



COMMISSARIO DELEGATO

OCDPC 482/2017

REGIONE TOSCANA

SETTORE GENIO CIVILE VALDARNO INFERIORE E COSTA

INTERVENTI DI RIDUZIONE DEL RISCHIO IDRAULICO SUL BACINO DEL RIO MAGGIORE - TRATTO 3 - APERTURA CANALE ED ADEGUAMENTO ALVEO NEL TRATTO DA VIA RODOCANACCHI A VIA TOTI, COMPRESO NUOVO PONTE VIA TOTI - COMUNE DI LIVORNO

PROGETTO DEFINITIVO/ESECUTIVO

DIRIGENTE RESPONSABILE DEL CONTRATTO

Ing. Francesco PISTONE

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO

Ing. Francesco PISTONE

UFFICIO DI PROGETTAZIONE

PROGETTISTI



Studio INGEО

Ingegneri e Geologi Associati

Via dell'Acquacalda 840 A - 55100 Lucca

Telefono 0583 - 48682

Telefax 0583 - 464539

E-mail ingegneri@ingeo.it

Ing. Paolo Barsotti

CODICE ELABORATO

Anno	Commessa	Progetto	Elaborato	Tipologia	n°
2019	049	E	SPE	REL	B300

LIVELLO	Numero	Data	Stesura	Controllo	Approvazione
1 ^ Emissione		30/04/2020			
2 ^ Emissione		24/06/2020			

OGGETTO ELABORATO

Relazione idrologica idraulica
(progetto preliminare a cura di HydroGeo Ingegneria s.r.l.)

	Soggetto competente	Data	Firma	ELABORATO REL B.3
Emesso	Progettista coordinatore/integratore Ing. Barsotti	Aprile 2020		
Visionato	R.U.P. Ing. Francesco Pistone			
Confermato	D.R.C. Ing. Francesco Pistone			

Livorno - Via Aristide Nardini 31, 57125



COMMISSARIO DELEGATO

OCDPC 482/2017

REGIONE TOSCANA

SETTORE GENIO CIVILE VALDARNO INFERIORE E COSTA

STUDIO IDROLOGICO IDRAULICO E PROGETTO PRELIMINARE DEGLI
INTERVENTI DI RIDUZIONE DEL RISCHIO IDRAULICO SUL BACINO DEL
RIO MAGGIORE NEL COMUNE DI LIVORNO

PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA

DIRIGENTE RESPONSABILE DEL CONTRATTO

Ing. Francesco PISTONE

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO

Ing. Francesco PISTONE

UFFICIO DI PROGETTAZIONE

PROGETTISTI



HydroGeo Ingegneria s.r.l.

Via Aretina, 167/B - 50136 Firenze

Tel 055 6587050 - Fax 055 0676043

e-mail info@studiohydrogeo.it

Ing. Tiziano Staiano

CODICE PROGETTO

2017ELI0084

OGGETTO ELABORATO

Verifica Idrologica Idraulica

Relazione Idrologica Idraulica

	Soggetto competente	Data	Firma	ELABORATO
Emesso	Progettista coordinatore/integratore Ing. Staiano	Agosto 2018		D1
Visionato	R.U.P. Ing. Francesco Pistone	Agosto 2018		
Confermato	D.R.C. Ing. Francesco Pistone	Agosto 2018		

Livorno - Via Aristide Nardini 31, 57125

INDICE

1. PREMESSA.....	3
2. ANALISI DELLO STATO ATTUALE.....	4
3. LE OPERE DI PROGETTO	6
4. APPROCCIO METODOLOGICO.....	11
5. ANALISI IDROLOGICA.....	12
5.1 STUDIO IDROLOGICO “RICOSTRUZIONE IDROLOGICA DELL’EVENTO DEL 9/10 SETTEMBRE 2017 NELLA PROVINCIA DI LIVORNO” (ING. CASTELLI).....	12
5.2 MODELLO IDROLOGICO DI SUPPORTO AL PROGETTO.....	13
5.2.1 Bacino idrografico di riferimento.....	13
5.2.2 Modello idrologico Rio Maggiore.....	13
5.2.2.1 Sollecitazioni pluviometriche.....	14
5.2.2.2 Idrogrammi di piena.....	15
5.2.3 Modello idrologico Fosso Limoncino.....	17
5.3 ANALISI E CONFRONTO DEI RISULTATI.....	19
6. MODELLISTICA IDRAULICA.....	21
6.1 ANALISI IDRAULICA STATO ATTUALE.....	21
6.1.1 Caratterizzazione topografica del corso d’acqua e delle aree di interesse.....	21
6.1.2 Modello Idraulico FLOOD.....	23
6.1.2.1 Verifiche Idrauliche implementate.....	23
6.1.2.2 Risultati.....	24
6.1.3 Modello Idraulico 1D.....	27
6.1.3.1 Verifiche Idrauliche implementate.....	27
6.1.3.2 Risultati.....	28
6.1.4 Modello idraulico Stato Attuale Fosso Limoncino.....	31
6.2 VERIFICHE IDRAULICHE STATO DI PROGETTO	33
6.2.1 Caratterizzazione topografica del corso d’acqua e delle aree di interesse.....	33
6.2.2 Modello Idraulico di PROGETTO.....	34
6.2.2.1 Verifiche Idrauliche implementate.....	35
6.2.2.2 Risultati.....	37
6.2.3 Modello Idraulico Stato di Progetto Fosso Limoncino.....	43
6.2.4 Modello Idraulico STRALCIO FUNZIONALE 1B.....	43
APPENDICE 1 – MODELLISTICA IDROLOGICA IDRAULICA - FONDAMENTI TEORICI.....	45
APPENDICE 2 – RISULTATI MODELLO IDRAULICO 1D	57
RISULTATI MODELLO 1D STATO ATTUALE.....	58
RISULTATI MODELLO 1D STATO ATTUALE SENZA PONTI	59

RISULTATI MODELLO 1D TRATTO TOMBATO	60
APPENDICE 3 – RISULTATI MODELLO IDRAULICO FOSSO LIMONCINO	61

Indice delle figure

Figura 2-1: Rio Maggiore tratto tombato da via cattaneo allo sbocco a mare	4
Figura 2-2: Tratti a geometria omogenea - Rio maggiore da via cattaneo alla loc. Limoncino	5
Figura 5-1: Idrogrammi Rio Maggiore - evento sintetico TR=30 anni durata 2 ore	16
Figura 5-2: Idrogrammi Rio Maggiore - evento sintetico TR=200 anni durata 2 ore	16
Figura 5-3: Idrogrammi Rio Maggiore - evento Reale 10 settembre 2017	17
Figura 5-4: Idrogrammi Fosso Limoncino – Eventi sintetici TR=30-200 anni durata 50 minuti	18
Figura 5-5: Idrogrammi Fosso Limoncino - Evento reale 10 settembre 2017	18
Figura 5-6: Confronto idrogrammi di piena sul Rio Maggiore - Tr=200 anni	20
Figura 6-1: Risultati Modello Flood stato attuale – Evento TR=200 anni – comportamento idraulico cassa RM2	26
Figura 6-2: Risultati Modello Flood stato attuale – Evento TR=200 anni – comportamento idraulico cassa RM3	26
Figura 6-3: Risultati Modello 1D stato attuale – Ponti S.P. Valle Benedetta	29
Figura 6-4: Risultati Modello 1D stato attuale – Ponte Via Oliveta	29
Figura 6-5: Risultati Modello 1D stato attuale – Ponti Via di Salviano e Via dei Pelaghi	29
Figura 6-6: Risultati Modello 1D stato attuale – Ponti Ferrovia e Via dell'Ardenza	30
Figura 6-7: Funzionamento idraulico del canale scolmatore – Scala di deflusso sezione 00036__18	36
Figura 6-8: Risultati Modello Idraulico di Progetto – Ponte S.P. Valle Benedetta monte	37
Figura 6-9: Risultati Modello Idraulico di Progetto – Ponte S.P. Valle Benedetta valle	38
Figura 6-10: Risultati Modello Idraulico di Progetto – Ponte Via Oliveta	38
Figura 6-11: Risultati Modello Idraulico di Progetto – Ponte Via di Salviano	38
Figura 6-12: Risultati Modello Idraulico di Progetto – Nuovo ponte Via Impastato	39
Figura 6-13: Risultati Modello Idraulico di Progetto – Ponte Ferrovia	39
Figura 6-14: Risultati Modello Idraulico di Progetto – Ponte Via dell'Ardenza	39
Figura 6-15: Risultati Modello Idraulico di Progetto – Ponte Via Cattaneo	40
Figura 6-16: Risultati Modello Idraulico di Progetto – Ponte Via dei Pensieri	40
Figura 6-17: Risultati Modello Idraulico di Progetto – Ponte Via Rodocanacchi	40
Figura 6-18: Risultati Modello Idraulico di Progetto – Ponte Via Toti	41
Figura 6-19: Risultati Modello Idraulico di Progetto – Attraversamento Viale Italia	41
Figura 6-20: Risultati Modello Idraulico di Progetto – Ponte Accademia Navale	41
Figura 6-21: Risultati Modello Idraulico di Progetto – Idrogrammi sfioratori casse di espansione – Evento TR=200 anni	42

Indice delle tabelle

Tabella 5-1: Parametri idrologici Rio Maggiore	14
Tabella 5-2: Eventi sintetici - Altezze di pioggia e coefficienti di ragguaglio	15
Tabella 5-3: Portate al colmo e volumi di piena Rio Maggiore – Eventi sintetici	15
Tabella 5-4: Portate al colmo e volumi di piena Rio Maggiore – Evento reale 10/09/2017	17
Tabella 5-5: Portate al colmo e volumi di piena Fosso Limoncino	18
Tabella 5-6: Confronto Portate al colmo e volumi di piena Rio Maggiore - Tr=200 anni	19
Tabella 6-1: Caratterizzazione geometrica Rio Maggiore- Codifica sezioni opere idrauliche stato attuale	22
Tabella 6-2: Caratterizzazione geometrica Rio Maggiore- Codifica sezioni idrauliche oggetto di interventi di progetto	34
Tabella 6-3: Risultati Modello Idraulico di Progetto – Funzionamento sfioratori casse di espansione – Evento TR=200 anni	42
Tabella 6-4: Risultati Modello Idraulico di Progetto – Funzionamento sfioratori casse di espansione – Evento settembre 2017	43

1. PREMESSA

La presente relazione idrologica idraulica, redatta a supporto del Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica denominato "STUDIO IDROLOGICO IDRAULICO E PROGETTO PRELIMINARE DEGLI INTERVENTI DI RIDUZIONE DEL RISCHIO IDRAULICO SUL BACINO DEL RIO MAGGIORE NEL COMUNE DI LIVORNO", descrive le verifiche svolte sul reticolo idraulico del Rio Maggiore per la verifica dell'ufficiosità idraulica del corso d'acqua allo stato attuale ed il dimensionamento delle opere di progetto per la riduzione del rischio idraulico.

Il presente elaborato si compone della seguente relazione idrologica idraulica e degli elaborati di testo e grafici a supporto della stessa e di seguito riportati.

D - <input type="checkbox"/> Relazione idrologica idraulica <input type="checkbox"/> Relazione idrologica idraulica <input type="checkbox"/> Relazione idrologica idraulica		
D1		Relazione Idrologica Idraulica
D1.1		Allegato 1 <input type="checkbox"/> Modello Idrologico
D1.2		Allegato 2 <input type="checkbox"/> Risultati Modello Idraulico
D2	1:5000	Planimetria Modello Idraulico Stato Attuale
D3.1	1:2000	Battenti Idrometrici Massimi <input type="checkbox"/> Stato Attuale <input type="checkbox"/> Scenario Idrologico Tr 30 anni <input type="checkbox"/> Quadro 1
D3.2	1:2000	Battenti Idrometrici Massimi <input type="checkbox"/> Stato Attuale <input type="checkbox"/> Scenario Idrologico Tr 30 anni <input type="checkbox"/> Quadro 2
D3.3	1:2000	Battenti Idrometrici Massimi <input type="checkbox"/> Stato Attuale <input type="checkbox"/> Scenario Idrologico Tr 200 anni <input type="checkbox"/> Quadro 1
D3.4	1:2000	Battenti Idrometrici Massimi <input type="checkbox"/> Stato Attuale <input type="checkbox"/> Scenario Idrologico Tr 200 anni <input type="checkbox"/> Quadro 2
D3.5	1:2000	Battenti Idrometrici Massimi <input type="checkbox"/> Stato Attuale <input type="checkbox"/> Scenario Idrologico E _{vento} <input type="checkbox"/> Quadro 1
D3.6	1:2000	Battenti Idrometrici Massimi <input type="checkbox"/> Stato Attuale <input type="checkbox"/> Scenario Idrologico E _{vento} <input type="checkbox"/> Quadro 2
D3.7	1:2000	Battenti Idrometrici Massimi <input type="checkbox"/> Stato Attuale <input type="checkbox"/> Scenario Idrologico E _{vento} <input type="checkbox"/> Quadro 3
D4	<input type="checkbox"/> Arie	Libretto delle Sezioni e Profilo Longitudinale con Livelli Idrometrici <input type="checkbox"/> Stato Attuale
D5.1	1:2000	Planimetria delle Aree Allagate Stato Attuale <input type="checkbox"/> Quadro 1
D5.2	1:2000	Planimetria delle Aree Allagate Stato Attuale <input type="checkbox"/> Quadro 2
D5.3	1:2000	Planimetria delle Aree Allagate Stato Attuale <input type="checkbox"/> Quadro 3
D6	1:5000	Planimetria Modello Idraulico Stato di Progetto
D7.1	1:2000	Battenti Idrometrici Massimi <input type="checkbox"/> Stato di Progetto <input type="checkbox"/> Quadro 1
D7.2	1:2000	Battenti Idrometrici Massimi <input type="checkbox"/> Stato di Progetto <input type="checkbox"/> Quadro 2
D7.3	1:2000	Battenti Idrometrici Massimi <input type="checkbox"/> Stato di Progetto <input type="checkbox"/> Quadro 3
D8	<input type="checkbox"/> Arie	Libretto delle Sezioni e Profilo Longitudinale con Livelli Idrometrici <input type="checkbox"/> Stato di Progetto
D9.1	1:2000	Planimetria delle Aree Allagate Stato di Progetto <input type="checkbox"/> Quadro 1
D9.2	1:2000	Planimetria delle Aree Allagate Stato di Progetto <input type="checkbox"/> Quadro 2
D9.3	1:2000	Planimetria delle Aree Allagate Stato di Progetto <input type="checkbox"/> Quadro 3
D10.1	1:2000	Battenti Idrometrici Massimi <input type="checkbox"/> Stato di Progetto Lotto Funzionale 1B <input type="checkbox"/> Scenario Idrologico Tr 30
D10.2	1:2000	Battenti Idrometrici Massimi <input type="checkbox"/> Stato di Progetto Lotto Funzionale 1B <input type="checkbox"/> Scenario Idrologico Tr 200
D10.3	1:2000	Battenti Idrometrici Massimi <input type="checkbox"/> Stato di Progetto Lotto Funzionale 1B <input type="checkbox"/> Scenario Idrologico E _{vento}

2. ANALISI DELLO STATO ATTUALE

Il territorio indagato va dalla località Limoncino alla foce del Rio Maggiore. Nella tavola A6.1 - *Inquadramento Generale Stato Attuale* del Progetto, è riportata una corografia generale d'insieme dell'area oggetto di studio.

Le analisi effettuate sui dati disponibili, sulle elaborazioni prodotte nello studio idrologico-idraulico e sui rilievi topografici realizzati, hanno permesso di individuare 13 tratti di corso d'acqua di caratteristiche omogenee di seguito sinteticamente descritti.

Tratto Tombato da Via Cattaneo alla Foce

Il rilievo del tratto tombato e delle aree poste al di sopra del tombamento stesso ha permesso di caratterizzare geometricamente il tombamento e le interferenze fra il canale ed i manufatti limitrofi.

Sono così stati individuati 6 distinti tratti, così come riportato in figura seguente.

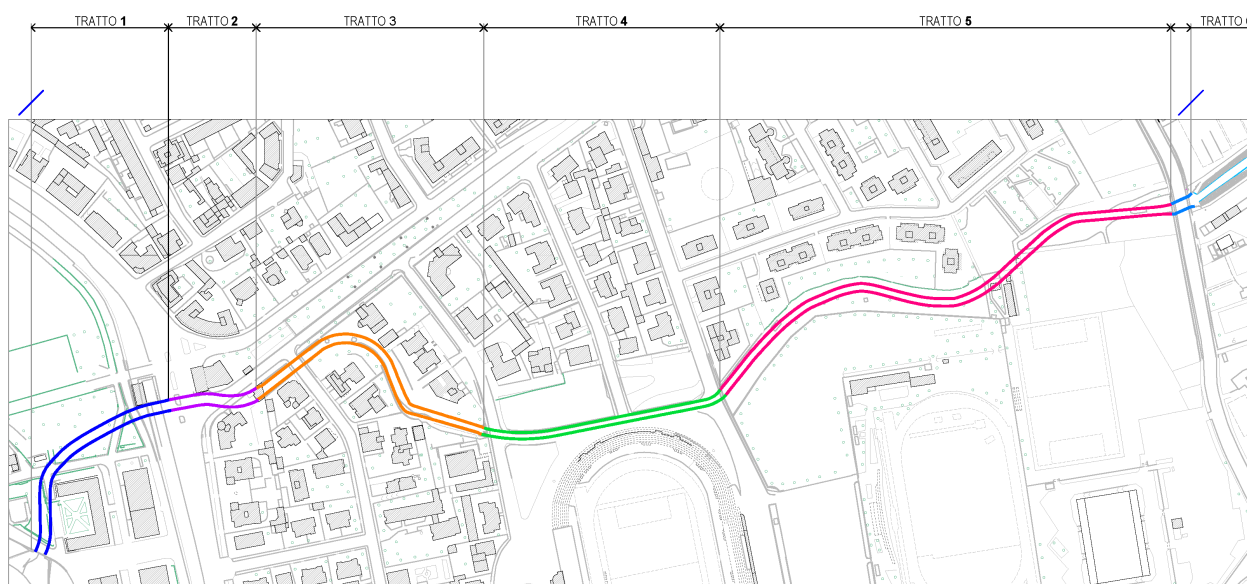


FIGURA 2-1: RIO MAGGIORE TRATTO TOMBATO DA VIA CATTANEO ALLO SBOCCO A MARE

Tratto a Cielo aperto da Via Cattaneo alla Loc. Limoncino

Il rilievo del tratto a cielo aperto ha permesso di caratterizzare geometricamente il corso d'acqua, le opere idrauliche presenti, nonché alcune ritenute significative, anche in relazione alle esondazioni registrate nel settembre 2017.

Come per la zona di valle, sono stati individuati tratti omogenei per caratteri fisici ed idraulici (dal tratto 7 al tratto 13).

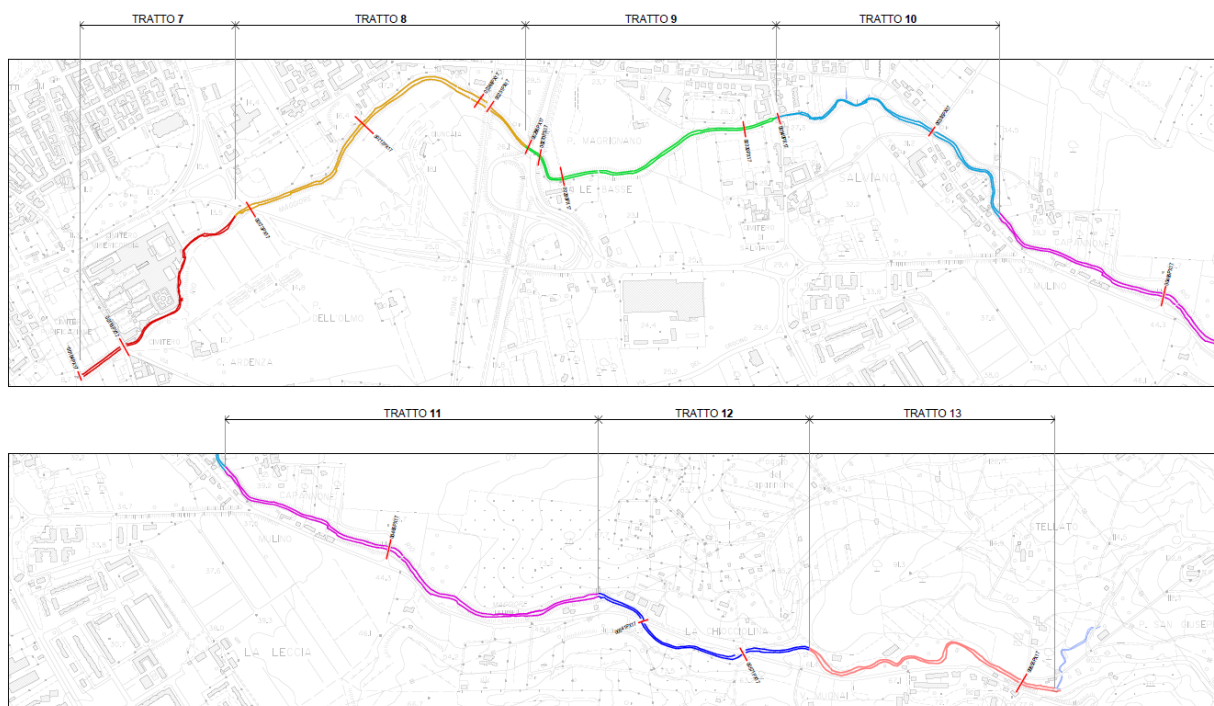


FIGURA 2-2: TRATTI A GEOMETRIA OMOGENEA - RIO MAGGIORE DA VIA CATTANEO ALLA LOC. LIMONCINO

Per la descrizione delle principali caratteristiche fisiche di ciascun tratto, determinate dai sopralluoghi, dall'analisi dei rilievi topografici, e dagli elementi del quadro conoscitivo si rimanda alla Relazione Tecnica Generale del Progetto (elaborato A1).

3. LE OPERE DI PROGETTO

Il presente progetto di fattibilità prevede la realizzazione di una serie di interventi sul Rio Maggiore per la riduzione del rischio idraulico ingenerato sul territorio comunale di Livorno ed ha le seguenti finalità:

- a. Riduzione delle aree allagabili in occasione di eventi di piena eccezionali;
- b. Riduzione del carico idraulico sulle infrastrutture e strutture idrauliche di contenimento;
- c. Incremento dell'efficienza idraulica del corso d'acqua ed ottimizzazione delle opere di difesa idraulica esistenti (casce di espansione).

La soluzione progettuale proposta, frutto di un'articolata indagine conoscitiva e di una accurata valutazione delle alternative progettuali, prevede la realizzazione di una serie di interventi puntuali e diffusi che interessano il reticolo del Rio Maggiore dalla località Limoncino fino allo sbocco a mare, per un totale di circa 6.6 km.

Per facilitare la lettura e permettere una rapida individuazione degli stessi, gli interventi di progetto sono stati codificati con riferimento ai 13 tratti in cui è stato suddiviso il reticolo del Rio Maggiore. Ciascun tratto, individuato per l'analisi dello stato attuale, interessa un tronco fluviale del reticolo del Rio Maggiore con caratteristiche geometriche ed idrauliche omogenee.

I tratti presentano una numerazione progressiva da valle verso monte e riguardano:

- Tratto 1-6. Tratto tombato urbano dallo sbocco a mare a Via Cattaneo;
- Tratti 7-13: reticolo a sezione aperta da Via Cattaneo alla località Limoncino.

Gli interventi di progetto, individuati nella Planimetria Generale di Progetto (elaborati A9.1, A9.2, A9.3), seguono la numerazione del tratto di appartenenza, e possono essere sintetizzati come di seguito riportato:

Opera 1 - area Accademia Navale: realizzazione di un canale aperto all'interno delle aree di proprietà della Marina Militare con rifacimento dello sbocco a mare. La sezione di progetto è a geometria rettangolare con savanella di magra e muri verticali in c.a. rivestiti in pietra. La larghezza del fondo alveo è prevista pari a 10 m nel primo tratto, e 12 m a valle del punto di restituzione del nuovo canale scolmatore (rif. Opera 4b – Zona Stadio). La lunghezza dell'intero tratto di intervento è di circa 140 m. In corrispondenza del nuovo sbocco a mare del canale (spostato di circa 60 m in destra idraulica rispetto allo sfocio del tombamento attuale), è prevista la realizzazione di un attraversamento carrabile, di dimensioni pari a 12x5m, al fine di garantire la piena fruibilità ai mezzi all'interno dell'Accademia Navale. Completano l'intervento la riassetto delle aree verdi e dei percorsi pedonali esistenti.

Opera 2 – Viale Italia: rifacimento dell'opera di sottoattraversamento del Viale Italia. La sezione di progetto è uno scatolare in c.a. a geometria rettangolare di dimensioni pari a 10x3.9m con savanella di magra. Le dimensioni della sezione idraulica e gli spessori del manufatto in c.a. garantiscono il mantenimento delle quote attuali del piano viario. Rispetto all'attuale disposizione planimetrica del tombamento, è prevista una rettifica del tracciato del canale e l'allontanamento del tracciato dalla Barriera Regina Margherita. La lunghezza del tratto di intervento è circa 105 m.

Opera 3a – Ponte di Via Toti: realizzazione di un nuovo attraversamento carrabile su Via Toti. La sezione di progetto è rettangolare in c.a. di dimensioni pari a 10x3.9m con savanella di magra. A valle del nuovo manufatto si prevede la realizzazione di un tratto di canale aperto lungo Viale Nazario Sauro, fino all'imbocco della nuova opera di sottoattraversamento di Viale Italia (rif. Opera 2 – Viale Italia). La sezione di progetto del canale si mantiene rettangolare, di larghezza 10 m, con savanella di magra e muri verticali in c.a. rivestiti in

pietra. A lati del canale si prevede la realizzazione di un percorso pedonale in sinistra idraulica e di una pista ciclabile in destra, a raccordo con l'esistente. La lunghezza del tratto di intervento è circa 40 m.

Opera 3b – Corridoio: realizzazione di un canale aperto in c.a. a sezione rettangolare con savanella di magra e pareti rivestite in bozze di pietra. La sezione di progetto ha una larghezza 10 m. Nella definizione del nuovo percorso a cielo aperto sono state valutate le distanze minime tra le opere da realizzare e gli edifici esistenti. Ove queste non consentono una agevole realizzazione delle nuove opere si è optato per il mantenimento dell'attuale perimetro del corso d'acqua, utilizzando le strutture esistenti come cassaforma per i nuovi muri di contenimento in c.a. Gli allargamenti della sezione rispetto all'impronta del tratto tombato attuale, definiti secondo il criterio succitato, hanno portato le distanze minime dagli edifici esistenti pari a 3 m. In sinistra idraulica si prevede la realizzazione di un percorso pedonale. La lunghezza del tratto di intervento è circa 170 m.

Opera 4a – Ponte di Via Rodocanacchi: realizzazione di un nuovo attraversamento carrabile su Via Rodocanacchi. La sezione di progetto è rettangolare in c.a. di dimensioni pari a 10x3.9m con di savanella di magra. Le spalle del ponte, in c.a. con rifinitura faccia a vista, si raccordano al canale aperto a sezione rettangolare previsto sia a valle (rif. Opera 3b – Corridoio) che a monte (rif. Opera 4b – Zona Stadio) del ponte di progetto mediante muri in c.a. rivestiti in pietra.

Opera 4b – Zona Stadio: realizzazione di un canale aperto nelle aree prospicienti allo Stadio di Livorno. La sezione di progetto ha una larghezza del fondo pari a 10 m e sponde costituite da un muro verticale in c.a. con rasatura cementizia in sinistra idraulica e da un muro in scogliera con pendenza 1:1 in destra. Il fondo alveo è previsto rivestito in massi ciclopici intasati in terra. Il nuovo tracciato planimetrico prevede l'allontanamento dalla viabilità di accesso allo Stadio e la riqualificazione di tutte le aree contermini, con realizzazione di percorsi pedonali e ciclopedonali, riassetto ed ampliamento delle aree verdi mediante creazione di fasce inerbite ed inserimento di alberature e arbusti. La lunghezza del tratto di intervento è circa 150 m.

In prossimità del nuovo ponte di Via Rodocanacchi (rif. Opera 4a – ponte di Via Rodocanacchi) sulla sponda in destra idraulica è prevista la realizzazione del manufatto di imbocco del nuovo canale scolmatore, che percorrerà Via Rodocanacchi e Viale Nazario Sauro e si reimmetterà nel canale aperto del Rio Maggiore all'interno dell'Accademia Navale (rif. Opera 1 - area Accademia Navale) dopo aver sottoattraversato il Viale Italia a nord della Barriera Regina Margherita. Il canale scolmatore, di lunghezza complessiva pari a circa 450 m, sarà realizzato con struttura scatolare prefabbricata di luce interna 3x2.5m ed avrà una capacità di smaltimento di circa 20 mc/s. La realizzazione di tale by-pass permette la riduzione del carico idraulico nei tratti 2 e 3. A valle dell'opera di imbocco del canale scolmatore, si prevede il raccordo della sezione del canale alla geometria rettangolare prevista per il nuovo attraversamento di via Rodocanacchi (rif. Opera 4a – ponte di Via Rodocanacchi).

Opera 4c – ponte di Via dei Pensieri: realizzazione di un nuovo attraversamento carrabile su Via dei Pensieri. La sezione di progetto è rettangolare di dimensioni pari a 12x4.4m, con fondo alveo naturale rivestito in massi ciclopici intasati in terra, dotato di savanella di magra. Le spalle del ponte, in c.a. con rifinitura faccia a vista, si raccorderanno al canale a sezione rettangolare previsto sia a valle (rif. Opera 4b – Zona Stadio) che a monte (rif. Opera 5 – Zona Parco) del ponte di progetto mediante muri in c.a. rivestiti in pietra.

Opera 5 – Zona Parco: realizzazione di un canale aperto in terra, inserito in un contesto naturalistico con riorganizzazione e riqualificazione delle aree verdi circostanti. La sezione di progetto è trapezia con larghezza del fondo alveo pari a 8 m e sponde inerbite a pendenza 3:2. In sinistra idraulica è prevista la realizzazione di un percorso a mezza sponda inerbito, connesso ad un'ampia area golenale. Il fondo alveo è rivestito in massi ciclopici intasati in terra e dotato di savanella di magra. In prossimità del nuovo ponte di Via dei Pensieri (rif.

Opera 4c – ponte di Via dei Pensieri) è prevista la realizzazione di un salto di fondo di altezza 75 cm. La lunghezza del tratto di intervento è circa 390 m.

A corredo dell'intervento si prevede il completo riassetto degli spazi circostanti con creazione di un parco verde intorno al Rio, dotato di aree attrezzate e corredato da percorsi ciclopeditoni che riconnettono il quartiere con il parco. In destra idraulica è inserito un percorso carrabile, ad uso pedonale, di servizio per la manutenzione.

Si prevede infine la riconfigurazione dell'area sportiva esistente, con spostamento del campo di allenamento, delocalizzazione degli spogliatoi e nuovo ingresso al centro, dotato di parcheggio.

Opera 6 – ponte di Via Cattaneo: realizzazione di un nuovo attraversamento carrabile su Via Cattaneo. La sezione di progetto è rettangolare di dimensioni pari a 12x4.0 m, con fondo alveo naturale rivestito in massi ciclopici intasati in terra, dotato di savanella di magra. Le spalle del ponte, in c.a. con rifinitura faccia a vista, si raccorderanno al canale a sezione trapezia previsto sia a valle (rif. Opera 5 – Zona Parco) che a monte (rif. Opera 7a – Zona Serre) del ponte di progetto mediante muri in c.a. rivestiti in pietra. L'altezza utile della sezione idraulica e le dimensioni del nuovo impalcato del ponte, impongono un sovralzato del piano stradale attuale di circa 50-70 cm, con modifica della livelletta stradale nell'intorno del nuovo attraversamento.

Opera 7a – Zona Serre: adeguamento della sezione idraulica e realizzazione di percorso ciclopeditone in destra idraulica. La geometria della sezione di progetto è trapezia con fondo alveo largo 8 m e sponde naturali inerbite a pendenza 3:2. Al piede sponda è prevista una protezione in scogliera. Il limite di intervento è costituito dai muri laterali esistenti a confine con le proprietà private (serre in destra, autolavaggio in sinistra idraulica). La lunghezza del tratto di intervento è circa 120 m.

Opera 7b – ponte di Via Ardenza: rifacimento del ponte carrabile su Via dell'Ardenza. La sezione di progetto è rettangolare di dimensioni pari a 12x4.4 m, con fondo alveo naturale rivestito in massi ciclopici intasati in terra, dotato di savanella di magra. Le spalle del ponte sono previste in c.a. con rifinitura faccia a vista. A raccordo con le sponde fluviali sia a monte che a valle saranno realizzati muri in c.a. rivestiti in pietra. A monte della nuova opera è prevista la realizzazione di un salto di fondo di altezza 90 cm. La realizzazione del nuovo attraversamento prevede lo spostamento planimetrico della viabilità principale (Via dell'Ardenza) e la deviazione della viabilità locale (Via di Popogna).

Opera 7c – Zona Cimitero: adeguamento della sezione idraulica e realizzazione di percorso ciclopeditone in sinistra idraulica. La geometria della sezione è trapezia con fondo alveo largo 8 m e sponde con pendenza 1:1 realizzate con muri in scogliera. La lunghezza del tratto di intervento è circa 180 m.

Opera 7d – Sfioro di sicurezza RM4: sovralzato dello sfioratore di sicurezza della cassa di espansione RM4 fino alla quota di 13.80 m s.l.m.

Opera 7e – Sfioro RM4: realizzazione di nuova opera di presa in sinistra idraulica del Rio Maggiore di larghezza utile 15 m, soglia di sfioro a quota 11.00 m s.l.m. dotata di paratoie mobili ad apertura automatica al raggiungimento di quote del pelo libero in alveo di 12.20 m s.l.m.

Opera 8a – Tombasifone: chiusura del tombasifone di collegamento tra la cassa RM3bis e la cassa RM4.

Opera 8b – Arginatura RM3bis valle: sovralzato e ringrosso del tratto terminale dell'argine della cassa RM3bis fino alla quota 16.70 m s.l.m.

Opera 8c – Sfioro di sicurezza RM3bis: sovralzato dello sfioratore di sicurezza della cassa di espansione RM3bis fino alla quota di 15.70 m s.l.m.

Opera 8d – Arginatura RM3bis monte: realizzazione di arginatura in sinistra idraulica del Rio Maggiore (lato opposto alla cassa) fino alla quota del coronamento arginale del modulo di monte della cassa RM3bis.

Opera 8e – Sfioro RM3bis: sovrizzo dello sfioratore di alimentazione della cassa di espansione RM3bis fino alla quota di 17.30 m s.l.m.

Opera 8f – ponte Ferrovia: rifacimento/adeguamento del ponte ferroviario della linea Pisa-Roma, di competenza RFI, con luce netta minima pari a 12x4 m.

Opera 9a - Argine sinistro Via Pelaghi: Demolizione del ponte di Via dei Pelaghi e realizzazione di un'arginatura in sinistra idraulica del Rio Maggiore (lato opposto alla cassa) fino alla quota del coronamento arginale della cassa RM3.

Opera 9b – Sfioro di sicurezza RM3: sovrizzo dello sfioratore di sicurezza della cassa di espansione RM3 fino alla quota di 22.90 m s.l.m.

Opera 9c – Ponte di Via Impastato: realizzazione di un attraversamento carrabile sul nuovo asse viario di Via Impastato. La sezione di progetto è rettangolare di dimensioni pari a 12x4.4 m, con fondo alveo naturale rivestito in massi ciclopici intasati in terra. Le spalle del ponte, in c.a. con rifinitura faccia a vista, si raccorderanno alla sezione fluviale attuale del Rio Maggiore con muri in c.a. rivestiti in pietra.

Opera 9d – Ponte di Via di Salviano: rifacimento del ponte carrabile su Via di Salviano. La sezione di progetto è rettangolare di dimensioni pari a 12x4.85 m, con fondo alveo naturale rivestito in massi ciclopici intasati in terra. Le spalle del ponte sono previste in c.a. con rifinitura faccia a vista. È prevista la risagomatura della sezione fluviale, sia a monte che a valle del nuovo ponte. La lunghezza complessiva del tratto di intervento è di circa 35 m. Il raccordo con le sponde fluviali sia a monte che a valle sarà realizzato con muri in c.a. rivestiti in bozze di pietra. A monte della nuova opera è prevista la realizzazione di un salto di fondo di altezza 1.7 m.

Opera 10a – Sfioro di sicurezza RM2: sovrizzo dello sfioratore di sicurezza della cassa di espansione RM2 fino alla quota di 29.50 m s.l.m.

Opera 10b – Ponte di Via dell'Uliveta: rifacimento del ponte carrabile su Via dell'Uliveta. La sezione di progetto è rettangolare di dimensioni pari a 12x4.4 m, con fondo alveo naturale rivestito in massi ciclopici intasati in terra. Le spalle del ponte sono previste in c.a. con rifinitura faccia a vista. È prevista la risagomatura della sezione fluviale, sia a monte che a valle del nuovo ponte. La lunghezza complessiva del tratto di intervento è di circa 50 m. Il nuovo ponte risulta spostato a valle di circa 10 m rispetto alla sua attuale posizione planimetrica. A chiusura idraulica, si prevede il prolungamento verso monte del muro di contenimento in destra idraulica presente a valle dell'opera. A corredo dell'opera si prevede il riassetto della viabilità attuale, con sovrizzo del piano viario principale e riorganizzazione di tutta la viabilità locale.

Opera 10c – Argine Uliveta: realizzazione di opere di contenimento idraulico a monte del ponte di Via Uliveta, sia in destra che in sinistra idraulica per un tratto di lunghezza pari a circa 220 m.

Opera 12a - Ponte Valle Benedetta valle: rifacimento del ponte carrabile sulla Strada Provinciale n. 5 Valle Benedetta. La sezione di progetto è rettangolare di dimensioni pari a 10x4.4 m, con fondo alveo naturale rivestito in massi ciclopici intasati in terra. Le spalle del ponte sono previste in c.a. con rifinitura faccia a vista. È prevista altresì la risagomatura della sezione fluviale, sia a monte che a valle del nuovo ponte, con

regolarizzazione della livelletta di fondo alveo e la realizzazione di un salto di fondo di altezza 70 cm a monte del nuovo manufatto.

Opera 12b - Ponte Valle Benedetta monte: rifacimento del ponte carrabile sulla Strada Provinciale n. 5 Valle Benedetta. La sezione di progetto è rettangolare di dimensioni pari a 10x4.4 m, con fondo alveo naturale rivestito in massi ciclopici intasati in terra. Le spalle del ponte sono previste in c.a. con rifinitura faccia a vista. È prevista altresì la risagomatura della sezione fluviale, sia a monte che a valle del nuovo ponte, a raccordo con la sezione idraulica esistente.

