

Provincia di Cuneo
S.S. 28 del Colle di Nava
Lavori di realizzazione della Tangenziale di Mondovì con collegamento alla S.S. 28 Dir – 564 e al casello A6 "Torino–Savona" – III Lotto (Variante di Mondovì)

PROGETTO DEFINITIVO

COD. T008

PROGETTAZIONE: RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO PROGETTISTI	MANDATARIA: 	MANDANTI:  POLITECNICA BUILDING FOR HUMANS	
IL RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE: <i>Ing. Andrea Renso – TECHNITAL Ordine Ingegneri Provincia di Verona n. A2413</i>	IL PROGETTISTA: <i>Ing. Andrea Renso – TECHNITAL Ordine Ingegneri Provincia di Verona n. A2413</i>		
IL GEOLOGO: <i>Geol. Emanuele Fresia – TECHNITAL Ordine Geologi Veneto n. A501</i>	GRUPPO DI PROGETTAZIONE: COORDINAMENTO PROGETTAZIONE E PROGETTAZIONE STRADALE: <i>Ing. Carlo Vittorio Matildi – MATILDI + PARTNERS Ordine Ingegneri Provincia di Bologna n. 6457/A</i> COORDINAMENTO PROGETTAZIONE E COORDINATORE STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE: <i>Ing. Edoardo Piccoli – TECHNITAL Ordine Ingegneri Provincia di Verona n. A3381</i>		
IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE: <i>Ing. Paolo Barrasso – MATILDI + PARTNERS Ordine Ingegneri Provincia di Bologna n. A9513</i>	OPERE D'ARTE MAGGIORI GALLERIA: <i>Ing. Corrado Pesce – TECHNITAL Ordine Ingegneri Provincia di Verona n. A1984</i> OPERE D'ARTE MAGGIORI PONTI E MINORI: <i>Ing. Stefano Isani – MATILDI + PARTNERS Ordine Ingegneri Provincia di Bologna n. A4550</i>		
VISTO: IL RESP. DEL PROCEDIMENTO: <i>Ing. Giuseppe Danilo Malgeri</i>	GEOTECNICA: <i>Ing. Alessandro Rizzo – TECHNITAL Ordine Ingegneri Provincia di Milano n. A19598</i> IDROLOGIA ED IDRAULICA: <i>Ing. Simone Venturini – TECHNITAL Ordine Ingegneri Provincia di Verona n. A2515</i>		
PROTOCOLLO:	DATA:		

04 – IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica–morfologica Torrente Ellero

CODICE PROGETTO	NOME FILE	PROGR. ELAB.	REV.	SCALA:		
DPT000008D16	04.03_P00_ID00_IDR_RE02_D	04.03	D	-		
	CODICE ELAB.					
	P00 ID00 IDR RE02					
D	ISTRUTTORIE CSLPP e VIA	Apr. 2021	Tecnital	Cacciatori	Venturini	Renso
C	-					
B	-					
A	-					
REV.	DESCRIZIONE	DATA	SOCIETA'	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

SOMMARIO

1	PREMESSA	1
2	L'INTERVENTO DI PROGETTO	2
3	CARATTERIZZAZIONE MORFOLOGICA E GRANULOMETRICA DELL'ALVEO	3
3.1	IMMAGINI SIGNIFICATIVE DELL'AREA FLUVIALE.....	3
3.2	ANALISI GRANULOMETRICHE.....	8
3.3	APPROFONDIMENTI DELLA REGIONE PIEMONTE.....	10
3.3.1	Valutazione degli aspetti morfologici.....	10
3.3.2	Linee generali di assetto e alveo-tipo.....	12
3.4	ANALISI DELLE FOTO AEREE DISPONIBILI, VALUTAZIONE DELLE ZONE DI DIVAGAZIONE.....	12
4	MODELLAZIONE IDRAULICA E MORFOLOGICA	16
4.1	IL MODELLO NUMERICO.....	17
4.2	LA GEOMETRIA DEL MODELLO.....	22
4.3	CONDIZIONI INIZIALI E AL CONTORNO.....	25
4.4	DEFINIZIONE DELLE SCABREZZE E RAPPRESENTAZIONE GRANULOMETRICA.....	26
5	RISULTATI DELLA MODELLAZIONE NUMERICA	27
5.1	SIMULAZIONI A FONDO FISSO.....	28
5.1.1	Analisi dei livelli idrici.....	28
5.1.2	Analisi del campo di velocità.....	33
5.1.3	Caratteristiche della corrente in approccio al viadotto.....	38
5.1.4	Tensioni tangenziali al fondo, portata critica e pendenza di equilibrio.....	39
5.2	SIMULAZIONI A FONDO MOBILE.....	41
5.2.1	Variazioni altimetriche dell'alveo – simulazione “portata critica”.....	42
5.2.2	Variazioni altimetriche dell'alveo – simulazione TR 200 anni.....	46
5.2.3	Divagazioni planimetriche – simulazione “portata critica”.....	50
5.2.4	Divagazioni planimetriche – simulazione TR 200 anni.....	53
6	CONCLUSIONI	56

1 PREMESSA

Nella presente relazione vengono trattati gli aspetti idraulici e morfologici relativi all'attraversamento stradale sul Torrente Ellero, parte delle opere previste nel progetto denominato "S.S. 28 del Colle di Nava Lavori di realizzazione della Tangenziale di Mondovì con collegamento alla S.S. 28 Dir - 564 ed al casello A6 "Torino-Savona" - III Lotto (Variante di Mondovì)".

Lo studio specialistico analizza il corso d'acqua nell'intorno del viadotto di progetto e sarà sviluppato in tre parti principali:

- Descrizione morfologica del corso d'acqua e granulometria del materiale in alveo;
- Simulazione a "fondo fisso": analisi del campo di moto che si instaura in occasione degli eventi di piena, rispetto allo scenario attuale e di progetto. Le principali grandezze idrodinamiche saranno valutate attraverso un modello numerico bidimensionale. L'assetto geometrico di riferimento dell'alveo sarà quello attuale (condizione ideale "a fondo fisso");
- Simulazione a "fondo mobile": Analisi delle tendenze evolutive del corso d'acqua attraverso l'implementazione di un modello numerico morfologico-idraulico a "fondo mobile". Anche in questo caso verrà analizzato lo scenario attuale assieme a quello di progetto.

La descrizione morfologica del corso d'acqua consentirà di inserire l'opera di attraversamento nell'attuale contesto fluviale, mentre le simulazioni numeriche permetteranno di valutare in termini qualitativi/quantitativi gli effetti sul campo di moto e le variazioni dell'alveo indotte dalle opere previste in progetto.

Vengono allegate alla presente relazione le seguenti tavole grafiche:

Codifica	Titolo elaborato	Formato
04.19_P00_ID00_IDR_PL01_D	Planimetria livelli idrici, piena TR 200 anni, confronto fra stato di fatto e stato di progetto	A1
04.20_P00_ID00_IDR_PL02_D	Planimetria velocità, piena TR 200 anni, confronto fra stato di fatto e stato di progetto	A1
04.21_P00_ID00_IDR_PL03_D	Sezioni Torrente Ellero, livelli idrici piena TR 200 anni, stato di fatto e stato di progetto	A1

2 L'INTERVENTO DI PROGETTO

La nuova tangenziale di Mondovì (Cuneo) rientra nel piano di riordino del sistema viario del Piemonte Sud Occidentale. Sviluppata interamente nel territorio comunale di Mondovì, drena il flusso di traffico proveniente dal quadrante Sud-Est collegando la S.S. 28, la S.P. 5 e la S.S. 564 con l'Autostrada A6 Torino-Savona presso lo svincolo di Mondovì. Il viadotto Ellero scavalca l'omonimo corso d'acqua, posizionandosi lungo una direzione non ortogonale rispetto all'alveo di magra del torrente. In figura è riportato l'inserimento fotografico dell'opera di attraversamento.

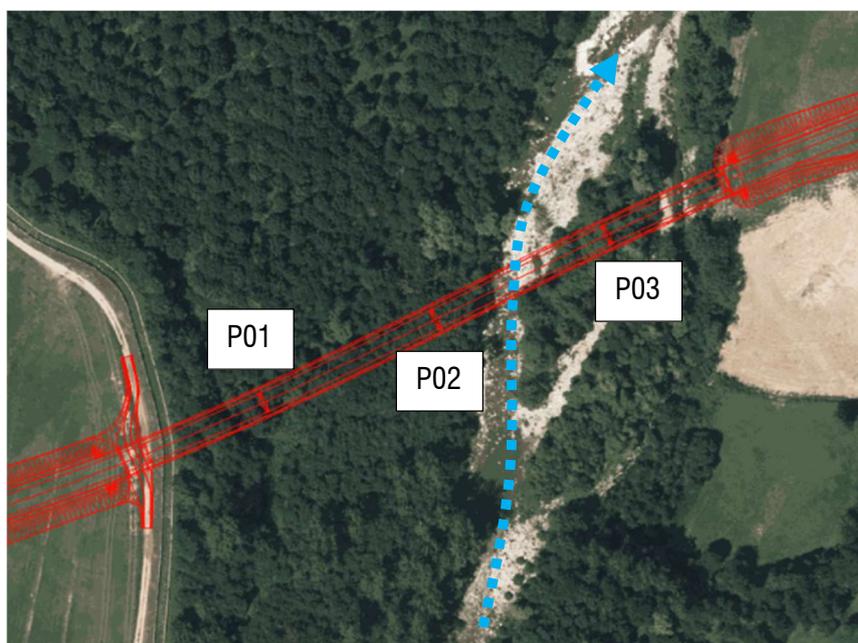


Figura 1 – Inquadramento planimetrico dell'attraversamento stradale sul Torrente Ellero, ortofoto AGEA 2018; (P01, P02, P03: pile del viadotto in progetto)

L'opera in oggetto è costituita complessivamente da quattro campate con la seguente scansione di luci 48 m + 72 m + 72 m + 48 m per una lunghezza complessiva di 240 m. Le tre pile in progetto, sono state studiate con una sezione circolare di diametro 3 m, in grado di minimizzare l'interferenza idraulica, e hanno un'altezza massima dei fusti di poco minore a 10 m (pianta impalcato e profilo longitudinale in Figura 2). Le pile vengono denominate P01, P02 e P03, seguendo il verso sinistra-destra idraulica. La spalla destra e quella di sinistra sono esterne all'area occupata dal corso d'acqua, sia in condizioni di magra che in condizioni di piena.

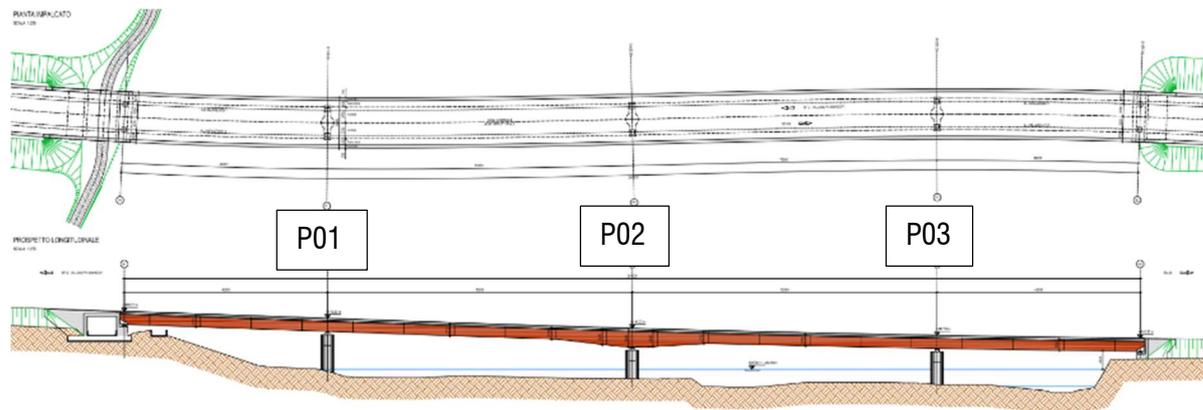


Figura 2 – Pianta impalcato e profilo longitudinale

3 CARATTERIZZAZIONE MORFOLOGICA E GRANULOMETRICA DELL'ALVEO

La caratterizzazione morfologica del Torrente Ellero è stata sviluppata facendo riferimento a diverse fonti di informazioni:

- Fotografie scattate in occasione dei sopralluoghi e rilievi;
- Analisi granulometriche;
- Rilievi LIDAR;
- Ortofoto storiche disponibili;
- Monografia “Analisi e valutazione degli aspetti morfologici - fiume Ellero - attività 2017-2018 Arpa Piemonte”;
- “Carta alveo-tipi e portate – BDGeo100 – Arpa Piemonte”;
- “Linee generali di assetto idrogeologico e quadro degli interventi –Bacino del Tanaro- Autorità di bacino del fiume Po”.

3.1 IMMAGINI SIGNIFICATIVE DELL'AREA FLUVIALE

Si riportano di seguito una serie di fotografie scattate in occasione dei sopralluoghi e rilievi; per ciascuna foto è riportata anche la posizione di riferimento.

Figura 3,

Figura 4,

Figura 5 e

Figura 6 sono rappresentative dell'area di intervento. In sponda destra, lungo l'asse del viadotto, è visibile un affioramento di sedimenti di tipo marnoso-sabbioso (

Figura 5) mentre, osservando la sponda sinistra in Figura 6, è evidente lo stato di erosione con affioramenti di ghiaie grossolane e ciottoli.

Attualmente l'alveo di magra è suddiviso in più tratti paralleli, uno principale e altri secondari posti in destra idraulica. Alveo principale e secondari sono interrotti da depositi di sedimenti la cui quota è sensibilmente superiore al fondo alveo. Tali forme sono attualmente rivestite da vegetazione spontanea, arbusti ed alberi (

Figura 4). In Figura 7 è indicata con linea continua la posizione dell'attuale alveo di magra principale e con linea tratteggiata quella dei secondari. Sul fondo alveo sono presenti ciottoli e ghiaie grossolane, alternati da massi.



Figura 3 – Alveo di magra principale, posizione G4, in prossimità dell'impalcato di progetto.



Figura 4 – Alveo di magra secondario, posizione G2, in prossimità dell'impalcato di progetto.



Figura 5 – Affioramento in sponda destra, posizione G1, in prossimità dell'impalcato di progetto.



Figura 6 – Sponda sinistra in erosione, posizione G5-bis, in prossimità dell'impalcato di progetto.

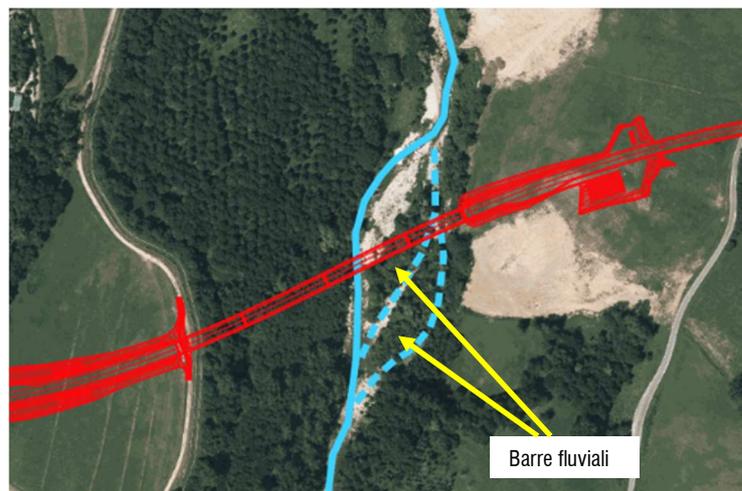


Figura 7 – Disposizione degli alvei di magra attorno al viadotto.

Nella prossima immagine è riportata una vista di un tratto di torrente posto a circa 300 metri a monte dell'area di intervento. Il corso d'acqua in questo tratto, come nel tratto a valle del viadotto in progetto, è monocursale, con la presenza quindi di un unico alveo principale



Figura 8 –Alveo di magra, posizione G8, a monte dell'impalcato di progetto.

A circa 1200 metri più a monte dell'area di intervento è attualmente collocata una traversa di derivazione. L'ostacolo funge anche da opera di stabilizzazione del fondo alveo a vantaggio dell'attraversamento stradale posto nelle immediate vicinanze (Figura 9).



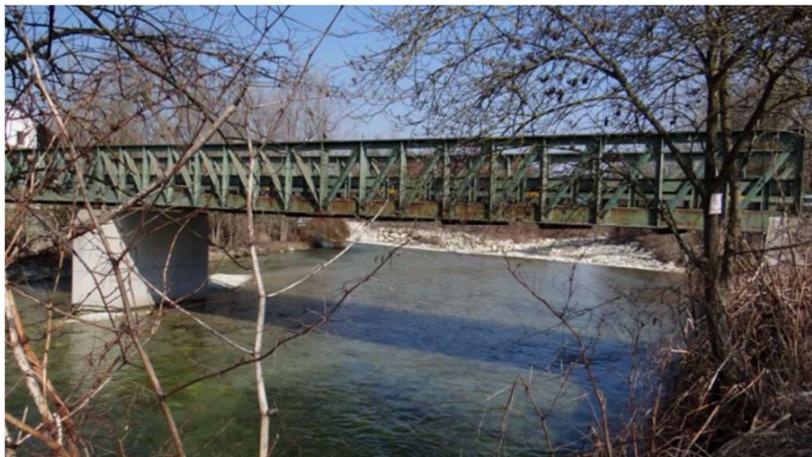


Figura 9 –Traversa di derivazione a monte dell'impalcato di progetto e ponte stradale esistente.

In Figura 10 è riportata un'immagine dell'alveo di magra, in una sezione posta 300 metri più a valle. In sponda sinistra è presente un affioramento di sedimenti marnoso-sabbiosi. Questi affioramenti si ritrovano anche nella sponda destra in corrispondenza dell'area di intervento (Figura 5). I sedimenti del fondo alveo sono ciottoli con ghiaie debolmente massosi.



Figura 10 –Alveo di magra, posizione G11, a valle dell'impalcato di progetto.

3.2 ANALISI GRANULOMETRICHE

Al fine di caratterizzare il materiale che costituisce il letto del torrente sono state eseguite diverse analisi granulometriche. Le aree di indagine sono tre, una posta in corrispondenza dell'asse del viadotto, una collocata all'incirca 300 m a monte e una a valle, ad un'analoga distanza, Figura 11.

Le tipologie di analisi granulometrica adottate sono due, quella ponderale e quella numerale. La prima consente di valutare la distribuzione dei diametri per i sedimenti più fini (argille, fini, limi, sabbie e ghiaie) mentre la seconda è adatta a stimare la distribuzione della frazione più grossolana (ghiaie, ciottoli e massi).

Il corso d'acqua oggetto di studio è di tipo torrentizio, con un fondo alveo per lo più costituito da sedimenti di dimensioni grossolane; si assume che le principali caratteristiche idrauliche dell'alveo, quali le scabrezze, e morfologiche, come la capacità di trasporto e le pendenze di equilibrio, siano maggiormente condizionate da tale frazione. Per tale motivo, nel presente approfondimento specialistico sono state utilizzate le informazioni dedotte dalle prove di tipo numerale.

Per ciascuna area di indagine sono stati eseguiti più punti di campionamento, muovendosi dalle golene, alle sponde più interne verso l'alveo di magra. I risultati delle analisi sono riportati, campione per campione, in Tabella 1, dove sono anche indicati i diametri caratteristici della distribuzione, D_{30} , D_{50} e D_{90} . D_{30} rappresenta il diametro del campione di sedimento corrispondente al 30% in peso del materiale passante; al diametro medio D_{50} corrisponde il 50%, al D_{90} il 90%.

Le valutazioni idrauliche e morfologiche saranno eseguite applicando i valori medi dei parametri caratteristici ottenuti per ciascun campione. Si ritengono più significative le misure effettuate in alveo, escludendo quelle eseguite nelle aree più esterne al torrente, poiché le stime vengono alterate dalla presenza di terriccio o dalla vegetazione spontanea.

I diametri caratteristici che verranno adottati in questa sede sono i seguenti:

$$D_{30} = 79 \text{ mm}, D_{50} = 117 \text{ mm}, D_{90} = 312 \text{ mm}$$

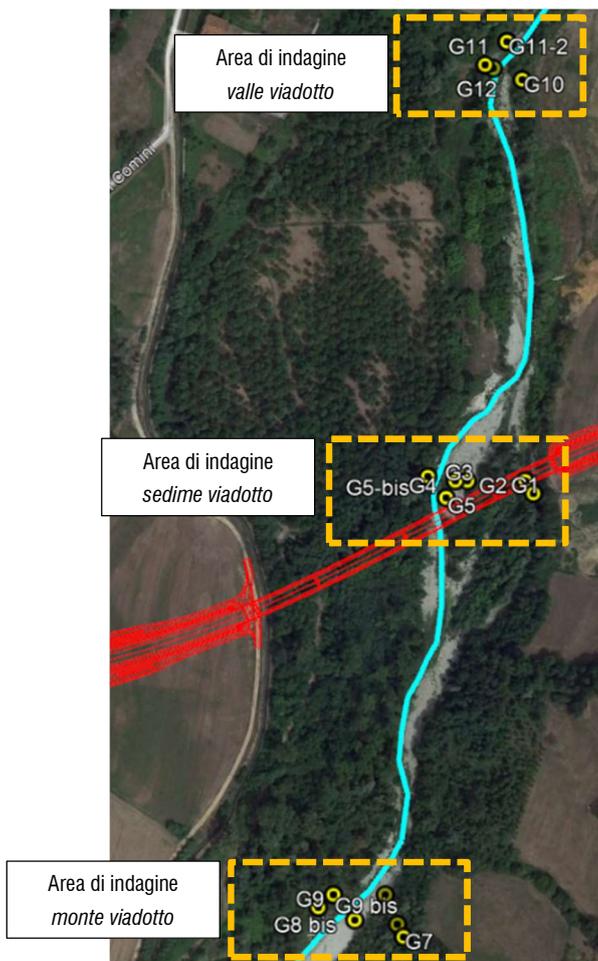


Figura 11 –Posizioni analisi granulometriche.

