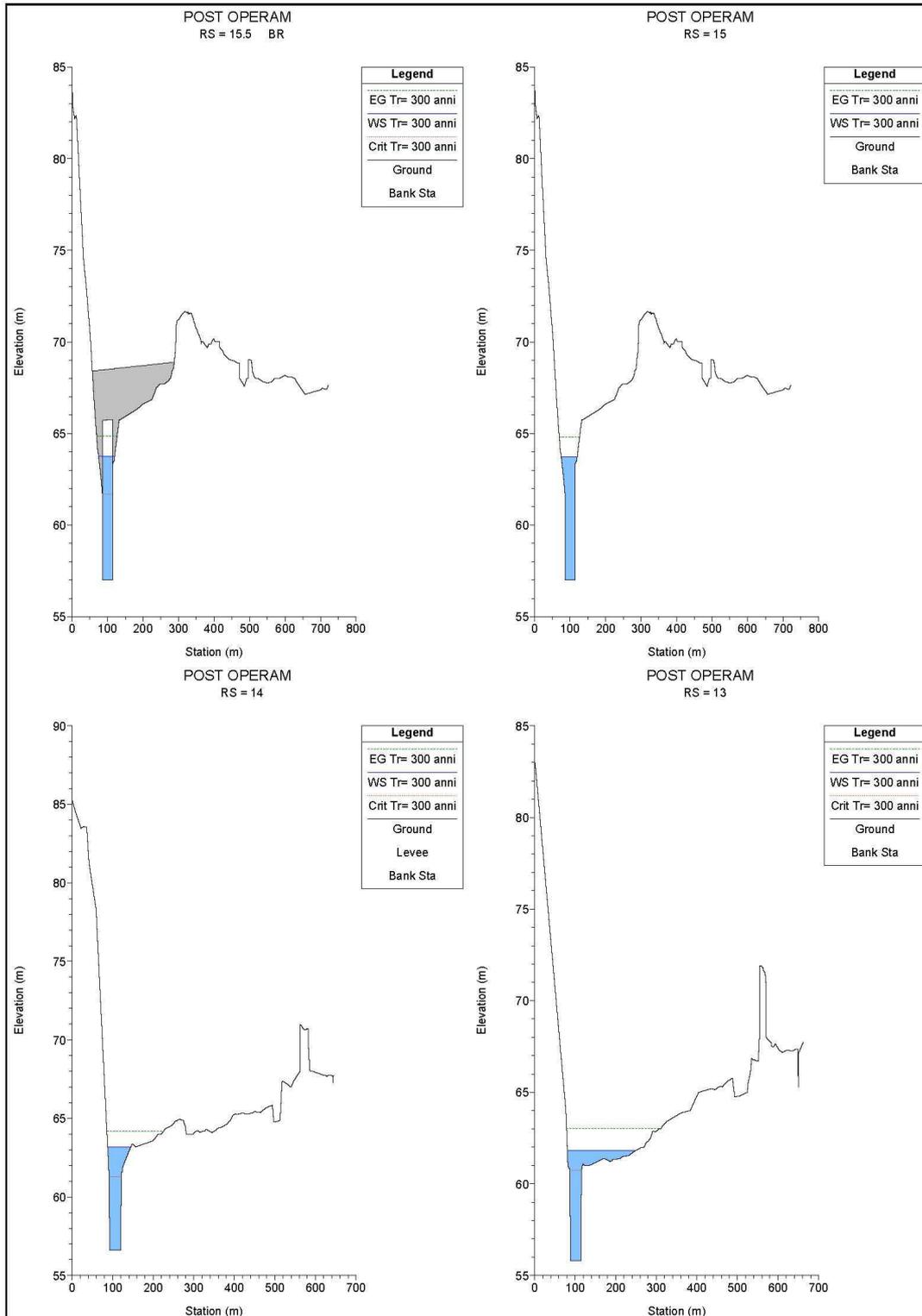
LINEA MESSINA - CATANIA  
**PROGETTO DEFINITIVO – RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI-  
 FIUMEFREDDO**  
**LOTTO 01**

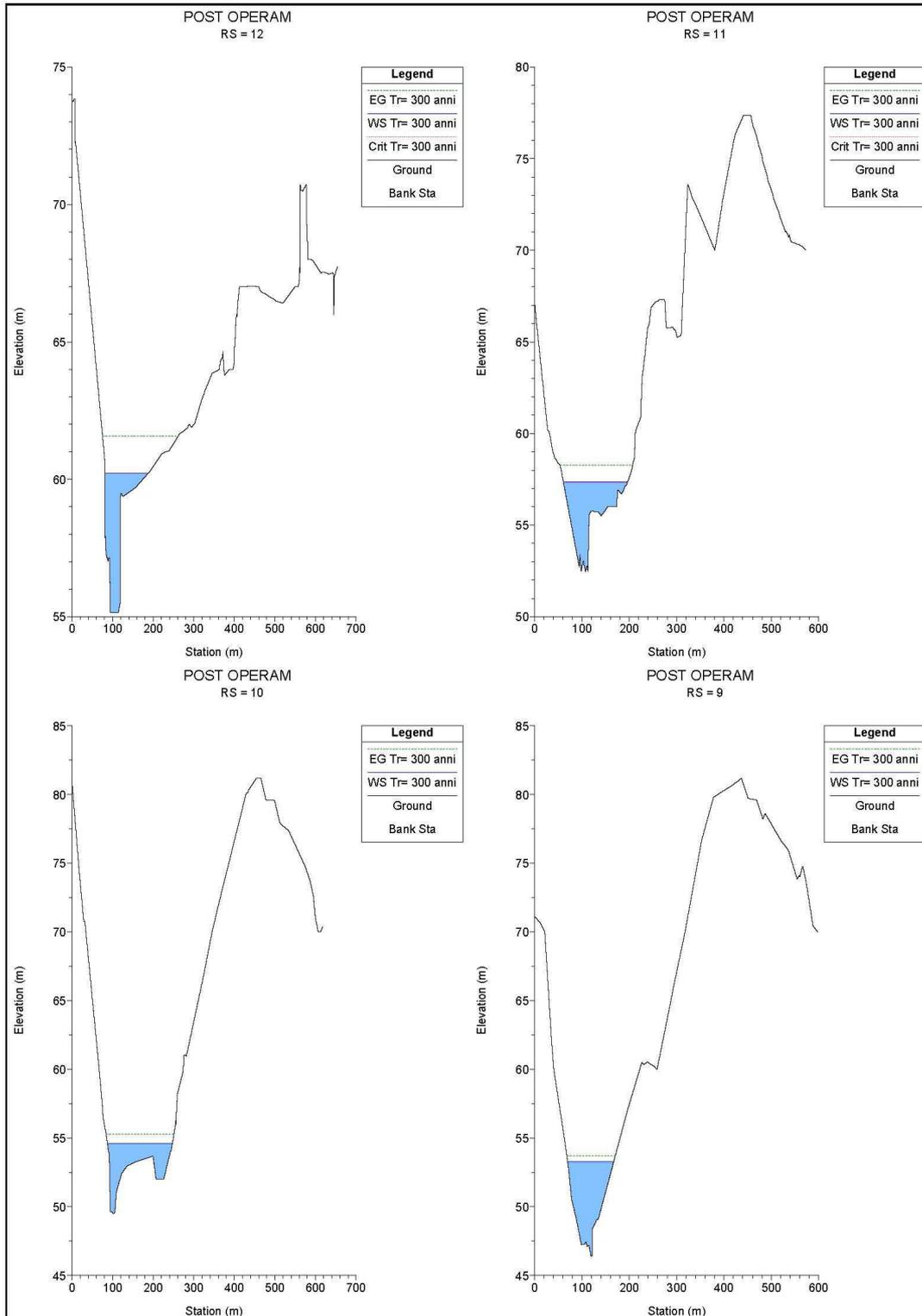
Relazione idraulica opere maggiori

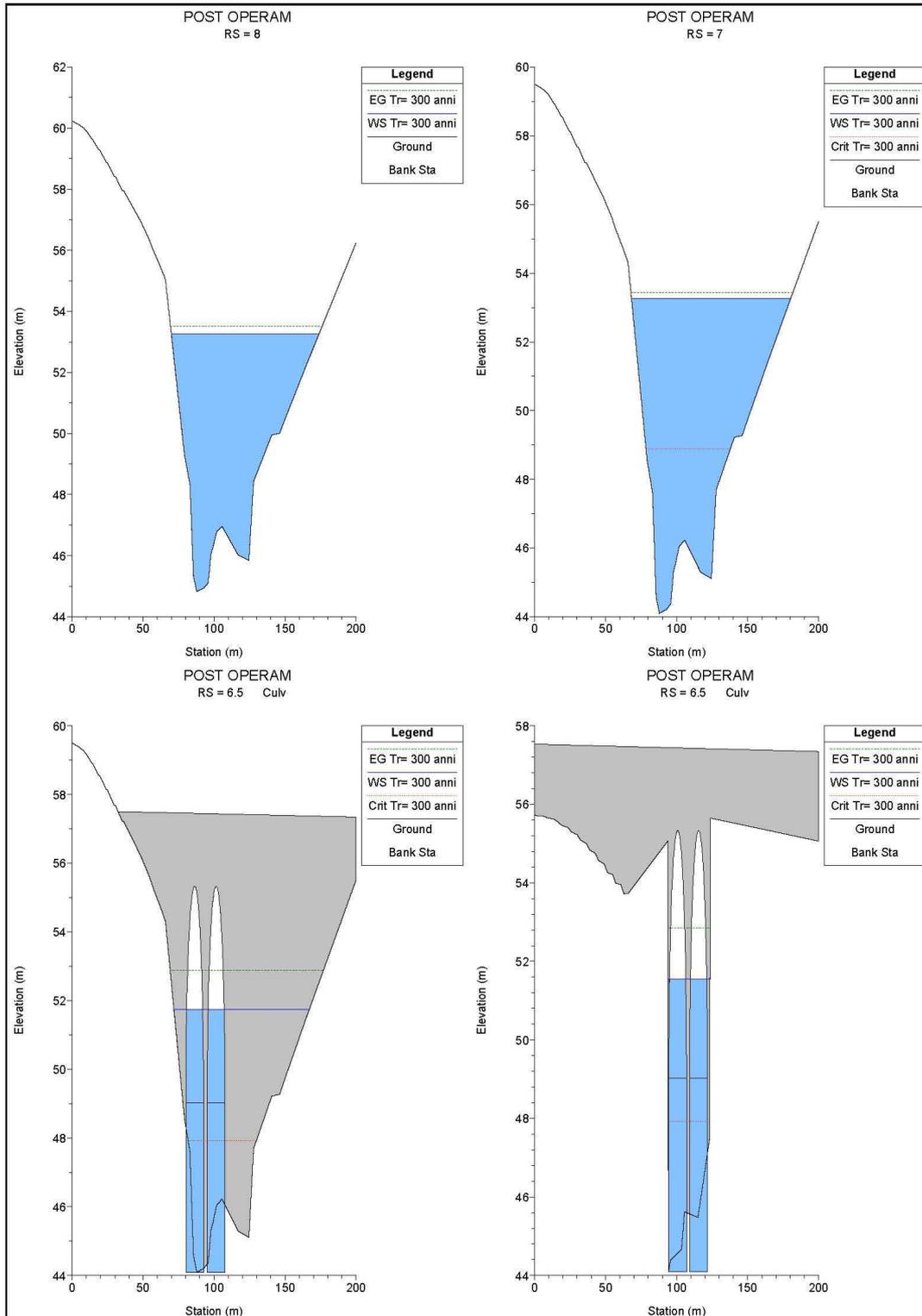
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	94 di 101

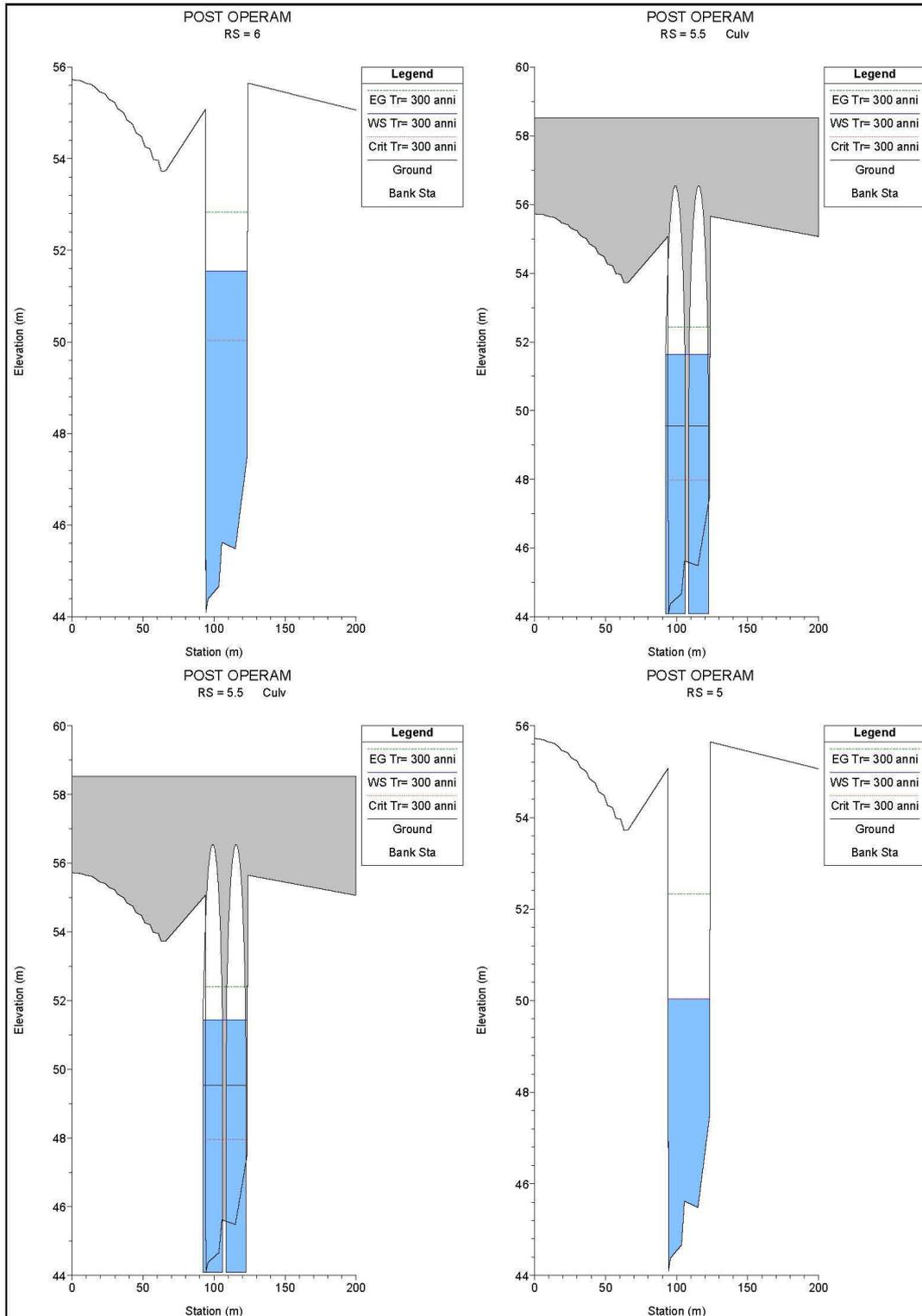












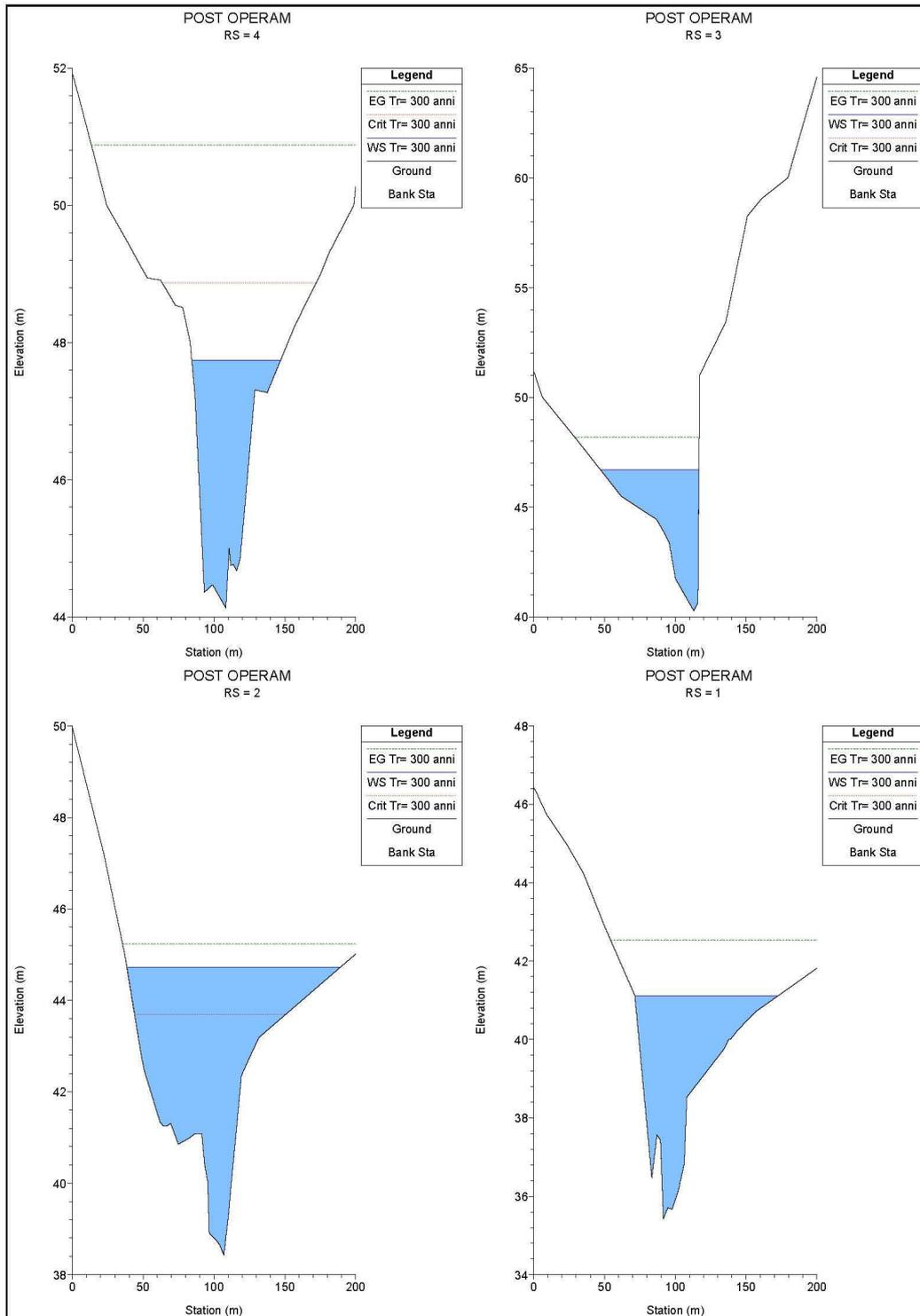


Figura 33 – Sezioni trasversali post operam del torrente Minissale

Relazione idraulica opere maggiori