Opera 13 – Fosso Limoncino: Stombamento e deviazione dell'ultimo tratto del fosso Limoncino. Tutto il tratto tombato attuale, di lunghezza pari a 300 m, sarà dismesso ed il corso d'acqua verrà deviato in una nuova canalizzazione a cielo aperto a sezione rettangolare in c.a. di dimensioni 2.0x1.5 m. Il sottoattraversamento della Strada Provinciale n.5 Valle Benedetta sarà realizzato mediante posa di scatolare in c.a. a sezione rettangolare di dimensioni 2.0x2.5 m. La nuova immissione del fosso Limoncino nel Rio Maggiore è stata spostata a monte del nuovo ponte sul Rio Maggiore, in corrispondenza delle protezioni in gabbioni esistenti in sponda sinistra del Rio, con realizzazione di salti di fondo in materassi Reno.

Per maggiori dettagli si rimanda alla relazione descrittiva del progetto generale ed agli elaborati grafici di progetto.

4. APPROCCIO METODOLOGICO

Al fine di verificare l'attuale livello di officiosità del corso d'acqua, definire analiticamente ogni criticità puntuale e/o diffusa del reticolo, progettare gli interventi necessari alla riduzione del rischio idraulico riscontrato e verificare l'efficacia degli interventi proposti, è stata sviluppata una analisi idrologica idraulica approfondita, descritta nei capitoli seguenti, che prevede:

- 1) ANALISI IDROLOGICA – finalizzata alla valutazione delle portate di piena da utilizzare in input alla modellazione idraulica. Allo scopo, è stato sviluppato un modello idrologico di dettaglio finalizzato alla determinazione degli idrogrammi di portata sintetici per assegnati tempi di ritorno attesi su varie sezioni di chiusura del bacino idrografico del Rio Maggiore. La ricostruzione su base idrologica dell'evento di pioggia eccezionale che ha colpito la Provincia di Livorno la notte fra il 9 e il 10 settembre 2017 è stato mutuato dallo studio *“Ricostruzione idrologica dell'evento del 9/10 settembre 2017 nella provincia di Livorno”* redatto dal Prof. Ing. Fabio Castelli.
- 2) ANALISI IDRAULICA DELLO STATO ATTUALE – finalizzata alla verifica del livello di officiosità idraulica attuale del corso d'acqua ed alla individuazione analitica delle criticità idrauliche puntuali e/o diffuse del reticolo.

Tale analisi è stata condotta in due step:

- i. Implementazione di un modello idraulico accoppiato, monodimensionale in alveo e bidimensionale nelle aree contermini potenzialmente allagabili (di seguito **Modello Idraulico FLOOD**), per la valutazione degli effetti indotti in alveo e nel territorio circostante, in termini di battenti, livelli e velocità di propagazione, da eventi di piena eccezionali (eventi sintetici per assegnati tempi di ritorno e ricostruzione della sollecitazione idrologica ingenerata dall'evento di pioggia eccezionale registrato il 9-10 settembre 2017);
- ii. Costruzione di un modello idraulico monodimensionale del corso d'acqua (di seguito **Modello Idraulico 1D**), sollecitato da set di valori di portata costante, per l'individuazione delle criticità idrauliche e la definizione analitica dell'attuale officiosità idraulica del corso d'acqua e delle opere idrauliche presenti.

I due modelli, distinti ma al contempo strettamente correlati, hanno permesso, rispettivamente, di valutare il comportamento del corso d'acqua e la funzionalità delle opere idrauliche esistenti in occasione di eventi meteorici estremi, e di stimarne officiosità e capacità di smaltimento in maniera analitica, permettendo così di individuare gli interventi di progetto necessari per la mitigazione del rischio idraulico indotto dal Rio Maggiore.

- 3) VERIFICA IDRAULICA DELLO STATO DI PROGETTO – finalizzata alla verifica dell'efficacia degli interventi di progetto. Allo scopo, è stato sviluppato un modello idraulico accoppiato, monodimensionale in alveo e bidimensionale nelle aree contermini, sollecitato da eventi di piena eccezionali (eventi sintetici per assegnati tempi di ritorno e ricostruzione della sollecitazione idrologica ingenerata dall'evento di pioggia eccezionale registrato il 9-10 settembre 2017), per la valutazione dell'efficacia degli interventi proposti in termini di:
 - a. Riduzione delle aree allagate;
 - b. Riduzione del carico idraulico sulle infrastrutture e strutture idrauliche di contenimento;
 - c. Incremento dell'officiosità idraulica del corso d'acqua ed ottimizzazione delle opere di difesa idraulica esistenti (casce di espansione).

5. ANALISI IDROLOGICA

Il presente capitolo illustra i risultati della modellazione idrologica eseguita sul reticolo del Rio Maggiore, finalizzata alla determinazione degli idrogrammi di piena attesi da utilizzare in input alla modellazione idraulica del corso d'acqua descritta al capitolo successivo.

L'analisi svolta ha previsto:

- Individuazione del bacino idrografico e del reticolo idraulico significativo;
- Determinazione degli input pluviometrici;
- Definizione del modello idrologico per la stima delle perdite e della trasformazione afflussi-deflussi e determinazione dei parametri idrologici;
- Determinazione della durata di pioggia critica;
- Calcolo degli idrogrammi di portata attesi su varie sezioni di chiusura del bacino idrografico.

I risultati ottenuti dal modello idrologico sono stati confrontati con le risultanze dello studio redatto dal Prof. Ing. Fabio Castelli *"Ricostruzione idrologica dell'evento del 9/10 settembre 2017 nella provincia di Livorno"*, i cui contenuti principali sono descritti al paragrafo seguente.

5.1 STUDIO IDROLOGICO "RICOSTRUZIONE IDROLOGICA DELL'EVENTO DEL 9/10 SETTEMBRE 2017 NELLA PROVINCIA DI LIVORNO" (ING. CASTELLI)

Lo studio idrologico *"Ricostruzione idrologica dell'evento del 9/10 settembre 2017 nella provincia di Livorno"* redatto dal Prof. Ing. Fabio Castelli riguarda la ricostruzione su base idrologica degli effetti al suolo dell'evento di pioggia eccezionale che ha colpito la provincia di Livorno la notte fra il 9 e il 10 settembre 2017. Gli obiettivi dello studio sono i seguenti:

- valutazione delle portate di piena dell'evento e della loro eccezionalità;
- stima di massima delle principali caratteristiche delle esondazioni provocate dall'evento;
- aggiornamento, in conseguenza dell'evento, gli idrogrammi di piena di progetto con tempo di ritorno preassegnato per il reticolo idrografico della zona oggetto di studio.

Mediante l'implementazione del modello idrologico a parametri distribuiti MOBIDIC, lo studio ha permesso di valutare:

- Portate massime e idrogrammi di evento in tutti i rami del reticolo di gestione;
- Aggiornamento delle portate massime per TR 30, 100 e 200 anni in tutti i rami del reticolo di gestione, sulla base delle LSPP aggiornate al 2012, e loro confronto con stime da studi precedenti;
- Fattore di amplificazione delle portate massime idrologiche di evento rispetto a quelle per TR 200 anni.

Il metodo adottato per il calcolo delle portate di piena per assegnati tempi di ritorno (eventi sintetici) consente di determinare per ciascun ramo del reticolo idrografico due idrogrammi critici fra tutti quelli calcolati con lo stesso tempo di ritorno: quello con massima portata al picco e quello con massimo volume di piena.

Per ciascun tempo di ritorno ### il software MOBIDIC permette il salvataggio dei risultati nella seguente forma:

- 1) Shape-file del reticolo idrografico contenente, per ciascun ramo, i seguenti campi:
 - Qmax### – Portata massima [mc/s] per evento con massima portata al picco.
 - dQmax### - Durata [ore] dell'evento con massima portata al picco.
 - VQmax### - Volume di piena [100 x mc] dell'evento con massima portata al picco.
 - Vmax### - Portata massima [mc/s] per evento con massimo volume di piena.
 - dVmax### - Durata [ore] dell'evento con massimo volume di piena.
 - QVmax### - Volume di piena [100 x mc] dell'evento con massimo volume di piena.

- 2) Tabella in formato .csv in cui è riportato, per ciascun ramo del reticolo, l'andamento temporale dell'idrogramma di piena per evento con massima portata al picco.

In merito al Rio Maggiore, le risultanze dello studio dell'Ing. Castelli utilizzate nel presente progetto di fattibilità, riguardano essenzialmente:

- Idrogrammi di evento calcolati su varie sezioni di chiusura del bacino idrografico del Rio Maggiore (utilizzati quali input idrologici nelle verifiche idrauliche);
- Idrogrammi di portata massima per TR=200 anni sulle stesse sezioni di chiusura (utilizzati per verifica e confronto con i risultati ottenuti dal modello idrologico sviluppato a supporto del presente progetto).

5.2 MODELLO IDROLOGICO DI SUPPORTO AL PROGETTO

5.2.1 Bacino idrografico di riferimento

Il Rio Maggiore sottende un bacino idrografico di superficie complessiva pari a circa 8 kmq. Morfologicamente il bacino risulta caratterizzato da un primo tratto montano fino alla località Limoncino, in cui il corso d'acqua scorre incassato tra versanti acclivi, e da un tratto vallivo che prosegue parallelo alla Strada Provinciale n.5 Valle Benedetta in un contesto sempre più urbanizzato, attraversando il centro abitato di Salviano e la zona sud di Livorno. In prossimità del cimitero comunale, dal ponte di Via Cattaneo il corso d'acqua prosegue tombato fino allo sbocco a mare.

L'analisi idrologica implementata è finalizzata alla stima degli idrogrammi di piena attesi sul Rio Maggiore nelle seguenti sezioni di chiusura:

- Località Limoncino, a monte dell'affluente in sinistra idrografica;
- Località Limoncino, a valle dell'affluente in sinistra idrografica;
- Ponte di Via dell'Uliveta;
- Ponte della Ferrovia;
- Ponte di Via Cattaneo.

Si ipotizza che a monte del tratto di analisi le portate idrologiche del corso d'acqua siano interamente contenute in alveo senza causare esondazioni.

Si precisa inoltre che l'analisi idrologica svolta non tiene conto dei contributi fognari che confluiscono nel tratto tombato a valle di Via Cattaneo.

Per l'individuazione del bacino idrografico, del reticolo idraulico del Rio Maggiore e delle sezioni di calcolo si rimanda all'elaborato dedicato (elaborato D.1.1 - Allegato 1 – Modello Idrologico).

5.2.2 Modello idrologico Rio Maggiore

Sul corso d'acqua di interesse è stata effettuata una classificazione geomorfologica del reticolo fluviale secondo il criterio di Horton-Strahler.

Per la stima delle perdite è stato adottato il metodo dell'infiltrazione a soglia.

I parametri I_a e K_s , intercettazione iniziale e coefficiente di infiltrazione a saturazione per la depurazione idrologica, sono stati ricavati dall'analisi delle carte dell'Uso del Suolo e della Geologia della Regione Toscana.

Per la stima del parametro I_a , intercettazione iniziale, si è utilizzata la formula indicata nella procedura di Regionalizzazione delle Portate di Piena della Regione Toscana, funzione dell'uso del suolo del bacino:

$$I_a = 3.3 + 22P_{ab}$$

dove P_{ab} rappresenta la percentuale di area boscata del bacino desunta dalla Carta dell'Uso del Suolo.

Il parametro K_s è stato stimato a partire dalla Carta Geologica.

Come modello di trasformazione afflussi-deflussi è stato adottato l'idrogramma istantaneo unitario geomorfologico (GIUH), i cui parametri n e k sono stati ricavati dalla gerarchizzazione.

Una sintesi dei parametri idrologici utilizzati è riportata nella tabella seguente.

			Modello di Infiltrazione		Trasformazione afflussi-deflussi	
Bacino	Sezione di chiusura	A	I_a	K_s	n	k
		[kmq]	[mm]	[mm/h]	[-]	[h]
Rio Maggiore	Limoncino (monte affluente)	4.62	20.333	0.936	2.973	0.291
	Limoncino (valle affluente)	4.89	20.427	0.849	2.978	0.285
	Via Uliveta	6.27	17.869	0.974	2.837	0.432
	Ferrovia	7.21	15.960	0.939	2.790	0.500
	Via Cattaneo	7.98	14.747	0.849	2.702	0.577

TABELLA 5-1: PARAMETRI IDROLOGICI RIO MAGGIORE

Tutti i risultati della modellistica idrologica implementata sono riportati nell'elaborato *D.1.1 - Allegato 1 – Modello Idrologico*.

Per approfondimenti sui fondamenti teorici della modellistica idrologica utilizzata si rimanda all'*Appendice 1 – Modellistica Idrologica Idraulica – Fondamenti Teorici*.

5.2.2.1 Sollecitazioni pluviometriche

Per la stima degli idrogrammi sintetici per assegnati tempi di ritorno, la sollecitazione pluviometrica è stata stimata sulla base delle griglie delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica a ed n pubblicate dalla Regione Toscana nell'ambito dello Studio di Regionalizzazione delle Precipitazioni.

Seguendo la procedura indicata nella "Guida all'Uso" fornita dalla Regione Toscana, sono state stimate le altezze di pioggia per varie durate (da 30 minuti a 6 ore) e tempi di ritorno (30-200 anni). La pioggia lorda così calcolata è stata opportunamente ragguagliata in funzione dell'area del bacino e della durata dell'evento meteorico.

Si precisa che per il calcolo del coefficiente di ragguaglio areale, K_r , è stata utilizzata la formulazione suggerita nella Regionalizzazione delle Portate di Piena della Regione Toscana:

$$K_r = 1 - \exp(\alpha t^\beta) + \exp(\alpha t^\beta - \gamma A)$$

dove t è la durata dell'evento, A è l'area del bacino sotteso e α , β , γ sono parametri dipendenti dal bacino considerato ed assunti pari a:

$$\alpha = 0.036a' \text{ con } a' = \text{parametro delle cpp nella forma trinomia } h = a' T^m D^n$$

$$\beta = 0.25$$

$$\gamma = 0.01$$

Pertanto, per il calcolo del K_r è stata eseguita la scomposizione dei due fattori a e n delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica dello Studio di Regionalizzazione in tre fattori a' , n' , m' mediante regressione logaritmica multipla. L'area del bacino sotteso è stata assunta pari alla superficie del bacino complessivo del Rio Maggiore.

La seguente Tabella 5-2 sintetizza i risultati ottenuti per le durate di pioggia pari a $d=1.25-1.5-2$ ore.

		Eventi sintetici TR=30 anni								
		Durata 1.25 ore			Durata 1.5 ore			Durata 2 ore		
Bacino	Sezione di chiusura	h_{lorda} [mm]	Kr [-]	h_{ragg} [mm]	h_{lorda} [mm]	Kr [-]	h_{ragg} [mm]	h_{lorda} [mm]	Kr [-]	h_{ragg} [mm]
Rio Maggiore	Limoncino (monte affluente)	75.7	0.971	73.5	79.0	0.973	76.9	84.6	0.975	82.5
	Limoncino (valle affluente)	75.8	0.971	73.6	79.1	0.973	76.9	84.7	0.975	82.6
	Via Uliveta	76.4	0.971	74.2	79.8	0.973	77.6	85.4	0.975	83.3
	Ferrovia	77.0	0.971	74.8	80.4	0.973	78.2	86.1	0.975	83.9
	Via Cattaneo	77.4	0.971	75.2	80.9	0.973	78.7	86.7	0.975	84.5

		Eventi sintetici TR=200 anni								
		Durata 1.25 ore			Durata 1.5 ore			Durata 2 ore		
Bacino	Sezione di chiusura	h_{lorda} [mm]	Kr [-]	h_{ragg} [mm]	h_{lorda} [mm]	Kr [-]	h_{ragg} [mm]	h_{lorda} [mm]	Kr [-]	h_{ragg} [mm]
Rio Maggiore	Limoncino (monte affluente)	106.8	0.971	103.7	112.8	0.973	109.7	123.0	0.975	119.9
	Limoncino (valle affluente)	106.9	0.971	103.8	112.9	0.973	109.8	123.1	0.975	120.0
	Via Uliveta	107.8	0.971	104.7	113.9	0.973	110.7	124.2	0.975	121.0
	Ferrovia	108.6	0.971	105.5	114.7	0.973	111.6	125.1	0.975	122.0
	Via Cattaneo	109.2	0.971	106.1	115.4	0.973	112.3	126.0	0.975	122.8

TABELLA 5-2: EVENTI SINTETICI - ALTEZZE DI PIOGGIA E COEFFICIENTI DI RAGGUAGLIO

La ricostruzione degli idrogrammi di piena ingenerati dalla sollecitazione pluviometrica dell'evento del 9-10 Settembre 2017 è stata mutuata dallo studio dell'Ing. Castelli, già descritto al paragrafo 5.1, a partire dalle misurazioni di pioggia registrate alle stazioni pluviometriche di Stagno, Colle Salvetti, Livorno, Valle Benedetta, Quercianella. Per tutti i dettagli si rimanda agli elaborati del citato studio.

5.2.2.2 Idrogrammi di piena

Alla luce di quanto argomentato ai paragrafi precedenti, gli idrogrammi di piena risultanti dal modello idrologico sviluppato a supporto del progetto sono sintetizzati nella Tabella 5-3 seguente, in cui si riportano i valori di portata di picco ed i volumi di piena (eventi con TR=30-200 anni, durata di pioggia d=1.25-1.5-2 ore).

Bacino	Sezione di chiusura	TR30 anni d=1.25 h		TR30 anni d=1.5 h		TR30 anni d=2 h	
		Qmax [mc/s]	Volumi [mcx1000]	Qmax [mc/s]	Volumi [mcx1000]	Qmax [mc/s]	Volumi [mcx1000]
Rio Maggiore	Limoncino (monte affluente)	51.9	240.1	51.1	254.5	47.0	278.2
	Limoncino (valle affluente)	55.8	254.5	54.7	269.8	50.2	295.2
	Via Uliveta	56.3	345.3	56.9	365.0	55.6	397.4
	Ferrovia	60.3	415.5	61.3	438.5	60.8	476.4
	Via Cattaneo	61.9	473.8	63.2	499.7	63.6	542.5

Bacino	Sezione di chiusura	TR200 anni d=1.25 h		TR200 anni d=1.5 h		TR200 anni d=2 h	
		Qmax [mc/s]	Volumi [mcx1000]	Qmax [mc/s]	Volumi [mcx1000]	Qmax [mc/s]	Volumi [mcx1000]
Rio Maggiore	Limoncino (monte affluente)	79.1	379.6	77.1	406.1	70.8	450.9
	Limoncino (valle affluente)	84.9	402.2	82.6	430.5	75.4	478.1
	Via Uliveta	85.9	536.2	87.0	572.6	85.2	633.9
	Ferrovia	91.3	636.9	93.2	679.4	93.1	750.8
	Via Cattaneo	93.2	720.2	95.8	767.8	97.1	848.0

TABELLA 5-3: PORTATE AL COLMO E VOLUMI DI PIENA RIO MAGGIORE – EVENTI SINTETICI

Dall'analisi dei risultati ottenuti, si evince che la durata di pioggia critica, che massimizza gli effetti sul bacino del Rio Maggiore, è pari a 2 ore. Per tale durata risultano infatti massimizzati i valori della portata di picco alla sezione di Via Cattaneo (sezione di chiusura dell'intero bacino).

Nelle verifiche idrauliche sviluppate al capitolo seguente, la durata di pioggia di progetto è stata pertanto assunta pari a 2 ore, in modo tale da massimizzare gli effetti attesi sul bacino.

Nelle figure seguenti si riportano i grafici degli idrogrammi di piena di durata 2 ore.

Gli idrogrammi di piena ricostruiti per la sollecitazione pluviometrica registrata in occasione dell'evento del 9-10 Settembre 2017, mutuati dallo studio dell'Ing. Castelli, sono invece riportati in Tabella 5-4 e Figura 5-3.

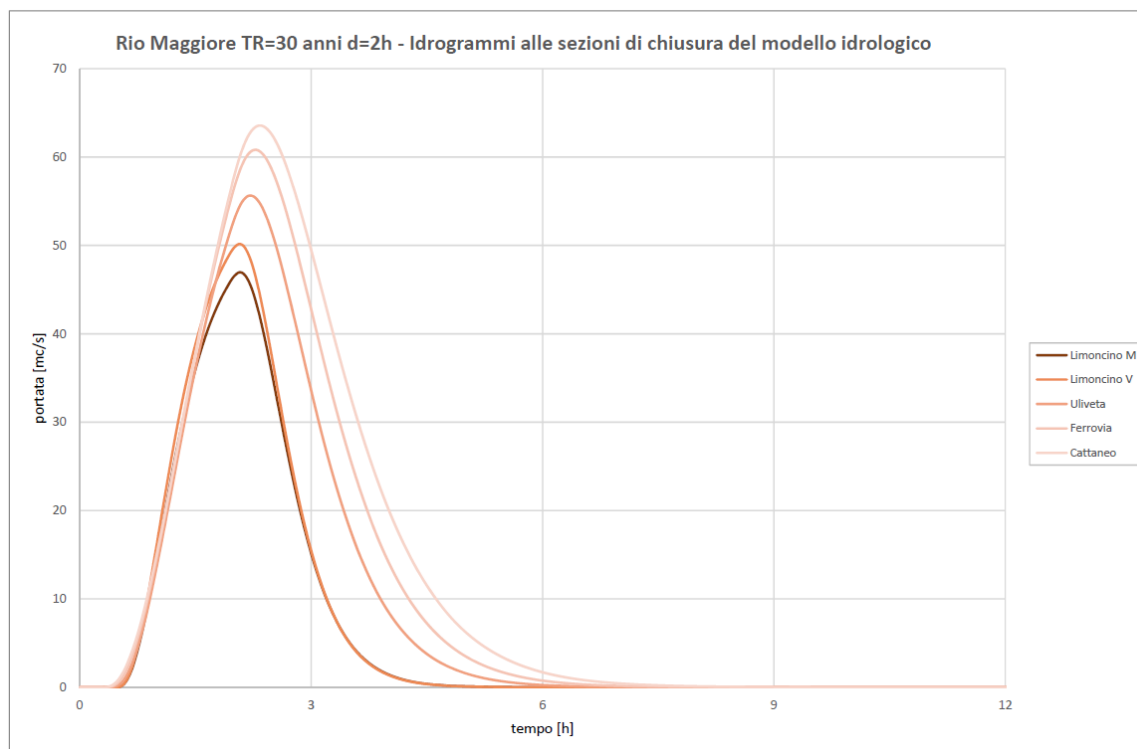


FIGURA 5-1: IDROGRAMMI RIO MAGGIORE - EVENTO SINTETICO TR=30 ANNI DURATA 2 ORE

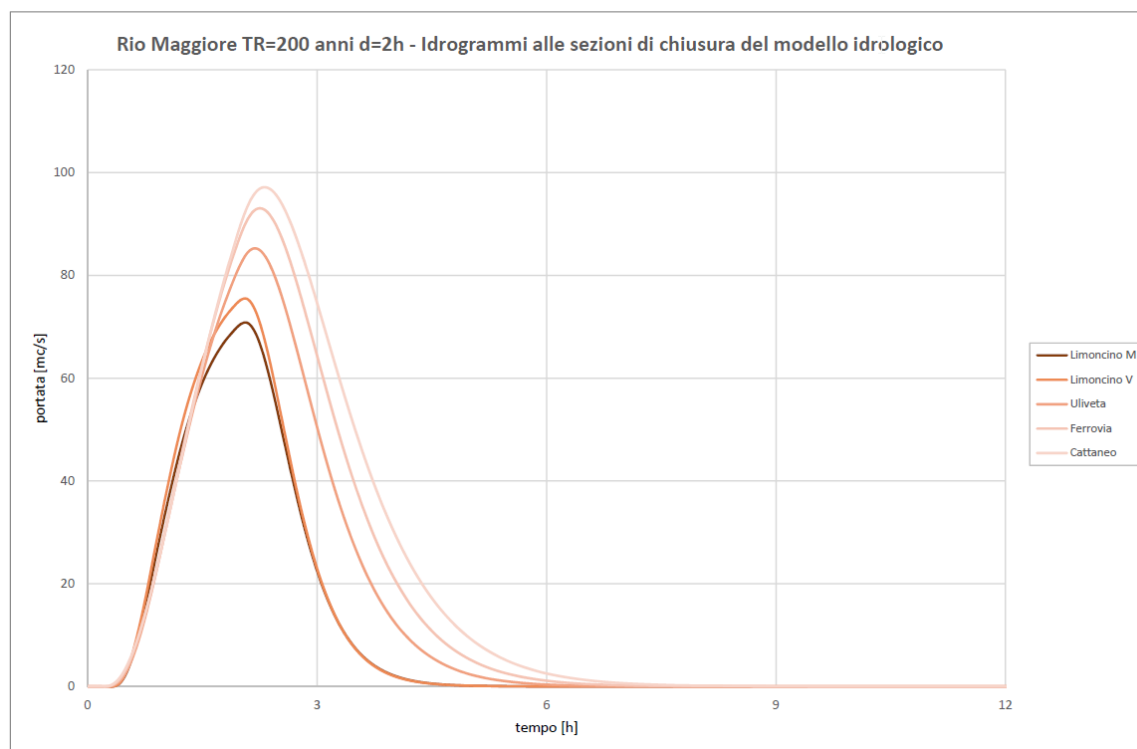


FIGURA 5-2: IDROGRAMMI RIO MAGGIORE - EVENTO SINTETICO TR=200 ANNI DURATA 2 ORE

Bacino	Sezione di chiusura	Evento reale 10/09/2017	
		Qmax [mc/s]	Volumi [mcx1000]
Rio Maggiore	Limoncino (monte affluente)	110.5	1038.8
	Limoncino (valle affluente)	126.2	1216.7
	Via Uliveta	138.5	1390.5
	Ferrovia	141.9	1498.8
	Via Cattaneo	141.4	1558.2

TABELLA 5-4: PORTATE AL COLMO E VOLUMI DI PIENA RIO MAGGIORE – EVENTO REALE 10/09/2017

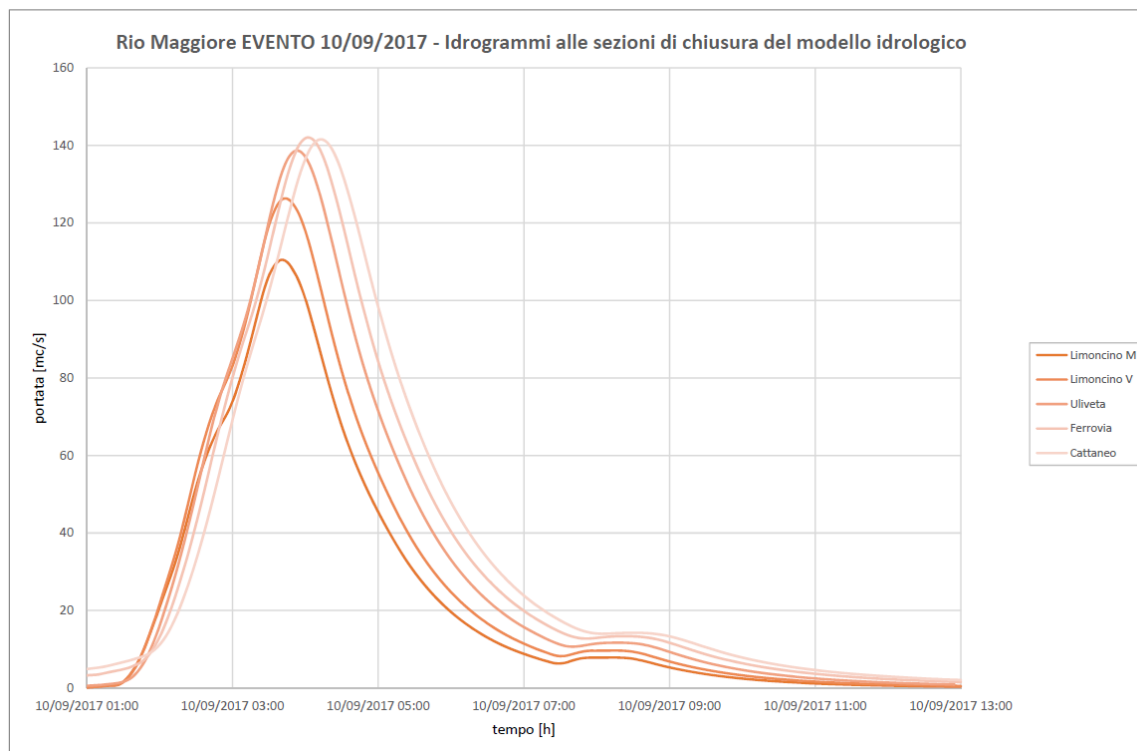


FIGURA 5-3: IDROGRAMMI RIO MAGGIORE - EVENTO REALE 10 SETTEMBRE 2017

5.2.3 Modello idrologico Fosso Limoncino

Tra gli interventi di progetto, descritti al Capitolo 3, è prevista anche la sistemazione del tratto terminale dell'affluente in sinistra idrografica del Rio Maggiore in località Limoncino (rif. Opera 13 – Fosso Limoncino).

Ai fini del corretto dimensionamento degli interventi di progetto, è stata pertanto condotta una analisi idrologica mirata a determinare gli idrogrammi di portata critici per l'affluente.

Gli idrogrammi di progetto sono stati stimati a partire dal modello idrologico sviluppato per l'intero bacino del Rio Maggiore, come differenza tra gli idrogrammi di piena attesi alle sezioni di calcolo "Limoncino (monte affluente)" e "Limoncino (monte affluente)". Al fine di massimizzare gli effetti attesi sull'affluente, il coefficiente di ragguglio areale, K_r , utilizzato per la stima della pioggia netta è stato calcolato sull'area del bacino dell'affluente.

Dai risultati di tale analisi si evince che la durata critica per il fosso è pari a 50 minuti. Gli idrogrammi di piena di progetto sono riportati in Tabella 5-5 e Figura 5-4 seguenti.

Per la ricostruzione della sollecitazione idrologica ingenerata dall'evento del settembre 2017 è stato mutuato l'idrogramma di piena dello studio Castelli calcolato per l'asta dell'affluente (Figura 5-5).

	TR30 anni	TR200 anni	Evento 10/09/2017
Q_{max} [mc/s]	4.2	6.3	5.7
Volumi [mcx1000]	13.3	20.5	55.5
Durata di pioggia [h]	0.83	0.83	12.00

TABELLA 5-5: PORTATE AL COLMO E VOLUMI DI PIENA FOSSO LIMONCINO

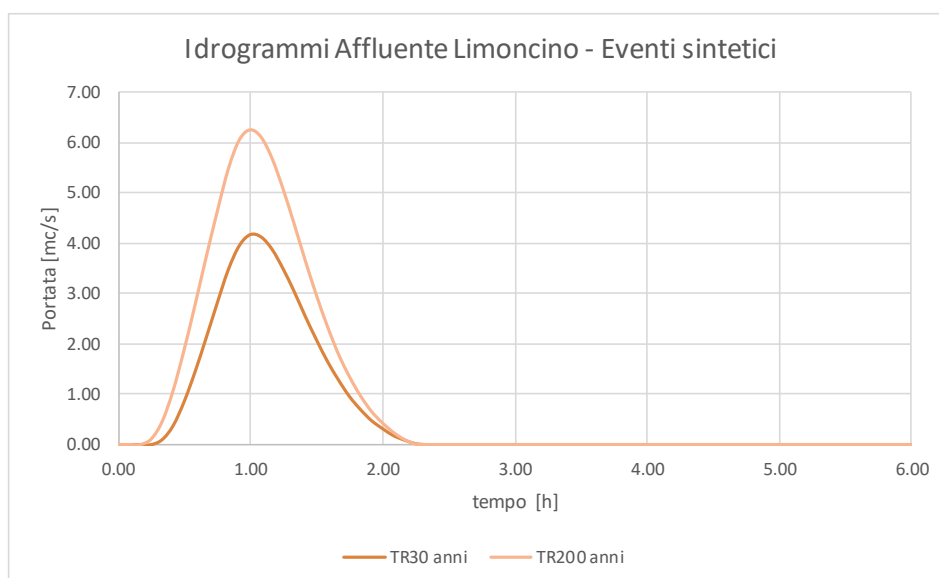


FIGURA 5-4: IDROGRAMMI FOSSO LIMONCINO – EVENTI SINTETICI TR=30-200 ANNI DURATA 50 MINUTI

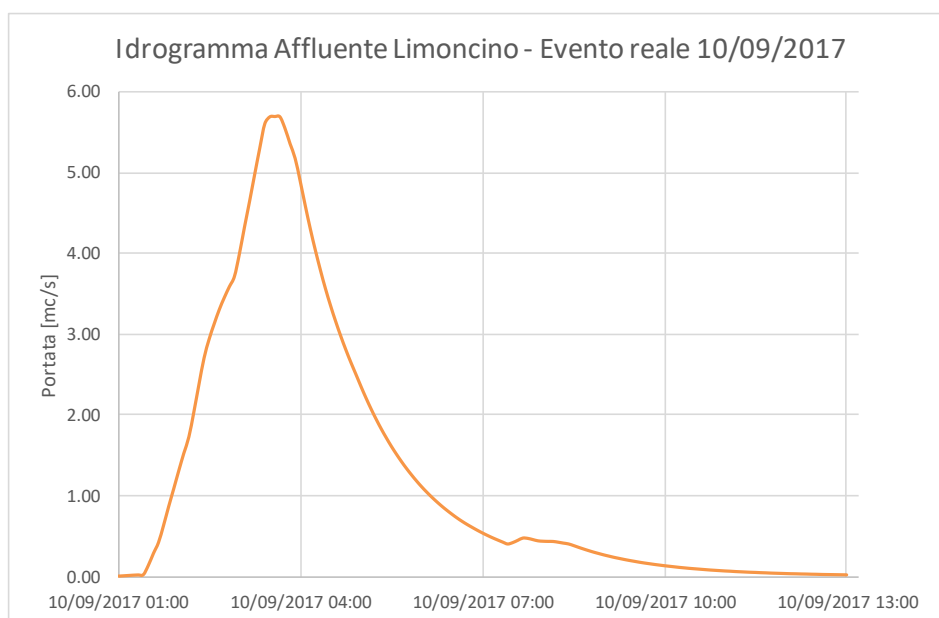


FIGURA 5-5: IDROGRAMMI FOSSO LIMONCINO - EVENTO REALE 10 SETTEMBRE 2017

5.3 ANALISI E CONFRONTO DEI RISULTATI

I risultati ottenuti dal modello idrologico implementato a supporto del presente progetto di fattibilità sono stati confrontati con le risultanze dello studio idrologico condotto dall'Ing. Castelli.

In particolare, sono stati confrontati gli idrogrammi di piena stimati per l'evento sintetico con TR=200 anni critico (ovvero per la durata di pioggia che massimizza il picco di portata) su tutte le sezioni di calcolo utilizzate nel modello idrologico.

Il risultato di tale analisi è sintetizzato in Tabella 5-6 e Figura 5-6 seguenti.

Si evidenzia che:

- 1) I risultati dello studio Castelli forniscono gli idrogrammi di portata massima di ogni ramo (ovvero riferita alla durata critica di ogni singola asta, diversa tratto per tratto), per cui non sono utilizzabili quali input di un modello idraulico che studia un tratto esteso del corso d'acqua in cui si vogliono massimizzare gli effetti indotti sull'intero bacino;
- 2) I risultati del modello idrologico sviluppato sono comparabili a quelli dello studio Castelli, sia in termini di valori di portata al picco che di volumi di piena sottesi dall'idrogramma di piena.

Alla luce di quanto sopra, gli idrogrammi di piena utilizzati nella modellazione idraulica di supporto al progetto sono quelli ricavati dal modello idrologico (paragrafo 5.2.2.2). Tale scelta risulta infatti l'unica percorribile per studiare la risposta idraulica del corso d'acqua a scala di bacino (che impone la scelta di un'unica durata di pioggia per la stima delle sollecitazioni idrologiche in input al modello idraulico) e altresì cautelativa, in quanto in tutte le sezioni di calcolo il modello idrologico stima valori di portata di picco e volumi di piena più alti rispetto allo studio Castelli.

RISULTATI TR=200 ANNI DURATA CRITICA - MODELLO IDROLOGICO					
	LIMONCINO M	LIMONCINO V	ULIVETA	FERROVIA	CATTANEO
<i>Q_{max} [mc/s]</i>	79.1	84.9	87.0	93.2	97.1
<i>Volumi[mcx1000]</i>	380	402	573	679	848
<i>Durata di pioggia [h]</i>	1.25	1.25	1.50	1.50	2.00
RISULTATI TR=200 ANNI DURATA CRITICA - STUDIO CASTELLI					
	LIMONCINO M	LIMONCINO V	ULIVETA	FERROVIA	CATTANEO
<i>Q_{max} [mc/s]</i>	65.5	74.0	80.8	85.8	87.0
<i>Volumi[mcx1000]</i>	452	528	642	762	843
<i>Durata di pioggia [h]</i>	1.17	1.17	1.33	1.42	1.50

TABELLA 5-6: CONFRONTO PORTATE AL COLMO E VOLUMI DI PIENA RIO MAGGIORE - TR=200 ANNI

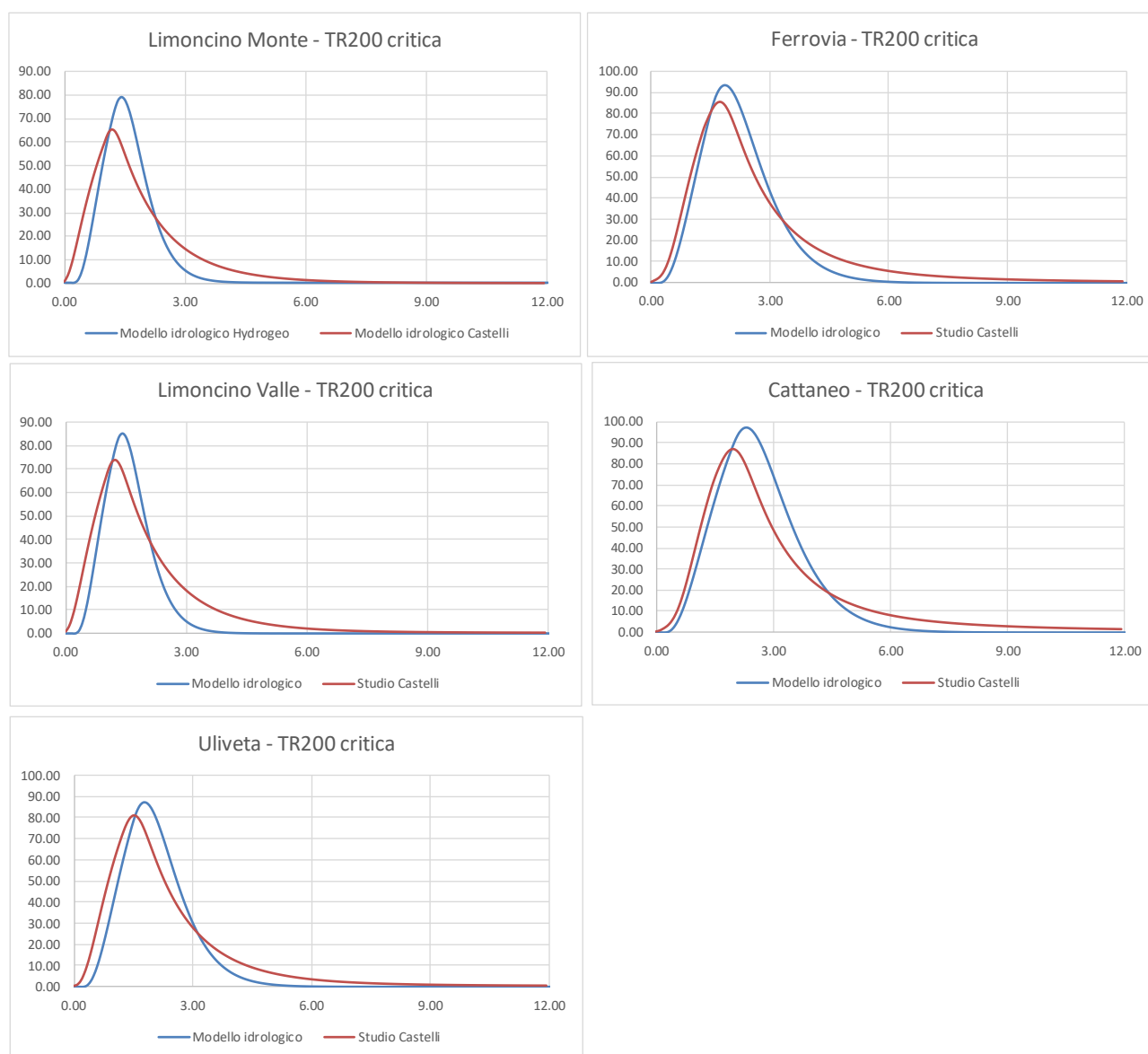


FIGURA 5-6: CONFRONTO IDROGRAMMI DI PIENA SUL RIO MAGGIORE - TR=200 ANNI

6. MODELLISTICA IDRAULICA

Nel presente capitolo si riportano i risultati delle analisi idrauliche svolte per valutare il comportamento del corso d'acqua e la funzionalità delle opere idrauliche allo stato attuale e delle verifiche idrauliche implementate per valutare l'efficacia degli interventi di progetto.