Id campione	Area di indagine	Posizione	D30 [mm]	D50 [mm]	D90 [mm]	NOTE
G2	viadotto	alveo magra secondario	124	166	317	Ciotoli massosi debolmente ghiaiosi
G3	viadotto	alveo magra secondario	61	86	204	Ciotoli con ghiaie debolmente massosi
G4	viadotto	alveo magra principale	56	89	444	Ciotoli con ghiaie massosi
G5	viadotto	prossimo sponda sinistra	58	99	202	Ciotoli con ghiaie
G5 bis	viadotto	piede sponda sinistra	40	86	301	Ciotoli con ghiaie massosi
G7	monte	area a bosco in destra, golena, cumulo di massi	194	259	445	Massi con ciotoli
G7 bis	monte	area a bosco in destra, golena, massi affioranti dal terrano	11	36	376	Ghiaie ciotolose massose
G8	monte	alveo, destra parte attiva	81	118	303	Ciotoli ghiaioso-massosi
G8 bis	monte	alveo, parte attiva	81	118	303	Ciotoli con ghiaie massosi
G9	monte	piede sponda sinistra	70	100	298	Ciotoli con ghiaie massosi
G9 bis	monte	piede sponda sinistra	83	136	362	Ciotoli ghiaioso-massosi
G10	valle	area a bosco in destra, golena	118	181	454	Ciotoli con massi debolmente ghiaiosi
G11	valle	alveo magra	62	88	247	Ciotoli con ghiaie debolmente massosi
G11-2	valle	alveo magra lambito cumulo di massi	150	199	454	Ciotoli con massi debolmente ghiaiosi

Tabella 1 - Tabella riassuntiva delle grandezze idrauliche relative al bacino del sollevamento

3.3 APPROFONDIMENTI DELLA REGIONE PIEMONTE

3.3.1 Valutazione degli aspetti morfologici

L'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale (ARPA) piemontese si è occupata recentemente del monitoraggio degli aspetti morfologici di diversi corsi d'acqua, tra cui il Torrente Ellero. La "Struttura Monitoraggi e Studi Geologici" ha effettuato una serie di valutazioni di tipo qualitativo e quantitativo, atte alla valutazione della qualità morfologica dei corpi idrici. Le attività dell'agenzia regionale ottemperano alle linee guida riportate nel manuale "IDRAIM", ovvero "sistema di valutazione IDR morfologica, Analisi e Monitoraggio dei corsi d'acqua" pubblicato dall'Istituto Superiore per la Protezione Ambientale (ISPRA).

Le condizioni di riferimento per un dato tratto di corso d'acqua sono definite considerando tre componenti: **funzionalità geomorfologica** (forme e processi del corso d'acqua), **artificialità** e **variazioni morfologiche** (instabilità).

Riguardo la prima componente, le condizioni di riferimento sono date dalla forma e dai processi che sono attesi per la tipologia morfologica esaminata.

Per l'artificialità, la condizione di riferimento è data da assenza o presenza molto ridotta di interventi antropici (regolazione delle portate liquide e solide, strutture idrauliche e attività di gestione). Se esistono elementi antropici, essi dovrebbero produrre effetti trascurabili sulla morfologia dell'alveo e sui processi.

Riguardo alla terza componente, un alveo deve essere stabile o in "equilibrio dinamico", vale a dire che non si sono verificate importanti variazioni morfologiche dovute a fattori antropici nel corso del "recente" passato (ovvero negli ultimi 100 anni circa).

Riassumendo, le condizioni di riferimento consistono in un tratto di corso d'acqua in equilibrio dinamico, dove il fiume svolge quei processi geomorfologici che sono attesi per una specifica tipologia, e dove l'artificialità è assente o non altera significativamente la dinamica del corso d'acqua a scala di bacino e di tratto.

A ciascuna delle tre componenti della qualità morfologica viene attribuito un punteggio, la cui somma fornisce l'Indice di Qualità Morfologica del tratto di corso d'acqua, IQM. L'IQM varia tra 0 e 1, ai valori maggiori corrispondono le valutazioni di qualità morfologica più elevate.

Si riportano nel seguito le principali evidenze contenute all'interno della monografia "IMPLEMENTAZIONE DELLA DIRETTIVA 2000/60/CE, ANALISI E VALUTAZIONE DEGLI ASPETTI MORFOLOGICI, ATTIVITA' 2017-2018, Torrente Ellero". Il tratto di interesse per il presente approfondimento è quello compreso tra Monasterolo di Vasco e San Bernolfo (Figura 12). L'asta torrentizia presenta una larghezza dell'alveo di magra pari a circa 26 m, mantiene una forma sinuosa con sezione trasversale di tipo semi-confinata. La pendenza media del tratto è di circa 1.3%. L'orientamento del tratto è quasi in direzione sud-nord. Il corso d'acqua in questo tratto non attraversa centri abitati o zone particolarmente antropizzate.



Figura 12 –Tratto fluviale analizzato.

La presenza di una traversa di derivazione all'estremità a monte (quella di Monasterolo di Vasco, Figura 9) pur non ostacolando il flusso, ha lievemente alterato la deposizione dei sedimenti.

Secondo la monografia sopra citata, la scarsa e discontinua presenza della piana inondabile denota un'alterazione dei processi morfologici. La presenza di una piana inondabile caratterizzata da una tale frequenza di inondazione favorisce l'esplicarsi di importanti funzioni: morfologiche (laminazione delle portate di piena e conseguente parziale dissipazione dell'energia della corrente, sedimentazione laterale dei sedimenti più fini), idrogeologiche (ricarica delle falde) ed ecologiche (pulsazione delle piene, mantenimento di habitat ripariali attraverso periodica sommersione, ecc.). Tali funzioni di continuità laterale dei flussi liquidi e solidi possono essere alterate per vari motivi, principalmente: (a) realizzazione di arginature e difese di sponda; (b) incisione dell'alveo.

La presenza di una traversa all'estremità a monte e una all'estremità a valle, le cui opere di presa non incidono sulle portate formative, determinano però un'alterazione delle portate solide nel tratto.

Vengono anche segnalati tagli significativi della vegetazione in fascia perfluviale. Gli interventi periodici di taglio della vegetazione arborea ed arbustiva (detti anche manutenzione o pulizia fluviale), anche quando realmente necessari per esigenze di sicurezza idraulica, comportano effetti negativi sul comparto morfologico (oltre che biologico) in quanto, riducendo drasticamente la dimensione delle piante presenti, viene alterata la loro capacità di esplicare azioni morfologiche significative una volta che esse diventino materiale legnoso in alveo.

Nel complesso l'indice di qualità morfologica del tratto ricade nella classe “**Buono**”.

3.3.2 Linee generali di assetto e alveo-tipo

Nelle "Linee generali di assetto idrogeologico per il bacino del Tanaro – AdBPO", per il tratto dell'Ellero compreso tra Roccaforte Mondovì alla confluenza in Tanaro, che comprende anche il tratto oggetto di studio, vengono indicate erosioni laterali e sovralluvionamenti.

Secondo la "Carta alveo-tipi e portate – BDGeo100 – Arpa Piemonte", nel tratto di interesse, il Torrente Ellero è attribuibile alla categoria di corsi d'acqua con alveo poco inciso, ad andamento sinuoso irregolare. I processi morfologici di spicco sono: le erosioni laterali, esondazioni con allagamenti e deposito di materiali prevalentemente fini.

3.4 ANALISI DELLE FOTO AEREE DISPONIBILI, VALUTAZIONE DELLE ZONE DI DIVAGAZIONE

Ai fini progettuali è di fondamentale importanza stimare quali possono essere le aree di divagazione laterale del corso d'acqua. Le future variazioni planimetriche dell'alveo principale possono condizionare fortemente l'azione erosiva della corrente ed influenzare la stabilità delle strutture in alveo come le pile e le protezioni spondali. La progettazione delle opere deve tenere conto dall'attuale assetto geometrico del corso d'acqua ma anche dei potenziali assetti futuri.

In tal senso si è proceduto alla definizione della Fascia di Dinamica Morfologica (FDM). Secondo il già citato manuale IDRAIM, questa fascia comprende: l'attuale alveo del corso d'acqua, le zone che sono state attive a partire dagli anni '50 del secolo scorso e le zone di possibile riattivazione nel medio periodo (prossimi 50 anni). La delimitazione della fascia si basa inoltre sulla presenza delle opere di difesa, che la vanno a delimitare dove presenti. Si tratta di una fascia che ha una probabilità elevata di essere interessata dalla dinamica laterale del corso d'acqua nel medio termine, anche in assenza di eventi di piena di elevata magnitudo.

La ricostruzione dell'evoluzione storica dell'alveo mira ad individuare e delimitare le zone interessate dalla dinamica fluviale in passato. Per la delimitazione della FDM è necessario considerare l'immagine telerilevata più recente a disposizione, le foto aeree del volo GAI degli anni 1954/55 e, possibilmente, altre immagini telerilevate riprese dagli anni '50 del secolo scorso ad oggi. La delimitazione della fascia va effettuata con modalità differenti a seconda della tipologia d'alveo. Per alvei a canali intrecciati, transizionali e rettilinei la fascia si ottiene dall'involuppo delle aree occupate dall'alveo nel periodo di tempo considerato. Nel caso di alvei sinuosi e meandriiformi viene definita attraverso l'analisi storica la "fascia dei meandri".

In tal senso dallo studio dei fotogrammi aerei disponibili, è stato possibile individuare i tracciati storici del corso d'acqua oggetto di studio. Le immagini raccolte sono:

- Fotogramma volo GAI 1954, fornito dall' "Istituto Geografico Militare" (IGM);
- Ortofoto disponibili nel "Geoportale Nazionale - Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare" relative alle riprese aeree anni 1988, 1996, 1998, 2007, 2012;
- Ortofoto dell'Agenzia per l'Erogazione in Agricoltura (AGEA) riprese aeree svolte negli anni 2015 e 2018.

Nell'immagine di Figura 12 sono riportati i tracciati storici del corso d'acqua assieme all'involuppo delle curve. Nella stessa immagine è riportata la Fascia di Dinamica Morfologica, che per i corsi d'acqua sinuosi coincide con la fascia dei meandri. Nello stralcio planimetrico si distinguono due aree principali di divagazione, una collocata a monte dell'area di intervento ed una collocata a cavallo dell'asse di progetto.

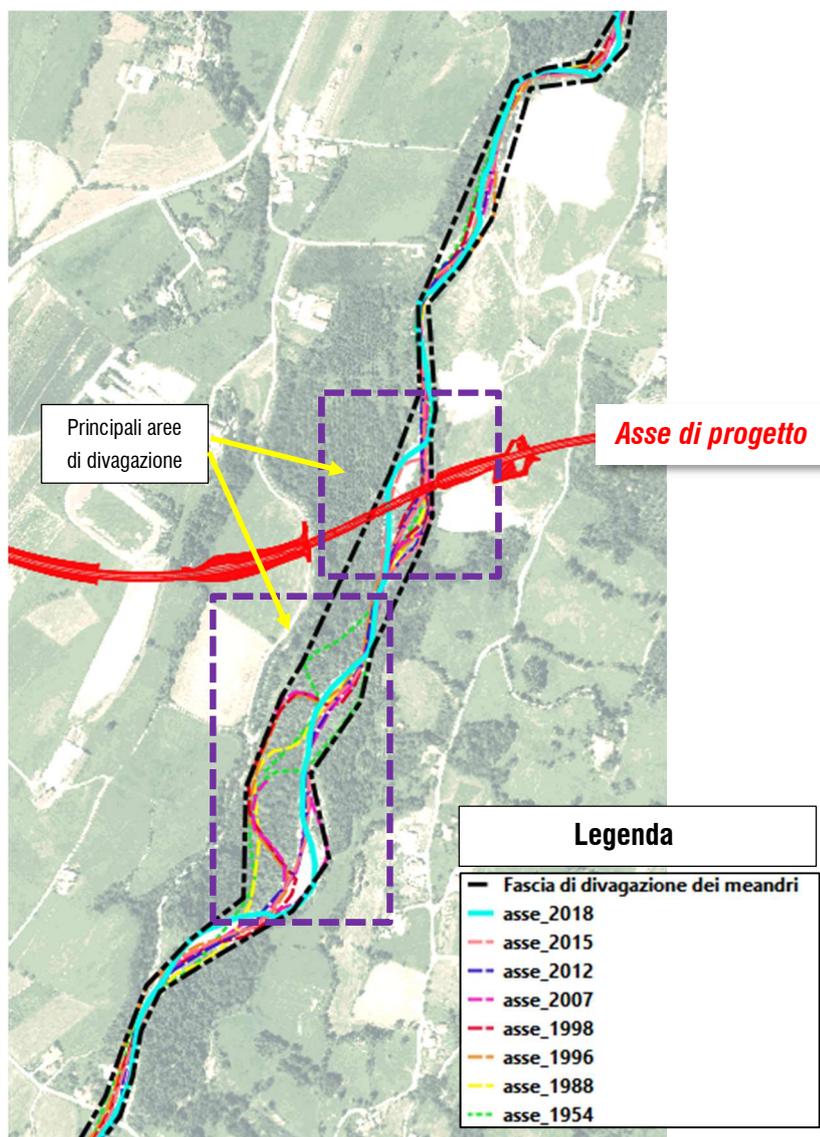


Figura 13 –Rappresentazione della FDM

Al fine di comparare le variazioni planimetriche dell'alveo principale del corso d'acqua, per ciascuna delle aree di divagazione individuate sono riportati i fotogrammi aerei più significativi, Figura 14 e Figura 15.

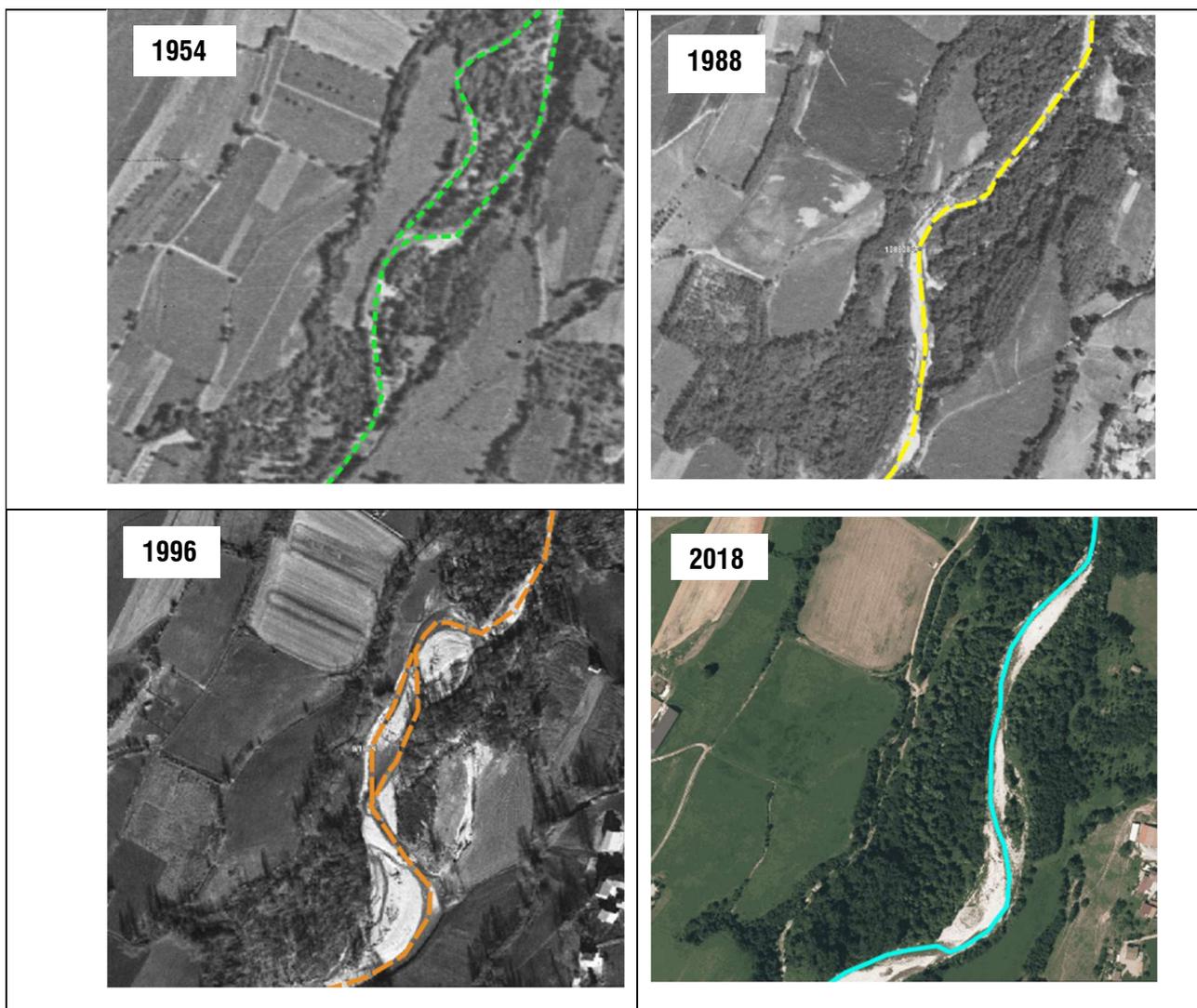


Figura 14 –Principali divagazioni dell'alveo, area a monte del viadotto in progetto

Ai fini progettuali sono di maggiore interesse le divagazioni avvenute in corrispondenza del viadotto di progetto (Figura 15). Nel primo fotogramma è evidente come nel 1954 l'alveo di magra si fosse stabilizzato a ridosso del limite di scarpata fluviale in sponda destra idraulica. Nei successivi decenni si sono consolidati dei tracciati alternativi paralleli, separati da barre longitudinali. La stabilizzazione delle barre è comprovata, ma allo stesso tempo condizionata, dalla presenza della fitta vegetazione spontanea di piccolo e medio fusto (Figura 4). Ad oggi l'alveo di magra principale sembra essersi stabilizzato più in sinistra, anche se permangono percorsi secondari paralleli collocati in destra.

Negli ultimi 65 anni, lo spostamento dell'alveo principale, se misurato parallelamente all'asse del viadotto, è stato dell'ordine dei 70 m in sinistra. Vista la ciclicità dei fenomeni morfologici, l'attuale dinamica non esclude però che nel medio-lungo periodo la divagazione possa manifestarsi in direzione opposta all'attuale, riportando l'alveo principale nella posizione passata.

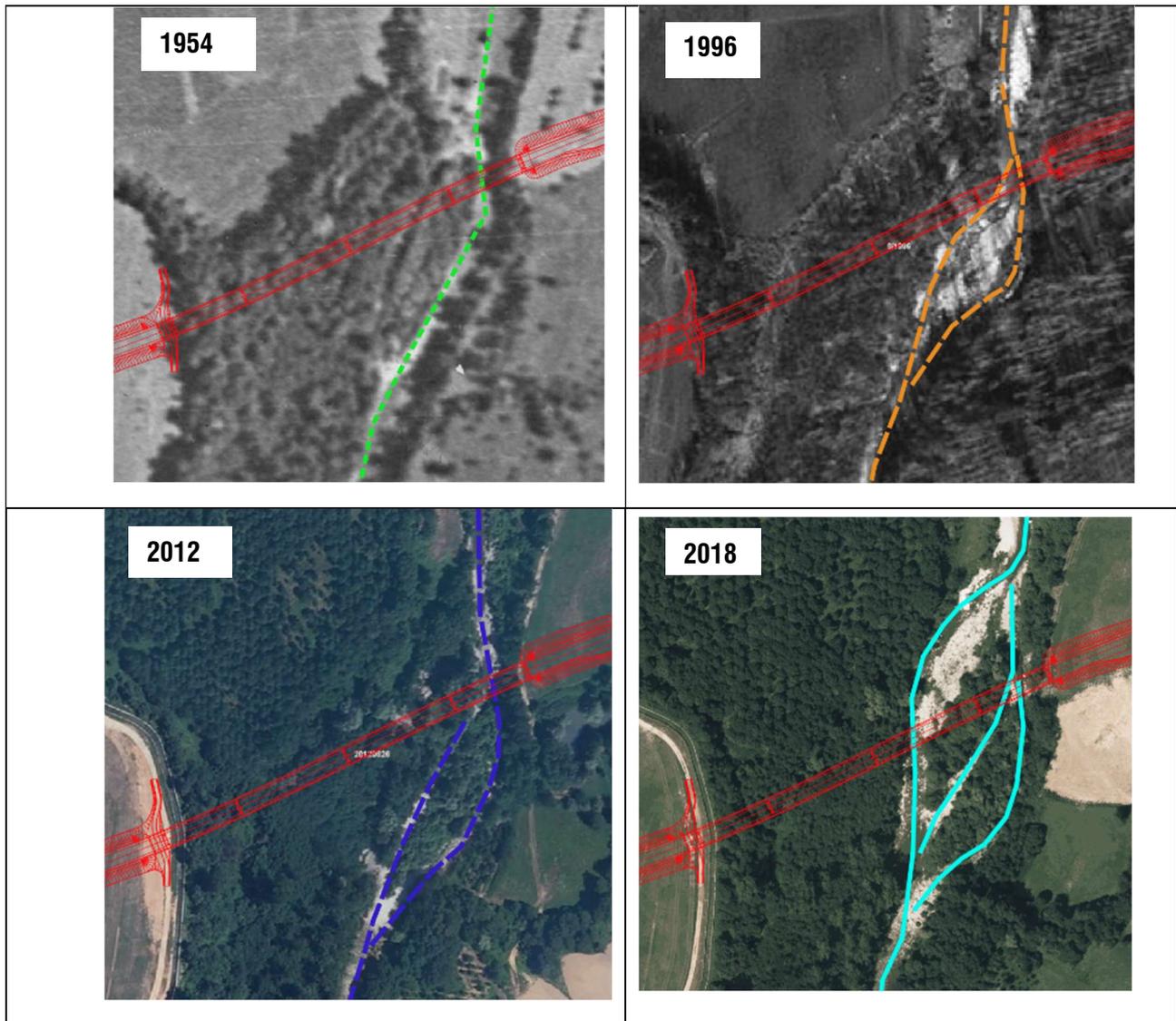


Figura 15 –Principali divagazioni dell'alveo, area di progetto

4 MODELLAZIONE IDRAULICA E MORFOLOGICA

Al fine di fornire indicazioni propedeutiche alla valutazione di compatibilità idraulica del viadotto Ellero e nel contempo disporre delle informazioni necessarie al dimensionamento delle opere di protezione, è stato implementato un modello idraulico bidimensionale. Per tale analisi la configurazione geometrica del fondo alveo è assunta come invariabile e corrisponde a quella attuale.

Anche lo studio morfologico è stato condotto attraverso l'approccio modellistico, implementando un codice di calcolo in grado di valutare in modo accoppiato sia l'evoluzione del campo di moto che le variazioni dell'alveo del corso d'acqua. In questo caso la configurazione geometrica è variabile, inizialmente pari a quella attuale, evolve poi in accordo con le equazioni che regolano il trasporto solido di sedimenti.

In altri termini, lo studio propedeutico per la verifica di compatibilità idraulica del viadotto in progetto è stato svolto in condizioni "a fondo fisso" mentre le analisi morfologiche del corso d'acqua sono state svolte mediante una modellazione "a fondo mobile". Sia lo studio idraulico che lo studio morfologico sono stati condotti attraverso la modellazione numerica bidimensionale.

L'area modellata ricopre un tratto torrentizio di lunghezza pari a circa 6 km, all'interno dei quali sono collocate le aree di intervento.

Sono state condotte diverse simulazioni in condizioni di moto vario, applicando però delle condizioni al contorno permanenti nel tempo. Questa procedura consente di raggiungere dopo un intervallo temporale adeguato una condizione pressoché stazionaria.

A tale scopo è stato utilizzato il codice di calcolo BASEMENT, software sviluppato dai ricercatori dell'ETH di Zurigo. BASEMENT permette di sviluppare analisi di evoluzione dei corsi d'acqua naturali, attraverso la risoluzione accoppiata delle equazioni di bilancio della parte fluida e della parte solida.

