

Politecnico di Milano

Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale

Corso di Laurea Specialistica in Civil Engineering for Environmental Risks Mitigation



EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Strategie di modellazione ed applicazione al caso del torrente Mallero

Relatore

Dott. Ing. Alessio RADICE

Politecnico di Milano

Tesi di Laurea Specialistica di:

Paolo FILIPPETTI

Matr. 752614

Alessandra Marie Therèse ZOPPI

Matr. 752538

Anno Accademico 2011-2012

ABSTRACT

Italiano

Lo studio del trasporto solido nei fiumi montani è molto importante in quanto coinvolge spesso una grande quantità di sedimenti che può provocare dei notevoli cambiamenti nella morfologia dei fiumi aumentando il rischio alluvionale anche per valori relativamente bassi di portata liquida.

Negli ultimi anni si è reso sempre più necessario studiare questi fenomeni con dei modelli numerici che implementassero l'accoppiamento acqua-sedimenti. Tuttavia, per definire questi modelli, sono richiesti numerosi parametri che, soprattutto in ambito montano, spesso sono di difficile caratterizzazione.

L'obiettivo del presente lavoro è quello di partire da studi pregressi sul trasporto solido svolti dal Politecnico di Milano per cercare di risolvere le criticità incontrate. Verrà creato un alveo fittizio che permetterà di studiare in maniera più mirata gli effetti di alcuni fattori sul fenomeno del trasporto solido e quindi sulla morfologia dell'alveo. Nello specifico, si studierà l'immissione di una portata solida in una sezione intermedia dell'alveo per valutare gli effetti che si hanno sia a monte che a valle di tale immissione e per capire quando è possibile considerare solo un tratto di alveo trascurando ciò che succede a monte; verrà modellata una briglia e in particolare si tenterà di riprodurre il fenomeno dell'interrimento; si introdurrà un'analisi plurigranulare per studiare come la granulometria dell'alveo evolve col tempo e lungo le sezioni. Lo studio plurigranulare verrà poi applicato ad un caso reale (il fiume Mallero) e confrontato con uno studio monogranulare per valutare se in questo caso specifico un onere computazionale maggiore sia necessario oppure no; in particolare si cercherà di simulare l'alluvione che ha interessato la Valtellina nel 1987 e, per verificare la bontà del modello, si confronteranno i risultati delle simulazioni con i valori degli accumuli di sedimenti di alcune sezioni caratteristiche misurati dopo l'evento.

Parole chiave: trasporto solido, rischio alluvionale, morfologia dei fiumi, portata laterale, briglia, granulometria variabile.

English

The study of solid transport in rivers mountain is very important as it often involves a large amount of sediments which can cause considerable changes in the morphology of the rivers increasing the alluvial risk even for relatively low values of water discharge. In recent years it has become increasingly necessary to study these phenomena with numerical models that implement the water-sediment coupling. However, in order to define these models, several parameters are required, that, especially in mountain areas, they are often difficult to characterize.

The objective of this work is to start from previous studies on the sediment carried by the Politecnico di Milano and to try to overcome the difficulties encountered. It will be created an artificial channel that will allow to study more easily the effects of some factors on the phenomenon of sediment transport and on the morphology of the riverbed. Specifically, we will study the introduction of an external sediment source to evaluate the effects both upstream and downstream of this release and to recognize when it is possible to consider only a stretch of the riverbed neglecting what happens upstream; it will be modeled a check-dam and in particular it will be attempted to reproduce the silting phenomena; the non-uniform grain size analysis will be introduced to study how the particle size distribution of the riverbed evolves with time and along the cross-sections. Then the non-uniform grain size study will be applied to a real case (the river Mallero) and compared with an uniform one to assess if in this specific case a greater computational burden is necessary or not; in particular it will be simulated the flood that has affected the Valtellina in 1987 and, to verify the goodness of the model, the results of the simulations will be compared with the values of the sediments deposition measured after the event in some particular section.

Keywords: sediment transport, flood risk, river morphology, check-dam, external source, non-uniform grain size.

Indice

ABSTRACT	2
INTRODUZIONE.....	9
1. CONSIDERAZIONI PRELIMINARI	12
1.1 Rilevanza per il rischio alluvionale.....	12
1.2 Cenni storici	14
1.3 Modellistica	18
1.3.1 Il fenomeno del trasporto solido	18
1.3.1.1 Condizioni di incipiente movimento per il trasporto di fondo	19
1.3.1.2 Capacità di trasporto al fondo	21
1.3.1.3 Valutazione dell'evoluzione morfologica	23
1.3.2 Modelli matematici	24
1.3.2.1 Equazione di continuità.....	24
1.3.3 Modelli numerici.....	31
1.4 Studi pregressi	33
1.4.1 Tesi di Del Curto C. (2000)	33
1.4.1.1 Titolo	33
1.4.1.2 Obiettivi.....	33
1.4.1.3 Struttura.....	33
1.4.1.4 Risultati	35
1.4.2 Tesi di Mauri M. e Spagnolatti M. (2009).....	36
1.4.2.1 Titolo	36
1.4.2.2 Obiettivi.....	36
1.4.2.3 Struttura.....	36
1.4.2.4 Risultati	37
1.4.3 Tesi di Bottà U. e Meroni G. (2010).....	38
1.4.3.1 Titolo	38
1.4.3.2 Obiettivi.....	38
1.4.3.3 Struttura.....	38
1.4.3.4 Risultati	39
1.4.4 Tesi di Colombo S. e Giuriani G. (2011).....	40
1.4.4.1 Titolo	40
1.4.4.2 Obiettivi.....	40

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

1.4.4.3 Struttura.....	40
1.4.4.4 Risultati	41
1.5 Obiettivi	42
2. STRATEGIE DI ANALISI NUMERICA.....	44
2.1 Il modello matematico <i>Basement</i> [®]	45
2.1.1 La risoluzione delle equazioni governanti	46
2.1.2 La risoluzione del trasporto solido.....	47
2.2 “Mini guida utente”: Input	50
2.2.1 Definizione dei blocchi	53
2.3 “Mini guida utente”: Output	54
2.3.1 Visualizzazione nel tempo e nello spazio	56
2.4 Regolarizzazione attraverso la media mobile.....	60
3. MODELLAZIONE E ANALISI DI CASI SINTETICI	67
3.1 Portata solida laterale	68
3.1.1 Elenco delle varie combinazioni $K_S (Q_S)$, $K_L (Q_L)$	68
3.1.2 Confronti al variare delle immissioni solide.....	70
3.1.3 Sovrapposizioni delle portate solide laterali e a monte	74
3.2 Inserimento di una briglia.....	76
3.2.1 Modellizzazione briglia	77
3.2.1.1 Briglia allungata	79
3.2.1.2 Media mobile frazionata.....	81
3.2.1.3 Bilancio di massa	83
3.2.1.4 Validazione dei risultati della briglia	85
3.2.2 Risultati con briglia n° 2	86
3.2.2.1 Profili a differenti gradi di sovralimentazione	87
3.2.2.2 Confronti in presenza-assenza di briglia	90
3.2.2.3 Andamenti del profilo nel tempo	92
3.2.2.4 Sassogrammi variabili nel tempo	96
3.3 Analisi granulometrica.....	99
3.3.1 “mini guida utente”	99
3.3.2 Validazione del modello, caso del corazzamento	102
3.3.2.1 Esperimento di corazzamento	103
3.3.2.2 Analisi di sensitività al volume di controllo.....	105

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

3.3.3 Riproduzione di un esperimento di letteratura.....	107
3.3.3.1 Descrizione dell'apparato sperimentale	107
3.3.3.2 Digitalizzazione e primi risultati	109
3.3.3.3 Strategie per migliorare il modello.....	113
3.3.3.4 Analisi sensitiva al volume di controllo.....	117
3.3.3.5 Conclusioni.....	121
3.3.4 Applicazione al caso test.....	121
3.3.4.1 Simulazioni su fondo corazzato	121
3.3.4.2 Simulazioni su fondo non corazzato	124
3.3.4.3 Sensività al volume di controllo.....	125
3.4 Considerazioni sui risultati.....	129
4. IL CASO DEL MALLERO	132
4.1 Descrizione dell'ambito territoriale di riferimento	132
4.1.1 Il bacino	132
4.1.2 Granulometrie e pendenze	135
4.1.3 Pluviometria.....	137
4.1.4 Idrometria.....	139
4.1.5 Le alluvioni del 1987	141
4.1.6 Calcolo idrogramma di piena.....	144
4.2 Analisi monogranulare.....	145
4.2.1 Simulazioni pregresse con Basement 1.7.....	145
4.2.2 Nuove simulazioni con la versione Basement 2.2	149
4.2.2.1 Alimentazione alluvione '87	150
4.2.2.2 Erosione.....	150
4.2.2.3 Scelta istanti caratteristici.....	152
4.3 Analisi plurigranulari.....	154
4.3.1 Creazione del modello	154
4.3.1.1 Scelta del fondo d'alveo (corazzato a monte)	154
4.3.1.2 Scelta dei parametri numerici.....	156
4.3.1.3 Scelta della granulometria entrante	158
4.3.2 Indagini sul comportamento della piena dell' 87	166
4.3.2.1 Studio delle portate d'equilibrio e del grado di sovralimentazione	167
4.3.2.2 Corazzamento dell'alveo.....	170

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

4.3.2.3 Altezze d'acqua	172
4.3.3 Analisi di dettaglio	174
4.3.3.1 Evoluzione delle sezioni critiche.....	175
4.3.3.2 Evoluzione dei parametri di pericolosità.....	182
CONCLUSIONI.....	187
SIMBOLOGIA.....	194
BIBLIOGRAFIA.....	196

INTRODUZIONE

La previsione del trasporto solido negli alvei, in particolare in quelli torrentizi tipici dei bacini montani, è molto importante per la valutazione del rischio nelle applicazioni di prevenzione, gestione del territorio, pianificazione delle zone di insediamento e salvaguardia della vita umana; nel caso in cui l'alveo sia soggetto ad erosione, infatti, possono verificarsi danni a strutture (argini, pile dei ponti), se invece è in deposito i livelli idrici aumentano e di conseguenza cresce il rischio di allagamenti. A questo riguardo esiste una direttiva europea (Floods Directive, 2007) per la valutazione preliminare del rischio di alluvioni, con particolare attenzione alle conseguenze negative che esse potrebbero causare e alla verifica dell'efficacia delle infrastrutture artificiali esistenti.

Nei bacini montani, possono verificarsi, durante lo stesso evento meteorologico, sia colate detritiche che trasporto di sedimenti, rendendo ancor più difficile un'accurata stima dell'erosione, del trasporto solido e delle zone di accumulo. C'è spesso una reciproca interazione tra i processi di erosione che avvengono sui fianchi dei pendii del bacino ed il tracciato dell'alveo; in particolare il fenomeno del trasporto solido può essere limitato o dalla disponibilità dei sedimenti o dalla capacità di trasporto della corrente.

Tipicamente la modellazione del trasporto solido usa modelli monodimensionali che partono dalle equazioni delle derivate parziali di Saint-Venant di conservazione della massa e della quantità di moto per acqua e sedimenti. Nel corso degli anni sono stati sviluppati modelli bidimensionali e tridimensionali ma, indipendentemente dal modello utilizzato, la parametrizzazione è un problema in quanto soprattutto negli alvei montani entrano in gioco molte variabili di difficile determinazione.

Nonostante un'attiva ricerca in tale campo quindi, la conoscenza dei processi di trasporto solido è ancora limitata e nessuno dei modelli pubblicati, e più avanti brevemente descritti nei loro campi di applicabilità, è in grado di descrivere perfettamente le rilevanze sperimentali o le misure di campagna; nella maggior parte dei casi le misure sono state effettuate a regimi di portate medio – basse, a causa delle oggettive difficoltà dei rilievi, mentre sono tipicamente assenti misure di trasporto solido a portate di picco o prossime all'esonazione.

Tutte queste peculiarità rendono il trasporto solido, specialmente negli alvei montani, un campo di ricerca ancora fecondo, oggetto di continue ricerche e tentativi di potenziamento, tra le quali si possono citare anche alcuni recenti elaborati di Tesi sviluppati presso questa Università (Del Curto, 1998 [1]; Mauri e Spagnolatti, 2009 [2]; Bottà e Meroni, 2010 [3]; Colombo e Giuriani, 2011 [4]). In particolare, in ciascuna delle suddette Tesi si sono evidenziate delle criticità

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

specifiche che in questo elaborato verranno approfondite e che si cercherà di risolvere per mezzo di differenti modellazioni.

Di seguito si propone una breve descrizione dei contenuti del lavoro:

- Il **Capitolo 1 - Considerazioni preliminari**, dà un'ampia panoramica sulle leggi che regolano il fenomeno della continuità idraulica e del suo accoppiamento con le formule empiriche che quantificano il trasporto solido; questi modelli matematici vengono poi applicati ai modelli numerici che forniscono delle soluzioni a tali fenomeni. Ed è proprio su alcuni di questi modelli numerici (Rhyme e Basement 1.7) che erano sviluppate le Tesi: si illustrano sia i risultati fino ad ora ottenuti che le criticità riscontrate che stimolano questo lavoro.
- Dei modelli numerici sopra nominati, nel **Capitolo 2 – Strategie di analisi numerica**, si studia in maniera approfondita il codice *Basement*[®] 2.2. Il punto di partenza è la descrizione della composizione dei blocchi che compongono il programma e che si riferiscono alla geometria, al risolutore numerico delle equazioni governanti il sistema, ed al metodo di discretizzazione. Vista la non immediata praticità di utilizzo del programma, viene proposta la cosiddetta “mini guida utente” utile al lettore che vorrà riprodurre i risultati: essa fornisce infatti un ausilio per l'immissione di tutti i dati in input necessari a ricreare le stesse condizioni del modello ed è di supporto nell'interpretazione dei dati di output e soprattutto della loro rielaborazione; nell'ultimo paragrafo, invece, si descrivono alcuni metodi per regolarizzare la visualizzazione dei risultati attraverso tecniche di media mobile.
- Nel **Capitolo 3 – Modellazione ed analisi di casi sintetici**, vengono studiate alcune criticità che avevano generato problemi ed incongruenze nei precedenti lavori di Tesi. In questo capitolo viene analizzata l'immissione dell'apporto solido in una sezione intermedia del canale (a rappresentare per esempio una frana) ed il cui effetto non era stato studiato precedentemente; si modella la briglia, tentando di risolvere il problema sorto nelle analisi di Mauri e Spagnolatti di non riuscire a riprodurre l'interrimento ed infine si studia il caso di granulometria non uniforme, che non era stata considerata nelle Tesi precedenti che avevano invece seguito ipotesi di monogranularità.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

- Il **Capitolo 4 – Il caso del Mallero**, dà inizialmente una panoramica dell'ambito territoriale di riferimento descrivendo anche l'alluvione del 1987 che interessò il torrente Mallero oggetto di studio; si passa poi ad un'analisi monogranulare dove vengono confrontati i risultati ottenuti da Colombo e Giuriani con una versione antecedente del programma Basement (versione 1.7) con quelli ottenuti con la versione 2.2. Infine, si applica la modellazione con granulometria variabile al fiume Mallero, tentando di riprodurre le dinamiche che si sono verificate in occasione dell'alluvione dell'87.

I risultati raggiunti nei vari step di quest'articolato lavoro verranno riassunti nelle **conclusioni finali**.

1. CONSIDERAZIONI PRELIMINARI

1.1 Rilevanza per il rischio alluvionale

I torrenti dei bacini montani (**Fig. 1.1**), rispetto ai corsi d'acqua in ambienti pianeggianti, hanno caratteristiche morfologiche particolari che rendono difficile il calcolo della portata solida:



Fig. 1.1 – Alveo di montagna

- pendenza elevata: la corrente non è lineare e il moto non può in generale essere approssimato come uniforme, per cui la pendenza della linea dell'energia non può essere assimilata alla pendenza longitudinale del fondo; vengono influenzati la stabilità e il movimento del solido;
- il grado di sommergenza h/d , cioè il rapporto tra la profondità della corrente e il diametro caratteristico del fondo, può risultare ridotto; questo comporta la deformazione dei profili di velocità, e conseguentemente modifica le azioni di trascinamento sul solido di fondo;
- la granulometria è fortemente variabile: non è possibile caratterizzare l'alveo (e quindi le caratteristiche della corrente) con un solo valore di diametro caratteristico; nel corso del processo, essendo la mobilità dei sedimenti inversamente correlata al diametro, si determina un'erosione selettiva dei sedimenti di minore diametro, e quindi una variazione della distribuzione granulometrica del fondo;

L'eccessivo accumulo di sedimenti può portare a diminuire i valori di soglia libera, ovvero a ridurre l'area effettiva entro cui la corrente è libera scorrere, innalzando il rischio di esondazione anche per valori relativamente bassi di portata (vedi il caso del Mallero al **Par. 4.1**): se in condizione iniziale l'altezza delle sponde era infatti sufficiente ad incanalare una portata Q_{lim1} , a seguito dell'innalzamento del fondo d'alveo solo una parte di essa, detta portata Q_{lim2} potrà essere convogliata; la parte eccedente tale limite sarà portata esondante, come qui sotto schematizzato.

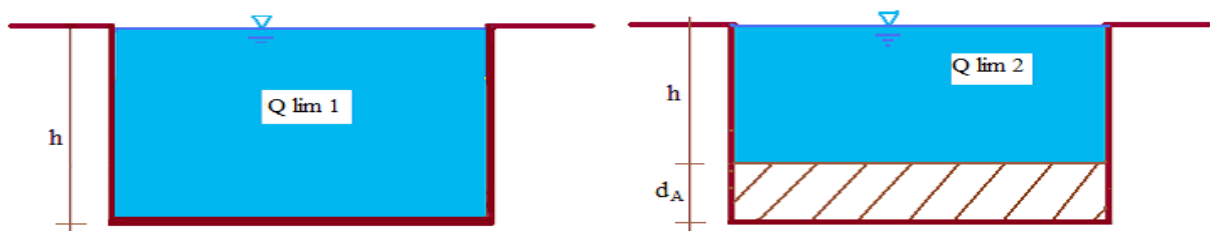


Fig. 1.2 – Valori di portata limite Q_{lim1} e Q_{lim2}

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

L'anno 2015 è stato scelto come termine ultimo entro il quale ogni Paese facente parte della Unione Europea esegua uno studio preliminare rivolto a individuare le aree del proprio territorio soggette a rischio alluvionale e, per ciascuna zona individuata, crei una mappa del rischio e ne stabilisca un piano di gestione basato sulla prevenzione, protezione e preparazione a tali eventi. Tale è il contenuto della Direttiva Europea sulle alluvioni, entrata in vigore il 6 Novembre 2007 [5]. Per la valutazione preliminare del rischio di alluvioni, in particolare delle conseguenze negative che esse potrebbero causare, e per la verifica dell'efficacia delle infrastrutture artificiali esistenti è previsto dalla Direttiva Europea l'utilizzo di modelli numerici che sfruttino le mappe topografiche dei bacini idrografici e le informazioni derivanti da eventi passati.

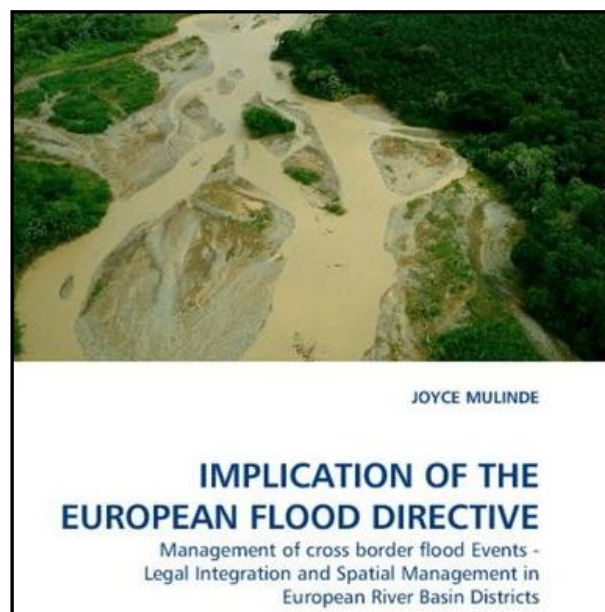


Fig. 1.3 – Flood directive

In Italia, in particolare, la zona alpina è caratterizzata da un' elevata predisposizione a fenomeni alluvionali, sia per l' attitudine a favorevoli condizioni meteorologiche, che per la particolare conformazione orografica. Il ruolo dei sedimenti negli alvei montani è molto più rilevante che nei corsi vallivi perché si possono avere variazioni morfologiche notevoli in tempi brevi.

1.2 Cenni storici

Il fenomeno del trasporto solido può essere messo in relazione con eventi di piena che interessano in particolare fiumi e torrenti di montagna. Un efficiente monitoraggio del trasporto solido diventa quindi importante per una corretta analisi del rischio.

Nel corso degli anni numerose alluvioni ed esondazioni hanno interessato il territorio italiano.

Nella **Tab 1.1** di seguito riportata, si dà una panoramica dei principali eventi di piena caratterizzati da trasporto solido che hanno interessato l'Italia dal 1948 al giorno d'oggi [6].

Data	Area geografica	Morti	Cause
22-nov 2011	Alluvione di Barcellona Pozzo di Gotto, Merì e Saponara (Messina)	3	Esondazione dei torrenti a causa delle intense precipitazioni. Forti mareggiate lungo le coste.
04-nov 2011	Alluvione di Genova e provincia	6	Esondazione/piena dei fiumi Bisagno, Fereggiano, Sturla e Scrivia a causa delle intense precipitazioni. Forti mareggiate lungo le coste.
25-ott 2011	Alluvione dello Spezzino e della Lunigiana (Liguria)	12	Esondazione/piena dei fiumi Vara, Magra, Taro e altri corsi d'acqua minori, a causa delle intense precipitazioni (500mm in meno di 6 ore)
11-giu 2011	Alluvione di Sala Baganza, Collecchio e Fornovo di Taro (Parma)	1	Esondazione del Rio Ginestra e del Torrente Scodogna a causa delle intense precipitazioni, incuria nella pulizia e gestione dei corsi d'acqua e cementificazione.
1 e 2 mar 2011	Frazioni di Marina di Ginosa del Comune di Ginosa (versante pugliese, la più colpita) e di Metaponto del Comune di Bernalda (versante lucano)	0	Piogge alluvionali, piena ed esondazione dei fiumi Bradano, Agri, Galaso, sovraccarico d'afflusso d'acqua della diga della Riserva regionale San Giuliano in Basilicata e altri corsi d'acqua minori, a causa delle intense precipitazioni.
03- mar 2011	Interessate gran parte delle Marche, il teramano e la Romagna	5	Piena ed esondazione dei fiumi Vomano, Tronto, Ete, Chienti, Fiastra, Esino, Misa e altri corsi d'acqua minori a causa delle intense precipitazioni.
1 e 2 nov 2010	Interessata buona parte del Veneto	3	Esondazione del fiume Bacchiglione e di altri corsi d'acqua minori causata dalle fortissime piogge nell'area prealpina e pedemontana veneta, unite a una rapida escursione termica con conseguente scioglimento del manto nevoso presente in montagna.
22-ott 2008	Alluvione e colata di detrito nel comune di Capoterra (CA)	5	A causa delle forti piogge si generano diverse esondazioni dei corsi torrentizi e colate detritiche che travolgono le abitazioni di Poggio dei Pini, Torre degli Ulivi e svariati altri insediamenti.
29-mag 2008	Alluvione e colata di detrito nel comune di Villar Pellice (Torino)	4	A causa delle forti piogge, nell'alveo del Rio Cassarot, tributario del torrente Pellice, si genera una colata detritica torrentizia che travolge una casa e ne danneggia altre 3 in Borgata Garin.
6 e 23 nov 2000	Province di Imperia e Savona	7	A causa di nubifragi nubifragi si ebbe l'esondazione, fra gli altri, dei torrenti Verbone e Armea.
13-16 ott 2000	Piemonte, Valle d'Aosta, Liguria, Lombardia	23	L'evento interessò il fiume Po e gran parte dei suoi affluenti in Valle d'Aosta, Piemonte, Liguria e Lombardia.
12-set 1995	Alluvione in Lombardia	1	Una violenta perturbazione provocò l'esondazione di vari corsi d'acqua.
13-mar 1995	Alluvione a Acireale, Giarre, Riposto e Mascali (Sicilia)	11	Torrenti in piena, mareggiate, bufere di vento.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

05-nov 1994	Alluvione in Piemonte	70	Dopo 3 giorni di piogge continue (oltre 600 mm) le acque del Tanaro allagano Asti, Alba, Ceva e Alessandria; il Po esonda a Palazzolo Vercellese, allaga Trino, Casale Monferrato e numerosi altri paesi fino a Valenza..
23-set 1993	Alluvione a Genova	2	Nubigifragio; esondazione dei torrenti Varenna, Leira ed altri corsi d'acqua del ponente genovese.
31-ott 1992	Alluvione di Poggio a Caiano	0	Il torrente Ombrone Pistoiese rompe gli argini la notte del 31 ottobre 1992 inondando il paese.
27-set 1992	Alluvione a Genova	2	Esondazione dei torrenti Bisagno e Sturla.
22-set 1992	Alluvione a Savona	3	Cause naturali.
estate 1987	Alluvione della Valtellina	53	A causa di forti e persistenti precipitazioni vi fu l'esondazione del fiume Adda e di alcuni torrenti e frane in Valtellina. Vengono seppelliti da una frana i paesi di Aquilone e San Antonio Morignone.
8-9 nov 1982	Esondazione del fiume Taro (Provincia di Parma)	0	A seguito di eccezionali violentissime piogge interessanti l'alta valle del Taro, il fiume entrava in piena rompendo le arginature. Comuni interessati: Fornovo Taro, Parma, Trecasali, San Secondo e Sissa.
7-8 ott 1970	Alluvione a Genova	44	Straripano in più punti e travolgono varie parti della città i torrenti Bisagno Polcevera, Leira, Chiaravagna e Cantarena. Piogge molto intense e localizzate che sono tipiche della costa ligure, accumularono circa 900 mm d'acqua in 24 ore.
04-nov 1966	Alluvione nel Veneto, Trentino e Friuli	18	Piogge eccezionali su tutta l'area, unite ad un aumento termico con il rapido disgelo della neve caduta in montagna, e ad un fortissimo vento di scirocco che impedì lo sversamento in mare delle acque meteoriche; Esondazione di tutti i fiumi dei bacini dell'Adige, Brenta-Bacchiglione, Piave, Livenza e Tagliamento
04-nov 1966	Alluvione di Firenze	34	Eccezionale ondata di maltempo; esondazione dell'Arno.
23-25 nov 1959	Alluvione nel Metapontino	11	A causa di forti piogge e del dissesto idrogeologico, nell'arco di pochi chilometri, sboccano uno vicino all'altro i cinque fiumi lucani.
25-26 ott 1954	Alluvione di Salerno	318	Comincia a piovere verso le ore 17:00 e in meno di 24 ore cadono più di 500 mm di pioggia. I torrenti in piena trascinano via ponti, strade e case. Numerose frane. Spazzato via il villaggio di Molina. Per l'immenso apporto di detriti cambia l'aspetto della fascia costiera salernitana.
19-set 1953	Alluvione in val Trebbia (provincia di Piacenza)	10	A causa di nubifragi, avviene l'esondazione del torrente Bisagno e del Trebbia
14-nov 1951	Alluvione del Polesine	84	Cause naturali e dissesto del territorio provocano l'esondazione fiume Po.
04-set 1948	Alluvione in Piemonte	49	Cause naturali, piogge consistenti, dissesto idrogeologico provocano l'esondazione dei torrenti Borbore, Triversa e fiume Tanaro.

Tab. 1.1 – Eventi alluvionali in Italia (1948-2012); fonte: Wikipedia

Durante questi eventi sono stati calcolati un numero di morti di circa 780 persone, con una tragica media di 12 morti all'anno a causa di fenomeni alluvionali.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Molti studiosi si sono soffermati sull' analizzare il trasporto solido dei fiumi montani , le eventuali relazioni con gli eventi di piena e attuare un piano di prevenzione. Ad esempio Sono state condotte approfondite indagini (Jaeggi, 2008 [7]; Ricknemann et al., 2010 [8])con lo scopo di monitorare il trasporto solido in alcuni fiumi montani svizzeri e di comparare i dati ottenuti con parametri di piena. Come supporto di questa analisi sono studiati gli eventi di piena dell'agosto del 2005 verificatisi in molti torrenti e fiumi di montagna nella parte nord delle Alpi Svizzere. In 72 ore caddero più di 200 mm di pioggia con tempi di ritorno di 100 anni. Molti fiumi furono soggetti a fenomeni di erosione e ciò produsse una notevole quantità di sedimenti. Nei punti in cui questi sedimenti si depositarono, si crearono ostruzioni con conseguenti inondazioni; le piene del fiume Schächen (**Fig. 1.4**) e quelle del fiume Lütschine (**Fig. 1.5**) rappresentano due esempi significativi.



Fig. 1.4 – Tratto del fiume Schächen



Fig. 1.5 – Esondazione del fiume Lütschine

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Tra gli eventi italiani elencati in **Tab. 1.1** particolare importanza assume l'alluvione della Valtellina nell'estate del 1987 che coinvolse gran parte del Nord Italia. Qui sotto sono riportate due immagini relative al fenomeno dell'abbondante trasporto solido in Val Brembana, adiacente alla Valtellina.



Fig. 1.6 – Il Brembo nella zona dei Campelli (Olmo al Brembo)



Fig. 1.7 – Strada provinciale interrotta a Piazzatorre (Val Brembana, BG)

Un ulteriore significativo episodio di esondazione legata al fenomeno della portata solida è il caso del Mallero, a Sondrio (1987), che è scelto come caso studio per la presente Tesi, e pertanto verrà descritto più dettagliatamente al **Par 4.1**.

1.3 Modellistica

1.3.1 Il fenomeno del trasporto solido

Il problema della modellazione delle piene e l'individuazione delle aree di esondazione, storicamente trattate a fondo fisso, non devono, soprattutto nel caso di torrenti e alvei montani, prescindere dallo studio del trasporto solido. I corsi d'acqua naturali sono costituiti da materiale incoerente che, a seconda delle condizioni di corrente, si muove o si deposita lungo l'asta fluviale modificando la morfologia delle sezioni e influenzando il livello idrico. Lo studio del moto dei sedimenti nei corsi d'acqua e delle conseguenze che ne derivano sulla morfologia costituisce un importante aspetto dell'idraulica fluviale e il soggetto principale di recenti ricerche. Il materiale d'alveo si mette in moto quando le forze idrodinamiche (di resistenza e portanza) prevalgono sulle forze che si oppongono al movimento (forza peso e attrito), secondo lo schema rappresentato in **Fig. 1.8**, nel quale u è la velocità dell'acqua, P è la forza di portanza, G è la forza peso, R è la forza di resistenza idrodinamica ed infine A è la forza di attrito [9].

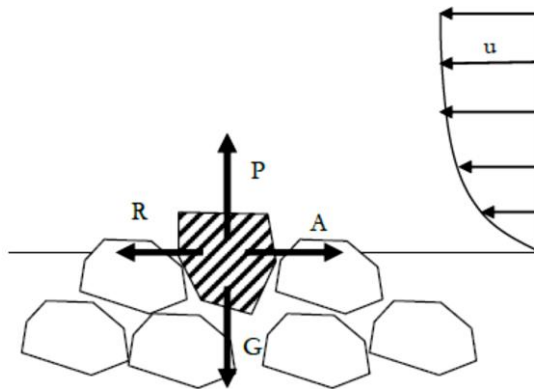


Fig. 1.8 – Schema delle forze in gioco nella teoria di Shields

Tale idealizzazione delle forze agenti sul generico grano all'equilibrio, sta alla base della teoria di Shields, e verrà meglio descritto nel prossimo paragrafo.

Una volta che il materiale si sia messo in movimento, può continuare il suo moto secondo due diverse modalità:

- moto di fondo: il materiale si sposta rotolando sul fondo o attraverso un'alternanza di piccoli salti;
- moto in sospensione: la particella viene sollevata ad un'altezza dal fondo dell'ordine del tirante d'acqua, e prima di ritornare sul fondo percorre un tratto confrontabile con il tirante d'acqua.

1.3.1.1 Condizioni di incipiente movimento per il trasporto di fondo

Il fenomeno di movimentazione del solido è essenzialmente legato alle caratteristiche idrauliche della corrente (distribuzione di velocità, sforzi sul fondo) che vengono calcolate a partire da geometria e portata e alle caratteristiche dei sedimenti.

Nell'ipotesi di particelle omogenee, non coesive e su fondo orizzontale, Shields, partendo dalle equazioni di equilibrio tra forze stabilizzanti e forze destabilizzanti, sviluppò una teoria di incipiente movimento (vedi Fig. 1.9).

Al momento di incipiente movimento si ha l'equilibrio tra la forza di resistenza R e quella di attrito coulombiano A . Si possono definire due parametri adimensionali; il primo è quello che definisce la mobilità di Shields:

$$\theta = \frac{u_*^2}{g \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d} = \frac{u_*^2}{g \Delta d}$$

dove $u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$ è la velocità di attrito dipendente dalla velocità della corrente attraverso lo sforzo tangenziale al fondo τ_0 , $\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$ è la densità relativa del grano immerso e d è il diametro del grano.

Il secondo parametro è il numero di Reynolds del grano che definisce la turbolenza del moto:

$$Re_* = \frac{du_*}{\nu}$$

dove ν è la viscosità cinematica dell'acqua.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Questi due parametri sono legati da una funzione determinata sperimentalmente da Shields che identifica nel piano $Re_* - \theta_{cr}$ la curva di separazione tra la zona di mobilità e quella di immobilità delle particelle.

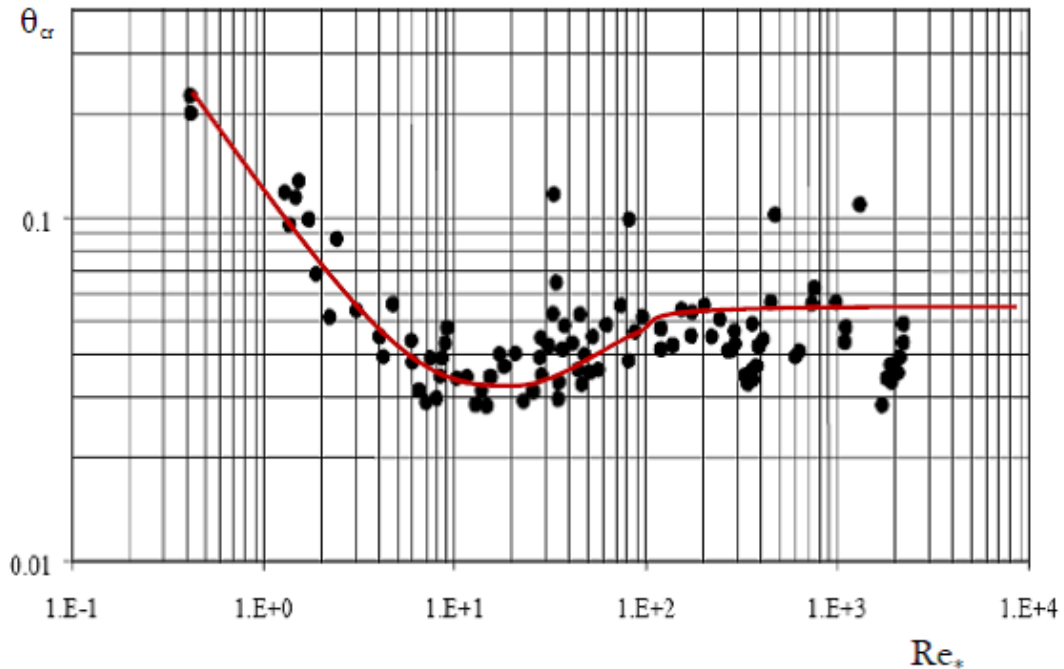


Fig. 1.9 – Diagramma di Shields

Per i punti che giacciono sotto la curva ($\theta < \theta_{cr}$) la corrente non è in grado di provocare il moto delle particelle, mentre i punti al di sopra della curva rappresentano condizioni di movimento dei sedimenti. La curva che rappresenta l'incipiente movimento ($\theta = \theta_{cr}$) può essere divisa in tre parti:

- $Re_* < 2$: è rappresentata da un segmento di retta con pendenza negativa nel diagramma bi-logaritmico; la velocità d'attrito critica delle particelle non dipende dal diametro ma solo dalla viscosità del fluido; il moto è essenzialmente di tipo viscoso;
- $2 \leq Re_* \leq 200$: tratto intermedio in cui l'andamento della funzione è curvilineo con un minimo relativo; la condizione di movimento dipende sia dalla viscosità del fluido sia dalle dimensioni del grano;
- $Re_* \geq 200$: nonostante un'elevata dispersione dei risultati, si assegnano al parametro di mobilità valori costanti attraverso la retta che meglio li interpola:

$$\theta_{cr} = \frac{(u_*)_{cr}^2}{g\Delta d} \cong 0.057$$

Le condizioni di mobilità del grano sono indipendenti dalla viscosità del fluido e dipendono solo dalla dimensione dei grani; il regime del moto è di tipo turbolento.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

La teoria di Shields è ricavata partendo da ipotesi restrittive che non rispecchiano la situazione reale. Le condizioni di incipiente movimento possono essere molto diverse da quelle teoriche. Esistono a questo scopo vari coefficienti correttivi e trattazioni specifiche che discendono da risultati sperimentali; importanti correzioni delle condizioni di incipiente movimento si hanno per:

- fondo molto pendente: si tiene conto del contributo destabilizzante della forza peso; l'incipiente movimento si ha per uno sforzo critico minore rispetto a quello calcolato attraverso Shields;
- effetto dell' inclinazione trasversale delle sponde: si ha una componente della forza anche nel piano tangente alla sponda;
- effetto della sommergenza relativa h/d : quando la dimensione dei grani è dello stesso ordine di grandezza del tirante idrico si forma uno strato di mescolamento che riduce la mobilità dei grani;
- effetto della disomogeneità del materiale: le particelle di dimensione minore sono protette da quelle di dimensione maggiore per cui la loro mobilità è ridotta mentre le particelle più grandi subiscono un aumento di mobilità (fenomeno di nascondimento);
- effetto di corazzamento dell'alveo.

Per determinare le condizioni di moto incipiente di un corso d'acqua si usa spesso, soprattutto negli alvei montani, la pendenza critica che si può definire come la pendenza di fondo per cui, alle condizioni idrodinamiche di calcolo, l'alveo sia in equilibrio. La pendenza critica viene calcolata nelle ipotesi che il moto sia turbolento (ovvero sia caratterizzato da numeri di Re_* alti), uniforme e la sezione sia sufficientemente larga per poter confondere il perimetro bagnato con la larghezza della sezione.

$$i_f = 0.057\Delta \frac{d}{h}$$

1.3.1.2 Capacità di trasporto al fondo

Non esiste un modo univoco per determinare la portata solida effettivamente trasportabile attraverso una sezione. Nel corso degli anni, su base sperimentale, sono state elaborate diverse equazioni che includono vari parametri e che non hanno valenza assoluta, ma si adattano al meglio solo ad alcune situazioni specifiche. I risultati delle varie campagne sperimentali sono delle funzioni algebriche che legano la capacità di trasporto della corrente a diversi parametri geometrici o idrodinamici che influenzano il fenomeno. Esistono moltissime formule, ricavate in condizioni diverse, che si basano sul concetto del valore critico di moto incipiente.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Di seguito si descrivono brevemente le formule implementate nel software utilizzato nell'ambito di questo lavoro evidenziandone limiti e campi di validità:

- La *formula monomia* rappresenta la via più semplice per legare la portata solida a quella liquida:

$$q_s = \frac{\beta}{g} c_b u^3$$

dove:

q_s è la portata solida per unità di larghezza;

β è il coefficiente di ragguaglio della quantità di moto;

c_b è la concentrazione di materiale sul fondo;

u è la velocità della corrente.

- La *formula di Parker* deriva dalla teoria di Einstein corretta per le portate molto basse; l'utilizzo di una formulazione in cui non si prevede un valore di soglia presenta vantaggi dal punto di vista computazionale e nell'implementazione di modelli numerici.

$$\frac{q_s}{d\sqrt{g\Delta d}} = G(\xi_0)0.00218\theta^{1.5}$$

dove

$$\xi_0 = \frac{\theta}{0.0386} \quad \text{e} \quad \begin{cases} G(\xi_0) = \xi_0^{14.2} & \text{per } \xi_0 < 1 \\ G(\xi_0) = e^{14.2(\xi_0-1)-9.28(\xi_0-1)^2} & \text{per } 1 \leq \xi_0 < 1.59 \\ G(\xi_0) = 5474 \left(1 - \frac{0.853}{\xi_0}\right)^{4.5} & \text{per } \xi_0 \geq 1.59 \end{cases}$$

- La *relazione di Shields* ha un valore di sforzo al fondo di soglia al di sotto del quale la portata solida è nulla.

$$\frac{q_s}{d\sqrt{g\Delta d}} = 10(\theta - \theta_{cr})\theta^{1.5} \frac{\rho}{\rho_s} \frac{u}{u_*}$$

- La *formula di Meyer-Peter e Müller* è stata ricavata sulla base di un notevole numero di prove sperimentali.

$$\frac{q_s}{d\sqrt{g\Delta d}} = 8(\theta - \theta_{cr})^{1.5}$$

dove si pone $\theta_{cr} = 0.047$; la formula è stata tarata per materiali di diametro grossolano (0.4-29 mm) ed è raccomandata per corsi d'acqua ghiaiosi con pendenze fino al 2%; per pendenze superiori, la formula non è stata verificata sperimentalmente.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

- La *formula di Smart e Jaggi* rappresenta l'estensione della formula di Meyer-Peter e Müller ai canali con forte pendenza ($3\% < i_f < 20\%$).

$$\frac{q_s}{d\sqrt{g\Delta d}} = 4 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0.2} i_f^{0.6} \theta^{0.5} (\theta - \theta_{cr}) \frac{u}{u_*}$$

Dove il $\left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0.2}$, parametro che tiene conto della non uniformità del materiale, può essere posto pari a 1.05. Si consiglia di utilizzare un $\theta_{cr} = 0.05$.

1.3.1.3 Valutazione dell'evoluzione morfologica

La conoscenza della portata solida transitante in una sezione non è sufficiente per determinare l'evoluzione morfologica del fondo del canale. Il sistema di equazioni che regola le modificazioni d'alveo verrà spiegato nel seguente paragrafo ma è qui possibile far riferimento ad uno schema concettuale semplificato per spiegare la tendenza di base. E' sufficiente confrontare le portate solide calcolate con una delle precedenti formule tra due sezioni successive.

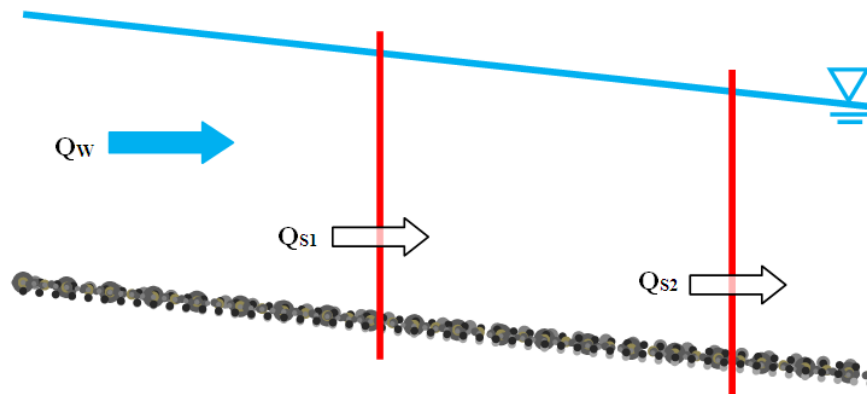


Fig. 1.10 – Bilancio di massa solida globale

Dal confronto tra Q_{S1} e Q_{S2} si può capire se il tratto compreso tra le due sezioni sia in deposito o in erosione; infatti se parte del solido transitante attraverso la prima sezione si deposita nel tratto d'alveo considerato, allora Q_{S1} sarà maggiore di Q_{S2} ; al contrario, se il tratto in questione è in erosione, la portata solida di monte sarà inferiore a quella di valle ($Q_{S1} < Q_{S2}$).

1.3.2 Modelli matematici

Il moto nei fiumi di montagna è prevalentemente unidirezionale e perciò le caratteristiche temporali e spaziali possono essere adeguatamente descritte usando la forma 1-D delle equazioni di Saint-Venant [10] che esprimono la legge di conservazione della massa e della quantità di moto.

Le ipotesi che stanno alla base di queste equazioni sono le seguenti:

- il moto viene considerato unidimensionale, turbolento e gradualmente variato;
- tutte le quantità possono essere descritte come funzioni continue e derivabili del tempo e dello spazio;
- il fluido è incomprimibile, e la pressione è distribuita idrostaticamente;
- la pendenza del fondo dell'alveo è abbastanza bassa da poter considerare le sezioni come verticali, mentre il canale è di forma prismatica.

1.3.2.1 Equazione di continuità

Si considera un tratto infinitesimo ds di fiume caratterizzato da una portata Q .

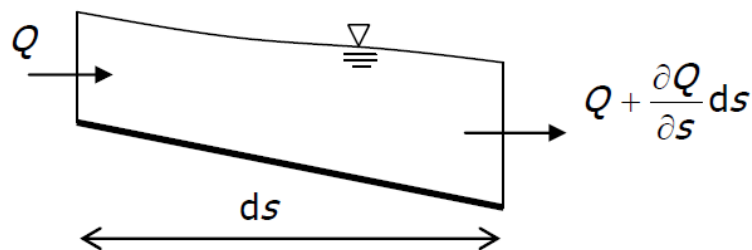


Fig. 1.11 – Bilancio di massa su un volume infinitesimo

Il volume totale di acqua che entra nel volume di controllo al tempo dt è:

$$dW_{in} = \left[Q - \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial s} ds \right) \right] dt$$

La variazione da tale quantità nel tratto infinitesimo preso in considerazione è:

$$dW_{contained} = \frac{\partial A}{\partial t} dt ds$$

dove A è l'area della sezione.

Per la legge di conservazione della massa, i volumi appena calcolati devono essere uguali; ciò porta alla forma finale dell'equazione di continuità:

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

1.3.2.2 Equazione della conservazione della quantità di moto

L'equazione della conservazione della quantità di moto può essere ricavata imponendo l'equilibrio delle forze di gravità (F_g), d'inerzia (F_i), d'attrito (F_f), forza idrostatica (F_p) e dinamica (F_d).

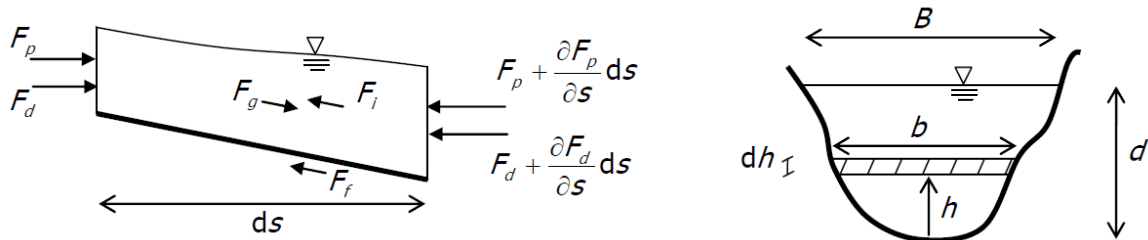


Fig. 1.12 – Equilibrio delle forze agenti su un volume infinitesimo

Le forze riportate in **Fig. 1.12** sono calcolate nel seguente modo:

$$F_i = \int \frac{\partial(\rho U)}{\partial t} dW = \frac{\partial(\rho Q)}{\partial t} ds ; F_f = \tau_b p_w ds = \rho g \frac{A}{p_w} S_f p_w ds$$

$$F_g = \rho g A ds S_0 ; F_p = \int_0^d \rho g (d - h) b dh ; F_d = \rho Q U$$

dove ρ è la densità dell'acqua, g è l'accelerazione di gravità, S_0 è la pendenza longitudinale del canale, U è la velocità dell'acqua, τ_b è lo sforzo sul fondo, p_w è il perimetro bagnato, S_f è la cadente piezometrica, h è l'altezza d'acqua, d è la larghezza della sezione all'altezza h , B è la larghezza della superficie libera.

La forma finale dell'equazione della conservazione della quantità di moto è la seguente:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial s} = g \left(S_0 - S_f - \frac{\partial d}{\partial s} \right)$$

Il primo termine è d'inerzia, il secondo è il termine convettivo, il terzo di pendenza, il quarto è il termine d'attrito e l'ultimo di pressione.

1.3.2.3 Equazione di continuità dei sedimenti

Alle equazioni idrodinamiche del moto vario si aggiunge l'equazione del bilancio della massa solida sul volume di controllo di lunghezza ds .

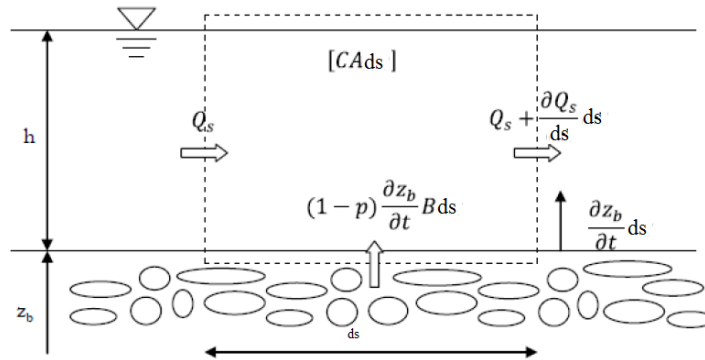


Fig. 1.13 – Bilancio di massa per i sedimenti

La massa entrante è uguale a quella uscente più la variazione temporale di densità al netto dell'innalzamento/abbassamento del fondo derivante dal deposito o dall'erosione di sedimenti. Il bilancio di massa dei sedimenti sul volume di controllo usando gli apporti in **Fig. 1.13** risulta:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial s} + \frac{\partial CA}{\partial t} = -(1-p) \frac{\partial z_b}{\partial t} B$$

dove p rappresenta la porosità del materiale d'alveo, $C = \int_A c \cdot \frac{dA}{A}$ è la concentrazione di volume mediata sulla sezione trasversale A (con c = concentrazione locale), $Q_s = \int_A u \cdot c \cdot dA$ è la portata solida con u velocità della corrente liquida, B è la larghezza media dell'alveo.

Se la portata solida al fondo è molto maggiore rispetto a quella in sospensione, il secondo termine al primo membro è trascurabile rispetto al primo; quest'ipotesi porta alla formulazione di Exner [1925] del bilancio di massa solida:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial s} = - \frac{\partial z_b}{\partial t} B$$

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Il comportamento dell'alveo è differente in funzione del segno dell'equazione:

- per $\frac{\partial Q_s}{\partial s} > 0$, la portata solida aumenta a scapito del materiale in alveo: la variazione temporale della quota di fondo è negativa e quindi l'alveo è in erosione;
- per $\frac{\partial Q_s}{\partial s} < 0$, la portata solida diminuisce incrementando il materiale sul fondo: l'alveo è in deposito.

Il sistema risultante è il seguente:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial Q}{\partial s} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial s} = g \left(S_0 - S_f - \frac{\partial d}{\partial s} \right) \\ \frac{\partial Q_s}{\partial s} + \frac{\partial CA}{\partial t} = -(1-p) \frac{\partial z_b}{\partial t} B \\ Q_s = f_s(Q, h, \chi, d, b \dots) \end{array} \right.$$

La portata solida è valutata dalla relazione di chiusura:

$$Q_s = f_s(Q, h, \chi, d, b \dots)$$

che non è un'equazione differenziale, ma algebrica e dipende dalle caratteristiche locali idrauliche, geometriche e dei sedimenti, e dove U è la velocità media sulla sezione, χ rappresenta coefficiente di Chezy e R_h è il raggio idraulico.