6.1 ANALISI IDRAULICA STATO ATTUALE

Al fine di verificare l'attuale livello di officiosità del corso d'acqua e definire analiticamente ogni criticità puntuale e/o diffusa del reticolo, è stata sviluppata una analisi idraulica approfondita dello stato di fatto del Rio Maggiore che prevede l'implementazione di due modelli:

1. modello idraulico accoppiato, monodimensionale in alveo e bidimensionale nelle aree contermini potenzialmente allagabili (di seguito **Modello Idraulico FLOOD**), per la valutazione degli effetti indotti in alveo e nel territorio circostante da eventi di piena eccezionali (eventi sintetici per assegnati tempi di ritorno e ricostruzione della sollecitazione idrologica ingenerata dall'evento di pioggia eccezionale del 9-10 settembre 2017);
2. modello idraulico monodimensionale del corso d'acqua (di seguito **Modello Idraulico 1D**), sollecitato da set di valori di portata costante, per l'individuazione delle criticità idrauliche e la definizione analitica dell'attuale officiosità idraulica del corso d'acqua e delle opere idrauliche presenti.

I due modelli, distinti ma al contempo strettamente correlati, hanno permesso, rispettivamente, di valutare il comportamento del corso d'acqua e la funzionalità delle opere idrauliche esistenti in occasione di eventi meteorici estremi, e di stimarne officiosità e capacità di smaltimento in maniera analitica, permettendo così di individuare gli interventi di progetto necessari per la mitigazione del rischio idraulico indotto dal Rio Maggiore.

È stato infine implementato un modello idraulico speditivo dedicato alla stima della pericolosità attuale indotta dal fosso Limoncino.

6.1.1 Caratterizzazione topografica del corso d'acqua e delle aree di interesse

La caratterizzazione geometrica del Rio Maggiore e delle aree contermini è stata ricavata dalla campagna di indagini topografiche eseguite a supporto della progettazione.

Le indagini topografiche hanno riguardato sia il tratto di corso d'acqua a cielo aperto, tra la località Limoncino ed il ponte di Via Cattaneo a Livorno (rilievo topografico eseguito dallo Studio Mazzetti), sia il tratto tombato cittadino, da Via Cattaneo allo sbocco a mare nei pressi della Barriera Margherita (rilievo topografico eseguito da Hera s.r.l.).

Complessivamente, l'area oggetto di rilievo si estende per una lunghezza di circa 6.6 Km lungo il reticolo del Rio Maggiore, tra la località Limoncino e lo sbocco a mare, e ricomprende l'alveo del corso d'acqua, le strutture di contenimento e le opere idrauliche esistenti, le infrastrutture e la viabilità contermini, nonché edifici, recinzioni, manufatti in muratura e quant'altro di significativo rilevato in prossimità del corso d'acqua, andando ad integrare ed ampliare le aree coperte dai voli Lidar già in possesso della Regione Toscana.

A partire dalle campagne topografiche succitate, è stato possibile caratterizzare i seguenti tratti fluviali:

- Rio Maggiore tratto a cielo aperto - dalla loc. Limoncino a Livorno Via Cattaneo, lunghezza 5.6 km,

205 sezioni fluviali (codifica da 00664__17 a 00104PX17);

- Rio Maggiore tratto tombato - da Via Cattaneo allo sbocco a mare, lunghezza 1.0 km, 35 sezioni fluviali (codifica da 00104PX17 a 00001__17).

Le sezioni fluviali utilizzate nella modellistica idraulica sono state codificate attraverso un codice alfanumerico che contiene al proprio interno le seguenti informazioni:

(Esempio: sezione 00104PX17)

- 5 caratteri (Esempio: 00104): identificativo del codice della sezione, in questo caso è la sezione 104, che individua la distanza progressiva dalla foce del corso d'acqua (metri x10);
- 2 caratteri (Esempio: PX): identificativo delle opere idrauliche; se non presenti si utilizzano i caratteri: __
- 2 caratteri (Esempio: 17): identificativo dell'anno di esecuzione del rilievo topografico.

Per un immediato riscontro e facilità di lettura, in tabella seguente sono riportate le sezioni fluviali in corrispondenza delle principali opere idrauliche presenti nel tratto di corso d'acqua oggetto di modellazione, complete di codifica, distanza progressiva (calcolata da monte verso valle) e descrizione dell'opera.

SEZIONI OPERE IDRAULICHE STATO ATTUALE		
Codice sezione	Distanza progressiva	Descrizione
00655PX17	89.02	PONTE LIMONCINO
00571PX17	926.50	PONTE SP VALLE BENEDETTA MONTE
00541PX17	1224.71	PONTE SP VALLE BENEDETTA VALLE
00465PX17	1987.73	PONTE PRIVATO
00385PX17	2789.49	PONTE VIA LIVETA
00377SX17	2868.43	SFIORE CASSA 2
00352SX17	3122.64	SFIORE SICUREZZA CASSA 2
00340PX17	3241.24	PONTE VIA SALVANO
00330PX17	3335.38	PASSERELLA PEDONALE
00310SX17	3537.07	SFIORE CASSA 3
00284SX17	3800.00	SFIORE SICUREZZA CASSA 3
00280PX17	3843.84	PONTE VIA PELAGHI
00270PX17	3941.55	PONTE SS1 SIVINCOLO NORD (stralicciato di 30°)
00266PX17	3979.98	PONTE SS1 SIVINCOLO SUD
00251PX17	4126.08	PONTE FERROVIA
00248PX17	4159.20	PONTE NUOVA LOTTIZZAZIONE
00244SX17	4200.00	SFIORE CASSA 3bis
00212PX17	4516.25	PASSERELLA NUOVA LOTTIZZAZIONE
00184SX17	4800.00	SFIORE SICUREZZA CASSA 3bis
00173PX17	4904.81	PONTE VIA EVANTE
00140SX17	5241.28	SFIORE SICUREZZA CASSA 4
00118PX17	5454.78	PONTE VIA ARDENZA
00104PX17	5595.05	INIZIO TOMBAMENTO (VIA CATTANEO)
00001__17	6637.72	SBOCCO A MARE

TABELLA 6-1: CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA RIO MAGGIORE- CODIFICA SEZIONI OPERE IDRAULICHE STATO ATTUALE

Per la modellazione dei territori limitrofi, comprese le aree destinate a cassa di espansione, è stato costruito un modello digitale del terreno a partire dalle informazioni plano-altimetriche delle indagini topografiche di supporto al progetto, integrate ed ampliate con i voli Lidar disponibili.

Nell'elaborato *D2 – Planimetria Modello idraulico stato Attuale* sono riportate le tracce di tutte le sezioni fluviali utilizzate, con relativa codifica alfanumerica, ed il modello digitale del terreno a maglia 4x4 metri utilizzato per la modellazione bidimensionale nelle aree contermini.

6.1.2 Modello Idraulico FLOOD

Con la denominazione **Modello Idraulico FLOOD** si identifica la modellazione idraulica sviluppata per lo stato attuale, per la valutazione degli effetti indotti in alveo e nel territorio circostante da eventi di piena eccezionali (eventi sintetici per assegnati tempi di ritorno e ricostruzione della sollecitazione idrologica ingenerata dall'evento di pioggia eccezionale del 9-10 settembre 2017).

L'implementazione del modello è stata effettuata attraverso il Software MIKE del Danish Hydraulic Institute – DHI, certificato dalla F.E.M.A. (Federal Emergency Management Agency).

In particolare, è stata implementata una modellistica accoppiata, monodimensionale in alveo e bidimensionale per il territorio circostante, che permette di determinare battenti, livelli e velocità di propagazione in alveo e nelle aree allagate.

Il comportamento idraulico in alveo del reticolo idrografico di verifica è stato simulato attraverso un modello monodimensionale (modulo MIKE 11) con la schematizzazione geometrica delle sezioni fluviali ricavata dai rilievi topografici, così come argomentato al paragrafo precedente. Le acque esondate e la loro propagazione sono state simulate con un modello bidimensionale (modulo MIKE21), a partire dal modello digitale del terreno a celle 4x4m, mutuato dai risultati delle indagini topografiche integrate ed ampliate con i voli Lidar disponibili.

Il modulo MIKE FLOOD permette l'accoppiamento dei due modelli in modo totalmente dinamico, garantendo la conservazione di massa e quantità di moto tra i diversi sistemi.

Per ulteriori dettagli si rimanda all'*Appendice 1 – Modellistica Idrologica Idraulica – Fondamenti Teorici*.

6.1.2.1 Verifiche Idrauliche implementate

Gli scenari di verifica implementati sono il risultato della combinazione fra scenari idrologici e scenari geometrici.

I primi consentono di individuare le sollecitazioni al reticolo idrografico schematizzato in funzione della probabilità di accadimento dell'evento meteorico simulato e della durata dello stesso; i secondi rappresentano le configurazioni territoriali che saranno cimentate alle sollecitazioni calcolate.

Nel caso in esame è stato costruito lo scenario geometrico dello **Stato Attuale**, che rappresenta l'attuale configurazione del territorio e permette di ricavare informazioni dettagliate sulla pericolosità idraulica delle aree oggetto di intervento e sulla funzionalità delle opere idrauliche esistenti.

Nello modello geometrico Stato Attuale sono state inserite le seguenti strutture idrauliche:

- Ponti: le strutture degli attraversamenti presenti lungo il corso d'acqua sono state inserite nel modello monodimensionale MIKE11;
- Casse di espansione: le soglie di sfioro fisse delle casse di espansione sono state modellate inserendo nel modulo MIKE11 degli sfioratori laterali direttamente collegati al modello MIKE21. Il funzionamento del tombasifone di collegamento tra il secondo modulo della cassa RM3bis e la cassa RM4 è stato modellato attraverso l'inserimento di un elemento Culvert (tombamento) direttamente nel modello bidimensionale MIKE21. La stima della propagazione delle acque sfiorate in cassa avviene nel modello bidimensionale.
- Collegamenti alveo-terreno: il trasferimento dei volumi d'esondatazione dall'alveo alle aree allagate viene garantito con l'inserimento di soglie sfioranti, inserite nel modulo MIKE FLOOD,

assimilabili a stramazzi in parete grossa, con funzionamento bidirezionale, in condizioni di deflusso libero oppure rigurgitato in funzione dei livelli a monte e a valle dello stramazzo.

A partire dall'analisi idrologica implementata e descritta al precedente paragrafo 5.2, è stato scelto di sollecitare il sistema idraulico con i seguenti 3 scenari idrologici:

- Eventi sintetici con TR=30 e 200 anni critici per il bacino del Rio Maggiore, ovvero con durata dell'evento di pioggia pari a 2 ore;
- Sollecitazione idrologica dell'evento reale del 09-10 settembre 2017.

Per ciascun scenario idrologico, la condizione al contorno di monte, assegnata in testa al modello (sezione 00664__17), è stata assunta pari all'idrogramma delle portate attese calcolato alla sezione di calcolo denominata "Limoncino (monte affluente)". Sono stati inoltre inseriti i seguenti apporti idrologici:

- Idrogramma interbacino "Limoncino (valle affluente)": contributo puntuale alla sezione 00654__17;
- Idrogramma interbacino "Uliveta": contributo distribuito tra le sezioni 00650__17 e 00386__17;
- Idrogramma interbacino "Ferrovia": contributo distribuito tra le sezioni 00384__17 e 00252__17;
- Idrogramma interbacino "Cattaneo": contributo distribuito tra le sezioni 00250__17 e 00119__17.

La rappresentazione grafica degli idrogrammi utilizzati nelle verifiche idrauliche è riportata nell'elaborato D.1.1 - Allegato 1 – Modello Idrologico.

6.1.2.2 Risultati

Dall'implementazione del **Modello Idraulico FLOOD** sopra descritto, si è giunti alla caratterizzazione delle condizioni di pericolosità e rischio idraulico attuale delle aree di intervento.

Le verifiche implementate sullo Stato Attuale mostrano criticità idrauliche marcate e diffuse su tutto il territorio urbanizzato oggetto di studio.

Il tratto urbano del reticolo idraulico risulta fortemente insufficiente al contenimento degli eventi di piena ed è causa di allagamenti diffusi. Per eventi con tempo di ritorno trentennale gli allagamenti riguardano principalmente i quartieri urbani a valle della dorsale di Via di Levante. Le aree soggette ad esondazione per eventi con TR=200 anni risultano più marcate e diffuse, estendendosi anche ad aree a monte di Via di Levante, fino ai margini del centro urbano di Livorno (zona ponte di Via Uliveta).

La simulazione eseguita sollecitando il modello stato attuale con gli input idrologici ricostruiti a partire dai dati di pioggia registrati in occasione dell'evento reale del 09-10 settembre 2017, mostra allagabilità ancora più diffuse che riguardano un territorio urbano molto esteso, andando ad interessare inoltre anche la viabilità provinciale S.P. n. 5 Valle Benedetta ed i fabbricati ad essa adiacenti, nel tratto in cui il corso d'acqua la attraversa, prima da nord a sud (ponte SP Valle Benedetta monte) e poi da sud a nord (ponte SP Valle Benedetta valle).

La capacità di smaltimento del Rio Maggiore risulta fortemente limitata dalla presenza dei ponti presenti lungo il suo tracciato, che spesso presentano una marcata insufficienza della sezione liquida e provocano evidenti fenomeni di rigurgito e rischio in termini di sicurezza delle strutture.

Procedendo da monte verso valle, le strutture che presentano le inefficienze più marcate sono:

- Ponte SP Valle Benedetta monte (cod. 00571PX17);
- Ponte SP Valle Benedetta valle (cod. 00541PX17);
- Ponte Via dell'Uliveta (cod. 00385PX17);
- Ponte Via di Salviano (cod. 00340PX17);
- Ponte Via dei Pelaghi (cod. 00280PX17);
- Ponte della Ferrovia (cod. 00251PX17);

- Ponte Via dell'Ardenza (cod. 00118PX17);
- Tratto tombato da Via Cattaneo a mare (cod. 00104PX17-00001__17).

Le condizioni di allagabilità del territorio sono evidenziate nelle Planimetrie delle Aree Allagate Stato Attuale (Tavole D5.1, D5.2, D5.3). Nelle Tavole D3.1-D3.7 sono inoltre riportati i battenti massimi attesi per ogni scenario idrologico simulato.

Ai fini di una corretta lettura delle tavole succitate, si precisa che:

- 1) il modello digitale del terreno utilizzato nelle verifiche idrauliche è un modello di suolo, ovvero risulta depurato di tutti gli elementi antropici (edifici, muri ed altri manufatti) e vegetazionali presenti sul territorio. Pertanto, i risultati riportati nelle tavole dei battenti e le planimetrie delle aree allagate non tengono conto degli elementi antropici presenti sul territorio e vanno lette ipotizzando tali strutture come "trasparenti" alla propagazione dei volumi di esondazione;
- 2) La carta dei battenti e la perimetrazione delle aree allagate per lo scenario idrologico sviluppato a partire dalle registrazioni pluviometriche dell'evento del 9-10 settembre 2017, NON vuol in alcun modo rappresentare la ricostruzione delle aree allagate verificatesi in occasione dell'evento, bensì vuol rappresentare una stima di quanto accadrebbe nel caso in cui si ripresentasse un evento meteorico estremo simile a quello del 2017 nell'attuale stato dei luoghi, ovvero in uno scenario geometrico diverso rispetto alla configurazione del settembre 2017, poiché ad oggi risultano in atto e/o conclusi diversi interventi di messa in sicurezza sul corso d'acqua, progettati a seguito dell'evento calamitoso in questione.

I livelli idrometrici massimi attesi in ciascuna sezione fluviale ed i profili longitudinali del corso d'acqua sono riportati nella Tavola D4.

Le casse di espansione presenti lungo il corso d'acqua entrano in funzione già sullo scenario trentennale. Sull'evento duecentennale i livelli idrometrici raggiunti in cassa sono compatibili e confrontabili con quelli del progetto esecutivo delle casse di espansione redatto dal Prof. Pagliara.

Si osserva che, soprattutto in occasione di eventi più intensi, come la sollecitazione idrologica del 9-10 settembre 2017, gli sfioratori di sicurezza, poiché presentano soglie ad una quota inferiore rispetto alle quote di massimo invaso delle casse, funzionano da sfioratori di piena e riversano in alveo portate che vanno a ridurre gli effetti laminativi registrati in corrispondenza degli sfiori di presa delle casse, cosicché la portata di picco registrata in alveo a valle dell'ultima cassa (RM4) risulta confrontabile con la portata idrologica.

A titolo di esempio, in Figura 6-1 e Figura 6-2 si riportano gli idrogrammi di piena risultanti in corrispondenza degli sfioratori delle casse RM2 e RM3 (portate a monte e valle degli sfiori) nello scenario TR=200 anni critico, da cui si evince il comportamento sopra descritto.

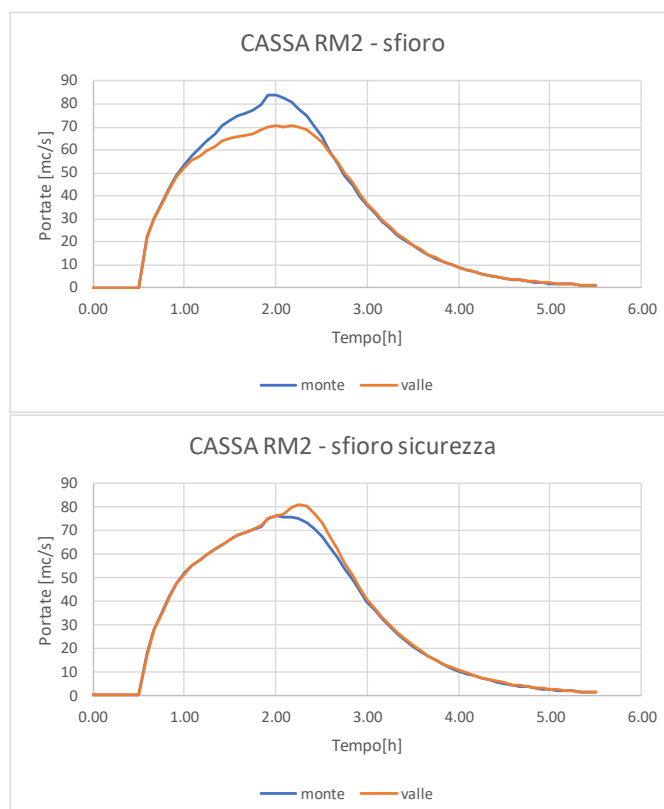


FIGURA 6-1: RISULTATI MODELLO FLOOD STATO ATTUALE – EVENTO TR=200 ANNI – COMPORTAMENTO IDRAULICO CASSA RM2

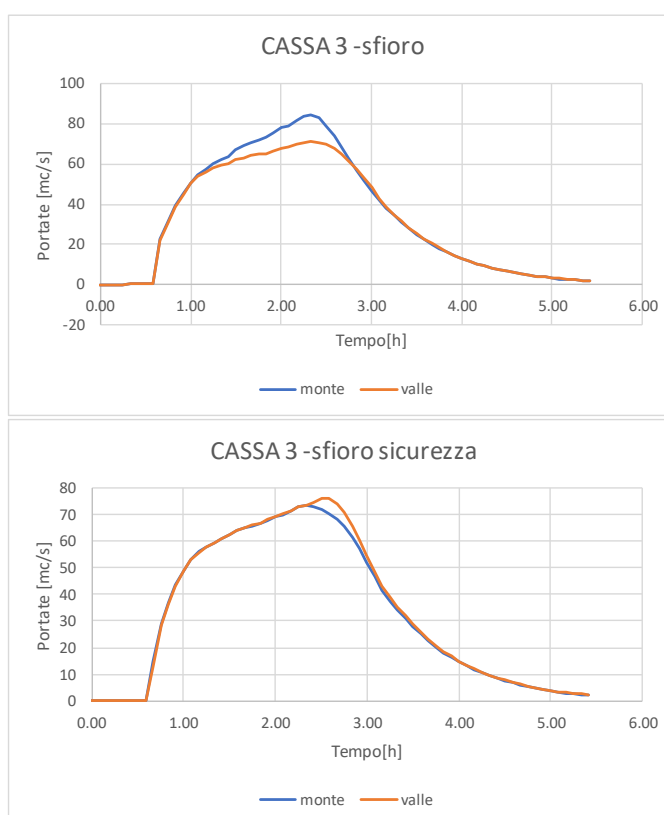


FIGURA 6-2: RISULTATI MODELLO FLOOD STATO ATTUALE – EVENTO TR=200 ANNI – COMPORTAMENTO IDRAULICO CASSA RM3

6.1.3 Modello Idraulico 1D

Con la denominazione **Modello Idraulico 1D** si identifica il modello idraulico sviluppato sul corso d'acqua per l'individuazione delle criticità idrauliche attuali e la definizione analitica dell'officiosità idraulica del reticolo (suddiviso in tratti omogenei per geometria e comportamento idraulico) e delle infrastrutture/opere idrauliche attualmente presenti.

L'implementazione del modello è stata effettuata attraverso il Software MIKE del Danish Hydraulic Institute – DHI, certificato dalla F.E.M.A. (Federal Emergency Management Agency).

In particolare, è stata implementata una modellistica monodimensionale del solo corso d'acqua con il modulo MIKE11, che permette di valutare il comportamento idraulico dell'asta fluviale, a partire dalla schematizzazione geometrica delle sezioni fluviali ricavata dai rilievi topografici, così come argomentato al paragrafo dedicato, in risposta alle sollecitazioni idrauliche imposte.

6.1.3.1 Verifiche Idrauliche implementate

Gli scenari di verifica implementati sono il risultato della combinazione fra scenari idrologici e scenari geometrici.

Nel caso in esame, sono state implementate una serie di verifiche, con grado di approfondimento progressivo, che hanno permesso la ricostruzione di un quadro completo delle criticità idrauliche puntuali e diffuse presenti lungo il reticolo e della officiosità delle opere idrauliche esistenti.

Tutti gli scenari geometrici del modello 1D sono stati cimentati su un set di portate costanti di valore crescente (da $Q=40$ mc/s a $Q=140$ mc/s), al fine di individuare, per tratti omogenei, la portata massima smaltibile ed il livello di criticità idraulica dell'asta fluviale e delle opere presenti.

Gli scenari geometrici implementati sono i seguenti:

- a) **Stato Attuale:** rappresenta l'attuale configurazione del corso d'acqua, comprensivo di tutte le opere idrauliche esistenti, e permette di ricavare informazioni dettagliate sulla officiosità idraulica del reticolo e delle opere; in particolare, le verifiche idrauliche eseguite su tale scenario geometrico hanno permesso l'individuazione delle principali criticità puntuali, ovvero gli attraversamenti che presentano evidenti problemi di insufficienza idraulica, provocando significativi fenomeni di rigurgito e rischio in termini di sicurezza delle strutture.
- b) **Stato Attuale senza ponti critici:** a partire dai risultati ottenuti dal modello geometrico Stato Attuale appena descritto, è stata ricostruita una geometria che riproduce l'attuale assetto geometrico del corso d'acqua, dalla quale sono state tolte le strutture degli attraversamenti con problemi di insufficienza idraulica (ponti SP Valle Benedetta monte e valle, cod. 00571PX17 e 00541PX17; ponte Via dell'Uliveta, cod. 00385PX17; ponte Via di Salviano, cod. 00340PX17; ponte Via dei Pelaghi, cod. 00280PX17; ponte della Ferrovia, cod. 00251PX17; ponte Via dell'Ardenza, cod. 00118PX17) ed è stato aperto tutto il tratto tombato da Via Cattaneo a mare (sezioni cod. da 00104PX17 a 00001__17). L'apertura del tratto tombato è stata simulata eliminando la struttura di copertura del canale, mantenendone però l'attuale geometria della sezione idraulica (si è cioè ipotizzato di poter semplicemente scoperchiare il canale, trascurandone la fattibilità dal punto di vista strutturale, al fine di valutare la capacità di smaltimento della sezione liquida attuale). Le verifiche idrauliche eseguite su tale scenario geometrico hanno permesso l'individuazione officiosità della sezione idraulica del reticolo, non più condizionata dal rigurgito provocato dall'insufficienza degli attraversamenti critici.

- c) **Tratto Tombato:** data la complessa geometria del tratto tombato evidenziata dal rilievo topografico svolto a supporto della progettazione, è stata condotta una analisi di dettaglio del solo tratto coperto, al fine di poter ricavare informazioni dettagliate sulla officiosità idraulica dei vari tratti del tombamento; in particolare, sono stati sviluppati 6 scenari geometrici (uno per ogni tratto a geometria omogenea individuati lungo il percorso tombato) che hanno permesso di valutare tratto per tratto il grado di officiosità dello stesso (senza condizionamenti dovuti alle inefficienze dei tratti adiacenti). È stata infine ricostruita una che riproduce l'apertura completa di tutto il tratto tombato (simulata eliminando la copertura a tutte le sezioni del canale).

6.1.3.2 Risultati

Nel presente paragrafo si riassumono i risultati ottenuti dalla modellazione 1D sviluppata per tutti gli scenari geometrici sopra descritti.

6.1.3.2.1 Risultati Modello idraulico 1D Stato Attuale

L'implementazione del modello idraulico 1D cimentato sullo scenario geometrico Stato Attuale ha permesso di ricavare:

- a. La capacità di smaltimento delle portate di piena degli attraversamenti;
- b. L'attuale officiosità idraulica del reticolo, che tiene conto della presenza di tutte le opere idrauliche presenti, ivi comprese quelle che presentano problemi di insufficienza idraulica e sono causa di fenomeni di rigurgito che provocano l'innalzamento dei livelli idraulici massimi attesi sulle sezioni fluviali di monte e limitano i deflussi, in termini di valori di portata di picco attesa, lungo l'asta fluviale di valle.

Una sintesi dei risultati ottenuti è riportata graficamente nella Carta delle Criticità (elaborati A8.1 e A8.2 – *Planimetria delle Criticità Stato Attuale*) che evidenzia:

- in linea continua, con colori diversi, il livello di officiosità idraulica attesa per ogni tratto del reticolo, risultante dal confronto tra la portata massima smaltibile e le portate idrologiche critiche stimate dallo Studio dell'Ing. Castelli (rif. paragrafo 5.1);
- il valore di portata massima smaltibile attuale su tutti gli attraversamenti.

In Appendice 2 sono inoltre riportati i profili longitudinali con i livelli idrometrici risultanti su ogni sezione fluviale.

Dall'analisi dei risultati del modello si evince quanto segue:

- 1) nel tratto di monte, dalla località Limoncino fino al ponte di Via Uliveta (tratti 13-12-11), il corso d'acqua risulta incassato e non presenta problematiche evidenti, ad eccezione delle criticità locali indotte dai due attraversamenti presenti lungo la Strada Provinciale n. 5 Valle Benedetta, che presentano una sezione idraulica ridotta per cui non riescono a far transitare portate maggiori di 60-70 mc/s (valori prossimi alla portata massima attesa per eventi con TR=30 anni).
Per il ponte di Limoncino (ricostruito post evento del 2017) e per l'attraversamento privato presente nel tratto 11 non si evidenziano problematiche di natura idraulica.

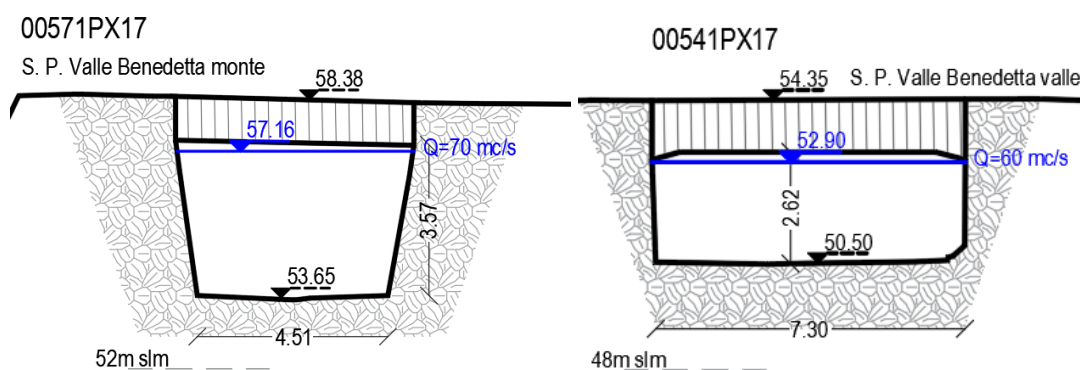


FIGURA 6-3: RISULTATI MODELLO 1D STATO ATTUALE – PONTI S.P. VALLE BENEDETTA

- 2) Il tratto in prossimità del ponte di Via Uliveta (tratto 10) presenta criticità idrauliche molto evidenti già per bassi valori di portata, per lo più causati dal rigurgito provocato dal ponte stesso, caratterizzato da una struttura ad arco di piccola luce, che non riesce a far defluire a piena luce neanche portate pari a 40 mc/s (a fronte di una portata attesa sull'evento trentennale di poco inferiore ai 70 mc/s).

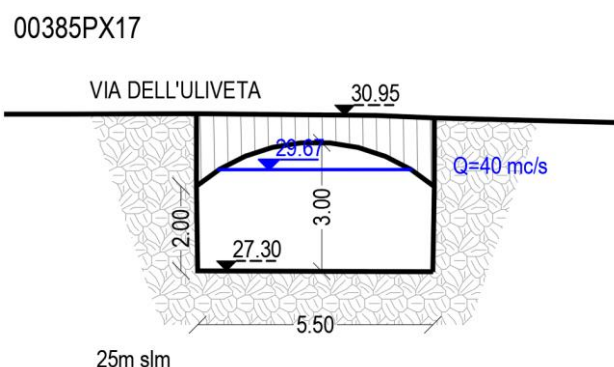


FIGURA 6-4: RISULTATI MODELLO 1D STATO ATTUALE – PONTE VIA ULIVETA

- 3) Il tratto 9 risulta fortemente influenzato dal rigurgito provocato dai ponti di Via di Salviano e di Via dei Pelaghi che presentano criticità idrauliche evidenti già per bassi valori di portata. La portata massima smaltibile dal ponte di Via di Salviano non supera i 70 mc/s, mentre il piccolo ponte ad arco di Via dei Pelaghi non è in grado di far transitare a piena luce valori di portata superiori ai 40 mc/s, a fronte di una portata trentennale attesa prossima ai 70 mc/s. La passerella pedonale e gli attraversamenti sulla S.S.1 Aurelia sono in grado di smaltire portate superiori ai valori attesi per TR=200 anni.

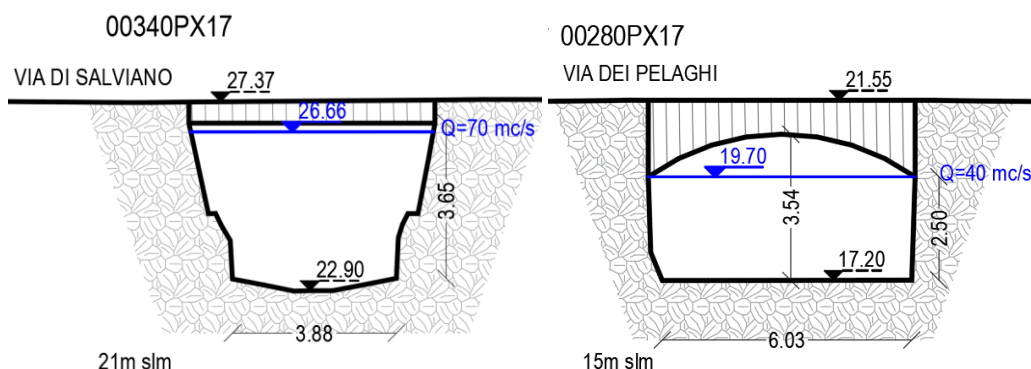


FIGURA 6-5: RISULTATI MODELLO 1D STATO ATTUALE – PONTI VIA DI SALVIANO E VIA DEI PELAGHI

- 4) I tratti urbani a valle della S.S. 1 Aurelia (tratti 8-7), presentano una officiosità idraulica fortemente compromessa, soprattutto dalle opere di attraversamento delle infrastrutture viarie e ferroviaria presenti. I ponti in corrispondenza della linea ferroviaria Pisa-Roma, e degli assi viari di Via dell'Ardenza e di Via Cattaneo presentano marcati problemi di insufficienza della sezione liquida e mandano in crisi tutto il tratto fluviale già per bassi valori di portata. Tutto il tratto tombato terminale presenta evidenti problematiche di natura idraulica (come sarà più ampiamente argomentato al successivo paragrafo dedicato) e tutto ciò inficia l'officiosità idraulica del corso d'acqua per diverse centinaia di metri a monte dello stesso.

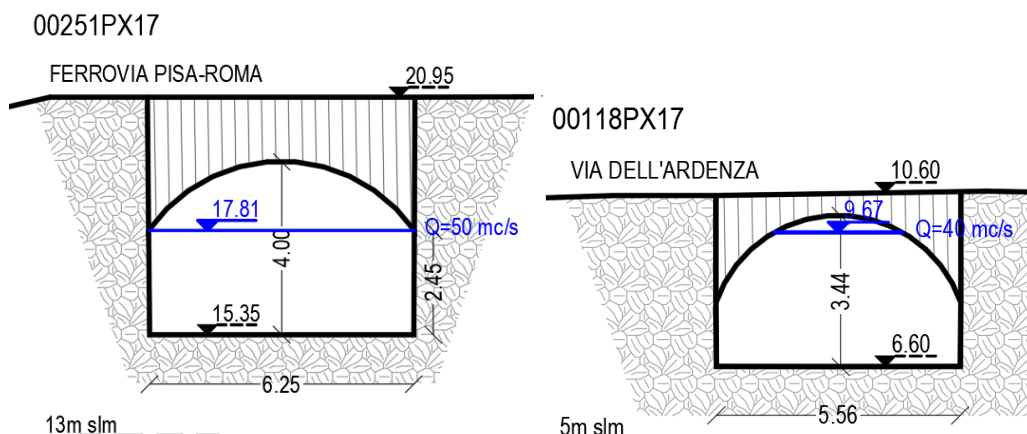


FIGURA 6-6: RISULTATI MODELLO 1D STATO ATTUALE – PONTI FERROVIA E VIA DELL'ARDEZZA

I ponti con criticità idrauliche marcate sono evidenziati nella Carta delle Criticità (elaborati A8.1 e A8.2 – *Planimetria delle Criticità Stato Attuale*) e sono quelli rimossi nella configurazione geometrica “Stato Attuale senza ponti critici”, i cui risultati sono discussi al paragrafo seguente.

6.1.3.2.2 Risultati Modello idraulico 1D Stato Attuale senza ponti critici

L'implementazione del modello idraulico 1D cimentato sullo scenario geometrico Stato Attuale Senza Ponti Critici ha permesso di ricavare:

- I tratti del reticolo idraulico che presentano problemi di insufficienza idraulica “residui”, ovvero dovuti alla ridotta sezione liquida del tratto fluviale e non condizionati dalla presenza degli attraversamenti che provocano fenomeni di rigurgito con conseguente innalzamento dei livelli idraulici a monte;
- La capacità di smaltimento delle portate di piena degli attraversamenti “non critici”.

Una sintesi dei risultati ottenuti è riportata graficamente nella Carta delle Criticità (elaborati A8.1 e A8.2 – *Planimetria delle Criticità Stato Attuale*) che evidenzia:

- in linea tratteggiata, con colori diversi, il livello di officiosità idraulica “residua” (ovvero al netto del rigurgito provocato dai ponti critici) per ogni tratto del reticolo, risultante dal confronto tra la portata massima smaltibile e le portate idrologiche critiche stimate dallo Studio dell'Ing. Castelli (rif. paragrafo 5.1);
- l'officiosità idraulica degli attraversamenti rimasti, in termini di franco di sicurezza atteso per eventi con TR=200 anni.

In Appendice 2 sono inoltre riportati i profili longitudinali con i livelli idrometrici risultanti su ogni sezione fluviale.

Dall'analisi dei risultati del modello, si evidenziano criticità residue del reticolo fluviale (proprie della geometria della sezione fluviale) nei seguenti tratti:

- 1) Tratto a cavallo del Ponte di Via Uliveta (tratto 10);
- 2) Tratto tra la S.S.1 Aurelia e la linea ferroviaria Pisa-Roma (tratto 8);
- 3) Tratto in prossimità del ponte di Via Dell'Ardenza (tratto 7).

Per l'analisi del tratto tombato terminale si rimanda al paragrafo seguente.

6.1.3.2.3 Risultati Modello idraulico 1D Tratto Tombato

Il modello idraulico 1D sviluppato per l'analisi della officiosità idraulica del tratto tombato è stato cimentato su 6 diversi scenari geometrici, che hanno permesso di valutare la capacità di smaltimento di ciascuno dei 6 tratti a geometria omogenea evidenziati dal rilievo topografico eseguito a supporto della progettazione.