Il software permette di simulare il trasporto di sedimenti, sia al fondo che in sospensione, in condizioni stazionarie e non stazionarie. Il trasporto al fondo è proprio dei materiali di maggiore dimensione, mentre quello in sospensione interessa i materiali più fini (sabbie, limi, argille). Il tratto di Torrente Ellero oggetto dello studio è caratterizzato da un alveo il cui letto è costituito principalmente da ghiaie e ciottoli. Per tale motivo l'analisi è stata svolta considerando il contributo del solo trasporto solido al fondo e non quello della parte sospesa.

In generale, le valutazioni sul trasporto solido dei corsi d'acqua sono soggette ad approssimazioni ed incertezze determinate da molti fattori. Le formule disponibili sono per lo più ricavate da analisi di laboratorio in condizioni semplificate, spesso con granulometrie uniformi e in moto permanente, diversamente dai fenomeni naturali in ambiente montano che generano onde di piena anche a carattere impulsivo e coinvolgono materiali di granulometria ampiamente dispersa. La previsione a lungo termine delle tendenze evolutive nell'alveo, non potendo prevedere l'esatta sequenza degli eventi futuri, deve limitarsi a verificare la capacità attuale delle correnti a produrre trasporto, nel presupposto di una completa disponibilità del materiale trasportabile. Su tale base, si possono distinguere zone

più plausibilmente erodibili, nel caso in cui la capacità di trasporto appare superiore e delle zone più facilmente alluvionabili, in ragione della loro minore capacità di trasporto di sedimenti.

4.1 IL MODELLO NUMERICO

Il modello numerico utilizzato per valutare il campo di moto è di tipo bidimensionale basato sulla risoluzione delle equazioni di continuità e quantità di moto mediate lungo la verticale ossia:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{1}{\rho h} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} = \frac{1}{\rho h} \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial x} - \frac{\tau_{by}}{\rho h}$$

dove: h rappresenta il tirante, u e v le componenti della velocità lungo le direzioni x ed y, t il tempo, g l'accelerazione di gravità, η la quota del livello idrico, ρ la densità, τ_{xx} , τ_{yy} , τ_{xy} e τ_{yx} le componenti del tensore di Reynolds mentre τ_{bx} e τ_{by} rappresentano le tensioni tangenziali di parete.

Le tensioni tangenziali alla parete sono calcolate nel seguente modo:

$$\tau_{bx} = \rho c_f u |\vec{V}|^{\rho} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\tau_{by} = \rho c_f v |\vec{V}|^{\rho}$$

dove: $|\vec{V}|$ è il modulo del vettore velocità, $c_f = gn^2/h^{1/3}$ e n il numero di Manning rappresentante la scabrezza del fondo.

Le tensioni di Reynolds, invece, sono modellate adottando l'ipotesi di Boussinesq, ossia:

$$\tau_{xx} = 2\rho \nu_t \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\tau_{yx} = \tau_{xy} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\tau_{yy} = 2\rho \nu_t \frac{\partial v}{\partial y}$$

dove ν_t rappresenta la viscosità turbolenta.

Il sistema di equazioni così descritto è risolto mediante la tecnica dei volumi finiti mediante discretizzazione del dominio di calcolo con elementi triangolari di opportune dimensioni in grado di interpretare le caratteristiche peculiari del campo di moto stesso.

La chiusura del sistema di equazioni (Eq. 1) necessita l'assegnazione di due insiemi di parametri: la viscosità turbolenta (ν_t) e la scabrezza del fondo (n di Manning).

È evidente l'importanza di una corretta assegnazione di tali parametri per una accurata rappresentazione del campo di moto; a tale merito diversi sono i lavori presenti in letteratura, fra i quali si citano: Zanichelli, Caroni e Fiorotto, J.Hydr.Eng., 2002, Rodi, Turbulence models and their application in hydraulics—A state of the art review, IAHR, 1993, Shiono e Knight, JFM, 1991, Magistrato per il Po, Studio SIMPO, 1980, King e Norton, Finite elements in water resources II, 1978 e Chow, Open channel hydraulics, 1959.

Per la soluzione dello schema numerico descritto fin qui si è scelto di adottare il programma denominato BASEMENT – Basic Simulation for Computation of Environmental Flow and Natural Hazard Simulation. BASEMENT è un software sviluppato presso il Laboratorio di Idraulica, Idrologia e Glaciologia (VAW) dell'Istituto Federale Svizzero di Tecnologia di Zurigo (ETH) e permette di realizzare simulazioni numeriche monodimensionali e bidimensionali di corsi d'acqua. Il programma consente inoltre la modellazione del trasporto solido.

Le peculiarità di BASEMENT sono la stabilità del modello numerico, la flessibilità della griglia computazionale e l'efficienza del metodo di calcolo. Accuratezza, stabilità e consistenza rendono il codice affidabile per le applicazioni pratiche.

BASEMENT può essere utilizzato per simulare flussi d'acqua nel caso in cui le componenti verticali di velocità ed accelerazione siano sufficientemente piccole rispetto alle componenti orizzontali. Infatti il modello numerico risolve le equazioni di De Saint Venant mediate sulla verticale o equazioni delle acque poco profonde SWE (Shallow Water Equations). Questo sistema di equazioni non lineari di tipo differenziale alle derivate parziali viene risolto in maniera numerica con la discretizzazione delle equazioni ai volumi finiti. Le equazioni sono integrate su un volume che è definito dai nodi della griglia della mesh di calcolo. I termini integrali di volume possono essere sostituiti da integrali di superficie utilizzando la formula di Gauss che definisce i flussi convettivi e diffusivi attraverso le superfici. Grazie all'integrazione sul volume, il metodo è completamente conservativo.

La forma conservativa del sistema di equazioni SWE può essere riscritta come:

$$\int_{\Omega} \mathbf{U}_t d\Omega + \int_{\Omega} \nabla \cdot (\mathbf{F}, \mathbf{G}) d\Omega + \int_{\Omega} \mathbf{S} d\Omega = 0$$

Dove: Ω rappresenta il dominio di calcolo

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix}; \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} uh \\ u^2h + \frac{1}{2}gh^2 - vh \frac{\partial u}{\partial x} \\ uvh - vh \frac{\partial u}{\partial y} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} vh \\ uvh - vh \frac{\partial v}{\partial x} \\ v^2h + \frac{1}{2}gh^2 - vh \frac{\partial v}{\partial y} \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ gh(S_{fx} - S_{Bx}) \\ gh(S_{fy} - S_{By}) \end{pmatrix}$$

U, F(U), G(U) e S sono rispettivamente il vettore delle variabili, i flussi in direzione x e y e il termine sorgente.

$$S_{fx} = \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{gc_f^2 h}, \quad S_{fy} = \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{gc_f^2 h}$$

$S_{Bx} = -\partial z_B / \partial x$ e $S_{By} = -\partial z_B / \partial y$, dove z_B è la quota assoluta del fondo alveo.

Utilizzando la relazione di Gauss l'equazione diventa:

$$\int_{\Omega} \mathbf{U}_t d\Omega + \int_{\partial\Omega} (\mathbf{F}, \mathbf{G}) \cdot \mathbf{n}_s dl + \int_{\Omega} \mathbf{S} d\Omega = 0$$

Assumendo U_t e S costanti su un dominio generico, è possibile approssimare, con un'accuratezza del primo ordine:

$$\mathbf{U}_t + \frac{1}{\Omega} \int_{\partial\Omega} (\mathbf{F}, \mathbf{G}) \cdot \mathbf{n}_s dl + \mathbf{S} = 0$$

La stessa equazione può essere discretizzata utilizzando un metodo numerico a due step del tipo predictor-corrector:

$$\mathbf{U}_t^{n+1} = \mathbf{U}_t^n - \frac{\Delta t}{\Omega} \sum_{j=1}^3 (\mathbf{F}, \mathbf{G})_{i,j}^n \times \mathbf{n}_j l_j - \Delta t \mathbf{S}_i^n$$

dove: $(\mathbf{F}, \mathbf{G})_{i,j}$ flusso attraverso i lati degli elementi;
 n numero dei lati degli elementi;
 \mathbf{n}_s vettore normale al lato della i-esima cella.

Il vantaggio di utilizzare un metodo a due step è l'accuratezza del secondo ordine.

Nel metodo ai volumi finiti, il problema fondamentale risulta essere quello di stimare il flusso attraverso ogni lato del dominio cioè $(\mathbf{F}, \mathbf{G})_{ns}$. Esistono diversi algoritmi in grado di valutare tale flusso. Il sistema di equazioni SWE è iperbolico e quindi esso ha un'insita proprietà direzionale di propagazione. Per questo sistema viene utilizzato il

solutore di Riemann in grado di tener conto di questa proprietà. Il solutore nella formulazione del metodo ai volumi finiti è particolarmente adatto perché è in grado di catturare le discontinuità nel flusso sia subcritico che supercritico. Nel codice di calcolo è stato implementato oltre ad un solutore esatto del problema di Riemann anche un solutore approssimato detto HLL.

EVOLUZIONE DEL FONDO ALVEO E TRASPORTO DI SEDIMENTI AL FONDO

L'equazione che regola l'evoluzione del fondo alveo è l'equazione di Exner. L'uguaglianza esprime in termini differenziali il bilancio di massa dei sedimenti presenti nell'alveo e i sedimenti trasportati dal moto del fluido; può essere rappresentata nel modo seguente:

$$(1-p) \frac{\partial z_B}{\partial t} + \sum_{g=1}^{ng} \left(\frac{\partial q_{B,x}^{(g)}}{\partial x} + \frac{\partial q_{B,y}^{(g)}}{\partial y} + s^{(g)} - sl_B^{(g)} \right) = 0$$

Dove p è la porosità del materiale al fondo (normalmente è assunta omogenea), z_B è la quota di fondo alveo, ng è il numero di classi granulometriche, g è la generica classe granulometrica. $q_{B,x}^{(g)}$ e $q_{B,y}^{(g)}$ sono rispettivamente le portate volumetriche specifiche al fondo, della classe g , in direzioni x e y . $s^{(g)}$ è il termine sorgente che descrive lo scambio di volume tra solidi sospesi e solidi al fondo, $sl_B^{(g)}$ è il termine che tiene conto delle immissioni o asportazioni locali di materiale. Nella presente analisi non verrà preso in considerazione il contributo legato alla portata solida sospesa, neppure le immissioni o asportazioni localizzate di materiale.

Lungo la direzione x , per la generica frazione g , il flusso specifico di materiale al fondo può essere scomposto in quattro parti (in modo analogo anche per la direzione y):

$$q_{B,x}^{(g)} = q_{B,xx}^{(g)} + q_{B,xlateral}^{(g)} + q_{B,xgrav}^{(g)} + q_{B,xcurv}^{(g)}$$

Dove:

$q_{B,xx}^{(g)}$ è la componente orizzontale della portata specifica dovuta al moto del fluido. Tale termine esprime la capacità di trasporto della corrente;

$q_{B,xlateral}^{(g)}$ è la componente x della portata specifica dovuta alla pendenza laterale;

$q_{B,xgrav}^{(g)}$ è la componente in x del flusso specifico indotto da fenomeni gravitativi, come il franamento dei versanti;

$q_{B,xcurv}^{(g)}$ è la componente orizzontale della portata specifica dovuta alla curvatura delle linee di corrente.

La capacità di trasporto della corrente può essere espressa attraverso diverse formule teorico-sperimentali. Il codice di calcolo BASEMENT offre la possibilità di utilizzare alcune formulazioni, tra cui quella di Meyer-Peter e Muller, Rickenmann, Smart e Jaggi, Wong e Parker. Tra le equazioni disponibili, l'equazione di Rickenmann è quella che presenta la base sperimentale più numerosa. Parallelamente sono state comunque svolte delle simulazioni preliminari utilizzando formulazioni differenti.

L'equazione di Rickenmann (1991) è basata su un insieme di 252 prove sperimentali sviluppate nei laboratori VAW ETH di Zurigo. Le indagini sperimentali condotte hanno permesso di indagare all'interno di un range di pendenze d'alveo variabile tra 0.04% e 2%. L'equazione di Rickenmann è qui riportata:

$$q_B = \Phi_B \left((s-1) g d_m^3 \right)^{0.5}$$

$$\Phi_B = 3.1 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} \theta^{0.5} (\theta - \theta_{cr}) Fr^{1.1} (s-1)^{-0.5}$$

Dove $s = \rho_s / \rho$ è il rapporto tra la densità dei sedimenti e quella del fluido, g è l'accelerazione di gravità. d_m , d_{30} , d_{90} sono rispettivamente: il diametro medio dei sedimenti, il diametro corrispondente al 30% del materiale passante al setaccio (in termini di massa) e il diametro corrispondente al 90% del materiale passante. Fr è il numero di Froude della corrente, θ è la tensione tangenziale al fondo adimensionale e θ_{cr} è la tensione tangenziale critica adimensionale di Shields.

Il calcolo della tensione tangenziale critica, nota anche come tensione di incipiente di movimento, è influenzata da diversi fattori, principalmente la densità dei sedimenti, il loro diametro e le caratteristiche della corrente. Tale valore è assunto pari a 0.055, valore intermedio tra quello proposto da Meyer-Peter e Muller (0.047) e Shields (0.06). θ_{cr} dipende anche da altri effetti, come il corazzamento (armoring) o la pendenza locale dell'alveo. Il codice di calcolo tiene conto di questi fenomeni secondari, correggendo con opportuni coefficienti il valore della tensione critica; si vedano Meyer-Peter e Muller (1948) e van Rijn, (1989).

La componente del flusso specifico dovuta alla pendenza laterale dell'alveo ($q_{B,xlateral}$) è quella correlata al non parallelismo tra il vettore di velocità del fluido e il vettore velocità dei sedimenti al fondo. Questo disallineamento dipende dalla direzione delle forze applicate al singolo granulo. La spinta idrodinamica è parallela alla direzione del flusso, ma generalmente non coincide con la direzione del gradiente locale del terreno, che influenza le traslazioni dei sedimenti. Il fenomeno è particolarmente rilevante in corrispondenza delle sponde dei corsi d'acqua. Tale componente della portata specifica non viene in realtà direttamente computata, ma si applica una correzione angolare al vettore portata specifica q_B , che inizialmente è assunto parallelo al vettore velocità media del fluido. All'interno del software

BASEMENT è implementata la correzione proposta da Ikeda (1982), si rimanda alla letteratura specifica per un maggiore approfondimento.

L'erosione della corrente comporta non solo delle variazioni altimetriche del fondo alveo, ma anche un inasprimento delle sponde che può provocare occasionalmente collassi localizzati. Il movimento franoso, oltre che alterare geometricamente la sezione dell'alveo, genera un ulteriore apporto di materiale solido che dalle sponde viene poi trascinato dal flusso liquido. Il modello numerico implementato in questa sede considera il trasporto gravitativo.

4.2 LA GEOMETRIA DEL MODELLO

In generale, la modellazione idraulica bidimensionale prevede la schematizzazione plano-altimetrica dei corsi d'acqua, alvei e golene, e delle aree circostanti potenzialmente allagabili mediante una mesh di calcolo in grado di riprodurre con sufficiente precisione l'andamento del territorio. Nel presente studio sono state prodotte due griglie di calcolo, una per la configurazione dello stato di fatto e una per quella di progetto.

L'area analizzata nel presente studio, rappresentata in Figura 16, si estende per una superficie di circa 2 km².

L'area modellata ricopre un tratto di Torrente Ellero di lunghezza pari a circa 6 km, si sviluppa lungo la direttrice sud-nord. La sezione di chiusura di monte è collocata all'altezza di Villanova di Mondovì (CN), mentre quella di valle è posta nelle vicinanze Mondovì (CN). In questo tratto il corso d'acqua mantiene una pendenza variabile da 1.5 % a 1.0 %.

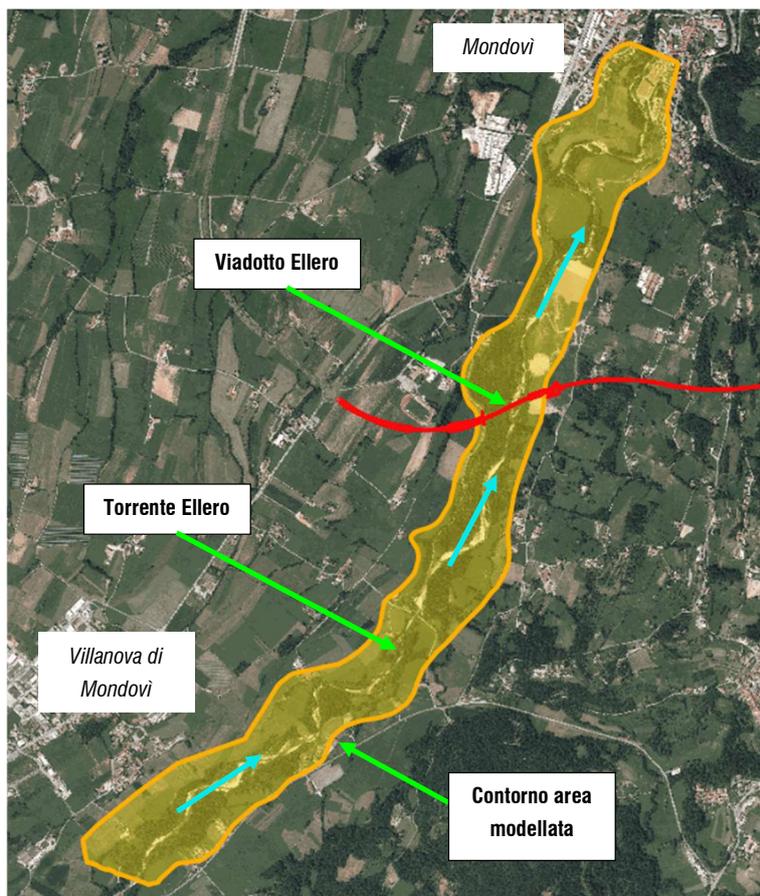


Figura 16 –Inquadramento dell’area modellata

L’esecuzione di un modello numerico bidimensionale si basa su un’accurata descrizione della geomorfologia della zona interessata (Figura 16). Nel caso specifico, è stato impiegato come “dato base” per la configurazione dello stato di fatto, un DTM con risoluzione 5 m fornito dalla Regione Piemonte. A cavallo dell’asse del viadotto di progetto è stato eseguito recentemente un rilievo LIDAR. Dalle informazioni del rilievo è stato poi estrapolato un DTM di elevata risoluzione, pari a 0.5 m (Figura 16). Come si evince dalle figure, il livello di dettaglio del rilievo è molto elevato, il corso d’acqua è ben rappresentato, come le singolarità nel territorio.

Preliminarmente è stata verificata la congruenza geometrica tra i due dati, riscontrando un’adeguata sovrapposizione. Sono stati eseguiti successivamente alcuni rilievi celerimetrici in alveo, nell’intorno dell’area di intervento. Anche in questo caso è stato eseguito un confronto fra i dati disponibili, che si sono dimostrati sufficientemente congruenti.

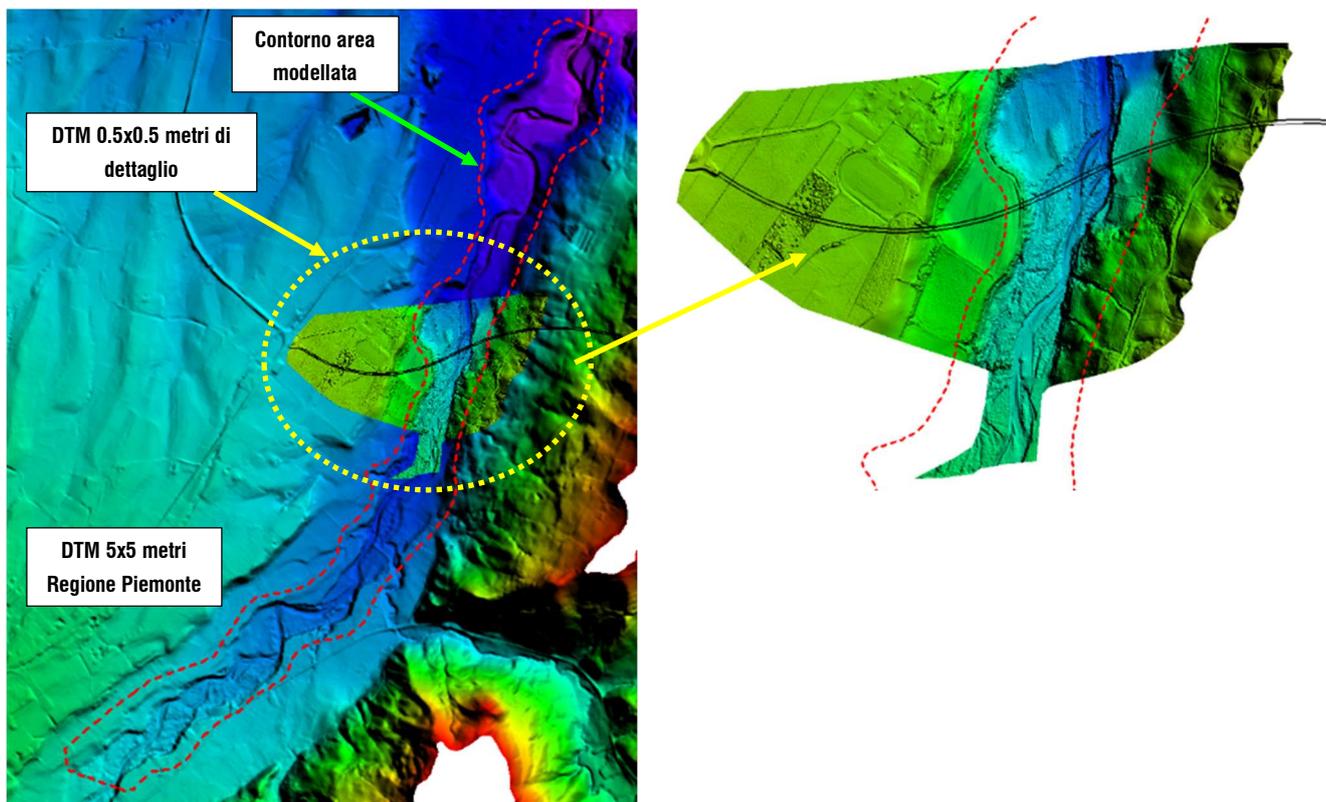


Figura 17 –Dettaglio del DTM impiegato

In questo modo è stato possibile ottenere per lo stato di fatto una mesh ad elementi triangolari a tre nodi con lati di lunghezza variabile. Il numero di elementi del modello numerico è pari a 61'000, mentre il numero di nodi è pari a circa 31'000. Nell'intorno dell'area di maggior interesse, quella di progetto, l'alveo principale del corso d'acqua, è stato schematizzato mediante triangoli con lati medi di lunghezza dell'ordine dei 2-3 m. Viceversa, le zone di espansione, a causa dei limitati gradienti del terreno, sono state modellate con triangoli con lato di lunghezza dell'ordine di 10÷15 m (Figura 18). Le dimensioni così assegnate rendono i risultati indipendenti dalla dimensione della mesh e permettono una descrizione sufficientemente accurata del campo di velocità e della distribuzione dei tiranti.

In Figura 18 è evidenziata anche la sezione al contorno di monte, linea di immissione delle portate liquide e solide, assieme alla sezione di chiusura di valle. All'interno della mesh dello stato di fatto sono stati successivamente inseriti gli interventi di progetto. Questa nuova griglia di calcolo costituisce il riferimento geometrico della configurazione di progetto.