Considerando il modello monogranulare, si ipotizza che il materiale sia uniforme o rappresentabile da un opportuno diametro equivalente d .

Si ipotizza inoltre che localmente la portata solida sia uguale alla capacità di trasporto del tratto. Ciò significa che, se nella sezione di ingresso al tratto entra una portata solida maggiore della capacità di trasporto, l'alveo è in deposito, mentre se la capacità di trasporto è maggiore della portata solida transitante l'alveo è in erosione.

1.3.2.4 Il sistema alle linee caratteristiche

Il sistema completo rappresenta un sistema alle derivate parziali di tipo iperbolico che quindi non è risolvibile analiticamente ma solo per via numerica; un modello numerico per la soluzione del sistema completo è il metodo delle caratteristiche (De Vries, 1965 [10]). Il sistema è composto da 3 equazioni in 3 incognite (U, h, Z_B).

Le ipotesi per compiere la trasformazione da un sistema all'altro sono:

- h ed U (rispettivamente tirante e velocità media) siano variabili continue. Questo vale a dire che nel tratto esaminato non vi debbano essere risalti idraulici;
- le sezioni siano di forma rettangolare larga, per cui i bilanci espressi nel sistema possono essere riscritti per unità di larghezza.

Si osserva che la portata solida per unità di larghezza $q_s = \frac{Q_s}{B}$ dipende essenzialmente dalle altre due variabili del sistema: velocità e tirante idrico locali ($q_s = q_s(U, h)$). In questo caso la sua derivata rispetto alla direzione longitudinale si può esprimere come:

$$\frac{\partial q_s}{\partial s} = \frac{\partial q_s}{\partial U} \frac{\partial U}{\partial s} + \frac{\partial q_s}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial s}$$

La variazione nel tempo della portata solida per unità di lunghezza viene trascurata. Con queste ipotesi si ottiene il sistema seguente scritto in forma matriciale:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + A_U \frac{\partial U}{\partial s} + B_U = 0$$

dove:

$$U = \begin{bmatrix} h \\ U \\ z_b \end{bmatrix} \quad A_U = \begin{bmatrix} h & U & 0 \\ U & g & g \\ \frac{\partial q_s}{\partial U} & \frac{\partial q_s}{\partial h} & 1 \end{bmatrix} \quad B_U = \begin{bmatrix} 0 \\ -S_f \\ 0 \end{bmatrix}$$

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

La matrice caratteristica della matrice dei coefficienti A_U , dove I è la matrice identità:

$$[A_U - \lambda I] = \begin{bmatrix} h - \lambda & U & 0 \\ U & g - \lambda & g \\ \frac{\partial q_s}{\partial U} & \frac{\partial q_s}{\partial h} & 1 - \lambda \end{bmatrix}$$

Gli autovalori $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3,)$ della matrice dei coefficienti A_U , sono detti autovalori del sistema e sono dati dalle tre radici dell'equazione polinomiale caratteristica:

$$p(\lambda) = \lambda^3 - 2U\lambda^2 + \left(U^2 - gh + g \frac{\partial q_s}{\partial U} \right) \lambda + gU \frac{\partial q_s}{\partial U} + gh \frac{\partial q_s}{\partial h} = 0$$

Le linee caratteristiche, sono quelle linee, di equazione $\lambda_i = \frac{dx}{d}$ che hanno la particolarità, dal punto di vista matematico, di essere linee di discontinuità della soluzione del problema differenziale. Dal punto di vista fisico, rappresentano il percorso seguito dalle perturbazioni.

Quando il numero di Froude è sufficientemente diverso da 1 e la concentrazione C è molto minore di 1, le equazioni delle linee caratteristiche possono essere rappresentate dalle seguenti espressioni, come proposto da de Vries (1965):

$$\begin{array}{ll} F_r < 1 & F_r > 1 \\ \lambda_1 = U + \sqrt{gh} + o(c) & \lambda_1 = U + \sqrt{gh} + o(c) \\ \lambda_2 = U - \sqrt{gh} + o(c) & \lambda_3 = \frac{U}{1 - F_r^2} B_\lambda \\ \lambda_3 = \frac{U}{1 - F_r^2} B_\lambda & \lambda_2 = U - \sqrt{gh} + o(c) \end{array}$$

dove $B_\lambda = \frac{U}{q} \frac{\partial q_s}{\partial U} - \frac{h}{q} \frac{\partial q_s}{\partial h}$ e con $q = Uh$.

Le espressioni ottenute affermano che le piccole perturbazioni del fondo migrano verso valle o verso monte a seconda che la corrente sia lenta o veloce.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Poiché le soluzioni proposte non valgono in prossimità di $Fr=1$, per valori non molto grandi della concentrazione si può assumere:

$$\lambda_3 \ll \lambda_1, \lambda_2 \text{ per } Fr < 0.8$$

$$\lambda_2 \ll \lambda_1, \lambda_3 \text{ per } Fr > 1.2$$

Studiando il sistema con il metodo delle caratteristiche si trovano quindi tre linee caratteristiche. Le prime due coincidono con quelle che si hanno nelle correnti a fondo fisso e guidano le perturbazioni della parte idrodinamica (la perturbazione del fondo sono di un ordine inferiore); la terza guida la perturbazione del fondo (le perturbazioni idrodinamiche sono di ordine inferiore). Si può dimostrare che due caratteristiche sono sempre positive e una è sempre negativa: due sono entranti nella sezione di monte e una entrante nella sezione di valle: bisogna sempre porre due condizioni di monte e una di valle. Nella seguente tabella vengono riassunte le condizioni più appropriate in funzione del numero di Froude della corrente.

	condizioni di monte	condizioni di valle
corrente lenta	U, z_b	h
corrente veloce	h, U	z_b

Tab. 1.2 – Scelta delle condizioni al contorno

1.3.2.5 Equazioni per i sedimenti non uniformi

Le formule espresse nel **Par. 1.3.1.2** usano un diametro medio d_{50} e quindi si prestano male a rappresentare in maniera realistica la realtà; inoltre non tengono conto degli effetti di nascondimento ed esposizione.

Di seguito si illustrano alcune formule usate in letteratura che tengono conto di questi aspetti:

➤ *Formula Di Silvio (1983)*

$$Q_{s,i} = \alpha \cdot \left(\frac{Q^m \cdot I_f^n}{B^p \cdot d_i^q} \right) \cdot \beta_i \cdot \xi_i$$

Nella formula, la portata solida massima per ogni i-esima classe granulometrica viene espressa come proporzionale alla presenza percentuale β_i della classe stessa sul fondo mobile, introducendo un coefficiente di correzione empirico ξ_i per l'effetto di nascondimento ed esposizione.

$$Q_s = \sum_{i=1}^N Q_{s,i}$$

Il calcolo finale del trasporto solido complessivo viene effettuato come somma del trasporto relativo ad ogni classe in cui si è deciso di suddividere il materiale presente sul fondo alveo .

Il coefficiente di nascondimento ed esposizione ξ_i ha l'effetto di ridurre (incrementare) la mobilità intrinseca delle particelle più fini (più grossolane) e si calcola nel seguente modo:

$$\xi_i = \frac{d_i^s}{[\sum_{i=1}^N (\beta_i \cdot d_i)]^s}$$

Il coefficiente α e gli esponenti m, n, p, q, s dipendono dal tipo di fiume.

➤ *Variazione della formula di Meyer-Peter e Müller [12]*

$$q_{s,i} = p_{i,MPM} \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_i^3 \left[\left(\frac{d_i}{d_{ref}} \right)^\alpha \cdot \frac{u^{*2}}{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_i} - \vartheta_{c,MPM} \right]^3}$$

Dove p_i è la percentuale del diametro i nella mistura dei sedimenti, d_i è il diametro medio della frazione di sedimenti e d_{ref} il diametro di riferimento che corrisponde al diametro medio d_m .

Gli effetti di nascondimento ed esposizione sono considerati nel parametro α che deve essere calibrato per ogni caso studio; il termine $\vartheta_{c,MPM}$ rappresenta lo sforzo sul fondo critico a cui normalmente si assegna il valore di 0.047, u^* rappresenta la velocità al taglio calcolata come:

$$u^* = \frac{u_m}{2\sqrt{8} \cdot \log \left(\frac{12h}{K_s} \right)}$$

dove h è l'altezza dell'acqua e u_m è la velocità media.

1.3.3 Modelli numerici

Nel campo della modellazione numerica esistono numerosi software in grado di quantificare il trasporto solido, sebbene i modelli che simulano tale fenomeno in fiumi e torrenti di montagna (pendenza maggiore del 5%) sono tutt'oggi molto limitati. Esistono infatti molti modelli 1-D che sono per lo più applicabili a fiumi alluvionali; modelli 2-D che oltre a studiare basse pendenze considerano granulometrie uniformi; ed infine modelli 3-D che sono per lo più modelli idrodinamici, dove il trasporto solido è applicabile solo a fiumi con un letto fatto di sabbia.

La maggior parte delle formule presenti in letteratura per il calcolo dell'evoluzione morfologica dei fiumi di montagna deriva da esperimenti su canali artificiali che possono portare a risultati differenti anche di un ordine di grandezza da quelli reali; inoltre questi metodi richiedono tempi molto lunghi (e, conseguentemente, costi molto elevati) di elaborazione.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Panicolaou et al. (2004) [12] affermano che la difficoltà nel valutare il trasporto solido nei fiumi montani risiede nei seguenti fattori:

- pendenze elevate;
- elementi caratterizzati da scabrezza molto alta;
- elevate turbolenze;
- disponibilità di sedimenti molto variabile;
- si tende a trascurare l'effetto di forma nel calcolo dello sforzo di fondo.

Gli autori sviluppano un modello 1-D (chiamato 3 ST1D) per il calcolo del trasporto solido in fiumi di montagna che è applicabile a condizioni di moto vario e che permette di valutare anche passaggi a corrente lenta (ad esempio le sequenze di step-pool).

Inoltre, come esposto da Cao et al. (2002) [13] i modelli numerici 1-D usati solitamente si basano su due aspetti fondamentali:

- semplificazione delle equazioni: si assume che l'evoluzione morfologica del letto del fiume sia un ordine di grandezza inferiore di quella del flusso e perciò si considera il fondo fisso. In alcuni casi si considera il moto quasi permanente e quindi i termini in funzione del tempo vengono eliminati;
- utilizzo di una procedura asincrona: nonostante il sistema sia fortemente accoppiato, la maggior parte dei modelli, risolve prima le equazioni di continuità e della conservazione della quantità di moto assumendo il fondo fisso; successivamente l'equazione di continuità riferita ai sedimenti è risolta usando le nuove variabili idrauliche ottenute.

Lo studio fatto da Cao e al. ha come scopo il confronto di questi modelli semplificati e asincroni (DeCoupled Model - DCM) con invece i modelli completi e sincroni (Fully Coupled Model - FCM) dove cioè il sistema di equazioni è risolto contemporaneamente.

I modelli FCM risolvono un sistema di equazioni iperboliche che ha come risultato due caratteristiche positive λ_1 e λ_2 e una negativa λ_3 ; di conseguenza sono necessarie due condizioni al contorno a monte ed una a valle.

Per i modelli DCM, invece, si osserva che in caso di correnti veloci la computazione diventa difettosa in quanto si necessita di un'ulteriore condizione a monte che non può essere trovata.

Successivamente è stato studiato il fenomeno di erosione e di accumulo: risulta che non ci sono notevoli differenze tra i due modelli per ciò che concerne l'erosione; in caso di accumulo, invece, è da preferire il modello FCM.

Infine è stato osservato che, per lunghe simulazioni, il cambiamento del letto del fiume diventa significativo e quindi il termine non può essere trascurato.

1.4 Studi pregressi

Alcune delle problematiche di rilevante importanza che sono contenute in questo elaborato di Tesi sono già state studiate in precedenti lavori pubblicati presso questo Ateneo, che pongono quindi un punto di partenza per questa Tesi.

Il tema comune è l'analisi del trasporto solido nei fiumi di montagna per poi applicarlo allo studio di un caso reale: il torrente Mallero, affluente dell'Adda.

Il fiume fu colpito dall'evento alluvionale della Valtellina del 1987, che mettendo in luce il problema dell'eccessivo materiale depositato nell'abitato di Sondrio e che causò l'innalzamento del livello del fondo tenendo la città a rischio esondazione durante la piena. Il Mallero restò entro gli argini solo perché i depositi maggiori si verificarono dopo il passaggio del picco dell'onda liquida ma i danni furono comunque ingenti.

Negli ultimi anni si è reso sempre più necessario studiare fenomeni di questo tipo con dei modelli numerici che implementino l'accoppiamento acqua-sedimenti. Tuttavia, per definire questi modelli, sono richiesti numerosi parametri che, soprattutto in ambito montano, spesso sono di difficile caratterizzazione.

Di seguito si vuole dare una panoramica degli studi compiuti dal Politecnico di Milano volti in questa direzione.

1.4.1 Tesi di Del Curto C. (2000)

1.4.1.1 Titolo

Evoluzione morfologica del torrente Mallero

1.4.1.2 Obiettivi

Da un lato fornire una sintesi delle conoscenze e dei metodi disponibili in letteratura per lo studio dell'evoluzione e dell'equilibrio morfologico di un corso d'acqua, dall'altro verificare le reali possibilità di applicazione di questi modelli e fare una analisi di sensitività dei risultati in relazione ai dati di ingresso.

1.4.1.3 Struttura

- Viene presentata l'unità geografica della Valmalenco, della cui morfologia è fornita una descrizione qualitativa; sono quindi illustrati i dati relativi all'utilizzo delle acque, alla misura delle superfici e alla cartografia in termini di profilo longitudinale e sezioni trasversali;

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

- vengono descritti i dati pluviometrici e idrometrici che è possibile reperire nel territorio della Valmalenco, ed illustrati i risultati dell'indagine idraulica e idrologica condotta dalla Regione Lombardia nel 1990, che ha permesso in seguito di proporre uno studio sulle dinamiche di trasformazione degli afflussi in deflussi degli eventi intensi e sul lungo periodo;
- viene esposto un modello di evoluzione altimetrica denominato Morimor, che è stato applicato per simulare l'evento del 1987. Il modello, relativamente complesso, consente di valutare l'evoluzione della granulometria del fondo, attraverso l'introduzione di una formula di trasporto tarata appositamente per il torrente Mallero. Poiché non sono note le caratteristiche del profilo su cui si è verificata la piena del 1987, la condizione di partenza (profilo altimetrico e granulometria) è stata determinata attraverso la simulazione di un regime di portate medie che si realizzarono nel corso di diversi anni, così da individuare la condizione di equilibrio;
- viene impostato il problema nella forma più generale e completa dell'accoppiamento idraulica - geometria, mostrando a quali livelli sia possibile introdurre delle semplificazioni e quali conseguenze, sul calcolo e sui risultati, queste semplificazioni comportano. Viene poi fornita una valutazione dell'evoluzione del torrente Mallero, che per la sua conformazione morfologica consente di usare un approccio strettamente monodimensionale, cioè di modellare l'evoluzione altimetrica di un alveo con la forma della sezione trasversale fissata;
- viene affrontato il problema della valutazione della morfologia di equilibrio del torrente Mallero e, con maggiore dettaglio, quello della sua evoluzione nel tempo. Innanzitutto si sono confrontati i valori di larghezza, pendenza e profondità previsti dalle formule empiriche con i dati delle misure di campagna del 1989; successivamente è stato affrontato il problema della valutazione dell'evoluzione dell'alveo sulla base dei dati e delle elaborazioni relative all'evento del 1987; lo scopo dell'analisi è quello di capire in quale misura, da analisi semplificate, sia possibile trarre informazioni sugli effetti del trasporto solido significative dal punto di vista ingegneristico. Infine è stato introdotto un modello matematico semplificato di evoluzione altimetrica (moto uniforme, solido del fondo monogranulare, discretizzazione dello spazio e del tempo, schema temporale esplicito), allo scopo di ottenere delle significative valutazioni degli effetti del trasporto solido;

1.4.1.4 Risultati

Il Morimor è un modello analiticamente complesso, ma i risultati forniti non sono in grado di dare alcuna indicazione circa la sensibilità del sistema Mallero rispetto ai parametri in gioco: granulometria del fondo e degli apporti laterali, modalità di immissione degli apporti laterali, vincoli sul fondo, scelta della formula per il calcolo del trasporto solido, e così via. Le osservazioni rese disponibili dallo studio del Piano Valtellina nel 1989 sono notevoli, ma permangono diversi elementi di incertezza riguardo la definizione dei parametri e il ruolo che essi giocano nel determinare l'evoluzione dell'alveo; inoltre il risultato finale in termini di granulometria non è in accordo con quella rilevata nel 1989.

L'equilibrio è stato valutato attraverso l'applicazione dei metodi empirici; i risultati mostrano che questo metodo non è applicabile al caso del Mallero né in termini di larghezza prevista che di pendenza (bisogna sottolineare che il profilo preso come riferimento non può essere considerato di equilibrio, essendo relativo ad una situazione, quella del 1989, non determinata dalla storia dell'alveo).

Il codice implementato nella Tesi per lo studio dell'evoluzione dell'alveo ha il pregio di consentire all'operatore il controllo e la comprensione diretta dell'effetto che i parametri stessi hanno nel determinare l'evoluzione dell'alveo.

Attraverso una serie di simulazioni si è verificato che il codice risulta stabile, cioè il sistema è in grado di fornire una soluzione di equilibrio sotto varie ipotesi di apporto liquido e solido, e questo non dipende dalla particolare scelta della discretizzazione adottata.

Il modello è stato poi applicato al torrente Mallero, simulando l'onda di piena del 1987 di cui sono noti alcuni principali dati di ingresso, quali l'idrogramma di piena e il volume e la distribuzione dell'apporto laterale di solido.

Si evidenzia la sensibilità del risultato rispetto alla variabilità del dato di ingresso: la definizione della granulometria del fondo e del materiale immesso dai versanti, che non è nota per l'evento dell'87; la definizione dell'idrogramma solido, cioè la modalità e i tempi di immissione del solido laterale, che in genere non è mai noto; la scelta della formula di trasporto solido, che non è univoca e definibile a priori.

Si conclude che il modello ha fornito risultati soddisfacenti consentendo di comprendere i meccanismi di funzionamento idraulico del corso d'acqua rispetto alla variabilità dei dati introdotti, e in particolare di individuare quali parametri determinano la risposta del sistema in termini di erosione o deposito, ma presenta due limiti: primo di non potere simulare l'evoluzione temporale della granulometria del fondo dovuta ai fenomeni di trasporto; secondo di adottare uno schema esplicito temporale per il calcolo delle portate solide, e quindi delle variazioni di quota.

1.4.2 Tesi di Mauri M. e Spagnolatti M. (2009)

1.4.2.1 Titolo

Modellazione dell'evoluzione morfologica del torrente Mallero durante un evento alluvionale e ripercussioni sulla città di Sondrio

1.4.2.2 Obiettivi

La presente tesi si pone l'obiettivo di riprodurre ed interpretare la dinamica dell'evento del 1987, quale base preliminare per effettuare future valutazioni.

1.4.2.3 Struttura

- Vengono descritte le caratteristiche morfologiche, idrologiche ed idrauliche del bacino del Mallero. Segue una parte dedicata ad una breve descrizione dell'evento alluvionale in Valtellina del 1987 con particolare riferimento alle conseguenze sull'abitato di Sondrio. Si passa a quindi parlare dei rilievi e degli studi effettuati dopo la piena dell'87;
- vengono elencati gli aspetti matematici e numerici della modellazione dell'evoluzione morfologica di un alveo. Nella prima parte viene presentato nel dettaglio il modello matematico che descrive il processo. La seconda parte è dedicata alla descrizione del modello numerico impiegato nelle simulazioni, con particolare riferimento alle ipotesi adottate e alle strategie per il trattamento delle singolarità tipicamente presenti in un ambito montano;
- successivamente viene sviluppate una serie di casi test svolti al fine di comprendere la risposta del modello alle discontinuità presenti nel torrente Mallero. La comprensione del singolo problema aiuta a gestire meglio la seguente modellazione del caso reale, che comprende molte complessità geometriche. Sono presentate sei "geometrie tipo" per ognuna delle quali sono state svolte più simulazioni variando le grandezze idrauliche e del trasporto solido. Il software utilizzato in queste simulazioni è il Rhyme, sviluppato dall'Università degli Studi di Trento;
- nella parte finale vengono raccolte le simulazioni svolte sul torrente Mallero. Sono presentati tre modelli geometrici con riferimento ai quali sono state effettuate diverse simulazioni variando i parametri in ingresso. Le simulazioni sono confrontate per quantificare la sensibilità dei risultati al variare delle grandezze di condizionamento.

1.4.2.4 Risultati

Nelle prime simulazioni del Mallero si usa un diametro medio d_{50} pari a 25 cm, da cui risulta che il materiale in ingresso non arriva a Sondrio, cosa che è invece accaduta durante l'evento del 1987.

Si osserva che le sezioni di valle sono influenzate soltanto dall'idrodinamica e dalla geometria e non dalla portata solida immessa a monte. È stato anche provato un modello senza il tratto inderodabile di Spriana che ha portato a erosioni volumetriche maggiori e quindi ad una sovralimentazione del tratto successivo che però non dà effetti particolari sul tratto di Sondrio.

Il programma presenta il problema di non riuscire a trattare l'interrimento delle briglie, ma il risultato finale non viene influenzato in maniera significativa, perché il volume massimo invasato dalle briglie è modesto rispetto a quello in gioco. Questi risultati hanno portato allo sviluppo di un modello più corto, che comprendesse gli ultimi 5 chilometri nella speranza di vedere maggiori effetti sulla città di Sondrio e si è passati all'utilizzo di un d_{50} di 5 cm, più rappresentativo della granulometria del tratto. Sono state svolte diverse simulazioni volte a comprendere l'influenza della portata solida immessa a monte e del diametro dei sedimenti sui volumi depositati e movimentati. I risultati prodotti hanno confermato che, anche in questo caso, il sistema in analisi è, negli ultimi due chilometri, indipendente dalla portata solida immessa. Il modello, pur rappresentando abbastanza bene i volumi depositati nel tratto cittadino (grazie al passaggio a un d_{50} pari a 5 cm), non ha fornito i risultati sperati rispetto al volume transitato in Adda: il materiale solido è molto lento nella traslazione verso valle e le modificazioni d'alveo avvengono in tempi molto più lunghi rispetto al passaggio dell'onda di piena. Per questo motivo si è aumentata la durata dell'evento analizzato mantenendo la geometria.

Si è concluso che l'andamento del deposito e dei volumi di solido transitanti nelle sezioni finali non dipende dalla portata solida inserita a monte ma dal tempo della simulazione (e dell'evento) nonché, come provato da un'altra serie di simulazioni, dal diametro dei sedimenti.

1.4.3 Tesi di Bottà U. e Meroni G. (2010)

1.4.3.1 Titolo

Realizzazione di una cassa d'espansione nell'alto Mallero per la riduzione del rischio di allagamento della città di Sondrio

1.4.3.2 Obiettivi

L'obiettivo della Tesi è l'analisi del bacino del torrente Mallero, cercando una strategia che ne controlli maggiormente i deflussi, finalizzata principalmente alla messa in sicurezza del torrente Mallero.

1.4.3.3 Struttura

- Descrizione dell'ambito territoriale del torrente Mallero con le indicazioni sulla pluviometria, l'idrometria, l'uso delle acque e il regime di deflusso. Si accenna alla piena del 1987 e della sua pericolosità soprattutto per la città di Sondrio, dovuto all'elevato trasporto solido che ha comportato;
- stima delle portate al colmo di piena per i bacini e i sottobacini del torrente Mallero; si descrive il modello afflussi-deflussi per la determinazione degli idrogrammi di piena nei vari sottobacini, facendo riferimento allo studio effettuato nel Marzo del 1989 dall'istituto di idraulica del Politecnico di Milano;
- progetto della cassa di espansione per consentire il controllo, almeno parziale, della portata di piena e del trasporto solido. Un'area adatta alla costruzione è stata individuata in località Sabbionaccio, poiché è pianeggiante e converge in una piccola strettoia riducendo così la lunghezza dello sbarramento di chiusura. Segue una dettagliata descrizione delle modalità di realizzazione sia dal punto di vista idraulico (calcolo del volume necessario per contenere l'onda di piena) che strutturale, con il progetto del muro di sbarramento (diga a gravità massiccia);
- studio degli effetti idraulici della cassa di espansione di Sabbionaccio in particolare sulla città di Sondrio. Si evidenzia come per determinare e quantificare questi effetti non sia possibile trascurare un'analisi del trasporto solido; non avendo a disposizione un programma che risolvesse il sistema di accoppiamento idraulico-sedimenti, si è utilizzato un approccio semplificato disaccoppiato; le analisi sono state compiute utilizzando il software Hec-Ras.
- si valuta il trasporto solido con e senza la cassa di espansione su un tratto lungo 4 km che va da poco prima del tratto ad elevata pendenza delle Cassandre alla confluenza con l'Adda,

trascurando tutte le briglie presenti in tale tratto; si evidenziano quindi le variazioni morfologiche del fondo del Mallero, specialmente nel tratto cittadino di Sondrio.

1.4.3.4 Risultati

In entrambi i casi senza e con la cassa di espansione l'andamento è quasi totalmente di deposito; nel primo caso il Mallero esonda prima che il torrente entri a Sondrio nel suo tratto rettilineo, nel secondo caso non esonda, anche se si è al limite.

Un altro risultato importante è che il materiale in ingresso non arriva a Sondrio nel tratto rettilineo del Mallero: nelle sezioni di valle la velocità della corrente diminuisce sensibilmente; in conseguenza alla diminuzione della pendenza, lo sforzo sul fondo è minore di quello critico e quindi non si ha trasporto solido perciò i risultati di queste sezioni dipendono solo dall'idrodinamica e dalla geometria e non vengono influenzati dalla portata solida immessa a monte.

Dalle analisi fatte si deduce che la cassa di espansione di Sabbionaccio ha un effetto positivo sia per quanto riguarda il controllo delle portate che sul trasporto solido, consentendo di ridurre il rischio di allagamento della città di Sondrio.

Se si considera un evento con un tempo di ritorno di 100 anni la presenza della cassa di Sabbionaccio permette all'acqua di rimanere all'interno degli argini.

Da un punto di vista quantitativo, la calibrazione del modello con i risultati del 1987 ha permesso di ottenere valori il più possibile realistici.

Bisogna però tenere presente dell'incertezza dei parametri utilizzati (granulometria dei sedimenti, caratteristiche delle sezioni trasversali, formule di trasporto solido, ecc.), soprattutto per quanto riguarda il trasporto solido, che è elevata e quindi i risultati non sono completamente attendibili.

Inoltre è opportuno effettuare studi più approfonditi per esempio utilizzando un software capace di risolvere numericamente il sistema di equazioni differenziali sia per il caso con che per il caso senza cassa di espansione al fine di confrontare i risultati.

1.4.4 Tesi di Colombo S. e Giuriani G. (2011)

1.4.4.1 Titolo

Evoluzione morfologica dei fiumi montani - Propagazione della condizione di alimentazione solida imposta a monte

1.4.4.2 Obiettivi

L'obiettivo della Tesi è quello di studiare in modo accurato la propagazione della condizione di alimentazione solida di monte all'interno dei fiumi montani e quanto influisca, all'interno di un modello numerico, l'incertezza nella stima di tale parametro.

1.4.4.3 Struttura

- Vengono mostrati alcuni esempi di alluvioni che hanno coinvolto ambiti alpini negli ultimi decenni. Particolare attenzione viene data all'evento alluvionale, già citato, che ha coinvolto il fiume Mallero e la città di Sondrio, di cui vengono richiamati degli studi precedenti. Vengono inoltre illustrati i modelli matematici e numerici utilizzati nel lavoro di Tesi per la modellazione del trasporto solido;
- si studia la propagazione della condizione di alimentazione solida imposta a monte all'interno del fiume Mallero durante l'evento di piena del 1987. In questa analisi vengono creati tre modelli con tre differenti apporti solidi e tra loro si effettuano dei confronti sulle quote del fondo e sui volumi trasportati per arrivare alla quantificazione della propagazione cercata. Per definire quando i due modelli venivano a coincidere, si è introdotta una soglia limite sia per le differenze di quote del fondo che per i volumi trasportati (criterio di arresto). Questo è stato fatto per ottenere la grandezza chiamata "celerità" che fornisce una stima della velocità con la quale la condizione di alimentazione solida di monte si propaga verso valle;
- i codici di calcolo utilizzati per la creazione dei modelli di questo capitolo sono due: Basement, sviluppato dal Politecnico di Zurigo, e Rhyme, sviluppato dall'Università di Trento;
- si illustra un'analisi basata su dei modelli ideali, con geometria e parametri semplificati, con l'intento di ottenere una legge generale che riproduca la propagazione dell'alimentazione solida di monte e di come questa venga influenzata dai parametri idraulici, sedimentologici e geometrici. Per i confronti sono stati utilizzati tre diversi criteri di arresto che vengono applicati solo alle differenze di quote del fondo; per ogni confronto si ottiene la sua relativa

curva di celerità, che è stata successivamente adimensionalizzata. Per le analisi è stato utilizzato il software Basement.

1.4.4.4 Risultati

I risultati relativi ai modelli numerici del fiume Mallero, per l'evento di piena del 1987 mostrano che la condizione di alimentazione solida imposta a monte non arriva, durante la durata dell'evento, a influenzare il deposito di detriti nella città di Sondrio. In particolare, gli autori hanno pensato che l'accumulo di detriti nel tratto cittadino dipendesse dal profilo pre-evento del fiume Mallero.

La velocità di propagazione ha dei valori tipici che sono inferiori alla velocità dell'acqua. Si stima che il tempo necessario affinché l'apporto solido di monte abbia effetti problematici nella città di Sondrio è di circa 83 ore, a fronte di una durata della piena di circa 60 ore. I risultati ottenuti con i due programmi (Basemnt e Rhyme) non differiscono in modo eccessivo, se non nelle curve di celerità ottenute dalle differenze di volume trasportato.

Dalle analisi svolte su dei fiumi ideali con caratteristiche geometriche, idrauliche e sedimentologiche semplificate, sono state ricavate le curve di celerità adimensionalizzate per le quali è stato osservato che l'andamento è assimilabile a quello di una legge di potenza:

$$\frac{x}{h} = A \left(\frac{tV}{h} \right)^B$$

È da sottolineare, però, che la formula è valida solo per sistemi con caratteristiche simili a quelli usati per la sua calibrazione. Per estenderne il campo di validità bisognerebbe ripetere le stesse analisi su modelli con caratteristiche diverse; inoltre sono sempre utilizzate delle granulometrie costanti con un unico diametro dei grani e quindi sarebbe interessante riproporre questo studio su modelli con granulometria variabile più vicini alla realtà.

Tenendo in considerazione queste limitazioni, le formule finali ottenute possono essere utili nella fase preliminare di creazione di un modello, in cui può essere utile disporre di un'equazione di facile applicazione che consenta di avere una prima stima della propagazione dell'alimentazione solida di monte.

1.5 Obiettivi

Il presente lavoro di Tesi prende come punto di partenza i lavori pregressi svolti dal Politecnico di Milano sullo studio del trasporto solido in fiumi di montagna (vedi il precedente **Par. 1.4**) cercando di risolvere le criticità incontrate. Gli obiettivi si possono riassumere nei seguenti punti:

➤ *Modellazione di una briglia*

Nella Tesi di Mauri M. e Spagnolatti M. (2009) erano stati creati dei modelli con lo scopo di riprodurre gli effetti dovuti all'inserimento di una briglia all'interno di un alveo; il programma usato (Rhyme), però, non riproduceva l'interrimento delle briglie; nella presente Tesi si vuole tentare di risolvere questo problema usando la versione 2.2 del software *Basement*®.

➤ *Studio di un'immissione di una portata laterale solida*

È importante per modellare l'apporto solido dovuto ad una sorgente laterale, come ad esempio una frana e per valutare gli effetti che si hanno a monte dell'immissione, per capire se il comportamento a monte di tale sezione influenzi significativamente l'alveo a valle.

➤ *Analisi con granulometria variabile*

Negli alvei montani la granulometria è molto distribuita e quindi caratterizzare l'alveo con un solo valore di diametro "caratteristico" non è realistico.

Un'analisi granulometrica variabile diventa quindi importante; nello specifico si analizzeranno due aspetti:

- studio di come la granulometria dell'alveo evolve col tempo e lungo le sezioni; analisi che in tutti i lavori precedenti non era stata affrontata;
- applicazione della granulometria variabile al caso reale del Mallero per vedere se ci sono differenze importanti con i risultati ottenuti da Colombo e Giuriani (2009) che avevano effettuato una simulazione monogranulare; lo scopo è quindi quello di valutare se in questo caso specifico un onere computazionale maggiore sia necessario oppure no.

➤ *Simulazione di un evento reale*

Tali strategie di modellazione verranno applicate per riprodurre l'alluvione che ha interessato la Valtellina nell'87 ed in particolare il comportamento del Mallero, con il modello a disposizione (*Basement 2.2*) apportando le modifiche fin qui descritte che saranno considerate significative, e verificando che la variazione della quota del fondo misurata in alcune sezioni caratteristiche dopo l'evento di piena sia confrontabile con quella ottenuta dalla simulazione.

2. STRATEGIE DI ANALISI NUMERICA

In precedenza è stato descritto il modello matematico il cui sistema di equazioni caratterizza il problema e le varie condizioni al contorno ad esso associate. Questo capitolo fornisce una breve spiegazione di come avviene il trasferimento dal modello matematico al problema numerico che deve risolvere il calcolatore.

Il modello scelto per la simulazioni è il *Basement*[®] [14], un software creato allo scopo di valutare l'evoluzione morfologica di un corso d'acqua, implementato dal Dipartimento di Idraulica dello Swiss Federal Institute of Technology ETH di Zurigo.

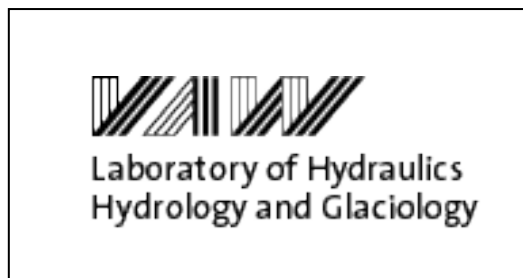


Fig. 2.1 – Logo dell'Istituto sviluppatore del programma Basement

2.1 Il modello matematico *Basement*[®]

Il modello utilizzato è suddiviso in tre differenti parti, mutualmente interconnesse l'una con l'altra:

- i modelli matematico-fisici costituiti dalle equazioni governanti il sistema, ovvero: per la parte idrodinamica, nelle simulazioni 1-D, vengono utilizzate le equazioni di Saint Venant che forniscono risultati per l'altezza d'acqua e la velocità media nella direzione del flusso; per la parte del trasporto solido si utilizzano formule empiriche (vedi **Par. 1.3.1.2**);

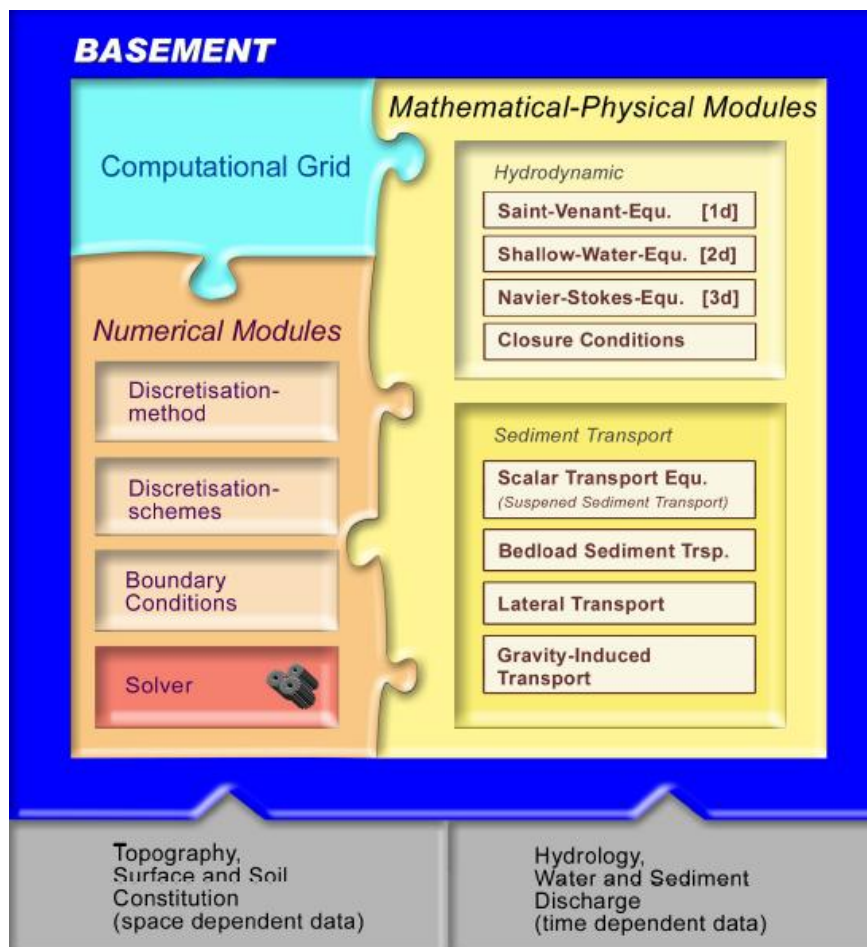


Fig. 2.2 – Schema concettuale del modello Basement

- la griglia computazionale che discretizza la topografia (dell'alveo e del bacino), che è costituita da celle (volumi di controllo) formate a loro volta da 3 oggetti: i nodi (punti privi di massa con coordinate geografiche); gli "edge" (definiti da due nodi e danno le informazioni riguardanti il flusso di informazioni tra due elementi adiacenti nel metodo ai volumi finiti); gli elementi (definiti da più nodi e costituiscono il luogo delle variabili fisiche).

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Nella sottostante **Fig. 2.3** sono indicati con le linee verticali a tratto continuo le sezioni, con le linee verticali tratteggiate gli edges.

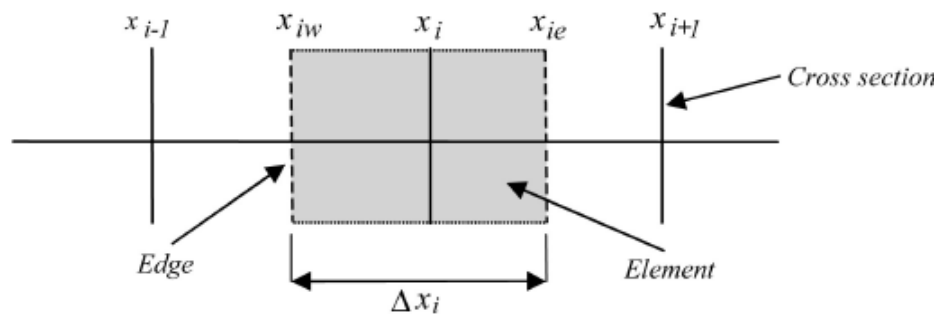


Fig. 2.3 – Discretizzazione spaziale

➤ i modelli numerici che risolvono le equazioni.

2.1.1 La risoluzione delle equazioni governanti

Matematicamente il Basement risolve il sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali (già descritte nel **Par. 1.3.2**) che comprende le due equazioni di Saint Venant (conservazione della massa e dell'energia per quanto riguarda la frazione liquida) e l'equazione di Exner (conservazione della massa solida).

Tali equazioni differenziali si possono risolvere attraverso diversi metodi di discretizzazione: differenze finite, elementi finiti, metodo delle linee caratteristiche, volumi finiti; il modello Basement predilige quest'ultimo, in cui le equazioni sono integrate su volumi, definiti da maglie di punti nodali e griglie, in modo da rendere discreto il continuo e che, essendo completamente conservativo, permette di simulare fenomeni discontinui come la propagazione dell'onda di piena. Gli integrali sul volume vengono sostituiti da integrali di superficie usando la formula di Gauss. La discretizzazione spaziale delle equazioni di Saint Venant prevede un'integrazione delle equazioni differenziali sull'elemento i-esimo di **Fig. 2.3**.

Attraverso questa griglia di calcolo possiamo affermare che qualsiasi funzione può essere discretizzata nel seguente modo:

$$\int_{x_{iL}}^{x_{iR}} f(x) dx \approx f(x_i)(x_{iR} - x_{iL}) = f_i \Delta x_i$$

Dove x_{iR} ed x_{iL} sono le posizioni degli edges, rispettivamente di destra e sinistra del generico elemento i . In questo modo si discretizzano tutte le equazioni che governano il sistema, a partire dalla conservazione di continuità:

$$\int_{x_{iL}}^{x_{iR}} \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l \right) dx = 0$$

Le differenti componenti di tale equazione vengono discretizzate (seguendo lo schema su proposto) in:

$$\begin{aligned} \int_{x_{iL}}^{x_{iR}} \frac{\partial A_i}{\partial t} dx &\approx \frac{\partial A_i}{\Delta t} \Delta x_i \approx \frac{A_i^{t+1} - A_i^t}{\Delta t} \Delta x_i \\ \int_{x_{iL}}^{x_{iR}} \frac{\partial Q_i}{\partial x} dx &\approx Q(x_{iR}) - Q(x_{iL}) = \Phi_{c,iR} - \Phi_{c,iL} \\ \int_{x_{iL}}^{x_{iR}} q_l dx &\approx q_{iR}(x_{iR} - x_i) + q_{iL}(x_i - x_{iL}) \end{aligned}$$

dove $\Phi_{c,iR}$ e $\Phi_{c,iL}$ sono i flussi di continuità. Per la discretizzazione temporale esplicita, il nuovo valore di A diverrà:

$$A_i^{t+1} = A_i^t - \frac{\Delta t}{\Delta x_i} (\Phi_{c,iR} - \Phi_{c,iL}) - \frac{\Delta t}{\Delta x_i} (q_{iR}(x_i - x_{iR}) + q_{iL}(x_{iL} - x_i))$$

L'equazione della conservazione della quantità di moto viene discretizzata in maniera del tutto analoga, ovvero, partendo da:

$$\int_{x_{iL}}^{x_{iR}} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A_{red}} \right) + \sum Sources \right) dx = 0$$

si ottiene l'espressione della portata nell'istante successivo:

$$Q_i^{t+1} = Q_i^t - \frac{\Delta t}{\Delta x_i} (\Phi_{m,iR} - \Phi_{m,iL}) + \sum Sources$$

dove $\Phi_{m,iR}$ e $\Phi_{m,iL}$ sono i flussi della quantità di moto ed i termini sorgenti sono discretizzati come segue:

$$\sum Sources = -\Delta t g A_{redi} \left(\frac{Z_{S,i+1} - Z_{S,i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}} \right)$$

2.1.2 La risoluzione del trasporto solido

L'ultima equazione del sistema governante che deve essere risolta, è quella legata al trasporto solido (equazione di Exner):

$$(1 - p) \frac{\partial A}{\partial t} + \left(\sum_{g=1}^{ng} \frac{\partial Q_s}{\partial x} + S_g - Sl_g \right) = 0$$

I singoli contributi di tale equazione possono essere integrati nel modo seguente:

$$\int_{x_{iL}}^{x_{iR}} \left((1 - p) \frac{\partial A}{\partial t} + \left(\sum_{g=1}^{ng} \frac{\partial Q_s}{\partial x} + S_g - Sl_g \right) \right) dx = 0$$

$$\int_{x_{iL}}^{x_{iR}} \frac{\sum_{k=1}^{ng} Q_{s,i}}{\partial x} dx = \sum_{k=1}^{ng} Q_s(x_{iR}) - \sum_{k=1}^{ng} Q_s(x_{iL}) = \Phi_{s,iR} - \Phi_{s,iL}$$

dove $\Phi_{s,iR}$ e $\Phi_{s,iL}$ sono i flussi del trasporto solido di fondo.

$$\int_{x_{iL}}^{x_{iR}} \sum_{k=1}^{ng} (S_g - Sl_g) dx = \sum_{k=1}^{ng} S_g - \sum_{k=1}^{ng} Sl_g$$

Il sistema bi-fase (acqua-sedimenti) può essere rappresentato da un numero arbitrario di classi monogranulari. Il dominio fisico è quindi suddiviso in volumi di controllo anche verticali per risolvere le equazioni governanti.

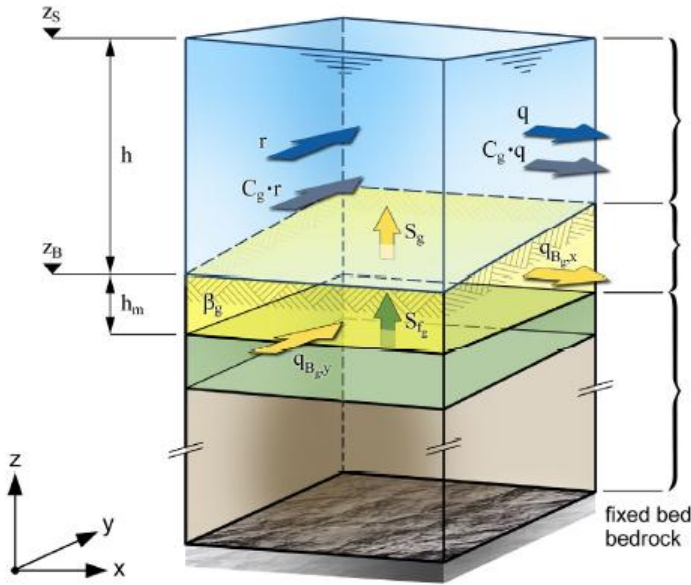


Fig. 2.4 – Discretizzazione verticale di una cella di calcolo

La Fig. 2.4 mostra una singola cella del modello numerico con partizione verticale in tre principali volumi di controllo: l'upper layer per la quantità di moto ed il trasporto solido sospeso, l'active layer (strato giallo) per il trasporto solido di fondo ed il sub layer (diviso a sua volta in due strati: uno per l'apporto solido verso lo strato superiore ed uno per l'accumulo). Le principali incognite dello strato superiore sono l'altezza d'acqua h e le portate

specifiche (in direzione delle coordinate cartesiane) q ed r ; nell'active layer $q_{B,g,x}$ e $q_{B,g,y}$ descrivono il trasporto di fondo specifico della g-esima classe granulometrica. La variazione

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

dell'altezza di fondo Z_B può essere ottenuta dalla combinazione delle equazioni di bilancio tra i suddetti strati verticali.

Il modo in cui il codice modifica le sezioni in caso di deposito o di erosione è una scelta arbitraria effettuata dagli sviluppatori del software. In questo caso i punti della sezione alla quota del pelo libero rimangono fissi e la quota del fondo varia in modo uniforme come mostrato nella sottostante **Fig. 2.5**.

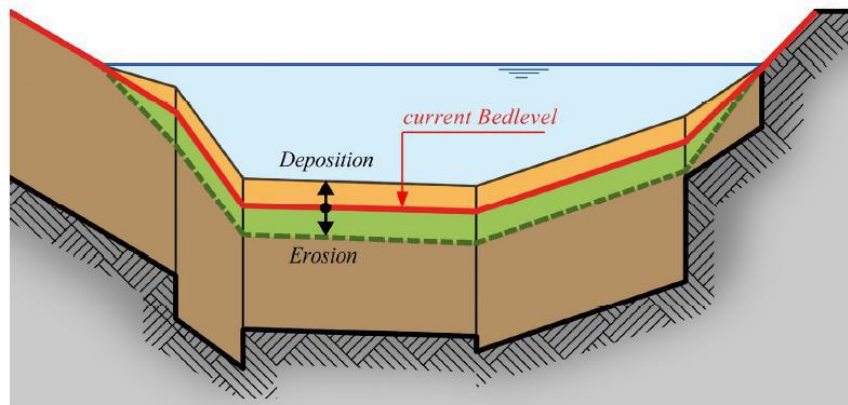


Fig. 2.5 – Modifica delle sezioni per deposito od erosione

2.2 “Mini guida utente”: Input

La versione del programma Basement [15] utilizzata è la 2.2. La finestra principale (**Fig. 2.6**) con cui si apre il programma è la seguente:

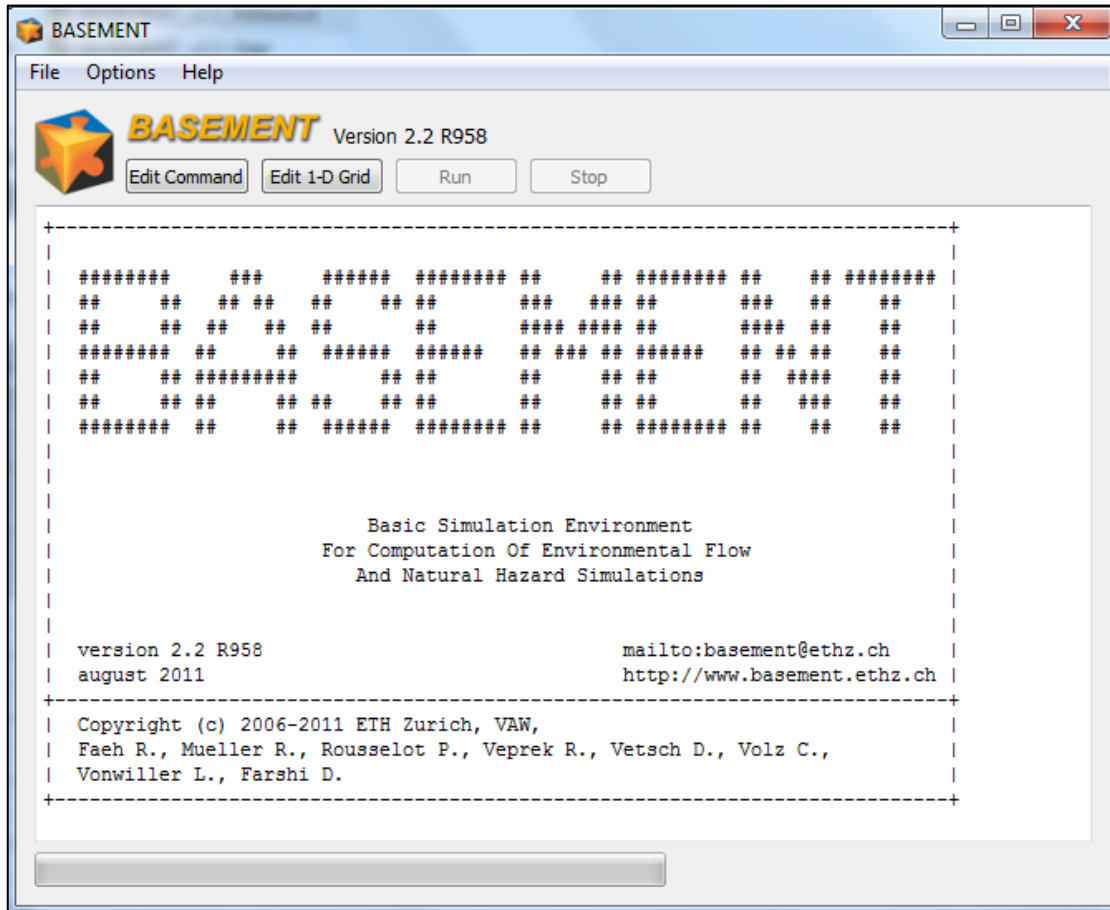


Fig. 2.6 – Finestra principale del programma

Il tasto **Edit command** permette di inserire le condizioni al contorno, le condizioni iniziali, i parametri del modello e definire l’output desiderato; il tasto **Edit -1 grid** permette l’inserimento della geometria; infine, il tasto **Run** (che si attiva solo a progettazione avvenuta e convalidata) permette di avviare la simulazione.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

A differenza delle versioni precedenti, nella 2.2. si dispone di un'interfaccia grafica per favorire l'inserimento dei dati (**Fig. 2.7**), lasciando comunque la possibilità di scrivere il programma direttamente attraverso lo script (ovvero il file di testo contenente i parametri del modello) con la funzione "edit raw" (**Fig. 2.8**).