Su ciascuno scenario geometrico, è stato riprodotto il tratto coperto oggetto di analisi nella sua configurazione attuale, mentre sono stati "scoperchiati" i restanti tratti (ovvero eliminando la struttura di copertura del canale, pur mantenendone l'attuale geometria della sezione idraulica), in modo tale da svincolare la risposta idraulica del tratto in analisi da condizionamenti dovuti alle inefficienze dei tratti adiacenti.

I risultati del modello, hanno permesso di stimare, per ciascuno dei 6 tratti a geometria omogenea, l'attuale officiosità idraulica del tombamento, ovvero la portata massima smaltibile a bocca piena dalla sezione chiusa.

Una sintesi dei risultati ottenuti è riportata in Appendice 2, in cui sono riportati i profili longitudinali con i livelli idrometrici attesi sulle sezioni fluviali per vari valori di portata, la graficizzazione di alcune sezioni del tombamento con l'evidenza delle portate massime smaltibili e tabelle riassuntive dei risultati ottenuti.

I risultati del modello evidenziano la seguente officiosità idraulica del tratto tombato:

- 1) Tratto 6 (Via Cattaneo): Q smaltibile = 60 mc/s;
- 2) Tratto 5 (da Via Cattaneo a via dei Pensieri): Q smaltibile = 40 mc/s;
- 3) Tratto 4 (da via dei Pensieri a via Rodocanacchi): Q smaltibile = 50 mc/s;
- 4) Tratto 3 (tra Via Rodocanacchi a Viale Sauro): Q smaltibile = 60 mc/s;
- 5) Tratto 2 (Viale Italia): Q smaltibile = 80 mc/s;
- 6) Tratto 1 (Accademia Navale): Q smaltibile = 70 mc/s.

La ricostruzione dello scenario geometrico che riproduce l'apertura completa di tutto il tratto tombato (simulata eliminando la copertura a tutte le sezioni del canale) ha dato come risultato una portata massima smaltibile del tratto di circa 80-100 mc/s, come si evince dal profilo longitudinale riportato in Appendice 2.

6.1.4 Modello idraulico Stato Attuale Fosso Limoncino

Nel presente paragrafo si sintetizza l'analisi idraulica svolta sul Fosso di Limoncino per la stima degli effetti indotti sul territorio in occasione di eventi di pioggia intensi.

Allo stato attuale il fosso del Limoncino risulta tombato per circa 300 m nel suo tratto terminale. Dal rilievo topografico svolto, si rileva la presenza di una condotta DN1200 all'imbocco e DN1500 in uscita. Non è stato possibile ricostruire la geometria né l'esatta ubicazione di tutto il tratto, che in alcuni punti risulta affiorante e ha evidenti problemi strutturali. In occasione dell'evento del settembre 2017, si verificò l'ostruzione completa del canale, con conseguente allagamento dei fabbricati limitrofi e danni alle attività ivi svolte.

Il tratto a cielo aperto a monte, è stato oggetto di intervento post evento 2017, con rimozione della vegetazione arborea ed arbustiva, ripristino dei dissesti e riprofilatura dell'alveo.

Con la modellazione idraulica sviluppata per lo stato attuale, si è pertanto fatta una valutazione degli effetti causati da eventi di piena eccezionali (eventi sintetici per assegnati tempi di ritorno e ricostruzione della

sollecitazione idrologica ingenerata dall'evento di pioggia eccezionale del 9-10 settembre 2017) ipotizzando il manufatto tombato completamente ostruito e valutando la propagazione dei volumi di piena sul territorio circostante. Il modello idraulico implementato risulta pertanto un modello bidimensionale che gli effetti attesi nelle aree allagate in termini di battenti, livelli e velocità di propagazione.

Come modello digitale del terreno è stato utilizzato il modello a maglia 4x4 metri utilizzato per la modellazione bidimensionale del Rio Maggiore. Gli input idrologico al modello sono gli idrogrammi stimati per il Fosso del Limoncino riportati al paragrafo 5.2.3.

Dall'analisi dei risultati, riportati in Appendice 3, si evidenzia che, date le forti acclività dei terreni, la propagazione dei deflussi sul territorio rimane confinata nell'intorno del corso d'acqua. I volumi di esondazione sono sostanzialmente volumi di transito che attraversano la Strada Provinciale e si riversano nel Rio Maggiore. I battenti massimi attesi rimangono inferiori ai 50 cm per tutti gli scenari idrologici simulati.

6.2 VERIFICHE IDRAULICHE STATO DI PROGETTO

Al fine di verificare l'efficacia degli interventi di progetto e valutarne gli effetti in termini di riduzione del rischio idraulico, è stata sviluppata una analisi idraulica approfondita dello stato di progetto che prevede l'implementazione di un modello idraulico accoppiato, monodimensionale in alveo e bidimensionale nelle aree contermini potenzialmente allagabili (di seguito **Modello Idraulico di PROGETTO**), che permetta di valutare il comportamento idraulico degli interventi di progetto proposti e gli effetti attesi nel territorio circostante, in occasione di eventi di piena eccezionali (eventi sintetici per assegnati tempi di ritorno e ricostruzione della sollecitazione idrologica ingenerata dall'evento di pioggia eccezionale del 9-10 settembre 2017).

6.2.1 Caratterizzazione topografica del corso d'acqua e delle aree di interesse

La configurazione geometrica di Progetto è stata ricostruita a partire dalla geometrizzazione del corso d'acqua e delle aree contermini sviluppata per lo scenario Stato Attuale.

Per una immediata individuazione, le sezioni fluviali variate rispetto allo Stato Attuale sono state codificate utilizzando come identificativo dell'anno di esecuzione del rilievo topografico (ultimi due caratteri del codice) il numero 18. Sono state inoltre introdotte nuove sezioni fluviali per la corretta definizione degli interventi di progetto.

Per un immediato riscontro e facilità di lettura, in Tabella 6-2 seguente sono riportate le sezioni fluviali in corrispondenza dei principali interventi previsti sul corso d'acqua allo Stato di Progetto, complete di codifica, distanza progressiva (calcolata da monte verso valle) e descrizione dell'opera, laddove presente.

Per la modellazione dei territori limitrofi, si è mutuato il modello digitale del terreno utilizzato per la modellazione idraulica Stato Attuale.

Nell'elaborato *D6 – Planimetria Modello idraulico Stato di Progetto* sono riportate le tracce di tutte le sezioni fluviali utilizzate, con relativa codifica alfanumerica, ed il modello digitale del terreno a maglia 4x4 metri utilizzato per la modellazione bidimensionale nelle aree contermini.

SEZIONI IDRAULICHE STATO DI PROGETTO					
Codice sezione	Distanza progressiva	Descrizione opere	Codice sezione	Distanza progressiva	Descrizione opere
00571PB18	920.11	PONTE SP VALLE BENEDET TA MONTE	00169_18	4950	SFIORO SICUREZZA CASSARM4
00571PC18	932.90		00140SB17	5226.08	
00543BB18	1211.5		00140SX17	5241.28	
00543BC18	1212.5		00140SC17	5258.89	
00541PB18	1218.54	PONTE SP VALLE BENEDET TA VALLE	00130_18	5341.97	
00541PC18	1230.90		00124_18	5393.84	
00540_18	1235.78		00120_18	5439.07	
00410_18	2538.34		00119BB18	5449.07	
00406_18	2579.92		00119BC18	5450.07	
00404_18	2603.8		00117PB18	5459.07	PONTE VIA ARDENZA
00401_18	2630.96		00117PC18	5471.07	
00397_18	2665.9		00116_18	5476.07	
00394_18	2702.8		00115_18	5486.07	
00390_18	2736.38		00109_18	5549.45	
00386_18	2784.65		00106_18	5576.54	
00384_18	2794.55	PONTE VIA ULIVETA	00105_18	5586.54	
00383_18	2806.83		00104PB18	5591.54	PONTE VIA CATTANEO
00352SB18	3116.63		00104PC18	5605.54	
00352SX18	3122.64	SFIORO SICUREZZA CASSARM2	00103_18	5610.54	
00352SC18	3130.41		00102_18	5620.54	
00343BB18	3216.8		00100_18	5641.56	
00343BC18	3217.8		00093_18	5706.64	
00342_18	3225.3		00084_18	5795.15	
00341_18	3235.74	PONTE VIA SALVANO	00075_18	5887.04	
00339_18	3247.61		00065_18	5967.21	
00338_18	3254.11		00064BB18	5981.93	
00294_18	3700		00064BC18	5982.93	
00289_18	3750		00063PB18	5991.87	PONTE VIA DEI PENSIERI
00284SA18	3791.92		00063PC18	6003.86	
00284SB18	3793.71	SFIORO SICUREZZA CASSARM3	00062_18	6008.86	
00284SX18	3800		00061_18	6018.86	
00284SC18	3813.45		00055_18	6080.16	
00284SD18	3814.94		00048_18	6150.24	
00281_18	3828.95		00047_18	6160.24	
00251PB18	4119.07	PONTE FERROVIA	00046PB18	6165.24	PONTE VIA RODOCANACCHI
00251PC18	4131.07		00046PC18	6177.23	
00244SB18	4185.75		00041_18	6225.31	
00244SX18	4200	SFIORO CASSARM3bis	00036_18	6274.64	
00244SC18	4217.81		00030_18	6330.58	
00239_18	4250		00028PB18	6347.48	PONTE VIA TOTI
00234_18	4300		00028PC18	6359.48	
00229_18	4353.76		00026_18	6372.1	
00224_18	4400		00017PB18	6384.73	TOMBAMENTO VIALE ITALIA
00219_18	4450		00017PX18	6486.72	
00214_18	4500		00017PC18	6486.72	
00213_18	4511.33		00010_18	6516.38	
00184SB18	4792.2	SFIORO SICUREZZA CASSARM3bis	00009_18	6526.38	
00184SX18	4800		00002PB18	6615.55	PONTE MARINA MILITARE
00184SC18	4819.48		00002PC18	6627.55	

TABELLA 6-2: CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA RIO MAGGIORE- CODIFICA SEZIONI IDRAULICHE OGGETTO DI INTERVENTI DI PROGETTO

6.2.2 Modello Idraulico di PROGETTO

Con la denominazione **Modello Idraulico di PROGETTO** si identifica la modellazione idraulica sviluppata per lo stato di progetto, per la valutazione del comportamento idraulico degli interventi di progetto proposti e degli effetti attesi sul territorio in caso di eventi di piena eccezionali (eventi sintetici per assegnati tempi di ritorno e ricostruzione della sollecitazione idrologica ingenerata dall'evento di pioggia eccezionale del 9-10 settembre 2017).

L'implementazione del modello è stata effettuata attraverso il Software MIKE del Danish Hydraulic Institute – DHI, certificato dalla F.E.M.A. (Federal Emergency Management Agency).

In particolare, è stata implementata una modellistica accoppiata, monodimensionale in alveo e bidimensionale per il territorio circostante, che permette di determinare battenti, livelli e velocità di propagazione in alveo e nelle aree allagate.

Il comportamento idraulico in alveo del reticolo idrografico di verifica è stato simulato attraverso un modello monodimensionale (modulo MIKE 11) con la schematizzazione geometrica delle sezioni fluviali ricostruita per lo stato di progetto. Le acque esondate e la loro propagazione sono state simulate con un modello bidimensionale (modulo MIKE21), a partire dal modello digitale del terreno a celle 4x4m, mutuato dal modello idraulico dello stato attuale.

Il modulo MIKE FLOOD permette l'accoppiamento dei due modelli in modo totalmente dinamico, garantendo la conservazione di massa e quantità di moto tra i diversi sistemi.

Per ulteriori dettagli si rimanda all'*Appendice 1 – Modellistica Idrologica Idraulica – Fondamenti Teorici*.

6.2.2.1 Verifiche Idrauliche implementate

Nello modello geometrico **Stato di Progetto** sono state inserite tutte le sezioni fluviali utilizzate per lo Stato Attuale modificando/aggiungendo quelle oggetto di intervento, e le seguenti strutture idrauliche:

- Ponti: le strutture degli attraversamenti presenti lungo il corso d'acqua sono state inserite nel modello monodimensionale MIKE11; i nuovi ponti e gli attraversamenti oggetto di rifacimento sono stati geometrizzati nella loro configurazione di progetto, sono stati eliminate le opere oggetto di demolizione senza ricostruzione;
- Casse di espansione: le soglie di sfioro delle casse di espansione sono state modellate inserendo nel modulo MIKE11 degli sfioratori laterali direttamente collegati al modello MIKE21, geometrizzati secondo la configurazione di progetto. Il tombasifone di collegamento tra il secondo modulo della cassa RM3bis e la cassa RM4 è stato rimosso. È stata infine inserita la struttura dell'opera di presa della cassa RM4. Il funzionamento idraulico delle paratoie mobili è stato ipotizzato ad apertura automatica al raggiungimento di quote del pelo libero in alveo di 12.20 m s.l.m.
- Collegamenti alveo-terreno: il trasferimento dei volumi d'esondazione dall'alveo alle aree allagate viene garantito con l'inserimento di soglie sfioranti, inserite nel modulo MIKE FLOOD, assimilabili a stramazzi in parete grossa, con funzionamento bidirezionale, in condizioni di deflusso libero oppure rigurgitato in funzione dei livelli a monte e a valle dello stramazzo.

Il funzionamento idraulico dello scolmatore di piena di progetto è descritto al paragrafo seguente.

A partire dall'analisi idrologica implementata e descritta al precedente paragrafo 5.2, è stato scelto di sollecitare il sistema idraulico di progetto con i seguenti 3 scenari idrologici:

- Eventi sintetici con TR=30 e 200 anni critici per il bacino del Rio Maggiore, ovvero con durata dell'evento di pioggia pari a 2 ore;
- Sollecitazione idrologica dell'evento reale del 09-10 settembre 2017.

Per ciascun scenario idrologico, le condizioni al contorno di monte, assegnate in testa al modello (sezione 00664__17), è stata assunta pari all'idrogramma delle portate attese calcolato alla sezione di calcolo denominata "Limoncino (monte affluente)". Sono stati inoltre inseriti i seguenti apporti idrologici:

- Idrogramma interbacino "Limoncino (valle affluente)": contributo puntuale alla sezione 00654__17;
- Idrogramma interbacino "Uliveta": contributo distribuito tra le sezioni 00650__17 e 00386__18;
- Idrogramma interbacino "Ferrovia": contributo distribuito tra le sezioni 00380__18 e 00255__17;
- Idrogramma interbacino "Cattaneo": contributo distribuito tra le sezioni 00250__17 e 00105__18.

La rappresentazione grafica degli idrogrammi utilizzati nelle verifiche idrauliche è riportata nell'elaborato *D.1.1 - Allegato 1 – Modello Idrologico*.

6.2.2.1.1 Funzionamento idraulico dello scolmatore di piena

Tra gli interventi di progetto individuati sul tratto terminale del Rio Maggiore, è prevista la realizzazione di uno scolmatore di piena, di dimensioni 3x2.5 m, con presa a monte del ponte su Via Rodocanacchi e restituzione nel tratto di canale aperto a valle della Barriera Regina Margherita in prossimità dello sbocco a mare, per la riduzione del carico idraulico sul tratto terminale del Rio Maggiore.

Il dimensionamento del canale scolmatore deriva da una analisi idraulica in moto uniforme, con le seguenti ipotesi progettuali:

- Portata massima smaltibile dal canale a bocca piena: 20 mc/s
- Lunghezza del tracciato: 450 m
- Pendenza della livelletta di fondo: $i=0.005$ m/m
- Scabrezza della condotta (Manning): 0.025

La valutazione degli effetti indotti dalla presenza del canale scolmatore, in termini di riduzione della portata di picco e dei livelli massimi attesi nel tratto terminale del Rio Maggiore a valle dell'opera di presa del canale, è stata compiuta ricostruendo la scala di deflusso per tutte le sezioni ricomprese tra le opere di presa e restituzione dello scolmatore (cod. da 00048__18 a 00010__18) e stimandone i livelli attesi nell'ipotesi di poter decurtare i valori di picco di portata risultanti dal modello idraulico di 20 mc/s (portata massima smaltibile dal canale a bocca piena). Le analisi svolte sono esemplificate in figura seguente, in cui è riportata a titolo di esempio la scala di deflusso calcolata per la sezione 00036__18.

Sono stati invece trascurati gli effetti indotti dalla presenza del canale scolmatore sulle sezioni a monte dell'opera di presa del canale.

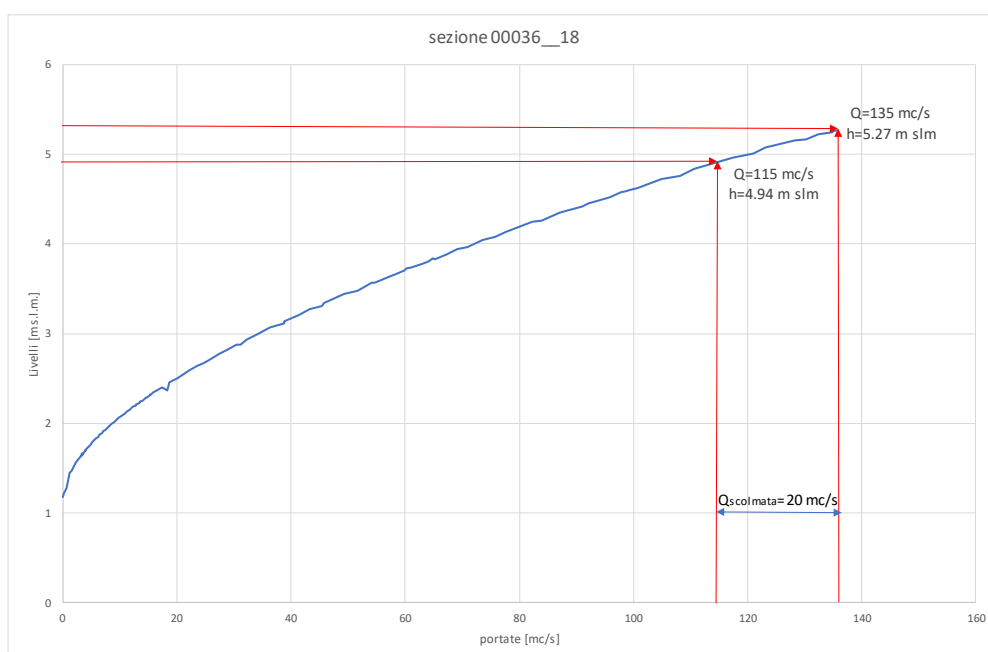


FIGURA 6-7: FUNZIONAMENTO IDRAULICO DEL CANALE SCOLMATORE – SCALA DI DEFLUSSO SEZIONE 00036__18

I risultati discussi nel paragrafo seguente e riportati nei tabulati delle verifiche idrauliche (rif. elaborato D1.2 – *Allegato 2 – Risultati Modello idraulico*) e negli elaborati grafici prodotti a supporto delle verifiche idrauliche (rif. elaborato D8 – *Libretto delle Sezioni e Profilo Longitudinale con livelli idrometrici stato di Progetto*) tengono conto del contributo del canale scolmatore, per cui le portate di picco ed i livelli idrometrici massimi riportati per le sezioni poste a valle dell'opera di presa del canale, sono quelli stimati come appena descritto.

6.2.2.2 Risultati

L'implementazione del **Modello Idraulico di PROGETTO** sopra descritto, ha permesso la valutazione del comportamento idraulico della soluzione progettuale proposta e la stima della riduzione del rischio idraulico indotta dagli interventi di progetto sul territorio in termini di:

- Riduzione delle aree allagabili in occasione di eventi di piena eccezionali;
- Riduzione del carico idraulico sulle infrastrutture e strutture idrauliche;
- Incremento dell'efficienza idraulica del corso d'acqua ed ottimizzazione della capacità laminativa delle opere di difesa idraulica esistenti (casce di espansione).

Le verifiche implementate sullo Stato di Progetto mostrano il sostanziale superamento di gran parte delle criticità ingenerate dal Rio Maggiore sul territorio circostante. Per eventi sintetici con $TR \leq 200$ anni il corso d'acqua riesce a contenere in alveo l'intero idrogramma di piena, mentre le aree soggette ad esondazione per eventi simili all'evento del settembre 2017 rimangono marginali e con battenti massimi attesi molto ridotti rispetto allo stato attuale.

Le condizioni di allagabilità del territorio sono evidenziate nelle Planimetrie delle Aree Allagate Stato di Progetto (Tavole D9.1, D9.2, D.9.3). Nelle Tavole D7.1, D7.2, D.7.3 sono inoltre riportati i battenti massimi attesi per tutti gli scenari idrologici simulati.

La capacità di smaltimento del Rio Maggiore risulta fortemente incrementata dal rifacimento dei ponti e soprattutto dal completo stombamento del tratto terminale.

I livelli idrometrici massimi attesi in ciascuna sezione fluviale ed i profili longitudinali del corso d'acqua sono riportati nella Tavola D8.

Dall'analisi dei risultati del modello si evince quanto segue:

- nel tratto di monte, dalla località Limoncino fino al ponte di Via Uliveta (tratti 13-12-11), il Rio Maggiore risulta incassato e non presenta problematiche evidenti già allo stato attuale. Allo stato di progetto, il rifacimento dei due ponti presenti lungo la Strada Provinciale n. 5 Valle Benedetta eliminano gli effetti di rigurgito provocati dalle strutture attuali garantendo il regolare deflusso delle portate di piena.

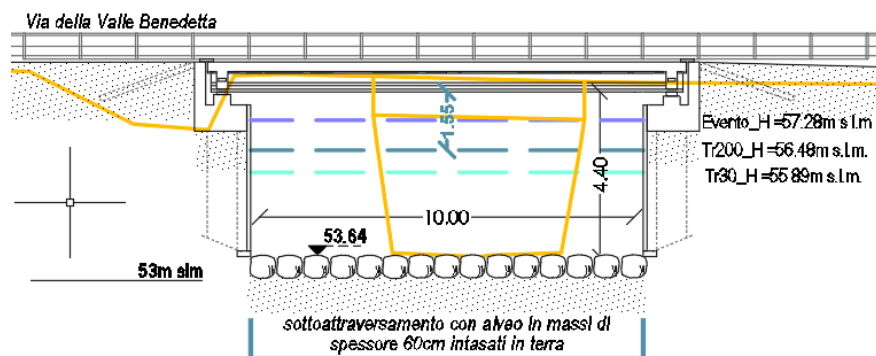


FIGURA 6-8: RISULTATI MODELLO IDRAULICO DI PROGETTO – PONTE S.P. VALLE BENEDETTA MONTE

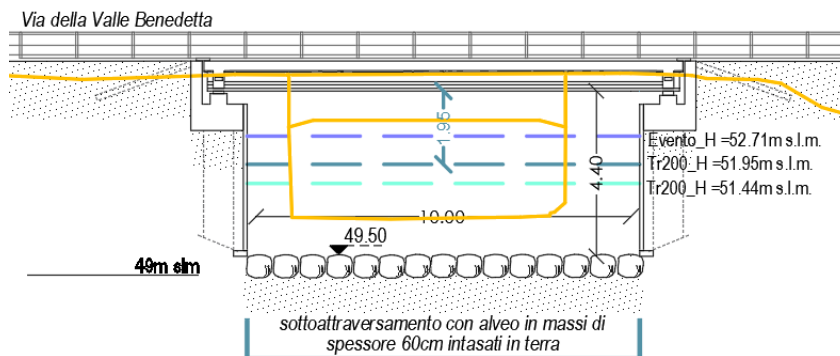


FIGURA 6-9: RISULTATI MODELLO IDRAULICO DI PROGETTO – PONTE S.P. VALLE BENEDETTA VALLE

- 2) Nel tratto in prossimità del ponte di Via Uliveta (tratto 10), il rifacimento del ponte, la realizzazione di opere di contenimento idraulico a monte dell'attraversamento e il prolungamento del muro in destra idraulica a valle garantiscono il sostanziale superamento delle criticità idrauliche evidenziate nello stato attuale. Il nuovo ponte garantisce il deflusso delle portate di piena per tutti gli scenari idrologici simulati.

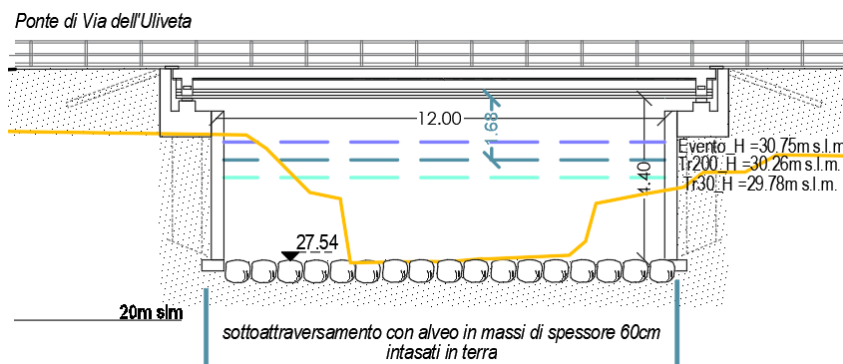


FIGURA 6-10: RISULTATI MODELLO IDRAULICO DI PROGETTO – PONTE VIA ULIVETA

- 3) Nel tratto 9, il rifacimento del ponte di Via di Salviano, la demolizione senza ricostruzione del ponte di Via dei Pelaghi e la realizzazione dell'arginatura sul lato opposto alla cassa RM3 permettono il superamento dei rigurgiti indotti dalle strutture attuali ed il contenimento in alveo delle portate di piena su tutti gli scenari idrologici di verifica. Il nuovo ponte di Via Impastato garantisce il regolare deflusso delle portate di piena, pur non garantendo un franco di sicurezza sullo scenario duecentennale adeguato alla normativa vigente

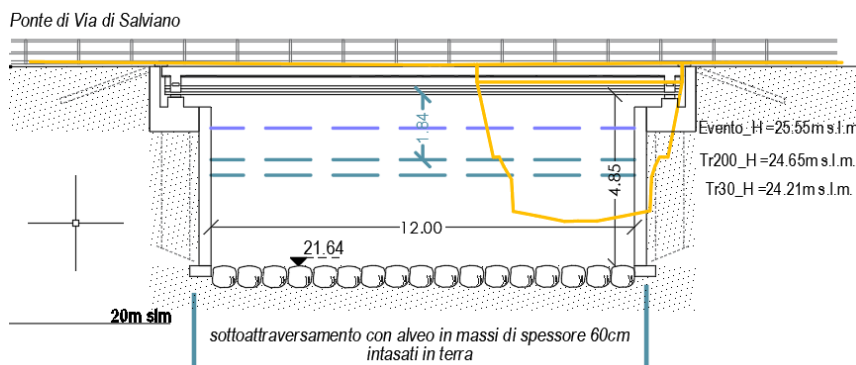


FIGURA 6-11: RISULTATI MODELLO IDRAULICO DI PROGETTO – PONTE VIA DI SALVIANO

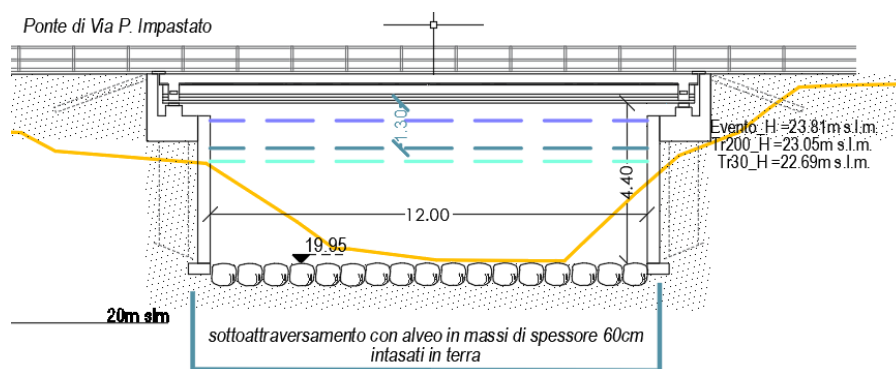


FIGURA 6-12: RISULTATI MODELLO IDRAULICO DI PROGETTO – NUOVO PONTE VIA IMPASTATO

- 4) Nel tratto 8, l'adeguamento della sezione idraulica in corrispondenza del rilevato ferroviario e la realizzazione dell'arginatura sul lato opposto al modulo di monte della cassa RM3bis, garantiscono il sostanziale superamento delle maggiori criticità idrauliche evidenziate nello stato attuale. Permangono problemi di insufficienza idraulica nelle sezioni fluviali tra la S.S. Aurelia ed il rilevato ferroviario, che in tale tratto non risultano arginate, per cui sono causa di esondazioni, che rimangono comunque modeste e confinate in aree in cui non risultano presenti abitazioni e/o altri elementi sensibili, per cui non si è ritenuto necessario un intervento.

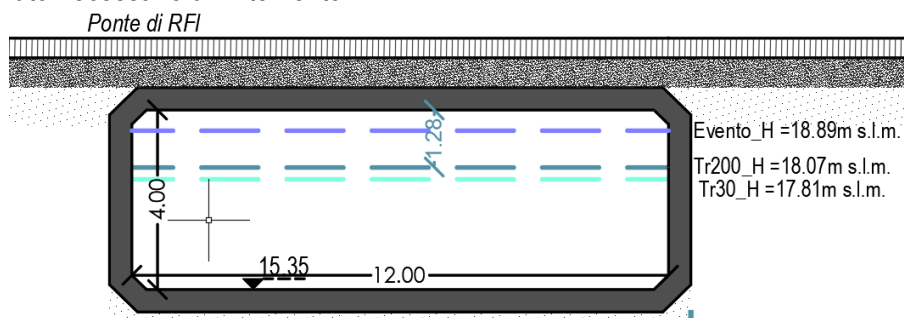


FIGURA 6-13: RISULTATI MODELLO IDRAULICO DI PROGETTO – PONTE FERROVIA

- 5) Nel tratto 7 è previsto l'adeguamento della sezione idraulica e del rifacimento del ponte di Via dell'Ardenza. Tali interventi garantiscono il sostanziale superamento delle problematiche idrauliche attuali.

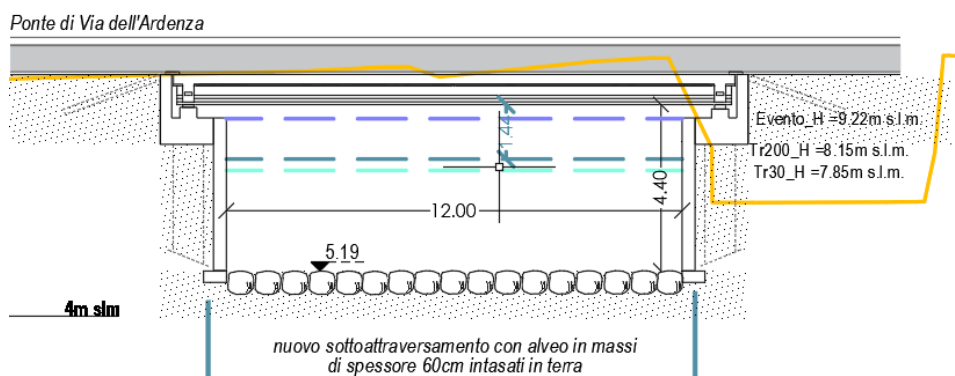


FIGURA 6-14: RISULTATI MODELLO IDRAULICO DI PROGETTO – PONTE VIA DELL'ARDENZA

- 6) Per il tratto attualmente tombato, da Via Cattaneo allo sbocco a mare, è previsto di riportare a cielo aperto il canale. La sezione idraulica di progetto ha geometria variabile, che gradualmente passa da

una conformazione più naturale inserita in un contesto di parco ad alla forma più compatta e tipicamente urbana di una canale rettangolare in c.a. La riconfigurazione di tutto il tratto porta ad un sostanziale miglioramento dell'officiosità idraulica del corso d'acqua che riesce a contenere in alveo tutto l'idrogramma di piena per gli eventi estremi simulati.

La presenza del canale scolmatore garantisce un ulteriore riduzione del carico idraulico sulle strutture idrauliche dei tratti 2 e 3.

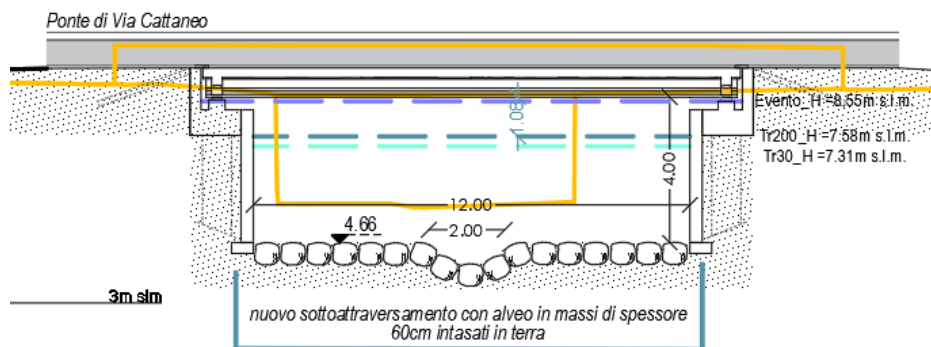


FIGURA 6-15: RISULTATI MODELLO IDRAULICO DI PROGETTO – PONTE VIA CATTANEO

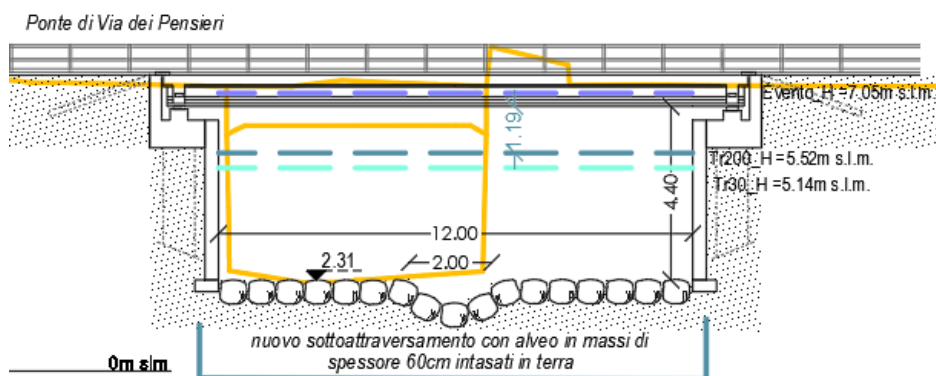


FIGURA 6-16: RISULTATI MODELLO IDRAULICO DI PROGETTO – PONTE VIA DEI PENSIERI

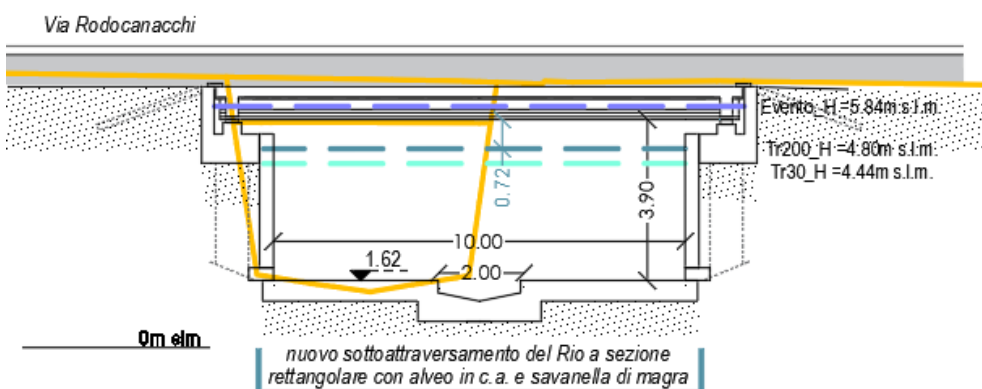


FIGURA 6-17: RISULTATI MODELLO IDRAULICO DI PROGETTO – PONTE VIA RODOCANACCHI

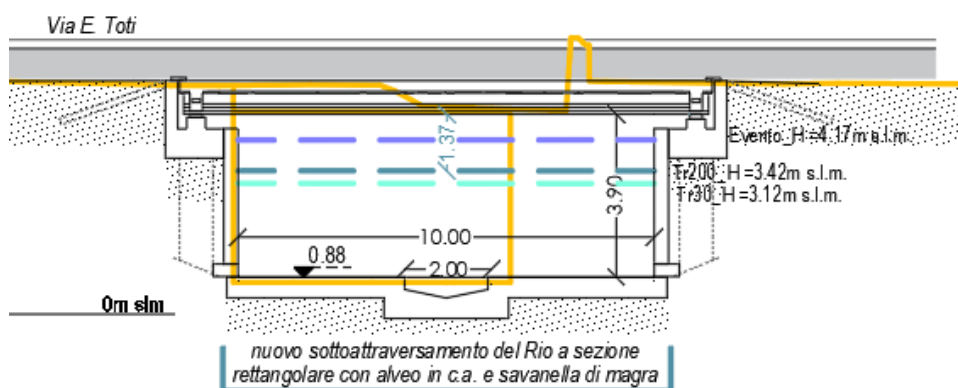


FIGURA 6-18: RISULTATI MODELLO IDRAULICO DI PROGETTO – PONTE VIA TOTI

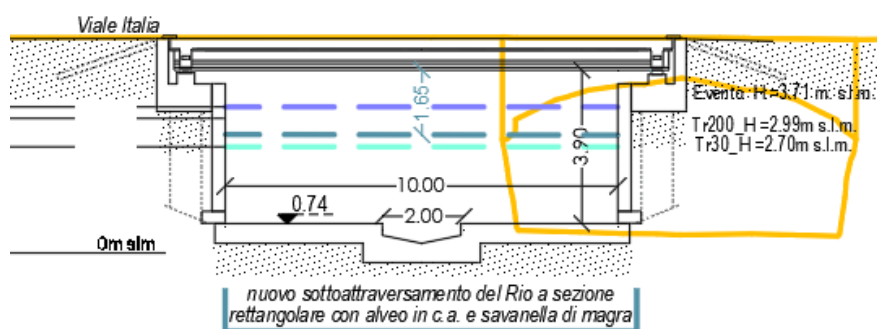


FIGURA 6-19: RISULTATI MODELLO IDRAULICO DI PROGETTO – ATTRAVERSAMENTO VIALE ITALIA

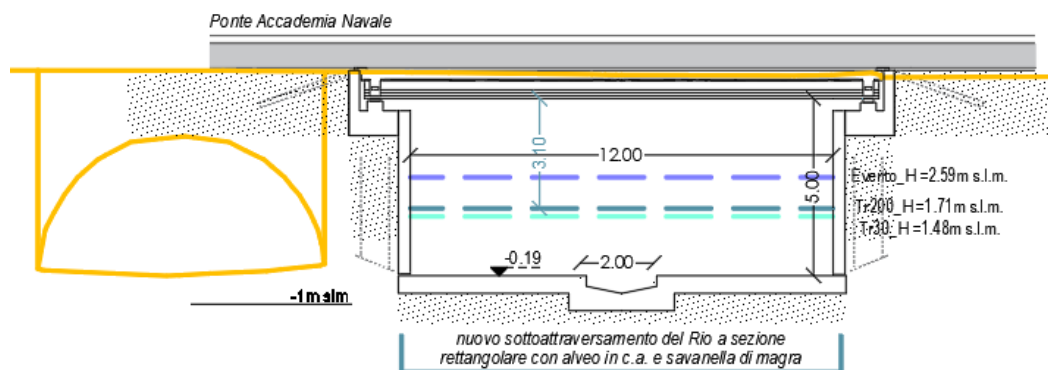


FIGURA 6-20: RISULTATI MODELLO IDRAULICO DI PROGETTO – PONTE ACCADEMIA NAVALE

L'ottimizzazione del funzionamento delle casse di espansione esistenti, attuato mediante il sovrizzo degli sfioratori di sicurezza e la realizzazione di un'opera di sfioro a paratoie mobili per alimentare la cassa RM4, in luogo del tombasifone di collegamento con la cassa RM3bis, ha permesso un sostanziale aumento della capacità laminativa delle casse di espansione.