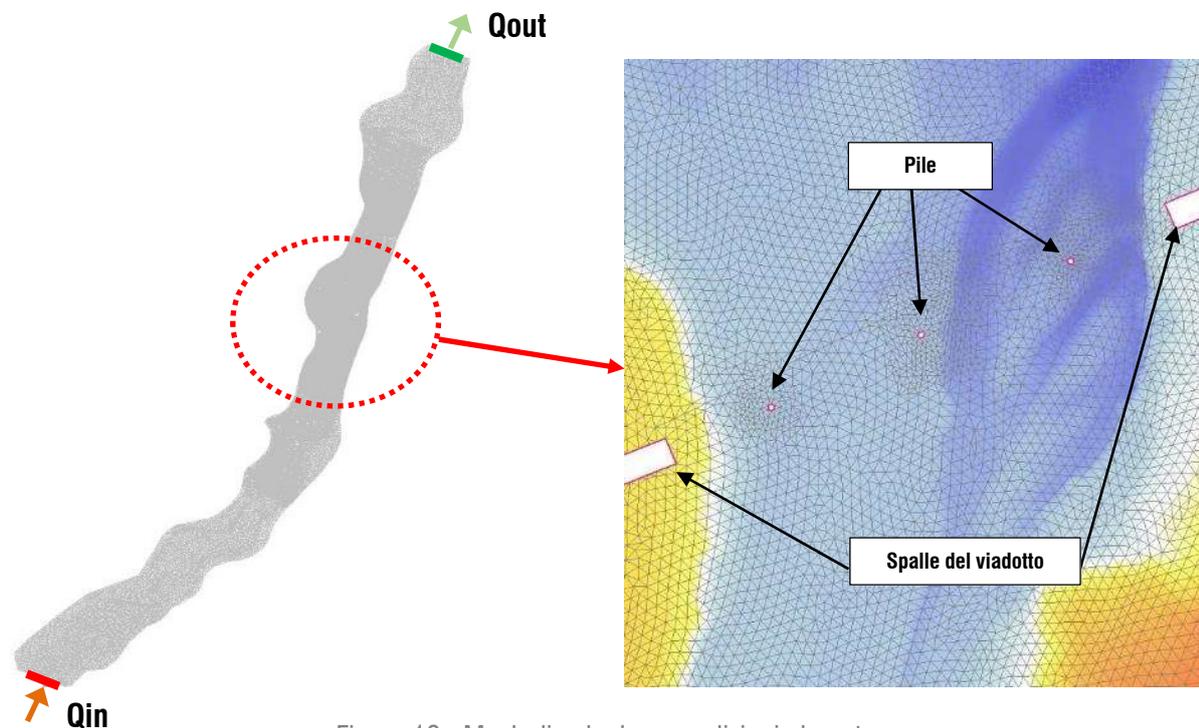


Figura 18 –Mesh di calcolo e condizioni al contorno

4.3 CONDIZIONI INIZIALI E AL CONTORNO

La corretta impostazione del modello numerico in condizioni non stazionarie richiede un'opportuna scelta delle condizioni iniziali e al contorno.

Per quel che riguarda la risoluzione del campo di moto sono state applicate alla sezione di chiusura di monte (Figura 18) le portate di riferimento. Sono state condotte diverse simulazioni in condizioni di moto vario, applicando però delle condizioni al contorno permanenti nel tempo. Questa procedura consente di raggiungere dopo un intervallo temporale adeguato una condizione pressoché stazionaria. Per la sezione di valle invece è stata impostata una condizione di moto uniforme. Invece per quel che concerne l'analisi morfologica sono state impiegate, come configurazioni geometriche iniziali, le rappresentazioni dello stato di fatto e di progetto. Per quanto riguarda le portate solide immesse nel dominio di calcolo, il codice permette di quantificare la portata solida potenziale generata dal flusso liquido imposto alla sezione di monte, sulla base dell'equazione del trasporto adottata. Rispetto all'area di indagine, le posizioni delle condizioni al contorno sono tali da ritenere trascurabili i loro effetti sulla parte centrale del dominio di calcolo, dove è collocata l'area di intervento.

4.4 DEFINIZIONE DELLE SCABREZZE E RAPPRESENTAZIONE GRANULOMETRICA

La scabrezza è un parametro fondamentale per la corretta impostazione del modello numerico bidimensionale. L'assegnazione di tale coefficiente è caratterizzata da un notevole grado di incertezza dal momento che questi parametri presentano un ampio spettro di valori in dipendenza dello stato dell'alveo, dal grado di manutenzione e pulizia dello stesso, dalla presenza e dal tipo di vegetazione, dai cicli stagionali, dalla granulometria del fondo, ecc. Il dominio di calcolo è stato suddiviso in due aree, quella dell'alveo di magra e quella delle aree di espansione. Mentre nell'alveo sono presenti soprattutto i sedimenti ghiaiosi e ciottolosi, nelle zone di espansione è piuttosto diffusa la vegetazione spontanea di tipo arbustivo ed arboreo. Per ciascuna superficie è stato assegnato un coefficiente di scabrezza secondo Gauckler-Strickler, all'alveo di magra è stato assegnato un valore di scabrezza pari a $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, per le aree golenali un coefficiente pari a $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Tali valori sono in accordo con quanto indicato nel paragrafo 4.8.4 della "Direttiva contenente i criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico all'interno delle fasce "A" e "B" ".

Per i torrenti una stima approssimata del coefficiente di scabrezza è possibile con la relazione:

$$K_s = 26/d_{90}^{1/6}$$

Nella quale d_{90} è espresso in metri. Poiché $d_{90} = 317 \text{ mm}$, diametro caratteristico stimato con le analisi granulometriche, il valore scelto per la scabrezza dell'alveo risulta compatibile con quanto suggerito dalla precedente equazione.

Per quel che riguarda il modello di evoluzione dell'alveo, il dominio di calcolo è stato rappresentato come un letto omogeneo di sedimenti, con diametri caratteristici pari a quelli stimati attraverso i rilievi in alveo. Si ricorda infine che l'equazione di Rickenmann valuta la capacità di trasporto al fondo in funzione di tre diametri caratteristici della distribuzione granulometrica, d_{30} , $d_m = d_{50}$, d_{90} .

5 RISULTATI DELLA MODELLAZIONE NUMERICA

Il modello numerico implementato può essere impiegato secondo due modalità, quella “a fondo fisso” e quella “a fondo mobile”.

Il primo approccio consente di valutare il campo di moto che si instaura al passaggio delle piene, applicando diverse portate di riferimento e rispetto a differenti scenari di progetto. Le informazioni estratte consentono di valutare le principali grandezze idrauliche come i livelli idrici, velocità, tensioni tangenziali, numero di Froude, utili al dimensionamento delle opere di protezione e alle verifiche specifiche della compatibilità idraulica. Nel seguito verranno infatti eseguiti dei confronti dei risultati ottenuti per lo scenario attuale e quello di progetto, analizzando le variazioni indotte sul campo di moto dall’opera di attraversamento. Le simulazioni a fondo fisso saranno eseguite applicando come dato di input la portata duecentennale, e come assetto dell’alveo quello attuale. Come riportato nella relazione idrologica, il valore di portata $Q_{200} = 831 \text{ m}^3/\text{s}$.

Il secondo approccio, quello “a fondo mobile” consente di prevedere in modo approssimato le tendenze morfologiche future. Come già ribadito, le interpretazioni modellistiche dei fenomeni di trasporto solido sono soggette a notevoli approssimazioni legate per lo più alla rappresentazione semplificata di complessi fenomeni fisici, come l’interazione fluido-sedimenti. Particolare limite alla solidità delle previsioni è anche la conoscenza mai completa ma sempre limitata delle condizioni al contorno e delle caratteristiche del sistema, come la distribuzione spaziale dei sedimenti, disponibilità di materiale in alveo, effetti protettivi legati alla vegetazione, apporti solidi esterni ecc. Per tali motivi le simulazioni morfologiche forniranno per lo più indicazioni e tendenze utili alla progettazione delle opere e alle valutazioni del loro impatto sulle dinamiche fluviali. Per le simulazioni a fondo mobile verranno applicata due portate differenti, quella critica $Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$ e quella duecentennale. L’imposizione del valore critico della portata ha come obiettivo quello di massimizzare le variazioni altimetriche locali nel breve-medio termine. Il secondo idrogramma, al contrario, ha lo scopo di favorire una più profonda evoluzione dell’alveo dovuto a fenomeni a scale temporali e spaziali maggiori. La stima della portata critica è discussa al paragrafo 5.1.4.

5.1 SIMULAZIONI A FONDO FISSO

Nelle prossime immagini verranno confrontati i risultati ottenuti per lo scenario “stato di fatto” e “stato di progetto”, attraverso l’analisi dei livelli idrici, velocità, numero di Froude e tensioni tangenziali al fondo. Oltre ad alcune rappresentazioni planimetriche verranno confrontati i risultati rispetto a sei sezioni di riferimento. La sezione 01 è posta a circa 170 m a monte dell’opera di attraversamento, sezioni 02-03-05 invece sono tracciate ortogonalmente alla direzione principale della corrente poco a monte delle pile P01-P02-P03 rispettivamente. La sezione 04 è parallela al viadotto, posta poco a monte, infine, la sezione 06 è collocata a valle del viadotto, a circa 130 m.

5.1.1 Analisi dei livelli idrici

In Figura 19 e Figura 20 sono riportate le distribuzioni dei livelli idrici rispettivamente per lo scenario attuale e quello di progetto. Dall’analisi delle immagini appare evidente che nell’intorno del viadotto le aree allagabili sono del tutto sovrapponibili, ed inoltre l’andamento dei livelli è simile per i due scenari, a meno di qualche variazione locale in corrispondenza delle pile del viadotto.

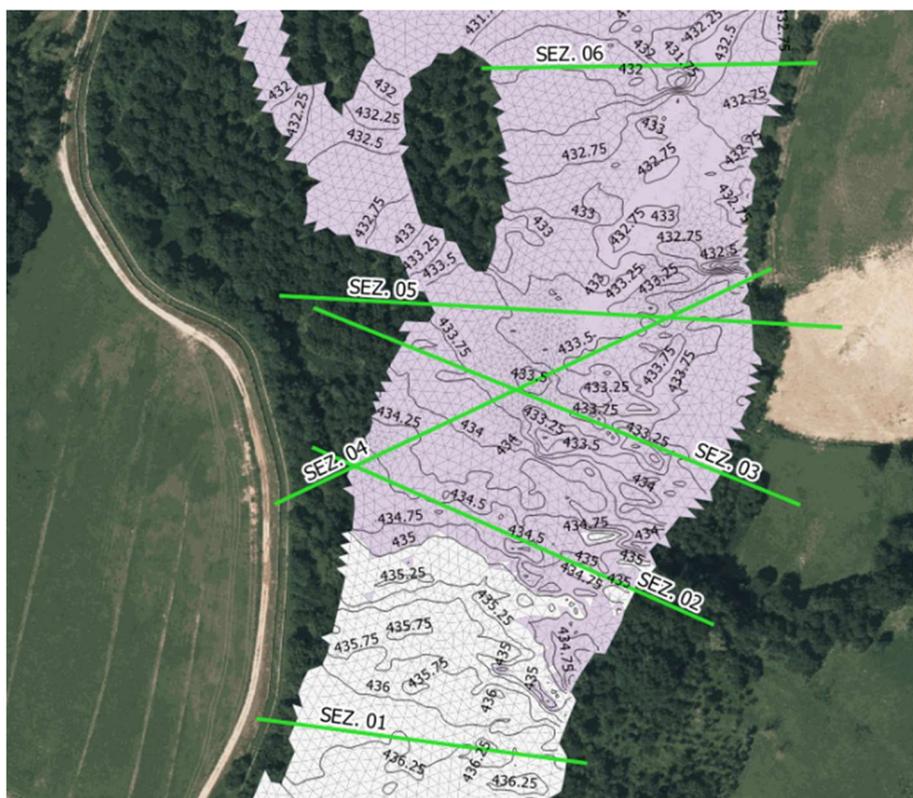


Figura 19 –Piena TR 200 anni, stato di fatto, distribuzione dei livelli idrici

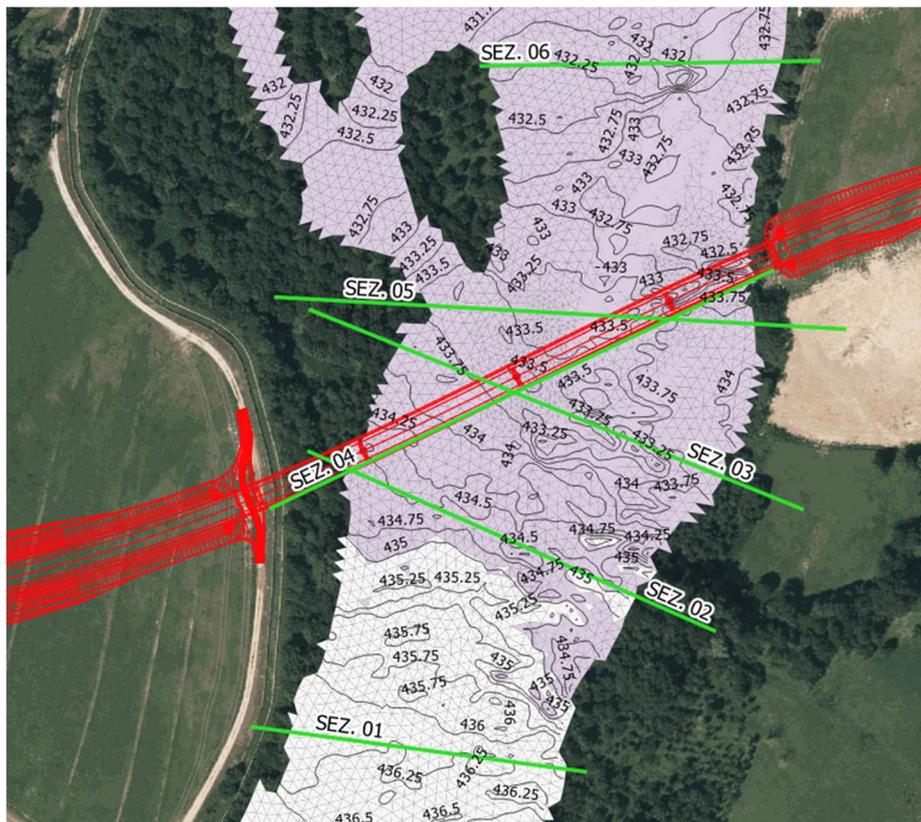


Figura 20 –Piena TR 200 anni, stato di progetto, distribuzione dei livelli idrici

Lungo la sezione 01, quella di monte, i livelli idrici stato di fatto e stato di progetto sono praticamente indistinguibili, mentre per le sezioni 02-03-04 e 05 si osservano limitati aumenti di livello provocati dalla presenza delle pile in alveo. In corrispondenza della pila P03, la variazione del livello è massima, pari a circa 0.30-0.40 m (Figura 24, Figura 25). Come appare lungo la sezione 04, gli incrementi di livello sono localizzati nell'intorno delle pile di progetto. L'incremento di livello massimo si ha in corrispondenza della pila 03 dove si osservano le maggiori velocità in modulo (Figura 32). Lungo la sezione 06, quella di valle, non si osservano variazioni di livello tra stato di fatto e di progetto. Per la piena di riferimento Q_{200} , secondo i risultati delle simulazioni, l'effetto delle opere sui livelli idrici è compreso al più tra la sezione 01 e 06, per un tratto d'alveo di estensione pari a circa 300 m.