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS2S	01	D 78 RI	ID 0002 001	B	101 di 101

River Station (Sezione)	Q Total (Portata) [m <sup>3</sup> /s]	Length Chan (Parziale) [m]	Min Ch El (Q.ta fondo) [m.s.m.]	W.S. Elev. (Pelo libero) [m.s.m.]	Crit. W.S. (Quota altezza critica) [m.s.m.]	EG Elev (Quota Energia) [m.s.m.]	E.G. Slope (Pend. Energia) [m/m]	Vel Chnl (Velocità) [m/s]	Flow Area (Area sez. liq.) [m <sup>2</sup> ]	Top Width (Largh. Sup.) [m]	Froude # Chl (n° Froude)	Shear Total (Tens. Trascinam.) [N/m <sup>2</sup> ]	W.P. Total (Cont. Bagn.) [m]
27	897.60	48.36	84.79	95.01	93.11	95.81	0.007314	4.30	269.03	62.67	0.49	284.26	67.88
26	897.60	8.43	81.54	95.14	87.38	95.51	0.002139	2.76	363.67	36.87	0.24	126.21	60.45
25	897.60	7.54	81.54	95.17	86.93	95.47	0.000982	2.47	411.67	40.52	0.22	61.89	64.08
24	897.60	123.75	81.54	86.93	86.93	89.36	0.028646	6.90	130.54	26.99	1.00	1053.17	34.82
23	897.60	128.61	74.00	80.29	81.32	84.00	0.068374	8.53	105.18	26.69	1.37	2315.20	30.46
22	897.60	77.30	68.51	76.31	74.92	77.26	0.009327	4.60	245.95	70.21	0.57	296.57	75.85
21	897.60	101.00	66.48	73.33	73.33	75.85	0.035430	7.04	129.55	27.21	0.97	1316.72	34.18
20	897.60	89.91	63.35	71.08	69.76	71.95	0.009845	5.03	277.26	77.96	0.61	330.17	81.08