Per l'evento duecentennale i risultati ottenuti sono sintetizzati in tabella e figura seguenti, in cui si legge che complessivamente il sistema di casse riesce a laminare circa 130000 mc, con un abbassamento del picco di portata da $Q=88$ mc/s a monte della cassa RM2 a $Q=76$ mc/s a valle della cassa RM4.

Descrizione	progressiva	sezione	Q200 alveo	Q200 sfioro
SFIORE CASSARM2	2868.43	00377SX17	88.3	12.55
SICUREZZA CASSARM2	3122.64	00352SX17	77.8	0.00
SFIORE CASSARM3	3537.07	00310SX17	80.9	10.39
SICUREZZA CASSARM3	3800.00	00284SX17	72.8	0.00
SFIORE CASSARM3bis	4200.00	00244SX17	76.4	6.17
SICUREZZA CASSARM3bis	4800.00	00184SX17	74.7	0.00
SFIORE CASSARM4	4950.00	00169__17	81.8	15.60
SICUREZZA CASSARM4	5241.28	00140SX17	75.7	0.00

Descrizione	Hmax	Battente max	Superficie	Volumi [mc]
CASSARM2	29.52	2.42	15712	38023
CASSARM3	22.68	2.25	18048	40608
CASSARM3bis	16.33	1.48	12624	18635
CASSARM4	12.19	1.84	16832	30971

totale 128237

TABELLA 6-3: RISULTATI MODELLO IDRAULICO DI PROGETTO – FUNZIONAMENTO SFIORATORI CASSE DI ESPANSIONE –
EVENTO TR=200 ANNI

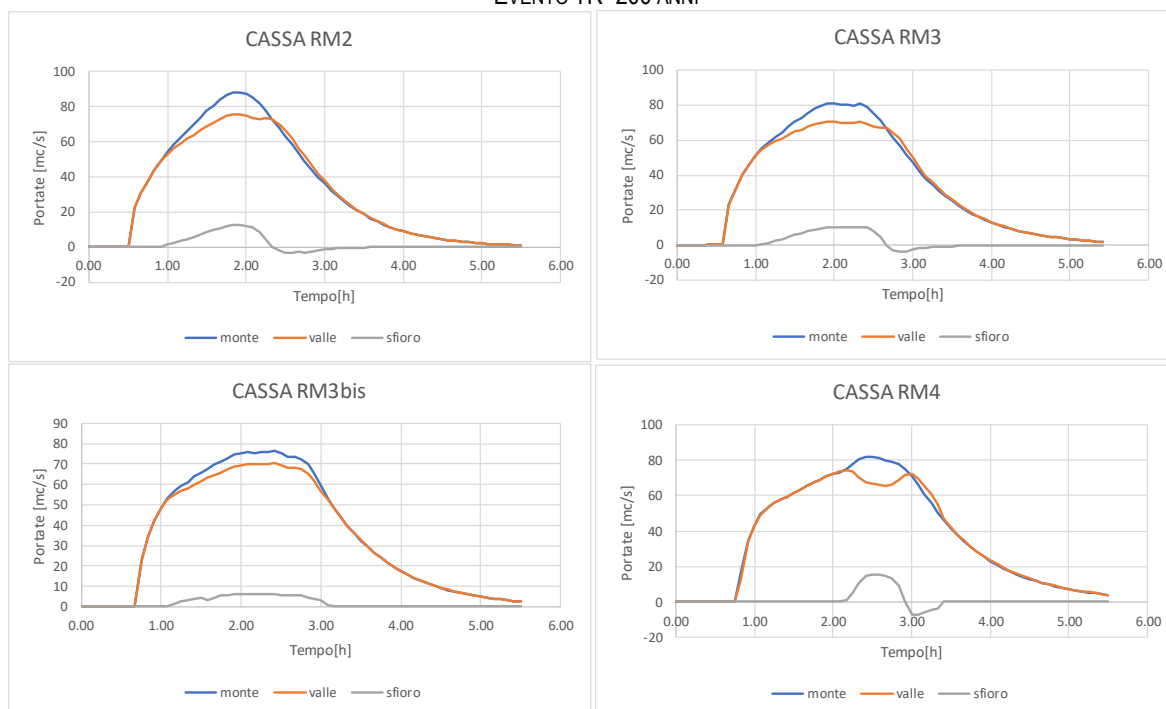


FIGURA 6-21: RISULTATI MODELLO IDRAULICO DI PROGETTO – IDROGRAMMI SFIORATORI CASSE DI ESPANSIONE –
EVENTO TR=200 ANNI

Per gli eventi più intensi, simil evento del settembre 2017, le casse superano i livelli di massimo invaso di progetto (le casse sono state dimensionate per eventi duecentennali) e pertanto entrano in funzione gli sfioratori di sicurezza, riversando in alveo i volumi in eccesso, per cui gli effetti laminativi degli invasi risultano meno efficaci.

Descrizione	progressiva	sezione	QEV alveo	QEV sfioro
SFIORO CASSA RM2	2868.43	00377SX17	120.7	22.12
SICUREZZA CASSA RM2	3122.64	00352SX17	122.0	-13.85
SFIORO CASSA RM3	3537.07	00310SX17	136.9	28.02
SICUREZZA CASSA RM3	3800.00	00284SX17	115.9	-10.11
SFIORO CASSA RM3bis	4200.00	00244SX17	140.0	20.92
SICUREZZA CASSA RM3bis	4800.00	00184SX17	118.3	-16.42
SFIORO CASSA RM4	4950.00	00169_17	135.6	32.60
SICUREZZA CASSA RM4	5241.28	00140SX17	136.7	0.00

Descrizione	Hmax	Battente max	Superficie	Volumi [mc]
CASSA RM2	30.13	2.90	16352	47421
CASSA RM3	23.42	2.85	18896	53854
CASSA RM3bis	16.70	1.75	13376	23408
CASSA RM4	13.22	2.71	18064	48953
totale			173636	

TABELLA 6-4: RISULTATI MODELLO IDRAULICO DI PROGETTO – FUNZIONAMENTO SFIORATORI CASSE DI ESPANSIONE –
EVENTO SETTEMBRE 2017

6.2.3 Modello Idraulico Stato di Progetto Fosso Limoncino

A supporto dell'intervento di progetto sul Fosso del Limoncino, che prevede lo stombamento e la deviazione del tratto terminale, è stata condotta una analisi idraulica in moto uniforme per la verifica del dimensionamento della nuova sezione idraulica.

Il progetto prevede la realizzazione di una nuova canalizzazione a cielo aperto a sezione rettangolare in c.a. di dimensioni 2.0x1.5 m. Il sottoattraversamento della Strada Provinciale n.5 Valle Benedetta sarà realizzato mediante posa di scatolare in c.a. a sezione rettangolare di dimensioni 2.0x2.5 m.

Le verifiche svolte hanno tenuto conto delle seguenti ipotesi progettuali:

- Portata massima smaltibile: 6.3 mc/s (portata critica per TR=200 anni)
- Pendenza della livelletta di fondo: $i=0.02$ m/m
- Scabrezza (Manning): 0.028
- Dimensioni sezione aperta: 2x1.5 m
- Dimensioni scatolare: 2x2.5 m

Dall'analisi di moto uniforme si stima un battente idraulico massimo atteso di circa **1.0 m**, per cui la geometria di progetto risulta verificata con franchi di sicurezza pari a 0.5 m nel tratto di canale aperto e di 1.5 m nello scatolare.

6.2.4 Modello Idraulico STRALCIO FUNZIONALE 1B

Al fine di valutare l'efficacia degli interventi previsti nello Stralcio Funzionale 1B, in termini di riduzione del rischio idraulico, il Modello Idraulico Flood, sviluppato per le verifiche idrauliche dello Stato Attuale, è stato cimentato sulla geometria di Progetto Stralcio 1B, che prevede lo stombamento del Tratto 4 (zona Stadio) del Rio Maggiore.

Il modello permette la valutazione degli effetti indotti in alveo e nel territorio circostante da eventi di piena eccezionali (eventi sintetici per TR=30 e 200 anni e sollecitazione idrologica dell'evento del 9-10 settembre

2017) mediante modellistica accoppiata, monodimensionale in alveo e bidimensionale per il territorio circostante, e permette di determinare battenti, livelli e velocità di propagazione in alveo e nelle aree allagate.

I risultanti del modello sono riportati nelle Tavole D10.1, D10.2 e D10.3, in cui si leggono i battenti massimi attesi nelle aree allagate per ogni scenario idrologico simulato.

Dal confronto con le planimetrie dei battenti dello Stato Attuale (Tavole D3.1-D.3.7), è evidente una riduzione delle aree di esondazione e dei battenti massimi attesi sulle aree urbane a valle dell'intervento.

A seguito dell'apertura del Tratto 4, infatti, tutto il tratto tombato terminale vede aumentata la sua capacità di smaltimento da circa 40 mc/s (stato attuale) ad 80 mc/s (stato di progetto Stralcio 1B), come si evince dai tabulati dei risultati idraulici riportati nell'elaborato *D1.2 – allegato 2 – Risultati Modello Idraulico*.

APPENDICE 1 – MODELLISTICA IDROLOGICA IDRAULICA - Fondamenti Teorici

MODELLISTICA IDROLOGICA

MODELLO DI INFILTRAZIONE - METODO DELL'INFILTRAZIONE A SOGLIA

La modellistica idrologica per la determinazione dell'idrogramma di piena in una o più sezioni fluviali di un bacino idrografico deve significativamente rappresentare tutte le fasi che si hanno a partire dalla distribuzione delle piogge insistenti sul bacino, fino alla valutazione dell'onda di piena.

La trasformazione da pioggia al suolo a portata nella sezione di chiusura avviene secondo una cascata di processi. L'ingresso principale al modello è costituito da una serie di misurazioni di pioggia, di tipo puntuale (registrazioni pluviometriche) sull'area d'interesse, che dovranno essere, in generale, interpolate per ottenere l'andamento delle precipitazioni lorde al suolo nello spazio e nel tempo, in termini di afflussi per unità di area. La quota parte di tali precipitazioni che andrà in scorrimento superficiale, detta anche precipitazione efficace (netta), viene valutata con un opportuno *modello di trasformazione afflussi-deflussi*, per la stima della produzione di deflusso idealmente in ciascun punto del bacino, avente le dimensioni di una portata per unità di area. Infine, il processo di concentrazione dei deflussi nel reticolo idrografico e di trasferimento lungo questo fino alla sezione di chiusura verrà rappresentato tramite un opportuno *modello di formazione dell'onda di piena*.

La metodologia alla base degli studi effettuati mira ad un'agevole caratterizzazione degli eventi in termini di tempi di ritorno; conseguenza diretta, la possibilità di definire i livelli di rischio in funzione della probabilità di accadimento. Ciò si ottiene facilmente attraverso una procedura semplificata di generazione di eventi sintetici, che si basa sulle seguenti ipotesi:

- eventi meteorici sintetici uniformemente distribuiti sul bacino;
- isofrequenza fra evento meteorico e portata in alveo (Tr evento di pioggia = Tr idrogramma di piena).

La determinazione degli idrogrammi di piena non può prescindere dai parametri, ormai generalmente utilizzati e condivisi, della procedura di *Regionalizzazione delle Portate di Piena della Regione Toscana*. Tale procedura parte dalla teoria dell'*Idrogramma Istantaneo Unitario* (*Instantaneous Unit Hydrograph, IUH*), dove i parametri in gioco sono stati ricavati dalle caratteristiche geomorfologiche del bacino, ottenendo così un *Idrogramma Istantaneo Unitario Geomorfologico* di cui vengono riportate di seguito le linee principali. Il modello di formazione dell'onda di piena adottato è quello proposto da Nash.

L'input meteorico è rappresentato da uno "*ietogramma sintetico ad intensità costante*" con il quale si assume che l'intensità di precipitazione sia costante durante l'intera evoluzione del fenomeno e pari al valor medio fornito dalle curve di possibilità climatica (o pluviometrica, di seguito *CPP*) illustrate in seguito. Tale ietogramma consente la determinazione della portata al colmo di assegnato tempo di ritorno sulla base del metodo dell'*evento critico*, individuando la durata di pioggia efficace che massimizza il valore al colmo dell'onda di piena fornita dal modello di trasformazione afflussi - deflussi.

Le CPP consentono di rappresentare il regime delle piogge di breve durata e forte intensità in una certa zona. Per la loro determinazione è necessaria un'analisi delle serie pluviometriche disponibili dalla rete di telemisura presente sul territorio a partire dall'esame dei topoi, o poligoni di Thiessen. Dall'analisi statistica delle precipitazioni estreme, in adattamento alla distribuzione TCEV, si perviene appunto alla determinazione delle CPP, che stabiliscono un legame tra le altezze di pioggia e la durata dell'evento piovoso, in funzione della probabilità di accadimento dell'evento stesso.

Il valore della pioggia lorda deve essere depurato delle perdite. La trasformazione afflussi-deflussi adottata prevede l'adozione di un "approccio asintotico a soglia" che richiede la stima di due parametri: la *perdita iniziale*, schematizzata introducendo un *volume unitario di perdita iniziale* (indicato con I_a), che il terreno assorbe completamente durante i primi istanti di precipitazione (dall'inizio dell'evento $t=0$ all'istante $t=t_a$), e la

perdita per infiltrazione nel suolo durante l'evento, schematizzata con una *infiltrazione cumulata costante a saturazione* (indicata con K_s).

$$\begin{cases} I_a(t) = I_a(0) + \int_0^{t_a} (P(\tau) - K_s) d\tau \\ P_n(t) = 0 \end{cases} \quad \text{per } t < t_a$$

$$\begin{cases} I_a(t) = I_a \\ P_n(t) = P(t) - K_s \end{cases} \quad \text{per } t \geq t_a$$

dove:

$P(t)$ intensità di precipitazione lorda sul bacino [mm/h];

$P_n(t)$ intensità di precipitazione netta sul bacino [mm/h];

$I_a(t)$ volume unitario di perdita iniziale all'istante t dell'evento [mm];

$I_a = I_a(t_a)$ volume di perdita iniziale per unità di area [mm];

K_s velocità di infiltrazione a saturazione [mm/h].

I valori di I_a e K_s , nel lavoro di regionalizzazione, sono calcolati in funzione dell'uso del suolo e dalla geologia dei bacini, resi indipendenti dalle dimensioni del bacino idrografico.

Osservando sperimentalmente le piogge intense è possibile affermare che, all'interno di una certa area, l'intensità di precipitazione durante l'evento piovoso varia da punto a punto, anche in maniera sensibile, e questa variazione è tanto maggiore quanto maggiore è l'estensione dell'area considerata. Per questo alla precipitazione lorda, calcolata rispetto alla sezione di calcolo, è stato applicato un coefficiente di ragguaglio dipendente dall'area del bacino e dalla durata dell'evento, in linea con la trattazione riportata nella Regionalizzazione delle Portate di Piena della Regione Toscana, secondo la seguente formulazione:

$$K_r = 1 - \exp(-\alpha t^\beta) + \exp(-\alpha t^\beta - \gamma A)$$

dove t è la durata dell'evento, A è l'area del bacino sotteso e α , β , γ sono parametri dipendenti dal bacino considerato.

MODELLO DI FORMAZIONE DELL'ONDA DI PIENA - MODELLO DI NASH E GIUH

L'*Idrogramma Istantaneo Unitario* (IUH) rappresenta l'idrogramma di piena causato da un evento impulsivo di pioggia di volume unitario e durata tendente a zero. Ipotizzando un comportamento del sistema bacino idrografico lineare e stazionario, la risposta $Q(t)$ ad una sollecitazione meteorica di intensità $p(t)$, supposta costante su tutti i punti del bacino (approccio di tipo integrato), è data dall'integrale di convoluzione fra idetogramma di pioggia efficace e IUH:

$$Q(t) = \int_0^t U(\tau) p(t - \tau) d\tau$$

dove:

$Q(t)$ è la portata defluente;

$p(t) = A i(t)$, con A area del bacino e $i(t)$ intensità di pioggia netta ragguagliata sul bacino;

$U(t)$ è l'idrogramma unitario

$$\begin{cases} U(0) = 1 \\ U(t > 0) = 0 \end{cases} \quad \int_0^\infty U(t) dt = 1$$

La caratterizzazione di un modello di formazione della piena basato su tale principio consiste quindi essenzialmente nella determinazione della forma della funzione $U(t)$, che può essere stimata fissandone la struttura sulla base di considerazioni teoriche, e stimandone i parametri o per taratura, utilizzando dati sperimentali contemporanei di afflussi sul bacino e deflussi nella sezione di chiusura, o sulla base di caratteristiche geomorfologiche del bacino. Uno dei più diffusi modelli concettuali utilizzati per determinare la

forma della funzione $U(t)$ è quello basato sull'ipotesi che il bacino idrografico si comporti come un insieme di n serbatoi lineari disposti in serie. L'espressione dell'idrogramma istantaneo unitario che ne deriva per un singolo serbatoio lineare è:

$$U(t) = \frac{1}{k} \cdot e^{-\frac{t}{k}}$$

dove k è la costante del serbatoio che rappresenta il tempo caratteristico di svuotamento del serbatoio.

Supponendo che il bacino si comporti come una serie di n serbatoi, ciascuno con uguale tempo caratteristico k , la portata in uscita dall'intero bacino come risposta ad un input impulsivo distribuito sul bacino rappresenterà l'idrogramma istantaneo unitario del bacino alla sua chiusura, nota come *Idrogramma Istantaneo Unitario di Nash*:

$$U(t) = \frac{1}{k\Gamma(n)} \left(\frac{t}{k}\right)^{(n-1)} e^{-\left(\frac{t}{k}\right)}$$

dove la funzione $\Gamma(n)=(n-1)!$.

Il momento di primo ordine dell'IUH rispetto all'origine viene detto *tempo di ritardo (lag) Tl* ed è dato da:

$$Tl = \int_0^{\infty} U(t)tdt$$

In questo schema il tempo di ritardo è dato dal prodotto nk (pari proprio alla media dell'idrogramma unitario). I parametri n, k dell'IUH di Nash sono stati ricavati sulla base delle caratteristiche geomorfologiche del reticolo idrografico, mediante le seguenti espressioni:

$$n = 3.29(Rb/Ra)^{0.78} Rl^{0.07}$$

$$k = 0.7(Ra/(Rb \cdot Rl))^{0.48} Lc/v$$

in unità congruenti, dove:

R_b = rapporto di biforcazione;

R_l = rapporto di lunghezza;

R_a = rapporto di area;

L_c = lunghezza del canale principale (dalla sorgente alla sezione di interesse);

v = fattore cinematico legato alla velocità della piena ("media spazio-temporale di scorrimento dell'acqua o di propagazione dell'onda di piena").

I parametri geomorfologici sopra elencati permettono di rappresentare lo sviluppo della rete idrografica mediante una descrizione gerarchica e possono quindi essere calcolati, una volta ordinato il reticolo idrografico secondo il metodo di gerarchizzazione e classificazione geomorfologica di Horton e Strahler.

La gerarchizzazione di una rete idrografica si esegue attribuendo un ordine a ciascun segmento fluviale; un'asta che non nasce dalla confluenza di altre due è di primo ordine; un'asta di ordine n e un'asta di ordine $n-1$ congiungendosi danno origine a un'asta di ordine n ; due aste di ordine n congiungendosi danno origine a un'asta di ordine $n+1$. Per ogni bacino idrografico esiste una relazione fra il numero dei rami fluviali aventi un certo ordine e l'ordine stesso: in genere, il valore del primo diminuisce all'aumentare del secondo.

L'organizzazione della rete idrografica e quindi il suo grado di gerarchizzazione possono essere espressi mediante parametri quantitativi che definiscono la geometria del reticolo idrografico e il suo grado di organizzazione gerarchica. Il parametro di base è il rapporto di biforcazione R_b , che esprime il rapporto fra il numero di segmenti fluviali di un certo ordine ed il numero dei segmenti dell'ordine immediatamente successivo. Considerando invece la lunghezza media delle aste di un certo ordine si ottiene il rapporto fra le lunghezze, R_l . Analogamente, si definisce anche il rapporto fra le aree, R_a .

I tre parametri appena descritti vengono determinati sulla base delle seguenti relazioni:

$$N_u = R_b^{\omega-u}$$

$$\bar{L}_u = \bar{L}_1 R_l^{u-1}$$

$$\bar{A}_u = \bar{A}_1 R_a^{u-1}$$

dove

ω è l'ordine massimo del reticolo;

N_u il numero delle aste di ordine u , con $u=1, 2, 3\dots$;

\overline{L}_u la lunghezza media delle aste di ordine u , con $u=1, 2, 3\dots$;

\overline{A}_u l'area media sottesa da aste di ordine u , con $u=1, 2, 3\dots$

Lo studio di Regionalizzazione delle Portate di Piena, attraverso la taratura sistematica dei dati relativi ad eventi registrati nei 42 bacini strumentati dal Servizio Idrografico, ha fornito una relazione fra i valori di Tl ed i parametri geomorfologici:

$$Tl = 0.42 \left(\frac{Rb}{Ra} \right)^{0.3} Rl^{-0.41} \frac{Lmc}{A^{0.075}} \quad [h]$$

dove A è l'area del bacino espressa in $[kmq]$ e L_{mc} la lunghezza del reticolo in $[km]$, calcolata come cumulata delle lunghezze medie per i vari ordini gerarchici.

MODELLISTICA IDRAULICA

MODELLISTICA MONODIMENSIONALE MIKE 11

MIKE 11 è un software in grado di simulare il flusso monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. Sviluppato a partire dagli anni '70 dal DHI (Danish Hydraulic Institute), rappresenta lo stato dell'arte nella modellistica matematica in ambito fluviale e riferimento nell'ambito della modellistica idrodinamica monodimensionale.

Caratteristiche del codice sono la velocità di calcolo e l'efficienza del robusto motore di simulazione idrodinamica (risolve le equazioni complete del De St.Venant), la struttura logica e sequenziale per l'inserimento e gestione dei dati di input (geometrie, serie storiche ecc.) ed i molteplici strumenti di interpretazione e visualizzazione dei risultati, in grado di garantire un'ottima rappresentazione degli studi condotti (rappresentazione di sezioni, profili, piani quotati, anche in ambiente GIS).

Modulo Idrodinamico (HD)

Il modulo idrodinamico HD rappresenta il cuore del codice di calcolo MIKE 11 ed è in grado di simulare il flusso idrico monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. Attraverso l'utilizzo di HD è possibile simulare:

- portate laterali;
- condizioni di corrente veloce o lenta;
- flusso libero o rigurgitato in corrispondenza di sfioratori;
- differenti regole operative di funzionamento di serbatoi o invasi;
- resistenze localizzate e perdite di carico concentrate;
- casse d'espansione;
- condizioni di flusso quasi - bidimensionale sulle pianure alluvionali;
- azione del vento;
- nodi idraulici (biforcazioni e confluenze).

L'adozione del programma di simulazione MIKE 11 consente la soluzione del problema idrodinamico di moto vario con uno schema di soluzione numerica molto efficiente, che limita i tempi di calcolo consentendo una adeguata rappresentazione dell'evolversi temporale dei transitori idraulici legati al passaggio dell'onda di piena.

Descrizione delle Condizioni di Moto Simulate

Il modello consente di attivare tre diverse descrizioni del moto, mediante tre differenti formulazioni matematiche:

- Approccio dell'"onda cinematica". Le condizioni di moto sono calcolate imponendo il bilancio tra le forze di gravità e di attrito. Questa semplificazione non permette di simulare gli effetti di rigurgito.
- Approccio dell'"onda diffusiva". Oltre alle forze di gravità ed attrito viene tenuto conto del gradiente idrostatico in modo tale da poter valutare anche gli effetti a monte delle condizioni al contorno di valle e quindi simulare i fenomeni di rigurgito.
- Approccio dell'"onda dinamica". Utilizzando le equazioni complete del moto, comprese le forze di accelerazione, è possibile simulare con questa formulazione transitori veloci, flussi di marea ecc.

In funzione del tipo di problema da risolvere è possibile scegliere la descrizione del moto più appropriata. Ognuna delle tre formulazioni consente di simulare sia sistemi idrici ramificati che reti idrauliche con maglie chiuse.

Equazioni generali di De Saint Venant

MIKE 11, risolve le equazioni di conservazione del volume e della quantità di moto (equazioni di De Saint Venant) che sono derivate sulla base delle seguenti assunzioni:

- il fluido (acqua) è incomprimibile ed omogeneo, cioè senza significativa variazione di densità;
- la pendenza del fondo è piccola;
- le lunghezze d'onda sono grandi se paragonate all'altezza d'acqua, in modo da poter considerare in ogni punto parallela al fondo la direzione della corrente: è cioè trascurabile la componente verticale dell'accelerazione e su ogni sezione trasversale alla corrente si può assumere una variazione idrostatica della pressione.

Integrando le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto si ottiene:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\alpha \frac{Q^2}{A} \right] + gA \frac{\partial x}{\partial x} = 0$$

ed introducendo la resistenza idraulica (attrito) e le portate laterali addotte:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = \square$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\alpha \frac{Q^2}{A} \right] + gA \frac{\partial x}{\partial x} + \frac{gQQ}{C^2AR} = 0$$

dove:

- A = area della sezione bagnata (m²);
- C = coefficiente di attrito di Chezy (m^{1/2} s⁻¹);
- g = accelerazione di gravità (m s⁻²);
- h = altezza del pelo libero rispetto ad un livello di riferimento orizzontale (m);
- Q = portata (m³/s);
- R = raggio idraulico (m);

α = coefficiente di distribuzione della quantità di moto;
 q = portata laterale addotta ($m^2 s^{-1}$).

Simulazione delle correnti veloci con l'approccio dell'onda dinamica

Per le correnti veloci viene applicata una equazione "ridotta" del moto, ottenuta trascurando il termine non lineare:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial \square}{\partial \square} + \frac{gQQ}{C^2 AR} = 0$$

La descrizione del moto è tanto più accurata quanto meno rapidamente variabile è la velocità della corrente.

Il vantaggio di questa schematizzazione è rappresentato dal fatto che è possibile ottenere una soluzione stabile con la stessa metodologia usata per le correnti lente. Nella transizione tra corrente lenta e veloce viene applicata una riduzione graduale del termine non lineare.

Approssimazione dell'onda diffusiva

L'approssimazione dell' "onda diffusiva" consiste nel trascurare, nelle equazioni generali di De Saint Venant, tutti i termini legati alla quantità di moto:

$$gA \frac{\partial \square}{\partial \square} + \frac{gQQ}{C^2 AR} = 0$$

Questa formulazione assicura ancora la descrizione dell'effetto di rigurgito attraverso il termine $\partial \square / \partial \square$. Per ragioni di stabilità questo termine viene smorzato; ciò significa che vengono risolti soltanto fenomeni di rigurgito relativamente stazionari (confrontati con lo step di tempo utilizzato).

Descrizione in corrispondenza di strutture

Dal punto di vista matematico la descrizione della corrente attraverso stramazzi o soglie e sezioni trasversali strette è abbastanza simile. Sono diversi i tipi di strutture che possono essere simulate:

Tipo 1. Stramazzo a soglia larga

Il programma automaticamente determina le caratteristiche di funzionamento standard dello stramazzo sulla base della geometria e dei coefficienti di perdita di carico specificati dall'utente. Viene assunta una distribuzione idrostatica delle pressioni sulla soglia e vengono utilizzati diversi algoritmi per la simulazione del deflusso libero e di quello rigurgitato.

Tipo 2. Relazione Q-h

Nel caso in cui le condizioni standard di funzionamento (tipo 1) dello stramazzo non risultino adeguate (ad esempio quando è evidente una significativa curvatura delle linee di corrente) è possibile specificare le relazioni Q-h (portate-livelli) valide per la data struttura. La relazione Q-h viene utilizzata per il deflusso libero in condizioni critiche, mentre per il deflusso rigurgitato (o sommerso) vengono utilizzati gli stessi algoritmi della struttura "tipo 1".

Tipo 3. Tombino

Un tombino può essere descritto mediante diversi algoritmi validi per condizioni di deflusso critico, rigurgitato o a "tubo pieno". Il funzionamento a "tubo pieno" è a sua volta suddiviso in deflusso libero a valle,

flusso rigurgitato e flusso sommerso: il codice calcola in automatico una relazione Q-h che contempla tutti i casi di deflusso critico allo sbocco del tombino. La portata critica è determinata da una formulazione di stramazzo a larga soglia quando l'imbocco è libero e da una formulazione di luce sotto battente quando l'imbocco è sommerso.

Tipo 4. Relazione Q-t

E' possibile inserire una qualsiasi relazione Q-t esterna per descrivere ad esempio il deflusso da una diga o un pompaggio. Questa relazione sostituisce localmente l'equazione di conservazione della quantità di moto.

Tipo 5. Relazione $Q = A(Zj1) \cdot Zj2$

Il deflusso nell'ambito di una struttura può essere posto in relazione, in modo dinamico, a due qualsiasi variabili indipendenti del sistema consentendo di simulare regole operative particolari. Il deflusso da un invaso può per esempio essere correlato alla portata in ingresso e al livello nell'invaso (o al livello a valle di esso).

Tipo 6. Strutture mobili

E' possibile simulare la presenza di strutture mobili con condizioni di deflusso di tipo sfioro o luce sotto battente. Viene assegnata la geometria fissa della struttura (larghezza, quota del fondo per sistemi a sfioro tipo ventola, quota del livello massimo della paratoia per sistemi con luce sotto battente) ed una regola operativa che determina la quota della parte mobile della struttura in funzione di una delle seguenti condizioni idrodinamiche calcolate dal modello: un livello, una differenza di livelli, una portata, una differenza di portate, il tempo. Il modulo simula dinamicamente la variazione della geometria della struttura ed il flusso che ne consegue.

Tipo 7. Ponti

In MIKE 11 possono essere utilizzate diverse formulazioni da letteratura per il calcolo del deflusso attraverso i ponti e del conseguente effetto di rigurgito. In particolare sono implementati i modelli della FHWA (Federal Highway Administration USA, WSPRO method) e della USBPR (US Bureau of Public Roads), modelli per la simulazione della presenza delle pile (Nagler e Yarnell), modelli per il libero deflusso attraverso ponti ad arco (Biery & Delour, HR method). Tutti i precedenti metodi di calcolo possono essere integrati con il calcolo del moto in pressione e con il calcolo del sormonto della struttura (tombini e stramazzi).

Resistenza d'attrito

MIKE 11 consente di utilizzare due diverse formulazioni della resistenza d'attrito: l'espressione di Chezy e quella di Strickler. Secondo la formula di Chezy, nell'equazione del moto il termine di resistenza risulta pari a:

$$\tau_r = \frac{g Q Q}{C^2 A R}$$

dove C è il coefficiente di attrito di Chezy.

Secondo la formula di Strickler, lo stesso termine diventa:

$$\tau_r = \frac{g Q Q}{M^2 A R^{4/3}}$$

dove M è il coefficiente di Strickler, pari a $1/n$, essendo n il coefficiente di Manning.

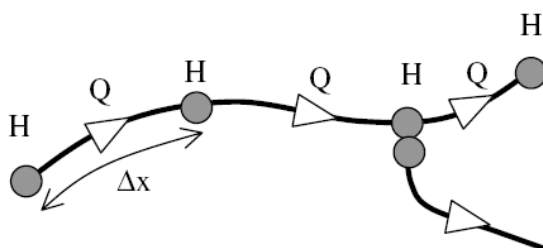
Condizioni Iniziali

Le condizioni iniziali possono essere specificate dall'utente oppure essere calcolate automaticamente. Nel secondo caso viene usata la formula di Chezy per determinare i livelli idrici e le portate da considerare all'inizio

della simulazione su tutta la rete o schema idraulico. In alternativa a queste due opzioni è possibile anche assumere come condizioni iniziali i risultati di una precedente simulazione effettuata sullo stesso schema idraulico.

Metodo di Soluzione

La soluzione del sistema di equazioni è indipendente dall'approccio modellistico seguito (cinematico, diffusivo, dinamico). Le equazioni generali di De Saint Venant sono trasformate in un sistema di equazioni implicite alle differenze finite secondo una griglia di calcolo con punti Q e h alternati tra loro, nei quali la portata Q e il livello idrico h, rispettivamente, sono determinati ad ogni passo temporale (schema di Abbott a 6 punti).



La griglia di calcolo viene generata dal modello in base alle richieste dell'utente:

- i punti Q sono posizionati sempre a metà tra due punti h vicini;
- la distanza tra due punti h può essere variabile;
- ad ogni sezione trasversale d'alveo viene assegnato un punto h;
- ad ogni struttura viene assegnato un punto Q.

Condizioni al Contorno

In MIKE 11 le condizioni al contorno sono distinte in esterne ed interne. Le condizioni al contorno interne sono: legami tra punti nodali, strutture, portate interne. Le condizioni al contorno esterne sono: valori costanti di h e Q, valori di h e Q variabili nel tempo, relazioni tra h e Q (ad es. scala di deflusso per una sezione d'alveo).

MODELLISTICA BIDIMENSIONALE MIKE 21

Il MIKE 21 è un programma modulare contenente diversi codici per la simulazione di corpi idrici per i quali sia possibile adottare l'approssimazione idrodinamica bidimensionale, piana, per fluidi verticalmente omogenei. Infatti, il numero "21" che contraddistingue il codice indica proprio la bidimensionalità nel piano ("2") e la monodimensionalità lungo la verticale ("1").

Il sistema modellistico è stato sviluppato per la simulazione delle correnti a pelo libero e dei fenomeni correlati all'idraulica in fiumi, laghi o invasi, così come in ambito costiero e offshore.

Modulo Idrodinamico (HD)

Il modulo idrodinamico (HD), cuore del codice MIKE 21, simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate, potendo essere utilizzato da solo o come base per i calcoli effettuati dagli altri moduli disponibili. In particolare, il modulo HD di MIKE 21 permette di tenere in considerazione i seguenti fenomeni:

- flooding and drying;
- perdite di carico;
- attrito al fondo;
- forza di Coriolis;
- effetto del vento;
- gradienti di pressione barometrica;
- coperture di ghiaccio;
- effetto delle maree;
- precipitazioni/Evaporazioni;
- radiation stresses;
- pozzi e sorgenti.

Il modulo idrodinamico HD del Mike 21 risolve le equazioni complete del moto di De St.Venant in un caso bidimensionale piano (la terza dimensione - asse z - è implicitamente integrata nelle equazioni considerando un mezzo verticalmente omogeneo), non stazionario. Il sistema delle equazioni di De St.Venant è costituito dalle seguenti equazioni.

Equazione di conservazione della massa:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \square}{\partial \square} + \frac{\partial \square}{\partial \square} = 0$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo x:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega q - fVV_x \\ + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} p_a + \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial \mathcal{S}_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{S}_{xy}}{\partial y} \right) = 0 \end{aligned}$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega p - fVV_y \\ + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} p_a + \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial \mathcal{S}_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \mathcal{S}_{xy}}{\partial x} \right) = 0 \end{aligned}$$

nelle quali:

$h(x,y,t)$ = profondità dell'acqua;

$\zeta(x,y,t)$ = quota del pelo libero;

$p,q(x,y,t)$ = portate unitarie nelle direzioni x e y;

$C(x,y)$ = coefficiente di scabrezza di Chezy;

G = accelerazione di gravità;

$f(V)$ = fattore d'attrito del vento;

$V, V_x, V_y(x,y,t)$ = velocità del vento e componenti lungo le direzioni x e y;

$\Omega(x,y)$ = parametro di Coriolis;

$p_a(x,y,t)$ = pressione atmosferica;

ρ_w = densità dell'acqua;

x, y = coordinate spaziali;

t = tempo;

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ = componenti dello sforzo di taglio che tengono conto della turbolenza e del profilo verticale delle velocità;

S_{xx}, S_{xy}, S_{yy} = componenti del radiation stress (nel caso la forzante idrodinamica derivi dall'interazione tra il moto ondoso ed il fondo).

Il termine di turbolenza è rappresentato dagli sforzi di taglio τ che compaiono nelle equazioni di conservazione della quantità di moto lungo le direzioni x e y . La formulazione utilizzata prende in considerazione il parametro E "eddy viscosity" che è implementato secondo due modalità:

1. dipendente dal flusso locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(E \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (\text{nella direzione } x);$$

2. oppure dipendente dalla velocità locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(E \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (\text{nella direzione } x).$$

Le due equazioni rappresentano il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto. Il coefficiente E può essere specificato come costante su tutta la griglia, variabile da punto a punto, o come funzione del campo di velocità locale secondo la formulazione di Smagorinski:

$$E = c_s^2 \Delta^2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right]$$

nella quale u e v sono le componenti della velocità locale, Δ è la dimensione spaziale della griglia e c_s è una costante compresa tra 0,25 e 1.

In questo caso il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto (asse x) è dato da:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h E \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{2} h E \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right)$$

La portata entrante nell'area di calcolo viene assegnata come portata unitaria ($m^3/s/m$) lungo la frontiera libera dalla quale entra il flusso: viene assegnata al modello la portata complessiva (m^3/s) che viene poi ripartita automaticamente sui punti di calcolo della griglia.

La condizione iniziale è rappresentata da una situazione di "quiete", nel senso che tutte le componenti delle forzanti sono nulle (portate, velocità, livelli) e variano poi linearmente nel tempo fino a raggiungere il valore assegnato in un tempo prefissato. Questa tecnica, detta del "soft start" consente di eliminare eventuali brusche oscillazioni iniziali della soluzione che potrebbero presentarsi per problemi di stabilità numerica. Al termine del "soft start" la situazione ottenuta è di effettiva stazionarietà.

Le equazioni di continuità del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenze finite su una griglia rettangolare, uniforme su tutto il dominio di calcolo, costituita da celle di dimensioni tali da poter descrivere in maniera sufficientemente corretta le variazioni plano-altimetriche della batimetria.