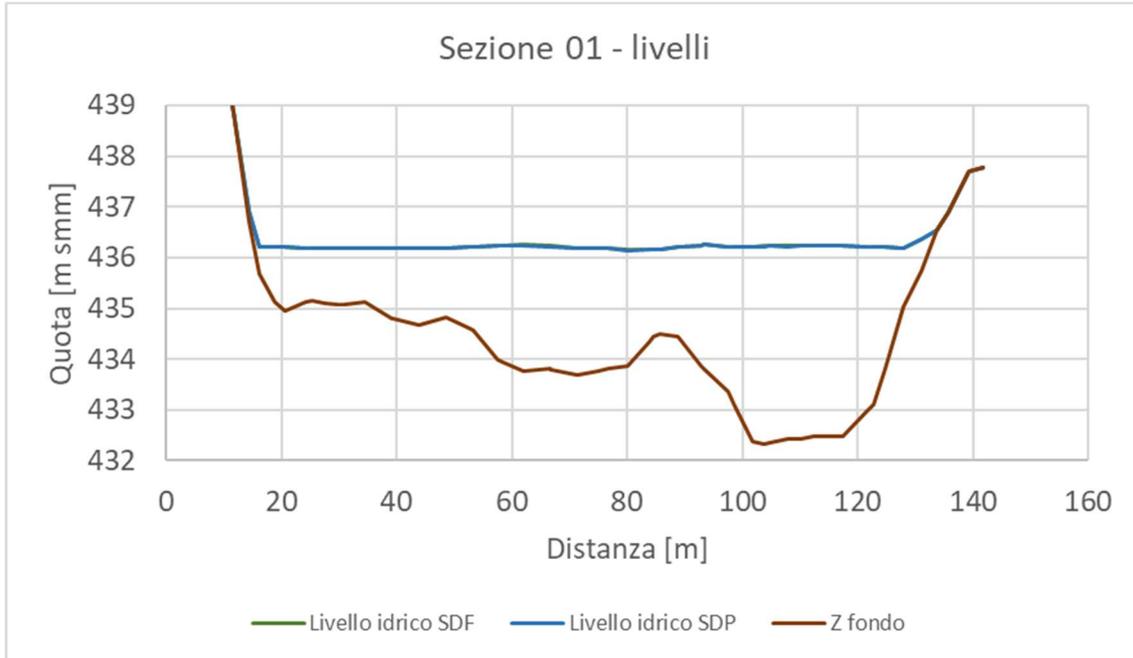


Figura 21 –Piena TR 200 anni, livelli idrici, sezione 01

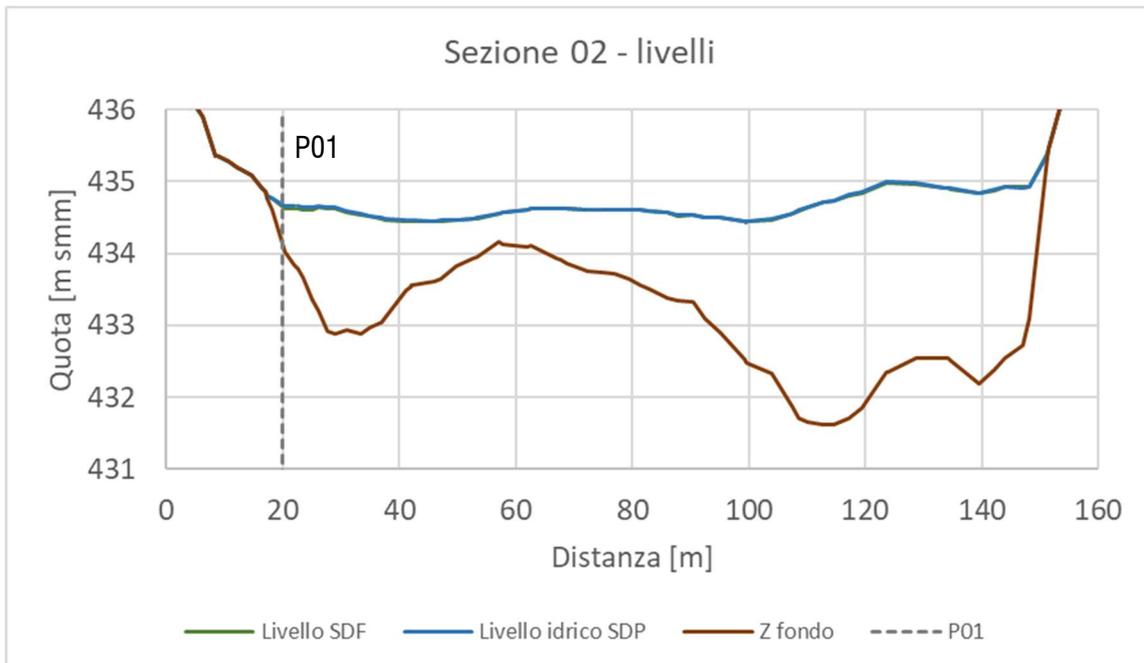


Figura 22 –Piena TR 200 anni, livelli idrici, sezione 02

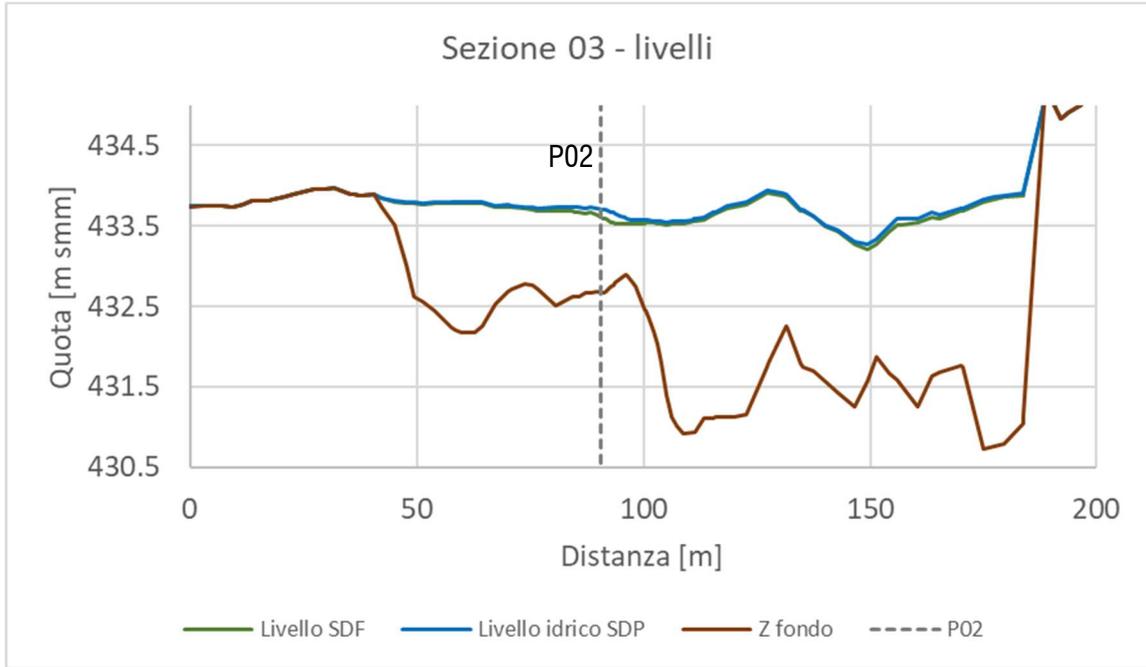


Figura 23 –Piena TR 200 anni, livelli idrici, sezione 03

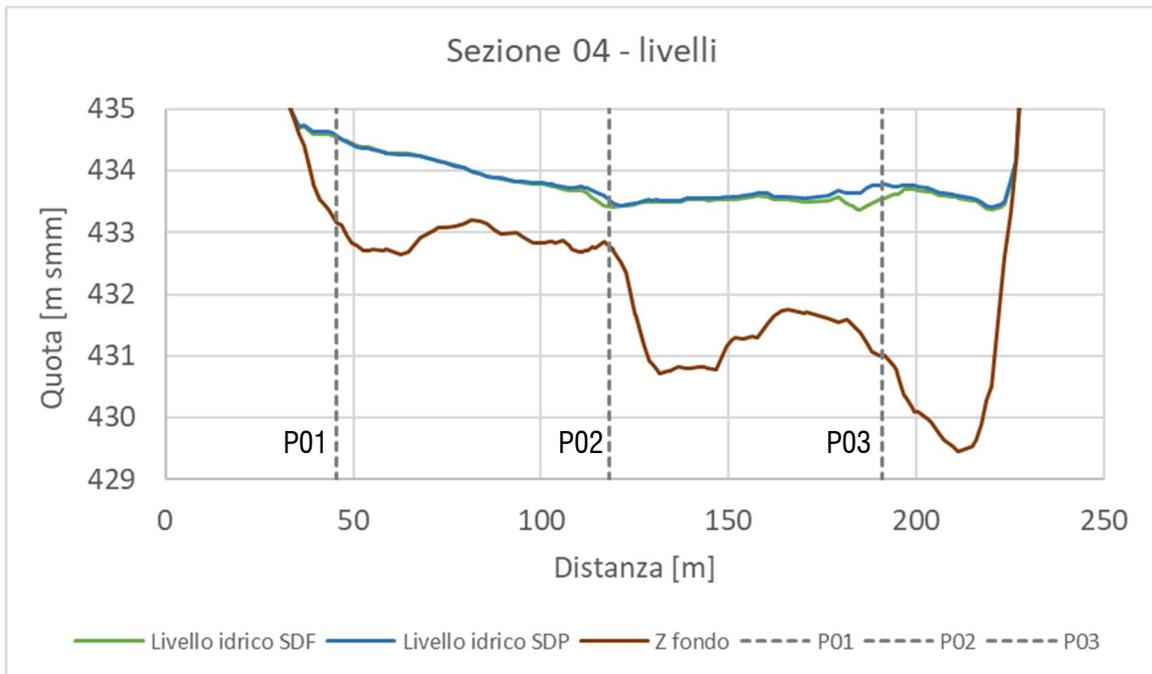


Figura 24 –Piena TR 200 anni, livelli idrici, sezione 04

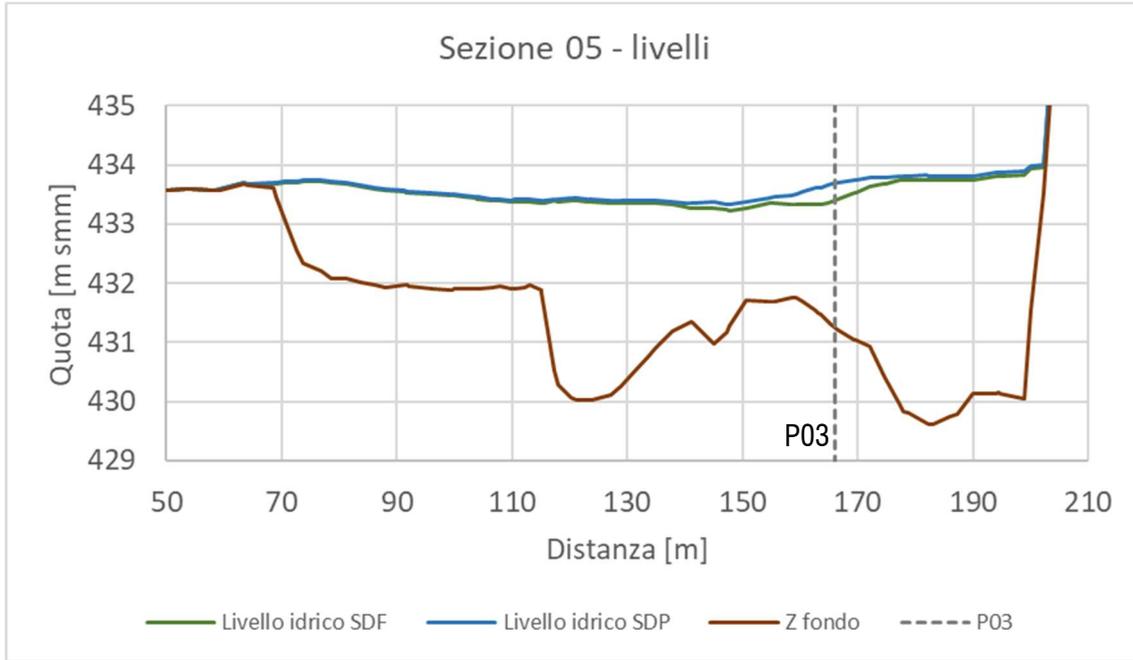


Figura 25 –Piena TR 200 anni, livelli idrici, sezione 05

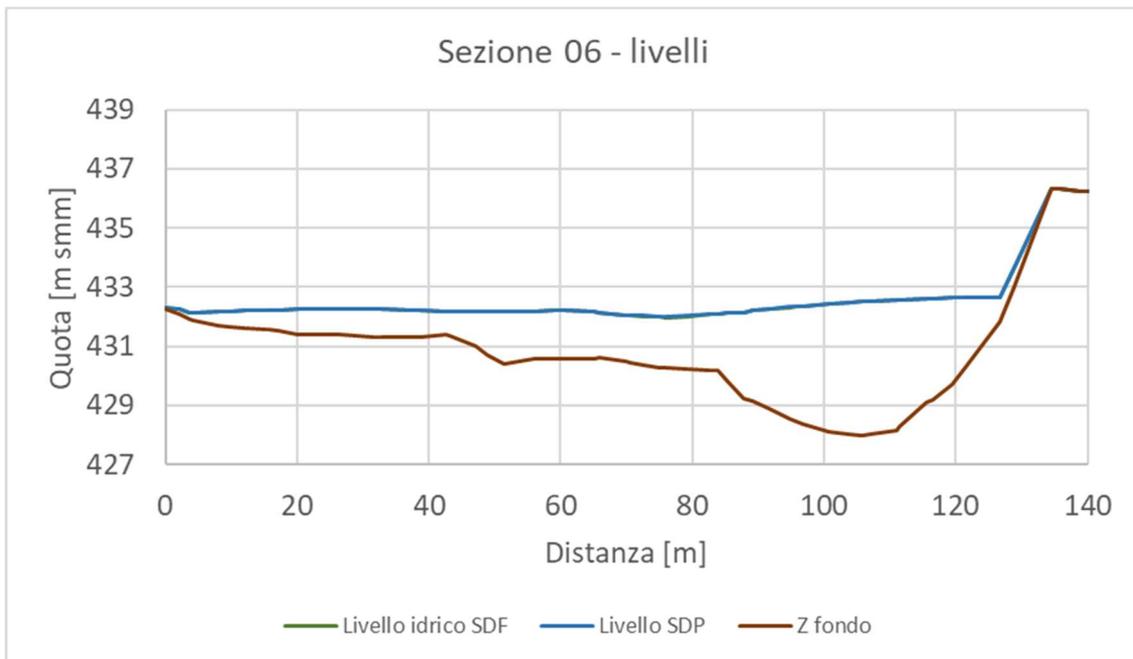


Figura 26 –Piena TR 200 anni, livelli idrici, sezione 06

5.1.2 Analisi del campo di velocità

Nel tratto di torrente posto a cavallo del viadotto Ellero, non si osservano macroscopiche differenze tra il campo di velocità valutato per lo stato di fatto e quello di progetto, si confrontino in tal senso Figura 27 e Figura 28. Le perturbazioni al campo di velocità indotta dalle tre pile in alveo sono limitate all'intorno delle pile stesse.

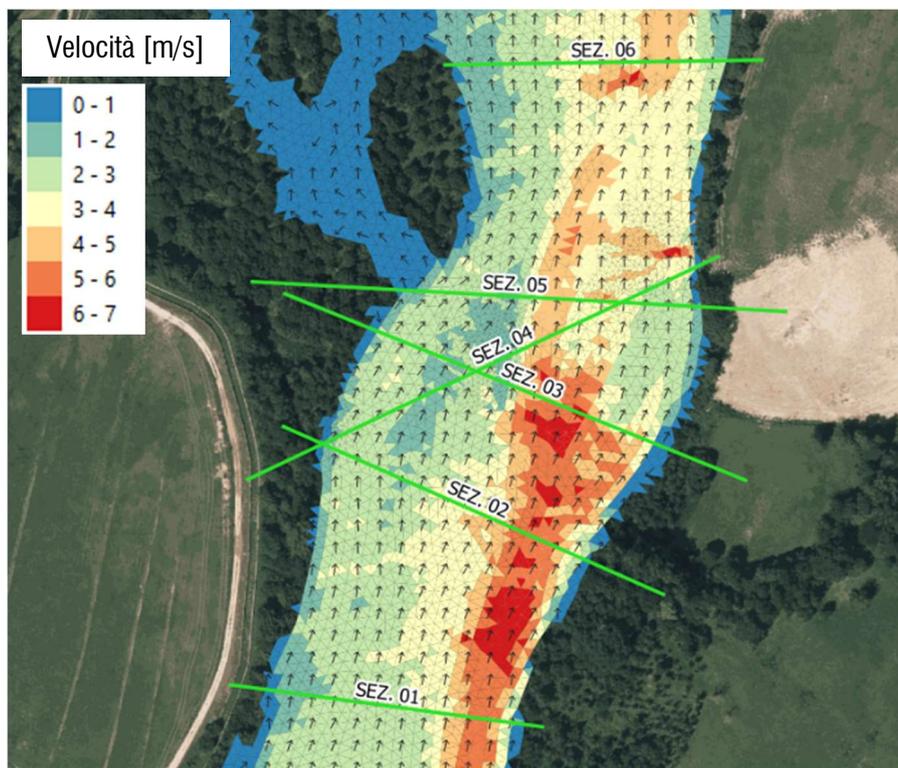


Figura 27 –Piena TR 200 anni, stato di fatto, campo di velocità

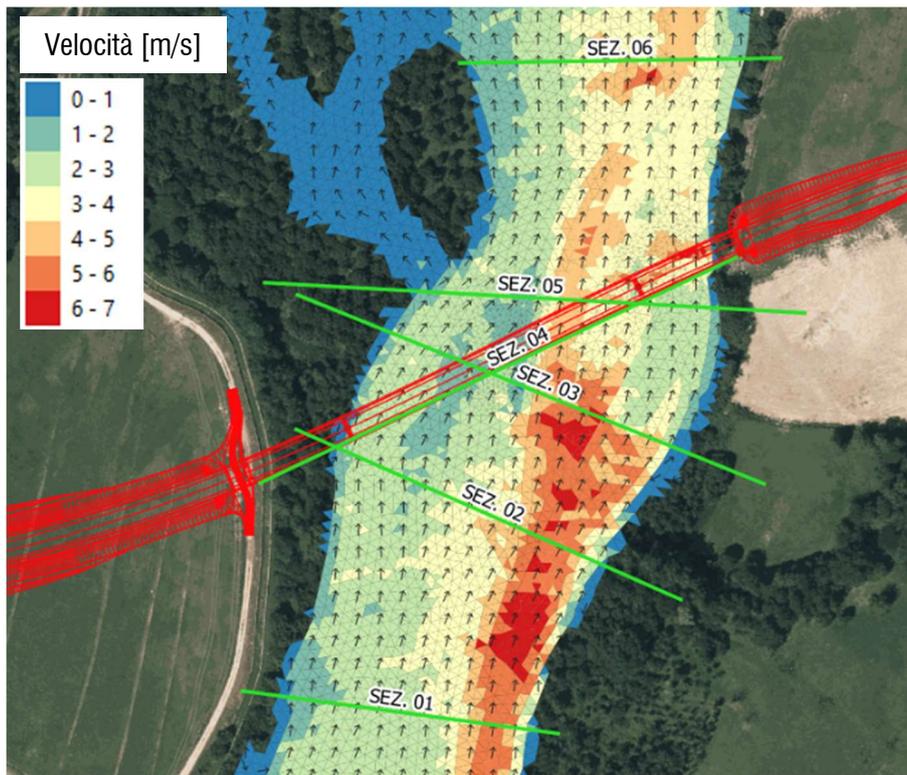


Figura 28 –Piena TR 200 anni, stato di progetto, campo di velocità

In analogia con i livelli idrici, in corrispondenza della sezione di monte, la 01, e di quella di valle, la 06, non si apprezzano perturbazioni di rilievo alle velocità della corrente. Lungo le altre sezioni, quelle collocate a monte delle pile in alveo, sono apprezzabili localizzate riduzioni della velocità nelle vicinanze degli ostacoli verticali (Figura 30, Figura 31, Figura 32 e Figura 33). I maggiori rallentamenti si riscontrano in corrispondenza della pila 03, quella interessata dalle maggiori velocità a monte, pari a circa 3.5-4 m/s. L'effetto perturbativo sul campo di velocità si genera e si smorza in un tratto di alveo non più esteso di quello individuato dalle sezioni 01 e 06.