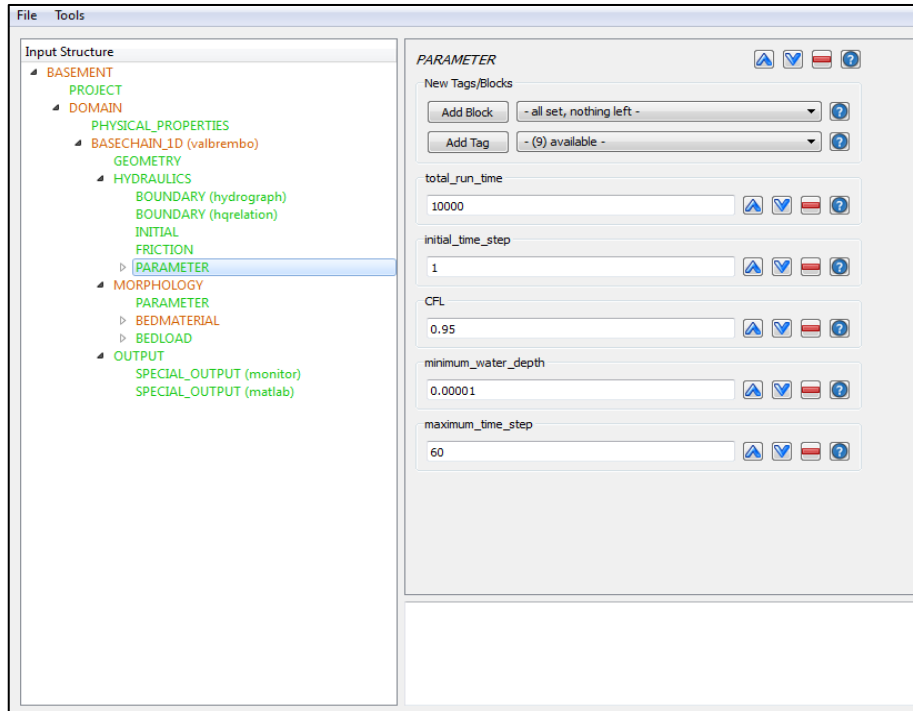


Fig. 2.7 – Esempio di interfaccia grafica

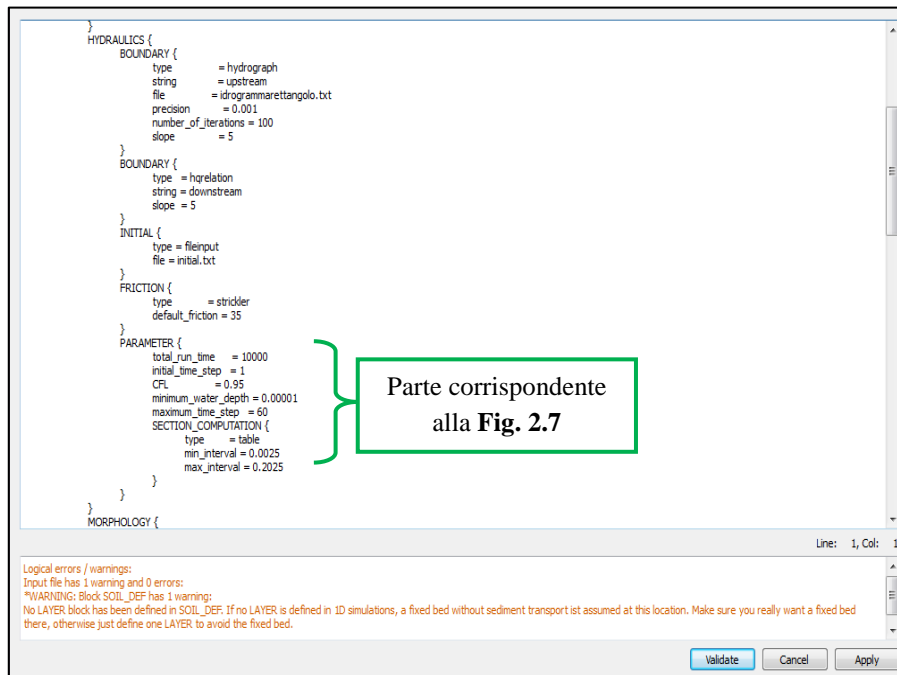


Fig. 2.8 – Esempio di script

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Edit-1D grid è composto da un blocco generale chiamato *BASECHAIN_GEOMETRY* suddiviso in n blocchi corrispondenti al numero delle sezioni. Ad ogni sezione vengono attribuite diverse *Tags*, cioè degli attributi che la specificano (nome, distanza della sezione dall'origine, coefficiente di scabrezza di Strickler e il suo intervallo di validità, coordinate dei nodi della sezione, intervallo nel quale il fondo è considerato attivo e cioè dove è erodibile e dove non lo è). Ciascuna sezione ha un sotto blocco chiamato *SOIL_DEF* nel quale si definisce un indice rappresentativo del fondo (in questo modello si è adottato 1 per il fondo non erodibile e 2 per il fondo erodibile).

Per meglio chiarire il funzionamento del programma e l'assegnazione dei dati, nel seguito sono proposte analisi di un modello svolto a titolo esemplificativo con le seguenti caratteristiche: un canale rettangolare largo 20 m, lungo 1 Km, con pendenza di 0.2% e scabrezza di $35 \text{ m}^{0.33}/\text{s}$, discretizzato in 21 sezioni (CS1, CS2, ..., CS21); un esempio di sezione è riportata di seguito:

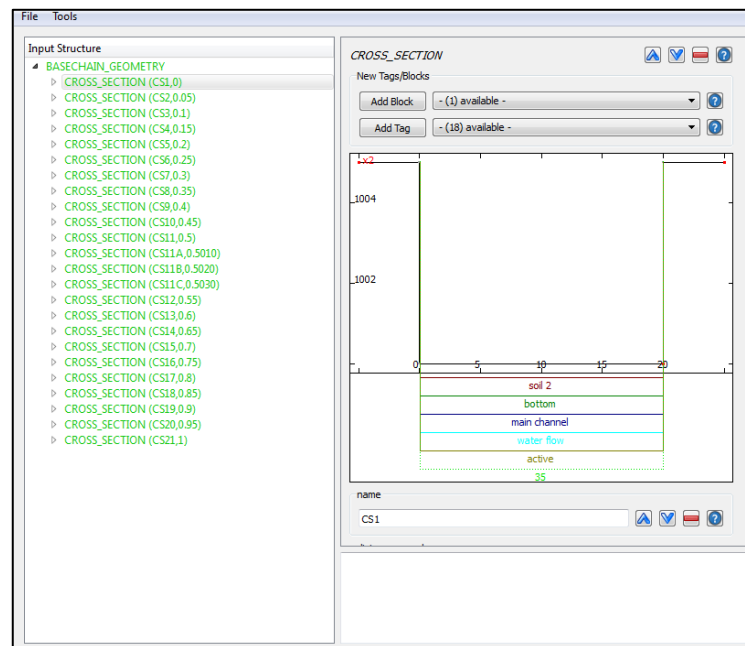


Fig. 2.9 – Sezione CS1

Edit command è composto da tutti i parametri in input che necessita il modello.

Si definiscono inizialmente le proprietà fisiche che normalmente non cambiano da una simulazione ad un'altra: gravità 9.81 m/s^2 ; viscosità $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ e densità del fluido 1000 Kg/m^3 .

È suddiviso in 4 blocchi generali (vedi **Fig. 2.7**), che verranno descritti nel dettaglio nel prossimo

Par. 2.2.1.

2.2.1 Definizione dei blocchi

- **GEOMETRY** : si importa il file .bmg creato nella sezione *Edit-1 grid* nel quale si è definita la geometria, poi si specificano le sezioni di cui è composta la simulazione;
- **HYDRAULICS**: si inseriscono tutte le informazioni riguardanti la simulazione idraulica. Indipendentemente dal fatto che si stiano analizzando correnti lente o veloci, il programma necessita di due condizioni al contorno: una di monte e una di valle.

Successivamente si inserisce la condizione iniziale: si effettua una prima simulazione considerando il canale asciutto e a fondo fisso che ha lo scopo di creare una condizione di moto permanente; i risultati ottenuti nel file di output ‘restart’ vengono usati come condizioni iniziali per una nuova simulazione.

Infine si definiscono i parametri della simulazione: in particolare si definisce il tempo totale di simulazione;

- **MORPHOLOGY**: in questo blocco si definiscono tutte le informazioni riguardanti il trasporto solido; è composto da 3 sottoblocchi:

-*parameter*: vengono definiti i parametri principali del trasporto solido quali la densità e la porosità dei sedimenti.

-*bedmaterial*: in questo sottoblocco si definiscono le dimensioni dei sedimenti, la loro percentuale (curva granulometrica) e vengono definiti i tipi di suolo con i rispettivi indici. Verrà approfondito nel **Par.3.3.1**.

-*bedload*: qui vengono introdotti i parametri significativi del trasporto di fondo, una condizione a monte ed una a valle e l’eventuale presenza di una portata solida laterale che si inserisce col comando “SOURCE” (specificando la sezione dove deve essere applicata e il tipo di granulometria);

- **OUTPUT**: il programma permette di visualizzare diversi output.

Per ogni simulazione viene prodotto un file .txt che definisce per ogni passo di calcolo le informazioni riferite a ciascuna sezione (nome della sezione, distanza dall’origine, quota fondo del letto, quota argine destro e sinistro, livello del fondo, quota della linea dell’energia, area bagnata della sezione, portata dell’ acqua, concentrazione dei sedimenti in sospensione, numero di Froude, capacità di trasporto) e a ciascun “*edge*” delle sezioni (numero del bordo, flusso di continuità H, flusso del momento U, flusso di sedimenti, advective flux A, diffusive flux D).

Questo tipo di output, però, non è immediatamente utilizzabile per plottare i grafici; per questo motivo si può utilizzare la funzione “special output” scegliendo tra le varie opzioni l’output “matlab” e “matlab flux”.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

E' da sottolineare che "Command" e "1D-Grid" sono reciprocamente influenzati, infatti la geometria definita in 1D-Grid viene usata nel Command che a sua volta definisce alcuni parametri, come per esempio la definizione dei suoli, che sono richiamati in 1D-Grid. Più avanti vengono descritte le operazioni per ottenere i risultati partendo dall'output di *Matlab*®.

2.3 "Mini guida utente": Output

Tra i diversi tipi di output che il programma *Basement*® propone, quello di *Matlab*® costituisce il migliore in quanto restituisce un file .dat dove è salvata una matrice che racchiude molti dati presenti nel file .txt che costituisce l'output di default del programma.

Come sottolineato nel precedente paragrafo, i risultati nel file .txt sono dati sia per le sezioni che per gli edges. Lo stesso vale per l'output: "matlab" restituisce una matrice che si riferisce ai valori nelle varie sezioni per i diversi istanti temporali; "matlab flux" restituisce una matrice che si riferisce ai parametri caratteristici del trasporto solido calcolati sugli edges.

In particolare la matrice riferita alle sezioni ha la seguente visualizzazione in matlab:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	0	1000	1005	1005	1000	1.0018e+03	1.0034e+03	200	200	0	0	0	0	0	0	0
2	0	50	997.5000	1.0025e+03	1.0025e+03	997.5000	998.8733	1.0016e+03	200	200	0	0	0	0	0	0	0
3	0	100	995	1000	1000	995	996.2719	999.4232	200	200	0	0	0	0	0	0	0
4	0	150	992.5000	997.5000	997.5000	992.5000	993.7354	997.0757	200	200	0	0	0	0	0	0	0
5	0	200	990	995	995	990	991.2216	994.6377	200	200	0	0	0	0	0	0	0
6	0	250	987.5000	992.5000	992.5000	987.5000	988.7151	992.1677	200	200	0	0	0	0	0	0	0
7	0	300	985	990	990	985	986.2134	989.6756	200	200	0	0	0	0	0	0	0
8	0	350	982.5000	987.5000	987.5000	982.5000	983.7116	987.1841	200	200	0	0	0	0	0	0	0
9	0	400	980	985	985	980	981.2121	984.6819	200	200	0	0	0	0	0	0	0
10	0	450	977.5000	982.5000	982.5000	977.5000	978.7110	982.1873	200	200	0	0	0	0	0	0	0
11	0	500	975	980	980	975	976.2119	979.6827	200	200	0	0	0	0	0	0	0
12	0	550	972.5000	977.5000	977.5000	972.5000	973.7109	977.1877	200	200	0	0	0	0	0	0	0
13	0	600	970	975	975	970	971.2119	974.6828	200	200	0	0	0	0	0	0	0
14	0	650	967.5000	972.5000	972.5000	967.5000	968.7109	972.1877	200	200	0	0	0	0	0	0	0
15	0	700	965	970	970	965	966.2119	969.6828	200	200	0	0	0	0	0	0	0
16	0	750	962.5000	967.5000	967.5000	962.5000	963.7109	967.1877	200	200	0	0	0	0	0	0	0
17	0	800	960	965	965	960	961.2119	964.6828	200	200	0	0	0	0	0	0	0
18	0	850	957.5000	962.5000	962.5000	957.5000	958.7111	962.1867	200	200	0	0	0	0	0	0	0
19	0	900	955	960	960	955	956.2073	959.7046	200	200	0	0	0	0	0	0	0
20	0	950	952.5000	957.5000	957.5000	952.5000	953.3863	959.8755	200	200	0	0	0	0	0	0	0
21	0	1000	950	955	955	950	952.5288	953.3260	200	392.7783	0	0	0	0	0	0	0
22	3.3375	0	999.9974	1005	1005	999.9974	1.0018e+03	1.0034e+03	200	200	0	0.6926	216.4300	1	1	4.8000	1
23	3.3375	50	997.4951	1.0025e+03	1.0025e+03	997.4951	998.8733	1.0016e+03	200	200	0	1.6120	398.8030	1	1	4.8000	1
24	3.3375	100	994.9975	1000	1000	994.9975	996.2719	999.4232	200	200	0	2.7079	475.6020	1	1	4.8000	1
25	3.3375	150	992.4989	997.5000	997.5000	992.4989	993.7354	997.0757	200	200	0	3.2453	508.4880	1	1	4.8000	1
26	3.3375	200	989.9995	995	995	989.9995	991.2216	994.6377	200	200	0	3.4830	521.7730	1	1	4.8000	1
27	3.3375	250	987.4998	992.5000	992.5000	987.4998	988.7151	992.1677	200	200	0	3.5863	528.1570	1	1	4.8000	1

Fig. 2.10 – Output Matlab riferito alle sezioni

In questo esempio si è modellato un canale con 21 sezioni; le righe dalla 1 alla 21 sono riferite al primo istante temporale; quelle dalla 22 alla 42 al secondo istante e così via fino ad arrivare al tempo totale di simulazione.

La prima riga di ogni istante temporale è riferita alla prima sezione, la seconda alla seconda, e così fino alla 21-esima riga di ciascun blocco temporale.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Ogni colonna si riferisce a caratteristiche ben precise:

- 1, 2: passo temporale [s] e distanza dall'origine [m];
- 3, 4, 5: quota del fondo, dell' argine destro e dell' argine sinistro [m];
- 6: livello medio del fondo [m];
- 7, 8: livello dell'acqua e quota della linea dell'energia [m];
- 9, 10: portata [m³/s];
- 11: concentrazione dei sedimenti in sospensione [-];
- 12: portata solida [m³/s];
- 13: sforzo sul fondo [Pa];
- 14,15,16,17: valori riferiti alla granulometria dell'alveo(vedi Par.

La matrice riferita al trasporto solido invece ha la visualizzazione in matlab, visibile in **Fig. 2.11**. In questo caso per ogni istante temporale ci sono 22 righe (ovvero il numero degli edges, pari al n° delle sezioni più uno); il significato delle colonne è il seguente:

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	3.3375	0	200	790.9450	0.5000	0.5000	0	0
2	3.3375	1	200	1.1773e+03	0.8853	0.8853	0	0
3	3.3375	2	200	1.4695e+03	2.3387	2.3387	0	0
4	3.3375	3	200	1.5771e+03	3.0772	3.0772	0	0
5	3.3375	4	200	1.6208e+03	3.4135	3.4135	0	0
6	3.3375	5	200	1.6382e+03	3.5526	3.5526	0	0
7	3.3375	6	200	1.6463e+03	3.6201	3.6201	0	0
8	3.3375	7	200	1.6486e+03	3.6381	3.6381	0	0
9	3.3375	8	200	1.6505e+03	3.6574	3.6574	0	0
10	3.3375	9	200	1.6503e+03	3.6524	3.6524	0	0
11	3.3375	10	200	1.6511e+03	3.6645	3.6645	0	0
12	3.3375	11	200	1.6506e+03	3.6542	3.6542	0	0
13	3.3375	12	200	1.6512e+03	3.6654	3.6654	0	0
14	3.3375	13	200	1.6506e+03	3.6545	3.6545	0	0
15	3.3375	14	200	1.6512e+03	3.6655	3.6655	0	0
16	3.3375	15	200	1.6506e+03	3.6545	3.6545	0	0
17	3.3375	16	200	1.6512e+03	3.6656	3.6656	0	0
18	3.3375	17	200	1.6506e+03	3.6545	3.6545	0	0
19	3.3375	18	200	1.6520e+03	3.6632	3.6632	0	0
20	3.3375	19	200	1.6824e+03	3.7038	3.7038	0	0
21	3.3375	20	200	817.4120	11.0265	11.0265	0	0
22	3.3375	21	200	790.9420	11.0265	11.0265	0	0
23	104.1517	0	200	790.9510	0.5000	0.5000	0	0
24	104.1517	1	199.9850	1.1816e+03	0.8967	0.8967	0	0
25	104.1517	2	200.0270	1.4701e+03	2.3133	2.3133	0	0
26	104.1517	3	199.8320	1.5686e+03	3.0112	3.0112	0	0
27	104.1517	4	200.3020	1.6187e+03	3.3414	3.3414	0	0

- 1: passo temporale [s];
- 2: numero dell' edge [-];
- 3: portata Q_w [m³/s];
- 4: Q_w^2/A [m⁴/s²];
- 5: portata solida totale [m³/s];
- 6: portata di fondo Q_b [m³/s];
- 7, 8: advective e diffusive flux (riferiti al trasposto sospeso) [m³/s].

Per plottare i grafici partendo dai valori forniti da queste due matrici è fondamentale prima di tutto unirle. Dal momento che la seconda matrice ha valori riferiti

Fig. 2.11 – Output Matlab riferito agli edges agli edges, è stato necessario creare una nuova matrice che, partendo dai valori del trasporto solido sugli edges, si riferisse ai valori del trasporto solido nelle varie sezioni; per fare ciò, ad ogni sezione è stato assegnato il valore medio tra il valore riferito all'edge precedente la sezione e quello successivo. Il passo finale è stato quello di unire le due matrici.

2.3.1 Visualizzazione nel tempo e nello spazio

Come è ovvio, è possibile visualizzare sia il comportamento di una sezione nel corso del tempo che il comportamento dell'intero alveo ad un determinato istante temporale. A titolo d'esempio vengono di seguito illustrati diversi grafici usando il seguente modello che utilizza come geometria quella già descritta precedentemente:

- portata d'acqua Q_W di $100 \text{ m}^3/\text{s}$ (capacità di trasporto di circa $2 \text{ m}^3/\text{s}$ per le condizioni di moto uniforme);
- portata solida in ingresso Q_S di $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$;
- portata solida laterale Q_L di $2 \text{ m}^3/\text{s}$ alla sezione 10 (450m).

In questo primo grafico, **Fig. 2.12**, riportiamo l'andamento del fondo dell'alveo su tutto il profilo per tre diversi istanti temporali: iniziale (a linea continua rossa), intermedio (a 5 000 s, a linea continua nera) e finale (a 10 000 s, linea continua blu).

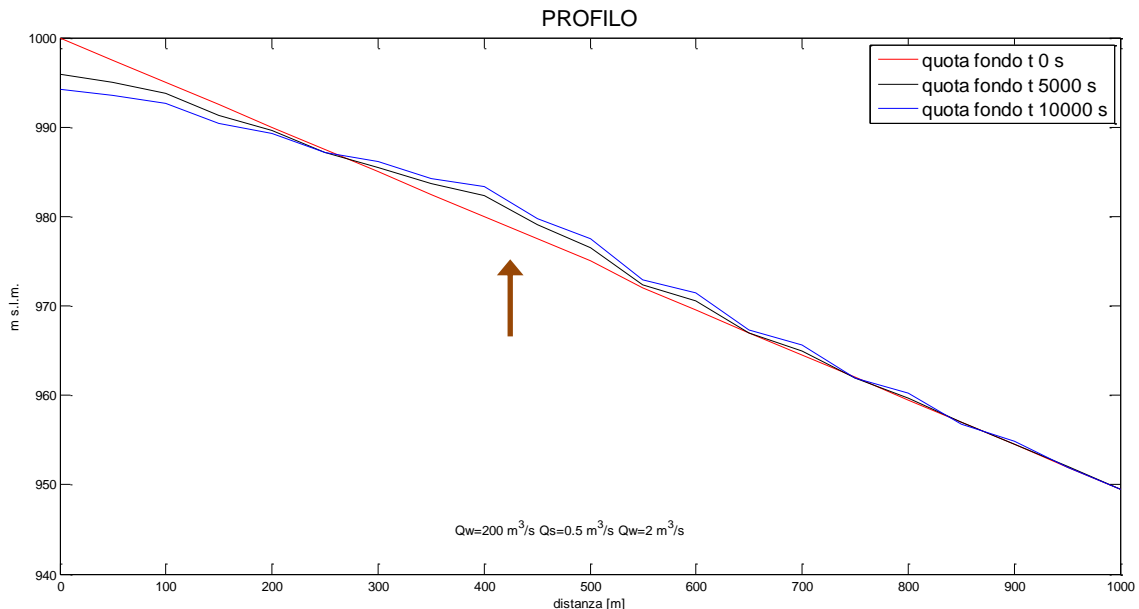


Fig. 2.12 – Generico profilo del fondo d'alveo plottato nello spazio

La portata all'equilibrio è di $2 \text{ m}^3/\text{s}$; essendo l'alveo sottoalimentato ($Q_S=0.5 \text{ m}^3/\text{s}$) nel tratto iniziale (fino a circa 250 m), si verifica l'erosione del fondo; nei tratti successivi, invece, si verifica il fenomeno opposto dell'accumulo dovuto all'immissione di una portata solida laterale di Q_L pari a $2 \text{ m}^3/\text{s}$ alla sezione CS10 (ad una distanza di 450 m).

È importante conoscere se l'alveo ha raggiunto la pendenza di equilibrio. Per fare ciò si usa la formula citata al **Par. 1.3.1.1**, che viene richiamata qui: $i_f = 0.057\Delta \frac{d}{h}$.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

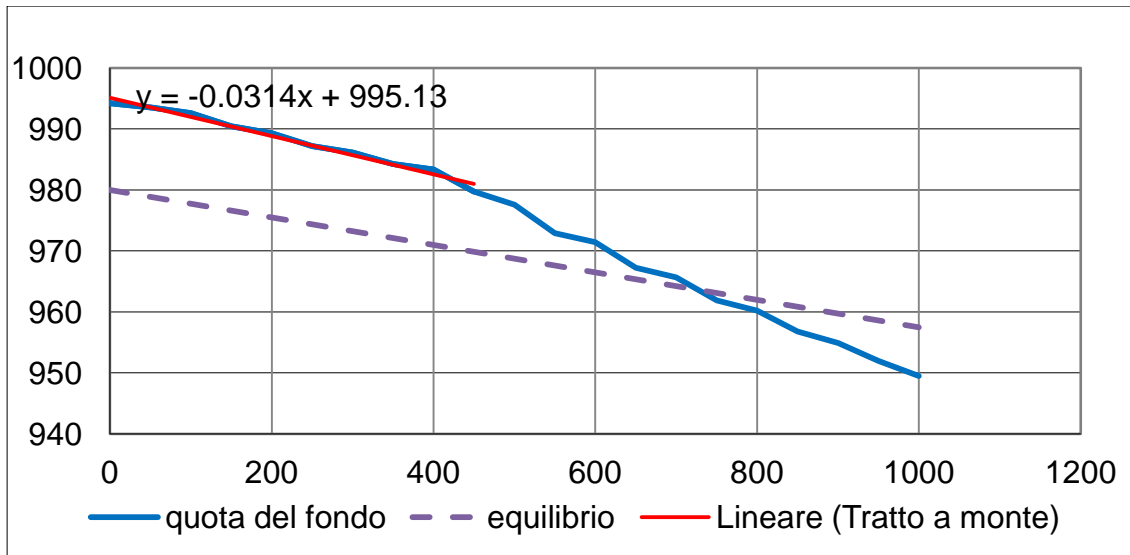


Fig. 2.13– Confronto con pendenza all’equilibrio

In **Fig. 2.13** viene visualizzata con una linea tratteggiata viola la pendenza di equilibrio e con la linea rossa continua la pendenza del fondo del fiume. Si ottiene una pendenza di equilibrio di 0.0225, mentre la pendenza calcolata nel primo tratto del fiume (fino al punto di immissione della portata solida) è di 0.0314; non si è quindi raggiunto ancora l’equilibrio perché il fiume tenderebbe ad erodere ancora se non fosse per l’introduzione della portata laterale.

Di seguito è riportato l’andamento (sempre nello spazio) di un’altra variabile: la portata solida di fondo effettivamente transitante attraverso le sezioni.

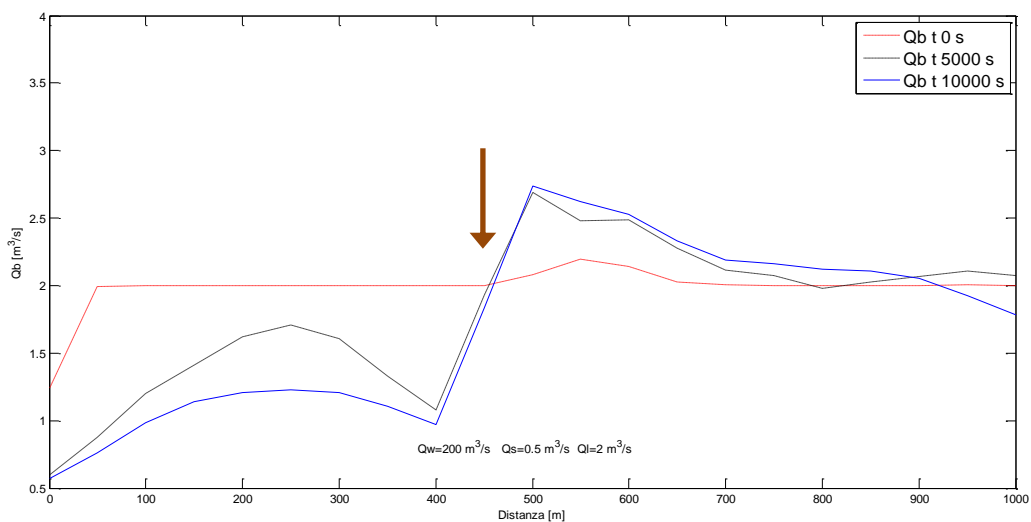


Fig. 2.14 – Andamento della portata solida plottata nello spazio

Si osserva che nell’istante iniziale (a tratto rosso), il trasporto solido passa dal valore della portata solida Q_s (nelle primissime sezioni), al valore della portata di equilibrio Q_{EQ} (a partire

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

dalla distanza di 100 m); con l'avanzare del tempo (linee nera e blu), l'alveo risente dell'immissione solida laterale, il cui effetto è quello di diminuire il trasporto solido a monte dell'immissione e di aumentarlo notevolmente (del 50 %) a valle dell'immissione. Nel grafico sottostante sono sovrapposti il trasporto solido e la quota del fondo (grafico non in scala).

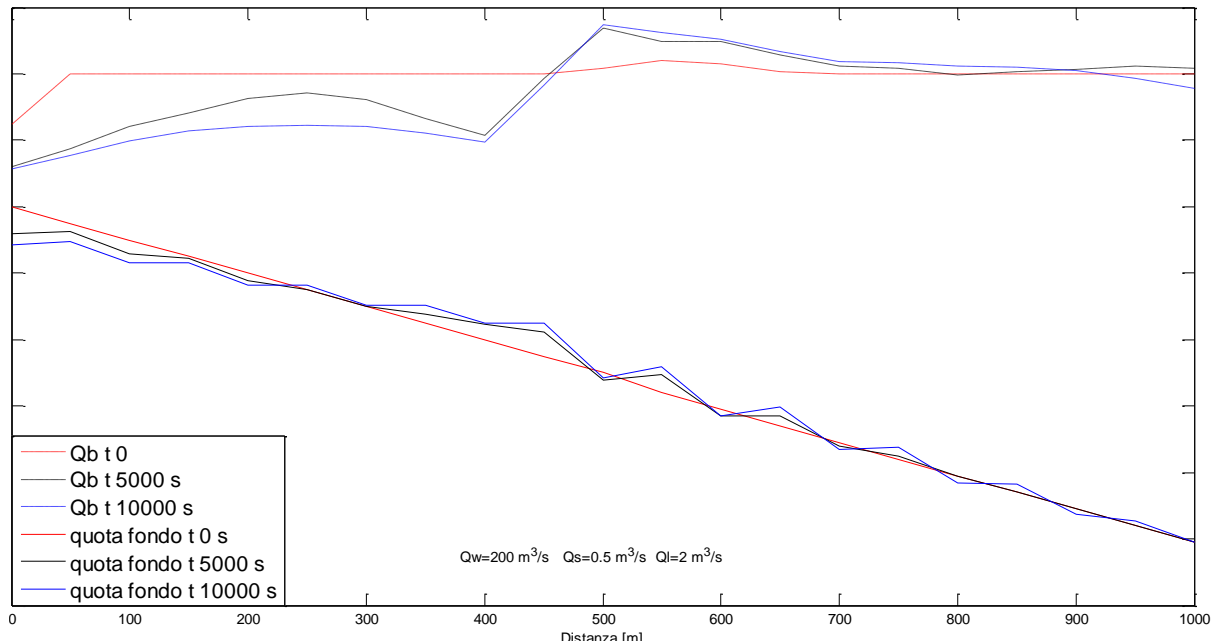


Fig. 2.15 – Confronto tra portata solida ed evoluzione del fondo nello spazio

Dalla **Fig. 2.15**, si può notare che dove il trasporto solido è piccolo (inferiore alla capacità di trasporto di $2 \text{ m}^3/\text{s}$) la quota del fondo diminuisce poiché si ha erosione; dove la portata solida immessa è superiore alla capacità di trasporto, si ha deposito di materiale (il canale può portare meno materiale di quel che c'è, quindi poco alla volta deposita tutto l'eccesso).

Allo stesso modo è possibile rappresentare l'andamento del fondo e del trasporto solido anche in funzione del tempo. Sono state scelte a titolo d'esempio le seguenti sezioni: CS1 all'inizio del canale, CS11(500 m) immediatamente dopo l'immissione laterale di sedimenti, CS16 (750 m) in posizione sufficientemente lontana dal disturbo, CS20 (950 m) alla fine del canale.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

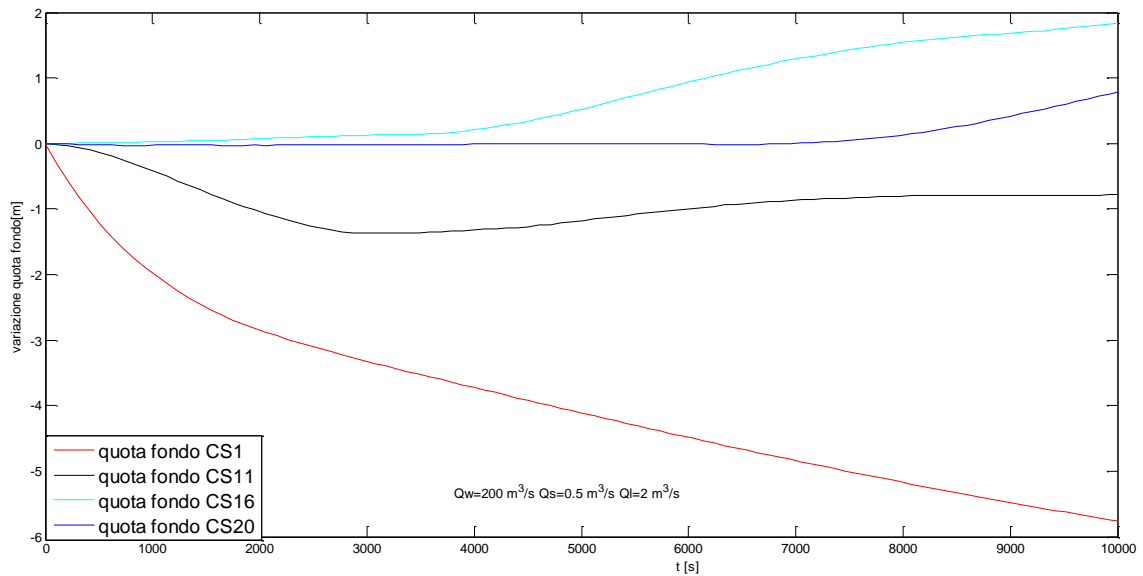


Fig. 2.16 – Variazione del fondo d'alveo di alcune sezioni caratteristiche plottate nel tempo

Di seguito si visualizza l'evoluzione del trasporto solido in tutti gli istanti temporali (**Fig. 2.17**):

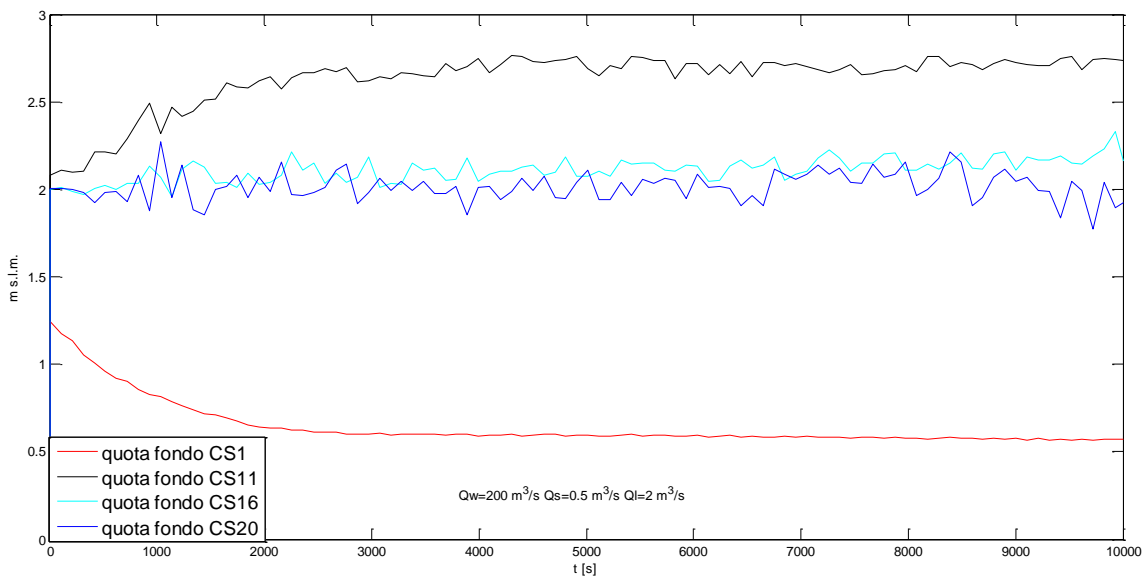


Fig. 2.17 – Variazione della portata solida di alcune sezioni caratteristiche plottate nel tempo

Si osserva che nella CS1 (a linea rossa, all'inizio del canale, con $Q_s=0.5 \text{ m}^3/\text{s}$) il trasporto solido è pari alla Q_s ; nella CS11 (a linea nera, immediatamente dopo l'immissione laterale di sassi, con $Q_L=2 \text{ m}^3/\text{s}$) il trasporto solido è pari a $Q_s + Q_L$; in corrispondenza della CS16 (a linea azzurra, in posizione "indisturbata") il trasporto solido è pari alla capacità di trasporto Q_{EQ} ; infine nella CS20 (a linea blu, alla fine del canale, con $Q_s=0.5 \text{ m}^3/\text{s}$) il trasporto solido tende alla capacità di trasporto.

2.4 Regolarizzazione attraverso la media mobile

Un problema riscontrato nella maggior parte dei casi esaminati è il cosiddetto “dente di sega”: il programma calcola infatti puntualmente le variabili in ciascuna delle sezioni costituenti la geometria del caso in esame, il che comporta la restituzione di una visualizzazione grafica non ottimale. Un esempio è mostrato dal grafico sottostante:

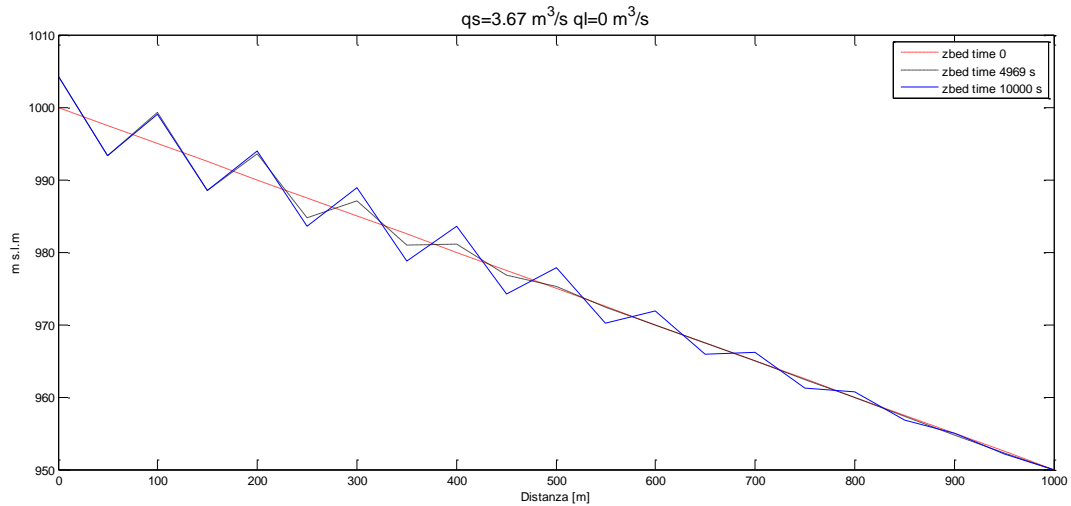


Fig. 2.18 – Profilo con dente di sega ben visibile

Per tentare di risolvere questo problema, i valori del fondo dell'alveo calcolati in ogni sezione sono stati mediati con le medie mobili a tre e a cinque punti in avanti, indietro e centrate.

Per la media a tre punti si è operato nel modo seguente:

- avanti: si sostituisce al valore calcolato in ogni singola sezione la media tra i valori calcolati nella sezione stessa, e nelle due successive;
- indietro: si sostituisce al valore calcolato in ogni singola sezione la media tra i valori calcolati nella sezione stessa, e nelle due precedenti;
- centrata: si sostituisce al valore calcolato in ogni singola sezione la media tra i valori calcolati nella sezione stessa, in quella precedente e in quella successiva.

Analoghe considerazioni valgono per la media a cinque punti.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Nei grafici sottostanti si mette a confronto la visualizzazione ottenuta facendo la media rispettivamente a 3 (**Fig. 2.19**) e a 5 (**Fig.2.20**) punti (la curva di partenza, quella “grezza”, è quella tratteggiata in nero). Il modello utilizzato è il seguente: $Q_w = 100 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_s = 15 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_L = 0 \text{ m}^3/\text{s}$; pendenza = 5%. I valori sono riportati (in quantità ridotta) in **Tab. 2.1** (prossima pagina).

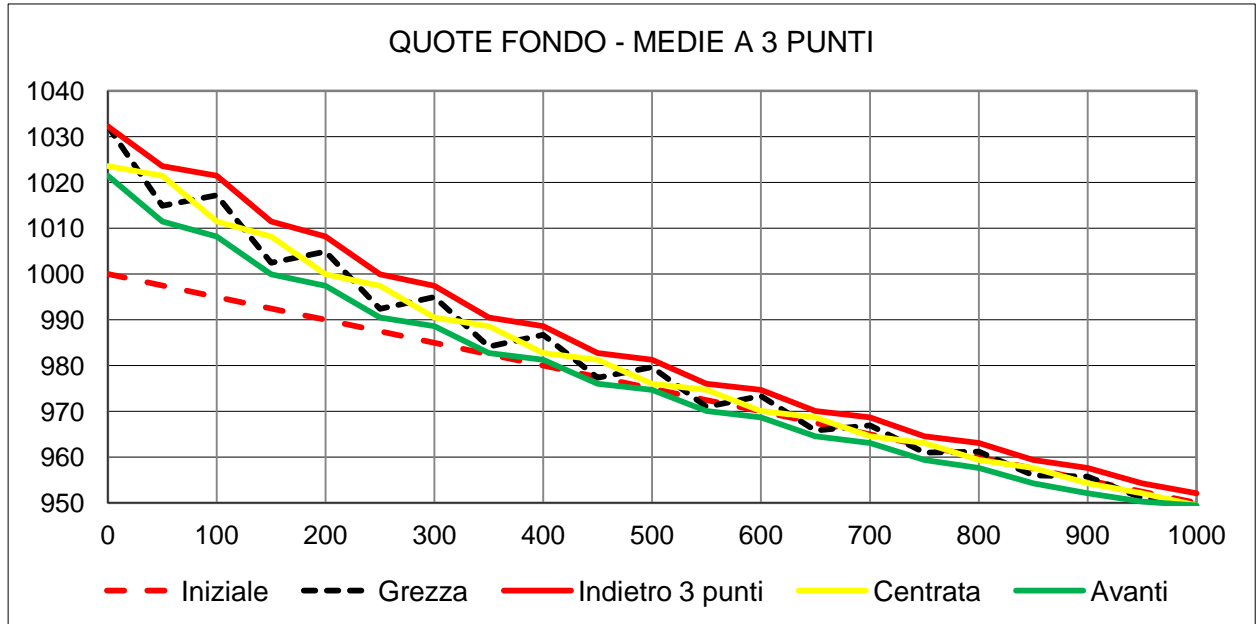


Fig. 2.19 – Profilo d'alveo con diverse medie mobili a 3 punti

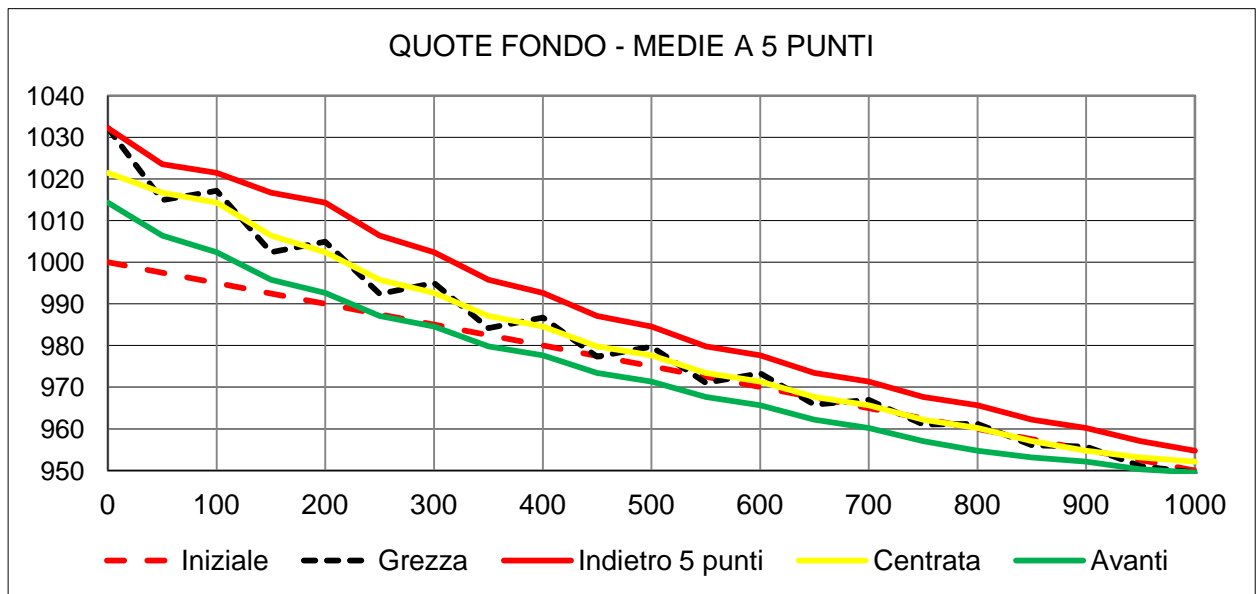


Fig. 2.20 – Profilo d'alveo con diverse medie mobili a 5 punti

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Come prevedibile, la media in avanti sottostima i valori delle quote del fondo, invece la media all'indietro li sovrastima, sia nel caso della media a 3 che a 5 punti (questo perché l'alveo è in deposito; se fosse in erosione la tendenza a sovra- o sotto-stimare sarebbe opposta). Per quantificare tali errori, sono state confrontate le somme di tali scarti, come visibile in **Tab. 2.2**).

Sezioni	Quote del fondo [m]							
	Iniziale	Grezza	Finale 3 punti			Finale 5 punti		
			Centrata	Indietro	Avanti	Centrata	Indietro	Avanti
0	1000	1032.3	1023.6	1032.3	1021.5	1021.5	1032.3	1014.3
50	997.5	1014.9	1021.5	1023.6	1011.5	1016.7	1023.6	1006.4
100	995	1017.2	1011.5	1021.5	1008.2	1014.3	1021.5	1002.4
...
950	952.5	951.1	952.1	954.3	950.3	953.1	957.0	950.3
1000	950	949.5	949.5	952.1	949.5	952.1	954.7	949.5

Tab 2.1 – Valori mediati con le medie mobili a 3 e 5 punti

Sezioni	Scarti media 3 punti						Scarti media 5 punti					
	Differenze con segno			S. Q. M. σ			Differenze con segno			S. Q. M. σ		
	Centrata 3 punti	Indietro 3 punti	Avanti 3 punti	Centrata	Indietro	Avanti	Centrata 5 punti	Indietro 5 punti	Avanti 5 punti	Centrata	Indietro	Avanti
0	8.7	0.0	10.8	75.08	0.00	116.59	10.80	0.00	17.91	116.59	0.00	320.66
50	-6.5	-8.7	3.4	42.66	75.08	11.62	-1.78	-8.66	8.54	3.15	75.08	73.01
100	5.7	-4.3	9.0	32.20	18.20	81.08	2.84	-4.27	14.79	8.08	18.20	218.80
...
950	-1.0	-3.2	0.8	1.07	10.35	0.62	-2.02	-5.95	0.79	4.08	35.38	0.62
1000	0.0	-2.6	0.0	0.00	6.79	0.00	-2.61	-5.21	0.00	6.79	27.18	0.00
	0.16	-3.78	3.65	4.20	4.48	4.61	0.12	-7.0	6.71	3.24	7.81	8.00

Tab 2.2 – Calcolo degli errori e dell'indice di dispersione

Nell'ultima riga è stata calcolata la somma dei quadrati delle differenze esistenti in ogni sezione tra i valori del fondo grezzi e quelli mediati. Tale valore della dispersione è particolarmente importante, pari alla radice varianza, e calcolato come:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x-\bar{x})^2}{n_{sez}}}$$

È ovvio, oltre che immediatamente visibile dalla **Tab 2.2**, che una maggiore perdita di precisione la si ottiene nel caso di media a 5 punti invece che a 3 punti. Infatti, le medie a cinque punti approssimano molto bene l'andamento dell'alveo, smussandone i picchi, ma una

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

sufficiente (e più corretta) approssimazione si ha con la media a tre punti (passiamo infatti da valori di σ intorno a 4.5 a valori intorno a 8 nel caso della media a 5 punti).

La Fig. 2.21 mostra nel dettaglio un esempio di confronto tra le medie a 3 (linea azzurra) e a 5 punti (linea rossa)

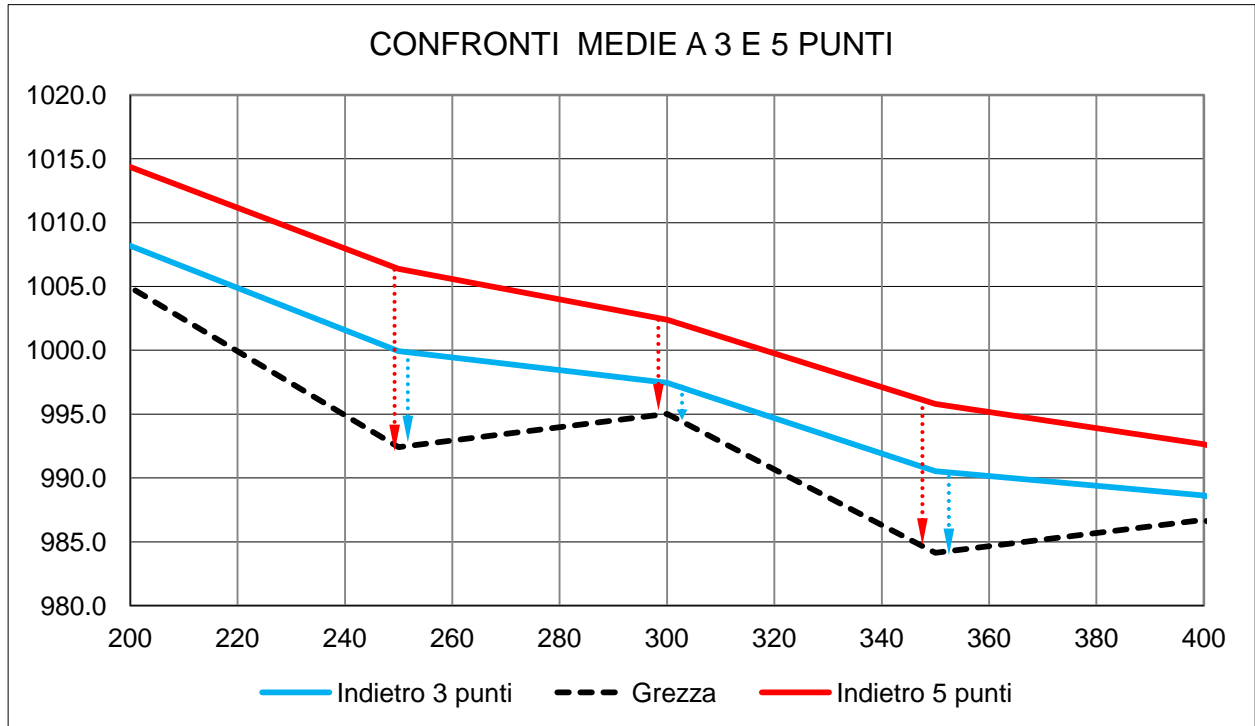


Fig 2.21 – confronto media a 3 e a 5 punti

Ora viene proposto un modello che prevede un'immissione laterale, caratterizzato dai seguenti parametri: $Q_w = 100 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_s = 0 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_L = 15 \text{ m}^3/\text{s}$; pendenza = 5%.

A causa della portata solida laterale, ci si aspetta un forte accumulo nella sezione di immissione, con conseguente notevole aumento della quota del fondo in tale sezione; la media mobile appena introdotta inevitabilmente smusserà tale picco, poiché restituirà un valore che è la media del fondo calcolato in quel punto (32 m) con il fondo calcolato nella sezione immediatamente a valle (15 m) e soprattutto con il fondo calcolato nella sezione di monte (che, non risentendo dell'accumulo, ha un'altezza di 0 m).