Le equazioni della conservazione della massa e della quantità di moto sono risolte alle differenze finite utilizzando il metodo ADI (Alternating Direction Implicit). Il sistema di equazioni linearizzate che scaturisce dall'algoritmo è risolto con il metodo DS (Double Sweep, Abbott, 1979).

Il modello MIKE 21 HD necessita di una serie di dati di input che si possono raggruppare in differenti categorie, ovvero:

- parametri temporali e del dominio (risoluzione della griglia di calcolo, time step, durata simulazione);
- fattori di calibrazione (bed resistance, viscosità turbolenta);
- condizioni iniziali (livelli e campi di corrente);
- condizioni al contorno (livelli, portate);
- altre forzanti (campi di vento, radiation stresses, sorgenti o pozzi).

I risultati di un'applicazione modellistica bidimensionale possono essere rappresentati con i molteplici strumenti di visualizzazione statica e dinamica a corredo dello strumento modellistico utilizzato. Gli strumenti di post processing consentono di creare animazione 2D da esportare ed utilizzare in ambiente di lavoro esterno alla piattaforma modellistica utilizzata per il calcolo numerico.

L'utilizzo di un approccio di tipo bidimensionale, permette di indagare non solo l'intensità del fenomeno ma anche direzione e verso del vettore velocità in ogni cella della matrice. Ad esempio per ognuno degli elementi della griglia, sono rappresentati le variazioni temporali delle seguenti variabili:

- profondità e livelli idrici;
- flussi di corrente nelle direzioni principali;
- velocità di corrente e direzione.

MODELLISTICA MIKE FLOOD

MIKE FLOOD permette l'accoppiamento tra modello monodimensionale in alveo e bidimensionale nelle aree contermini.

L'accoppiamento dei modelli è dinamico:

- i modelli "girano" simultaneamente;
- ad ogni istante di simulazione avviene uno scambio di dati;
- la mutua interazione è bidirezionale.

L'integrazione tra i diversi modelli avviene in modo totalmente dinamico, garantendo quindi la conservazione di massa e quantità di moto tra i diversi sistemi ed è impostata attraverso un'interfaccia grafica comune.

L'accoppiamento tra mono e bidimensionale può avvenire in maniera puntuale, oppure in maniera distribuita.

Il corso d'acqua viene simulato attraverso sezioni fluviali. Le acque esondate e la loro propagazione viene effettuata con un modello bidimensionale.

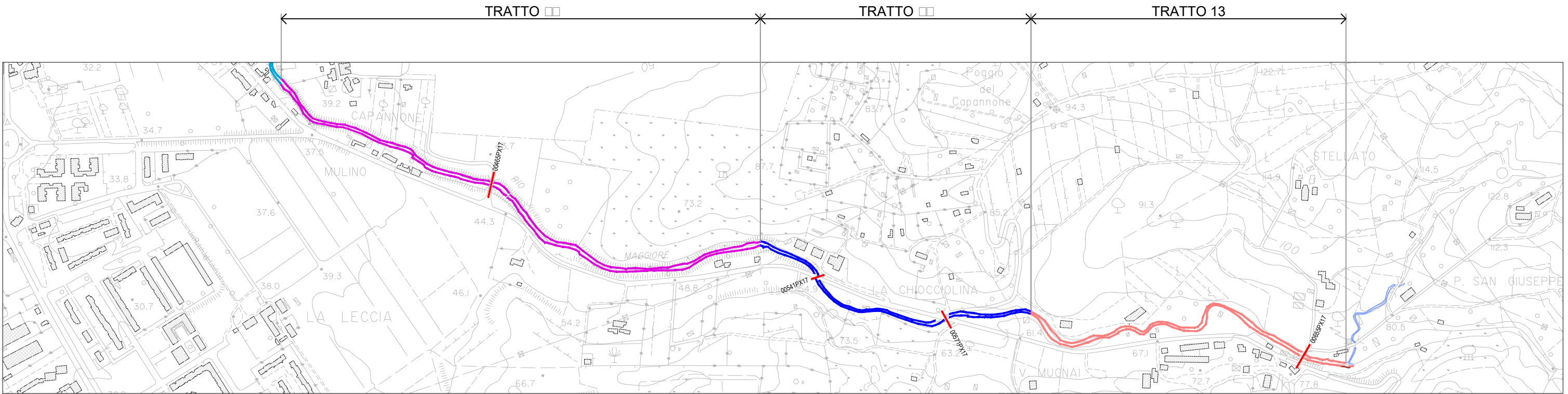
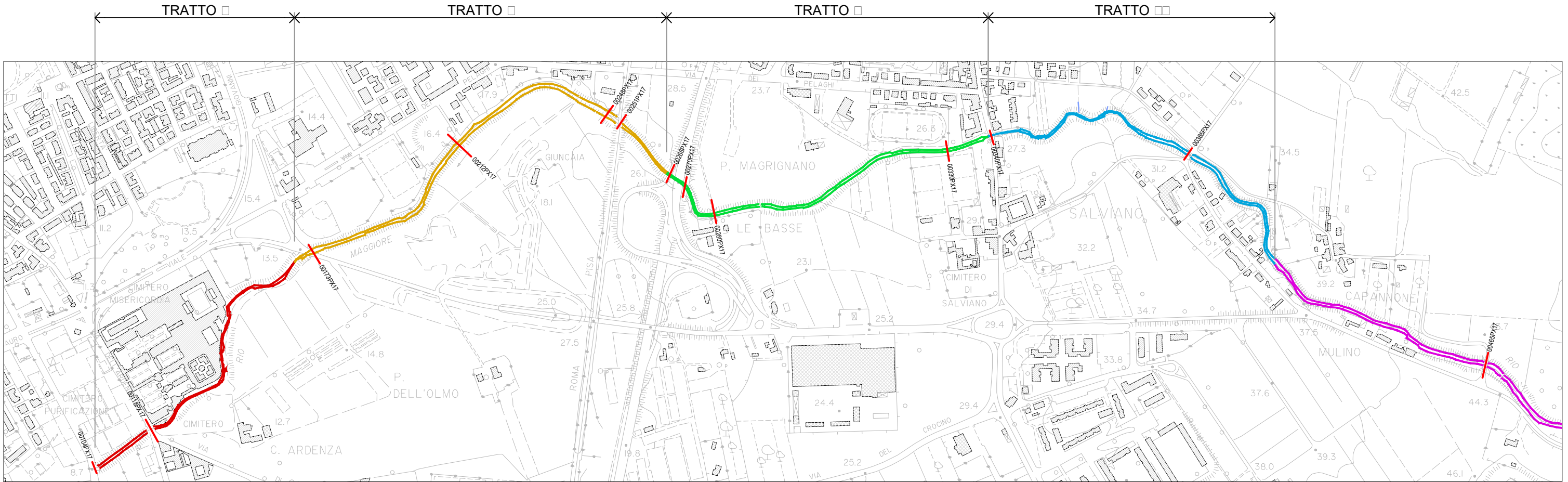
I risultati sono espressi in battenti, livelli, flussi e velocità nelle aree allagate.

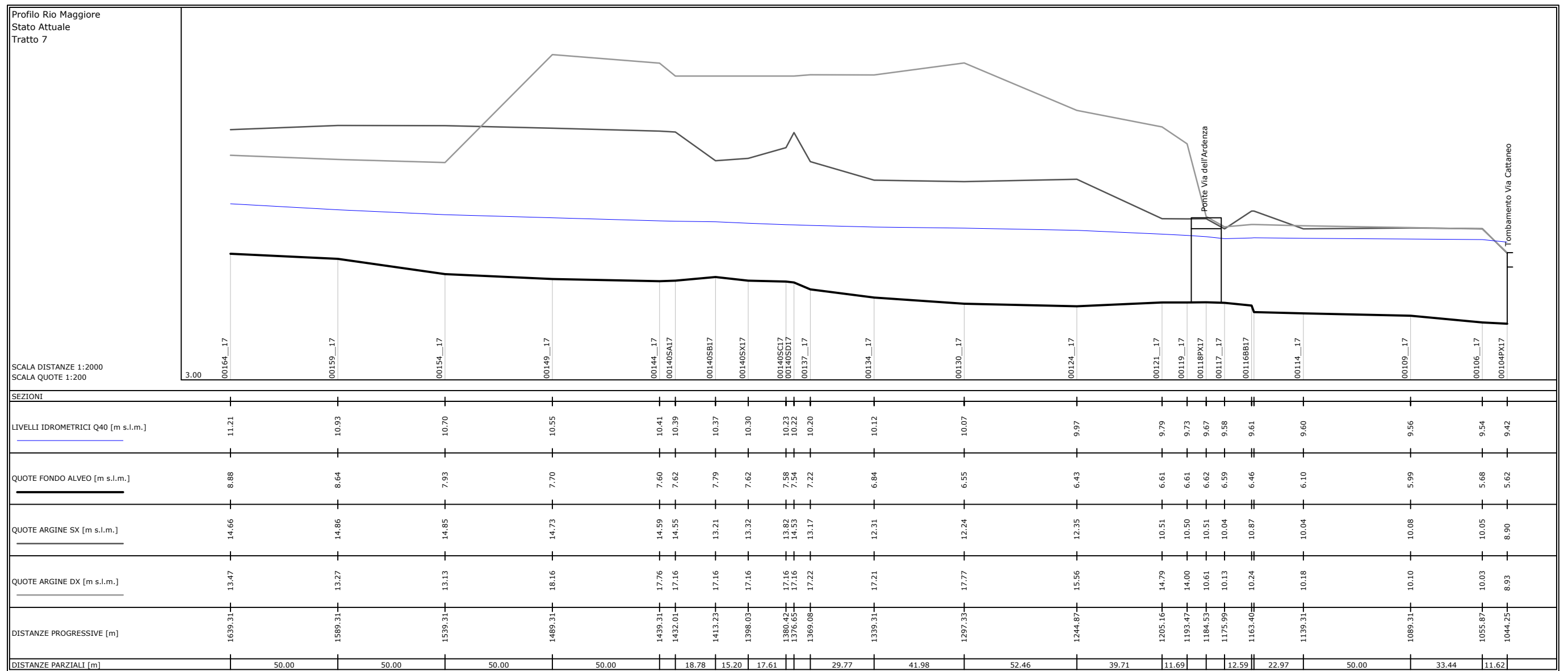
APPENDICE 2 – RISULTATI MODELLO IDRAULICO 1D

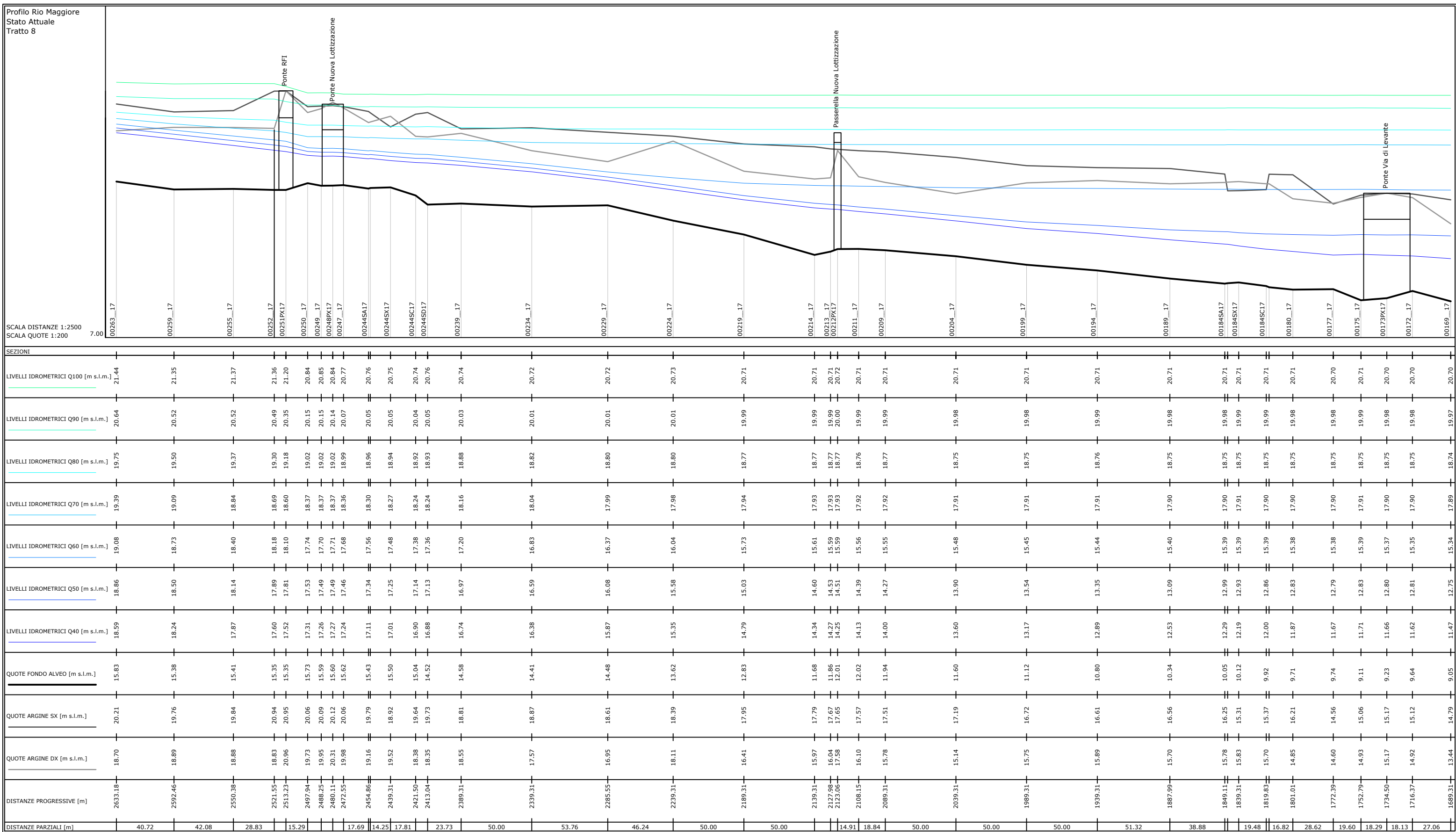
RISULTATI MODELLO 1D STATO ATTUALE

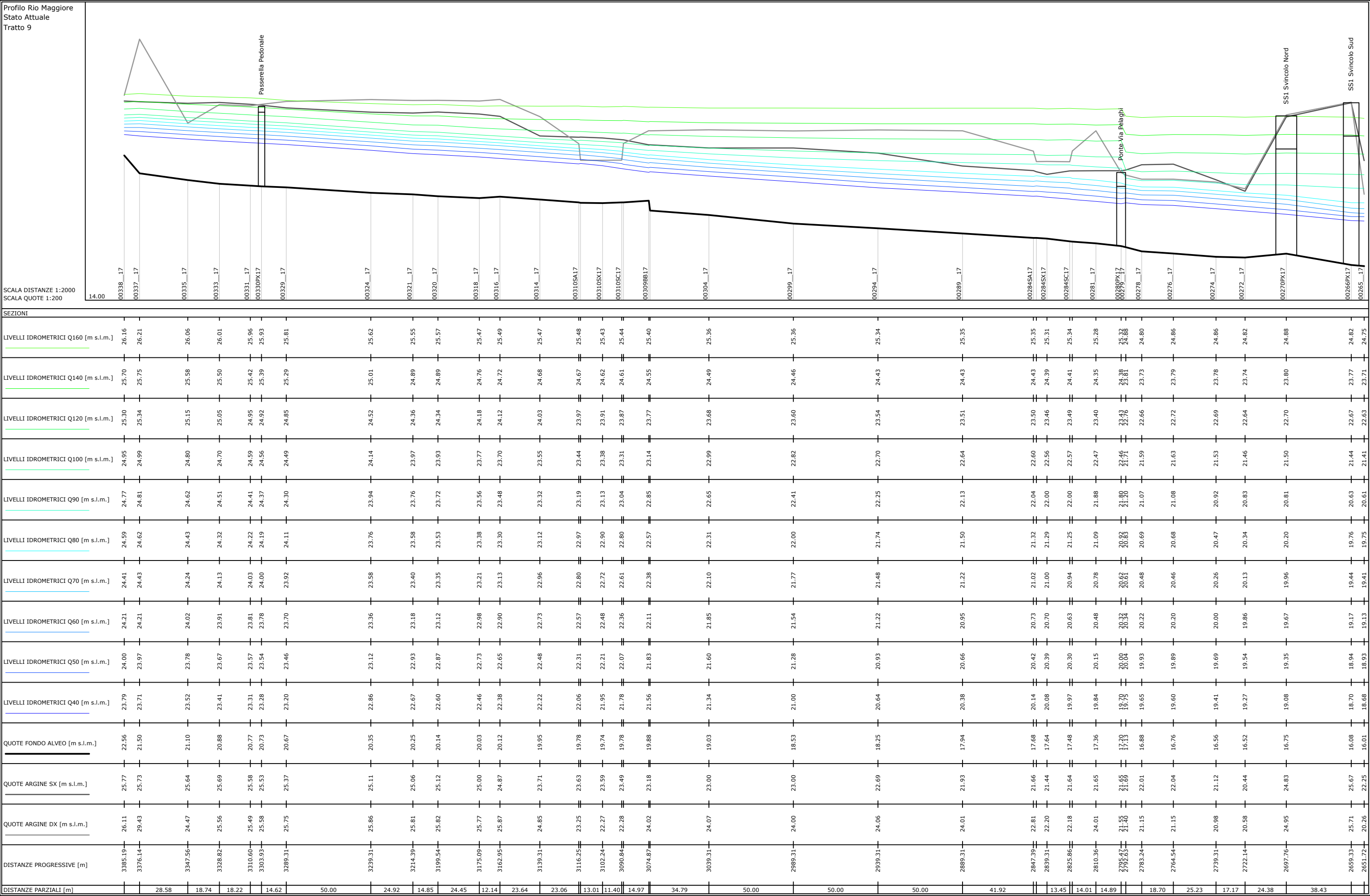
STUDIO DEL CORSO SUPERFICIALE DEL RIO MAGGIORE

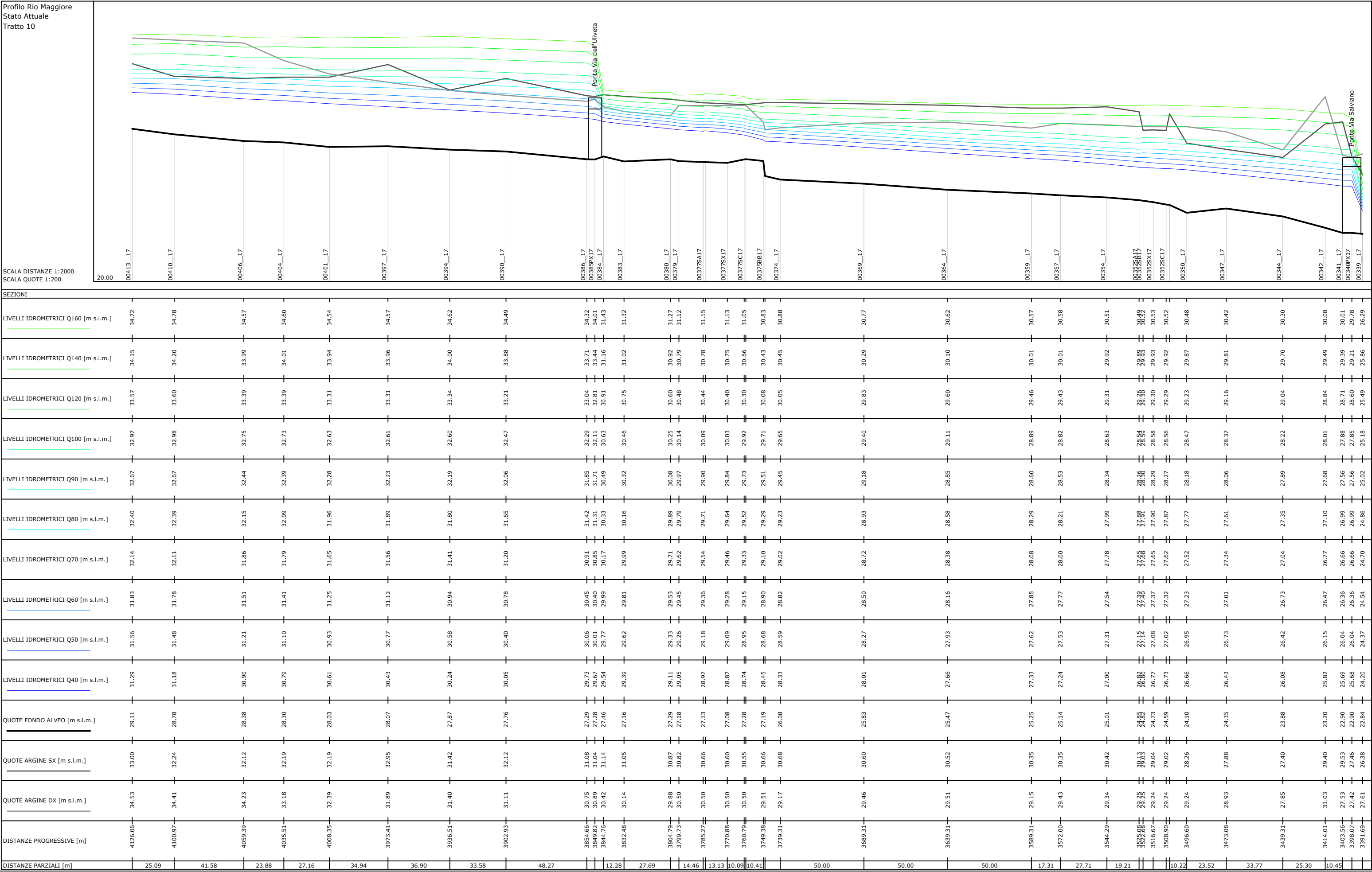
Da Via Cattaneo a località Limoncino



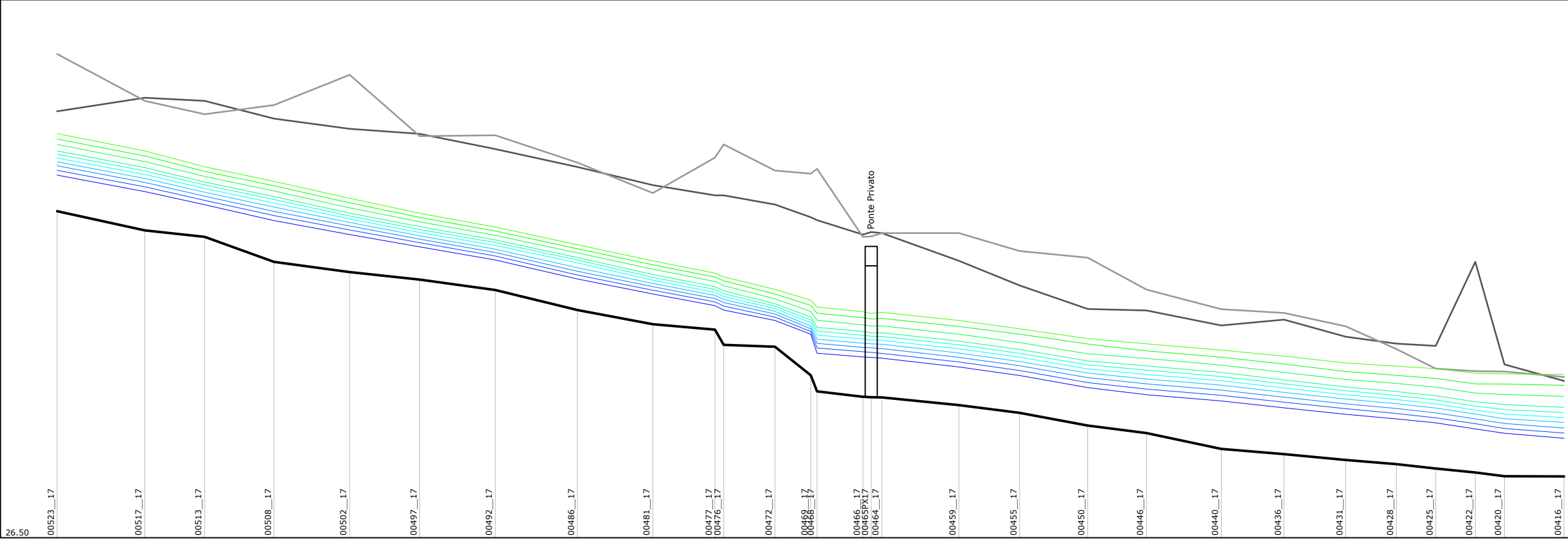








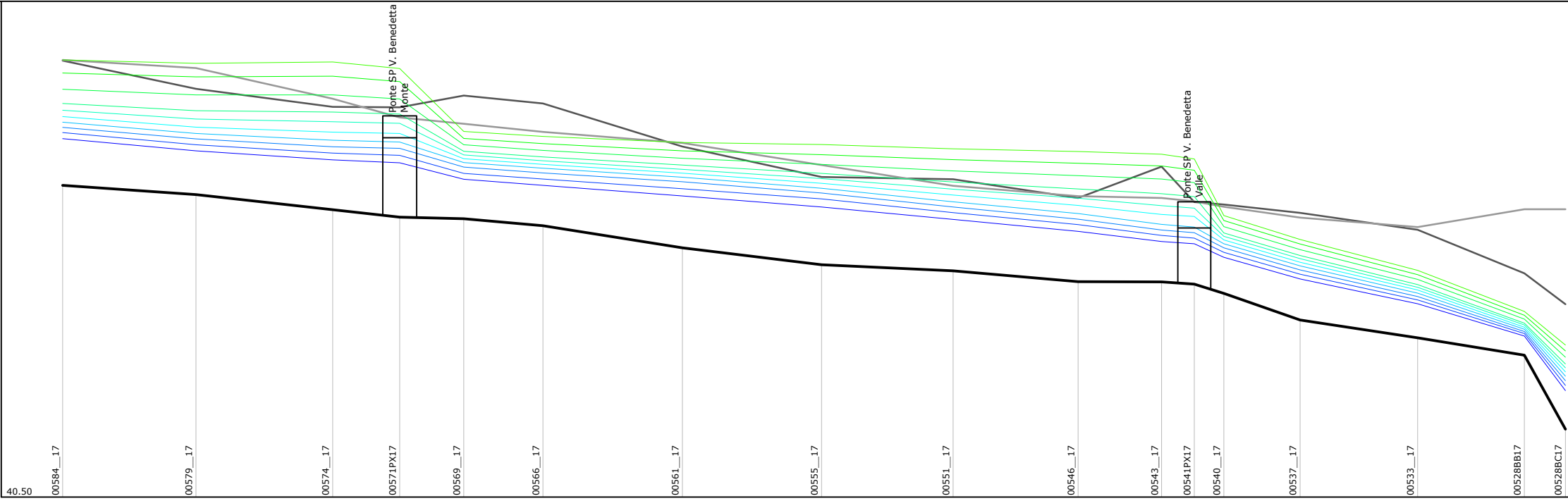
SCALA DISTANZE 1:3500
SCALA QUOTE 1:250



SEZIONI	00523_17	00517_17	00513_17	00508_17	00502_17	00497_17	00492_17	00486_17	00481_17	00477_17 00476_17	00472_17	00468_17 00467_17	00466_17 00465PK17 00464_17	00459_17	00455_17	00450_17	00446_17	00440_17	00436_17	00431_17	00428_17	00425_17	00422_17	00420_17	00416_17
LIVELLI IDROMETRICI Q160 [m s.l.m.]	47.01	46.14	45.33	44.59	43.73	42.97	42.27	41.37	40.56	39.93 39.74	39.11	38.56 38.21	37.97 37.89 37.94	37.53	37.11	36.61	36.35	36.03	35.72	35.37	35.21	35.09	34.85	34.82	34.79
LIVELLI IDROMETRICI Q140 [m s.l.m.]	46.74	45.88	45.10	44.37	43.50	42.76	42.07	41.17	40.36	39.73 39.54	38.88	38.28 37.90	37.67 37.60 37.64	37.22	36.83	36.33	35.99	35.67	35.32	34.94	34.75	34.59	34.31	34.30	34.24
LIVELLI IDROMETRICI Q120 [m s.l.m.]	46.46	45.60	44.84	44.10	43.25	42.54	41.85	40.96	40.13	39.51 39.30	38.63	37.99 37.54	37.31 37.25 37.26	36.83	36.41	35.84	35.60	35.27	34.90	34.54	34.33	34.14	33.85	33.77	33.68
LIVELLI IDROMETRICI Q100 [m s.l.m.]	46.14	45.29	44.56	43.82	42.98	42.29	41.62	40.73	39.86	39.25 39.03	38.38	37.71 37.18	36.97 36.91 36.91	36.48	36.06	35.48	35.22	34.89	34.51	34.15	33.92	33.71	33.40	33.26	33.12
LIVELLI IDROMETRICI Q90 [m s.l.m.]	45.97	45.12	44.41	43.67	42.83	42.15	41.49	40.60	39.72	39.11 38.89	38.26	37.56 36.99	36.78 36.73 36.72	36.29	35.86	35.28	35.01	34.68	34.31	33.96	33.72	33.50	33.18	33.01	32.85
LIVELLI IDROMETRICI Q80 [m s.l.m.]	45.78	44.94	44.23	43.49	42.68	42.00	41.34	40.45	39.57	38.96 38.75	38.13	37.42 36.79	36.59 36.54 36.52	36.09	35.67	35.08	34.79	34.47	34.10	33.76	33.52	33.30	32.98	32.78	32.60
LIVELLI IDROMETRICI Q70 [m s.l.m.]	45.59	44.74	44.04	43.29	42.50	41.83	41.15	40.21	39.41	38.80 38.60	38.00	37.25 36.58	36.38 36.35 36.32	35.88	35.45	34.86	34.56	34.25	33.88	33.54	33.31	33.08	32.78	32.55	32.35
LIVELLI IDROMETRICI Q60 [m s.l.m.]	45.38	44.54	43.84	43.07	42.32	41.66	40.98	40.03	39.24	38.64 38.44	37.86	37.11 36.37	36.17 36.14 36.10	35.66	35.23	34.63	34.31	34.00	33.64	33.30	33.06	32.84	32.53	32.30	32.07
LIVELLI IDROMETRICI Q50 [m s.l.m.]	45.15	44.32	43.63	42.85	42.12	41.48	40.80	39.84	39.06	38.47 38.26	37.70	36.97 36.13	35.94 35.66 35.86	35.42	34.99	34.38	34.05	33.73	33.38	33.05	32.81	32.59	32.29	32.05	31.81
LIVELLI IDROMETRICI Q40 [m s.l.m.]	44.91	44.07	43.40	42.60	41.89	41.27	40.60	39.64	38.87	38.28 38.06	37.53	36.83 36.06	35.68 35.66 35.61	35.17	34.74	34.12	33.76	33.44	33.10	32.77	32.54	32.33	32.03	31.80	31.55
QUOTE FONDO ALVEO [m s.l.m.]	43.08	42.10	41.78	40.50	39.99	39.61	39.08	38.06	37.34	37.06 36.29	36.20	34.75 33.33	33.66 33.64 33.63	33.23	32.84	32.20	31.82	31.01	30.75	30.45	30.24	30.02	29.81	29.62	29.61
QUOTE ARGINE SX [m s.l.m.]	48.15	48.83	48.68	47.78	47.26	47.00	46.23	45.32	44.40	43.88 43.88	43.42	42.72 42.62	41.89 42.02 41.97	40.56	39.31	38.11	38.04	37.28	37.57	36.70	36.36	36.24	40.51	35.30	34.46
QUOTE ARGINE DX [m s.l.m.]	51.06	48.68	48.00	48.46	50.00	46.89	46.93	45.54	44.00	45.80 46.46	45.14	44.98 45.23	41.77 41.80 41.97	41.97	41.05	40.72	39.10	38.10	37.91	37.23	36.08	35.09	34.96	34.94	34.66
DISTANZE PROGRESSIVE [m]	5230.52	5168.19	5125.65	5076.21	5022.51	4972.65	4918.96	4860.49	4806.96	4762.66 4756.44	4719.99	4694.62 4690.06	4657.55 4651.58 4644.08	4589.28	4546.10	4497.72	4455.94	4402.73	4358.01	4314.17	4278.20	4250.21	4222.06	4201.37	4158.95
DISTANZE PARZIALI [m]		62.33	42.54	49.44	53.70	49.86	53.69	58.47	53.53	44.30	36.45	25.37	32.51	54.80	43.18	48.38	41.78	53.21	44.72	43.84	35.97	27.99	28.15	20.69	42.42

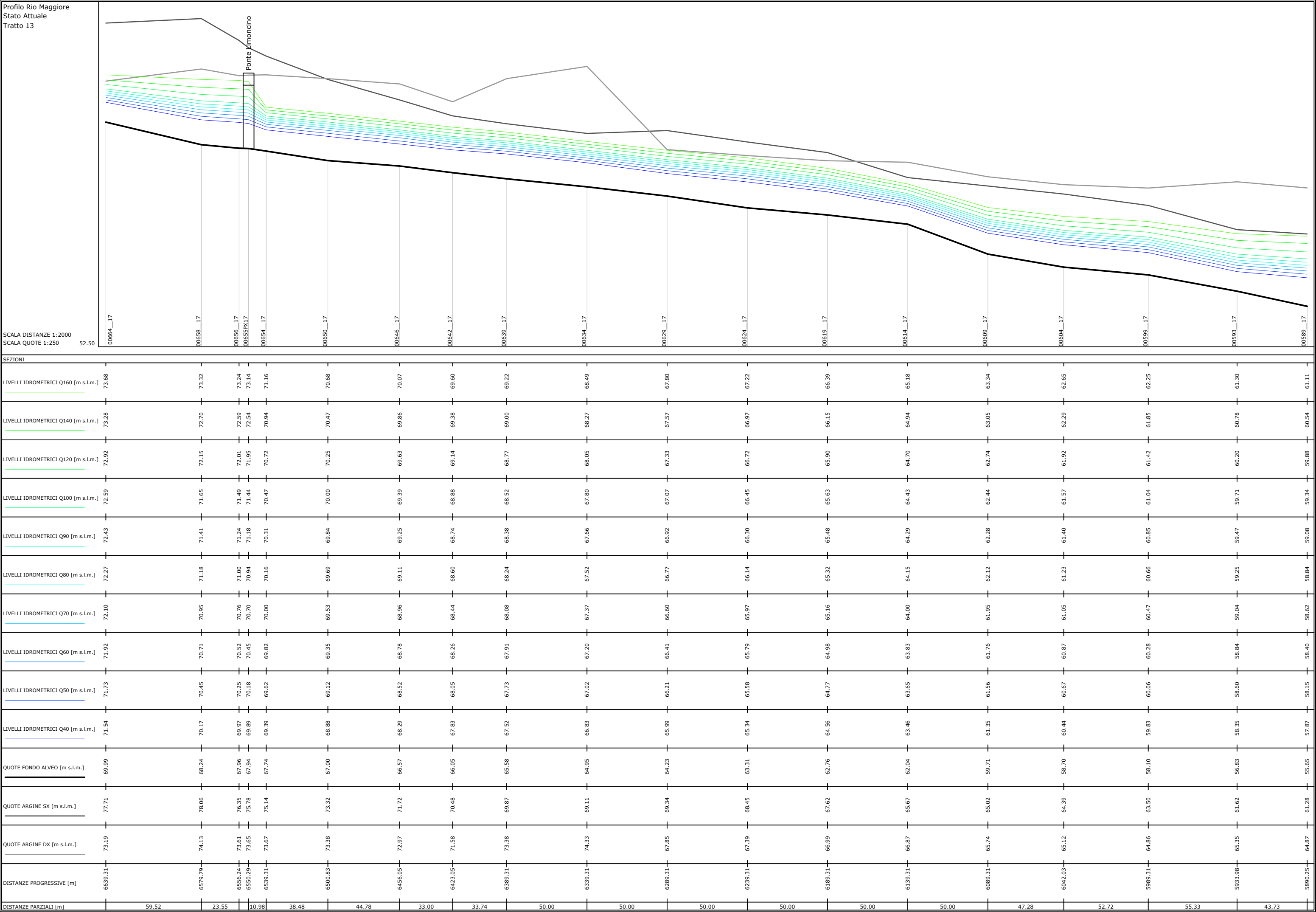
Profilo Rio Maggiore
Stato Attuale
Tratto 12