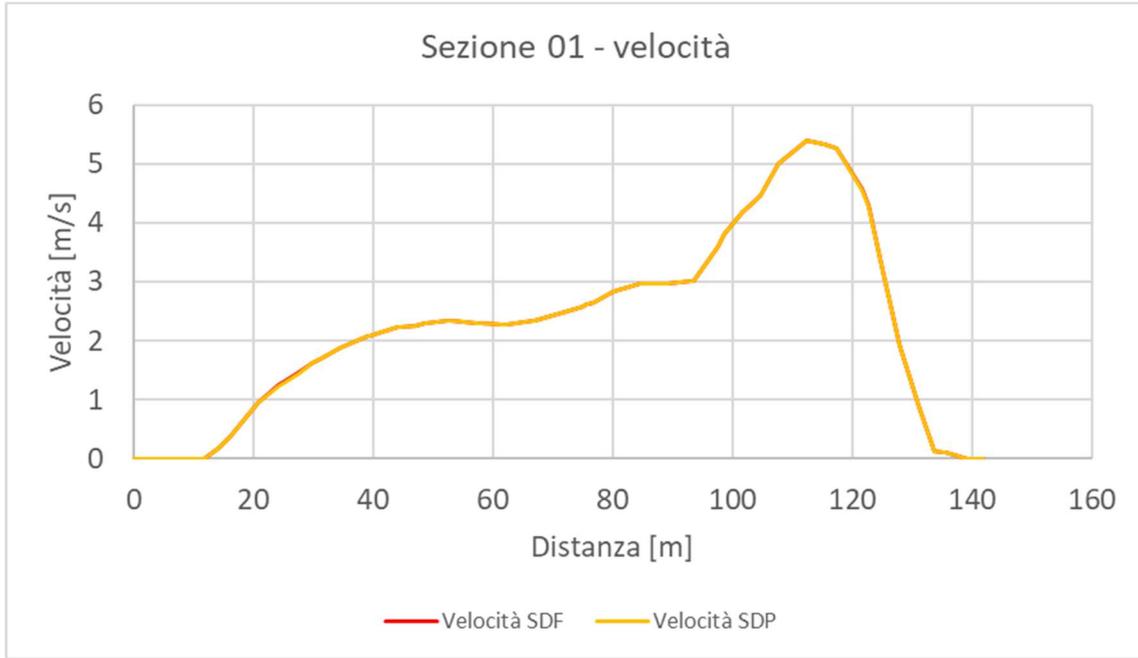


Figura 29 –Piena TR 200 anni, velocità, sezione 01

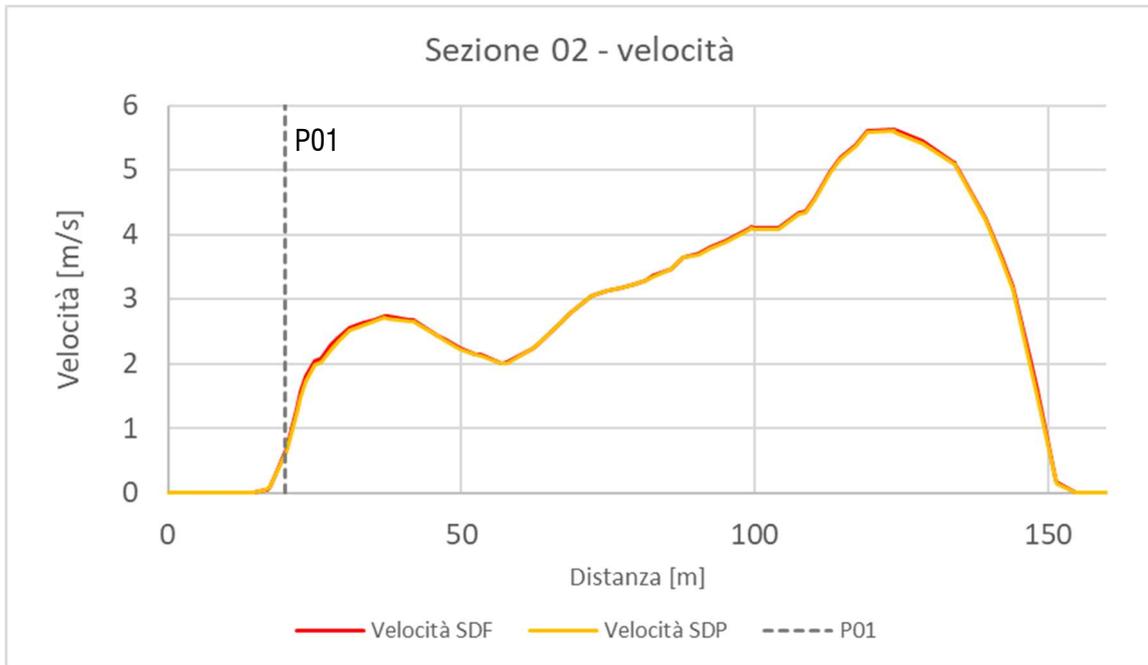


Figura 30 –Piena TR 200 anni, velocità, sezione 02

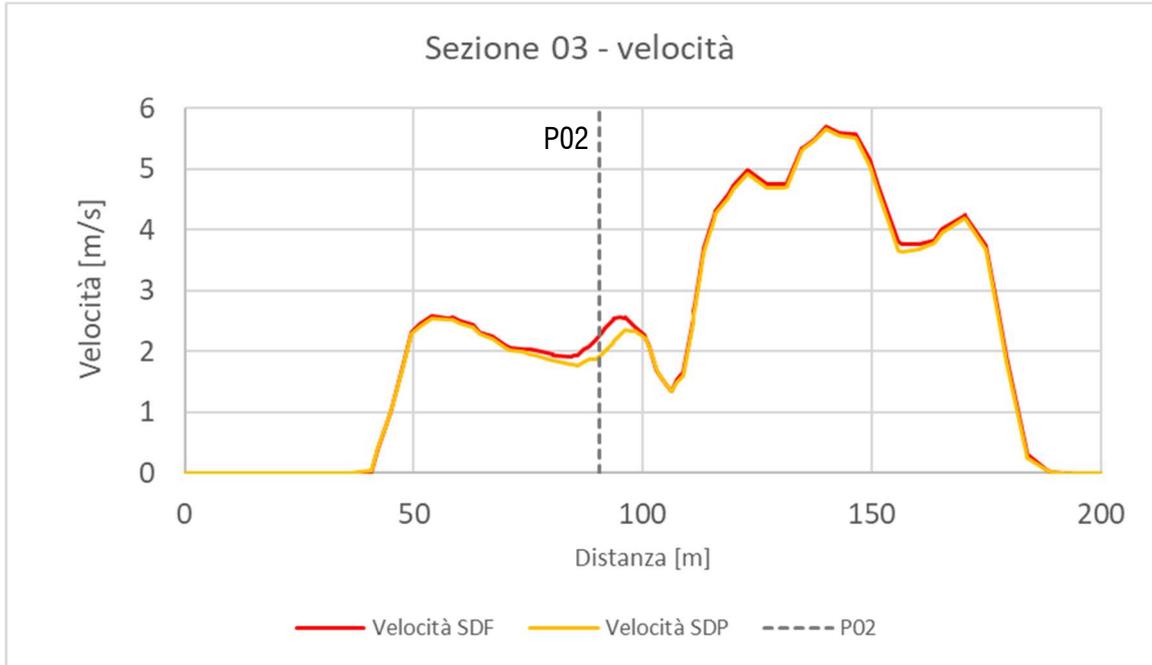


Figura 31 –Piena TR 200 anni, velocità, sezione 03

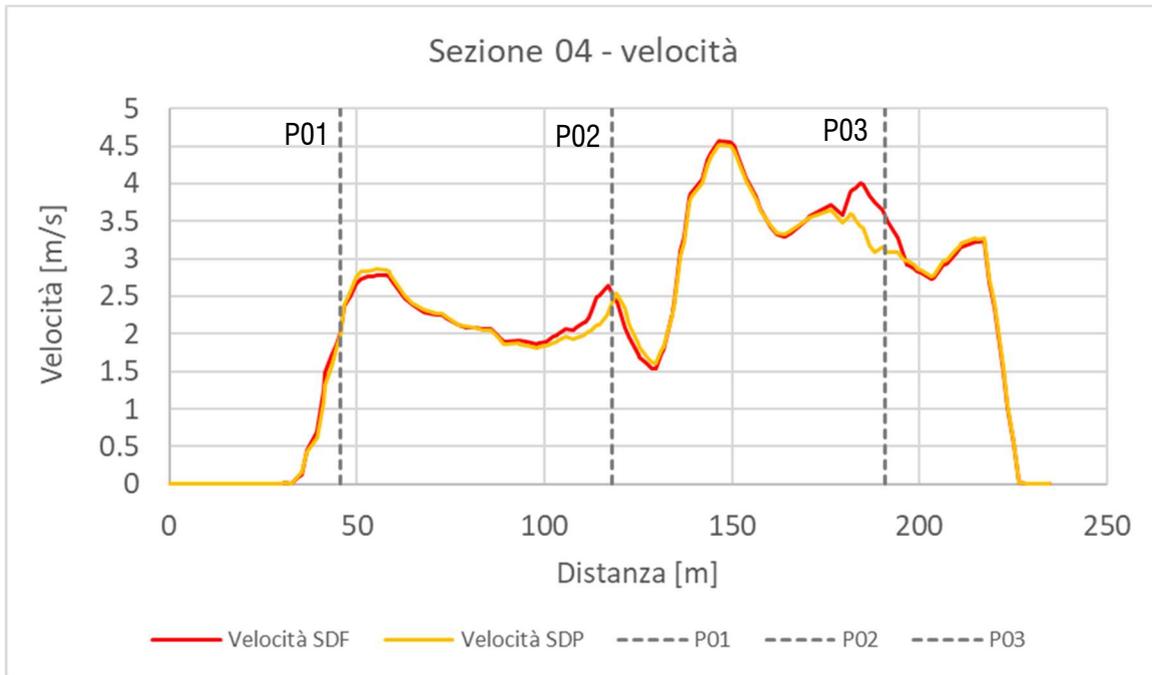


Figura 32 –Piena TR 200 anni, velocità, sezione 04

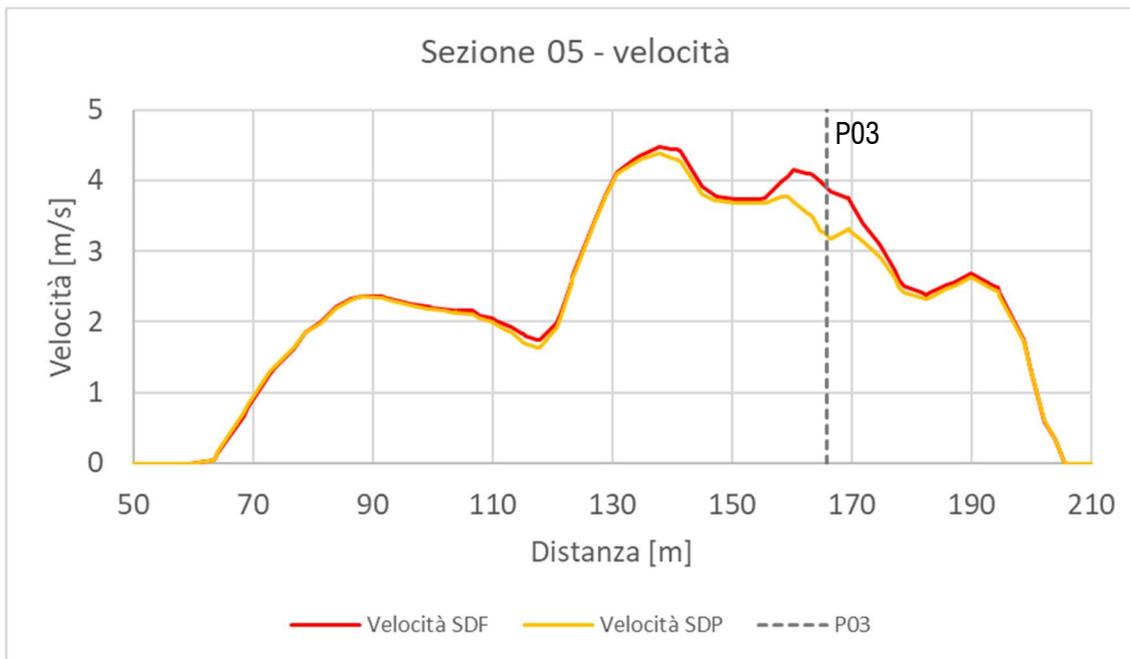


Figura 33 –Piena TR 200 anni, velocità, sezione 05

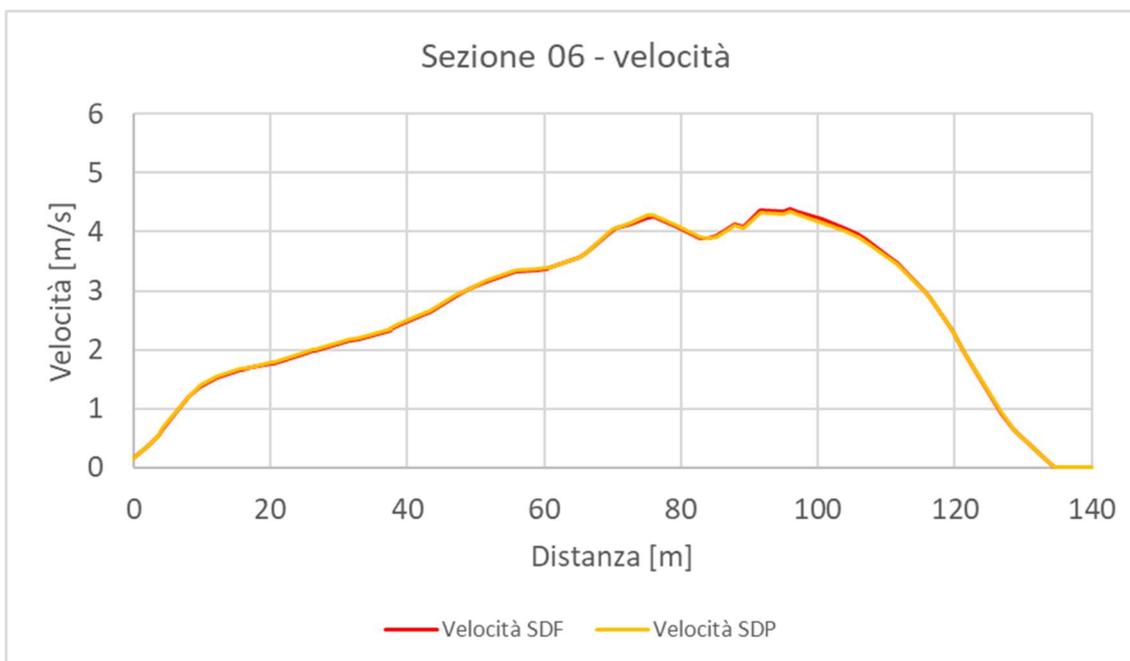


Figura 34 –Piena TR 200 anni, velocità, sezione 06

5.1.3 Caratteristiche della corrente in approccio al viadotto

Al fine di valutare le caratteristiche della corrente nell'intorno dell'opera di attraversamento, è stata analizzata la distribuzione spaziale del numero di Froude per lo scenario di progetto, Figura 35. Per la piena di riferimento, la corrente in approccio al viadotto è mediamente lenta, prossima alla critica, cioè con numero di Froude di poco inferiore ad uno. In destra idraulica, tra le sezioni 01e 03 appaiono alcune aree in cui il numero di Froude è superiore ad 1, cioè si instaurano localmente dei flussi di corrente veloce. Più a valle dell'attraversamento la corrente è tendenzialmente lenta, con numero di Froude medio pari a 0.6. I risultati delle simulazioni evidenziano come a monte del viadotto, in destra Ellero, si localizzi un risalto di tipo ondulatorio, scarsamente dissipativo, con numeri di Froude inferiori generalmente a 1.7.

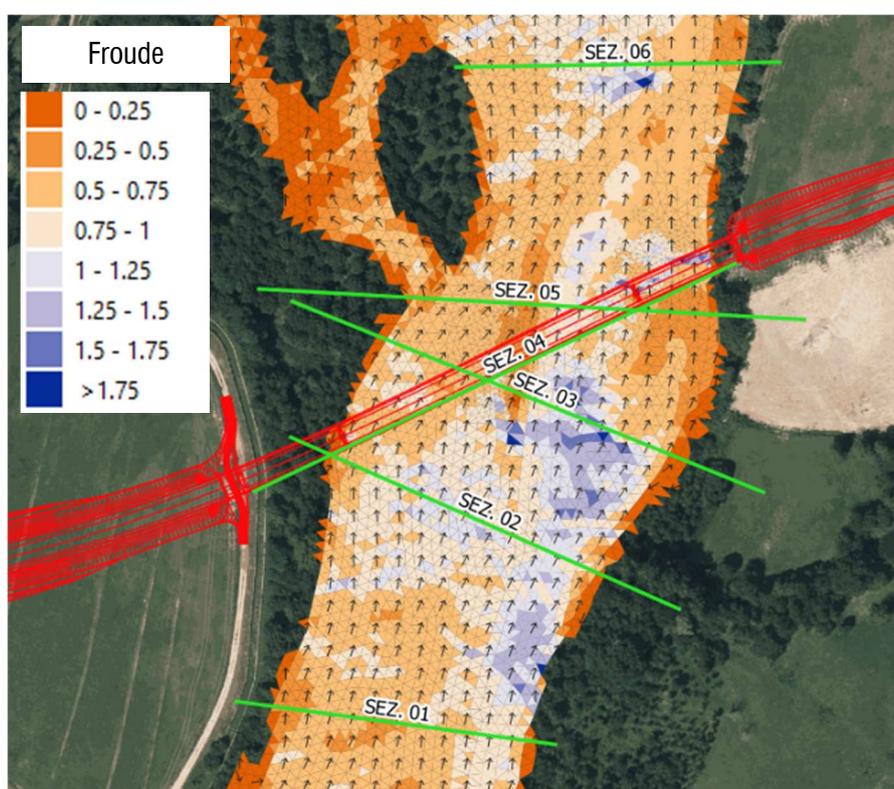


Figura 35 –Piena TR 200 anni, stato di progetto, distribuzione del numero di Froude

5.1.4 Tensioni tangenziali al fondo, portata critica e pendenza di equilibrio

La tensione tangenziale al fondo è un parametro di fondamentale importanza nello studio dei fenomeni legati al trasporto solido. Secondo l'approccio proposto da Shields la condizione di incipiente di movimento si manifesta in alveo per una tensione al fondo superiore ad un valore limite detto anche "critico". La tensione critica di Shields viene calcolata secondo la seguente espressione:

$$\tau_{cr} = \theta_{cr}(\rho_s - \rho)gd$$

dove $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ sono rispettivamente densità dei sedimenti e dell'acqua, g è l'accelerazione di gravità, θ_{cr} è il parametro di Shields che dipende dalle caratteristiche della corrente liquida e dal diametro del materiale. Per un campo di moto in regime turbolento, Shields propose $\theta_{cr} = 0.06$, altri autori come Meyer-Peter e Muller, indicarono un valore lievemente inferiore, $\theta_{cr} = 0.047$. Nella presente analisi è stato utilizzato un coefficiente intermedio pari a 0.055.

Generalmente d viene assunto pari al diametro mediano, nel caso in esame $d = d_{50} = 117 \text{ mm}$. Ne viene che:

$$\tau_{cr} = 104 \text{ N/m}^2.$$

La definizione della condizione di incipiente di movimento può essere particolarmente complessa poiché dipende da molti fattori, come la distribuzione granulometrica complessiva e dalle pendenze locali dell'alveo, ecc. Questa prima analisi semplificata ha lo scopo fornire una quantificazione di massima dei parametri di riferimento utili all'analisi morfologica, che sarà successivamente sviluppata in modo più rigoroso attraverso la modellazione a fondo mobile.

In Figura 36 è riportato l'andamento delle tensioni tangenziali ottenute attraverso la simulazione a fondo fisso per la piena TR 200 anni. Nell'intorno del viadotto di progetto la tensione tangenziale media pari a circa 180-200 N/m^2 , ampiamente superiore al valore critico, che denota, nelle condizioni di calcolo, una tendenza generalizzata all'instabilità dei sedimenti a fondo alveo.

Attraverso una serie di ulteriori simulazioni numeriche è stata ricercata quella condizione limite per cui, in termini medi areali, la tensione tangenziale al fondo risulti confrontabile con il valore critico stimato in precedenza (Figura 37). Tale valore risulta pari a **250 m^3/s** , verrà nel seguito menzionato come portata critica.

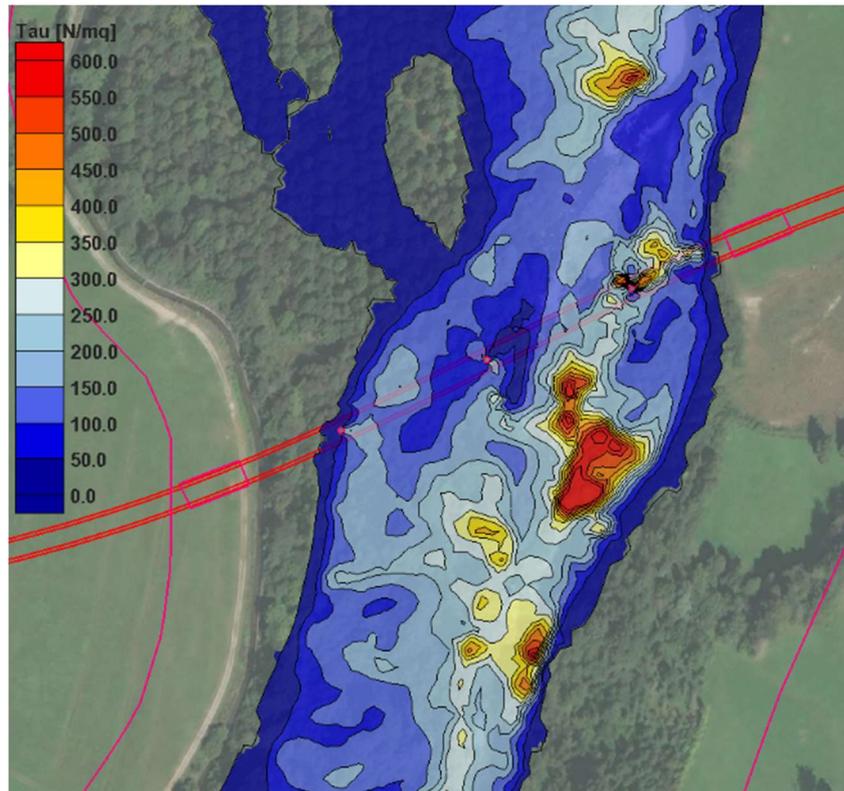


Figura 36 –Piena TR 200 anni, tensione al fondo

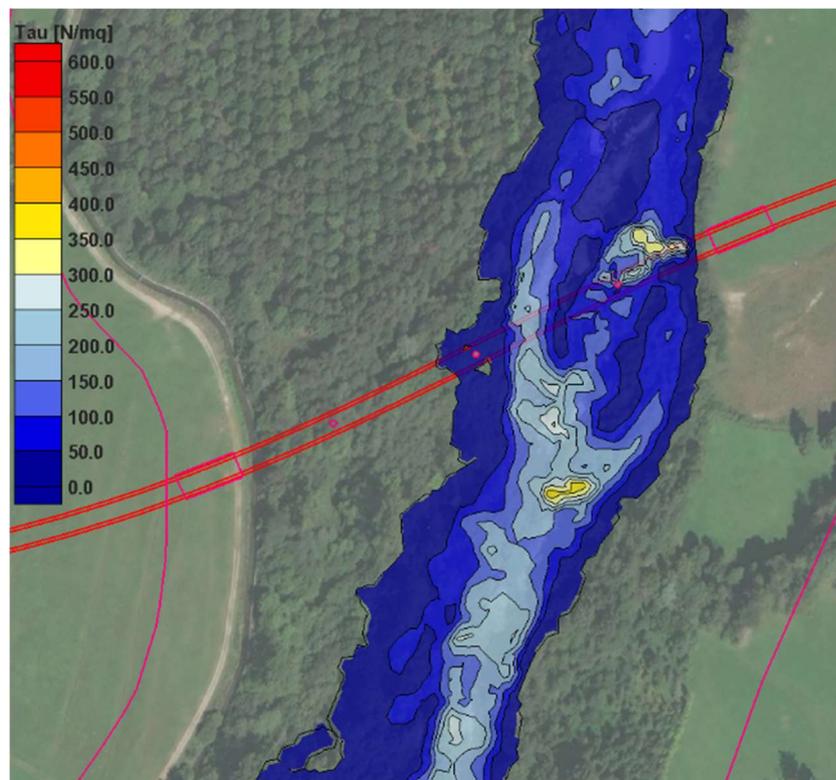


Figura 37 –Portata critica, tensione al fondo

Fondamentale per l'analisi della condizione di stabilità del fondo alveo è il confronto della sua pendenza attuale con quella di equilibrio valutata per un prefissato valore di portata.

In un alveo rettangolare e in condizioni di moto uniforme, valgono le seguenti relazioni:

$$Q = K_s R_H^{2/3} i_f^{1/2} A$$

$$\tau = \gamma R_H i_f$$

Dove Q è la portata liquida, K_s è il coefficiente di scabrezza, R_H è il raggio idraulico, i_f è la pendenza dell'alveo, A è la sezione bagnata, γ è il peso specifico dell'acqua. Nell'ipotesi di sezione rettangolare larga il raggio idraulico può essere confuso con il tirante y . Combinando le precedenti equazioni ed imponendo la condizione critica $\tau = \tau_{cr}$, è possibile calcolare quella pendenza dell'alveo che garantisce, per il moto uniforme, la condizione di limite di stabilità sei sedimenti. Questa pendenza è nota come pendenza di equilibrio o di compensazione.

Per un tratto di torrente posto a cavallo dell'opera di attraversamento, sulla base delle relazioni precedenti, è stata effettuata un'interpretazione semplificata dei risultati numerici delle simulazioni bidimensionali. Per la piena duecentennale $Q_{200} = 831 \text{ m}^3/\text{s}$, la pendenza di equilibrio è pari a circa 0.6%, mentre l'attuale pendenza del torrente in corrispondenza dell'area di intervento è attorno a 1.25%. La stessa stima è stata fatta per la portata critica $Q_c = 250 \text{ m}^3/\text{s}$, ottenendo che la pendenza di compensazione, calcolata per via semplificata è confrontabile con la pendenza attuale dell'alveo.

5.2 SIMULAZIONI A FONDO MOBILE

Le analisi a fondo mobile sono state effettuate considerando due scenari:

1. Idrogramma costante con portata pari al valore critico;
2. Idrogramma costante con portata estrema di tempo di ritorno 200 anni.

I risultati si riferiscono all'evoluzione dopo un tempo di ritorno di 120 ore (5 giorni), intervallo temporale sufficientemente lungo da considerare i risultati stazionari. L'approccio utilizzato è semplificato poiché si trascurano, in favore di sicurezza, le durate effettive degli eventi di piena e la frequenza delle portate liquide in un dato periodo. Scopo della presente analisi non è infatti quello di stimare le variazioni altimetriche del fondo alveo conseguenti al passaggio di un prefissato evento di piena, ma piuttosto quello di valutare le tendenze morfologiche nel medio-lungo periodo. Nella realtà le dinamiche d'alveo hanno carattere impulsivo, sono fortemente correlate alle forme degli idrogrammi, e alla successione degli eventi di piena significativi. La ricerca di una soluzione stazionaria è un tentativo di valutare un assetto asintotico e tendenziale.

L'imposizione del valore critico della portata ha come obiettivo quello di massimizzare le variazioni altimetriche locali nel breve-medio termine. Il secondo idrogramma, al contrario, ha lo scopo di favorire una più profonda evoluzione dell'alveo dovuto a fenomeni a scale temporali e spaziali maggiori.

Nei prossimi paragrafi verranno esposti i risultati numerici ottenuti per le simulazioni a fondo mobile. In particolare verranno descritte le variazioni altimetriche del fondo alveo e le divagazioni planimetriche del torrente.

5.2.1 Variazioni altimetriche dell'alveo – simulazione “portata critica”

In Figura 38 è riportato il profilo altimetrico del terreno nella condizione iniziale e in quella finale. Le quote sono ottenute interrogando i risultati rispetto all'asse centrale del dell'alveo a fine simulazione. Come si vedrà nei prossimi paragrafi, il torrente è soggetto a divagazioni, con conseguente modifica dell'asse planimetrico iniziale.

Il profilo attuale del terreno è indicato con linea marrone tratteggiata, mentre quello a fine simulazione con linea continua in verde chiaro. Sono anche indicate le posizioni della traversa di derivazione a monte e della del viadotto di progetto. Per questo scenario, a valle della traversa si manifesta una tendenza erosiva che tende ad attenuarsi procedendo verso valle. A cavallo dell'opera di attraversamento la pendenza dell'alveo è pari a circa 1.25 %, mentre nella configurazione finale tende a diminuire leggermente, attestandosi attorno 1.15%.

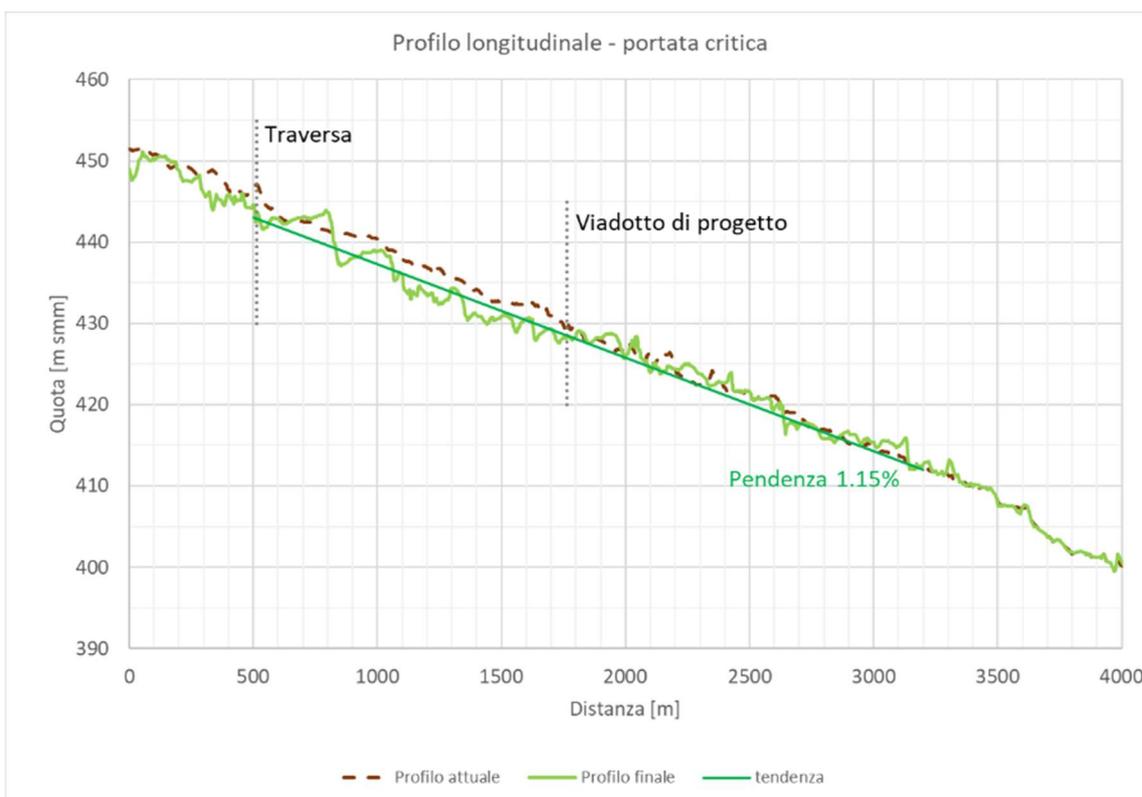


Figura 38 – Profilo altimetrico del fondo alveo, simulazione Qcritica

In corrispondenza delle sezioni di riferimento, vengono confrontate le quote del terreno iniziali e finali. La traccia delle sezioni è indicata nella in Figura 39. La sezione 01 è posta a circa 170 m del viadotto, la sezione 04 è collocata poco a monte del dell'opera di attraversamento, la sezione 06 è tracciata 130 m a valle. Le sezioni 02, 03 e 05 sono tracciate ortogonalmente alla direzione della corrente in piena, poste poco a monte delle pile 01, 02 e 03 rispettivamente.