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

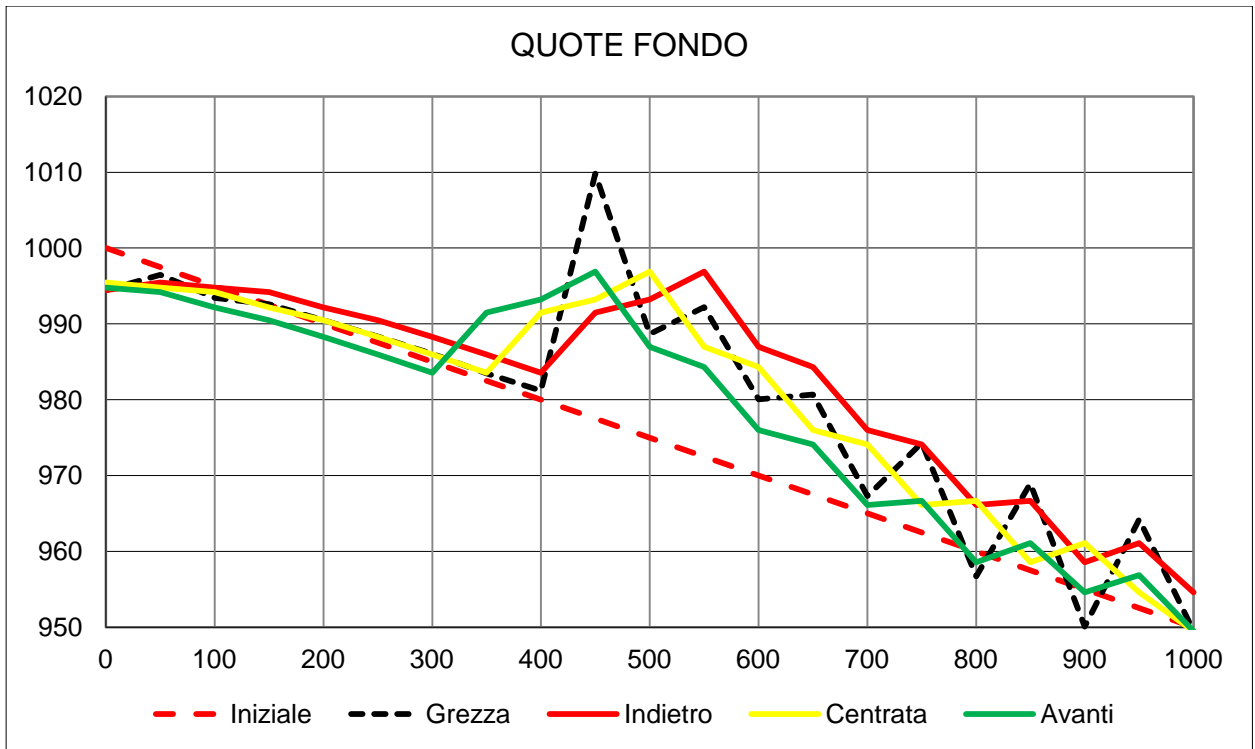


Fig. 2.22 – Profilo d'alveo con diverse medie mobili a 3 punti

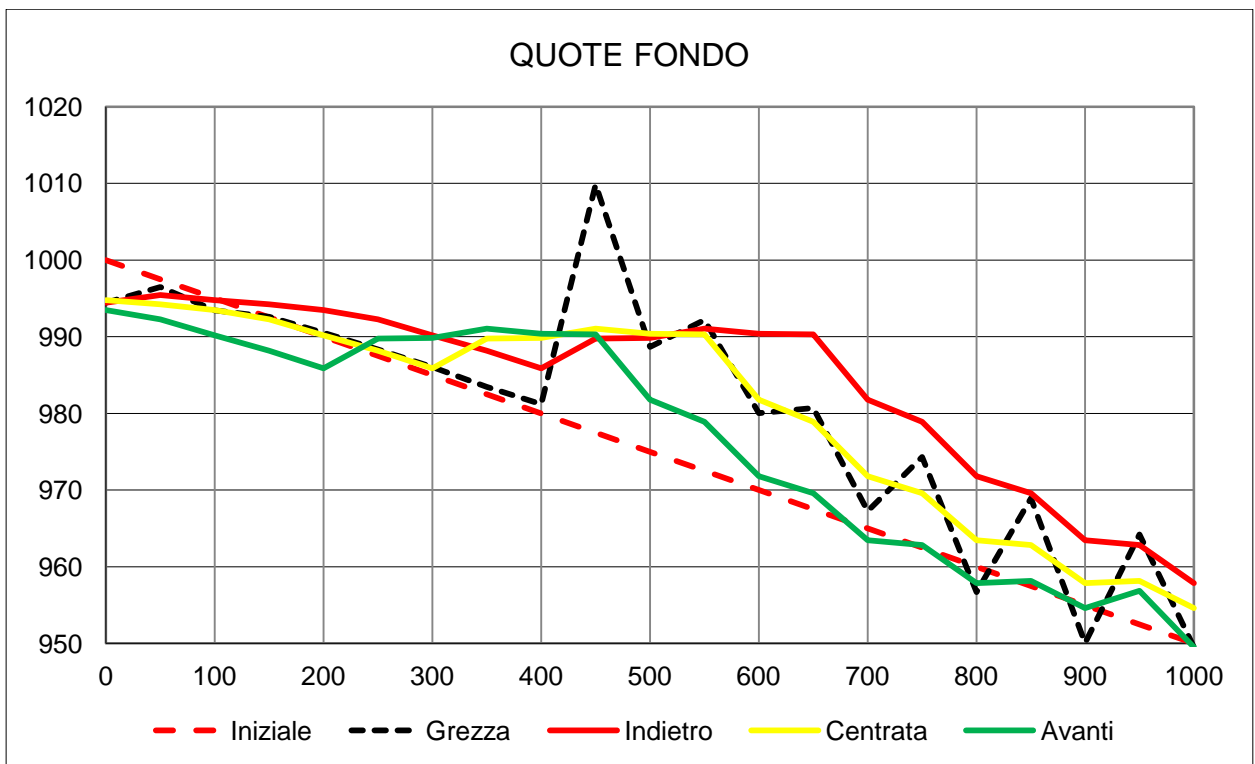


Fig. 2.23 – Profilo d'alveo con diverse medie mobili a 5 punti

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Osservando le **Fig. 2.22** e **Fig. 2.23** si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Come previsto, l'utilizzo della media mobile ha ridotto l'effettiva altezza del picco; la media a 3 punti riduce il picco di 15 m, quella a 5 lo riduce di 20 m;
- La media in avanti è la sola in grado di mantenere la posizione del picco, ma sottostima di molto l'accumulo di sedimenti a valle del picco e lo sovrastima a monte dello stesso;
- La media all'indietro invece sposta a valle la posizione del picco, mentre per quanto riguarda l'andamento del fondo dell'alveo, si comporta in maniera opposta alla media in avanti;
- Infine la media centrata, sebbene sposti la posizione del picco a valle (in maniera minore rispetto alla media all'indietro), approssima in maniera migliore l'andamento del fondo su tutto l'alveo;
- In entrambi gli esempi la media a 3 tre punti smussa a sufficienza l'andamento del fondo dell'alveo, senza ridurre eccessivamente l'altezza del picco.

Anche in questo caso viene calcolata la dispersione dei valori a seguito dell'utilizzo delle due differenti mede mobili:

Sezioni	Scarti media 3 punti						Scarti media 5 punti					
	Differenze con segno			S. Q.M. σ			Differenze con segno			S. Q.M. σ		
	Centrata 3 punti	Indietro 3 punti	Avanti 3 punti	Centrata	Indietro	Avanti	Centrata 5 punti	Indietro 5 punti	Avanti 5 punti	Centrata	Indietro	Avanti
0	1.02	0.00	0.35	1.05	0.00	0.13	0.35	0.00	-0.94	0.13	0.00	0.88
50	-1.69	-1.02	-2.30	2.86	1.05	5.28	-2.23	-1.02	-4.20	4.99	1.05	17.65
100	0.73	1.34	-1.26	0.53	1.78	1.60	0.04	1.34	-3.26	0.00	1.78	10.65
...
950	-9.62	-3.15	-7.36	92.63	9.91	54.16	-6.04	-1.37	-7.36	36.49	1.89	54.16
1000	0.00	5.09	0.00	0.00	25.96	0.00	5.09	8.38	0.00	25.96	70.26	0.00
	-0.22	1.92	-2.05	7.09	5.97	5.90	0.02	3.70	-3.91	5.91	8.19	8.06

Tab 2.3 – Calcolo degli errori e dell'indice di dispersione

La dispersione appena calcolata è sensibilmente maggiore nel caso dei valori mediati a 5 punti rispetto a quelli mediati a 3 punti (si passa da valori di σ superiori ad 8, a valori inferiori a 6), a dimostrazione del fatto che la media a 5 punti è eccessivamente lontana dai valori reali.

Come nel precedente modello, la scelta dello strumento migliore di regolarizzazione è quindi ricaduta sulla media centrata a tre punti, che pertanto d'ora in poi verrà applicata nella visualizzazione di tutte le simulazioni.

3. MODELLAZIONE E ANALISI DI CASI

SINTETICI

La realtà è per sua natura stessa molto complessa; in particolar modo la modellazione di un caso reale come quello del Mallero, che sarà l'oggetto del prossimo **Cap. 4**, presuppone una serie di semplificazioni, per studiare le quali sono stati generati dei casi sintetici che di volta in volta simulano una specifica problematica.

Nel **Par. 1.5** erano state individuate una serie di criticità, il superamento delle quali è stato posto come obiettivo che questa Tesi vuole raggiungere. La strategia di modellazione seguita vuole quindi rispondere agli obiettivi posti ed avvicinarsi alla realtà in maniera maggiormente precisa.

Sono previsti i seguenti casi esemplificativi (meglio spiegati all'inizio del relativo paragrafo) :

- imporre un apporto solido a metà dell'alveo, e non solo all'inizio dello stesso;
- inserire una briglia all'interno dell'alveo in esame;
- imporre sedimenti a granulometria variabile, e non a diametro costante.

Vista la notevole mole di lavoro, i risultati ottenuti saranno poi riassunti nell'ultimo paragrafo di questo capitolo, il **Par 3.4**; mentre solo quelli ritenuti opportuni saranno applicati al caso studio del già citato Mallero.

3.1 Portata solida laterale

Come condizioni al contorno per il tratto di alveo in esame, vengono imposti un idrogramma Q_w (a portata costante) ed il cosiddetto “sassogramma” Q_s per l’afflusso di sedimenti a monte; tale

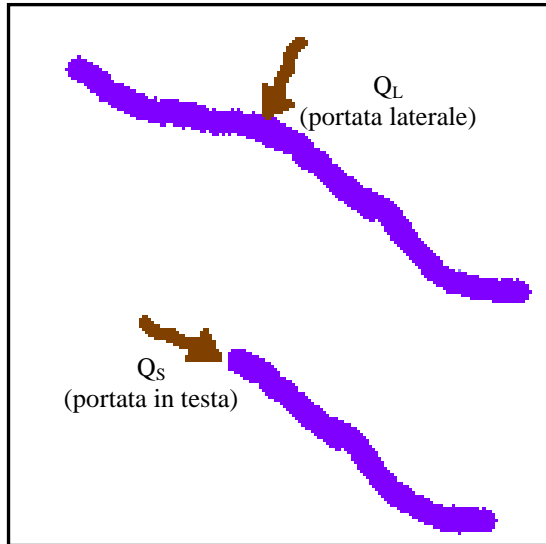


Fig. 3.1 – Significato della portata laterale

condizione approssima la portata solida che viene trasportata dal fiume a monte del tratto in esame, e che viene pertanto imposta alla sezione in testa all’alveo in esame (ovvero alla CS1).

Per modellare l’apporto solido dovuto ad una sorgente laterale (ad esempio una frana), si è impostata una portata laterale Q_L che di fatto è un sassogramma imposto in una sezione intermedia (nel caso da noi studiato la CS10, posta a 450 m dalla sezione d’origine).

Lo strumento della “portata laterale” consente di valutare quale effetto hanno le dinamiche che avvengono a monte sul bacino in esame.

3.1.1 Elenco delle varie combinazioni K_S (Q_S), K_L (Q_L)

Data un’assegnata geometria e delle assegnate condizioni al contorno, la capacità di trasporto dell’alveo è nota, a meno della formula di calcolo scelta (nel nostro caso la MPM, Mayer-Peter e Müller); tale portata è definita come

$$Q_{EQ} = 8(\theta' - \theta_{cr})^{1.5} \sqrt{(s - 1)g} d_m^{1.5}$$

Se la portata solida imposta è superiore a Q_{EQ} , si è in condizioni di alveo sovralimentato; in caso contrario, l’alveo è sottoalimentato. Per poter confrontare in maniera più immediata le varie simulazioni, i sassogrammi (a portata costante, ovvero non variabile nel tempo) imposti come condizioni al contorno possono essere definiti come multipli o sottomultipli della suddetta portata di equilibrio e in particolare:

$$\text{portata solida a monte } Q_S = K_S * Q_{EQ}$$

$$\text{portata solida laterale } Q_L = K_L * Q_{EQ}$$

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

I risultati di seguito ottenuti sono stati svolti con apporto solido a monte, in mezzo, in entrambe le sezioni o in nessuna delle due; secondo la convenzione appena descritta, è stata quindi inserita k-volte una certa portata solida; in particolare:

- $k=1 \rightarrow$ valore del sassogramma coincidente con la portata effettivamente trasportabile;
- $k=0 \rightarrow$ nessuna immissione solida;
- $k<1 \rightarrow$ caso sottoalimentato (cioè sassogramma inferiore alla portata solida trasportabile);
- $k>1 \rightarrow$ caso sovralimentato (cioè sassogramma superiore alla portata solida trasportabile).

Si è posta attenzione a non eccedere nel quantitativo di sedimenti imposti, mantenendosi, per rispettare le ipotesi alla base delle leggi fluido-dinamiche, sempre all'interno del campo limite:

$$\frac{(Q_S + Q_L)}{Q_W} \leq 10\%$$

Lo scenario di riferimento prevede una pendenza S_0 del 5%, la portata Q_W di 200 m³/s, la larghezza dell'alveo pari a 20 m, e diametro dei sedimenti d_m di 20 mm (e quindi Q_{EQ} pari a 4 m³/s). Le varie combinazioni di portata solida a monte Q_S o laterale Q_L sono riportate in **Tab. 3.1**, in cui sono riportati i coefficienti moltiplicativi K_S e K_L , secondo la convenzione appena descritta:

	$K_S (Q_S)$	$K_L (Q_L)$
1	0	0
2	0.5	
3	1	
4	2.5	
5	5	
6	1	0
7		1
8		2
9		3
10		4
11		5

Tab. 3.1 - Combinazioni portate solide

I casi da 1 a 5 sono di alimentazione a monte e variano da erosione a deposito; casi da 6 a 11 hanno l'alimentazione a monte in equilibrio e variano il K_L . In genere l'alveo è sempre sovralimentato ($K_S + K_L > 1$) a parte i casi 3 e 6.

3.1.2 Confronti al variare delle immissioni solide

Al variare della portata solida (Q_S) in testa all'alveo, si hanno i seguenti risultati:

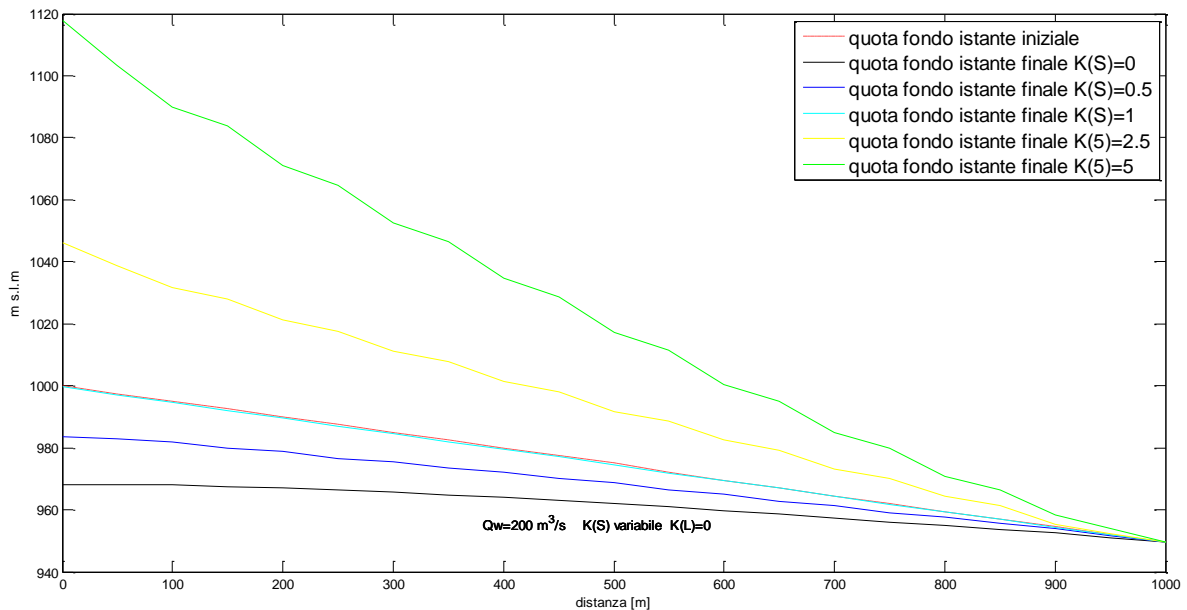


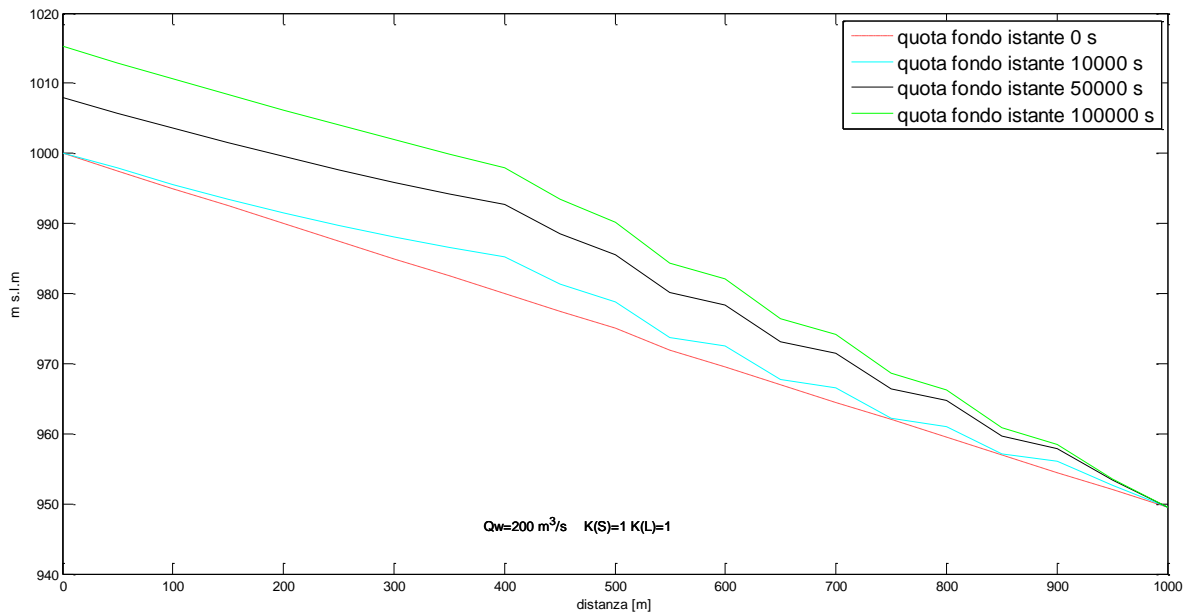
Fig. 3.2 – Profili dell'alveo al variare della portata solida in ingresso

Come è ben facile prevedere, si hanno notevoli differenze, proporzionali all'aumentare di Q_S : per il caso K_S pari a 0, la portata solida è ovviamente minore della portata di equilibrio e quindi l'alveo è in erosione; per K_S pari a 1 (e cioè pari alla portata di equilibrio), non si osserva nessun cambiamento del fondo dell'alveo; per K_S pari a 5 e cioè molto superiore alla portata solida di equilibrio, si ha accumulo; per valori di K_S (0.5 e 2.5) intermedi a quelli appena citati, anche il comportamento è intermedio. Dopo una simulazione di circa 28 ore (100 000 s) si passa da erosioni, per la sezione di monte, di 30 m (nel caso di $K_S = 0$) ad accumuli di 120 m (nel caso di $K_S = 5$). Si tiene a precisare che tali valori, sebbene fortemente inverosimili in condizioni realistiche, sono da attribuirsi a simulazioni in condizioni volutamente esagerate, per accentuare i risultati ottenuti in questi casi di studio.

Vengono ora proposti dei casi in cui si fa aumentare gradualmente la portata laterale Q_L , mantenendo fissa la portata solida in ingresso, posta pari a quella di equilibrio (per evitare fenomeni di erosione nelle sezioni iniziali).

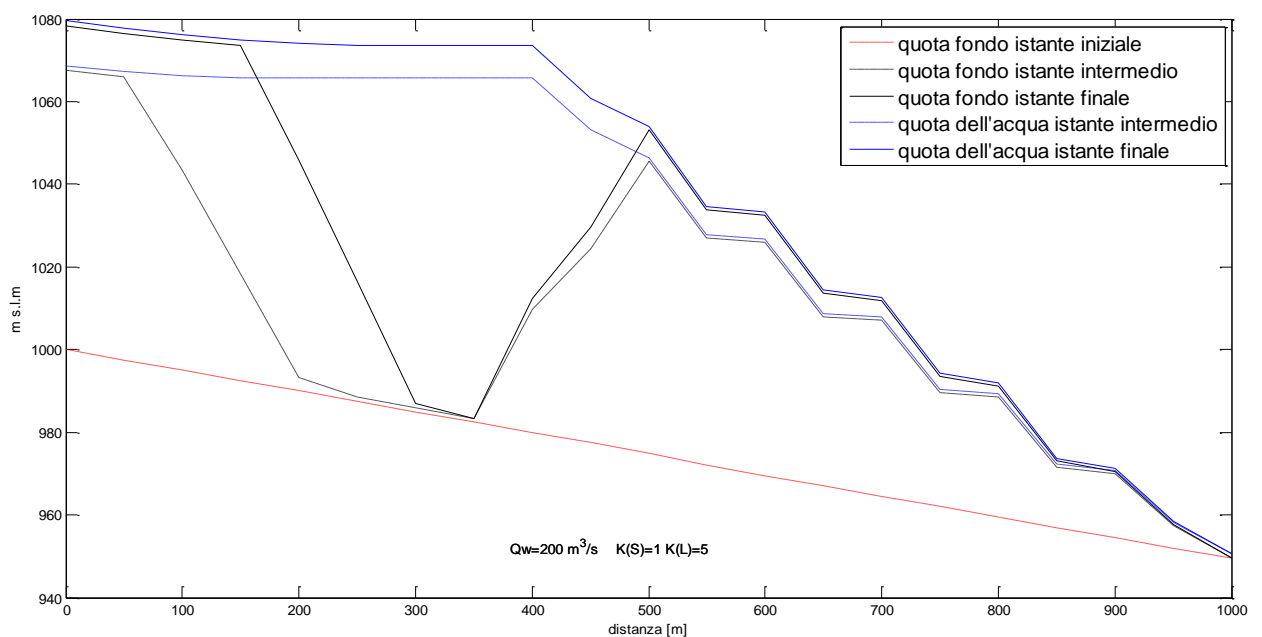
EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Il primo caso è quello in cui la portata laterale è pari a quella di equilibrio ($K_L=1$); per capire meglio il comportamento del fondo dell'alveo si è deciso di rappresentare diversi istanti temporali.



Tale caso, come quelli in cui K_L è pari a 0, 1, 2 e 3 (visibili nella Fig. 3.8 riportata alla fine di questo paragrafo), presenta un accumulo a monte dove si osserva la tendenza a mantenere la pendenza di equilibrio.

L'esempio proposto di seguito, invece, si riferisce ad una portata laterale Q_L pari a 5 volte quella di equilibrio; nel grafico vengono mostrati gli andamenti in alcuni istanti temporali del fondo dell'alveo.



EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Fig. 3.4 – Profili dell'alveo e del pelo libero per forte sovra alimentazione laterale

Si nota un accumulo a monte molto elevato seguito da un tratto in cui non si ha né accumulo, né erosione; in corrispondenza dell'immissione della portata laterale vi è un brusco aumento del fondo dell'alveo.

Per giustificare tale comportamento si sono confrontati i valori delle velocità dell'acqua (**Fig. 3.5**), dello sforzo sul fondo (**Fig. 3.6**) e del numero di Froude (**Fig. 3.7**) e lungo tutto il canale. Si osserva che per le sezioni CS6, CS7, CS8 e CS9 tutti questi valori tendono a zero a causa del notevole rigurgito imposto dallo sbarramento a metà del canale.

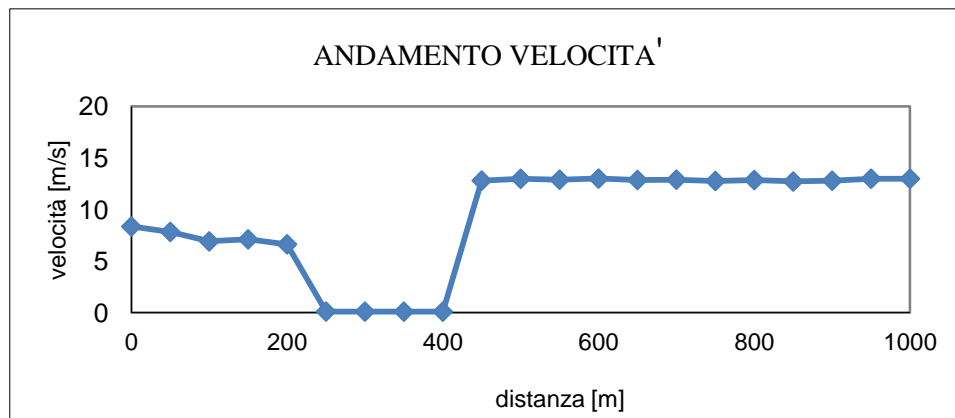


Fig. 3.5 – Andamento della velocità dell'acqua nell'alveo

Lo sforzo che agisce sul fondo dell'alveo è direttamente proporzionale al quadrato della velocità secondo la seguente formula: $\tau = \rho \cdot g \cdot R_H \cdot \frac{n^2 \cdot v^2}{R^{4/3}}$.

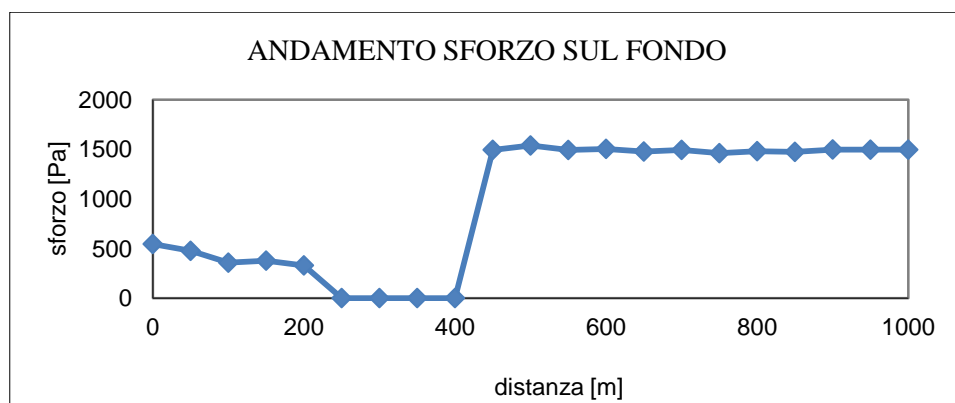


Fig. 3.6 – Andamento della velocità dello sforzo sul fondo del canale

È evidente che nelle sezioni in cui la velocità è zero, anche lo sforzo sul fondo sarà nullo.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Il numero di Froude (Fr) rappresenta il rapporto tra la velocità della corrente e la celerità delle piccole perturbazioni ed è pari a $\frac{V}{\sqrt{g \cdot d}}$. Se la corrente è veloce tale rapporto è maggiore di 1, viceversa se la corrente è lenta.

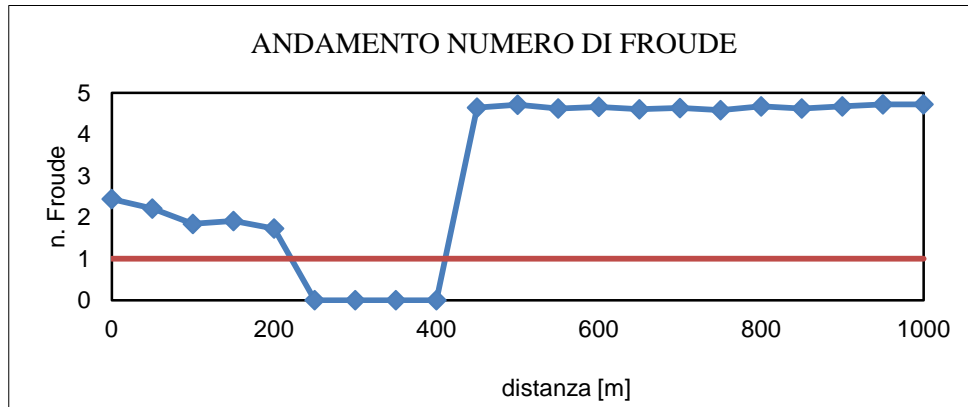


Fig. 3.7 – Andamento del numero di Froude

L'apporto di sedimenti nella sezione CS10 (a 450 m) è così elevato da ostacolare il deflusso dell'acqua che rende la corrente lenta subito a monte di tale immissione; per questo motivo la portata solida in ingresso si deposita nelle sezioni iniziali e non viene trasportata a valle.

Nel grafico seguente si mettono a confronto i casi suddetti con altri casi di portate laterali via via crescenti.

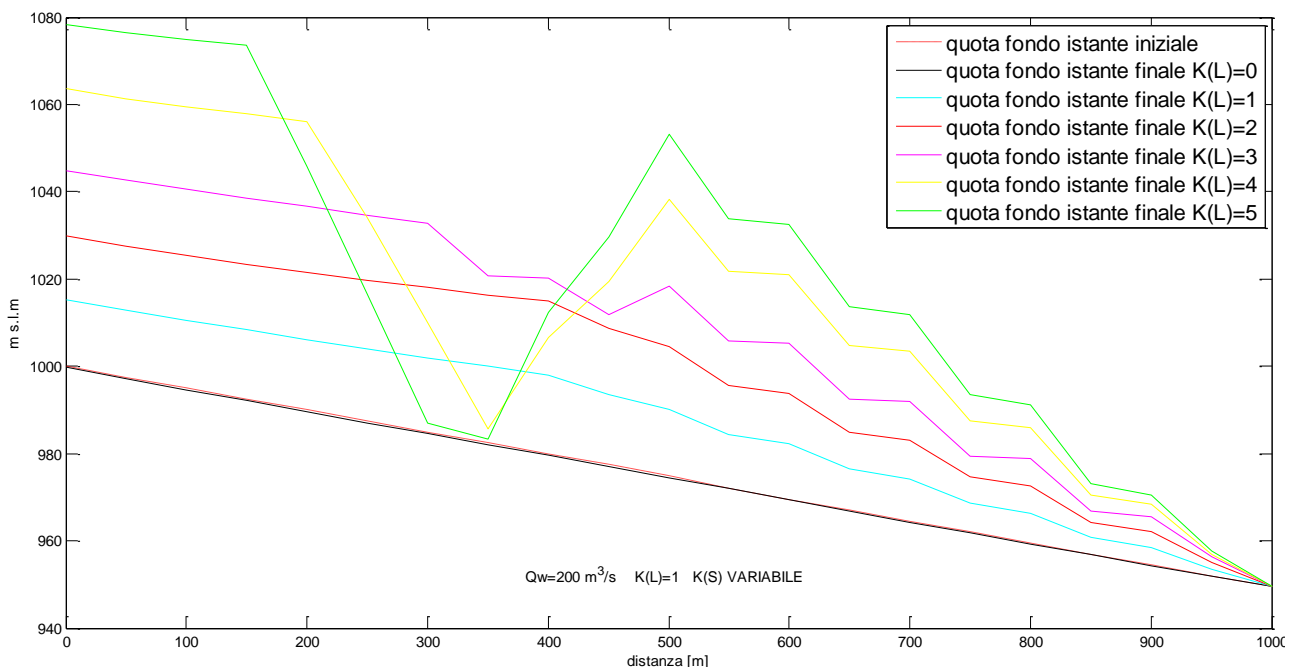


Fig. 3.8 – Profili dell'alveo al variare della portata solida laterale

Si osserva che nel tratto iniziale le pendenze sono simili indipendentemente dalla portata laterale immessa; come precedentemente affermato nei casi con K_s che va da 0 a 3 l'alveo ha la tendenza a mantenere la pendenza di equilibrio; nei casi in cui K_s è pari a 4 e 5 si osserva un rigurgito.

3.1.3 Sovrapposizioni delle portate solide laterali e a monte

Come detto in introduzione a questo paragrafo, ricorrendo ad una immissione solida laterale (nel nostro caso a metà circa dell'alveo in esame, ovvero a 450 m) si possono monitorare gli effetti che tale apporto di sedimenti provoca a monte della sezione stessa; la geometria del fondo - in particolare la pendenza- cambia considerevolmente a monte oltre che a valle del disturbo, propagando tali cambiamenti anche al comportamento del trasporto solido.

Per l'apporto solido a monte si è scelta la seguente simulazione:

$$K_{S1} = 4 , K_{L1} = 0$$

che è stata confrontata con due casi di portata laterale :

$$K_{S2} = 1 , K_{L2} = 4$$

$$K_{S3} = 1 , K_{L3} = 3$$

Per poter aver un confronto diretto, la curva di immissione a monte è stata traslata nella sezione CS10 di immissione dell'apporto solido laterale.

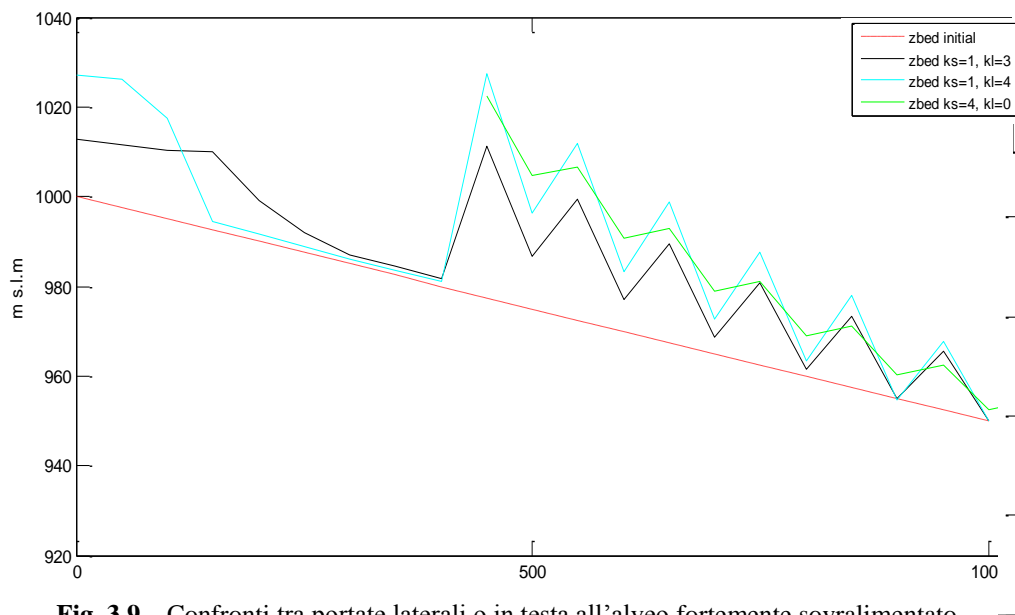


Fig. 3.9 – Confronti tra portate laterali o in testa all'alveo fortemente sovralimentato

Si osserva che la simulazione che meglio approssima la curva di partenza è quella rappresentata in azzurro e cioè quella per cui $K_{S1} = K_{L2}$; a meno delle differenze dovute all'utilizzo della media mobile (vedi **Par. 2.4**), l'andamento del fondo dell'alveo è perfettamente coincidente.

Si vuole ora analizzare il caso in cui l'apporto solido a monte sia pari a $3.67 \text{ m}^3/\text{s}$ e cioè pari alla portata di equilibrio ($K_S = 1 , K_L = 0$). Secondo il ragionamento fatto in precedenza, il caso di portata laterale che meglio lo dovrebbe approssimare è quello per cui K_S è pari a 1 e K_L a 1. Nella **Fig. 3.10** sono messi a confronto i due casi.

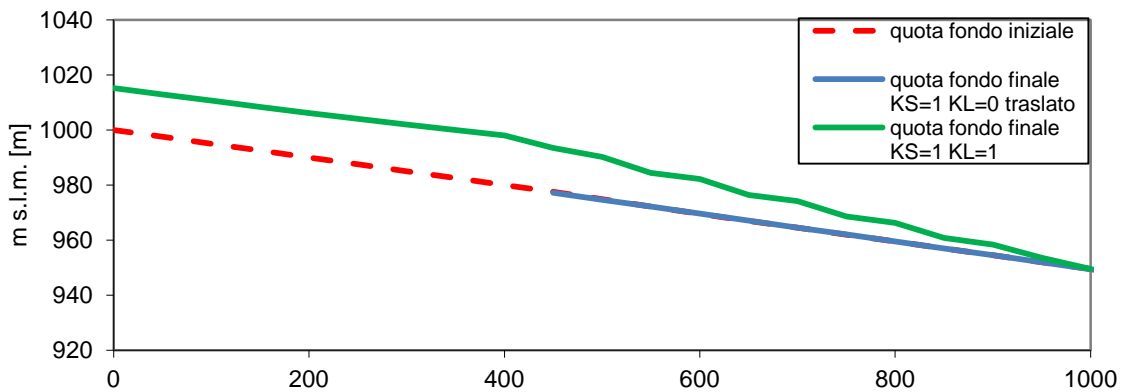


Fig. 3.10 – Confronti tra portate laterali o in testa all'alveo all'equilibrio

Si osserva che le due curve non sono confrontabili poiché l'apporto solido a monte con K_S pari a 1 non produce nessun effetto sull'alveo; questo è giustificabile, in quanto viene introdotta esattamente la portata di equilibrio.

Un altro confronto significativo è:

$$K_{S1} = 2, K_{L1} = 0; K_{S2} = 1, K_{L2} = 1.$$

In questo caso si tiene costante la somma $K_S + K_L$ che si sceglie pari a 2; in **Fig. 3.11** il confronto dei due casi:

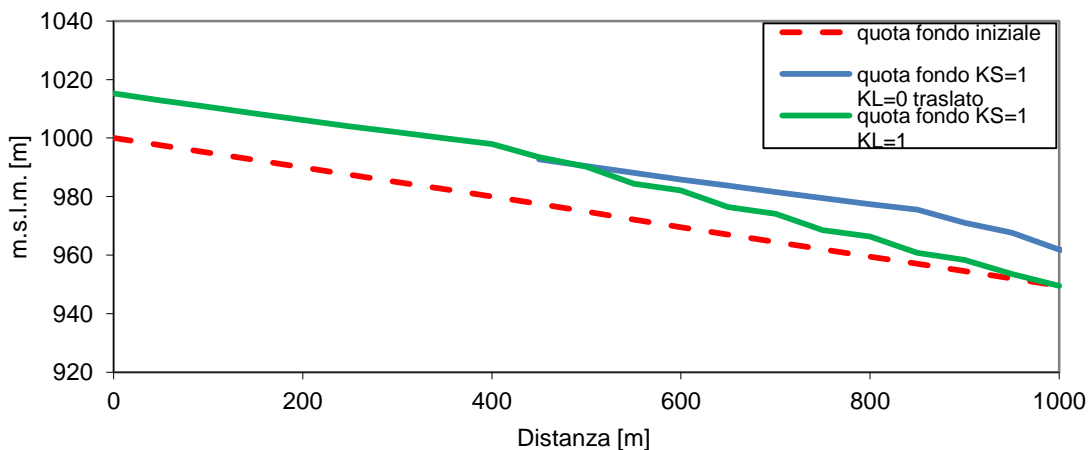


Fig. 3.11 – Confronti tra portate laterali o in testa all'alveo scarsamente sovralimentate

Si osserva che in questo caso i due picchi coincidono anche se gli andamenti lungo l'alveo non sono gli stessi. Una giustificazione si trova nel fatto che il comportamento dell'alveo in seguito all'immissione di una portata solida a monte di valore piccolo è rappresentato bene con un caso di portata laterale che mantenga costante la somma $K_S + K_L$; un K_L pari a 4, invece, è sufficientemente grande da disconnettere monte da valle (dal punto di vista dell'immissione di portata solida) e perciò il caso di portata a monte è ben rappresentato con una portata laterale che abbia lo stesso valore di K .

3.2 Inserimento di una briglia

Apporti di sedimenti caratterizzati da valori diversi da quelli della portata solida d'equilibrio sono da considerarsi un disturbo per l'alveo; nello specifico:

- sassogrammi con eccessi di sedimenti possono portare a problematiche di accumulo;
- sassogrammi in difetto di sedimenti possono presentare problematiche di erosione.

Per evitare l'eccessiva propagazione di tali effetti, la continuità dell'alveo può essere interrotta per mezzo di manufatti artificiali quali le briglie, di cui viene mostrato un esempio in **Fig. 3.12**:



Fig. 3.12 – Briglia in un torrente alpino

Per modellare la presenza di una briglia, non prevista dal programma in uso, si è ricorso allo stratagemma di creare delle sezioni a fondo non erodibile, e scegliere come primo tentativo una differenza di quota di 0.5 m (alla sezione 11, ovvero a 500 m). L'alveo di partenza è lo stesso già descritto in precedenza con le seguenti caratteristiche: lunghezza di 1 Km, larghezza B delle sezioni di 20 m, portata liquida in ingresso Q_w pari a $200 \text{ m}^3/\text{s}$, diametro dei sedimenti d_{50} di 20 mm e pendenza del 0.5 %.

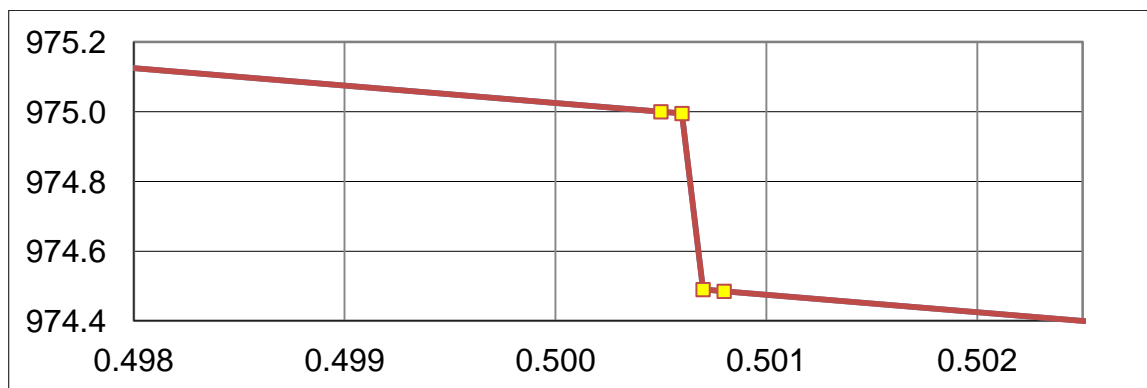


Fig. 3.13 – Sezioni della briglia

3.2.1 Modellizzazione briglia

Per valutare la bontà dell'approssimazione della briglia modellata, si sono messi a confronto alvei in presenza od in assenza di briglia (ovvero, data la stessa geometria -in particolare delle quote del fondo- si è attribuito un fondo non erodibile al caso con briglia ed un fondo erodibile al caso in assenza di briglia); nelle simulazioni di questo paragrafo, la portata Q_w è di $200 \text{ m}^3/\text{s}$, quindi la Q_{EQ} è di $3.6 \text{ m}^3/\text{s}$ mentre la portata solida immessa varia di volta in volta; l'effetto atteso in assenza di briglia è quello di avere un elevato valore di deposito lungo tutto l'alveo, fino alla sezione in cui si raggiunge la portata solida d'equilibrio ($3.6 \text{ m}^3/\text{s}$); in presenza di briglia invece si ha tutto il deposito del volume di sedimenti in eccesso a monte della briglia, mentre a valle si ha addirittura erosione del fondo dell'alveo.

Il primo caso proposto è quello con portata solida in ingresso pari a 0 (alveo sottoalimentato)

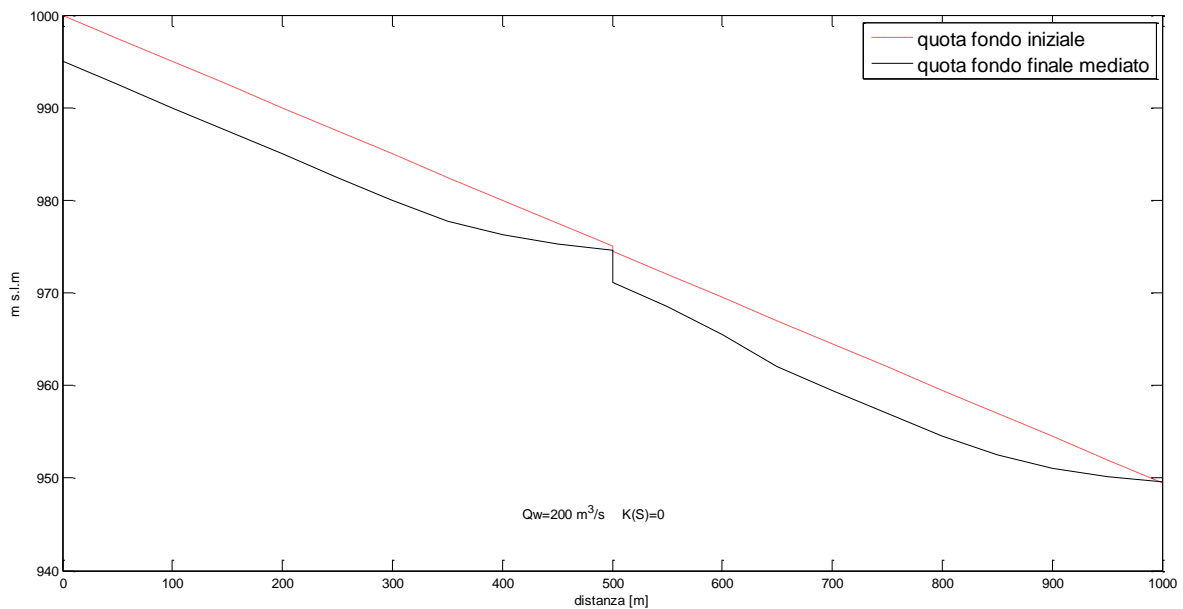


Fig. 3.14– Briglia in caso di sottoalimentazione

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Questo secondo grafico si riferisce invece al caso di briglia in canale fortemente sovralimentato (Q_S di $18 \text{ m}^3/\text{s}$, coincidente con una K_S pari 18):

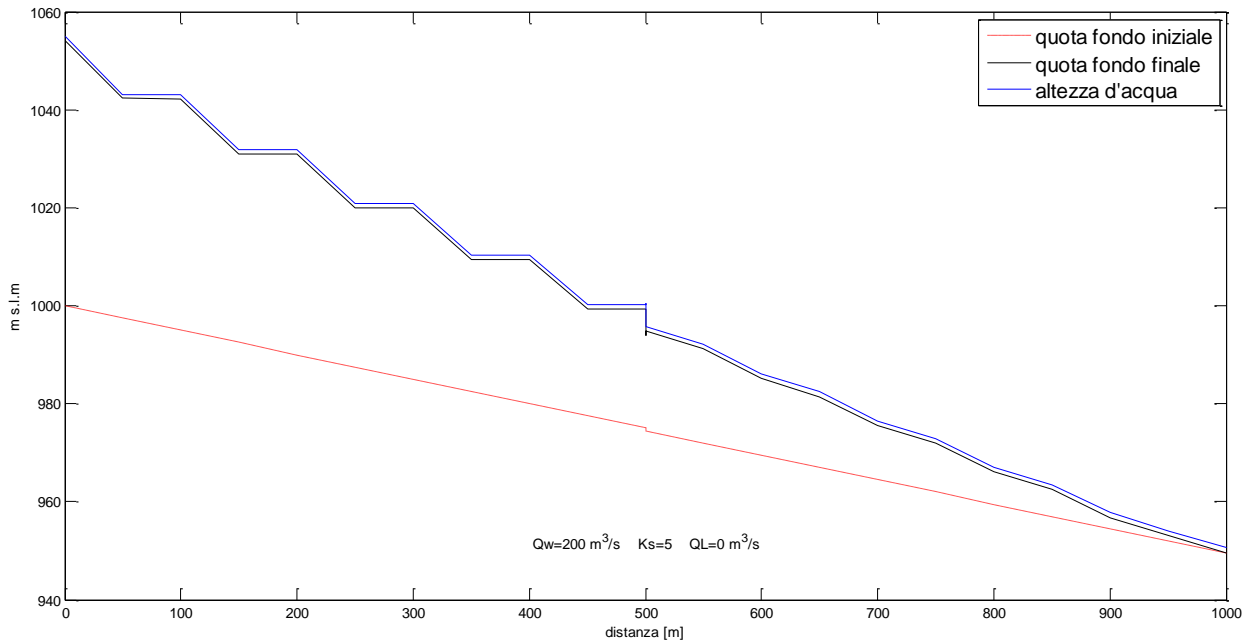


Fig. 3.15 – Briglia in caso di forte sovralimentazione

In entrambi i grafici si notano delle incongruenze: nel caso in erosione di **Fig. 3.14** si evidenzia un gradino di 3 m a valle della briglia, mentre nel caso in deposito di **Fig. 3.15** ci si aspetterebbe la sommersione della briglia, che invece non si apprezza.

A parziale giustificazione di tali comportamenti, si ricorda che le sezioni della briglia sono state definite come inerodibili. Mauri e Spagnolatti (2010) svolsero un confronto tra il Basement ed un altro modello numerico -il Rhyme- su come questi due codici numerici considerino le sezioni inerodibili (vedi **Par. 1.4**). Il Rhyme tratta tali sezioni come sezioni in cui non è possibile avere né deposito né erosione. Il modello Basement, invece, considera le sezioni inerodibili come geometrie in cui non è possibile avere erosione ma è possibile avere deposito. Quest' ultima soluzione è più realistica, ma può portare ad avere instabilità numeriche della soluzione. La discriminante che fa scegliere un modello piuttosto che l'altro sta nel compromesso tra stabilità della soluzione e corretta considerazione del comportamento fisico.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

3.2.1.1 Briglia allungata

Un ulteriore tentativo di risoluzione delle instabilità visibili alle **Fig. 3.14** e **Fig. 3.15** è stato fatto allontanando le sezioni della briglia; in tale modo si ottiene la cosiddetta briglia allungata:

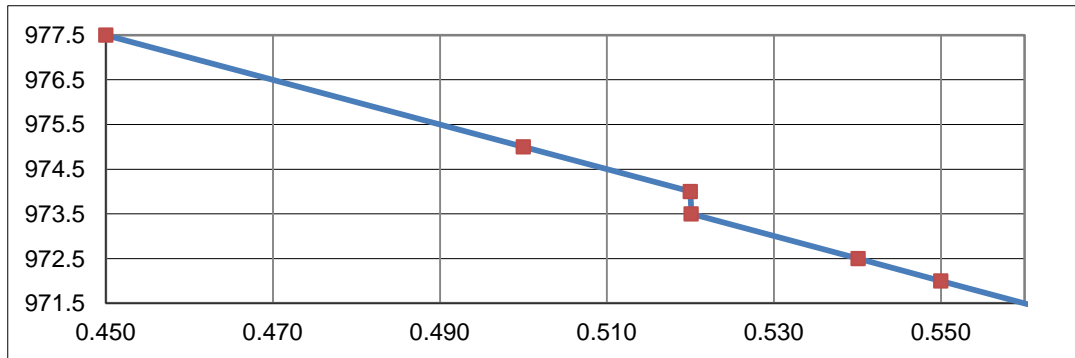


Fig. 3.16 – Sezioni della briglia allungata

Per tale briglia, si è eseguita una simulazione di alveo sovralimentato (K_S pari a 4), ma il profilo risultante è stato riportato non mediato, e quindi con i valori grezzi direttamente calcolati dal modello.