SCALA DISTANZE 1:2000
SCALA QUOTE 1:250

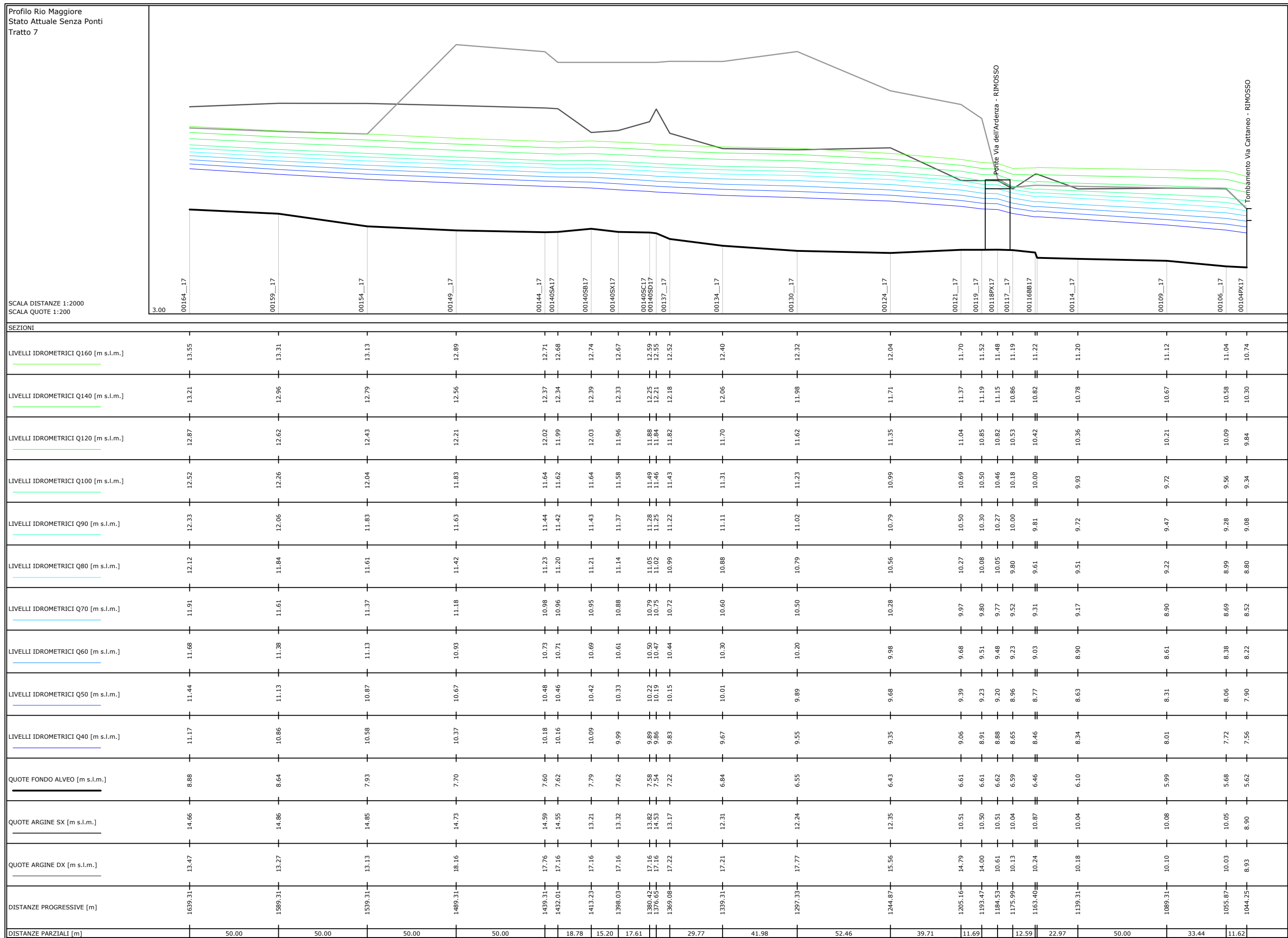


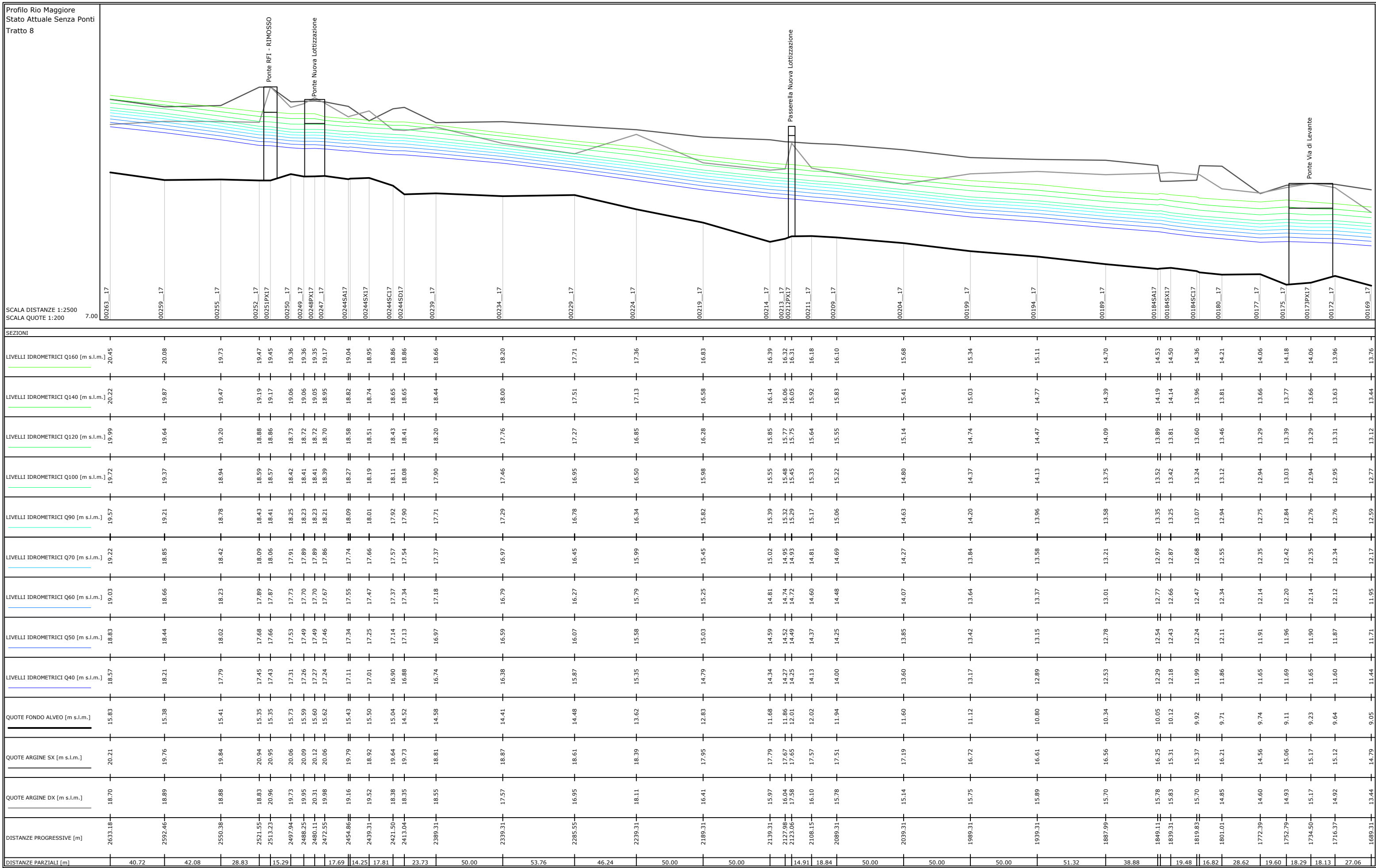
SEZIONI

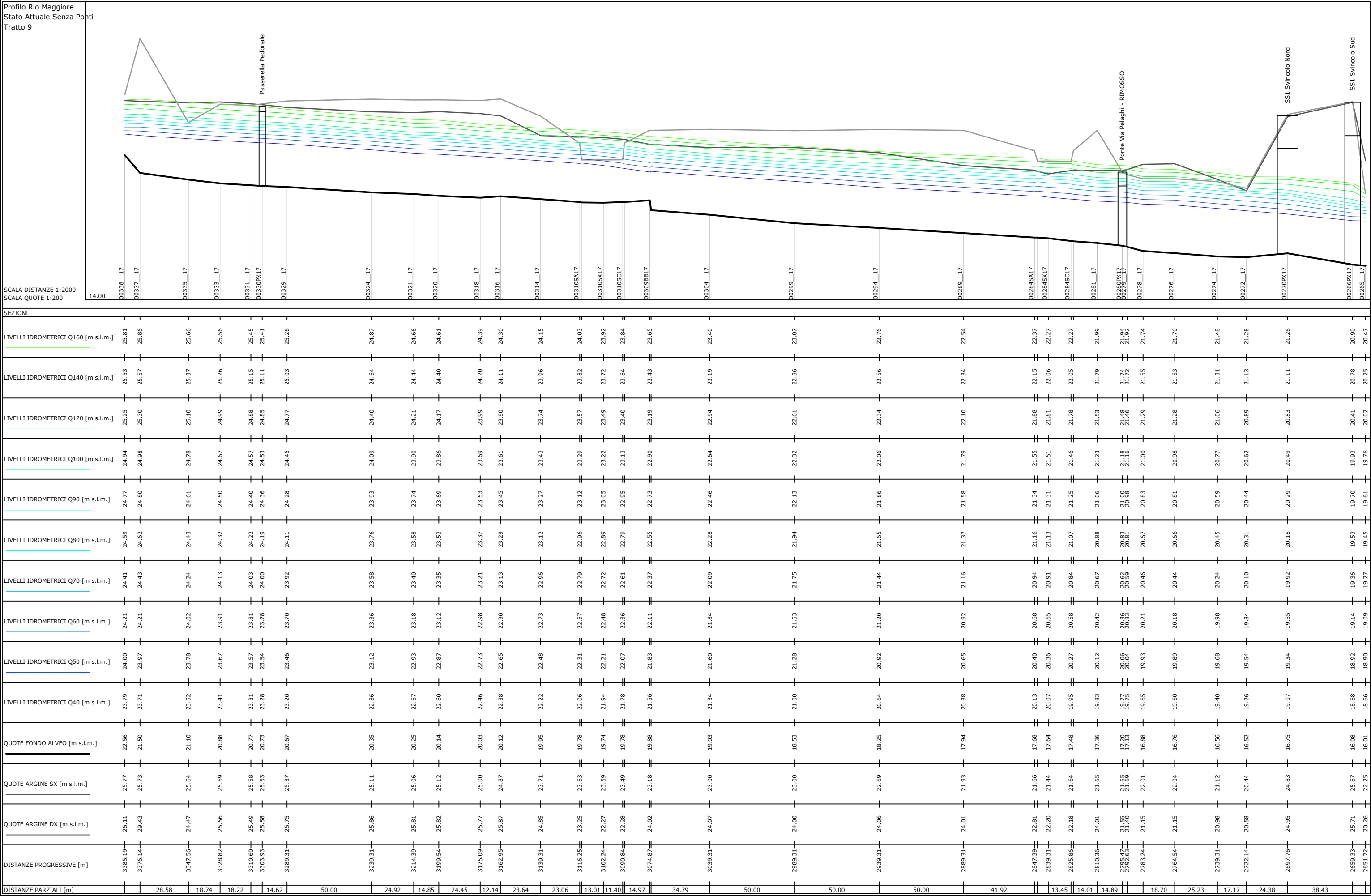
LIVELLI IDROMETRICI Q160 [m s.l.m.]	61.01		60.85		60.91		60.61		57.65		57.42		57.14		57.04		56.84		56.71		56.59		56.36		53.71		52.59		51.14		49.21		47.63
LIVELLI IDROMETRICI Q140 [m s.l.m.]	60.40		60.22		60.25		59.99		57.33		57.08		56.74		56.56		56.33		56.16		56.03		55.83		53.47		52.37		50.93		49.03		47.36
LIVELLI IDROMETRICI Q120 [m s.l.m.]	59.63		59.37		59.37		59.18		57.03		56.77		56.39		56.11		55.80		55.58		55.42		55.25		53.19		52.11		50.71		48.85		47.06
LIVELLI IDROMETRICI Q100 [m s.l.m.]	58.97		58.63		58.56		58.47		56.72		56.46		56.08		55.69		55.28		54.96		54.73		54.60		52.89		51.83		50.47		48.66		46.74
LIVELLI IDROMETRICI Q90 [m s.l.m.]	58.65		58.24		58.11		58.04		56.55		56.28		55.88		55.44		54.95		54.52		54.17		54.06		52.73		51.68		50.34		48.57		46.56
LIVELLI IDROMETRICI Q80 [m s.l.m.]	58.35		57.86		57.62		57.56		56.37		56.11		55.70		55.22		54.67		54.18		53.76		53.66		52.56		51.52		50.21		48.47		46.37
LIVELLI IDROMETRICI Q70 [m s.l.m.]	58.09		57.56		57.24		57.16		56.19		55.93		55.51		54.99		54.35		53.80		53.29		53.17		52.38		51.35		50.07		48.37		46.17
LIVELLI IDROMETRICI Q60 [m s.l.m.]	57.85		57.30		56.94		56.86		55.98		55.71		55.29		54.77		54.11		53.54		53.03		52.90		52.19		51.16		49.91		48.27		45.96
LIVELLI IDROMETRICI Q50 [m s.l.m.]	57.60		57.03		56.64		56.53		55.69		55.42		54.97		54.49		53.84		53.28		52.77		52.65		51.98		50.96		49.75		48.17		45.74
LIVELLI IDROMETRICI Q40 [m s.l.m.]	57.32		56.74		56.32		56.18		55.41		55.13		54.63		54.11		53.53		52.97		52.49		52.38		51.75		50.73		49.57		48.06		45.49
QUOTE FONDO ALVEO [m s.l.m.]	55.12		54.69		53.98		53.63		53.56		53.23		52.19		51.40		51.11		50.61		50.60		50.49		50.06		48.81		47.97		47.15		43.68
QUOTE ARGINE SX [m s.l.m.]	60.98		59.65		58.81		58.79		59.34		58.97		56.95		55.52		55.41		54.53		56.00		54.34		54.22		53.83		53.04		51.00		49.55
QUOTE ARGINE DX [m s.l.m.]	61.01		60.63		59.19		58.31		58.01		57.63		57.11		56.08		55.10		54.62		54.53		54.37		54.12		53.61		53.17		54.00		54.00
DISTANZE PROGRESSIVE [m]	5839.31		5789.31		5737.94		5712.81		5688.76		5659.06		5606.75		5554.45		5505.14		5458.21		5426.82		5414.60		5403.53		5374.89		5330.72		5290.68		5275.31
DISTANZE PARZIALI [m]	50.00	51.37	25.13	24.05	29.70	52.31	52.30	49.31	46.93	31.39	12.22	11.07	28.64	44.17	40.04	15.37																	

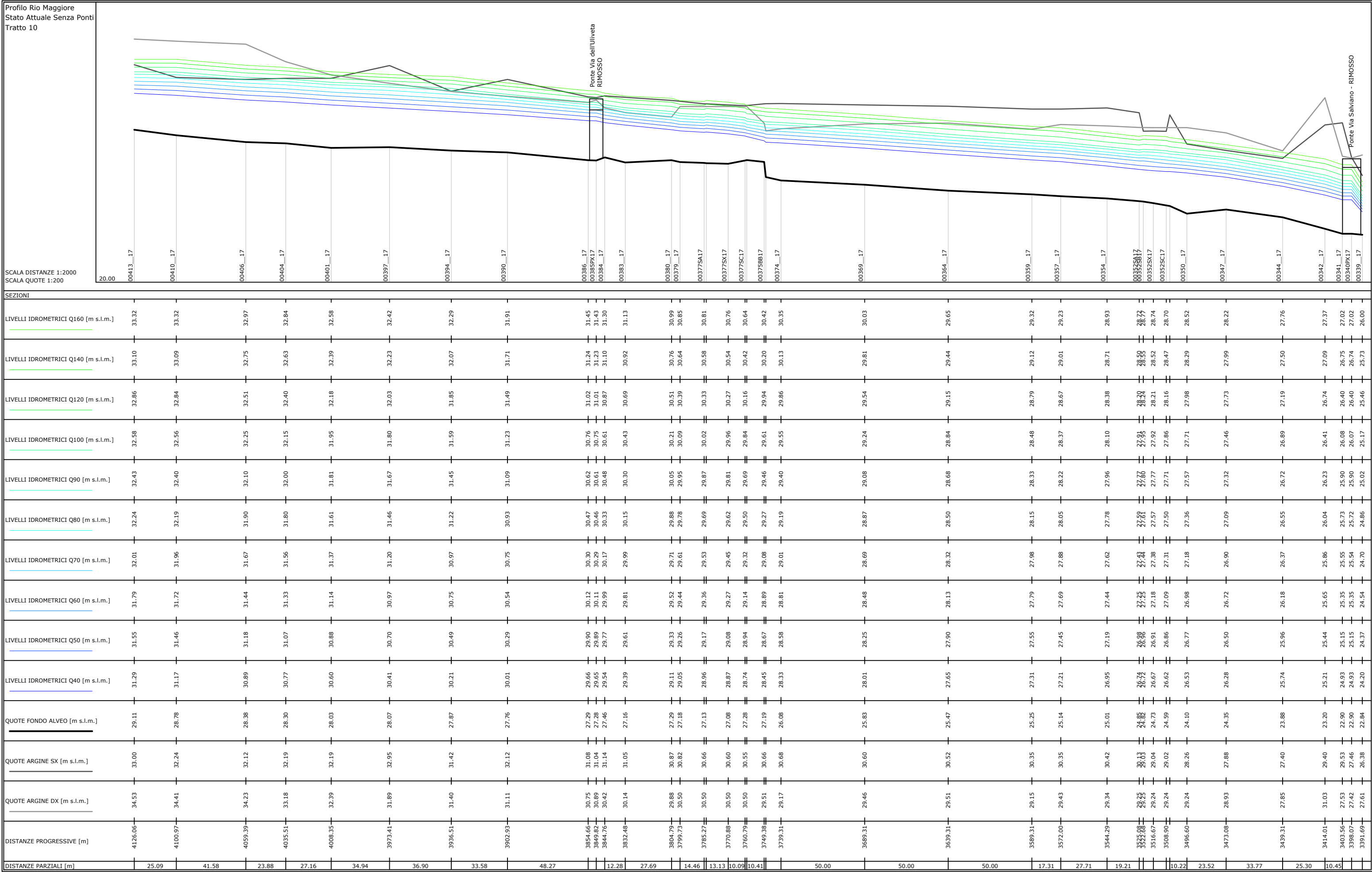


RISULTATI MODELLO 1D STATO ATTUALE SENZA PONTI



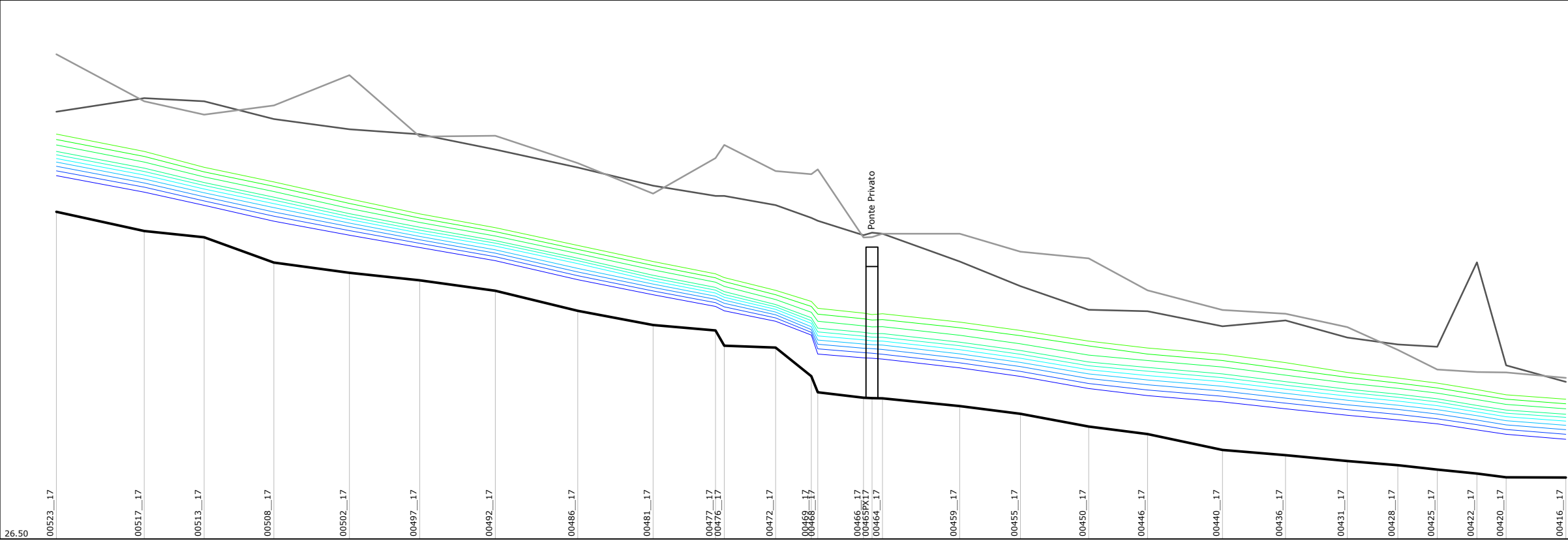






Profilo Rio Maggiore
Stato Attuale Senza Ponti
Tratto 11

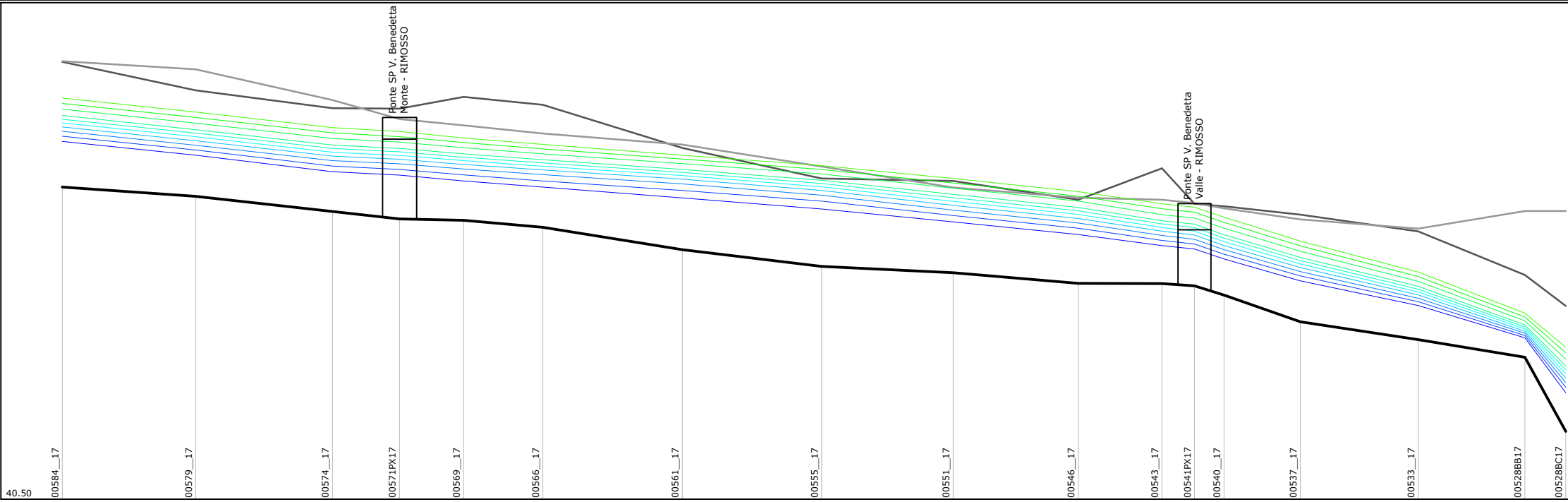
SCALA DISTANZE 1:3500
SCALA QUOTE 1:250



SEZIONI												
LIVELLI IDROMETRICI Q160 [m s.l.m.]	47.01	46.14	45.33	44.59	43.73	42.97	42.27	41.37	40.56	39.93	38.54	37.94
LIVELLI IDROMETRICI Q140 [m s.l.m.]	46.74	45.88	45.10	44.37	43.50	42.76	42.07	41.17	40.36	39.73	38.28	37.66
LIVELLI IDROMETRICI Q120 [m s.l.m.]	46.46	45.60	44.84	44.10	43.25	42.54	41.85	40.96	40.13	39.51	37.99	37.30
LIVELLI IDROMETRICI Q100 [m s.l.m.]	46.14	45.29	44.56	43.82	42.98	42.29	41.62	40.73	39.86	39.25	37.18	36.97
LIVELLI IDROMETRICI Q90 [m s.l.m.]	45.97	45.12	44.41	43.67	42.83	42.15	41.49	40.60	39.72	39.11	36.99	36.78
LIVELLI IDROMETRICI Q80 [m s.l.m.]	45.78	44.94	44.23	43.49	42.68	42.00	41.34	40.45	39.57	38.96	36.79	36.59
LIVELLI IDROMETRICI Q70 [m s.l.m.]	45.59	44.74	44.04	43.29	42.50	41.83	41.15	40.21	39.41	38.80	36.58	36.35
LIVELLI IDROMETRICI Q60 [m s.l.m.]	45.38	44.54	43.84	43.07	42.32	41.66	40.98	40.03	39.24	38.64	36.37	36.17
LIVELLI IDROMETRICI Q50 [m s.l.m.]	45.15	44.32	43.63	42.85	42.12	41.48	40.80	39.84	39.06	38.47	36.13	35.94
LIVELLI IDROMETRICI Q40 [m s.l.m.]	44.91	44.07	43.40	42.60	41.89	41.27	40.60	39.64	38.87	38.28	35.89	35.68
QUOTE FONDO ALVEO [m s.l.m.]	43.08	42.10	41.78	40.50	39.99	39.61	39.08	38.06	37.34	37.06	34.75	33.66
QUOTE ARGINE SX [m s.l.m.]	48.15	48.83	48.68	47.78	47.26	47.00	46.23	45.32	44.40	43.88	42.72	41.89
QUOTE ARGINE DX [m s.l.m.]	51.06	48.68	48.00	48.46	50.00	46.89	46.93	45.54	44.00	45.80	44.98	41.77
DISTANZE PROGRESSIVE [m]	5230.52	5168.19	5125.65	5076.21	5022.51	4972.65	4918.96	4860.49	4806.96	4762.66	4694.62	4657.55
DISTANZE PARZIALI [m]		62.33	42.54	49.44	53.70	49.86	53.69	58.47	53.53	44.30	36.45	25.37

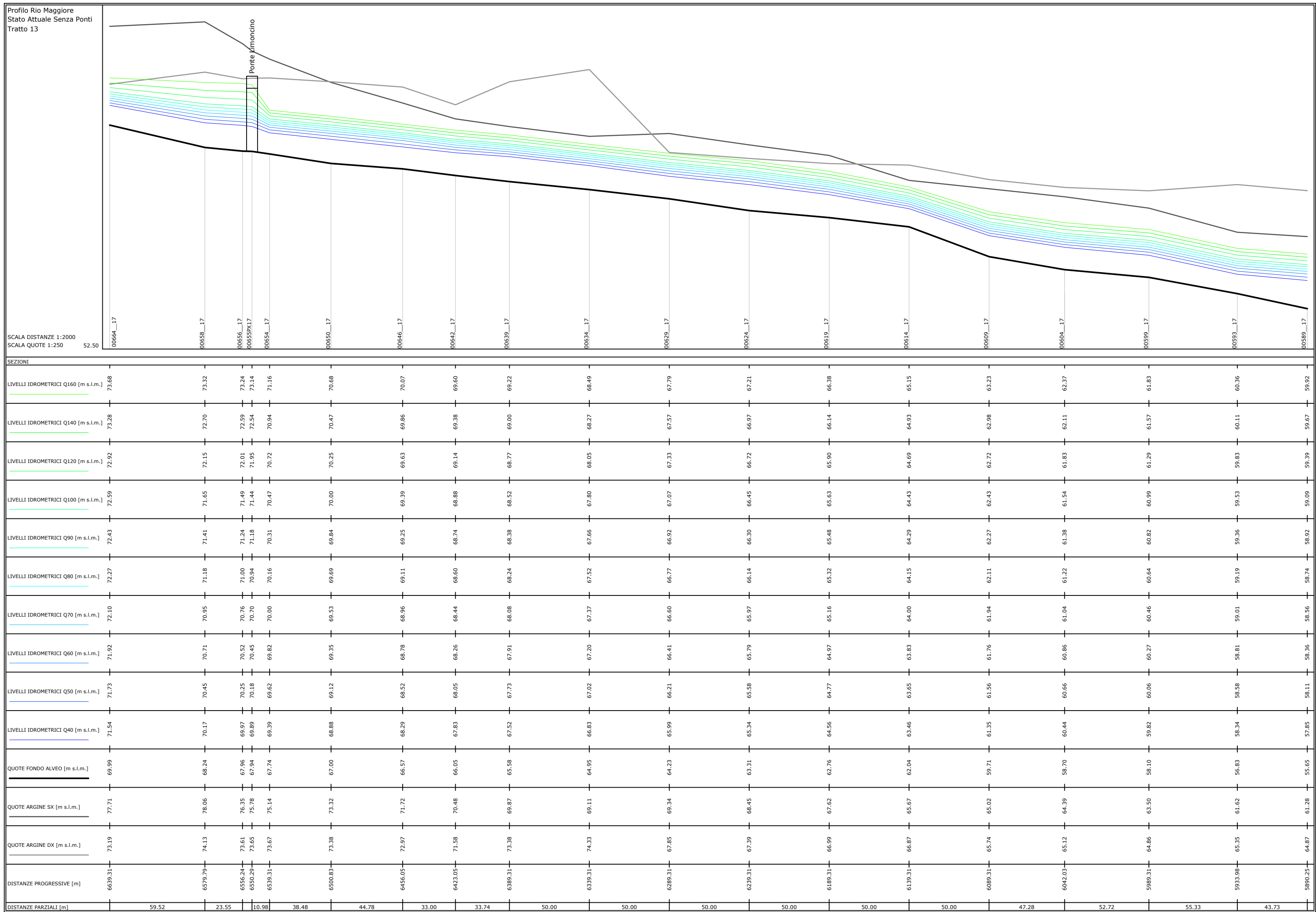
Profilo Rio Maggiore
Stato Attuale Senza Ponti
Tratto 12

SCALA DISTANZE 1:2000
SCALA QUOTE 1:250



SEZIONI

LIVELLI IDROMETRICI Q160 [m s.l.m.]	59.29	58.63	57.90	57.72	57.42	57.12	56.61	56.13	55.52	54.91	54.34	54.18	53.71	52.99	51.14	49.21	47.63
LIVELLI IDROMETRICI Q140 [m s.l.m.]	59.04	58.38	57.66	57.48	57.20	56.91	56.43	55.95	55.31	54.70	54.10	53.94	53.47	52.37	50.93	49.03	47.36
LIVELLI IDROMETRICI Q120 [m s.l.m.]	58.77	58.11	57.39	57.23	56.96	56.68	56.22	55.73	55.07	54.46	53.83	53.67	53.19	52.11	50.71	48.85	47.06
LIVELLI IDROMETRICI Q100 [m s.l.m.]	58.47	57.81	57.09	56.93	56.68	56.40	55.95	55.44	54.78	54.17	53.54	53.38	52.89	51.83	50.47	48.66	46.74
LIVELLI IDROMETRICI Q90 [m s.l.m.]	58.30	57.65	56.93	56.77	56.52	56.25	55.81	55.29	54.62	54.01	53.39	53.22	52.73	51.68	50.34	48.57	46.56
LIVELLI IDROMETRICI Q80 [m s.l.m.]	58.13	57.48	56.75	56.60	56.36	56.09	55.66	55.13	54.45	53.84	53.22	53.05	52.56	51.52	50.21	48.47	46.37
LIVELLI IDROMETRICI Q70 [m s.l.m.]	57.94	57.29	56.57	56.42	56.18	55.92	55.49	54.96	54.26	53.65	53.05	52.87	52.38	51.35	50.07	48.37	46.17
LIVELLI IDROMETRICI Q60 [m s.l.m.]	57.73	57.08	56.36	56.21	55.97	55.70	55.27	54.74	54.04	53.44	52.85	52.67	52.19	51.16	49.91	48.27	45.96
LIVELLI IDROMETRICI Q50 [m s.l.m.]	57.50	56.86	56.10	55.94	55.69	55.41	54.96	54.46	53.79	53.19	52.62	52.45	51.98	50.96	49.75	48.17	45.74
LIVELLI IDROMETRICI Q40 [m s.l.m.]	57.26	56.61	55.84	55.68	55.41	55.12	54.61	54.09	53.49	52.90	52.38	52.22	51.75	50.73	49.57	48.06	45.49
QUOTE FONDO ALVEO [m s.l.m.]	55.12	54.69	53.98	53.63	53.56	53.23	52.19	51.40	51.11	50.61	50.60	50.49	50.06	48.81	47.97	47.15	43.68
QUOTE ARGINE SX [m s.l.m.]	60.98	59.65	58.81	58.79	59.34	58.97	56.95	55.52	55.41	54.53	56.00	54.34	54.22	53.83	53.04	51.00	49.55
QUOTE ARGINE DX [m s.l.m.]	61.01	60.63	59.19	58.31	58.01	57.63	57.11	56.08	55.10	54.62	54.53	54.37	54.12	53.61	53.17	54.00	54.00
DISTANZE PROGRESSIVE [m]	5639.31	5789.31	5737.94	5712.81	5688.76	5659.06	5606.75	5554.45	5505.14	5458.21	5426.82	5414.60	5403.53	5374.89	5330.72	5290.68	5275.31
DISTANZE PARZIALI [m]		50.00	51.37	25.13	24.05	29.70	52.31	52.30	49.31	46.93	31.39	12.22	11.07	28.64	44.17	40.04	15.37



RISULTATI MODELLO 1D TRATTO TOMBATO

STUDIO DEL TRATTO TOMBATO DEL RIO MAGGIORE

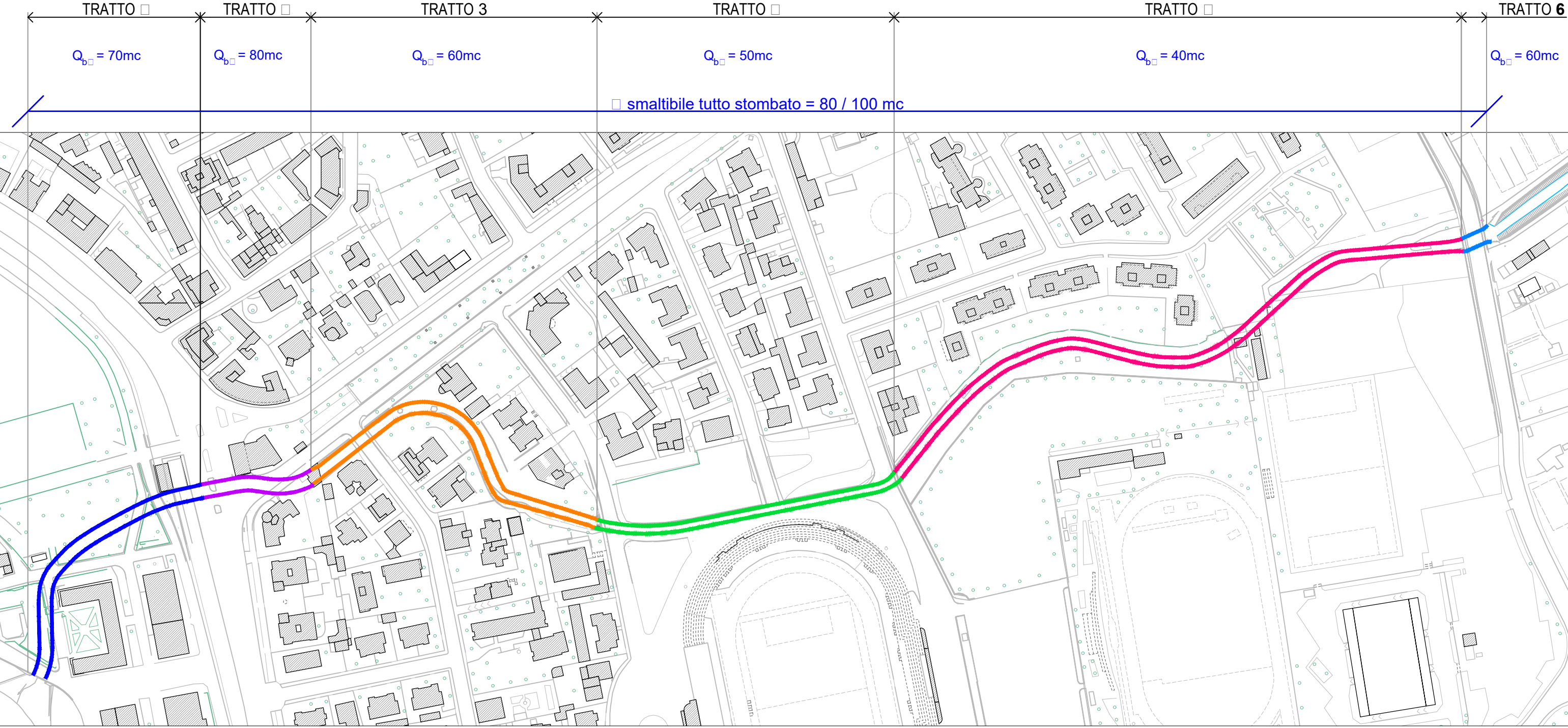
Dalla foce presso l'Accademia Navale a Via Cattaneo

PORTATE IDROLOGICHE

TR 30 □ 70mc/s

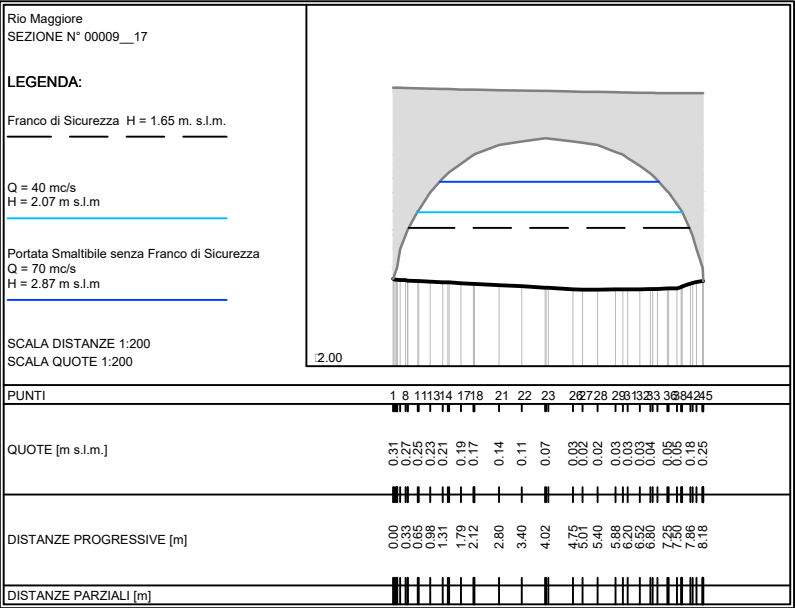
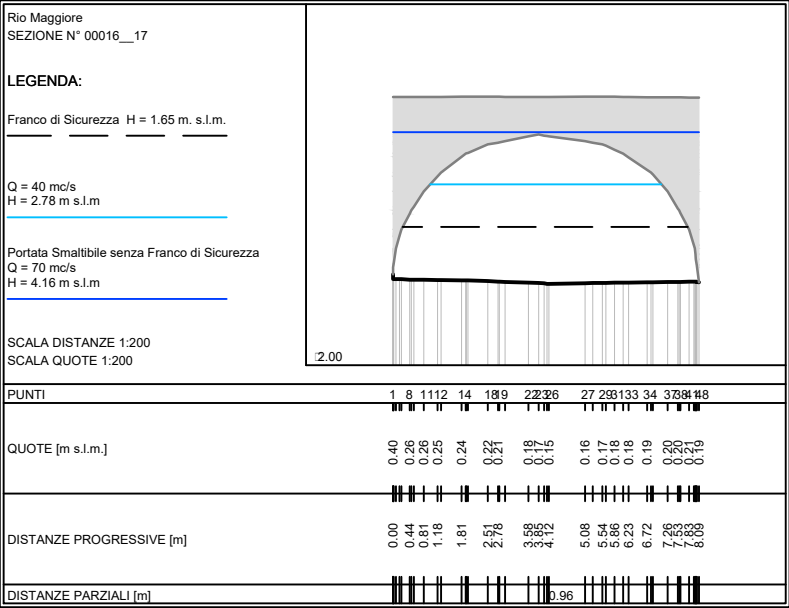
TR 200 □ 100MC/S