19	897.60	80.19	61.66	68.56	68.56	70.60	0.020962	7.17	179.03	50.97	0.89	642.76	57.26
18	897.60	15.81	60.77	65.22	65.86	67.97	0.055679	7.35	122.15	35.59	1.27	1572.55	42.41
17	897.60	10.30	58.63	62.66	64.00	66.77	0.083594	8.98	100.00	27.00	1.49	2349.81	34.89
16.1	897.60	5.15	57.23	64.20	61.94	65.12	0.010633	4.27	210.68	36.71	0.55	434.91	50.51
16	897.60	20.24	57.19	64.17	61.82	65.06	0.009835	4.18	214.62	33.60	0.53	437.73	47.29
15	897.60	54.00	57.02	63.71		64.79	0.011132	4.64	202.24	44.83	0.57	393.89	56.05
14	897.60	94.72	56.59	63.19	61.29	64.19	0.010201	4.48	215.32	58.10	0.58	323.23	66.64
13	897.60	83.83	55.82	61.81	60.73	63.02	0.014685	5.05	236.50	167.95	0.68	193.54	175.98
12	897.60	120.15	55.14	60.22	60.22	61.57	0.020658	5.23	199.31	106.66	0.81	355.40	113.61
11	897.60	144.13	52.44	57.34	57.33	58.27	0.022024	5.40	269.06	135.48	0.82	421.44	137.88
10	897.60	158.68	49.50	54.60		55.27	0.019226	4.94	314.13	160.05	0.74	362.93	163.19
9	897.60	51.32	46.39	53.30		53.71	0.005814	3.48	369.90	97.62	0.45	209.48	100.67
8	897.60	21.00	44.82	53.25		53.50	0.002129	2.36	471.07	103.92	0.28	91.23	107.80
7	897.60	12.70	44.09	53.26	48.89	53.44	0.001434	2.06	550.64	112.08	0.23	66.67	116.16
6	897.60	15.70	44.09	51.55	50.04	52.84	0.017447	5.03	178.52	29.50	0.65	744.17	41.05
5	897.60	23.66	44.09	50.04	50.04	52.32	0.040980	6.70	134.01	29.38	1.00	1416.52	38.02
4	897.60	109.23	44.13	47.74	48.87	50.88	0.086001	7.90	119.03	62.62	1.55	1574.17	63.77
3	897.60	115.19	40.27	46.71	46.71	48.18	0.026271	5.69	190.37	69.71	0.85	648.26	75.65
2	897.60	187.81	38.43	44.72	43.69	45.23	0.008386	3.88	361.36	150.70	0.54	195.16	152.27
1	897.60		35.43	41.12	41.12	42.54	0.024894	6.10	217.68	101.38	0.89	510.74	104.04

**Tabella 13 Risultati della simulazione numerica del torrente Minissale nella configurazione post operam**