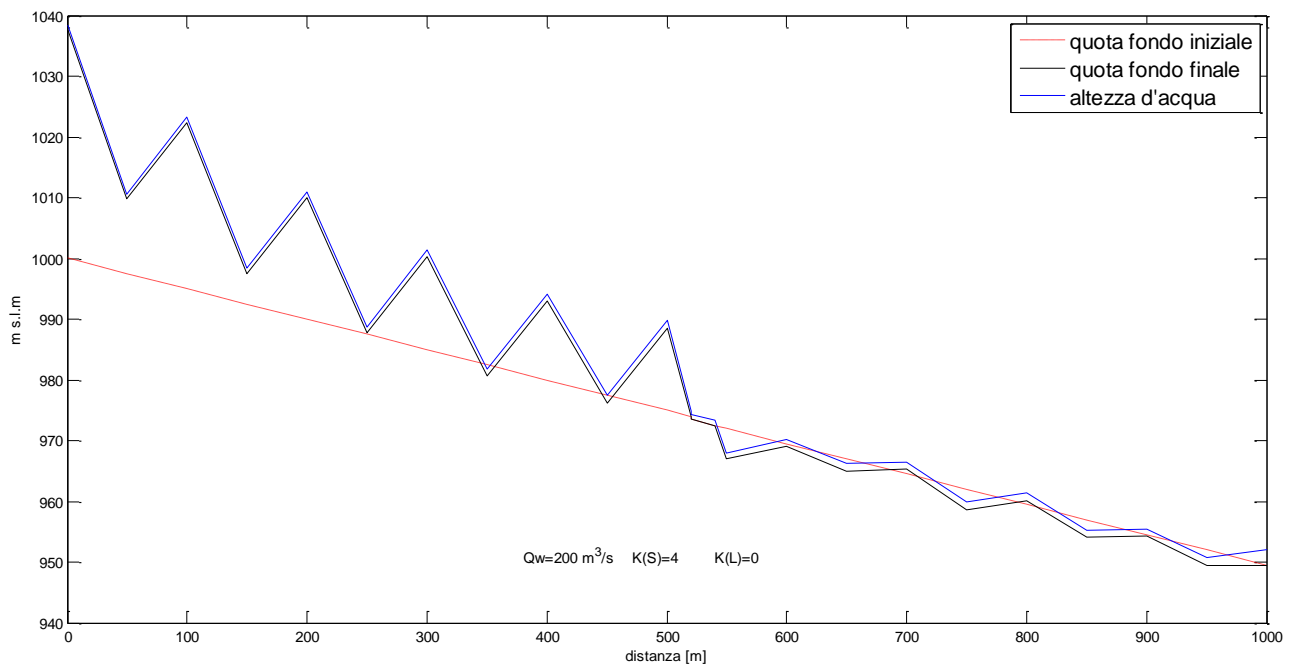


Fig. 3.17 – profilo non mediato con briglia allungata

Si vede bene che nei dati grezzi, (dove non c'è la media mobile), il fondo delle sezioni di briglia viene mantenuto costante nel tempo, in quanto non erodibile; si ha esclusivamente l'erosione al piede della briglia, ovvero a valle delle sezioni non erodibili, dove in effetti è corretto aspettarsi erosione. A monte, invece, si ha accumulo sebbene non venga sommersa la briglia.

Ora invece il profilo viene presentato mediante la solita media mobile centrata a 3 punti.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

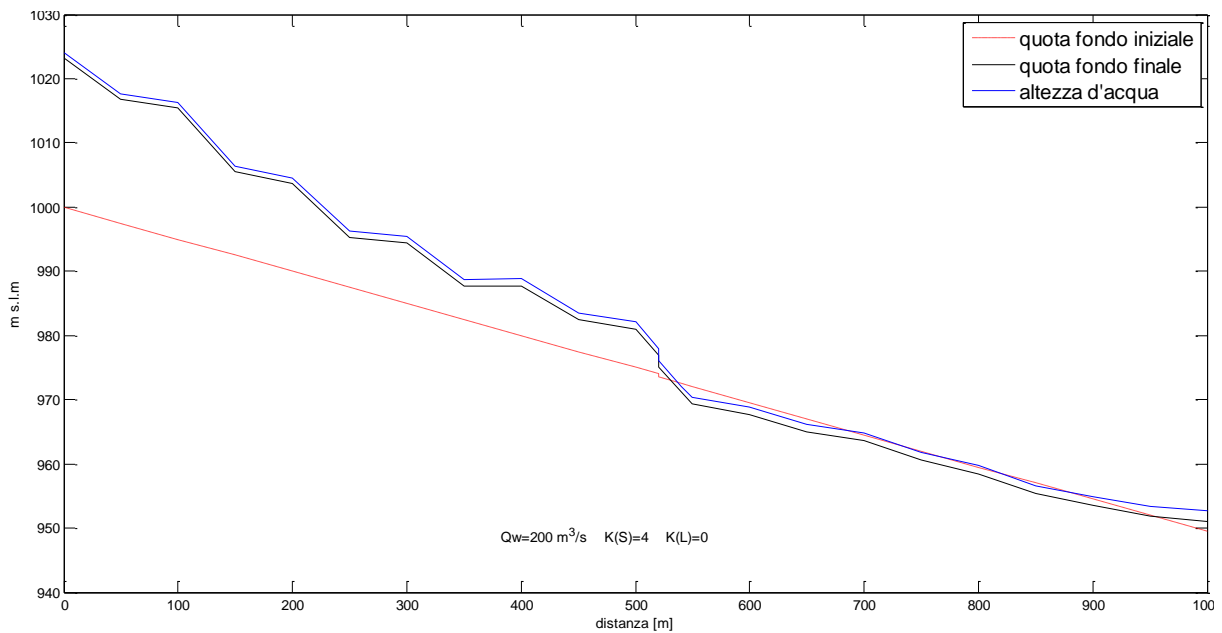


Fig. 3.18– profilo mediato con briglia allungata

Si nota che il tratto rosso (fondo d'alveo a 0 s) della sezione immediatamente a valle della briglia (i 20 m inerodibili) sono attraversati dalla linea nera (fondo dell'alveo a 10 000 s). Questo perché in tale posizione, il fondo d'alveo viene calcolato mediando con il valore di monte e di valle, e quindi inevitabilmente viene variato. Quindi si può ipotizzare che tale media in qualche modo disturbi il comportamento della briglia.

Un'ulteriore simulazione è stata eseguita nel caso di alveo sovralimentato in maniera meno ingente ($K_S=3$), e confrontando i valori grezzi con i valori mediati.

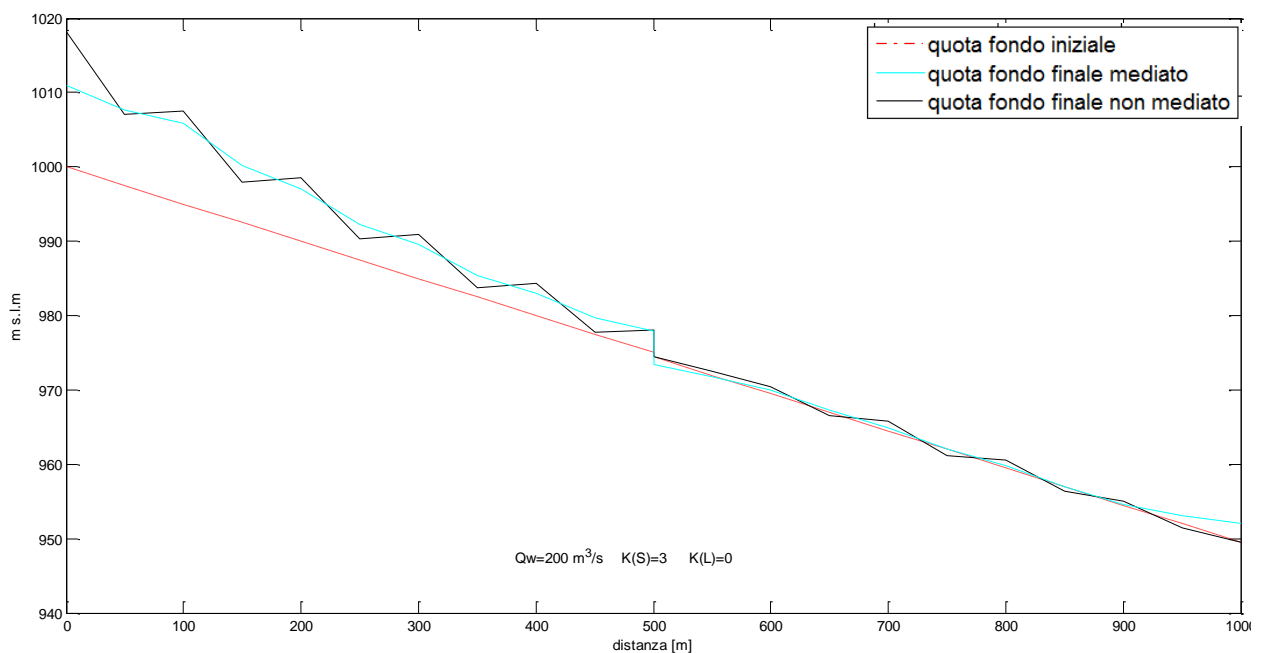


Fig. 3.19 – Confronto tra valori mediati e non mediati

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Dal confronto appena proposto, si ha la conferma dell'ipotesi che la media dei valori restituiti dal codice di calcolo genera degli errori incompatibili con la realtà, come ben visibile dallo zoom del suddetto grafico nella zona di nostro interesse:

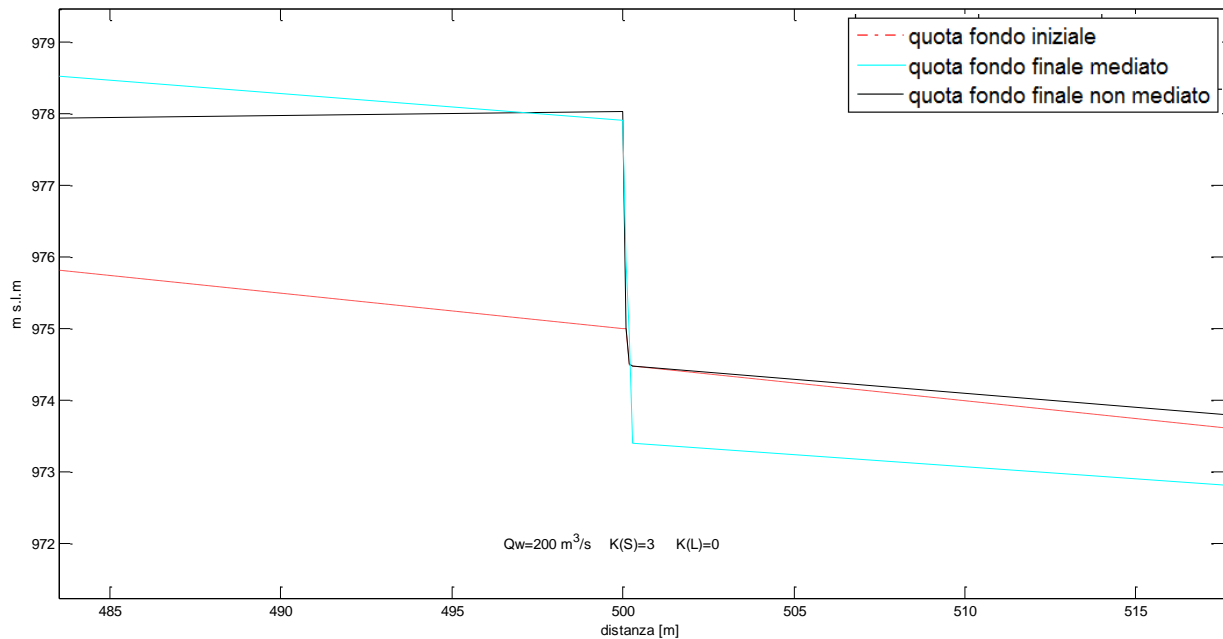


Fig. 3.20 – Zoom del confronto tra valori mediati e non mediati

3.2.1.2 Media mobile frazionata

Visti i commenti fin qui fatti, la soluzione individuata è quella di “frazionare” la media che viene eseguita sui risultati calcolati dal programma, ovvero per i successivi casi della briglia verrà applicata una media mobile solo su alcune porzioni dell’alveo; in particolare assegneremo la media mobile a tre punti centrata al tratto a monte della briglia e a valle della briglia (alla sezioni CS1→CS11 e CS12→CS21), mentre assegneremo i valori calcolati “grezzi” (così come vengono restituiti dal codice di calcolo Basement) alle CS11, CS11A, CS11B, CS11C, ovvero quelle inerodibili, che simulano la presenza della briglia. Per raffinare la visualizzazione, la soluzione di interrompere la media in corrispondenza della briglia dovrebbe essere limitata ai casi in cui la briglia stessa non è interrata, e quindi dovrebbe essere implementato un controllo automatico che, in funzione del livello di riempimento della briglia, sia in grado di assegnare alle sezioni corrispondenti i valori grezzi o i valori mediati. Tale onere computazionale aggiuntivo non è stato però giustificato dagli effettivi miglioramenti e pertanto non verrà preso in considerazione.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Questi sono i nuovi risultati, con media solo sulle porzioni d'alveo che non sono la briglia. Il primo caso proposto è quello di alveo sovralimentato ($K_S=3$), da confrontare con la **Fig. 3.19**, in cui era stata eseguita la solita media mobile su tutto il canale indistintamente.

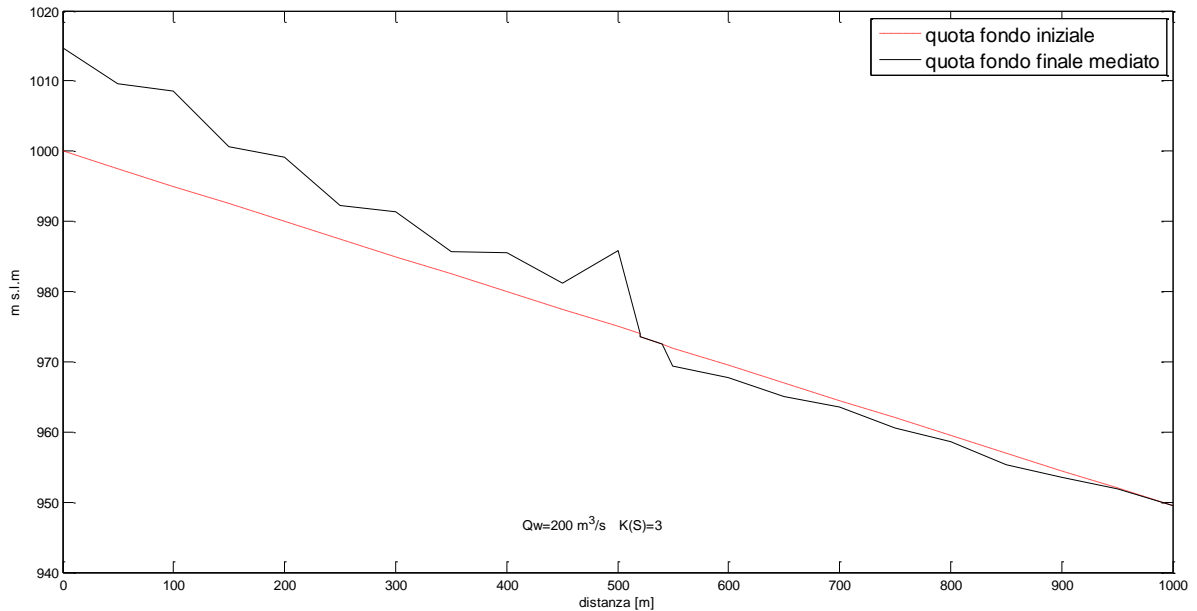


Fig. 3.21 – Media frazionata in alveo fortemente sovralimentato

Ora invece l'alveo è sovralimentato più esiguamente ($K_S=2$); il comportamento come prevedibile è del tutto analogo, fatta eccezione per i valori assoluti di deposito ed erosione raggiunti.

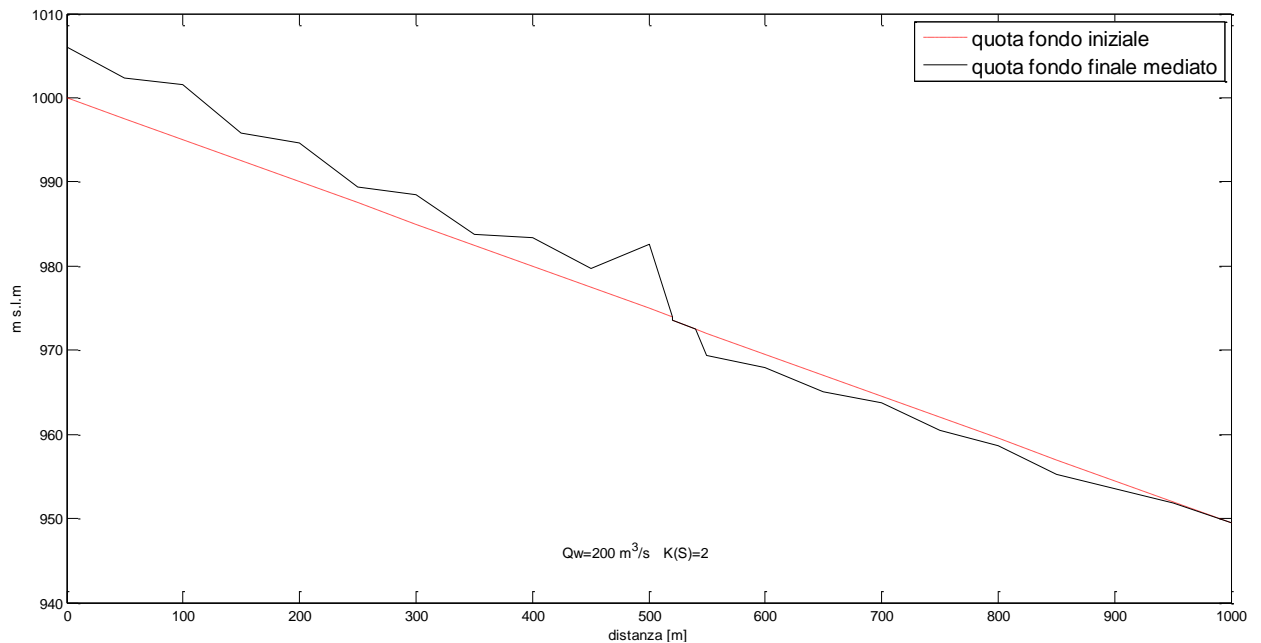


Fig. 3.22 – Media frazionata in alveo scarsamente sovralimentato

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Un' ulteriore verifica dell'esattezza dello stratagemma adottato si ha nel caso di alveo in erosione ($K_S=0$), qui mediato con la media mobile frazionata appena introdotta.

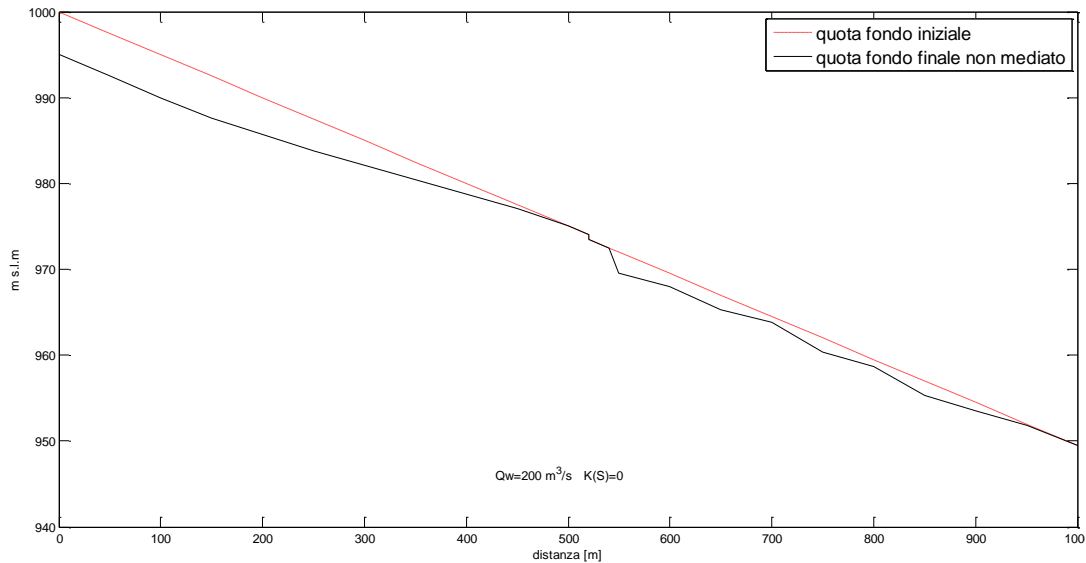


Fig. 3.23– Media frazionata in alveo sottoalimentato

Tuttavia la modalità di accumulo del materiale a monte della briglia delle **Fig. 3.21** e **Fig. 3.22**, relative agli alvei in accumulo di sedimenti, non sono del tutto convincenti: presentano infatti un eccessivo picco di accumulo a monte della briglia; questo avviene perché nella sezione in questione l'accumulo di sedimenti viene mediato con dei valori a monte più elevati il che genera un accumulo fittizio.

Per verificare la correttezza dei risultati fin qui proposti, si è eseguito il controllo del bilancio di volumi in gioco nelle diverse simulazioni.

3.2.1.3 Bilancio di massa

Il bilancio di massa proposto di seguito vuole semplicemente verificare che la quantità di sedimenti immessa a monte del sistema sia conservata, ovvero sia pari alla somma dei sedimenti depositati lungo l'alveo (al negativo, se erosi dal fondo in un caso sottoalimentato) e dei sedimenti uscenti dal sistema:

$Q_w =$	$[\text{m}^3/\text{s}]$	200
$K_S =$	$[-]$	1.25
$Q_s =$	$[\text{m}^3/\text{s}]$	4.5
Larghezza canale =	$[\text{m}]$	20
Distanza sezioni =	$[\text{m}]$	50
Pendenza =	$[-]$	0.05
Istante finale =	$[\text{s}]$	100000

Tab. 3.2 – Parametri del sistema

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Nelle due seguenti tabelle, vengono calcolati i volumi di solidi che vengono depositati lungo l'alveo (**Tab. 3.3**) e che vengono espulsi dal sistema (**Tab. 3.4**).

	Quote del fondo [m]		Dimensioni [m]			[m ³]
	Iniziale	Finale	Altezza	Lunghezza	Larghezza	
CS1	1000.0	1007.01	7.0	25	20	3503.95
CS2	997.5	1003.30	5.8	50	20	5804.2
...
CS11	975.0	978.01	3.0	26	20	1565.85
CS11A	975.0	977.66	2.7	1.05	20	55.85853
CS11B	972.0	977.62	5.6	1.05	20	118.1099
CS11C	972.0	977.21	5.2	28.95	20	3014.152
CS11D	972.0	974.19	2.2	47.95	20	2103.643
CS13	969.5	971.95	2.4	45	20	2202.003
...
CS21	949.5	949.50	0.0	25	20	0
				1000	Somme	60540

Tab. 3.3 – Volumi depositati (positivi) o erosi (negativi) nell'alveo

Durata istante	Sediment flux	Volume transitante
[s]	[m ³ /s]	[m ³]
1000	3.66	3658.0787
1000	3.63	3632.6188
...
1000	4.20	4200.439
1000	4.11	4105.2636
	Somme	389510

Tab. 3.4 – Volumi uscenti dall'ultima sezione

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Infine si confrontano i volumi appena calcolati con quelli immessi (pari semplicemente al prodotto della portata solida per la durata di tale simulazione) e se ne fa un bilancio, verificando che questo sia il più possibile vicino allo 0.

Volumi in ingresso=	[m ³]	450000	Integrale del sassogramma iniziale
Volumi sull'alveo=	[m ³]	60540	Integrale dei volumi (positivi o negativi) sull'alveo
Volumi in uscita=	[m ³]	389510	Integrale del sediment flux nella sezione finale
Bilancio=	[m ³]	-50	
Errore % :		0.011	

Tab. 3.5 – Confronto tra tutti i volumi in gioco

A seguito di tale analisi, si può confermare la veridicità e la correttezza dei valori, in quanto l'errore finale risulta essere del tutto trascurabile ai fini di una valutazione ingegneristica (0.1 per mille). Una analoga verifica è stata fatta nel caso di altre simulazioni (che differiscono da quella riportata sia per geometria della briglia, che per condizioni al contorno), ma le tabelle relative vengono omesse per un'economia di lettura, dal momento che i risultati finali ottenuti sono del tutto identici (errori finali dell'ordine dei permille).

3.2.1.4 Validazione dei risultati della briglia

Vista l'abbondanza delle elaborazioni proposte sin qui per ottenere dei risultati sempre più soddisfacenti e realistici, si vuole spendere qualche parola per tirare le fila dell'evoluzione modellistica.

Il codice utilizzato non permette l'inserimento automatico di tale costruzione, pertanto il primo step è stato quello di manipolare alcune sezioni, per riprodurre le due caratteristiche principali di una briglia: il dislivello tra monte e valle, e l'inerodibilità.



Fig. 3.24 – Parametri caratteristici di una briglia: dislivello ed inerodibilità

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

È stato controllato il buon comportamento della briglia eseguendo un bilancio di massa che è stato abbondantemente verificato; i problemi maggiori sono invece legati alla media mobile che altera il risultato in corrispondenza della briglia stessa; pertanto è stato introdotto un nuovo modo di applicare tale regolarizzazione; tale modifica prevede l'assegnazione della media mobile alle sezioni dell'alveo, e la sua interruzione sulle sezioni che sono state introdotte per modellare la briglia. In questo modo si riesce a ricostruire l'andamento preciso in tale porzione dell'alveo che altrimenti, a causa della media, sarebbe andato perso; in conseguenza di tale modifica, le irregolarità residue sono limitate e del tutto ininfluenti dal punto di vista dell'andamento generale dell'alveo. Qualche incertezza rimane piuttosto riguardo la modellazione dell'alveo a valle della briglia: infatti, nelle precedenti simulazioni, per riprodurre il dislivello di 3 m che simulava l'altezza della briglia, tutte le sezioni a valle di essa erano state traslate verticalmente di -3 m. Un importante sviluppo si avrà ricreando tale struttura mantenendo al contempo inalterate le altre sezioni dell'alveo. Il prossimo paragrafo ci si porrà quindi tale obiettivo.

3.2.2 Risultati con briglia n° 2

Viene ora introdotta una nuova forma di briglia, denominata briglia n°2; è stata pensata come uno scavo con successivo rinforzo in un canale reale (nelle simulazioni fatte finora, la briglia era modellata come una successione di sezioni inerodibili su un canale che di fatto presentava già un gradino, e che veniva semplicemente reso inerodibile). Ora invece il fondo dell'alveo in assenza di briglia è un' unica retta inclinata (senza gradino centrale), a differenza del caso in presenza di briglia in cui solo alcune sezioni cambiano, mentre la quota di tutte le altre rimane invariata.

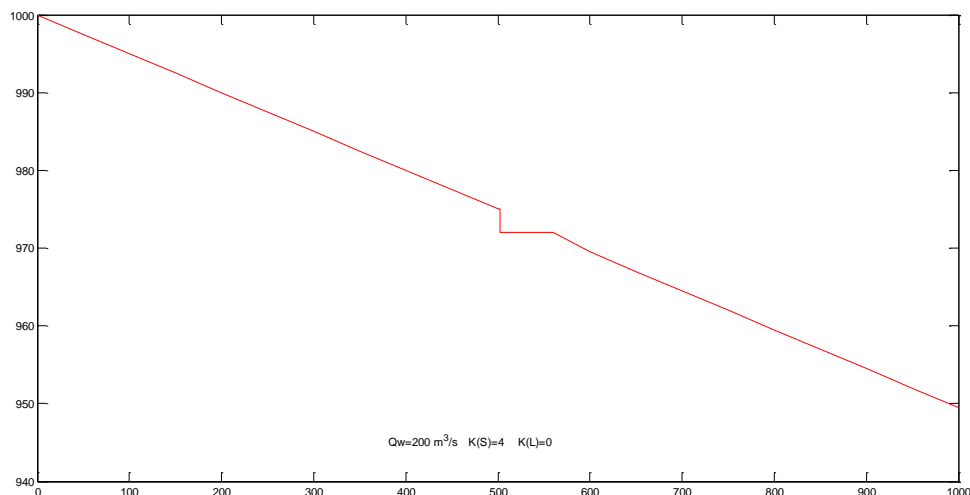


Fig. 3.25 – Localizzazione della briglia reale nell'alveo

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

La geometria della briglia quindi è costituita da 2 m inerodibili orizzontali, seguiti da 3 m inerodibili verticali, seguiti a loro volta 2 m inerodibili orizzontali; infine vi è un lungo tratto orizzontale erodibile di 56 m, necessario a tornare al livello dell'alveo originale.

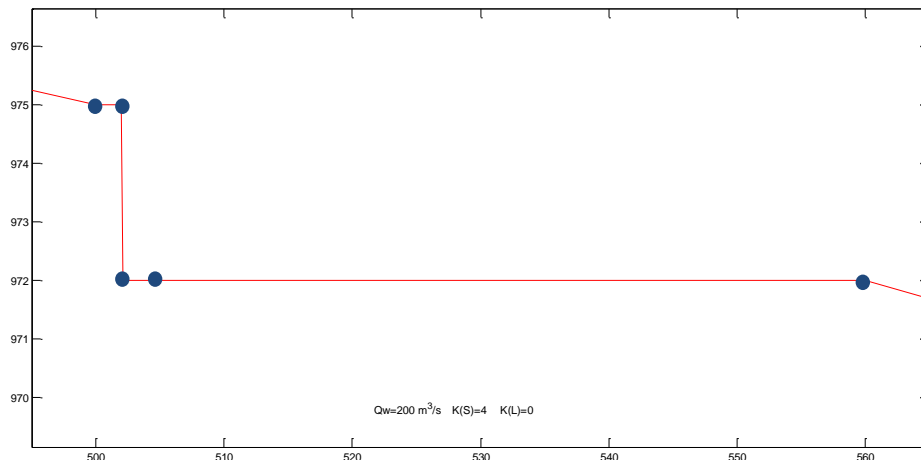


Fig. 3.26– Sezioni della briglia reale nell'alveo

3.2.2.1 Profili a differenti gradi di sovralimentazione

Per il caso sovralimentato ($K_S=3$), dopo una simulazione di 100 000 s, si ottiene il seguente risultato, di seguito visualizzato con la media mobile frazionata già descritta al **Par. 3.2.1.2**.

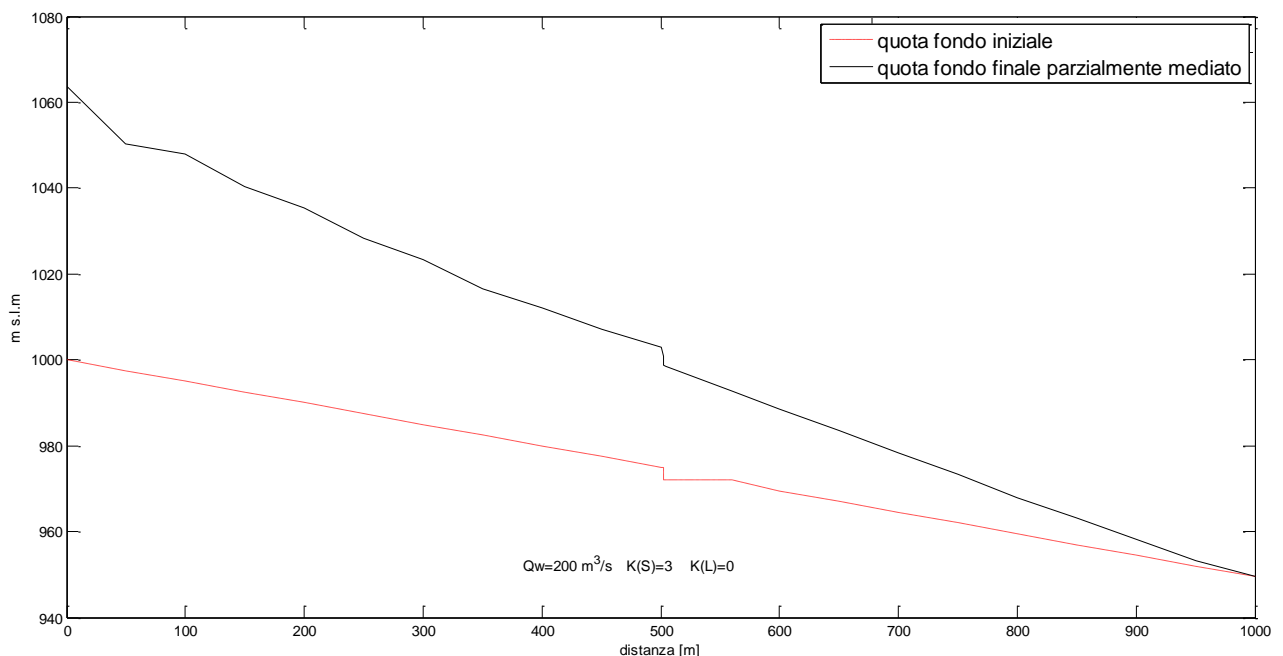


Fig. 3.27 – Briglia reale in sovralimentazione

La briglia viene correttamente sommersa a causa del notevole accumulo. L'unica divergenza con la realtà è rappresentata dal notevole dislivello in corrispondenza delle sezioni della briglia; di fatto l'altezza della briglia viene propagata anche a sommersione avvenuta.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Per il caso con portata immessa solida pari a quella di equilibrio ($K_S=1$), il risultato è il seguente, con sommersione della briglia.

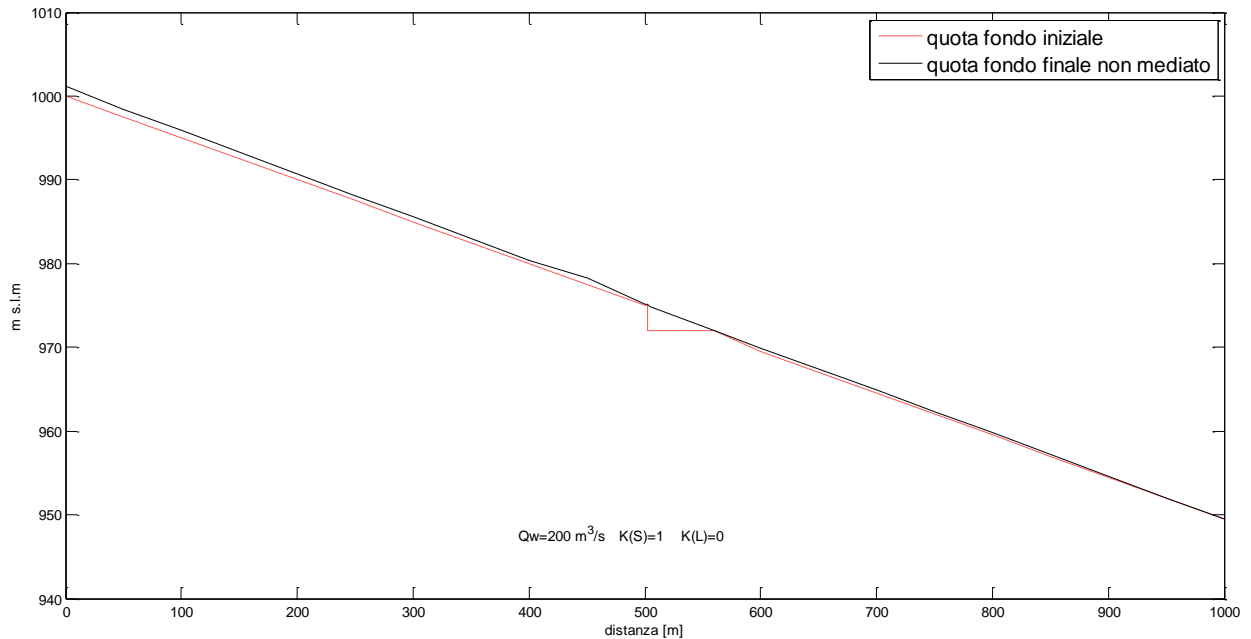


Fig. 3.28 – Briglia reale sommersa con portata all'equilibrio

Nello zoom di seguito proposto, è ancora più facilmente apprezzabile l'effetto della sommersione della briglia, effetto atteso in una situazione reale in cui i sedimenti trasportati dalla corrente si depositano fino a sommergere la briglia stessa.

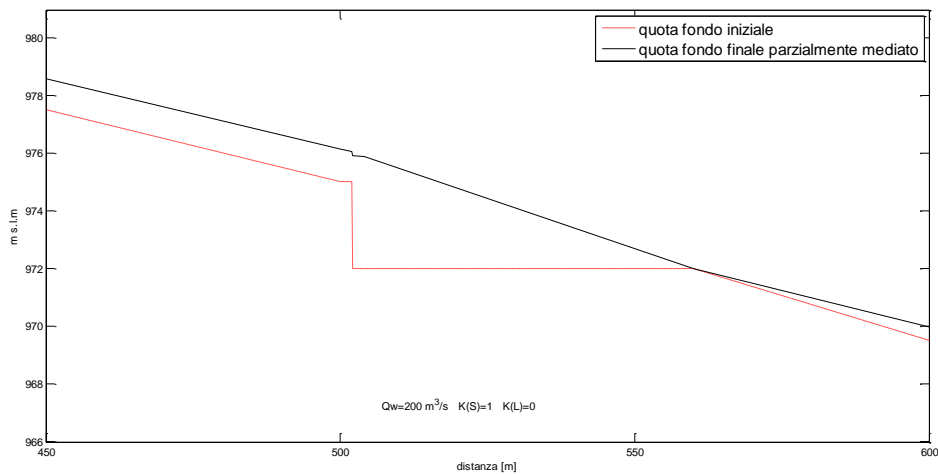


Fig. 3.29 – Zoom della briglia reale sommersa con portata all'equilibrio

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Di seguito si propone il caso leggermente sovralimentato ($K_S = 1.25$) sia visualizzandone l'andamento del profilo nell'intero alveo di simulazione, che con uno zoom nelle sezioni della briglia (sommersa).

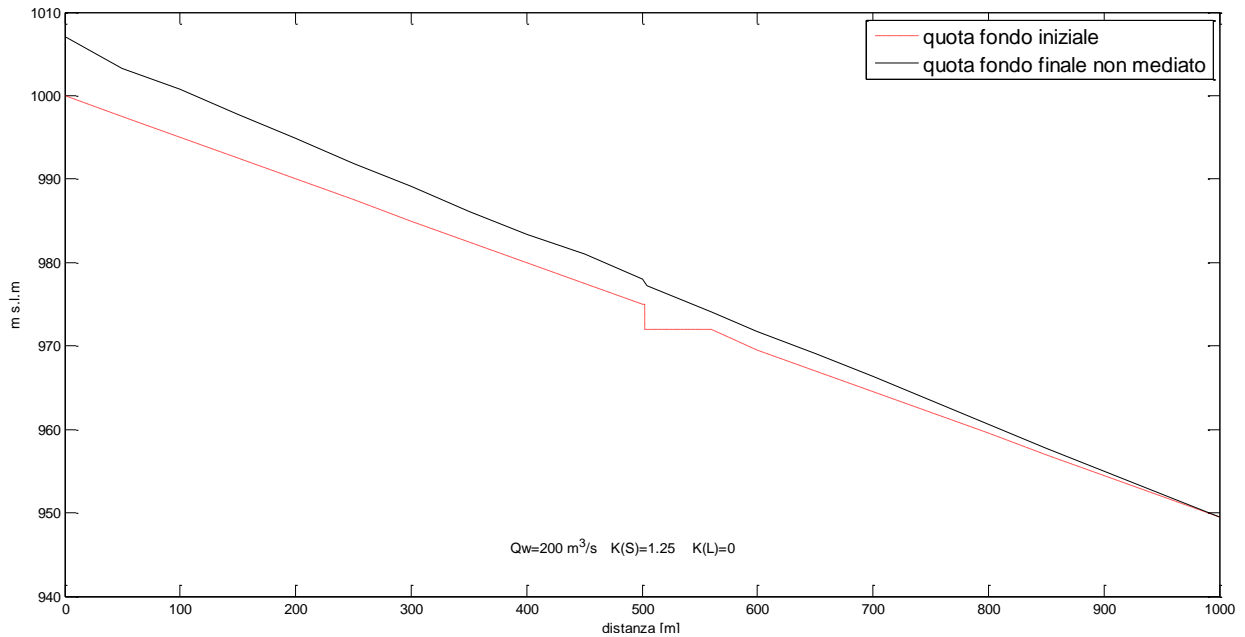


Fig. 3.30 – Briglia reale sommersa leggermente sovralimentata

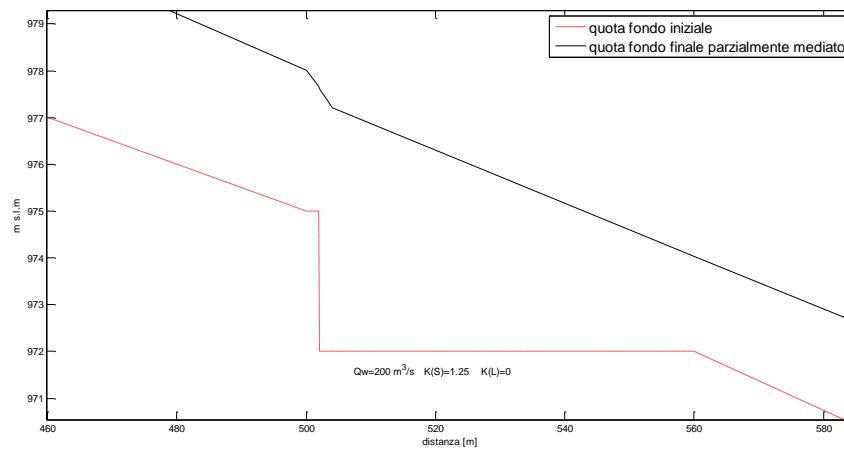


Fig. 3.31 – Zoom della briglia reale sommersa leggermente sovralimentata

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

3.2.2.2 Confronti in presenza-assenza di briglia

Per studiare l'effetto della presenza o meno della briglia, vengono di seguito messe a confronto differenti simulazioni in cui sono sovrapposti alla stessa geometria dell'alveo di partenza, i profili agli istanti finali con sezioni della briglia rispettivamente erodibili e inerodibili.

Il primo caso è quello di canale leggermente sovralimentato ($K_S=1.25$)

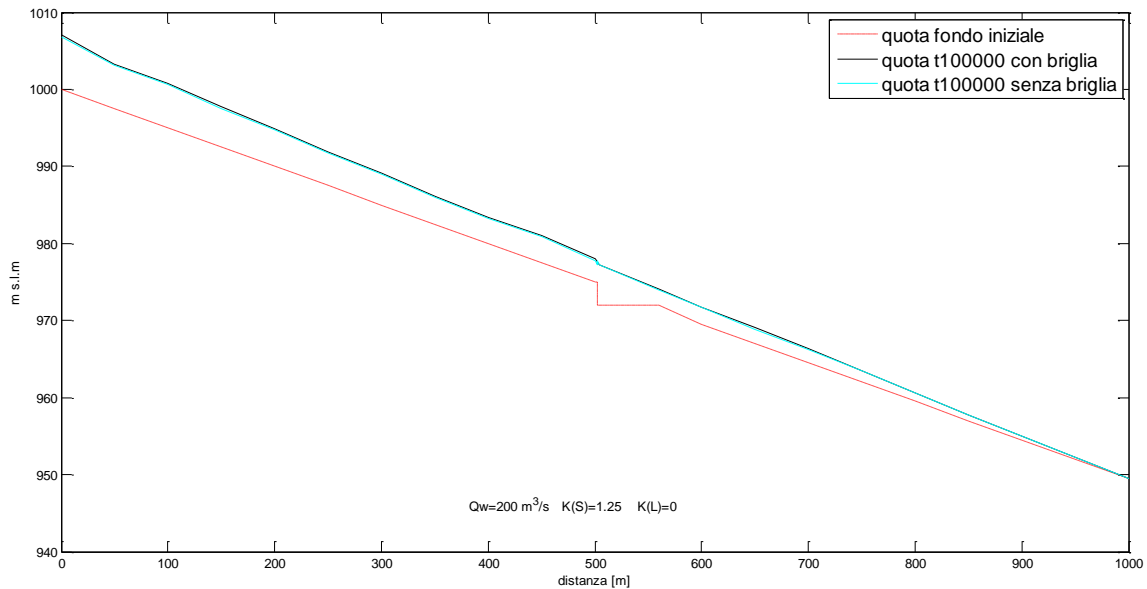


Fig. 3.32 – Confronto caso con e senza briglia in accumulo

Il comportamento generale è del tutto analogo; piccole incongruenze si possono apprezzare solo dallo zoom nella zona della briglia proposto nella sottostante Fig. 3.33:

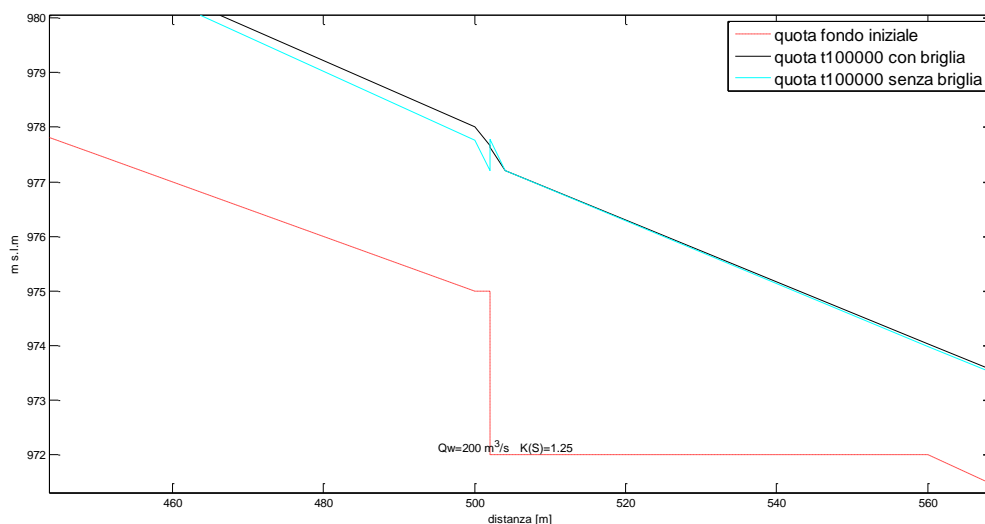


Fig. 3.33 – Zoom del confronto caso con e senza briglia in accumulo

L'unica differenza degna di nota è la piccola incongruenza (generata dalla diversa modalità di mediare le sezioni facenti parte della briglia e quelle che non lo sono), del tutto trascurabile nella considerazione del profilo dell'intero alveo.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Il secondo caso di confronto tra comportamento in presenza od assenza di briglia è quello di canale in erosione ($K_S=0$).

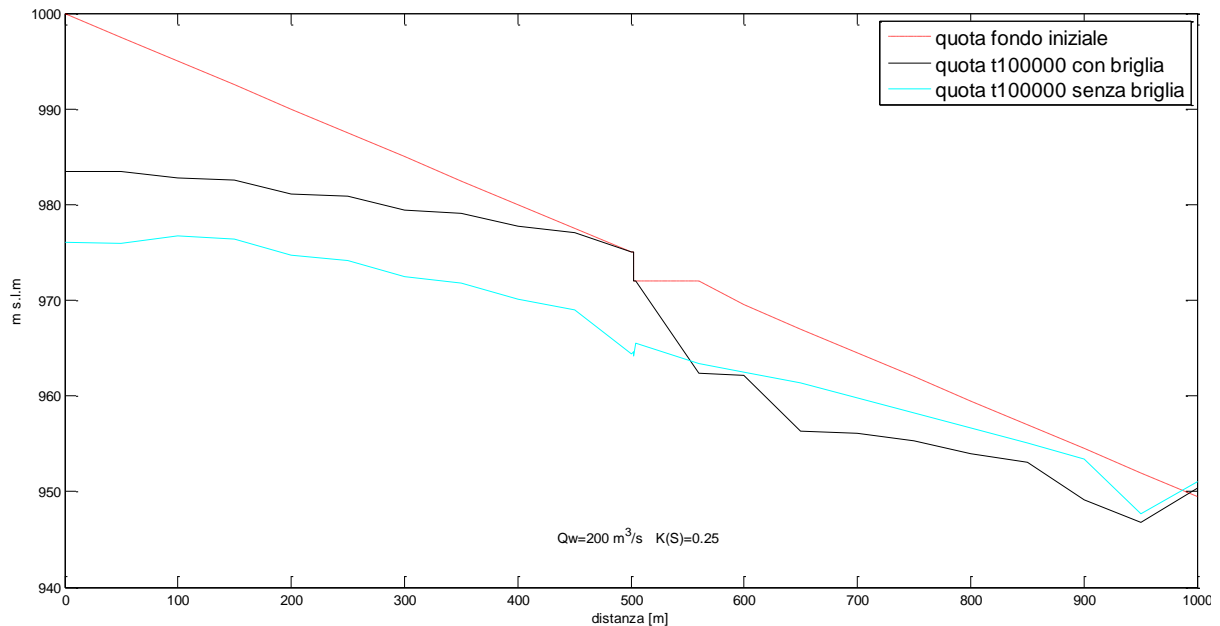


Fig. 3.34– Confronto caso con e senza briglia in erosione

Si nota che, come prevedibile, se non erodibile, la briglia viene completamente erosa. Ad ulteriore conferma si vuole riportare una semplice verifica della conservazione della pendenza d'equilibrio sia a monte che a valle della briglia.