EVENTO □ 140MC/S

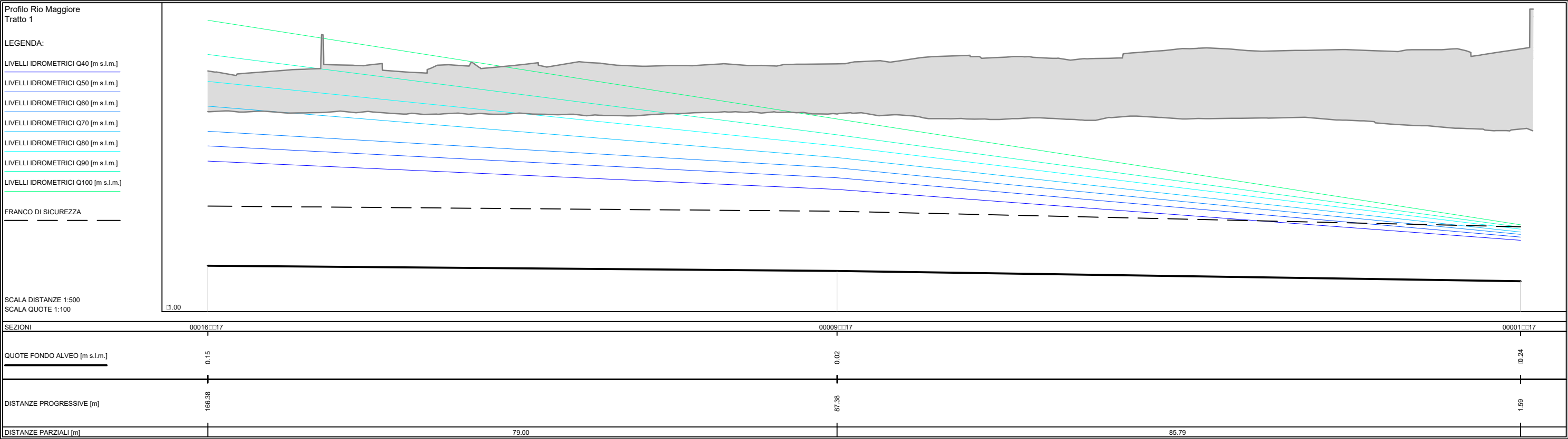


STUDIO DEL TRATTO TOMBATO DEL RIO MAGGIORE

Tratto □ - Verifica Officiosità Idraulica



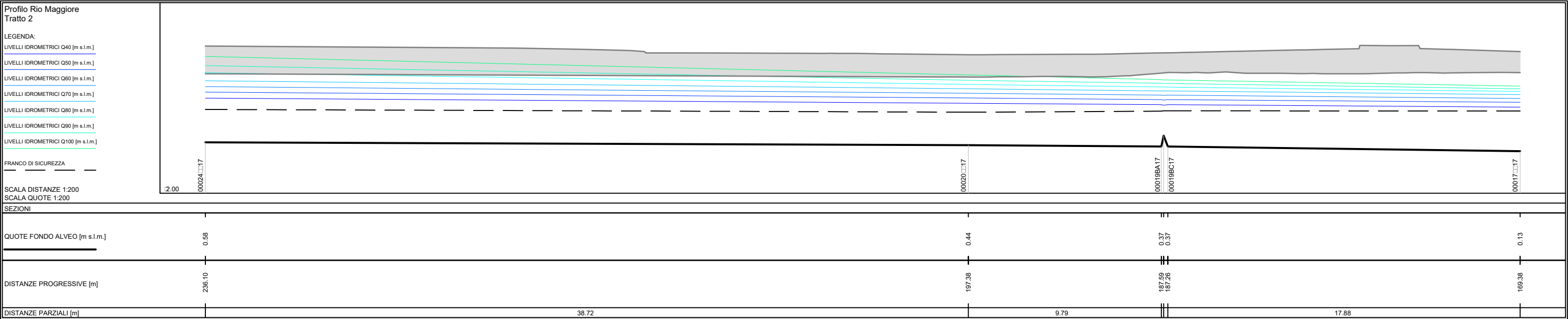
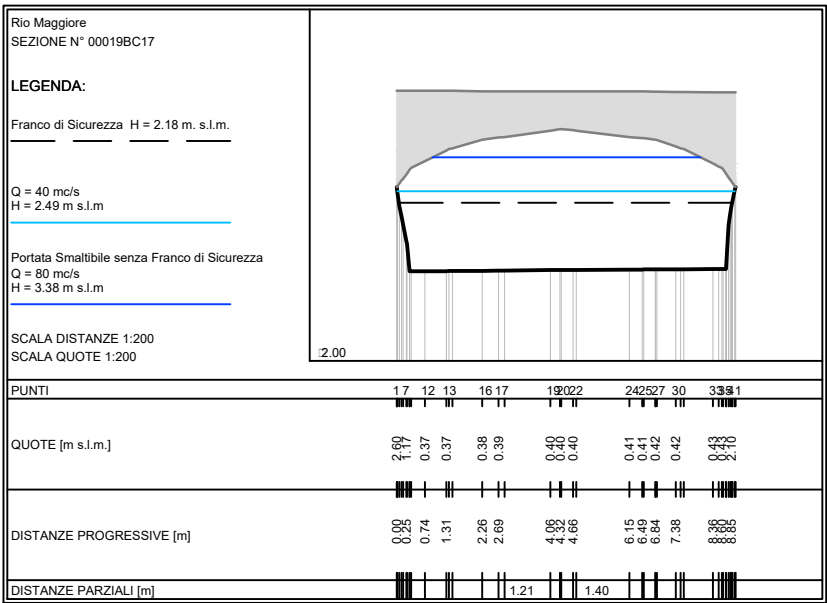
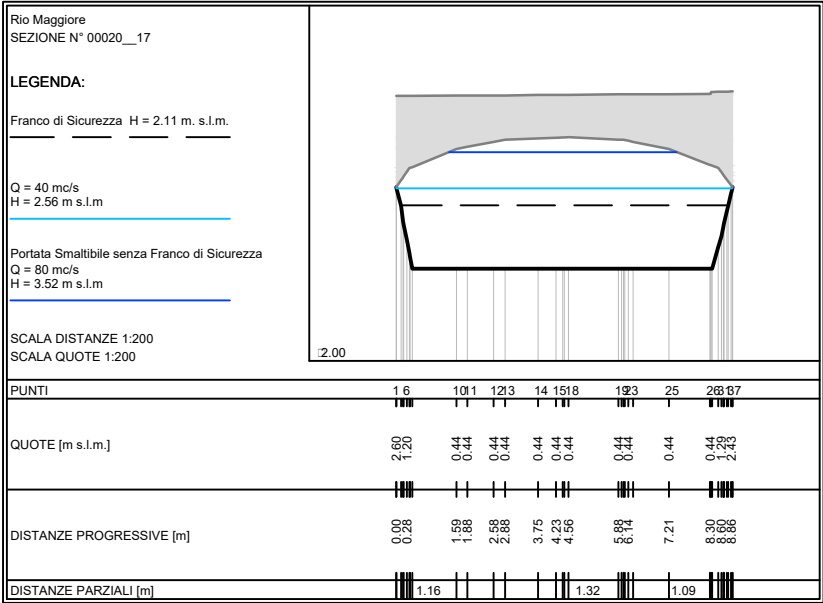
		Sezione	00016__17	00009__17	00001__17
		quota fondo alveo [m slm]	0.16	0.02	-0.23
		quota intradosso [m slm]	4.10	4.03	3.65
		quota franco sicurezza [m slm]	1.65	1.52	1.13
Q [mc/s]	40	01/02/18 02:55	2.78	2.07	0.79
	50	01/02/18 05:55	3.16	2.36	0.87
	60	01/02/18 08:55	3.53	2.61	0.94
	70	01/02/18 11:55	4.16	2.87	1.00
	80	01/02/18 14:55	4.78	3.16	1.07
	90	01/02/18 17:55	5.46	3.44	1.12
	100	01/02/18 20:55	6.32	3.84	1.18



STUDIO DEL TRATTO TOMBATO DEL RIO MAGGIORE

Tratto □ - Verifica Officiosità Idraulica

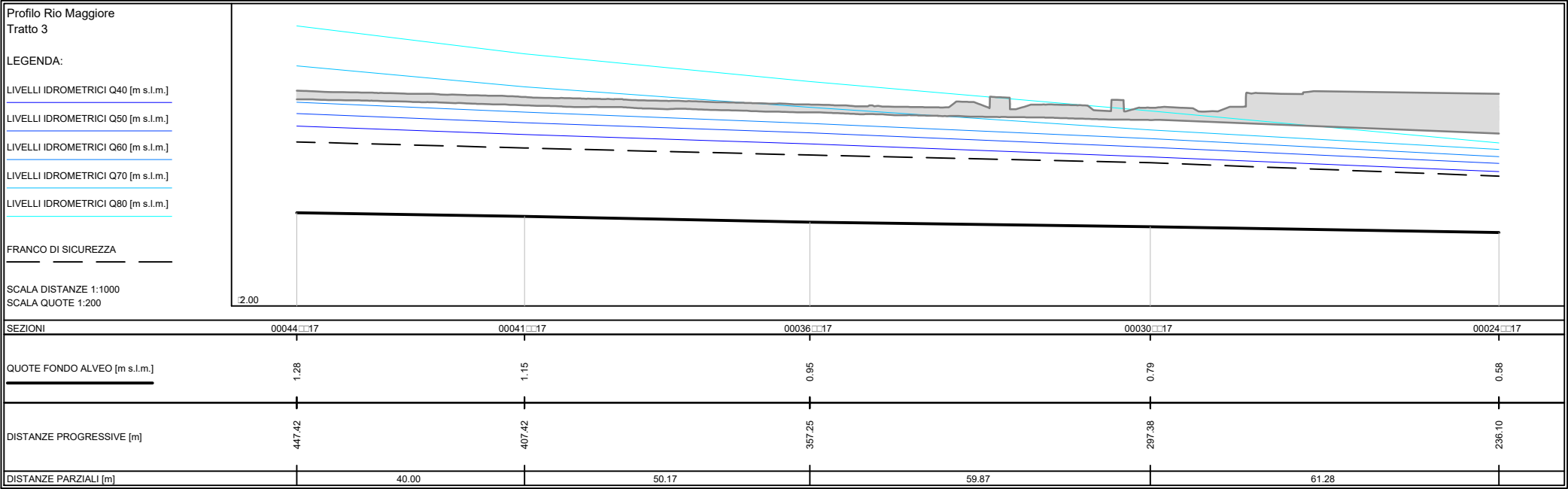
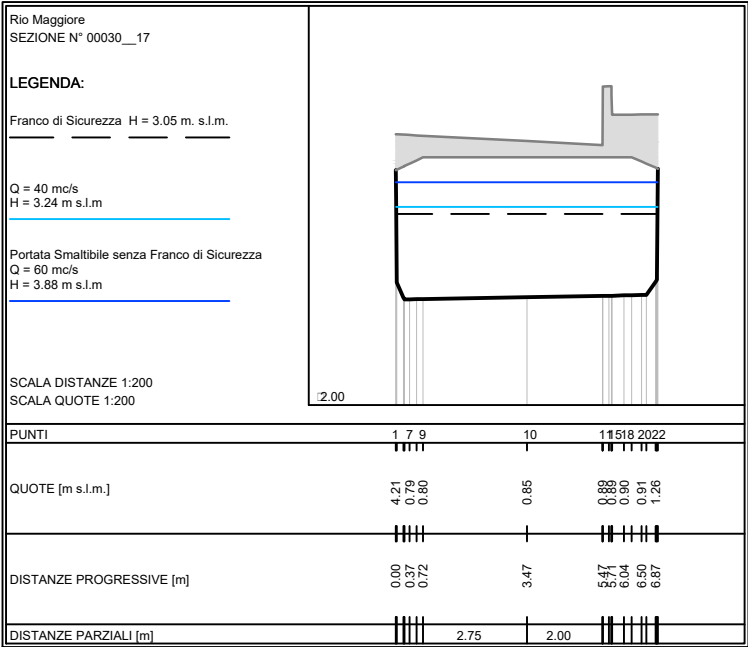
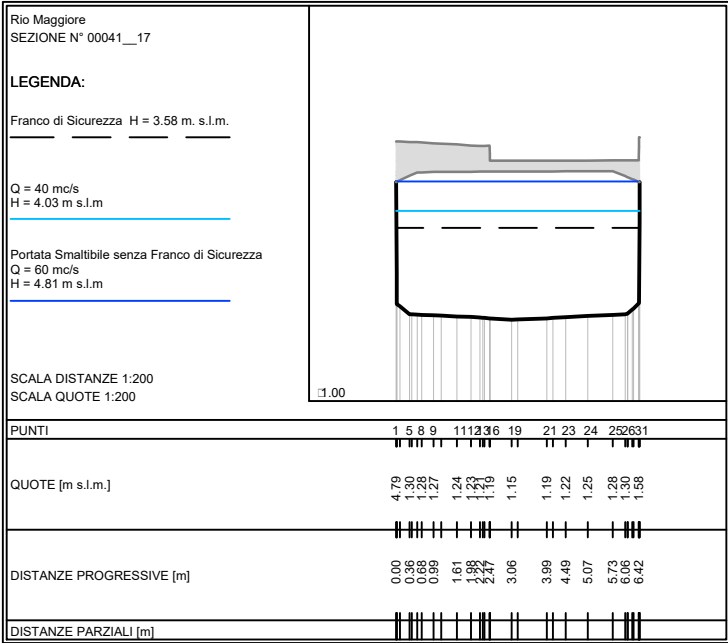
		Sezione	00024__17	00020__17	00019BA17	00019BB17	00019BC17	00017__17
		quota fondo alveo [m slm]	0.58	0.44	0.37	0.91	0.36	0.14
		quota intradosso [m slm]	4.05	3.91	4.10	4.11	4.13	4.15
		quota franco sicurezza [m slm]	2.25	2.11	2.16	2.18	2.18	2.17
Q [mc/s]	40	01/02/18 02:55	2.82	2.56	2.49	2.46	2.49	2.37
	50	01/02/18 05:55	3.13	2.83	2.75	2.72	2.75	2.61
	60	01/02/18 08:55	3.41	3.07	2.98	2.96	2.98	2.81
	70	01/02/18 11:55	3.70	3.30	3.19	3.19	3.19	3.00
	80	01/02/18 14:55	4.11	3.52	3.39	3.39	3.38	3.16
	90	01/02/18 17:55	4.47	3.73	3.58	3.57	3.57	3.30
	100	01/02/18 20:55	4.94	4.00	3.76	3.75	3.75	3.43



STUDIO DEL TRATTO TOMBATO DEL RIO MAGGIORE

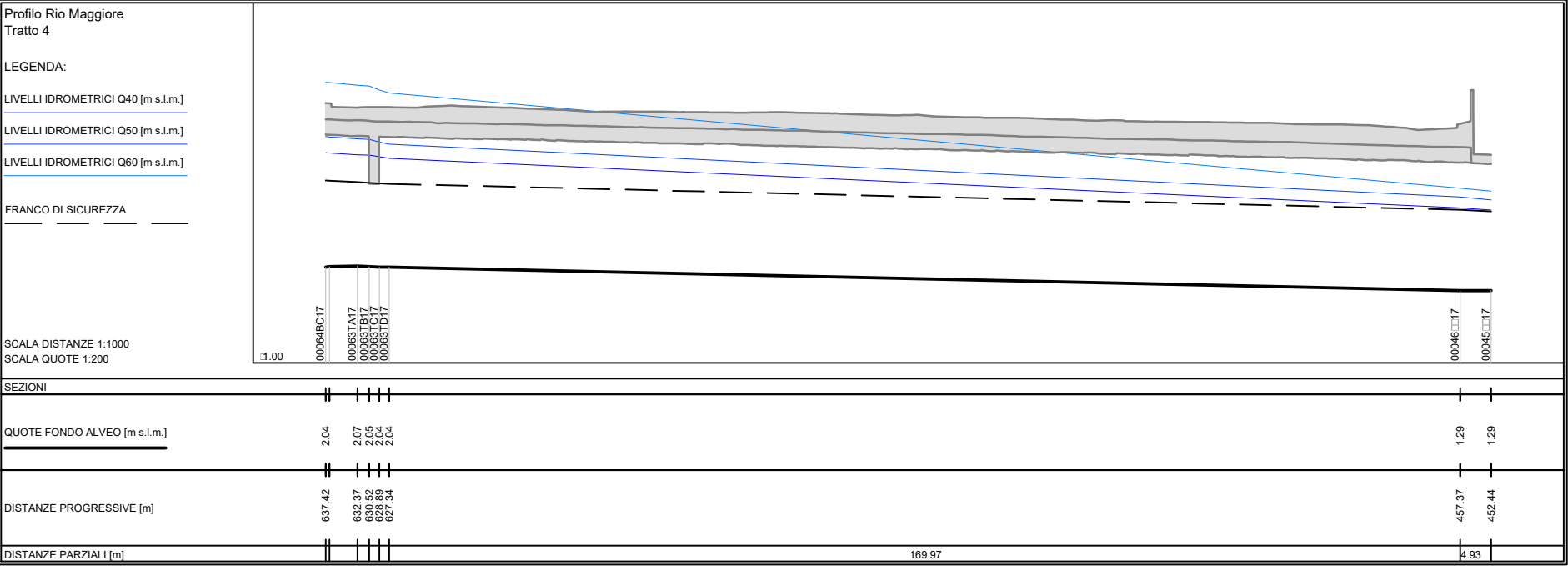
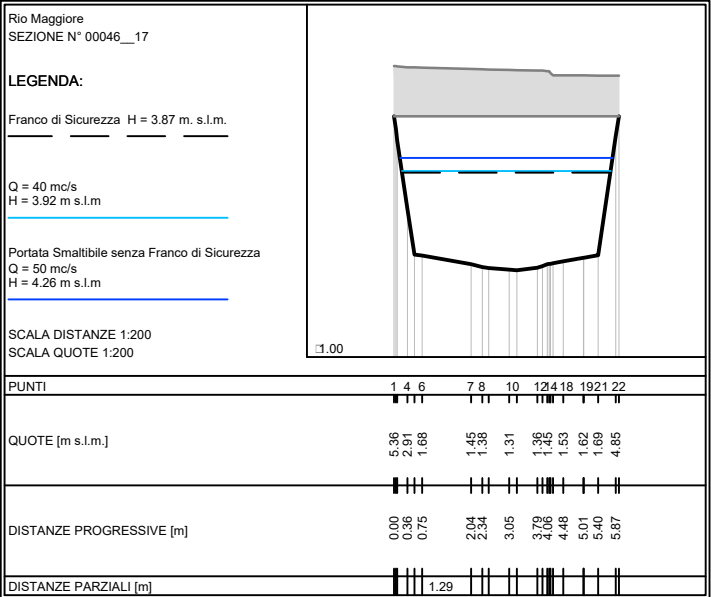
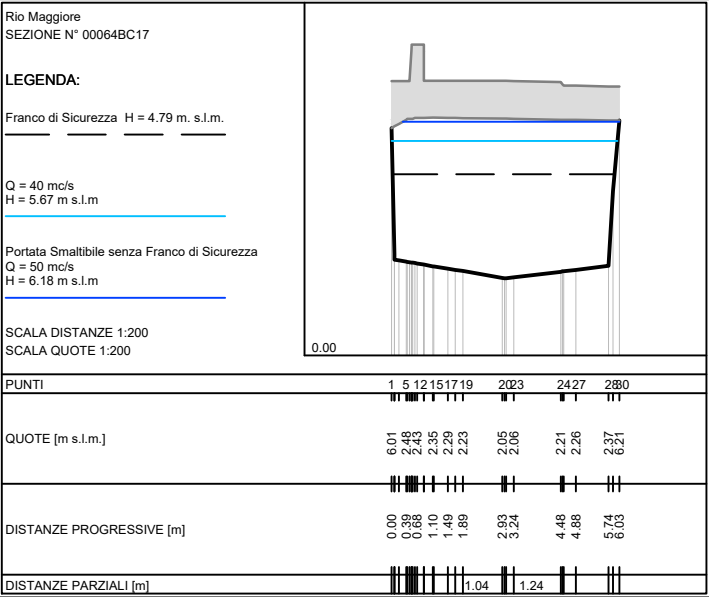
Tratto □ - Verifica Officiosità Idraulica

		Sezione	00044__17	00041__17	00036__17	00030__17	00024__17
		quota fondo alveo [m slm]	1.29	1.15	0.95	0.79	0.58
		quota intradosso [m slm]	5.28	5.08	4.83	4.55	4.05
		quota franco sicurezza [m slm]	3.78	3.58	3.33	3.05	2.25
Q [mc/s]	40	01/02/18 02:55	4.32	4.03	3.70	3.24	2.72
	50	01/02/18 05:55	4.76	4.44	4.09	3.58	3.01
	60	01/02/18 08:55	5.16	4.81	4.42	3.88	3.25
	70	01/02/18 11:55	6.44	5.70	4.98	4.19	3.50
	80	01/02/18 14:55	7.84	6.86	5.89	4.86	3.73



STUDIO DEL TRATTO TOMBATO DEL RIO MAGGIORE
Tratto □ - Verifica Officiosità Idraulica

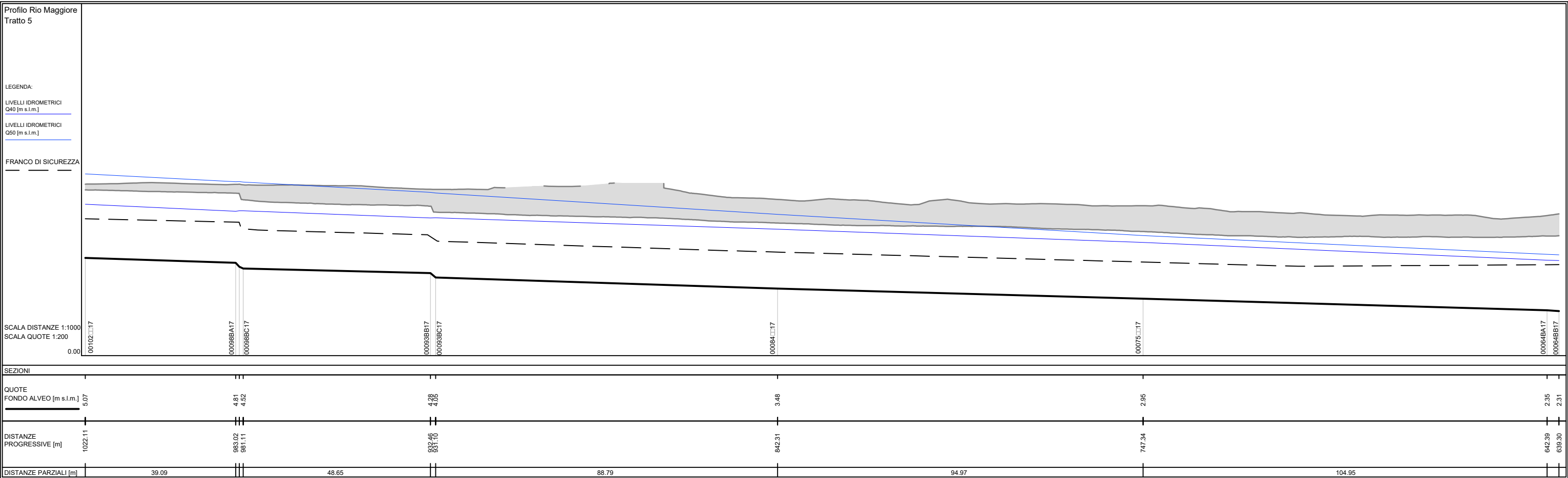
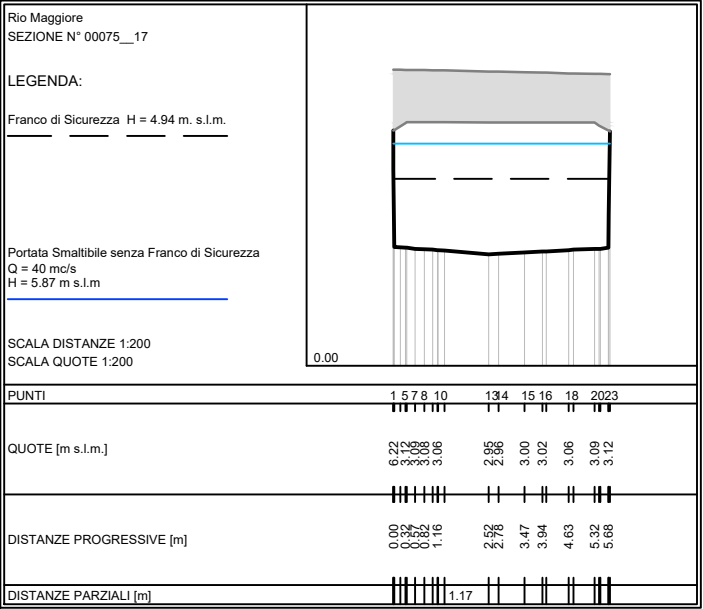
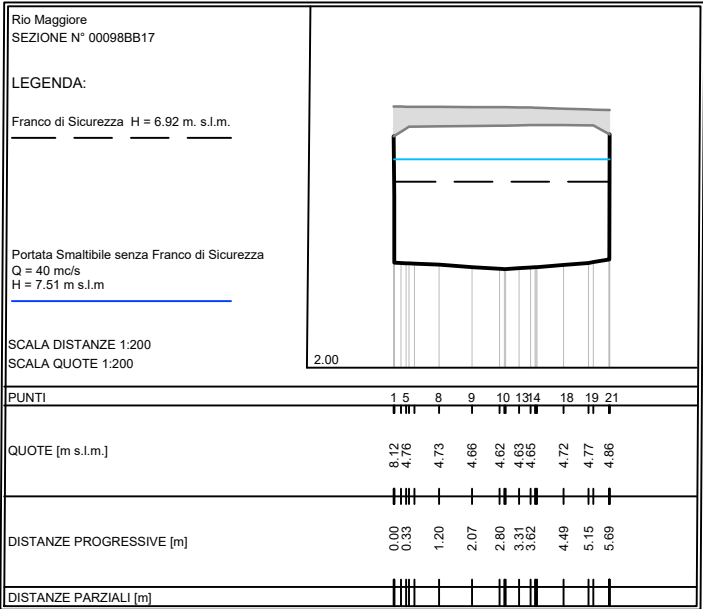
		Sezione	00064BC17	00064BD17	00063TA17	00063TB17	00063TC17	00063TD17	00046__17	00045__17
		quota fondo alveo [m slm]	2.24	2.05	2.07	2.05	2.05	2.04	1.29	1.29
		quota intradosso [m slm]	6.29	6.25	6.21	4.71	4.71	6.18	5.37	5.32
		quota franco sicurezza [m slm]	4.79	4.75	4.71	3.21	3.21	4.68	3.87	3.82
Q [mc/s]	40	01/02/18 02:55	5.67	5.66	5.60	5.59	5.54	5.49	3.92	3.85
	50	01/02/18 05:55	6.18	6.17	6.11	6.09	6.01	5.94	4.26	4.17
	60	01/02/18 08:55	7.90	7.89	7.81	7.78	7.66	7.56	4.54	4.45



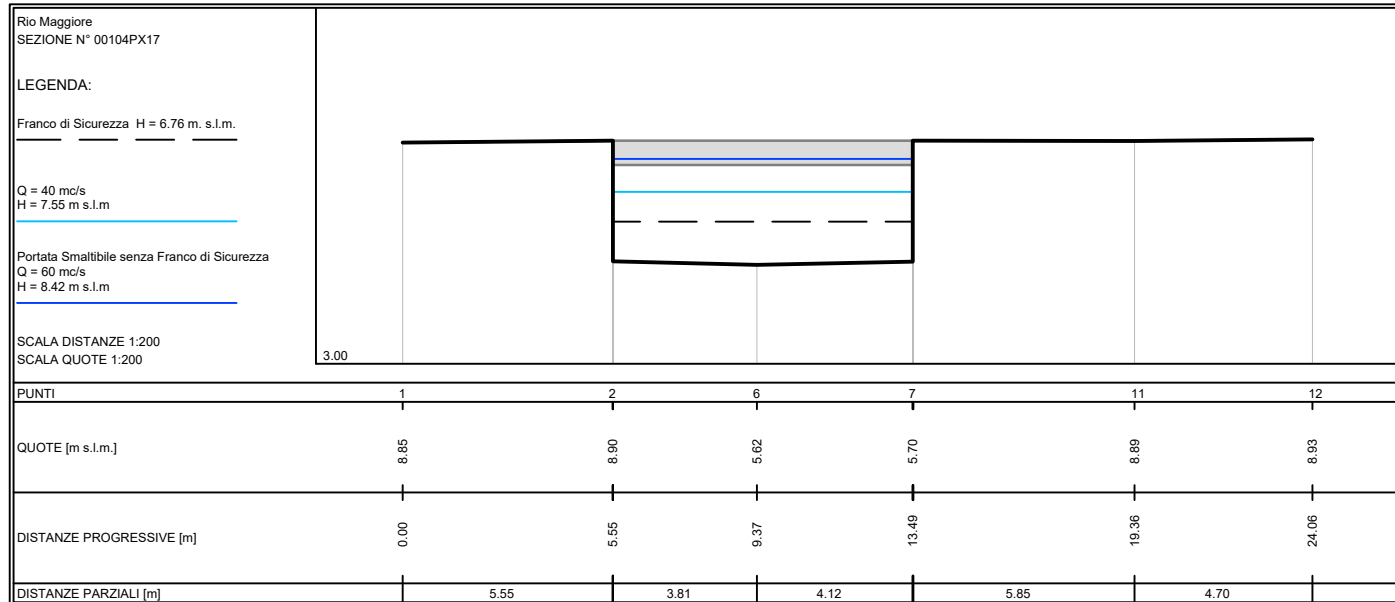
STUDIO DEL TRATTO TOMBATO DEL RIO MAGGIORE

Tratto □ - Verifica Officiosità Idraulica

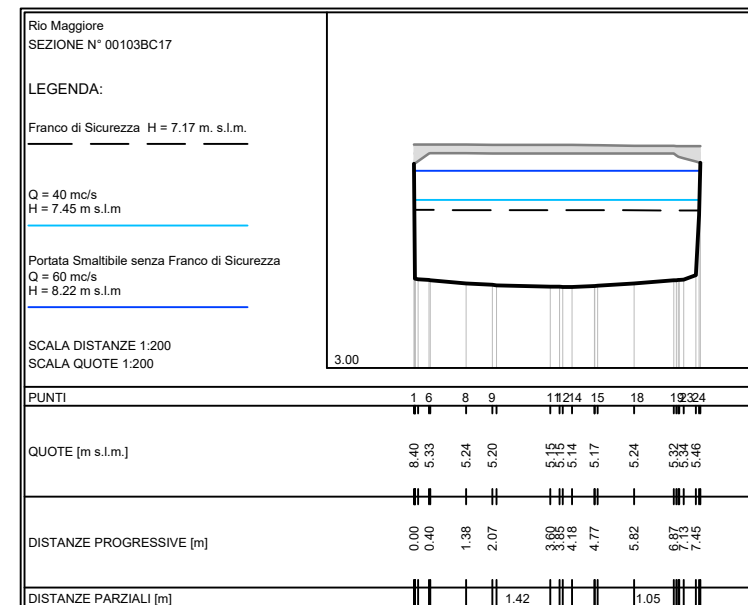
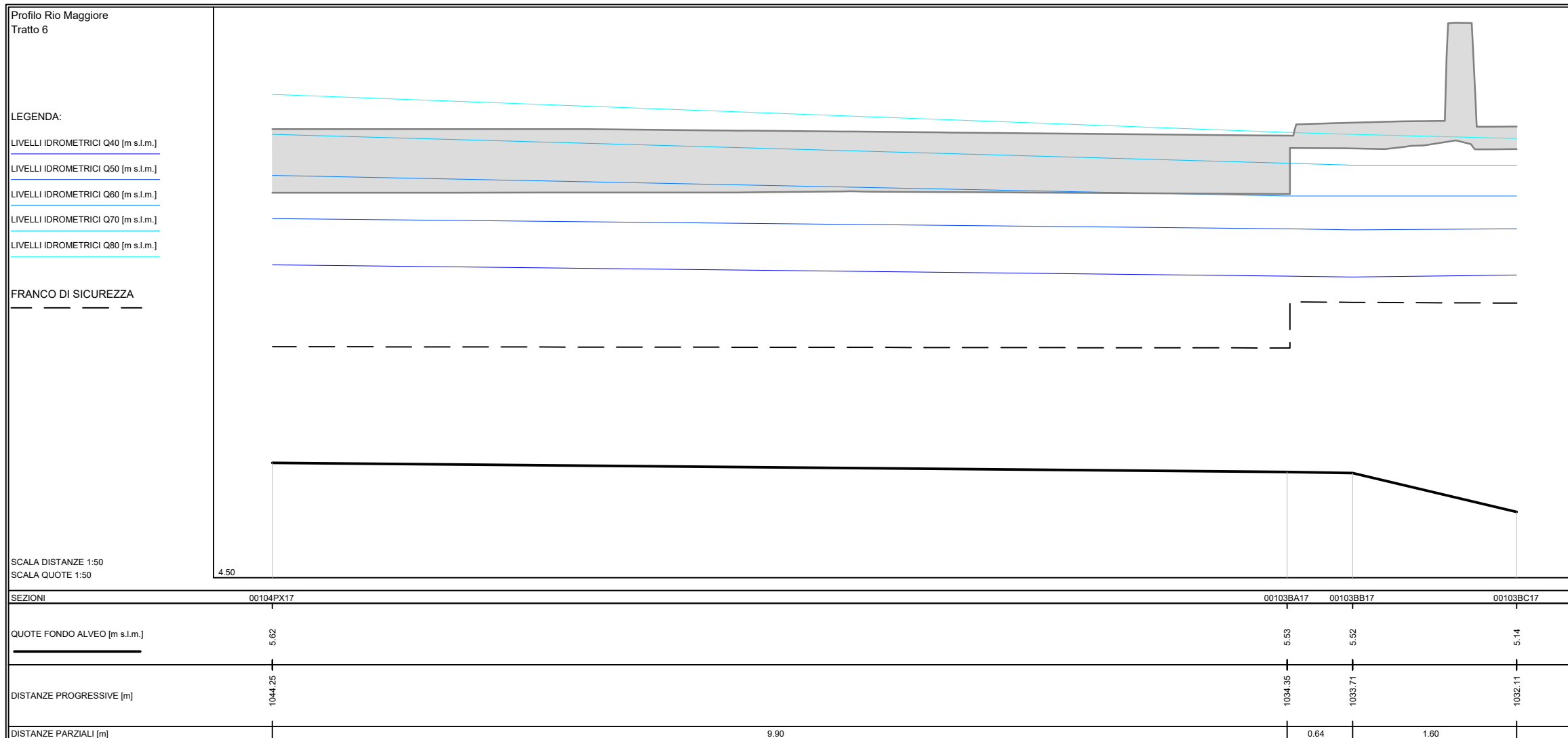
		Sezione	00102__17	00098BA17	00098BB17	00098BC17	00093BB17	00093BC17	00084__17	00075__17	00064BA17	00064BB17
		quota fondo alveo [m slm]	5.07	4.81	4.61	4.52	4.28	4.06	3.48	2.95	2.35	2.31
		quota intradosso [m slm]	8.61	8.43	8.42	8.09	7.75	7.44	6.88	6.44	6.22	6.28
		quota franco sicurezza [m slm]	7.11	6.93	6.92	6.59	6.25	5.94	5.38	4.94	4.72	4.78
Q [mc/s]	40	01/02/18 02:55	7.85	7.49	7.51	7.51	7.14	7.15	6.56	5.87	4.95	4.93
	50	01/02/18 05:55	9.43	9.02	9.03	9.00	8.47	8.44	7.33	6.23	5.25	5.23

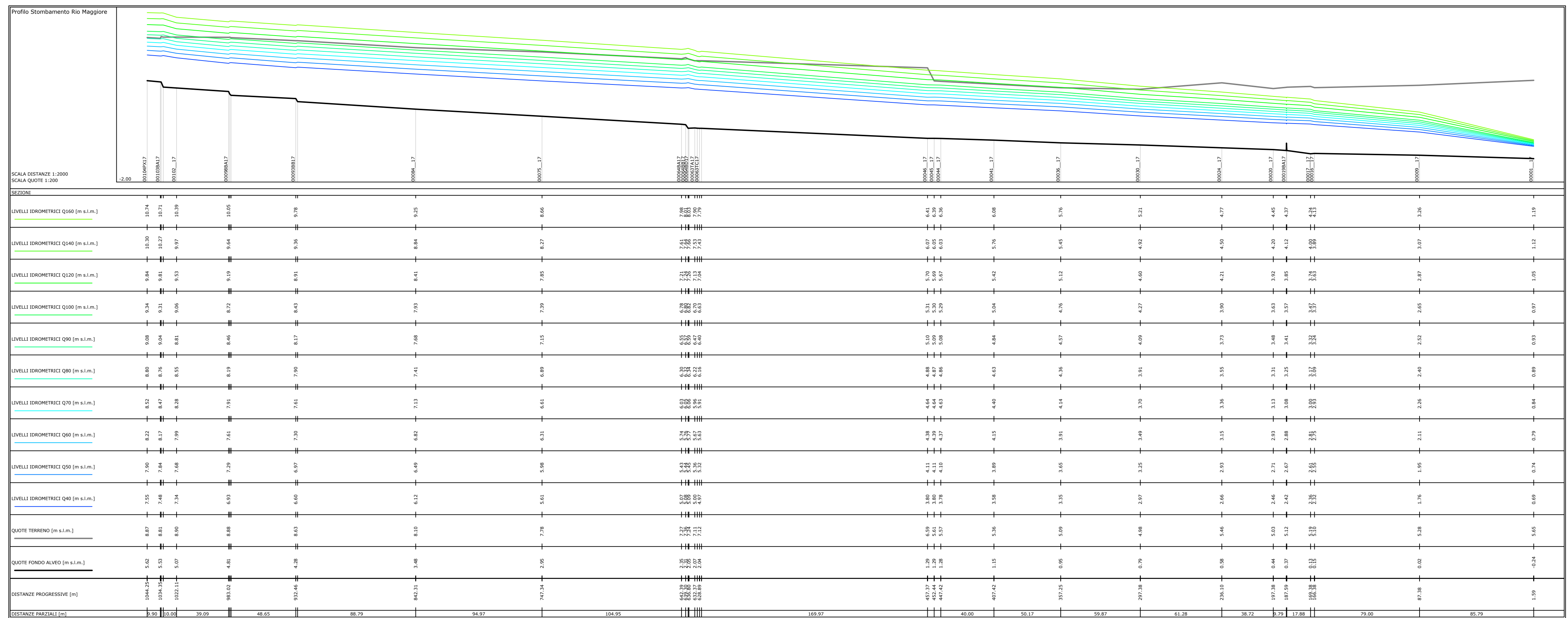


STUDIO DEL TRATTO TOMBATO DEL RIO MAGGIORE
Tratto **6** - Verifica Officiosità Idraulica



		Sezione	00104PX17	00103BA17	00103BB17	00103BC17
		quota fondo alveo [m slm]	5.62	5.53	5.52	5.14
		quota intradosso [m slm]	8.26	8.24	8.73	8.67
		quota franco sicurezza [m slm]	6.76	6.74	7.23	7.17
Q [mc/s]	40	01/02/18 02:55	7.55	7.44	7.43	7.45
	50	01/02/18 05:55	8.00	7.90	7.89	7.90
	60	01/02/18 08:55	8.42	8.22	8.22	8.22
	70	01/02/18 11:55	8.82	8.54	8.52	8.52
	80	01/02/18 14:55	9.21	8.84	8.82	8.78





APPENDICE 3 – RISULTATI MODELLO IDRAULICO FOSSO LIMONCINO