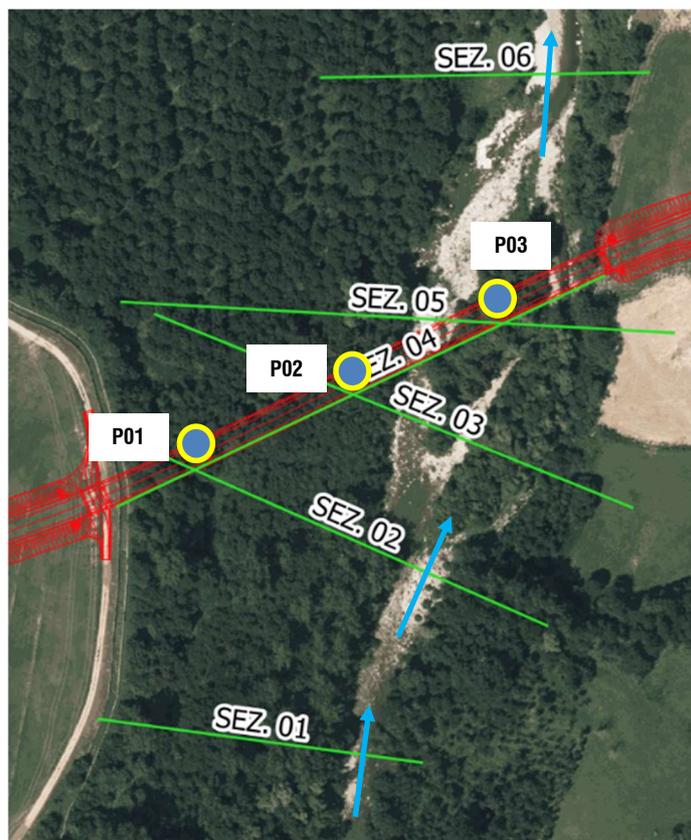


Figura 39 –Planimetria delle sezioni di riferimento

I risultati delle simulazioni condotte applicando la portata critica mostrano nell'intorno dell'area di intervento una tendenza all'incisione dell'alveo di magra. In corrispondenza delle sezioni 03-04-05 si nota un abbassamento dell'alveo in destra idraulica in corrispondenza della sponda, mentre in sinistra appare un restringimento dell'alveo. La barra centrale attualmente divide i due alvei cresce, a discapito dell'incisione in sinistra. A ridosso del viadotto l'alveo del torrente si mantiene stabile, l'incisione subisce un approfondimento dell'ordine di 1.5 m.

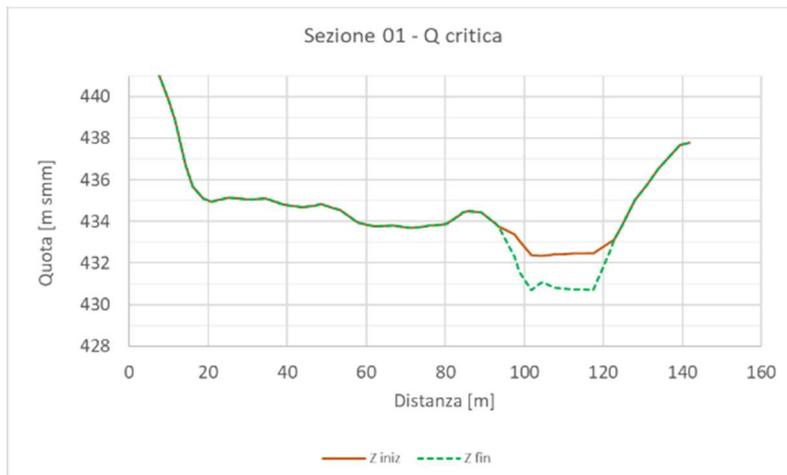


Figura 40 – Sezione 01, andamento del fondo alveo, simulazione Qcritica

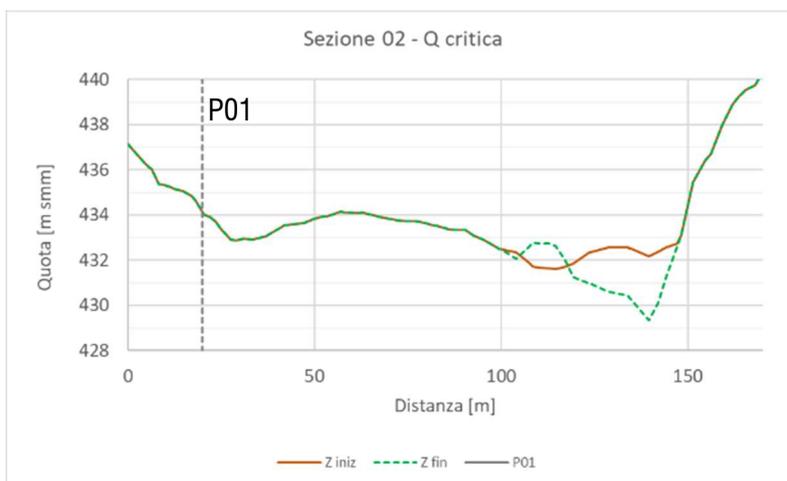


Figura 41 – Sezione 02, andamento del fondo alveo, simulazione Qcritica

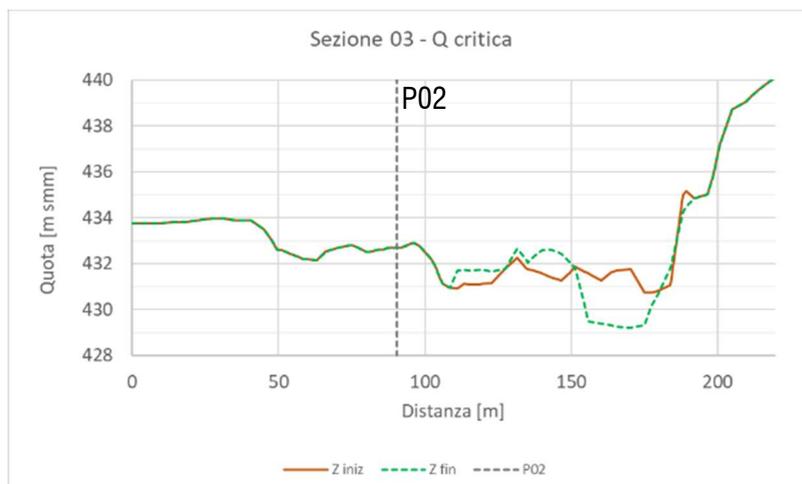


Figura 42 – Sezione 03, andamento del fondo alveo, simulazione Qcritica

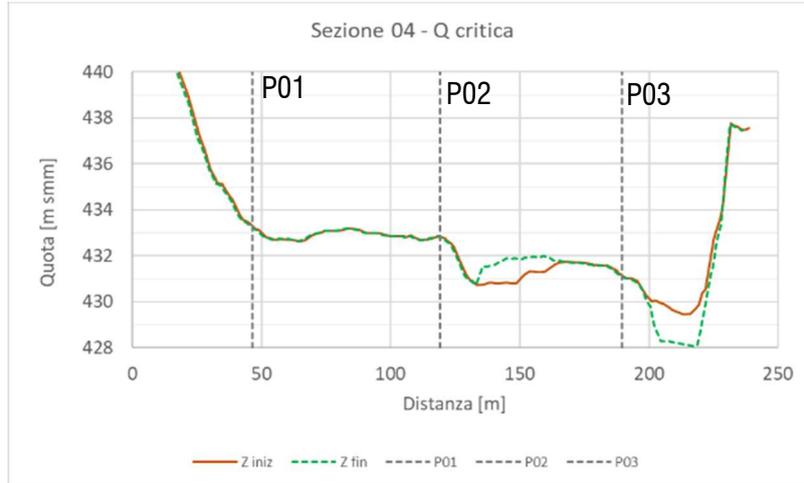


Figura 43 – Sezione 04, andamento del fondo alveo, simulazione Qcritica

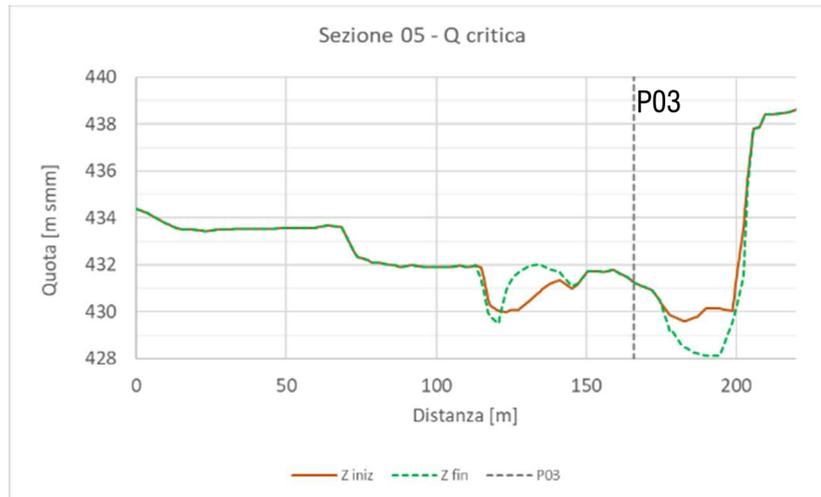


Figura 44 – Sezione 05, andamento del fondo alveo, simulazione Qcritica



Figura 45 – Sezione 06, andamento del fondo alveo, simulazione Qcritica

5.2.2 Variazioni altimetriche dell'alveo – simulazione TR 200 anni

Diversamente dallo scenario precedente, la piena Tr 200 anni ha carattere estremo. E' possibile calcolare la probabilità che tale evento venga superato o uguagliato almeno una volta in un periodo di N anni:

$$p_s = 1 - (1 - 1/T_r)^N$$

In un arco temporale di 100 anni, la probabilità di non superamento è pari al 39%, in 200 anni è pari a circa il 63%.

Come si vedrà nel seguito, la condizione è particolarmente gravosa poiché induce delle variazioni altimetriche e planimetriche consistenti.

I risultati delle simulazioni vengono esposti in modo analogo a quelli ottenuti per la portata critica, profilo altimetrico e sezioni.

La traversa di derivazione viene rappresentata all'interno del modello come un ostacolo inerodibile. I risultati delle simulazioni a fondo mobile mostrano come la piena Tr 200 anni induca un'erosione localizzata a lato della traversa di monte provocando un'incisione laterale consistente. L'aggiramento dell'ostacolo provoca una concentrazione dei flussi in un'area ristretta, l'elevata capacità erosiva della corrente che provoca un'importante alterazione dell'alveo del torrente, come appare nel profilo di Figura 46. A valle della traversa, l'alterazione del fondo alveo si manifesta con un consistente abbassamento della sezione. Procedendo verso valle la differenza tra la quota iniziale e quella finale si riduce progressivamente, il nuovo profilo altimetrico appare meno inclinato con una pendenza pari a circa al 0.72%, inferiore di quella attuale 1.25%. L'erosione indotta dall'aggiramento della traversa sembra generare un'instabilità dell'alveo che evolve verso una nuova configurazione morfologica più stabile, con pendenze prossime a quelle di compensazione-equilibrio. Il materiale eroso viene trasportato più a valle, dove si osserva una tendenza al sovralluvionamento.

A cavallo dell'opera di attraversamento, i risultati delle simulazioni evidenziano un abbassamento del fondo alveo. Nel dettaglio:

- Sezione 1, sezione 2: attualmente l'alveo di magra è collocato in destra, mentre in sinistra è presente l'area golenale. A termine della simulazione morfologica si genera un'isola centrale che separa due incisioni, poste ai lati della sezione. L'alveo in sinistra ha quota del talweg prossima a quella in destra, ma è superiore per estensione orizzontale.
- Sezione 3, sezione 4: rispetto alle sezioni precedenti, l'incisione in sinistra ha profondità ed estensione superiori a quella in destra, il filone principale della corrente è traslato verso il lato opposto. Lungo la sezione parallela al viadotto, la 04, appare un'ampia area di erosione in quell'area occupata inizialmente della golenale, mentre in destra il fondo alveo tende ad alzarsi. L'abbassamento della quota della golenale in sinistra è dell'ordine dei 2 metri. Rispetto alla configurazione attuale in cui le pile 01 e 02 sono esterne all'alveo principale, in quella finale le pile sono posizionate centralmente;
- Sezione 5, sezione 6: Le sezioni presentano un'incisione principale collocata in sinistra.

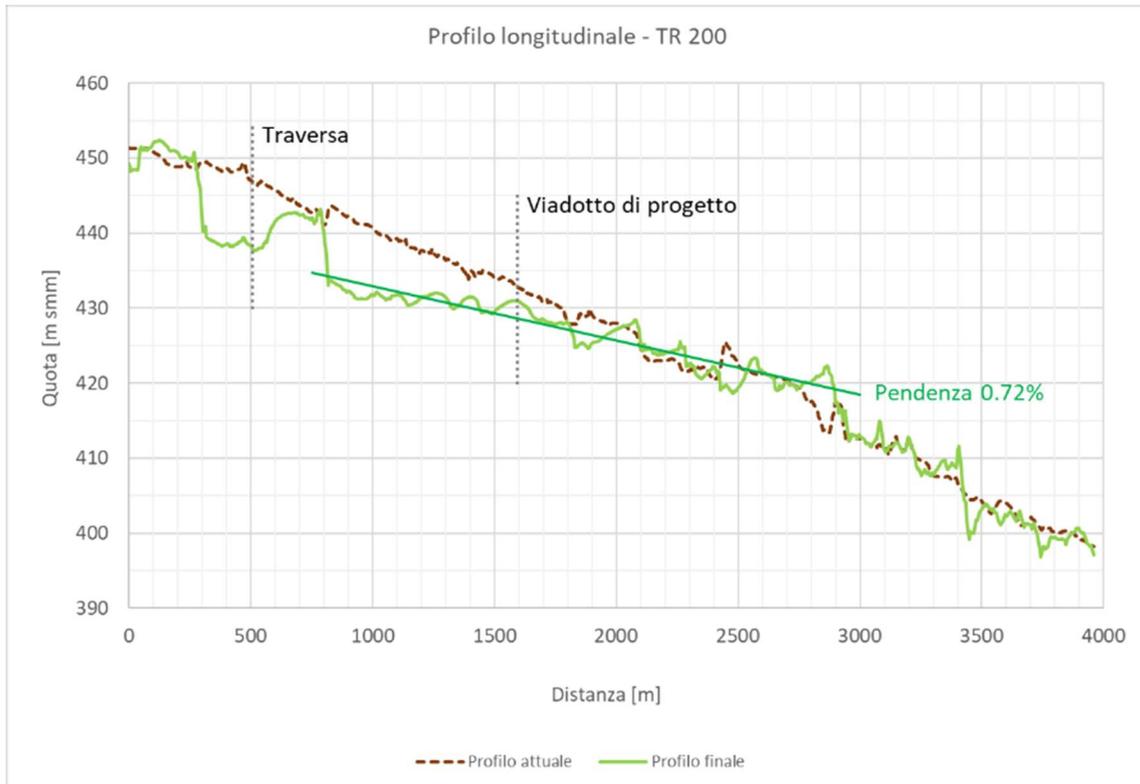


Figura 46 – Profilo altimetrico del fondo alveo, simulazione TR 200 anni

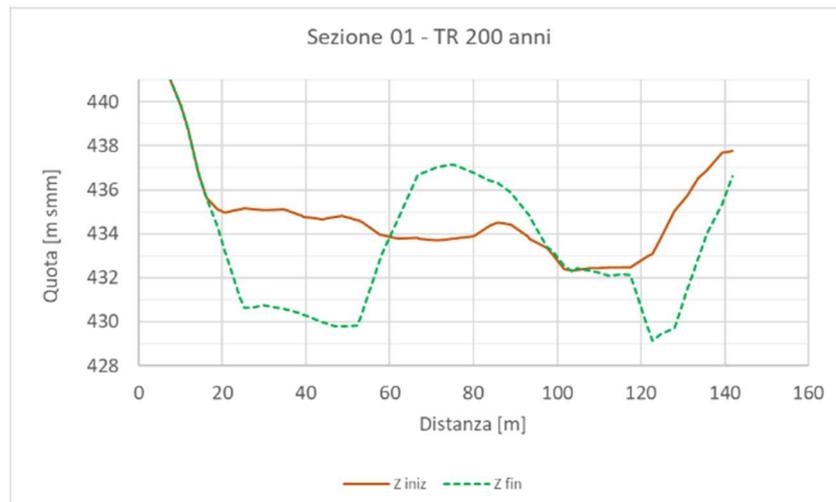


Figura 47 – Sezione 01, andamento del fondo alveo, simulazione TR 200 anni

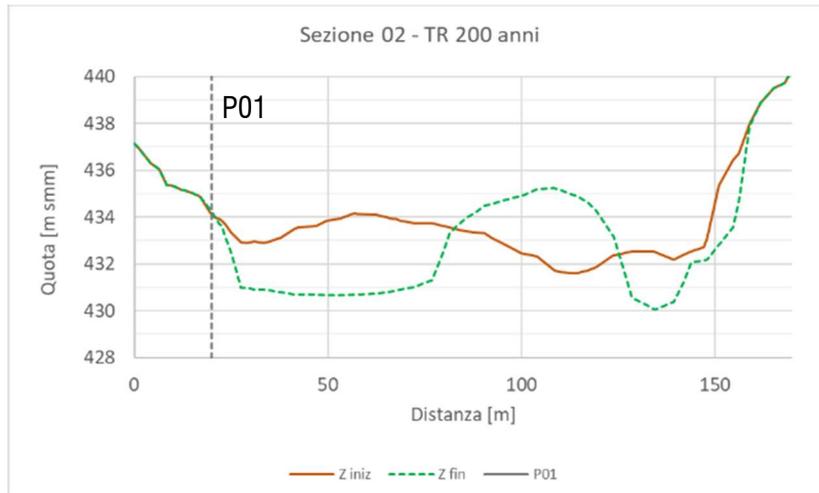


Figura 48 – Sezione 02, andamento del fondo alveo, simulazione TR 200 anni

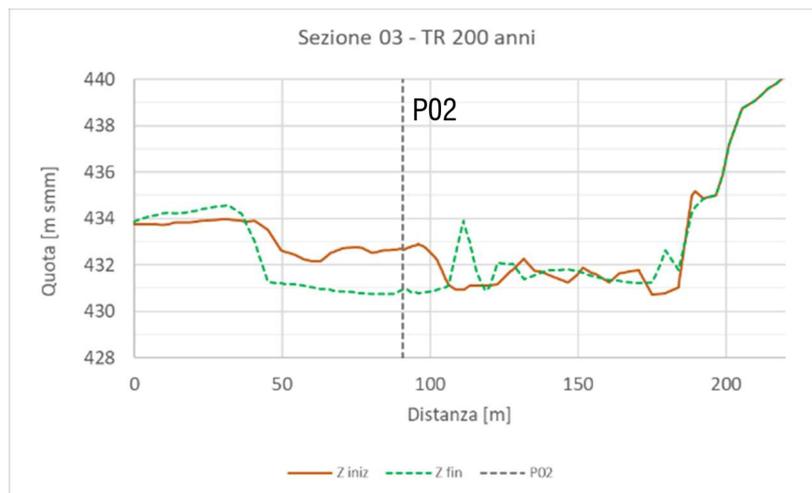


Figura 49 – Sezione 03, andamento del fondo alveo, simulazione TR 200 anni

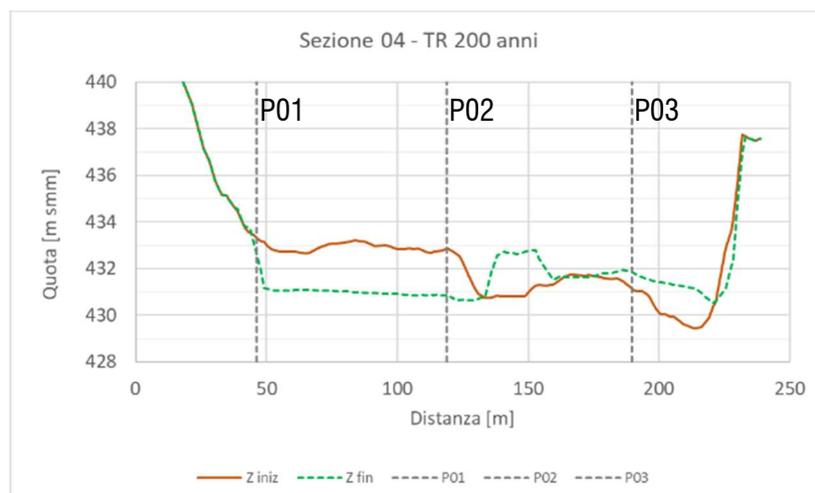


Figura 50 – Sezione 04, andamento del fondo alveo, simulazione TR 200 anni

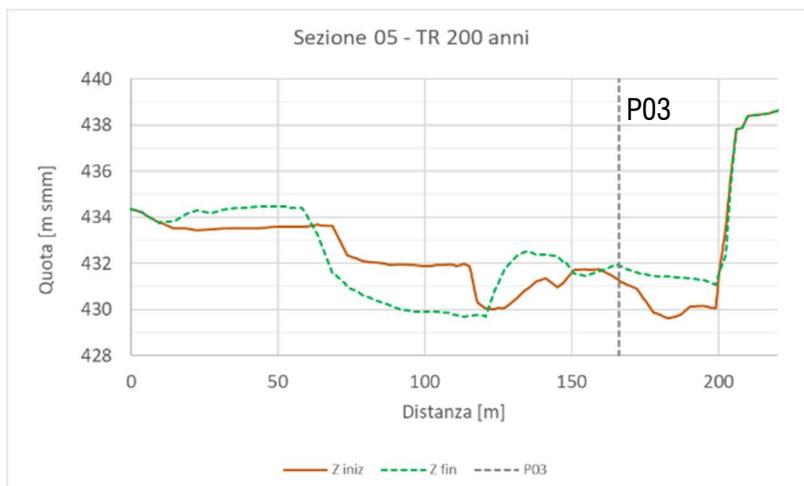


Figura 51 – Sezione 05, andamento del fondo alveo, simulazione TR 200 anni

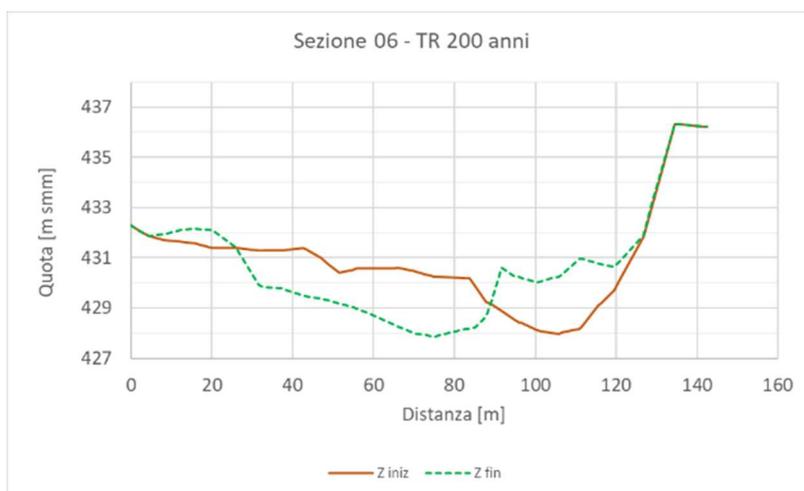


Figura 52 – Sezione 06, andamento del fondo alveo, simulazione TR 200 anni

5.2.3 Divagazioni planimetriche – simulazione “portata critica”

Nel presente paragrafo verranno analizzate le tendenze alla divagazione del Torrente Ellero attraverso l’interpretazione della distribuzione planimetrica della portata specifica. La portata specifica è data, punto per punto, dal prodotto del tirante idrico per la velocità. La mappatura della portata specifica consente di individuare con chiarezza i filoni di corrente principale, all’interno dei quali scorre buona parte della portata liquida. L’alveo centrale è normalmente caratterizzato da tiranti e velocità elevate, mentre nelle aree più esterne, quelle golenali, sia tiranti che velocità sono normalmente inferiori. Per tale motivo nell’alveo inciso si osservano portate specifiche significativamente superiori a quelle delle zone più esterne.