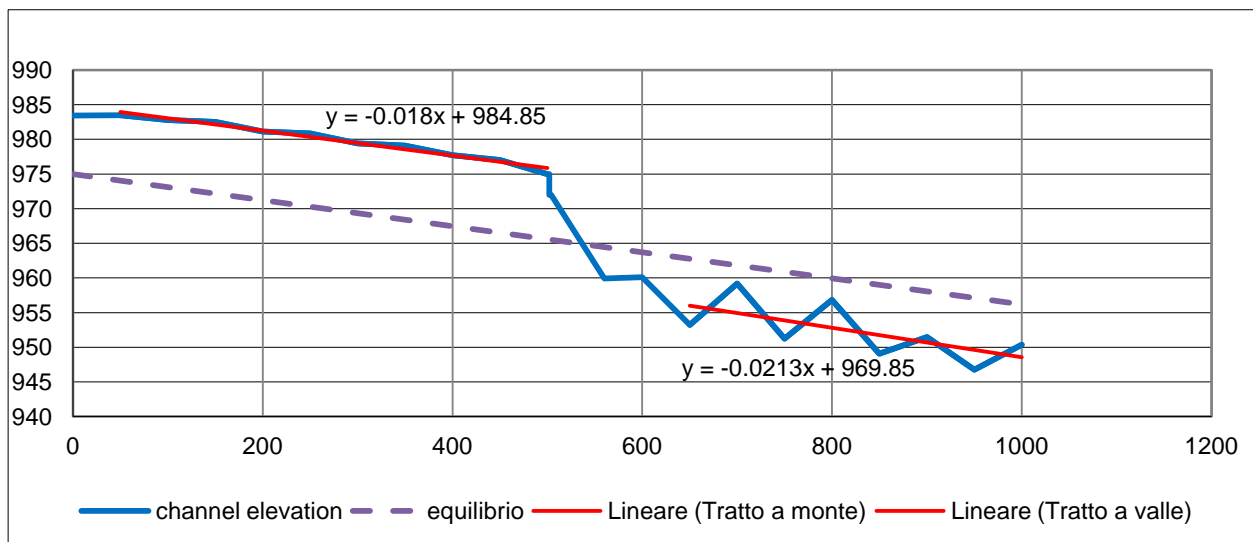


Fig. 3.35– Confronto con pendenza all'equilibrio

La pendenza all'equilibrio (trasporto solido nullo) calcolata con la formula già citata al **Par. 1.3.1.** è pari a 0.018; le linee di tendenza che interpolano le quote del fondo a monte e a valle, visibili nel grafico di **Fig. 3.35**, hanno una pendenza rispettivamente pari a 0.018 e 0.0213 (ritenute sufficientemente simili a quella teorica calcolata).

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

3.2.2.3 Andamenti del profilo nel tempo

Si vuole ora valutare come viene restituito dal modello l'interrimento delle briglie; per far ciò, di seguito sono plottati i profili degli alvei (ed, in **Fig. 3.37**, i relativi ingrandimenti in zona della briglia) a diversi istanti temporali (indicati nella legenda).

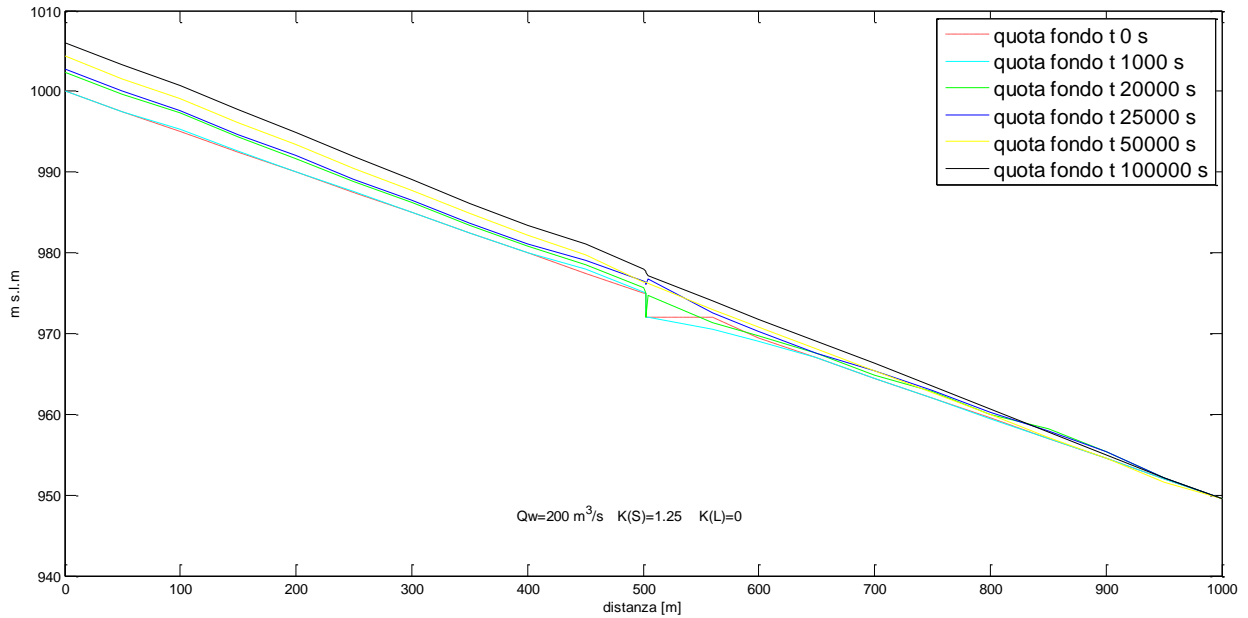


Fig. 3.36 – Evoluzione dell'alveo in successivi istanti temporali, $K_S=1.25$

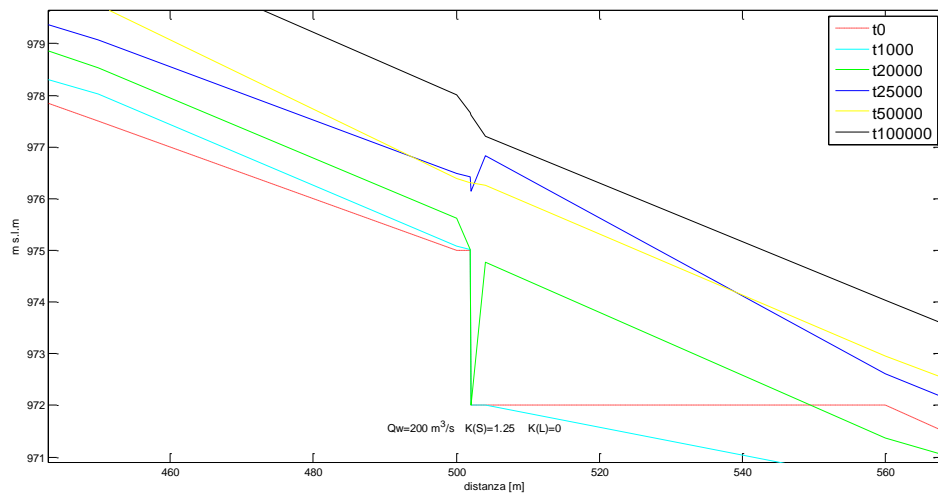
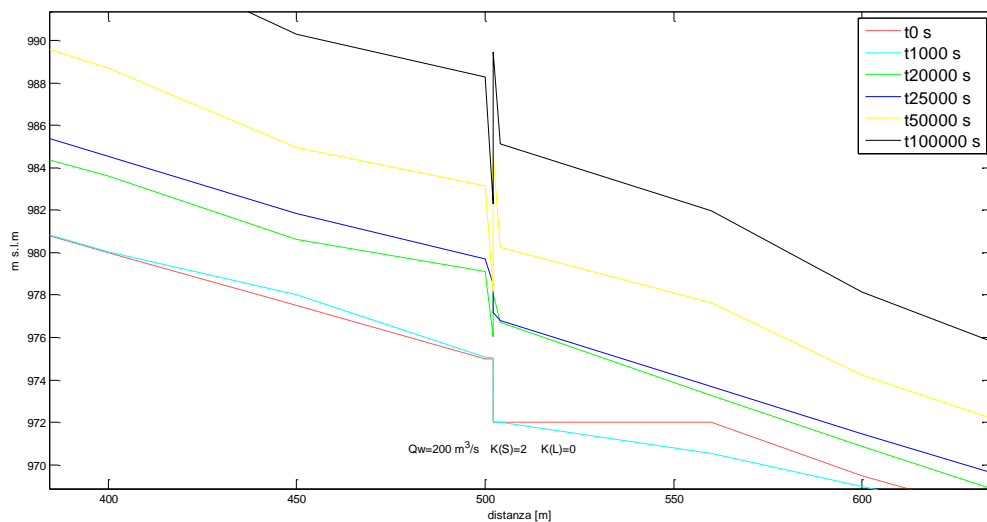
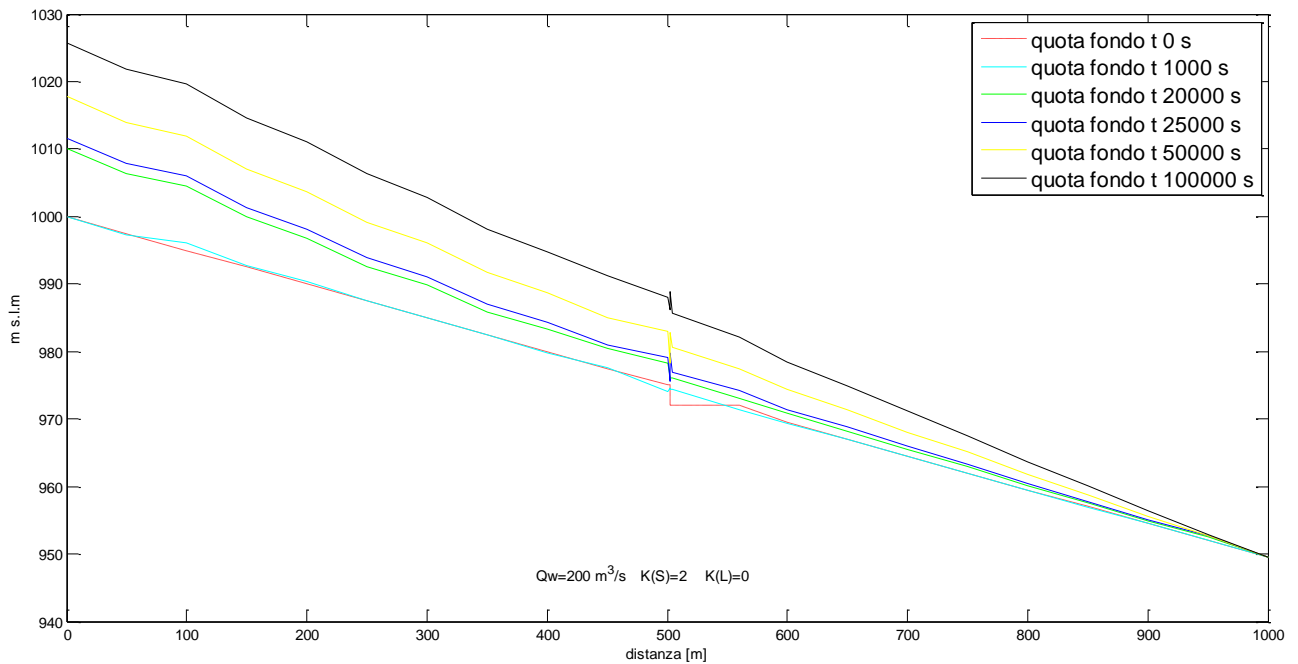


Fig.

3.37 – Zoom dell'evoluzione della briglia in successivi istanti temporali, $K_S=1.25$

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Il comportamento è del tutto analogo nel caso si aumenti ancora il grado di sovralimentazione, raggiungendo un K_S pari a 2, ovvero alimentando con una portata doppia rispetto a quella di equilibrio (che si ricorda essere pari a $3.67 \text{ m}^3/\text{s}$):



In tutti i grafici sopra riportati, il comportamento globale è soddisfacente, sebbene siano visibili dei disturbi in corrispondenza della briglia, le cui cause sono state precedentemente analizzate.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Sempre col fine di studiare le modalità di sommersione della briglia, sono di seguito riportati dei profili aggiuntivi (solo per il caso scarsamente sovralimentato, $K_S=1.25$) di variazione del fondo e portata solida nel tempo, per alcune sezioni significative, ovvero:

- CS2 (50 m a valle dell'origine);
- CS10 (50 m a valle della briglia);
- CS11C (4,01 m a monte della briglia);
- CS13 (50 m a valle della briglia);
- CS20 (50 m a monte della sezione di chiusura).

In questi primi grafici viene mostrata la variazione che il fondo dell'alveo subisce negli istanti iniziali (25 000 s):

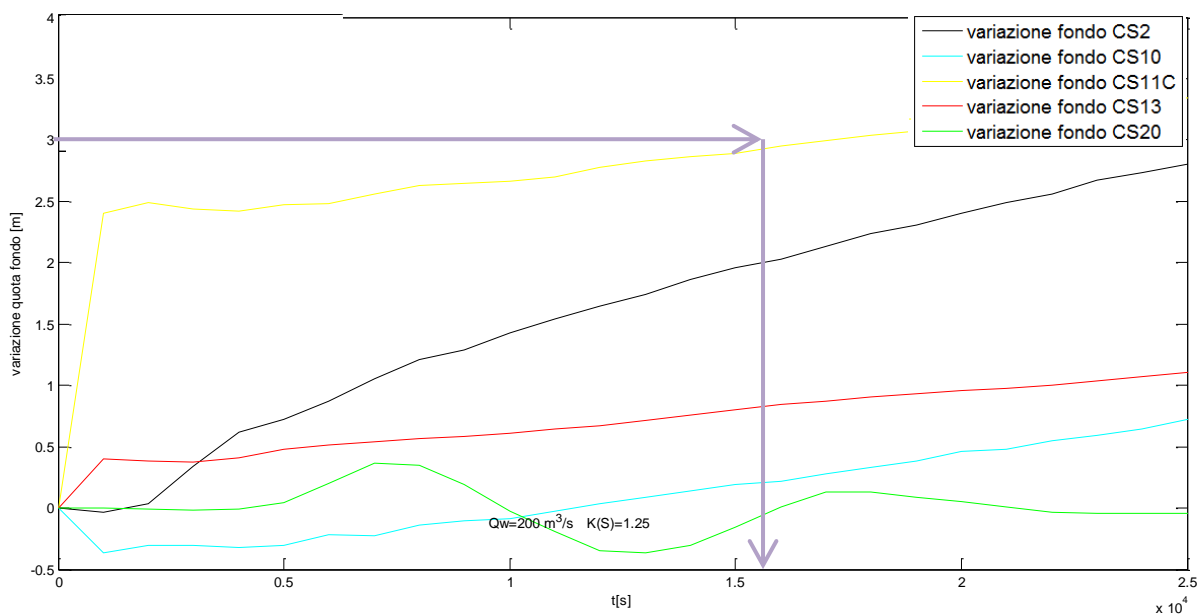


Fig. 3.40 – Innalzamento del fondo d'alveo nelle prime 7 ore

Si osserva che:

- la quota del fondo della sezione d'apertura (la linea nera di **Fig. 3.40**) rimane stabile fino a 2500 s, poi aumenta monotonicamente;
- la sezione a monte della briglia (linea azzurra), invece, è interessata da erosione di alcune decine di centimetri fino a circa 10 000 s, per poi aumentare il livello del fondo;
- il comportamento del fondo nel tratto interessato dalla briglia (linea gialla) presenta un accumulo fino a circa 2.5 metri nei primissimi istanti per poi continuare ad accumulare ma con una pendenza minore. Si osserva che in corrispondenza di circa 16000 s si ha la sommersione della briglia in quanto si è raggiunta l'altezza di 3 metri, come sottolineato dalla freccia viola anteposta al grafico;

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

- a valle della briglia, la quota del fondo (linea rossa) aumenta sin dai primissimi istanti fino a circa mezzo metro e continua poi ad aumentare, ma con una velocità minore;
- infine, nella sezione di chiusura, l'innalzamento del fondo (linea verde) è soggetto ad un lieve ritardo (5000 s); successivamente si osserva un fenomeno di accumulo e poi di erosione, come se la quota del fondo si stabilizzasse intorno al valore iniziale (fenomeno dovuto alla condizione al contorno di valle).

Nel grafico sottostante è rappresentato il comportamento delle sezioni per l'intera simulazione (120 000 s). Tale comportamento è confrontabile con quello che si era già delineato nei primi istanti, rappresentati in **Fig. 3.40** relativa ai primi 25 000 s.

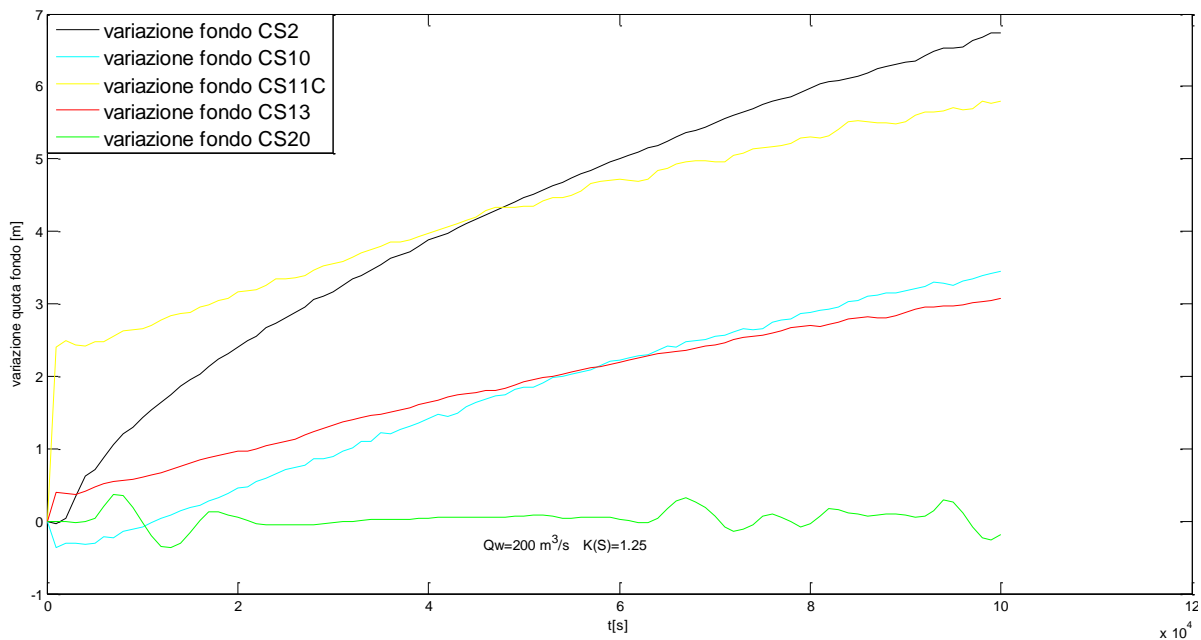


Fig. 3.41 - Innalzamento del fondo d'alveo dopo 28 ore

Il comportamento del fondo, come più volte detto nel corso di questa Tesi (vedi ad esempio il **Par. 1.3.1.3**) è strettamente dipendente dal trasporto solido e dalla sua variazione tra due sezioni. Pertanto ora si riporta l'andamento di questa quantità nelle suddette sezioni.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

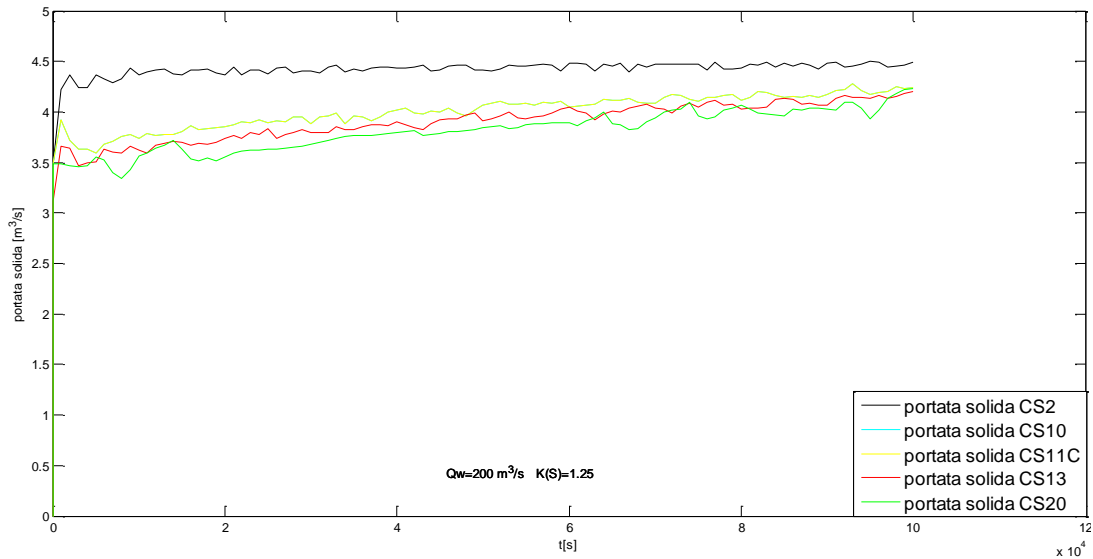


Fig. 3.42 – Portata solida in alcune sezioni

Come prevedibile, nella sezione iniziale (i colori utilizzati sono i medesimi dell'andamento del fondo dei precedenti grafici) il valore della portata solida è coincidente a quello imposto come condizione al contorno; anche il comportamento delle altre sezioni non desta sorprese: in accordo con l'andamento del fondo di Fig. 3.41, presentano dapprima un modesto trasporto solido, che diminuisce man mano che ci si allontana dalla sezione iniziale, mentre poi si assestano sui valori della portata solida d'equilibrio Q_{EQ} , che raggiungono in maniera asintotica.

3.2.2.4 Sassogrammi variabili nel tempo

Visti i buoni risultati fin qui raggiunti, si è provato a riprodurre il comportamento di un alveo con un'alimentazione solida non costante.

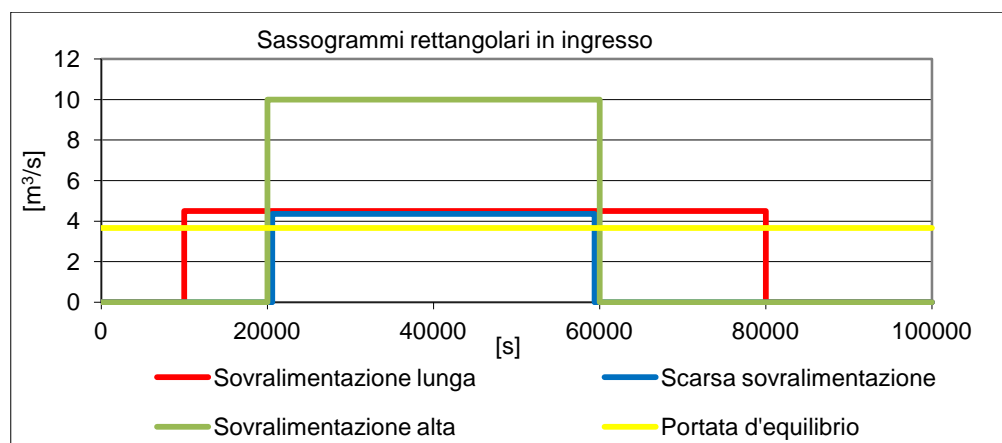


Fig. 3.43 – Confronto tra i diversi sassogrammi variabili nel tempo

Il modello parte in erosione ($Q_s=0$), poi diventa sovralimentato ed infine torna in erosione.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Gli istanti per cui sono stati plottati i grafici sono:

- quello in cui inizia la sovralimentazione (e quindi di massima erosione);
- quelli in cui termina la sovralimentazione (e quindi di massimo accumulo);
- quello al termine della simulazione (anch'esso in erosione).

Questo primo caso è quello della “scarsa” sovralimentazione.

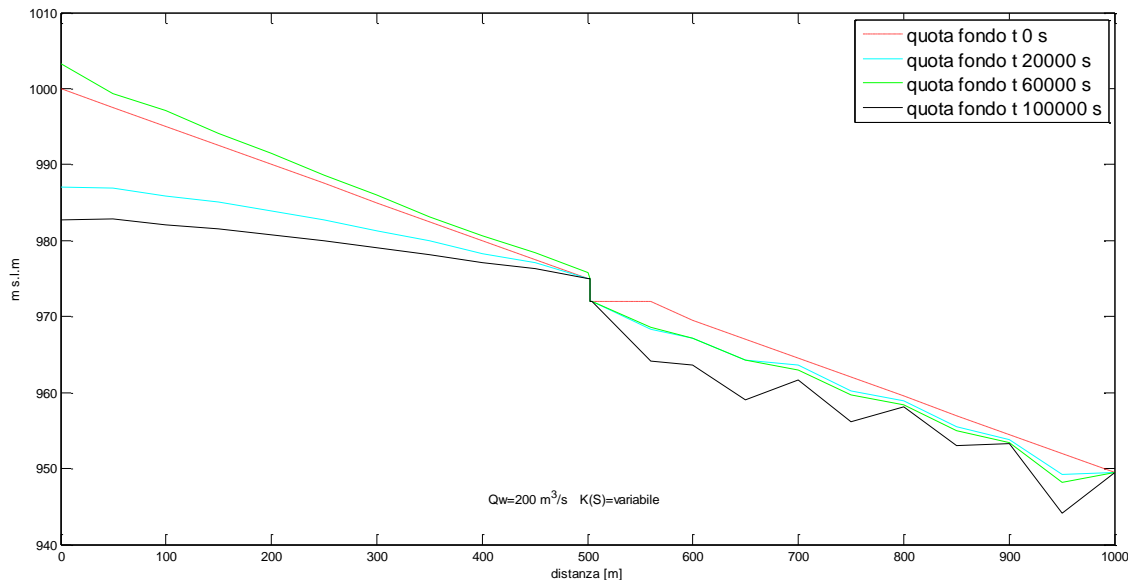


Fig. 3.44 – Briglia con sassogramma di “scarsa” sovralimentazione

Si osserva che facendo partire il modello con un’erosione, la briglia n°2 si riduce a quella precedentemente analizzata.

Il caso seguente, invece, presenta una sovralimentazione “lunga” (ovvero con un K_S pari a 1.25 da 10 000 s ad 80 000 s).

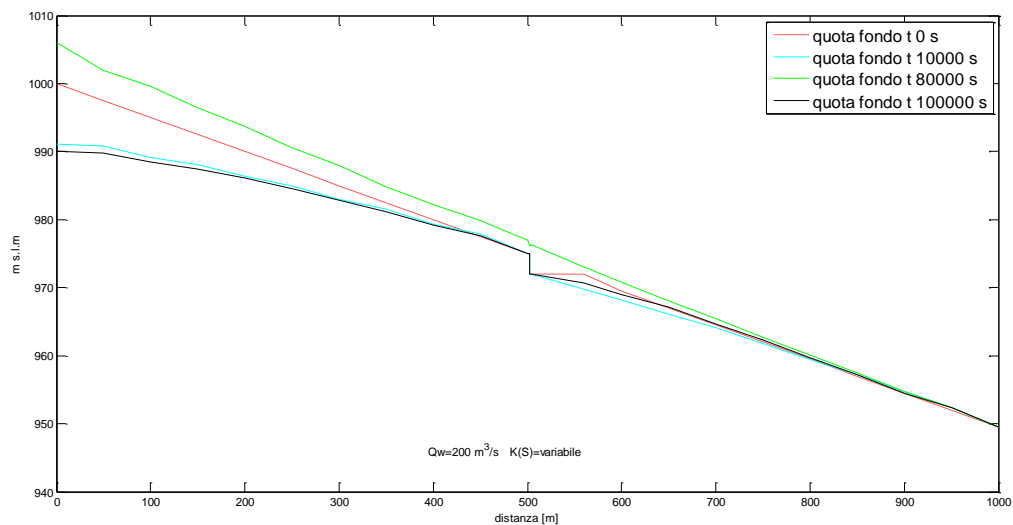


Fig. 3.45 – Briglia con sassogramma di sovralimentazione “lunga”

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Infine questo caso presenta una sovralimentazione “alta” (ovvero con un K_S pari a 3 da 20 000 s a 60 000 s).

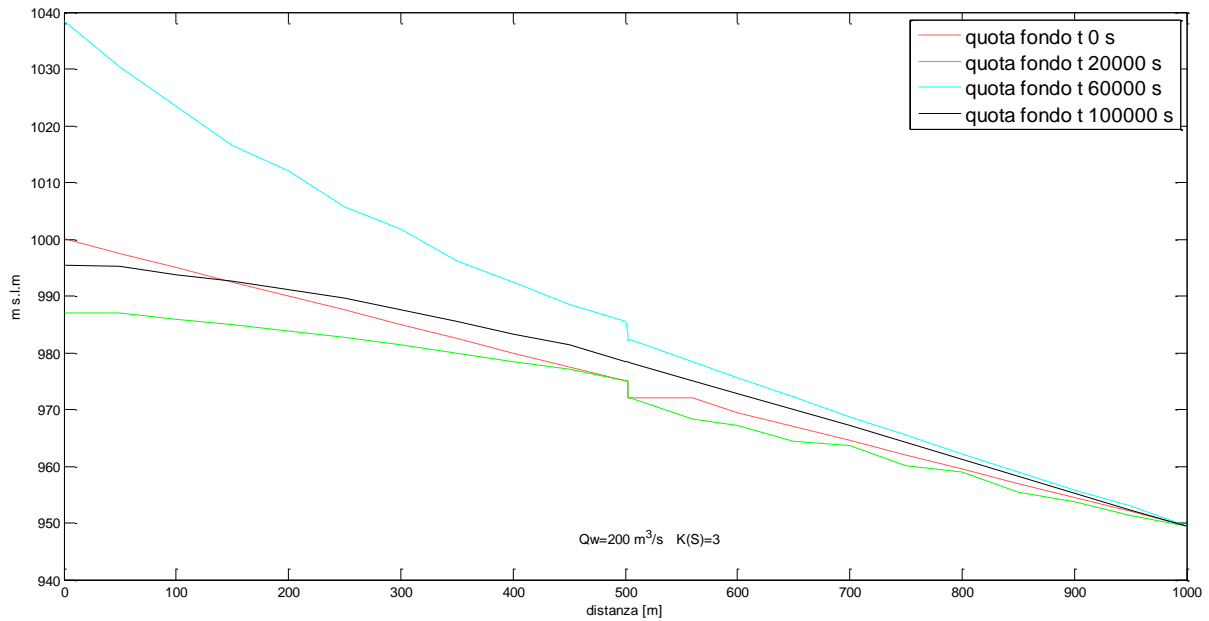


Fig. 3.46 – Briglia con sassogramma di sovralimentazione “lunga”

In tutti i risultati proposti, è ben visibile l’andamento del profilo, che dapprima erode il fondo, successivamente è in accumulo (con valori tanto maggiori quanto maggiore è il grado di sovralimentazione) ed infine torna ad erodere in maniera legata alla storia di alimentazione.

3.3 Analisi granulometrica

Negli alvei montani la granulometria è molto distribuita e il d_{50} , il diametro medio del fondo dell'alveo può assumere valori diversi lungo l'asta fluviale; caratterizzare l'alveo (e quindi le caratteristiche della corrente) con un solo valore di diametro "caratteristico", non è quindi realistico.

Gli studi pregressi citati al **Par. 1.4** hanno usato dei software che non permettevano l'inserimento di curve granulometriche, influenzando in modo significativo il trasporto solido e di conseguenza le variazioni del fondo dell'alveo.

Questo paragrafo ha lo scopo di analizzare come la granulometria influenzi i profili del fondo dell'alveo e come la curva granulometrica vari lungo il tratto di alveo considerato e al passare del tempo.

3.3.1 “mini guida utente”

Nel **Par. 2.2** sono state descritte le istruzioni necessarie per inserire gli input necessari a far funzionare il programma Basement, e a manipolare correttamente gli output risultanti. Di seguito si approfondiranno i passi per inserire le informazioni sulla granulometria ed in particolar modo il caso della granulometria variabile.

La sezione del programma Basement interessata è la BED MATERIAL, che appartiene al blocco MORPHOLOGY (vedi **Par. 2.2.1**); le informazioni da inserire sono, nell'ordine:

- *grain class*: si elencano in ordine crescente le classi granulometriche, ovvero i diametri (in mm) dei sedimenti presenti nella simulazione;
- *mixture*: si assegnano alle varie granulometrie il nome e le percentuali dei sedimenti presenti in ognuna di esse; si dovranno inserire tante mixtures quanti sono i tipi di suolo che caratterizzano il fondo o gli apporti solidi (**Fig. 3.47**);
- *soil-def*: si definisce il nome del suolo, della mixture da cui è formato e lo spessore dello strato di suolo erodibile;
- *soil-assignment*: si assegna ad ogni suolo precedentemente definito un indice che, come già spiegato al **Par. 2.2**, verrà poi usato nel file *geometry.bmg* per definire il tipo di suolo caratteristico di ciascuna sezione.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Di seguito viene visualizzata l'interfaccia grafica che permette la definizione della granulometria riferita al fondo dell'alveo a monte dell'asta fluviale.

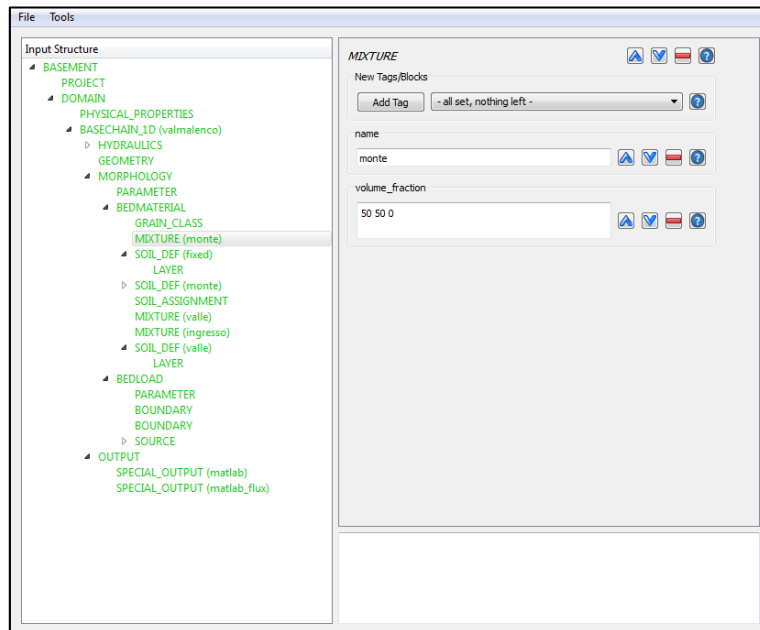


Fig. 3.47 – Interfaccia grafica per l'inserimento della composizione di una granulometria

Nel **Par. 2.2**, si è spiegato a cosa corrispondono le colonne dell'output di Matlab fino alla tredicesima; nel caso di granulometria uniforme il numero totale di colonne è 17; più il numero dei diametri inseriti (che definiscono la curva granulometrica) aumenta e più il numero delle colonne di output aumenta.

Per esempio nel caso in cui il numero di diametri sia pari a due, il numero di colonne risultanti è 19, come mostrato in **Fig. 3.48**, dove sono rappresentate le colonne che vanno dalla 14 alla 19.

Le ultime due colonne sono sempre riferite alle stesse quantità: la penultima colonna rappresenta l'altezza dello strato di terreno che si ottiene sottraendo allo spessore del fondo erodibile (bottom elevation) più l'eventuale strato di sedimenti (se si è in accumulo), lo spessore del volume di controllo (control volume thickness); per semplicità lo spessore di questo strato verrà chiamato h ; l'ultima colonna, invece, assume valori di 1 o -1 , rispettivamente se il fondo è erodibile oppure no.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Le colonne intermedie, invece sono riferite alle percentuali delle differenti granulometrie rispettivamente nello spessore del volume di controllo e nello strato h . Nel caso di un fondo

14	15	16	17	18	19
0.6028	0.3972	0.0230	0.9770	50.5258	1
0.6459	0.3541	0.0183	0.9817	50.3521	1
0.6513	0.3487	0.0168	0.9832	50.2857	1
0.6481	0.3519	0.0168	0.9832	50.2828	1
0.6417	0.3583	0.0166	0.9834	50.2612	1
0.6324	0.3676	0.0167	0.9833	50.2521	1
0.6596	0.3404	0.0153	0.9847	50.2256	1
0.6306	0.3694	0.0161	0.9839	50.2193	1
0.6163	0.3837	0.0155	0.9845	50.1609	1
0.6230	0.3770	0.0135	0.9865	50.0748	1
0.5868	0.4132	0.0130	0.9870	49.9868	1
0.6384	0.3616	0.0184	0.9816	50.3507	1
0.6190	0.3810	0.0187	0.9813	50.3308	1
0.6283	0.3717	0.0175	0.9825	50.2837	1
0.6277	0.3723	0.0169	0.9831	50.2528	1
0.6109	0.3891	0.0164	0.9836	50.1981	1
0.5902	0.4098	0.0153	0.9847	50.1087	1
0.5423	0.4577	0.0136	0.9864	49.9443	1
0.4620	0.5380	0.0119	0.9881	49.6770	1
0.4239	0.5761	0.0160	0.9840	49.1129	1
0.0226	0.9774	8.6095e-06	1.0000	48.4365	1

Fig. 3.48 – Output Matlab riferito alla granulometria.

con due differenti valori di diametro dei sedimenti, il significato delle colonne è il seguente:

14: percentuale del diametro minore nel volume di controllo;

15: percentuale del diametro maggiore nel volume di controllo;

16: percentuale del diametro minore nello strato inferiore (h);

17: percentuale del diametro maggiore nello strato h .

La **Fig. 3.49** visualizza questi due strati, dove oltre alla rappresentazione del suolo

vengono rappresentate le percentuali riferite al volume di controllo che restituisce come output il codice Basement. Il modello rappresentato in figura è bi-granulare: si considera un fondo monogranulare di diametro d_1 e una portata solida immessa monogranulare di diametro minore del fondo d_2 .

Oltre alla rappresentazione del suolo, sono indicate le curve granulometriche riferite allo spessore del volume di controllo (c.v.t.). La curva blu è riferita alla percentuale del diametro maggiore d_1 , mentre la curva rossa alle percentuali del diametro minore d_2 .

Si osserva che le due curve si incontrano quando le percentuali dei diametri arrivano al 50% e che la percentuale del diametro d_1 si annulla nel punto in cui i sedimenti caratterizzati da tale diametro non sono più presenti nel volume di controllo, come mostrato nell'ingrandimento.

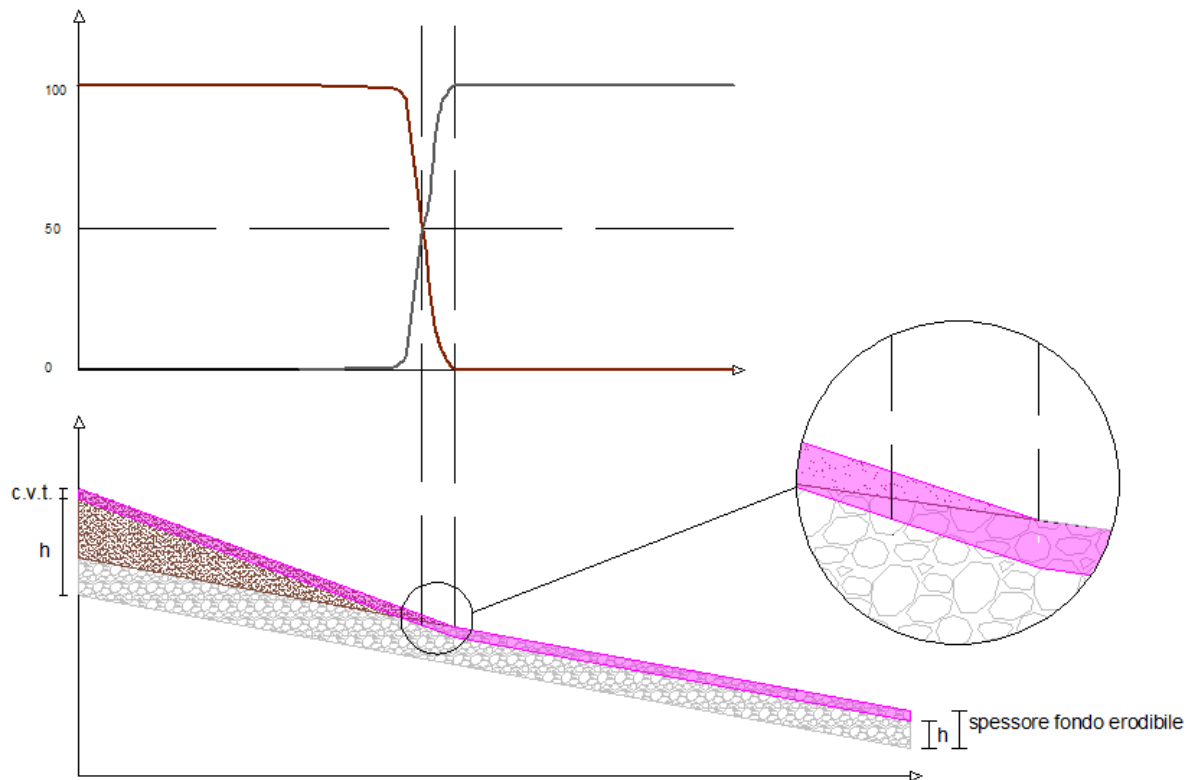


Fig. 3.49 – Rappresentazione degli strati del terreno e percentuali di d_1 e d_2

Nel caso in cui i diametri utilizzati nel programma siano 3, il numero di colonne complessive sarà 21; la penultima e l'ultima colonna hanno lo stesso significato del caso precedente; le colonne 14, 15, 16 saranno riferite alle percentuali nel volume di controllo dei tre diametri e le colonne 17, 18 e 19 saranno invece riferite alle percentuali degli stessi diametri nello spessore h ; ovviamente per una granulometria caratterizzata da quattro diametri, si passerà ad un numero totale di colonne pari a 23, e così via per un numero di diametri crescente.

3.3.2 Validazione del modello, caso del corazzamento

In un canale caratterizzato da granulometria non uniforme, l'effetto dello sforzo esercitato dall'acqua sui diversi sedimenti sarà legato al loro diametro; in particolare maggiore è il diametro, maggiore sarà la probabilità che tali sedimenti rimangano immobili; viceversa, i sedimenti più piccoli saranno trasportati a valle con maggior facilità; tale fenomeno è detto corazzamento, ad indicare il fatto che la superficie del fondo, risultando mediamente più grossolana, sarà meno sensibile al fenomeno del trasporto solido di fondo, proteggendolo da ulteriore erosione.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

3.3.2.1 Esperimento di corazzamento

I programmatori del codice Basement hanno validato l'efficienza del codice, confrontando un modello fisico con i risultati ottenuti da una simulazione in cui hanno riprodotto le stesse caratteristiche. Nella sottostante **Fig. 3.50** è rappresentato il profilo dell'alveo di laboratorio all'istante iniziale (con ben visibili anche la vasca d'accumulo dei sedimenti a monte ed il serbatoio di valle) e dopo 3 giorni e mezzo di simulazione.

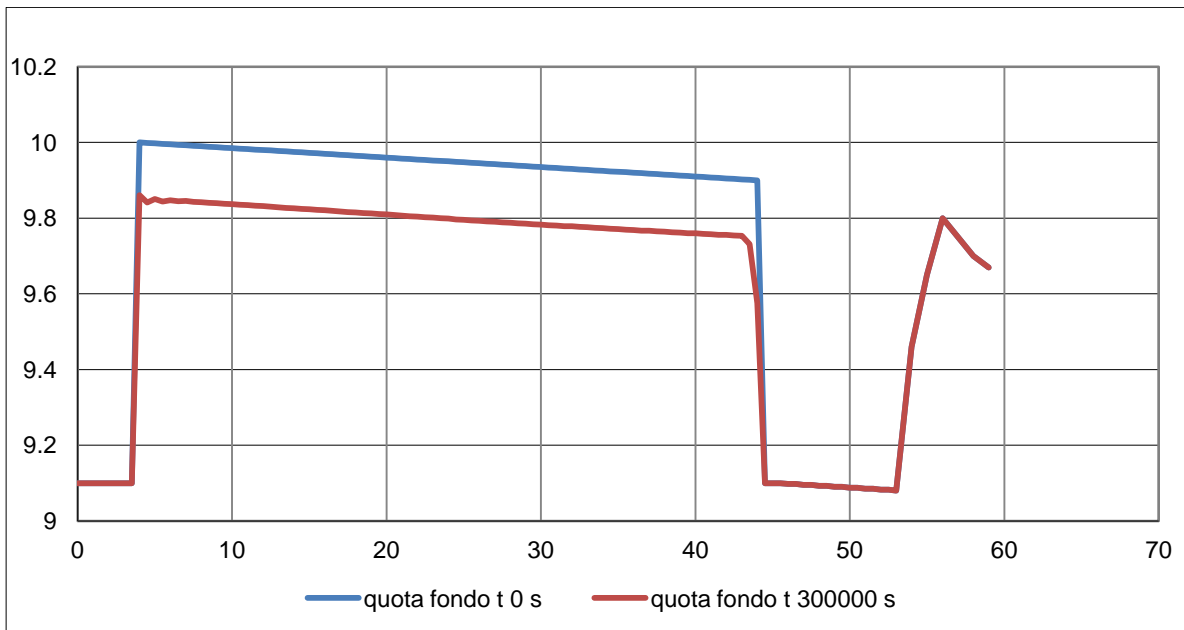


Fig. 3.50 – Profilo dell'alveo per l'esperimento di corazzamento

Come prevedibile, il canale non essendo alimentato a monte tende ad erodere, per portarsi ad una minore pendenza, più prossima a quella di equilibrio, ed i cui valori sono visibili in **Fig. 3.51**.

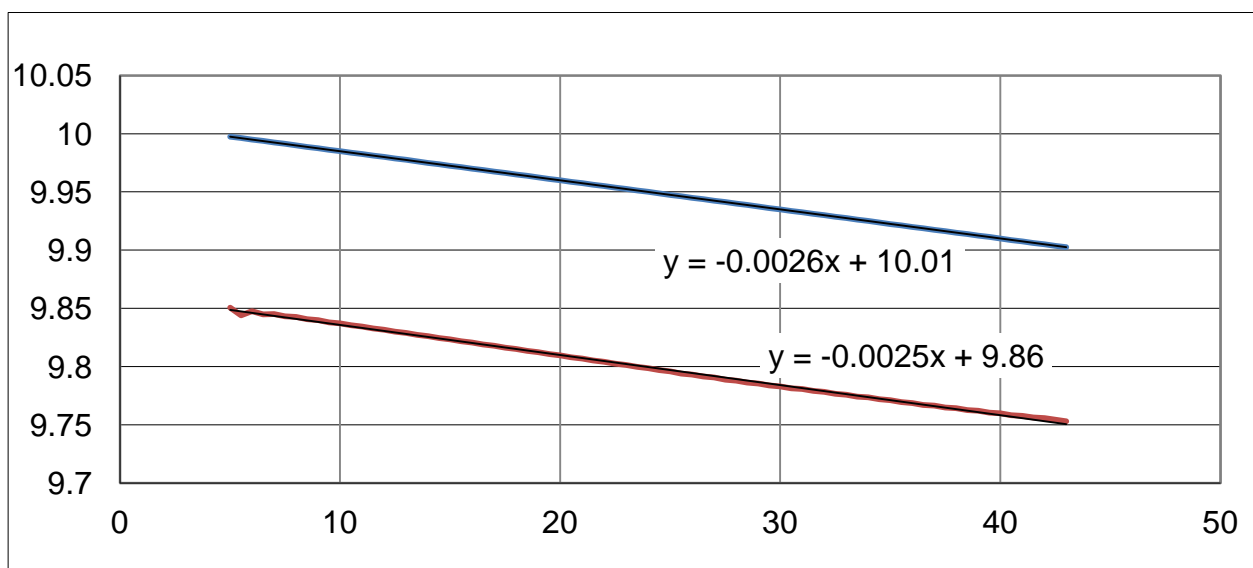


Fig. 3.51 – Diminuzione della pendenza per l'esperimento di corazzamento

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Ma in questa simulazione, desta maggior interesse l'evoluzione della curva granulometrica. Ci si aspetta che le sezioni di monte presentino una curva granulometrica caratterizzata da diametri maggiori, mentre il diametro delle sezioni di valle sia mediamente più fine delle precedenti. Nel grafico sottostante è ben visibile tale comportamento (in rosso la curva riferita alla sezione di monte; in viola quella riferita alla sezione di valle).

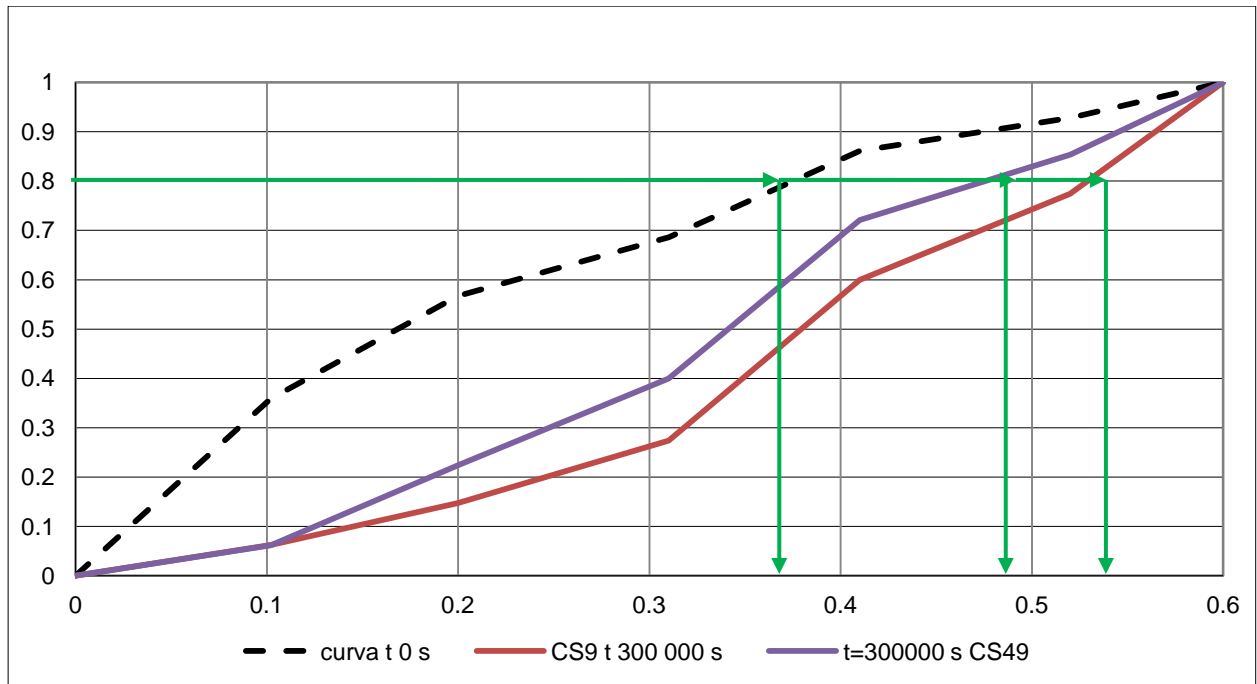


Fig. 3.52 – Evoluzione della curva granulometrica

La curva nera tratteggiata è riferita alla granulometria che era stata inserita come fondo dell'intero alveo prima che iniziasse la simulazione; si nota che entrambe le curve all'istante finale sono spostate verso destra, ovvero caratterizzate da una granulometria con sedimenti maggiori; in particolare, la sezione di monte ha un diametro medio superiore a quella di valle, proprio per effetto del corazzamento.

Per quantificare tali variazioni, in **Fig. 3.52** è stata tracciata una freccia multipla che individua il diametro che caratterizza l'80% di ogni sezione: all'istante iniziale l'intero alveo è caratterizzato da un d_{80} di 38 mm; alla fine della simulazione, nella sezione iniziale, il d_{80} è pari a 54 mm e in una sezione intermedia il d_{80} raggiunge i 48 mm.

Nel seguente grafico sono messi a confronto i valori calcolati dal programma con le misure sperimentali, giungendo alla conclusione che in effetti Basement restituisce una curva granulometrica più fine, ma comunque è in grado di riprodurre con sufficiente approssimazione tale distribuzione di granulometria.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

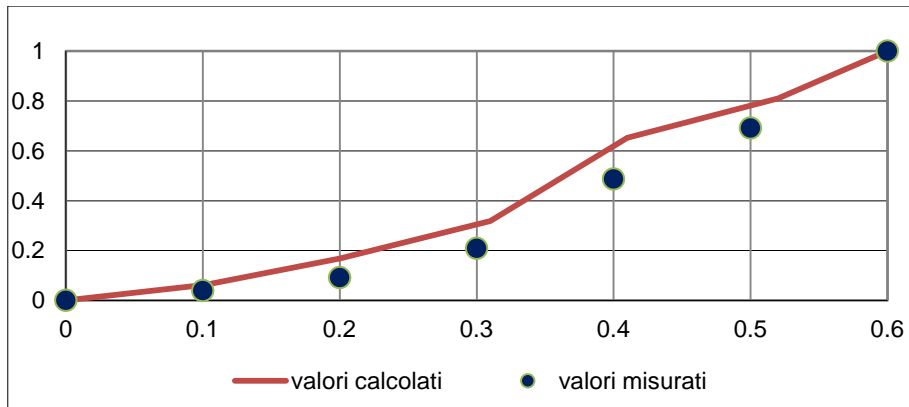


Fig. 3.53 – Confronto tra valori delle curve granulometriche calcolate e misurate

3.3.2.2 Analisi di sensitività al volume di controllo

La Control Volume Thickness gioca un ruolo fondamentale nel calcolo del trasporto solido, influenzando notevolmente gli spessori di fondo erosi o in accumulo. Sempre in riferimento all'esperimento appena descritto, si sono voluti dare differenti risultati dell'erosione del fondo dell'alveo, per mezzo di simulazioni del tutto identiche per quanto riguarda la geometria e le condizioni al contorno, ma variando di volta in volta lo spessore del volume di controllo.

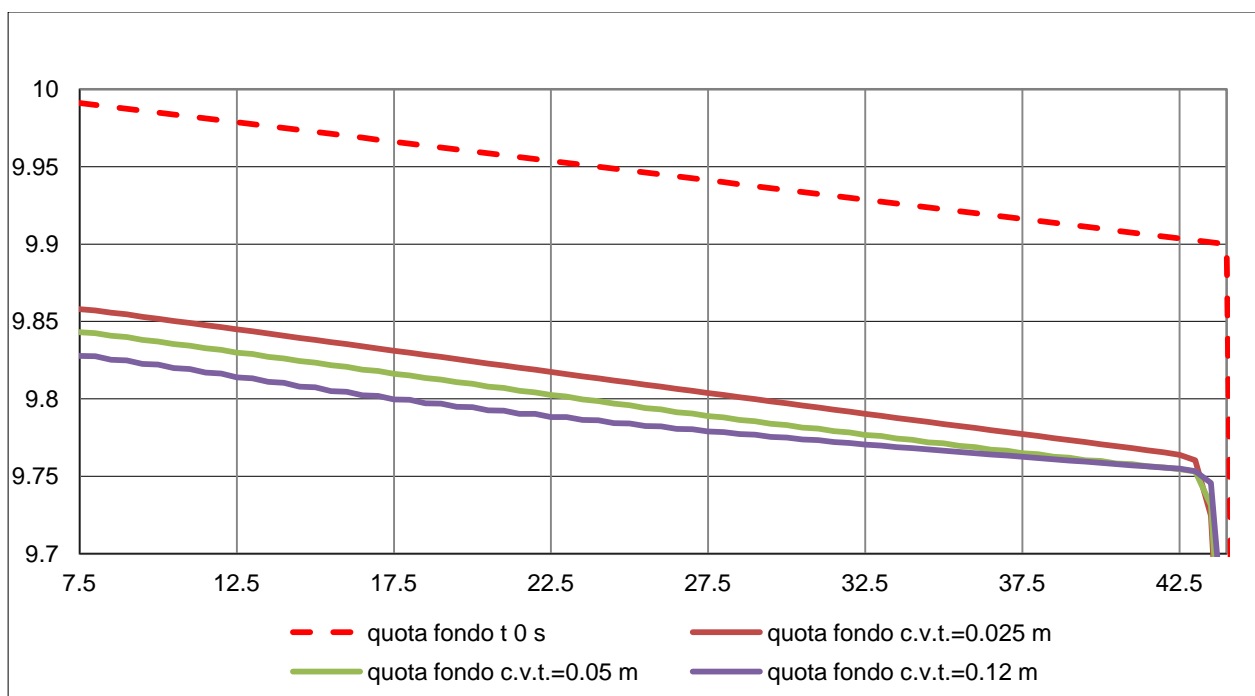


Fig. 3.54 – Profili del canale al variare del volume di controllo per istante finale

Si osserva innanzitutto che al crescere dello spessore del volume di controllo, aumenta l'erosione; inoltre è da notare che vi è una differente rotazione del fondo, ovvero una diversa velocità con cui la pendenza media tende alla pendenza di equilibrio.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

In **Fig. 3.55** vengono confrontate le curve granulometriche riferite ai differenti volumi di controllo nella sezione di testa alla fine della simulazione; per completezza in nero tratteggiato è rappresentata la curva granulometrica riferita all'istante iniziale che coincide con quella di **Fig. 3.52**.

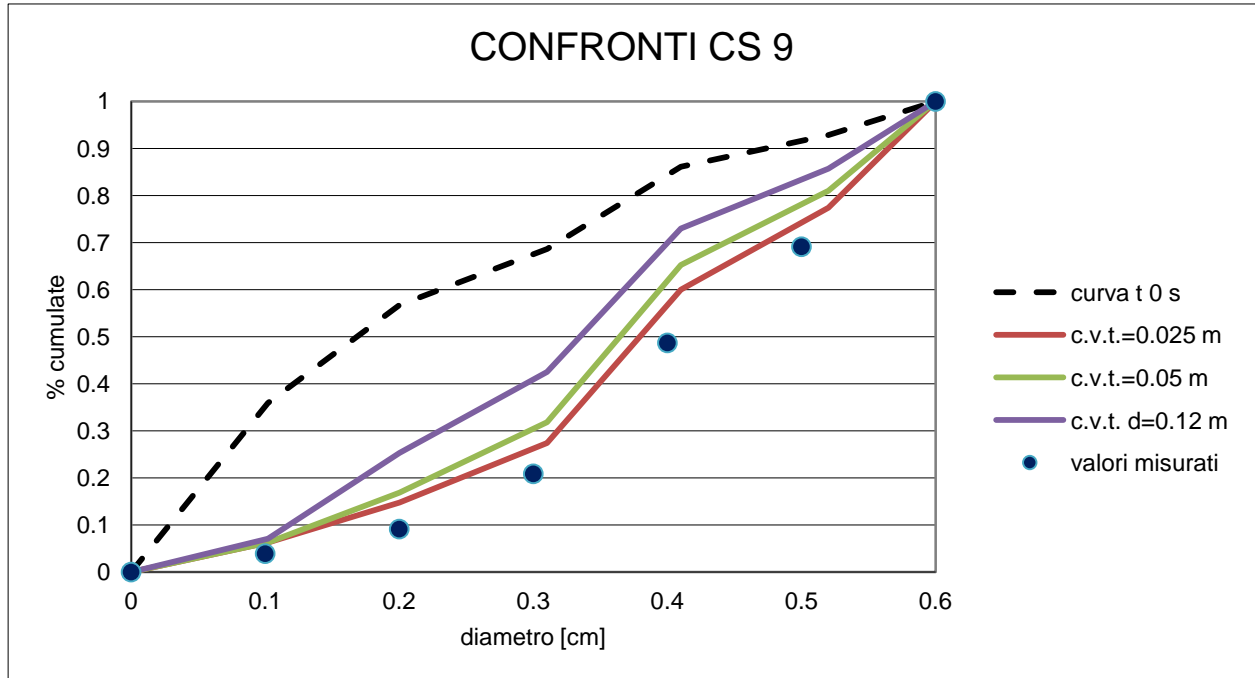


Fig. 3.55 – Differenti curve granulometriche al variare del volume di controllo (CS 9)

La tendenza generale dell'alveo all'aumentare della c.v.t. è quella di ridurre l'effetto del corazzamento, ed aumentare l'erosione, poiché aumenta la possibilità che sedimenti di diametro maggiore si spostino.

Risulta evidente che la miglior corrispondenza con le misure sperimentali si ha nel caso in cui il volume di controllo venga impostato a 0.025 m, ovvero pari alla dimensione media della curva granulometrica. Gli altri spessori testati restituiscono delle curve granulometriche che si discostano notevolmente dalla realtà, sia per il caso dello spessore doppio del d_{50} , che per uno spessore maggiore ancora (il quadruplo del diametro medio).

Lo stesso confronto viene proposto per la sezione centrale del canale sperimentale, seppur, per mancanza di adeguate misure sperimentali, non sia stato possibile validare tali risultati.

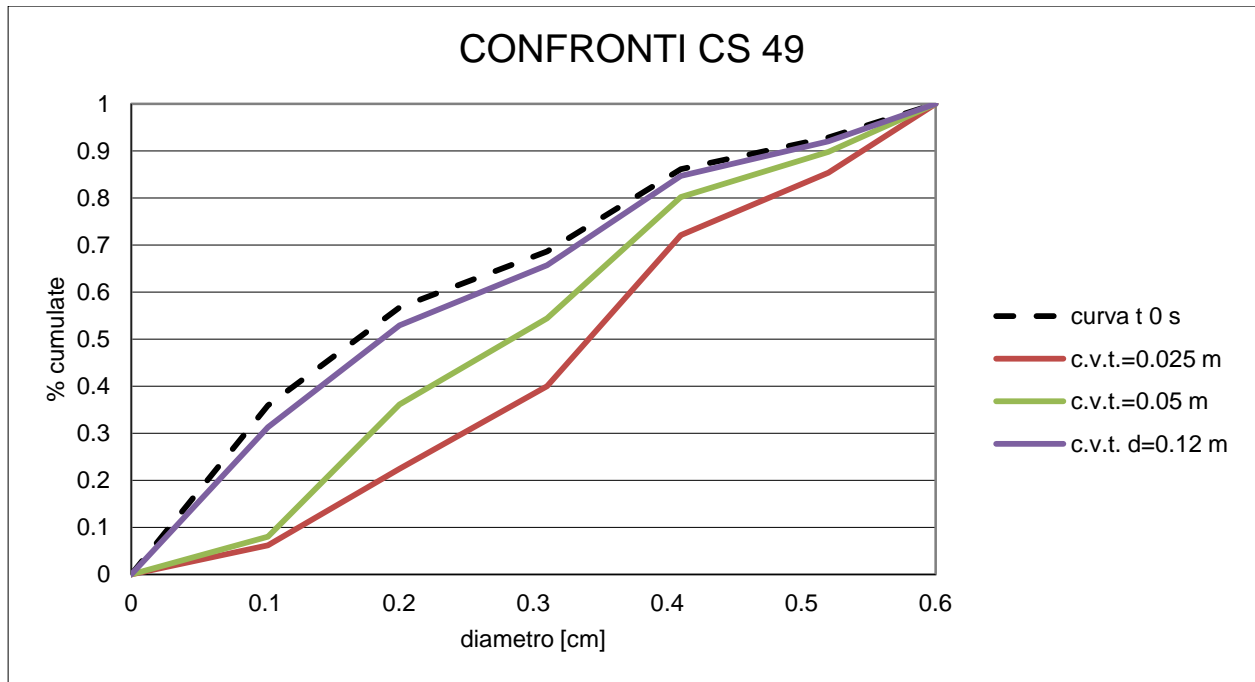


Fig. 3.56 – Differenti curve granulometriche al variare del volume di controllo (CS 49)

Nel prossimo paragrafo si vuole studiare nello specifico come lo spessore del volume di controllo influenzi i risultati delle simulazioni, con un ulteriore confronto tra i risultati elaborati dal codice Basement ed altre misure sperimentali.

3.3.3 Riproduzione di un esperimento di letteratura

Come appena detto, in questo paragrafo verrà descritta un'analisi sensitiva al volume di controllo che è un importante parametro di calibrazione nel caso di granulometria variabile, attraverso la ricostruzione, per mezzo del codice Basement, di un esperimento presentato in un articolo di Sklar et al, (2009) [16].

3.3.3.1 Descrizione dell'apparato sperimentale

Nell'articolo vengono mostrati i risultati di una serie di esperimenti di laboratorio nei quali si vuole studiare l'influenza dell'immissione di un volume di sedimenti e di una granulometria variabile sull'evoluzione topografica del letto di un fiume a valle di una diga.

Per riprodurre la realtà è stato creato un canale artificiale di 28 m, largo 0.86 metri e profondo 0.8 m realizzato nell'Università Berkeley (California, USA).

La portata viene mantenuta costante (205 m³/s) per studiare gli effetti delle variazioni spaziali e temporali in seguito all'immissione sedimenti senza le complicazioni introdotte da un'idrogramma non uniforme.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Dopo aver reso il letto corazzato, è stata simulata una serie di esperimenti che prevedono singole pulsazioni in cui si varia sia il volume immesso che la dimensione dei grani.

Run Type ^a	Large Coarse Run 7
Pulse grain size, D_{50} (mm)	8.0
Pulse mass (kg)	267
Pulse input feed rate (kg/h)	160
Sediment feed duration (min)	100
Total run duration (min)	1165
Bed slope (%)	0.41
Water depth (m)	0.23
Mean flow velocity (m/s)	1.06
Froude number	0.71
Mean bed shear stress ^c (Pa)	8.6
Prepulse bed grain size, D_{50} (mm)	11.9
Prepulse bed Shields stress, τ^*	0.053
Pulse sediment Shields stress, τ^*	0.073
Pulse transport stage, τ^*/τ_c^{*d}	1.6
Pulse grain paint color	dark blue

Fig. 3.57 – Elenco dei parametri in ingresso della simulazione 7

I risultati dell'esperimento sono mostrati nella figura sottostante, per diversi istanti temporali.

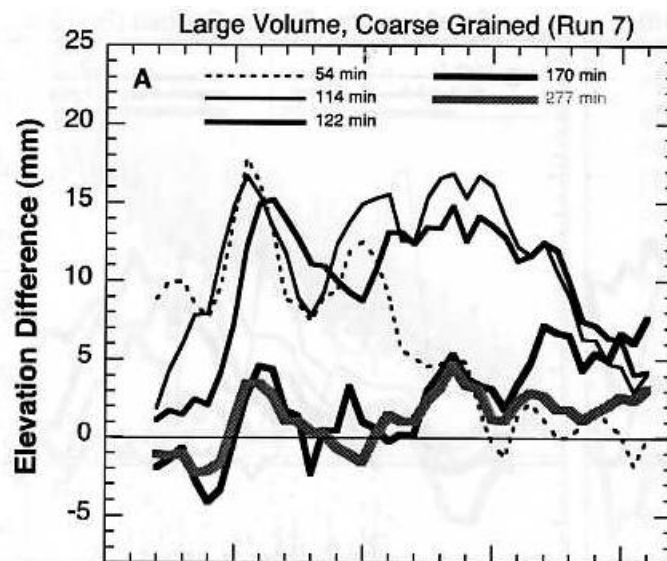


Fig. 3.58 – Risultati della simulazione 7 (Sklar et al)

Nel grafico sono mostrate le variazioni delle quote del fondo rispetto all'istante iniziale per cinque istanti temporali (elencati in legenda); si osserva che la tendenza del picco è quella di essere traslato verso valle; inoltre, coerentemente con la modalità di alimentazione solida (che viene interrotta a 100 minuti), dai 114 minuti in avanti, le variazioni della quota del fondo diminuiscono.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Nella presente Tesi si è voluto ricreare, con il programma Basement 2.2, la simulazione 7, che utilizza un'alimentazione di $16.67 \text{ m}^3/\text{s}$ per 100 min, un diametro dei sedimenti immessi di 8 mm ed un diametro dei sedimenti del fondo di 11.9 mm (**Fig. 3.57**). È da osservare che i diametri in questione si riferiscono a valori medi (d_{50}), mentre non sono state date informazioni sulla curva granulometrica.

Tra i parametri in ingresso del programma Basement c'è il coefficiente di scabrezza. Questo valore non è fornito direttamente nell'articolo, poiché si dà il numero di Shields τ^* . È stato quindi ricavato il coefficiente di scabrezza impostando il valore di τ^* (in funzione di K_s) a 0.053 che è il parametro di Shields riferito al fondo (vedi **Fig. 3.57**) e trovando il valore di K_s con la funzione ricerca obiettivo di Excel. I parametri in ingresso e i risultati sono mostrati nella seguente **Tab. 3.3**.

h	h di moto uniforme	0.23
B	Larghezza sezione	0.86
A	Area bagnata	0.198
Q_w	Portata	0.205
V	Velocità	1.04
R_H	Raggio Idraulico	0.15
S_0	Pendenza	0.0041
d_m	Diametro sedimenti	0.008
τ_{cr}	Incipiente movimento	0.047
S	ρ_s / ρ	2.65
S_f	$(v/K_s)^2 / R_H^{4/3}$	0.0064
τ_0	$r^*g^*R_H^*S_f$	9.436
τ^*	$t^* = \Theta = \tau_0 / (r^*g^*(s-1)*d_m)$	0.053
K_s	Scabrezza Strickler	45

Tab. 3.3 – Calcolo del coefficiente di scabrezza di Strickler

3.3.3.2 Digitalizzazione e primi risultati

Per avere un confronto tra i dati calcolati (con il programma Basement) e i dati misurati nell'esperimento, si è effettuata la digitalizzazione delle curve rappresentate in **Fig. 3.58**. A questo scopo è stato usato il programma *Engauge Digiter 4.1*, che crea automaticamente un foglio Excel nel quale sono salvate le coordinate x e y della curva desiderata (**Tab. 3.4**).

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

C.S	t = 3240 s	t = 6840 s	t = 7320 s	t = 10200 s	t = 16620 s
7	8.5	2	1	-2	-1
8	10	6	1.5	-1	-1
...
...
25	0	5	6.2	6.3	2.8
26	-0.2	3.2	4.4	8	3.7

Tab. 3.4 – Output della digitalizzazione

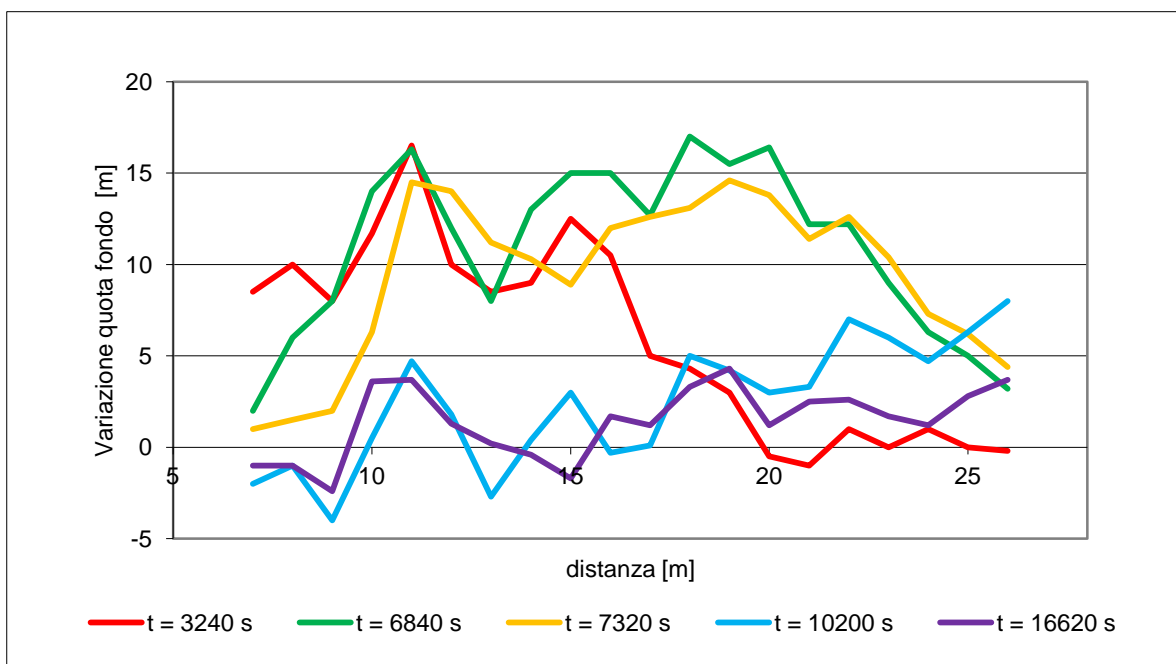


Fig.3.59 – Visualizzazione dei dati ottenuti dalla digitalizzazione

Come precedentemente affermato, lo spessore del volume di controllo (c.v.t.) è un parametro importante quando si eseguono delle simulazioni pluri-granulari. Si è scelto di usare inizialmente un valore di 0.02 m che corrisponde a circa il doppio del diametro maggiore.

In **Fig 3.60** sono mostrati i risultati ottenuti dalla simulazione, dove si rappresentano le variazioni della quota del fondo in funzione della distanza per gli stessi istanti temporali scelti nella simulazione 7 descritta nell'articolo.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

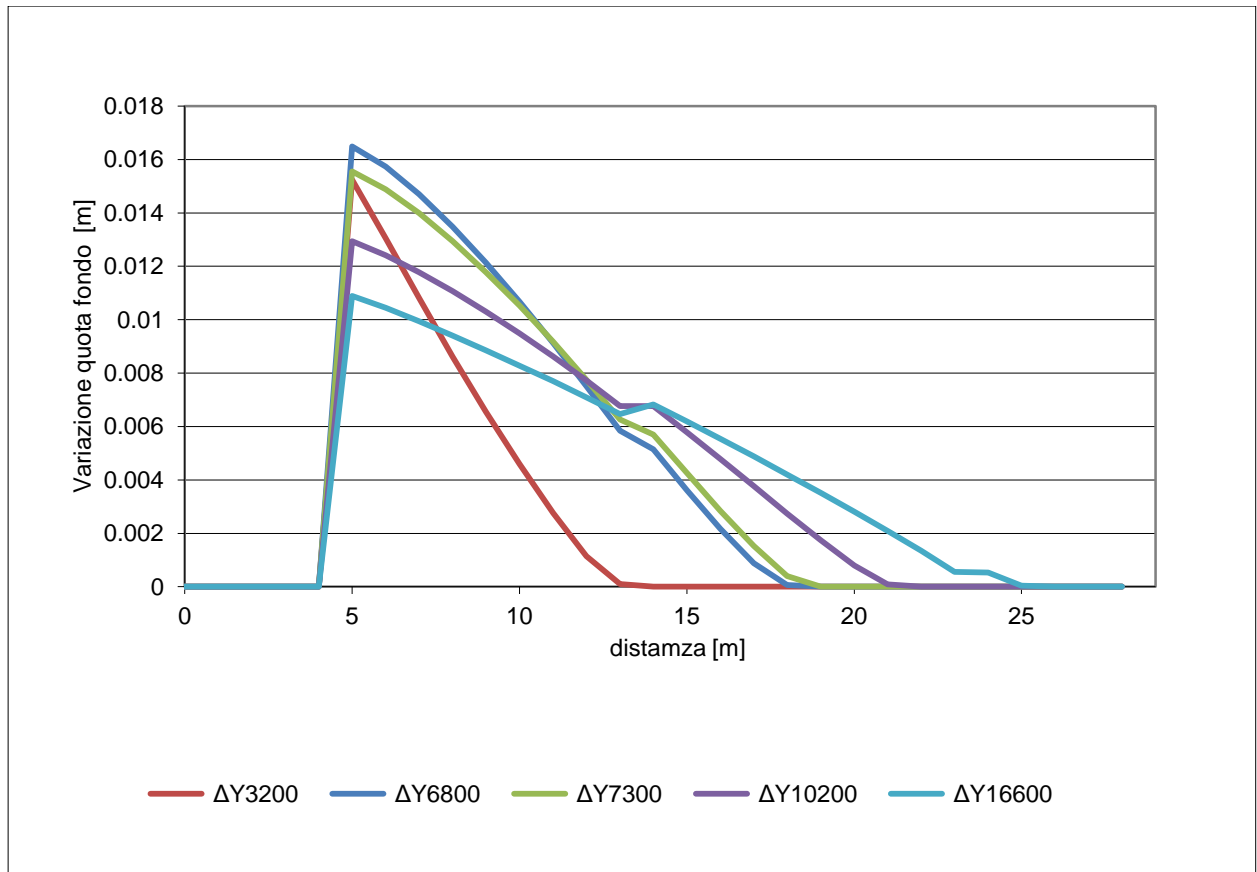


Fig.3.60 – Visualizzazione dei dati ottenuti con il programma Basement 2.2

Si osserva che il programma presenta il grosso limite di non spostare il picco di sedimenti a valle; infatti questo resta fermo a 5 metri e cioè alla sezione alla quale viene alimentato l'alveo. Per confrontare i valori misurati con quelli calcolati sono stati sovrapposti gli uni agli altri; di seguito vengono proposte tali sovrapposizioni per tutti gli istanti caratteristici. (Fig.3.61- Fig.3.65).

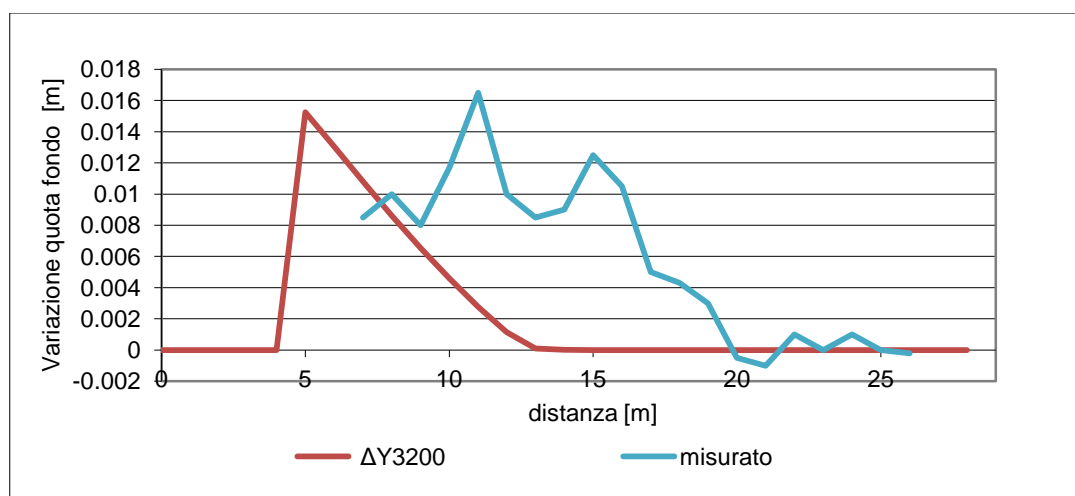


Fig.3.61 – Sovrapposizioni per il tempo 3200 s

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

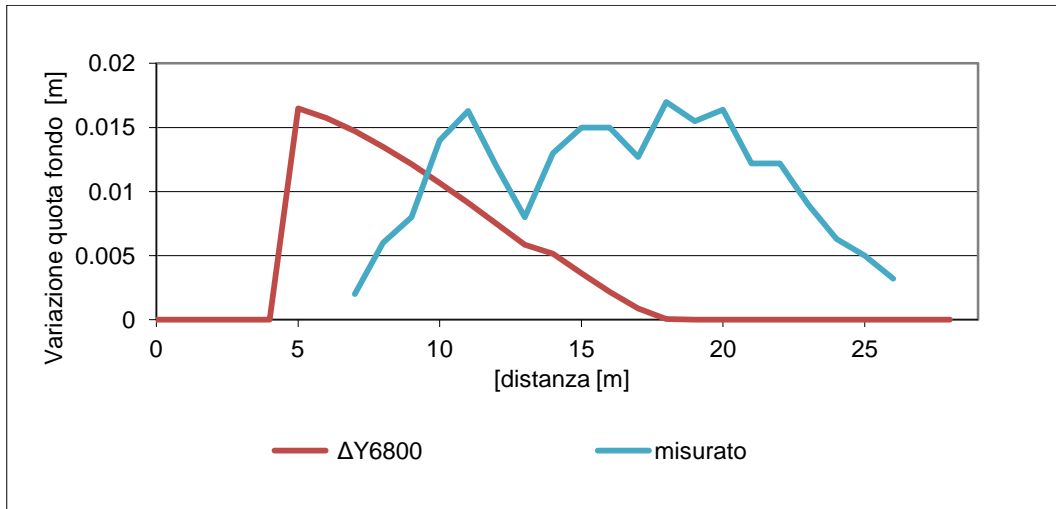


Fig.3.62 – Sovrapposizioni per il tempo 6800 s

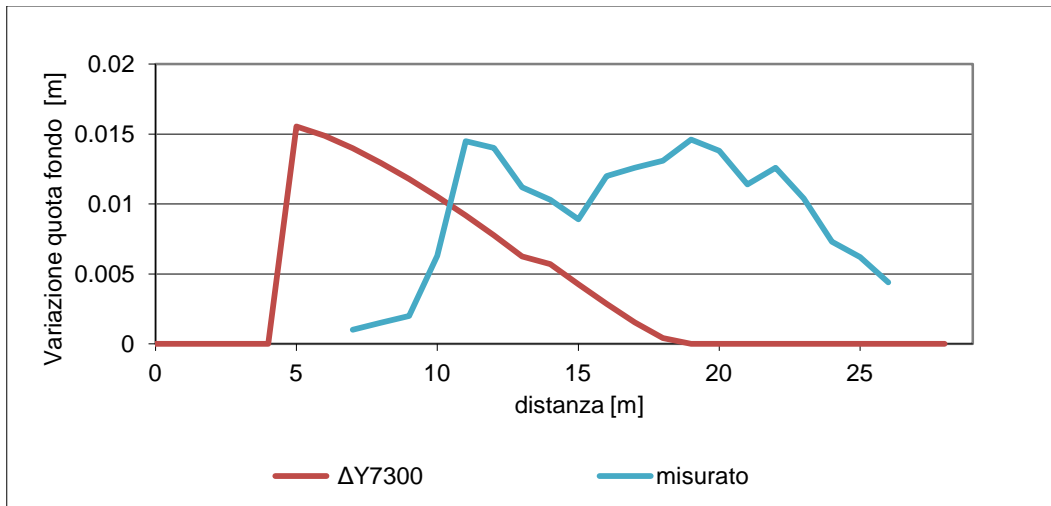


Fig.3.63 – Sovrapposizioni per il tempo 7300 s

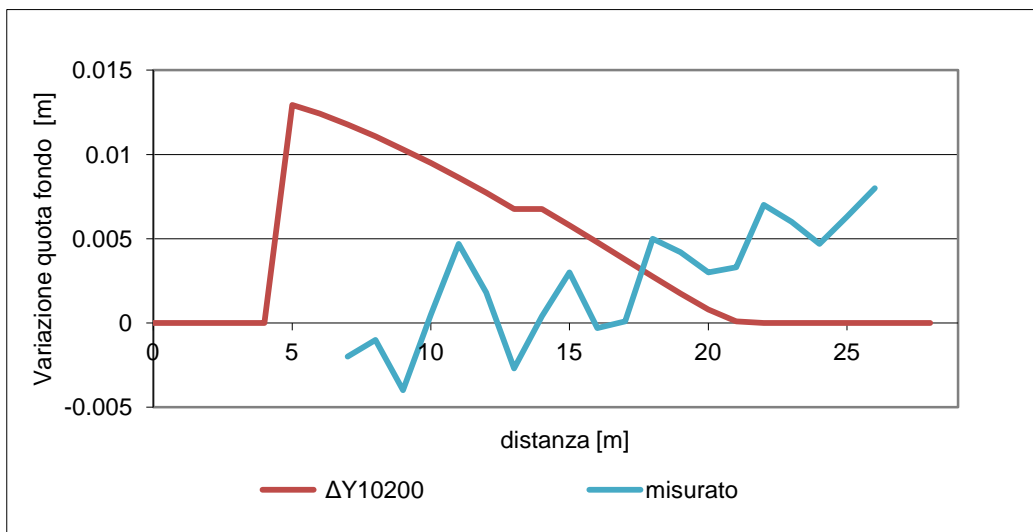


Fig.3.64 – Sovrapposizioni per il tempo 10200 s

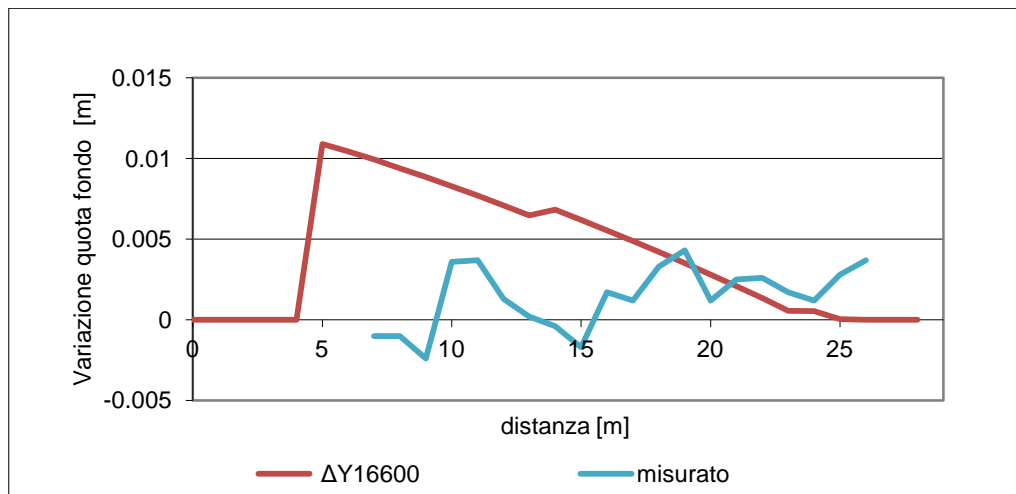


Fig.3.65 – Sovrapposizioni per il tempo 16600 s

Si osserva che il modello creato non riesce a riprodurre il caso test, infatti tutte le curve misurate sono traslate di alcuni metri rispetto a quelle calcolate. Se ne deduce che non c'è una buona correlazione dati misurati - dati calcolati; si osserva comunque un miglior comportamento in accumulo che in erosione dal momento che il programma Basement è in grado di riprodurre meglio le condizioni iniziali imposte (in questo caso una sovralimentazione che, quindi, genera accumulo) e fatica invece ad evolverle nel tempo e nello spazio.

3.3.3.3 Strategie per migliorare il modello

Per tentare di migliorare il modello sono state seguite 3 strategie:

- aumentare il tempo di simulazione (**Fig. 3.66**), per consentire alla corrente di attuare le modifiche che la porterebbero all'equilibrio;
- allontanare la condizione al contorno di valle (aumentando la lunghezza dell'alveo, creando una serie di sezioni fittizie) in modo che il risultato non sia condizionato da tale –non veritiera- condizione al contorno (**Fig. 3.67**);
- diminuire la dimensione dei sedimenti in ingresso (**Fig. 3.68**). Si ipotizza infatti che il programma Basement non riesca a riprodurre bene il trasporto solido quando i diametri dell'alimentazione e del fondo sono molto simili. Si è scelto di ridurre il diametro dei sedimenti immessi a 0.0008 mm (100 volte più piccoli), per vedere se in questo caso il picco si sposta a valle.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Bisogna sottolineare che si è scelto un diametro piccolo, ma comunque abbastanza grande per evitare che la modalità di trasporto sia sospesa. In particolare deve verificarsi la disequazione limite tale per cui:

$$\frac{V^*}{w_0} > \text{valore critico}$$

dove V^* è la velocità di taglio sul fondo e w_0 la velocità di deposizione.

Il *valore critico* è compreso tra 0.2 e 2; rappresenta quindi un range più elevato rispetto al caso del trasporto di fondo e per questo motivo risulta molto difficile definire la condizione di moto incipiente. In questa analisi è stato scelto il valore unitario.

Nella **Tab. 3.5** sono elencati i parametri in ingresso e i risultati dei calcoli.

Si ottiene che il diametro minimo per cui si ha trasporto di fondo è 0.008 mm. Il valore è stato trovato imponendo il rapporto $\frac{V^*}{w_0}$ a 1 e trovando il valore di d_m con la funzione “ricerca obiettivo”.

h	h di moto uniforme	0.23
B	Larghezza sezione	0.86
A	Area bagnata	0.1978
Q_w	Portata	0.205
V	Velocità	1.04
R_H	Raggio Idraulico	0.15
S_0	Pendenza	0.0041
d_m	Diametro sedimenti	0.0008
K_S	Scabrezza Strickler	43
Cd	Coefficiente di resistenza fluidodinamica	1.5
τ_0	Sforzo sul fondo	10.72926055
V^*	Velocità di taglio sul fondo	0.103582144
w_0	Velocità di deposizione	0.107286532
V^* / w_0	rapporto	0.96547201
$V^* / w_{0,cr}$	Valore critico	1

Tab. 3.5 – Calcolo del diametro minimo per cui si ha trasporto di fondo

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Si osserva nella seguente **Fig. 3.55** che aumentare il tempo di simulazione non porta i risultati aspettati in quanto il picco rimane sempre fisso a 5 m.

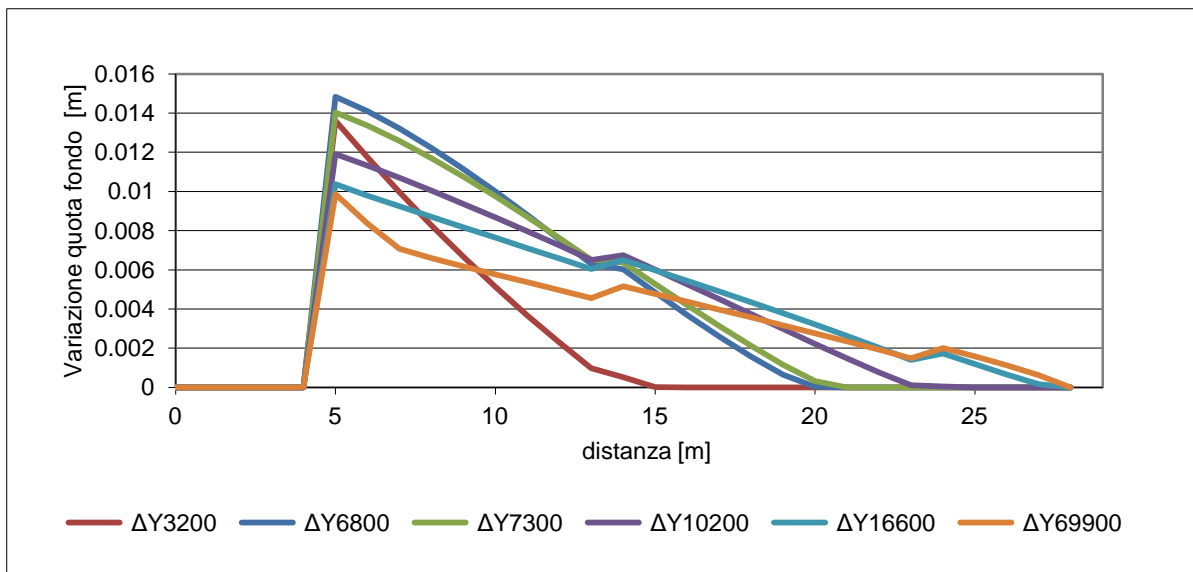


Fig. 3.66 – Tempo di simulazione aumentato

Anche nel caso in cui la condizione al contorno di valle venga allontanata, il picco non si sposta, ma si osserva che avendo rimosso la condizione al contorno a 25 metri, i valori delle sezioni finali non tendono più a zero.

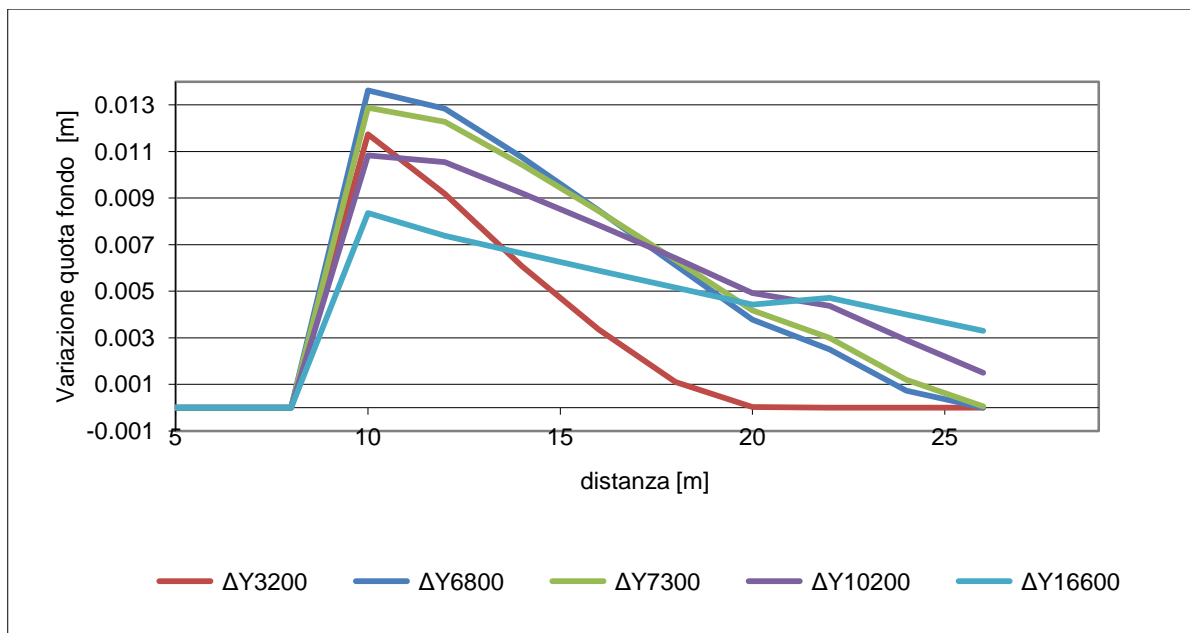


Fig. 3.67 – Condizione di valle allontanata

Finalmente nella simulazione con alimentazione sensibilmente più piccola del diametro del fondo, si osserva lo spostamento del picco, ad avvalorare l'ipotesi che il programma è in grado di

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

simulare bene questo fenomeno nel caso in cui la granulometria di fondo e quella in ingresso siano molto differenti (in questo caso di circa due ordini di grandezza).

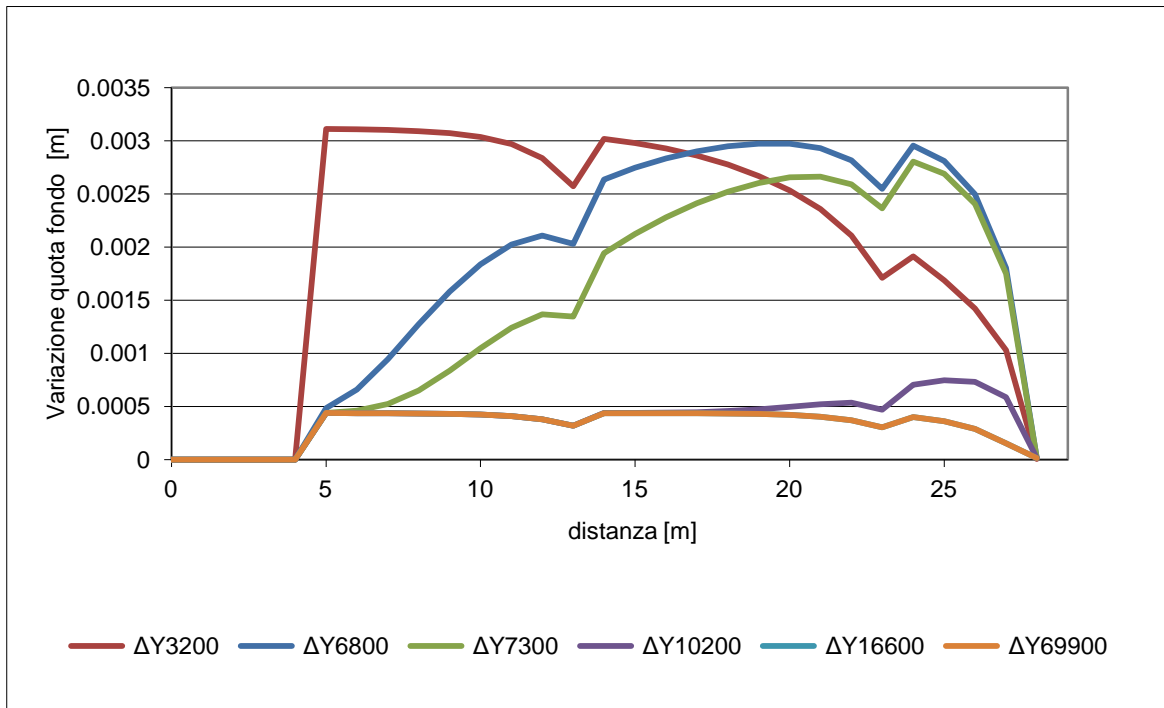


Fig. 3.68 – Apporto solido rimpicciolito

Infine si sono apportate tutte e tre le modifiche appena descritte in un'unica simulazione, che risulta quindi più lunga, con la condizione al contorno di valle più distante e con dei sedimenti immessi molto più piccoli del fondo.

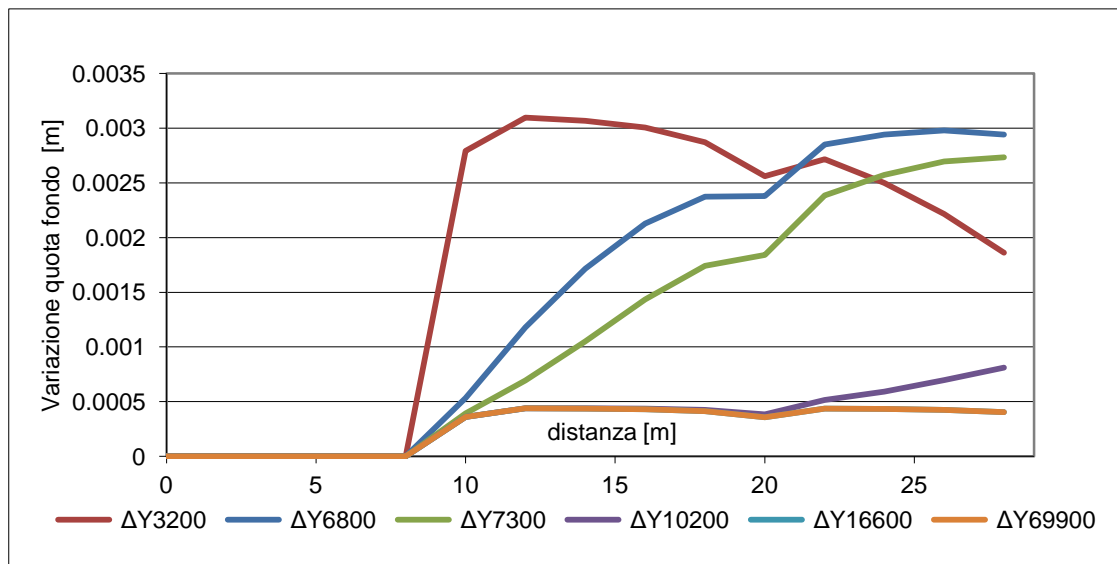


Fig. 3.69– Esperimento Sklar con modifiche apportate

3.3.3.4 Analisi sensitiva al volume di controllo

Poiché il caso test non può essere usato per validare il modello, si è deciso di fare un'analisi sensitiva al volume di controllo; successivamente si sceglierà quel valore per il quale si ottiene una migliore correlazione tra valori misurati e calcolati.

Come primo tentativo si è scelto un valore molto piccolo, e cioè di 0.001 m (**Fig.3.70**).

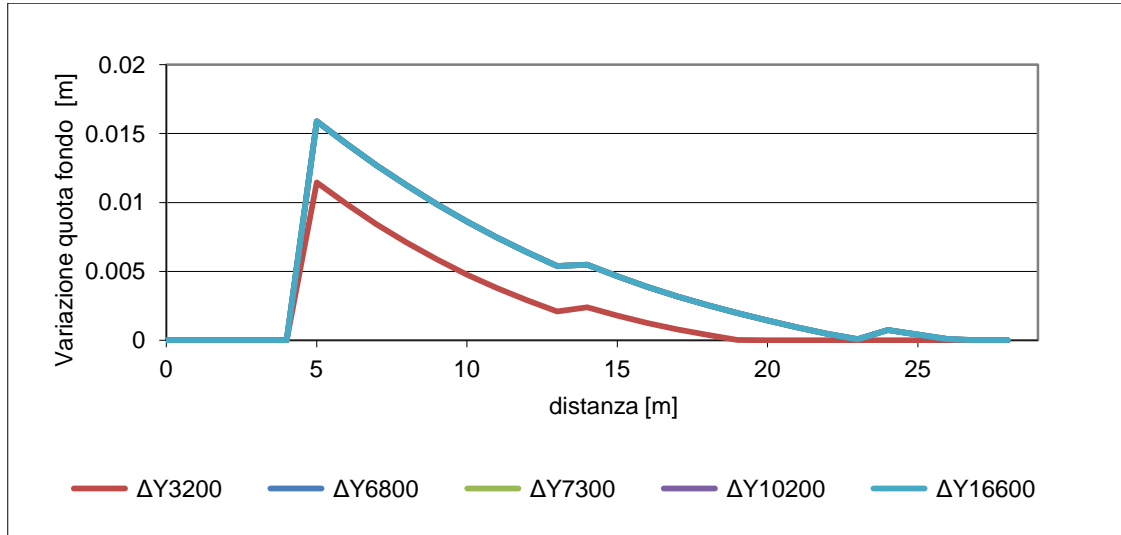


Fig.3.70 – Risultati per c.v.t di 0.0001 m

Si osserva che con un valore così piccolo la simulazione non dà i risultati aspettati in quanto la quota del fondo dopo un certo istante rimane costante, infatti tutte le curve coincidono.

Sono stati poi scelti un valore di c.v.t. di 0.01 m e cioè pari a circa il diametro dei sassi del fondo (**Fig. 3.71**) e un altro di 0.2 m cioè 20 volte la granulometria del fondo (**Fig. 3.72**).