In Figura 53 è riportata la distribuzione della portata specifica ad inizio a fine simulazione, la simulazione di riferimento è quella “Q critica” a fondo mobile, il tratto in esame è quello a monte del viadotto Ellero. Rispetto alla condizione iniziale non si osservano divagazioni di particolare interesse. Lungo l’alveo principale si nota un sensibile aumento della portata specifica che indica una maggiore concentrazione dei flussi liquidi, e di conseguenza, una maggior incisione dell’alveo rispetto alla condizione iniziale.

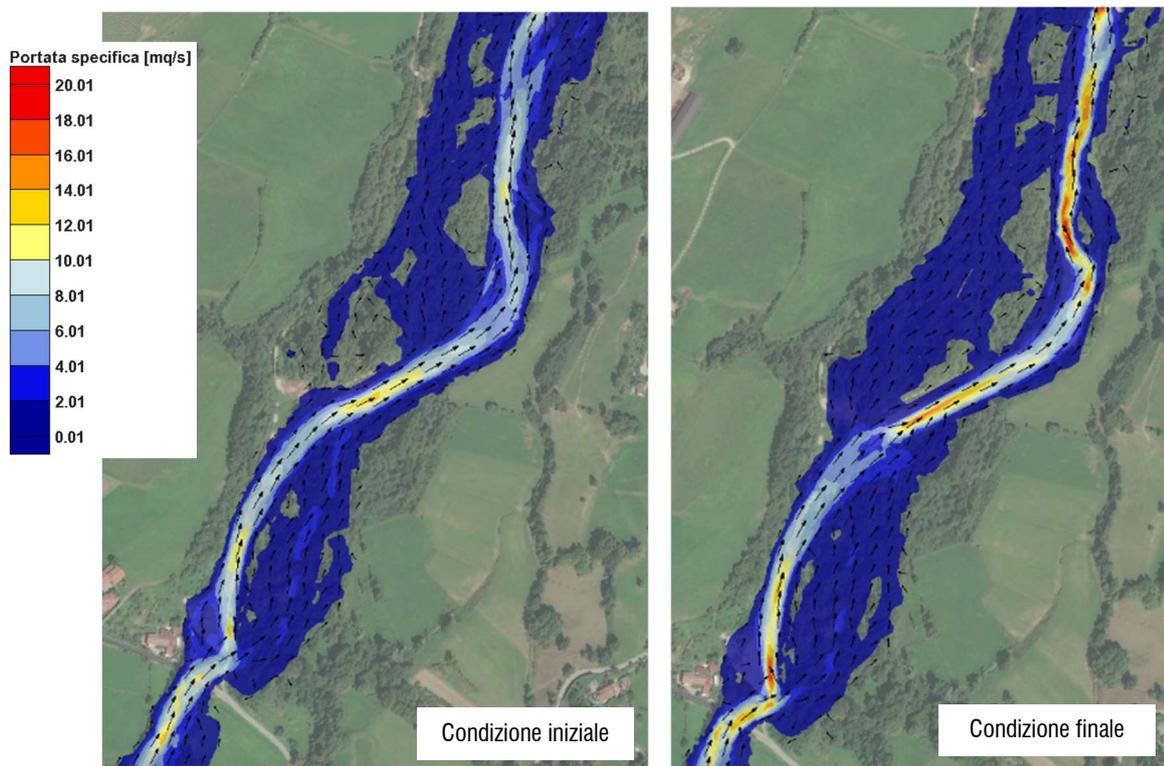


Figura 53 –Simulazione “Q critica”, distribuzione della portata specifica iniziale e finale, zona a monte del viadotto

Nel tratto più a valle, a ridosso dell'area di intervento, permane la tendenza all'incisione dell'alveo principale (Figura 54). Nell'intorno del viadotto la portata si distribuisce inizialmente lungo due filoni di corrente che tendono ad unirsi più a valle. Nella configurazione finale invece, la portata liquida scorre prevalentemente in destra idraulica, all'interno dell'alveo inciso. Nell'intorno dell'area di intervento, in accordo con quanto mostrato per la sezione 04, il corso d'acqua divaga tendenzialmente verso destra.

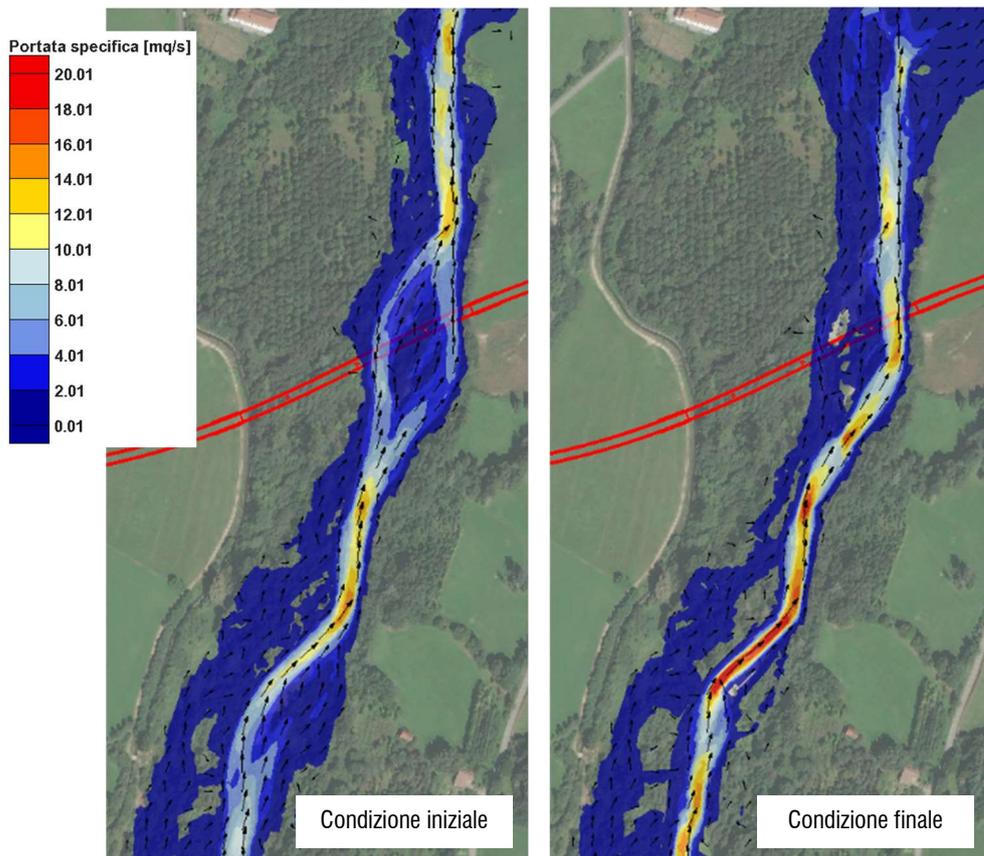


Figura 54 – Simulazione “Q critica”, distribuzione della portata specifica iniziale e finale, area di intervento

A valle del viadotto, confrontando la condizione iniziale e quella finale, si osservano alcune divagazioni dell'asse principale della corrente. Contestualmente si riscontrano incrementi dell'area allagata, legati all'aumento della quota media del fondo alveo. Il materiale eroso nei tratti più a monte viene trascinato verso valle, dove si manifestano sovralluvionamenti.

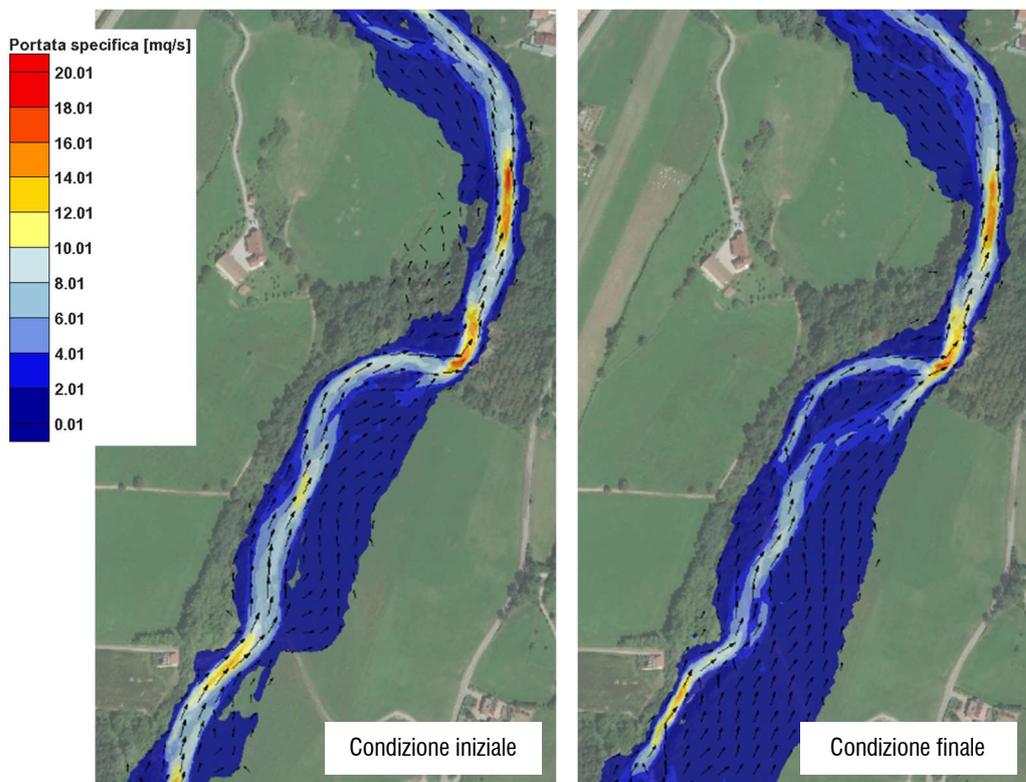


Figura 55 – Simulazione “Q critica”, distribuzione della portata specifica iniziale e finale, zone a valle dell'area intervento

5.2.4 Divagazioni planimetriche – simulazione TR 200 anni

Nelle prossime immagini vengono indicate le distribuzioni delle portate specifiche ottenute attraverso la simulazione "TR 200 anni" a fondo mobile. Anche per questo scenario verrà confrontata la configurazione iniziale con quella finale.

Come appare in Figura 56, il flusso in piena è in grado di incidere profondamente l'area golenale posta alla destra della traversa di derivazione. A valle della traversa il flusso liquido appare prima concentrato per poi diffondersi su una sezione più ampia. Procedendo verso l'area di intervento il corso d'acqua si distribuisce lungo due filoni, quello principale è collocato in sinistra.

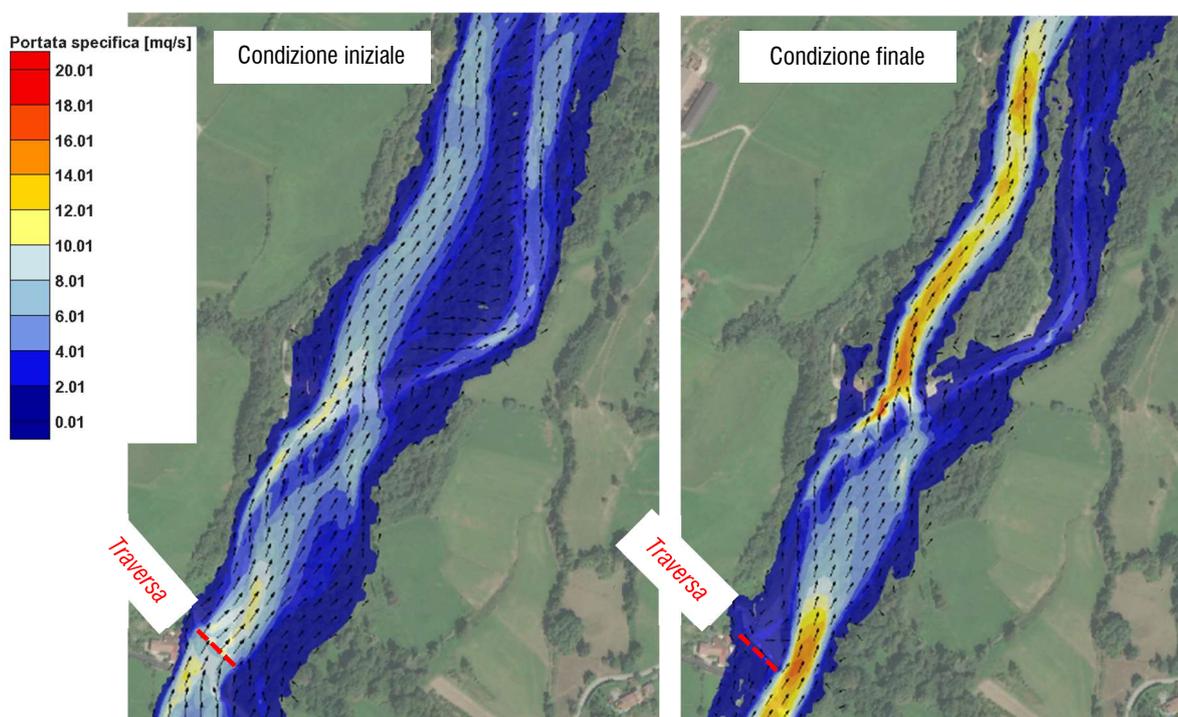


Figura 56 –Piena TR 200 anni, distribuzione della portata specifica iniziale e finale, zona a monte del viadotto

Nella configurazione iniziale, nell'intorno del viadotto, la portata liquida è distribuita prevalentemente in destra idraulica (Figura 57), mentre nella condizione finale il flusso è maggiormente concentrato in sinistra. L'evoluzione del fondo alveo ha indotto uno spostamento della corrente principale da destra verso sinistra ed un "abbandono" dell'attuale alveo. Questa tendenza alla divagazione in sinistra è in accordo con gli spostamenti planimetrici dell'alveo principale osservati negli ultimi 50-70 anni, Figura 13. A valle della traversa di derivazione, fino all'area di intervento si osserva una tendenziale riduzione dell'area allagata dovuta alla concentrazione del flusso complessivo in una sezione più incisa rispetto a quella attuale.

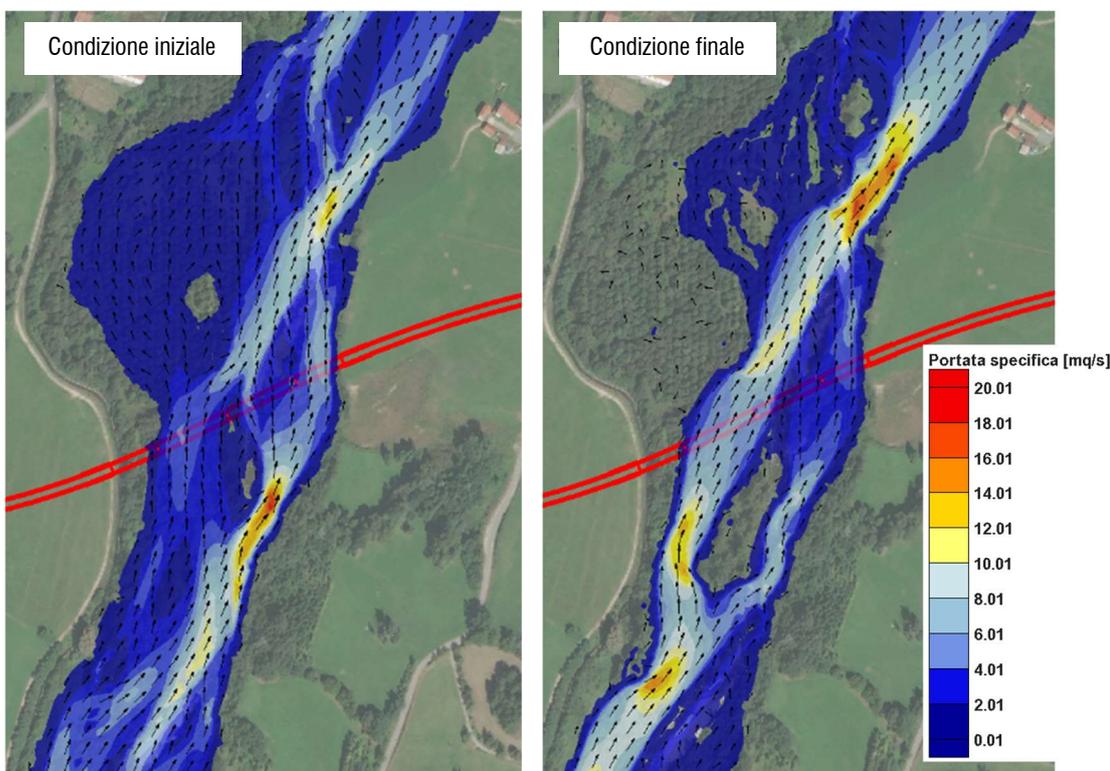


Figura 57 – Piena TR 200 anni, distribuzione della portata specifica iniziale e finale, area di intervento

Come mostrato nel corrispondente profilo altimetrico di Figura 46, il materiale eroso dal tratto di torrente collocato a monte del viadotto è trasportato più a valle dove tende a distribuirsi causando un generalizzato aumento della quota di fondo alveo. Dal confronto delle immagini di Figura 58 appare una tendenza alla divagazione della corrente principale, sia in destra che sinistra idraulica.

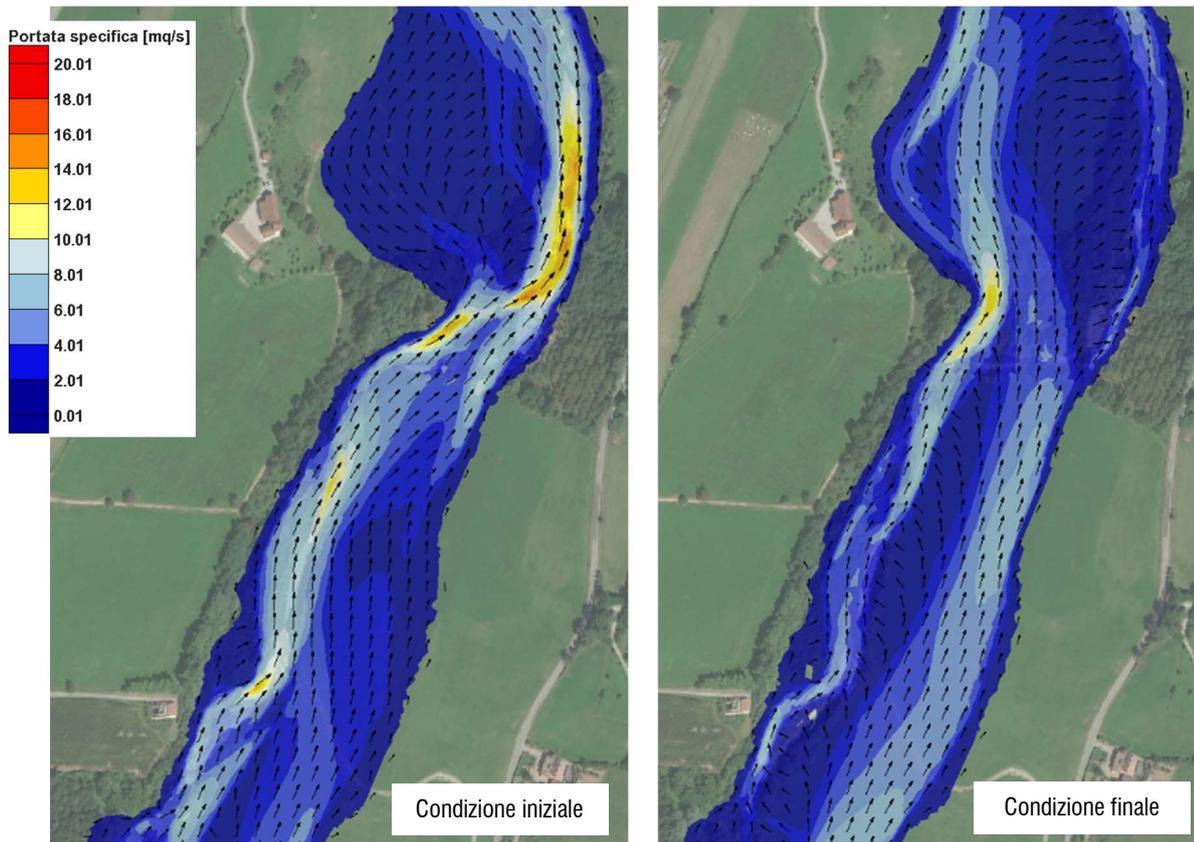


Figura 58 –Piena TR 200 anni, distribuzione della portata specifica iniziale e finale, zona a valle dell’area intervento

6 CONCLUSIONI

La presente relazione fa parte degli elaborati specialistici annessi al progetto definitivo "S.S. 28 del Colle di Nava Lavori di realizzazione della Tangenziale di Mondovì con collegamento alla S.S. 28 Dir - 564 ed al casello A6 "Torino-Savona" - III Lotto (Variante di Mondovì)". In particolare sono stati trattati gli aspetti idraulici e morfologici relativi all'attraversamento stradale sul Torrente Ellero.

La prima parte dello studio ha riguardato la descrizione del corso d'acqua, basata sul materiale fotografico disponibile, sugli studi pregressi e sulle analisi granulometriche. Individuate le caratteristiche morfologiche principali, ci si è soffermati sull'analisi delle divagazioni passate dell'alveo principale, indicazioni utili ad individuare le potenziali tendenze future.

La seconda parte dello studio è dedicata alla modellazione numerica bidimensionale del corso d'acqua. Le simulazioni sono state svolte rispetto alla configurazione attuale e dello stato di progetto, in condizioni a "fondo fisso" e a "fondo mobile".

L'obiettivo delle simulazioni a fondo fisso è quello di fornire indicazioni utili alla verifica di compatibilità idraulica e al dimensionamento delle opere di protezione. I risultati della modellazione hanno evidenziato che, per la piena duecentennale, le alterazioni al campo di moto sono riscontrabili solo nell'intorno delle pile. Nel complesso l'opera di attraversamento non modifica in modo sostanziale né i livelli idrici né le velocità. L'analisi delle tensioni al fondo ha permesso di valutare l'attuale condizione di stabilità dell'alveo e la pendenza di equilibrio.

Le simulazioni a fondo mobile sono state svolte applicando due differenti portate, quella critica e quella duecentennale. Il primo scenario consente di valutare le modifiche dell'alveo indotte da una piena ordinaria, mentre il secondo rappresenta un evento estremo. Dalla simulazione "Q critica" si evince una tendenza all'approfondimento del talweg in corrispondenza dell'asse del viadotto, mentre l'assetto globale dell'alveo rimane sostanzialmente inalterato. Rispetto alla piena Tr 200 l'alveo appare in condizioni di instabilità, si osserva infatti una variazione della pendenza complessiva, incisioni e riporti dell'alveo e divagazioni della corrente principale.