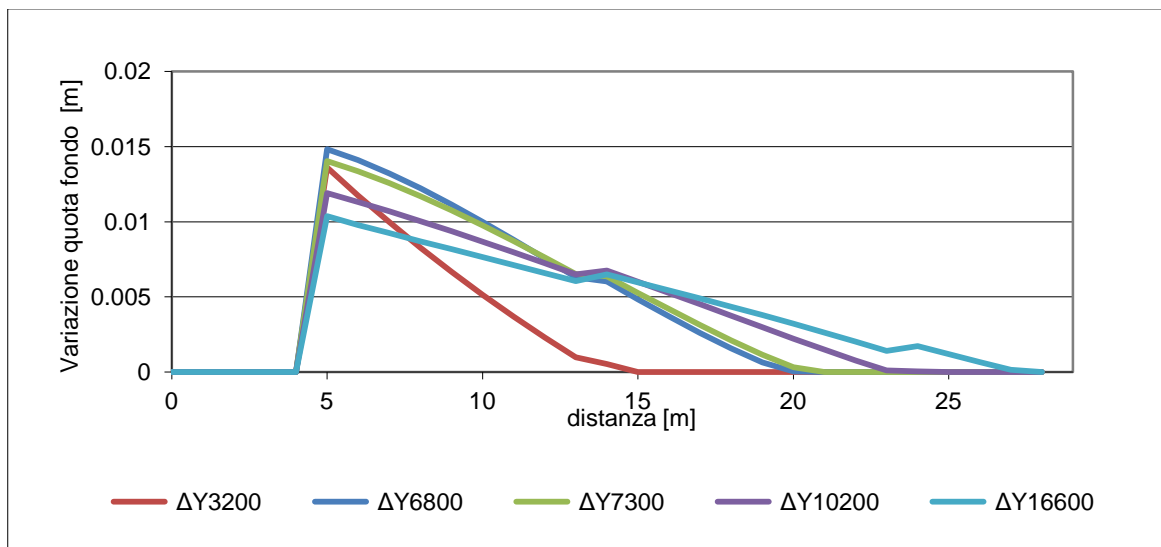
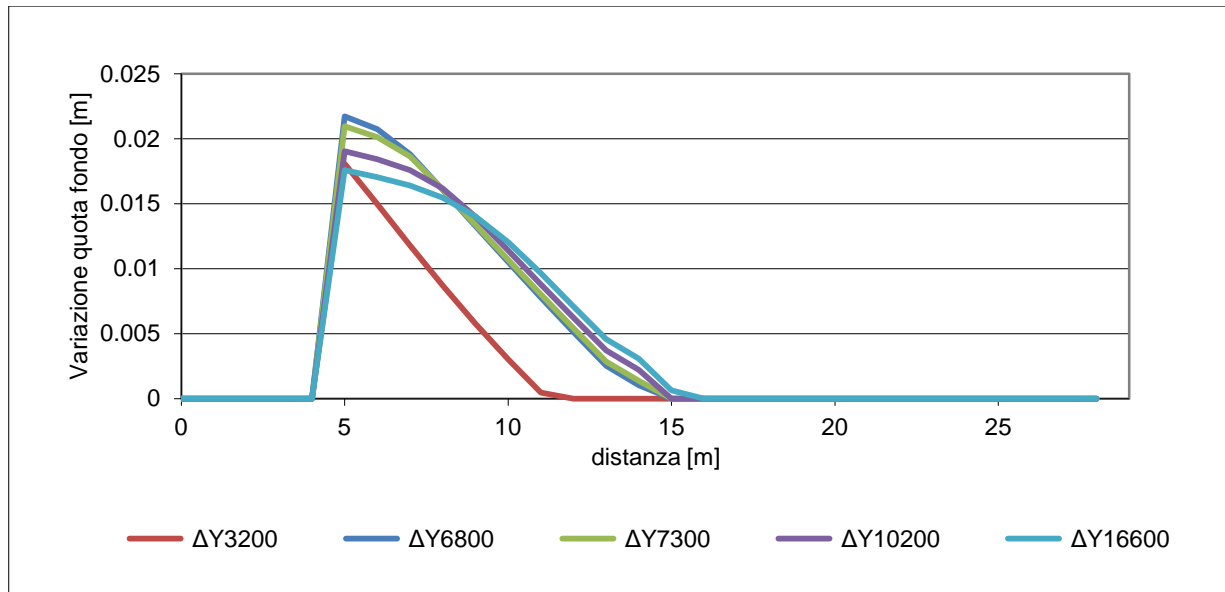


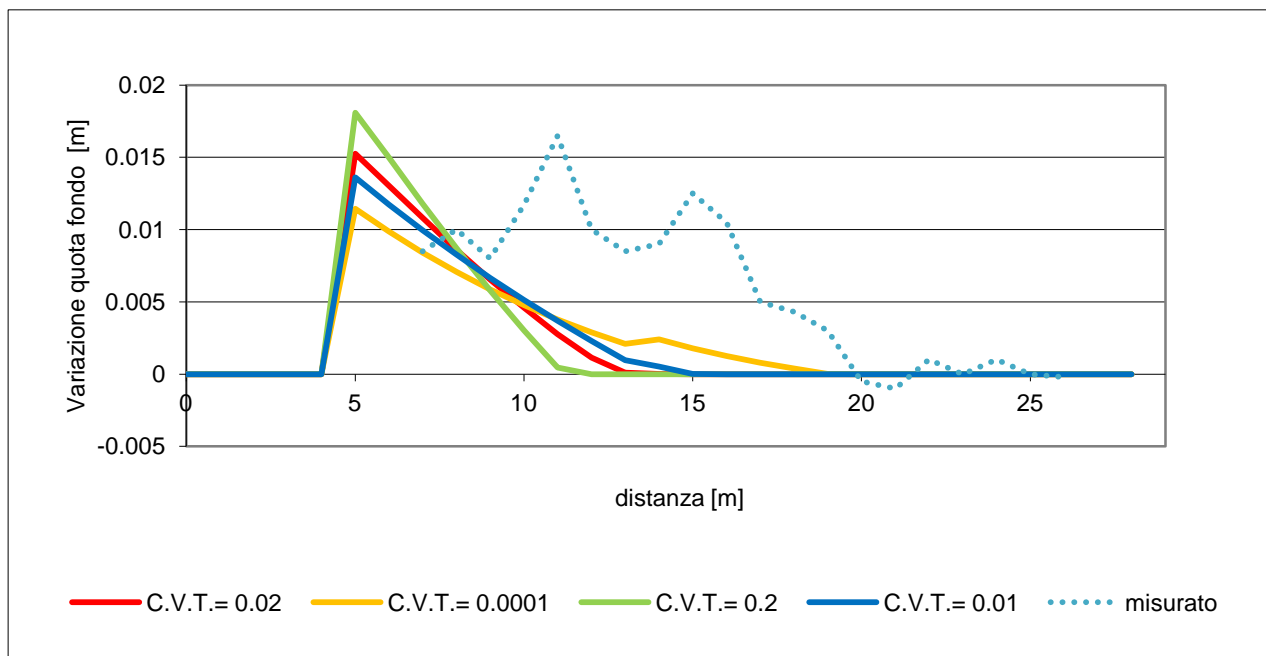
Fig. 3.71 – Risultati per c.v.t di 0.01 m

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO



È da notare che anche in questi casi il picco non viene spostato ma rimane fisso a 5 metri, la variazione del volume di controllo è quindi influente da questo punto di vista.

Nel grafico seguente si mettono a confronto i risultati ottenuti per le diverse simulazioni variando il volume di controllo con la curva dei valori misurati (i risultati sono riferiti al tempo 3200 s).



Si osserva che più il c.v.t. aumenta, più il valore del picco aumenta; inoltre le variazioni del fondo si esauriscono in tempo più breve.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Per avere un indice della bontà di approssimazione dell'andamento dell'alveo, nel grafico seguente (**Fig. 3.74**) sono plottati lungo l'asse delle x i valori misurati, lungo l'asse delle y i valori calcolati. La maggior parte dei valori si trova sotto la bisettrice del primo quadrante, ad indicare che i valori misurati sono nel complesso maggiori di quelli calcolati, fatto che si osservava già nel grafico di **Fig. 3.73**.

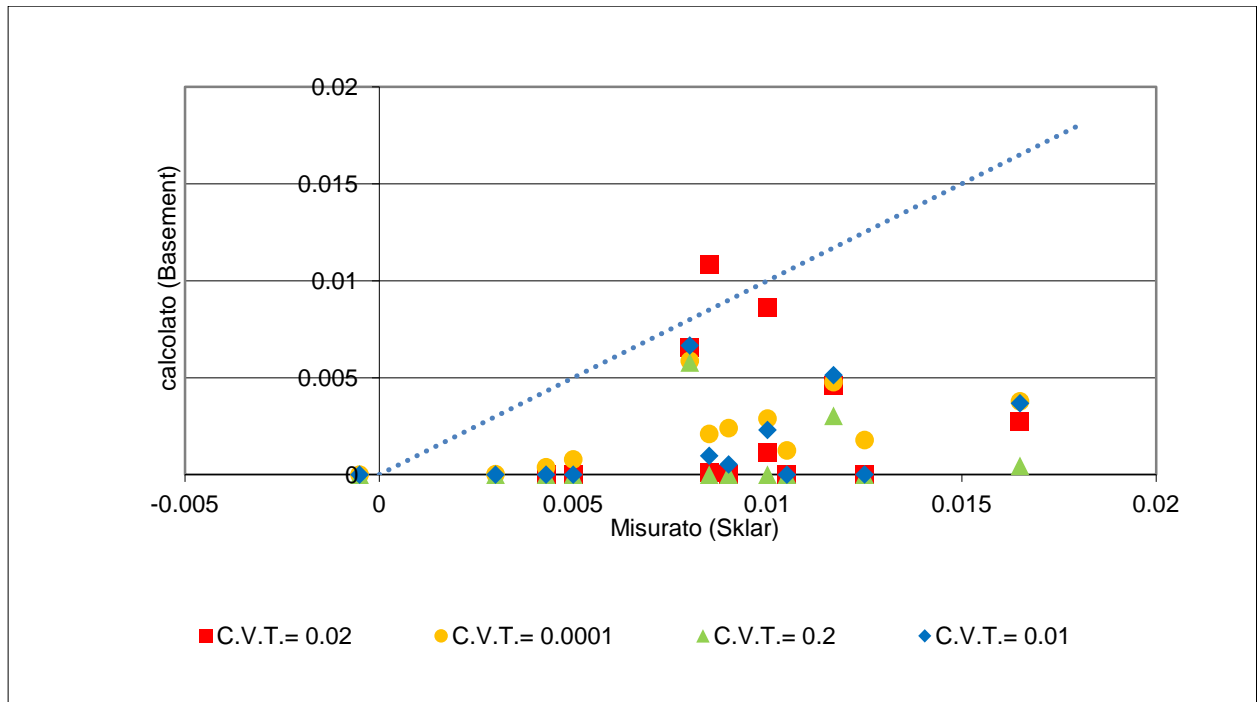


Fig. 3.74 – Correlazione tra valori misurati e calcolati al variare del c.v.t.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

La stessa analisi può essere fatta per un tempo successivo: di 10200 s, dove parte l'analisi in laboratorio mostra parte del fondo in erosione.

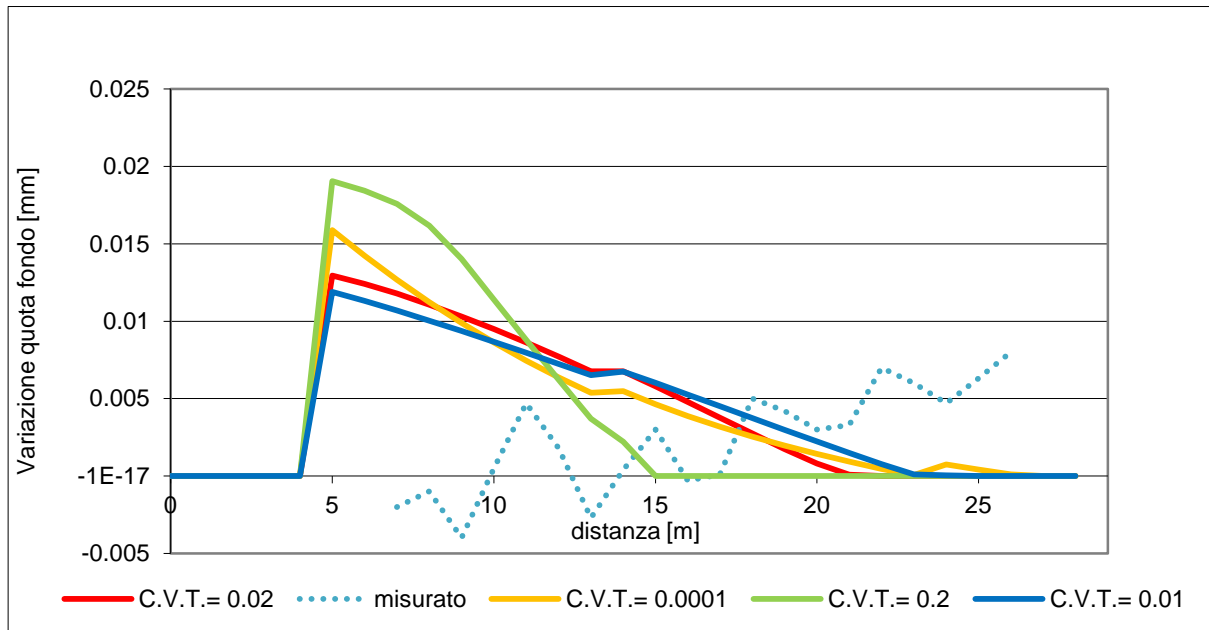


Fig. 3.75 – Analisi di sensitività al volume di controllo per un tempo di 10200 s

Come precedentemente affermato, in caso di erosione il modello tende a sovrastimare il quantitativo di sedimenti depositati; si può lo stesso valutare il grado di correlazione di questi valori nel seguente grafico.

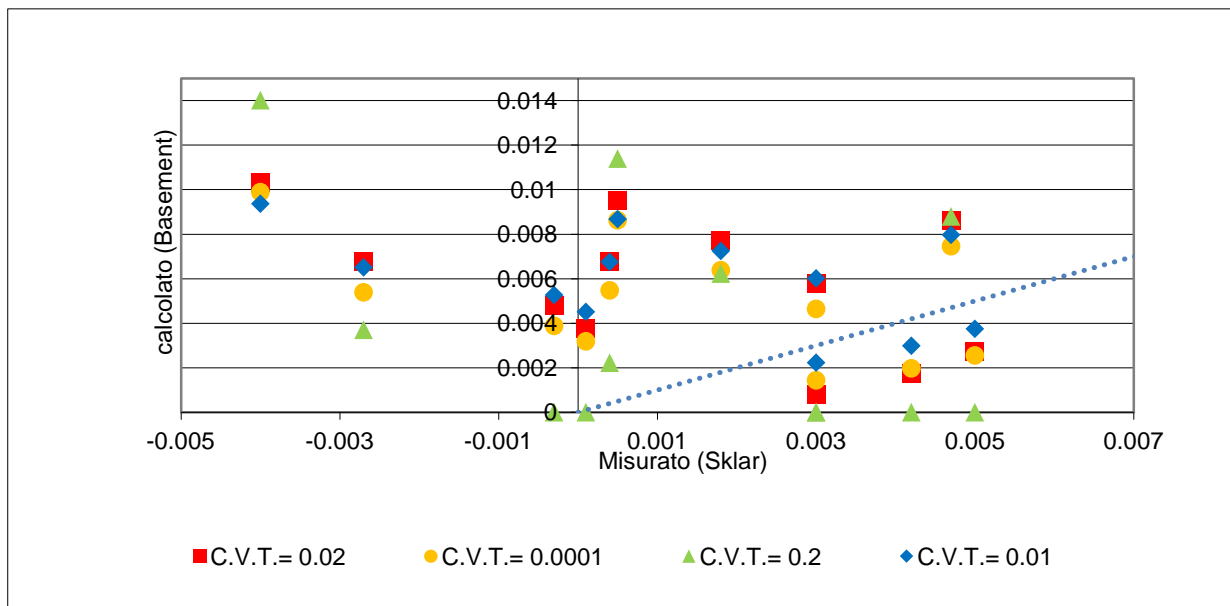


Fig. 3.76 – Correlazione tra valori misurati e calcolati al variare del c.v.t.

Si osserva che a differenza del precedente caso, i valori si trovano sopra alla bisettrice, a conferma del fatto che i dati calcolati dal Basement sono di gran lunga superiori a quelli misurati.

3.3.3.5 Conclusioni

La riproduzione fedele di un esperimento non è sempre possibile, in quanto entrano in gioco numerosi parametri che sono difficili da quantificare e riprodurre. Nel caso in esame, il modello riprodotto con il programma Basement, non è riuscito né a riprodurre lo spostamento del picco a valle, né la posizione del picco.

La scelta iniziale di usare questo esperimento per validare il nostro modello è stata abbandonata per compiere un'analisi di sensitività variando sia parametri geometrici (aumento della lunghezza del canale), che fisici (diminuzione del diametro dei sedimenti in ingresso) che del modello (aumento del tempo di simulazione e variazione dello spessore del volume di controllo).

3.3.4 Applicazione al caso test

Dopo aver valutato la capacità del codice di riprodurre i risultati sperimentali proposti nei due precedenti paragrafi, si vuole ora applicare lo studio della granulometria disomogenea al caso test studiato in questo capitolo che aveva le seguenti caratteristiche: lunghezza 1 Km, larghezza delle sezioni 20 m, portata liquida in ingresso 200 m³/s e pendenza 0.5 %.

Come prima cosa, viene calcolato il minimo diametro per cui il fondo può essere definito corazzato, sotto le condizioni idrauliche già descritte all'inizio di questo capitolo, ovvero il diametro massimo che la corrente riesce a trasportare.

I risultati di tale analisi sono riassunti nella sottostante **Tab.3.6**.

Diametro sedimenti	Portata solida
d_m [cm]	Q_s [m ³ /s]
4	3.5
25	2
50	0.6
65	0.07
0.6969	≈0
70	-
80	-

Tab. 3.6 – Calcolo del minore diametro immobile

3.3.4.1 Simulazioni su fondo corazzato

Per il primo set di simulazioni è stato scelto un caso di alimentazione con sedimenti via via più grossolani su un fondo corazzato, ovvero caratterizzato da un diametro (800 mm) che alle condizioni di simulazione risulta essere immobile. Il primo diametro in ingresso è di 400 mm,

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

che verrà definito con la notazione d400 in seguito, analogamente a quanto verrà fatto per gli altri diametri (d20, d400, d800 e d1200 corrisponderanno a sedimenti il cui diametro sarà rispettivamente si 20 mm, 40 cm, 80 cm, 1.2 m).

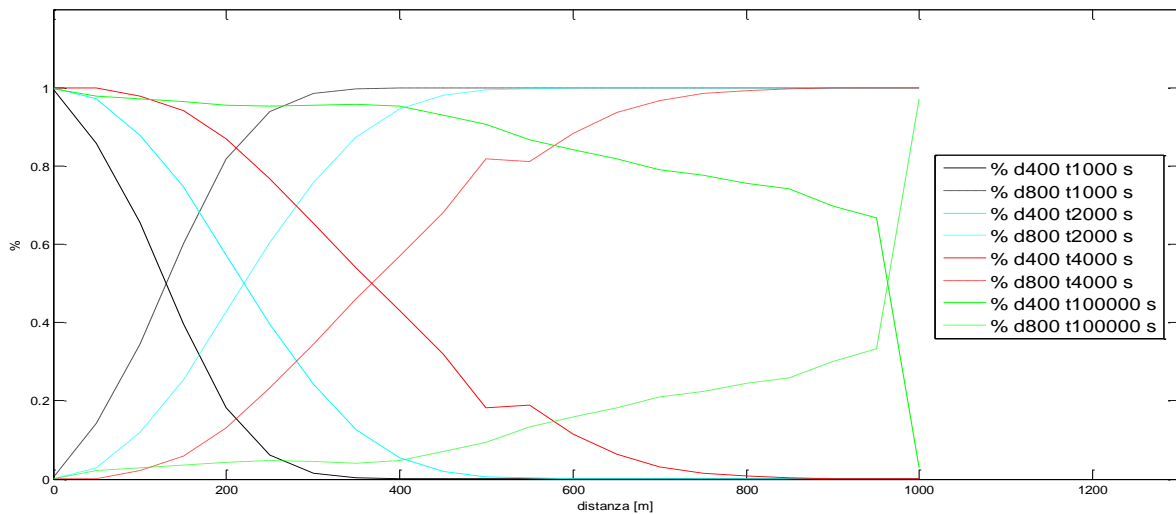


Fig. 3.77 – Diametro 400 mm su alveo corazzato

L' aumento della percentuale del d400 all' aumentare dell' istante di simulazione, indicativa della velocità di propagazione dei sedimenti in ingresso, è piuttosto rapido.

Viene confermata tale ipotesi di velocità crescente all' aumentare della differenza di diametro tra i sedimenti di fondo ed in ingresso, riportando il caso di diametro 800 mm su un fondo di 800 mm (in **Fig. 3.78**).

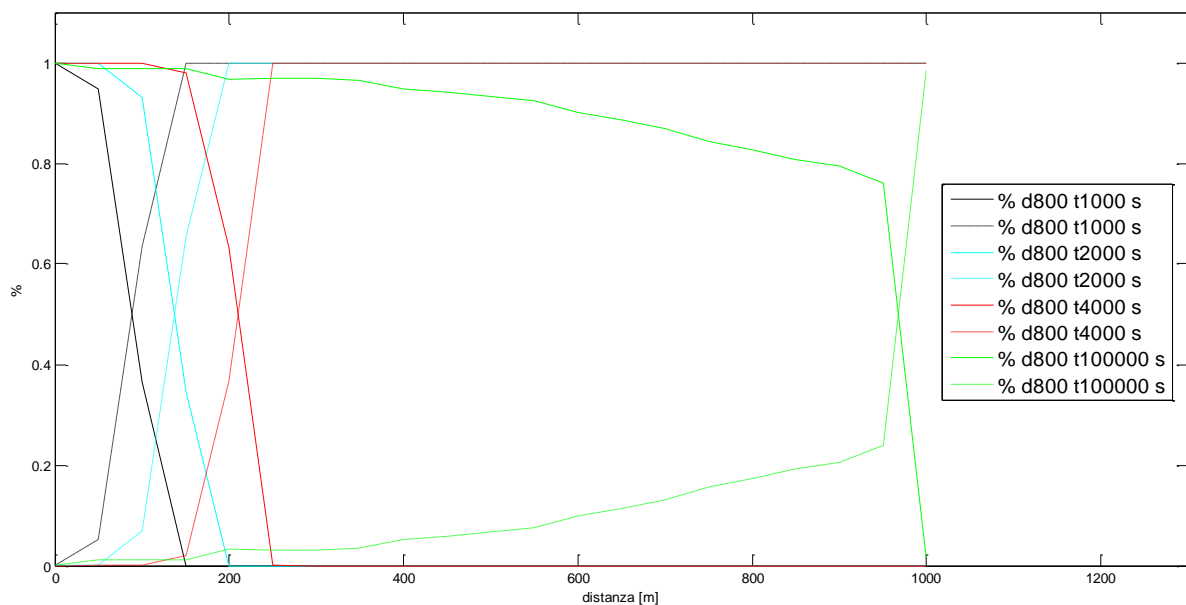


Fig. 3.78 – Diametro 800 mm su alveo corazzato

Qui i sedimenti imposti sono grandi come il fondo, ed in particolare entrambi immobili. Teoricamente non si dovrebbe muovere nulla. Ma i sedimenti imposti a monte ed

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

immediatamente accumulati contribuiscono ad aumentare la pendenza e conseguentemente la capacità di trasporto e quindi anche i sedimenti di 800 mm di diametro vengono portati a valle (molto lentamente, come visibile in **Fig. 3.79**, nella quale è rappresentato il profilo dell'alveo a 5000 s, a conferma dell'ipotesi).

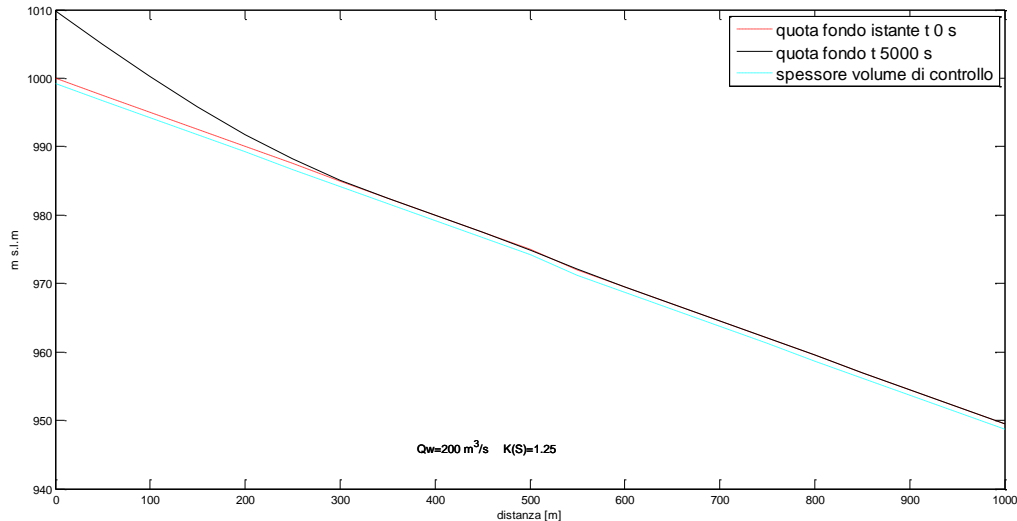


Fig. 3.79 – Diametro 800 mm su alveo corazzato

Infine viene fatta un'ulteriore forzatura, ovvero inserire come alimentazione esterna un diametro ancora maggiore (1200 mm, quasi il doppio rispetto al minimo diametro immobile); tale simulazione potrebbe essere ad esempio paragonata ad una rock-fall che interessa il bacino. Si fa notare come la velocità di propagazione dei sedimenti inseriti sia ulteriormente diminuita.

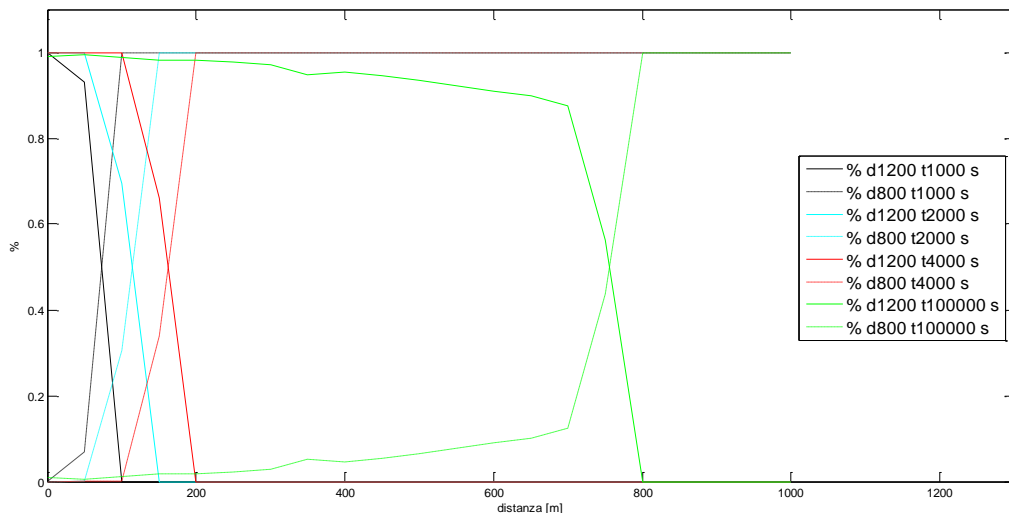


Fig. 3.80 – Diametro 1200 mm su alveo corazzato

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

3.3.4.2 Simulazioni su fondo non corazzato

Nel precedente paragrafo si è giunti alla conclusione che la velocità con cui i sedimenti imposti a monte vengono portati a valle è tanto maggiore quanto minore è il diametro immesso rispetto al diametro del fondo. Nei prossimi tre grafici proposti si vuole validare tale ipotesi anche per un caso di alveo non corazzato (costituito da un fondo di 400 mm di diametro che, come visibile in **Fig. 3.81** risulta essere mobile).

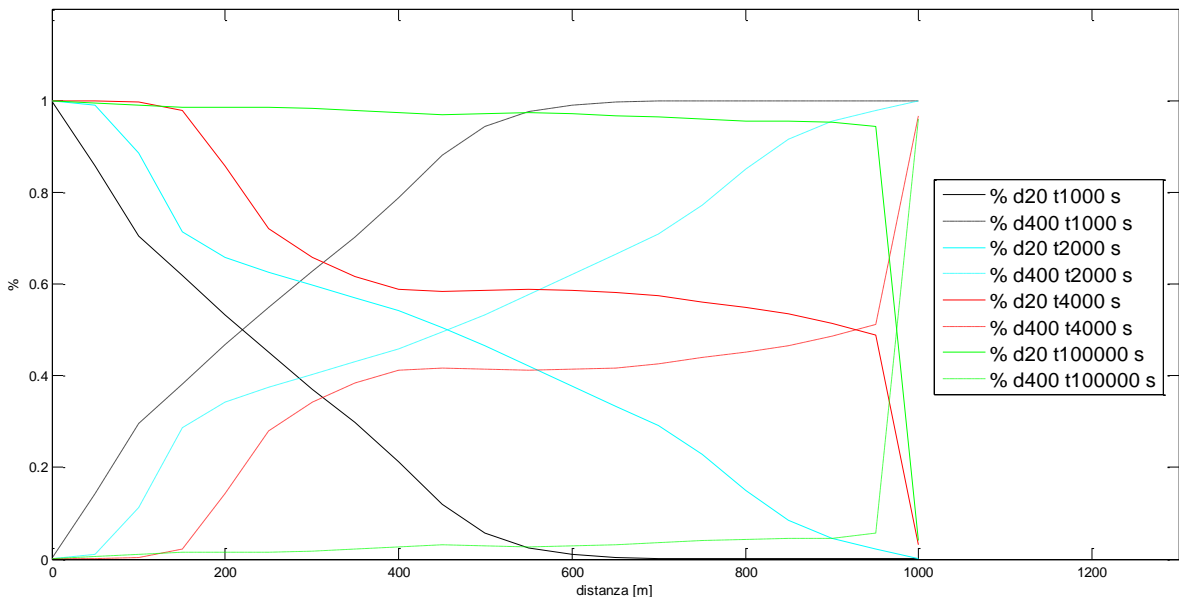


Fig. 3.81 – Diametro 20 mm su alveo non corazzato (400 mm)

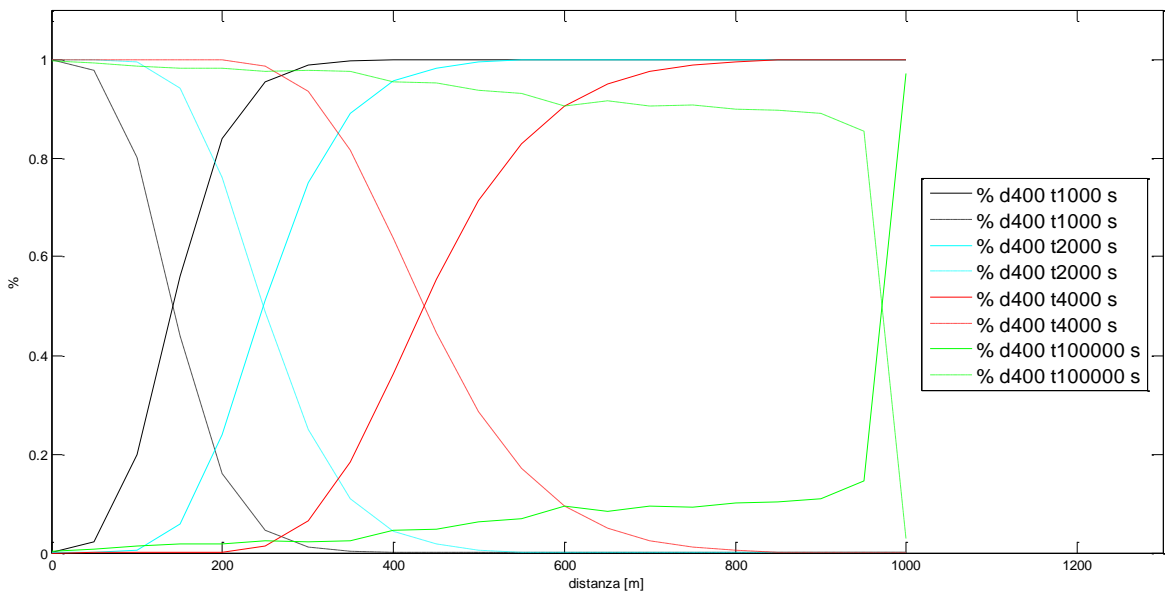


Fig. 3.82 – Diametro 400 mm su alveo non corazzato (400 mm)

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

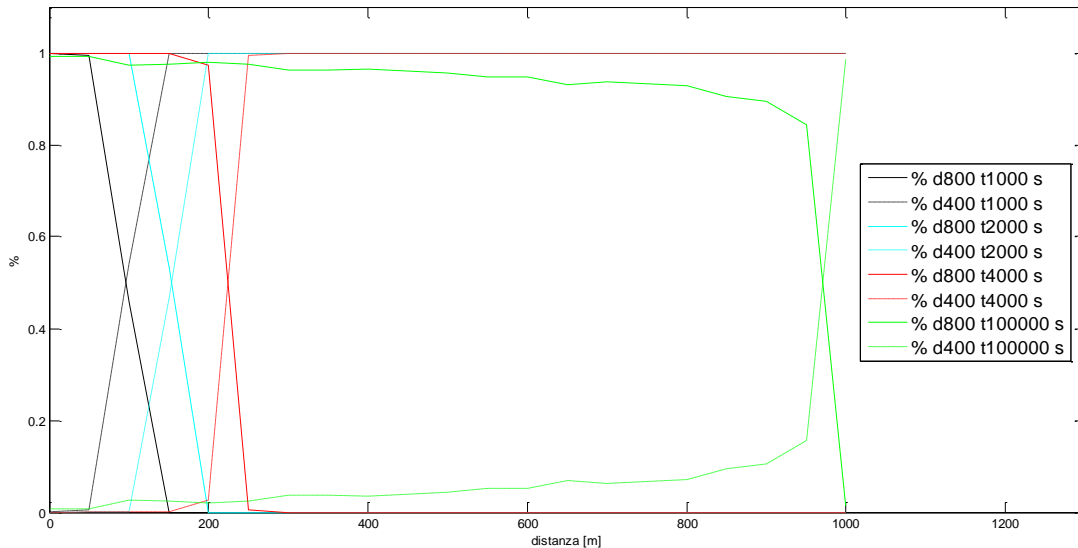


Fig. 3.83 – Diametro 800 mm su alveo non corazzato (400 mm)

Anche nel caso di alimentazione su fondo non corazzato, la velocità di propagazione dei sedimenti in ingresso è inversamente proporzionale all'aumento del diametro, a sottolineare che la composizione del fondo è meno influente della composizione dei sedimenti immessi (in questo specifico caso, che è sovralimentato).

3.3.4.3 Sensibilità al volume di controllo

Di seguito viene proposto uno studio sulle variazioni dei risultati al variare del control volume thickness che, come visto nei precedenti paragrafi, è un parametro a cui la simulazione è molto sensibile. Vengono proposti tre casi rappresentativi di simulazioni, ovvero quello di alimentazione mobile (diametro della Q_s di 400 mm), quello di alimentazione immobile (800 mm) ed infine quello in erosione. Lo spessore dei volumi di controllo immessi per tutte e tre le simulazioni è schematizzato in **Tab. 3.7**, nella prossima pagina.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

	Diametro fondo	Diametro Q_s	Spessore del Volume di Controllo	
Q_s mobile	20 mm	400 mm	0.04 m	C.V.T. doppio del diametro del fondo
			0.4 m	C.V.T. pari al diametro di Q_s
			0.8 m	C.V.T. doppio del diametro di Q_s
Q_s immobile	20 mm	800 mm	0.04 m	C.V.T. doppio del diametro del fondo
			0.8 m	C.V.T. pari al diametro di Q_s
			1.6 m	C.V.T. doppio del diametro di Q_s
Erosione	20 mm	--	0.000001m	C.V.T. nullo
			0.006 m	C.V.T. quasi nullo
			0.01 m	C.V.T. metà del diametro del fondo
			0.02 m	C.V.T. pari al diametro del fondo
			0.025 m	C.V.T. leggerm. superiore al fondo
			0.03 m	C.V.T. superiore al diametro del fondo

Tab. 3. 7 – Schema di sintesi per la simulazioni sulla sensitività al c.v.t.

Questo primo grafico (400 mm su 20 mm di fondo) mette in evidenza il fatto che nel caso in accumulo, per il caso test presentato negli altri paragrafi, il risultato finale è indipendente dallo spessore del volume di controllo.

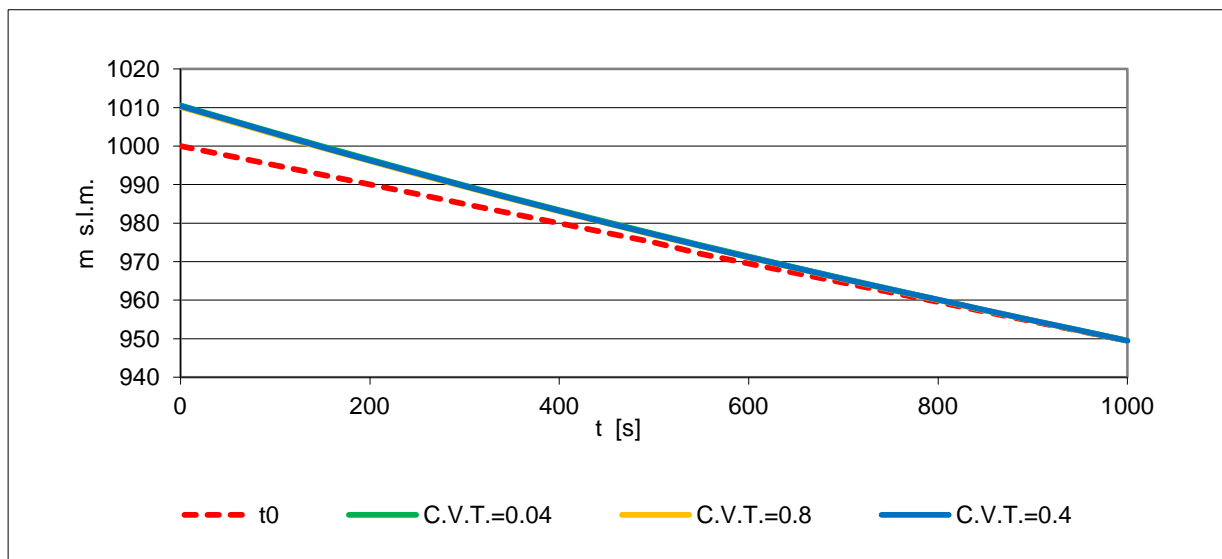


Fig. 3.84 – sensitività al c.v.t. per alimentazione mobile

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Tale ipotesi di comportamento è verificata nel caso di portata solida immessa costituita da un diametro medio immobile (800 mm), nel quale grafico comparativo è evidente l'indipendenza praticamente totale dal volume di controllo.

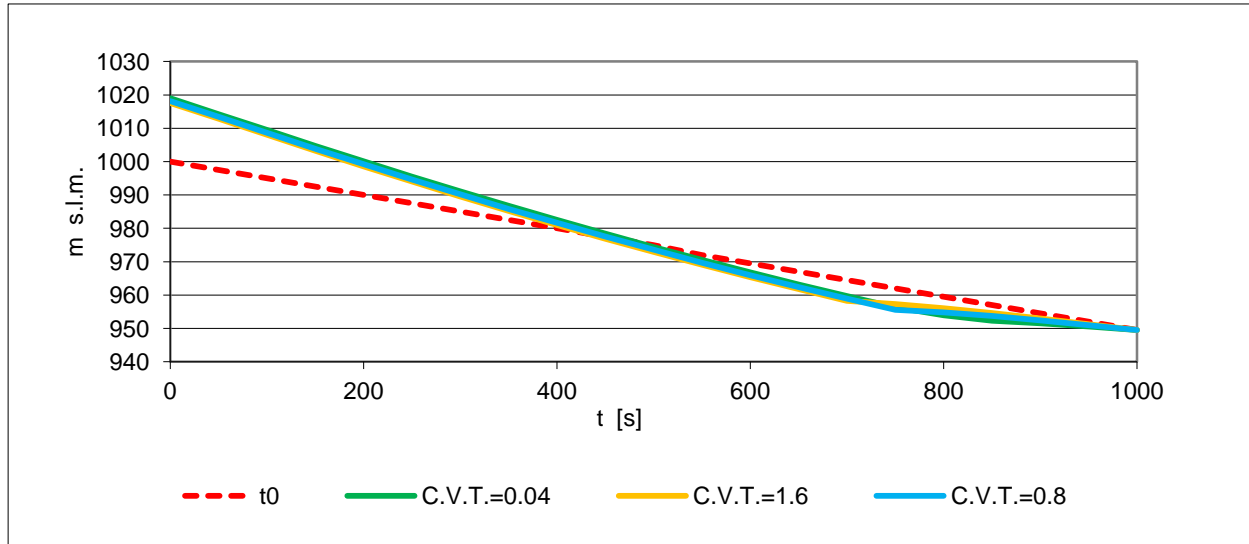


Fig. 3.85 – sensibilità al c.v.t. per alimentazione immobile

Si sottolinea che, come già osservato in precedenza, per esempio nel **Par. 3.3.4.1**, ad un diametro maggiore inserito come Q_s corrisponde un maggior incremento della quota del fondo, visibile confrontando l'altezza dei sedimenti nelle sezioni iniziali di **Fig. 3.84** e **Fig. 3.85**, che sono rispettivamente di 1010 m e 1020 m s.l.m.

Per il caso appena presentato di alimentazione immobile, si può apprezzare una lieve dipendenza dalla c.v.t. nelle sezioni di chiusura a causa del fatto che in questo tratto la corrente risulta essere sottoalimentata, e quindi l'alveo è in erosione (vedi **Fig. 3.86**).

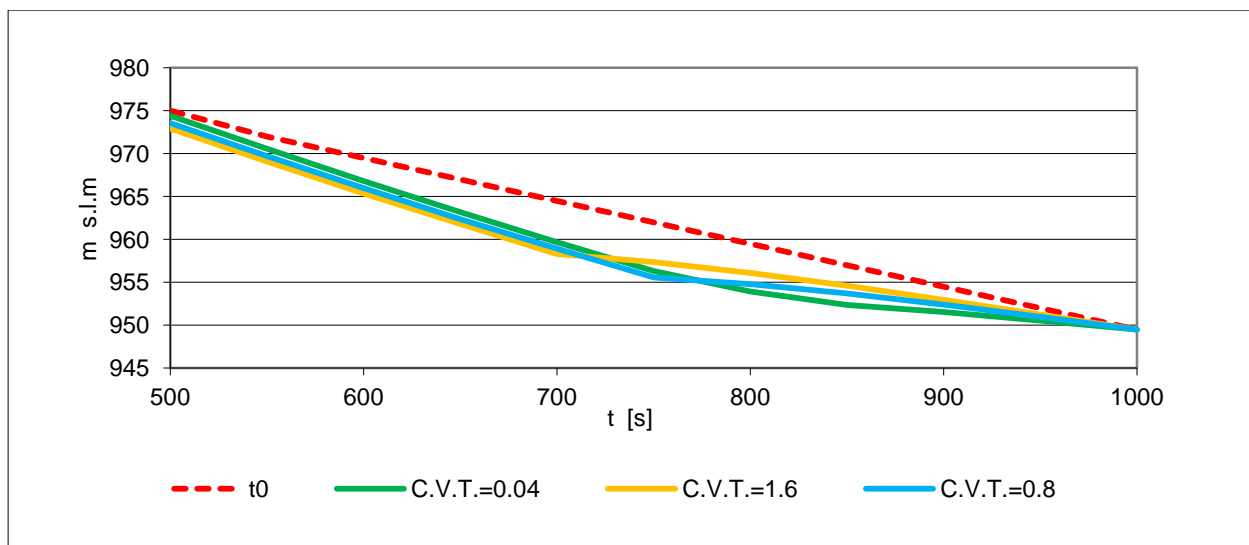


Fig. 3.86 – sensibilità al c.v.t. per alimentazione immobile-tratto finale

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Per il caso in erosione, invece, notiamo che il risultato finale cambia molto a seconda dello spessore scelto per il volume di controllo, di cui viene di seguito proposta una panoramica con differenti profili al variare del c.v.t.

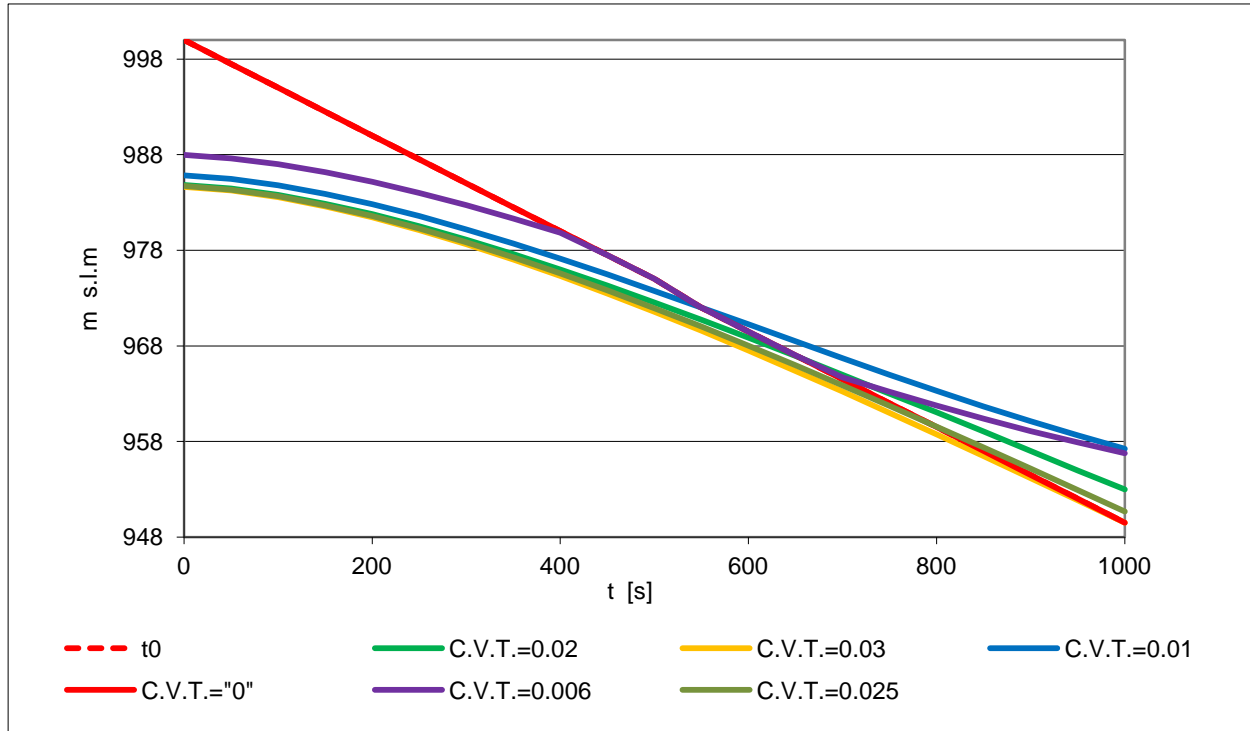


Fig. 3.87 – sensibilità al c.v.t. per alveo non alimentato

Come già osservato nel **Par. 3.3.2.2** l'erosione aumenta all'aumentare dello spessore del volume di controllo; oltre il valore di 0.02 m si registrano delle differenze solo nel tratto di valle.

3.4 Considerazioni sui risultati

Tra i principali obiettivi che ci si era posti in fase di pianificazione dei lavori di questa Tesi, vi era la modellazione di una serie di fenomeni reali controllando di volta in volta i parametri del codice usato; tuttavia non tutti i risultati ottenuti saranno applicati al caso reale oggetto del prossimo capitolo.

➤ *Portata solida laterale*

Nel **Par. 3.1.** sono state condotte delle analisi per studiare il comportamento dell'alveo in seguito all'immissione di una portata laterale. Si osserva che per portate solide molto alte (quattro volte maggiori rispetto alla portata di equilibrio) si verifica un forte accumulo di sedimenti nella sezione di monte; il deposito di sedimenti nella sezione di immissione laterale è infatti così elevato da ostacolare il deflusso dell'acqua che rende la corrente lenta subito a monte di tale tratto; per immissioni laterali inferiori, invece, si osserva a monte la tendenza a mantenere la pendenza di equilibrio.

Successivamente si è voluto capire se si commettono errori nel considerare nelle analisi solo un tratto di alveo (che inizia nel punto di immissione di una portata laterale solida) senza tenere in conto dei contributi che si hanno a monte; si è osservato che nel caso in cui la portata laterale è piccola (costante di alimentazione minore di 4), ciò che succede a monte influenza il tratto di valle; per valori maggiori, invece, la portata laterale è sufficientemente grande da disconnettere monte da valle dal punto di vista dell'immissione di portata solida; in caso di piena intensa, quindi si può analizzare esclusivamente il tratto di interesse senza commettere errori significativi.

➤ *Inserimento di una briglia*

Il **Par. 3.2** è dedicato alla modellazione di una briglia per studiarne gli effetti sul trasporto solido all'interno dell'alveo, in particolare analizzare come il programma Basement 2.2 restituisca l'interrimento delle briglie; nel lavoro di Tesi svolto da Mauri e Spagnolatti (2009), nel quale si era utilizzato il programma Rhyme per le simulazioni, erano sorti infatti dei problemi legati proprio a questo fenomeno. Dal momento che il programma non prevede l'inserimento di una briglia, si è ricorso ad un espediente che consiste nel rendere inerodibili le sezioni dove dovrebbe esserci la briglia. Si è osservato che nel caso di sovralimentazione, la tendenza dell'alveo è di depositare il volume di sedimenti in eccesso a monte della briglia, mentre a valle si ha erosione del fondo. In caso di sottoalimentazione, invece l'introduzione della briglia impedisce che l'erosione sia troppo accentuata. Per verificare la correttezza dei volumi depositati è stato

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

eseguito un bilancio di massa ottenendo risultati soddisfacenti. Si è infine valutato come viene restituito dal modello l'interrimento e lo svuotamento delle briglie: il comportamento globale è soddisfacente anche se sono presenti dei disturbi in corrispondenza della briglia, le cui cause sono da attribuire alla tecnica di media mobile adottata. Risulta inoltre che se l'interrimento è elevato la briglia viene sommersa da valle e poi si comporta come se fosse erodibile; se invece il volume invasabile dalla briglia non è elevato, non vengono alterate significativamente le dinamiche di deposito.

➤ *Analisi granulometrica*

Le analisi svolte al **Par.3.3** hanno lo scopo di valutare come la granulometria influenzi i profili del fondo dell'alveo e come la curva granulometrica vari lungo il tratto di alveo considerato ed al passare del tempo.

Per prima cosa si è voluto analizzare il fenomeno del corazzamento: ci si è serviti di un'analisi svolta dai programmatori del codice Basement per validare il programma, che confrontava i risultati ottenuti da un modello fisico con quelli ottenuti dal loro stesso software per un caso di sottoalimentazione. Si osserva che col passare del tempo le curve granulometriche sono caratterizzate da diametri sempre maggiori, indice del fatto che l'alveo si sta corazzando. Successivamente è stata eseguita un'analisi cambiando lo spessore del volume di controllo che è un importante parametro di calibrazione nelle analisi plurigranulari; si osserva che all'aumentare di questo parametro aumenta l'erosione ed invece diminuisce l'effetto del corazzamento.

Si è poi cercato di riprodurre un esperimento descritto in un articolo (Sklar e al., 2009), ma il modello riprodotto con il programma Basement, non è riuscito a riprodurre i risultati ottenuti sperimentalmente; è stato però possibile compiere un'analisi sensitiva variando sia parametri geometrici e fisici che del modello.

Infine l'analisi plurigranulometrica è stata applicata al canale rettangolare utilizzato come caso test per la portata laterale e la briglia. Sono state eseguite diverse simulazioni variando di volta in volta il diametro dei sedimenti in ingresso a monte e il diametro dei sedimenti presenti sul fondo. Si osserva un aumento della velocità di propagazione dei sedimenti in ingresso al crescere della differenza di diametro tra i sedimenti di fondo e di ingresso; all'aumentare del diametro dei sedimenti in ingresso (tenendo il fondo corazzato) diminuisce la relativa velocità di propagazione.

Anche in questo caso è stata eseguita un'analisi di sensitività al volume di controllo: in caso di accumulo non si riscontrano differenze; in caso di erosione invece si osserva un aumento dell'erosione all'aumentare del volume di controllo.

4. IL CASO DEL MALLERO

Come affermato nel **Par.1.1**, la valutazione della pericolosità di un corso d'acqua non può prescindere dalla modellazione delle variazioni della quota del fondo dovuta al trasporto di sedimenti da parte della corrente. Tale necessità è particolarmente importante negli ambiti montani, dove tipicamente c'è notevole disponibilità di sedimenti e l'intensità della corrente è elevata grazie alla pendenza significativa del corso d'acqua.

Nel luglio del 1987 un evento alluvionale colpì la Valtellina; sebbene la magnitudo dell'evento non fosse particolarmente elevata (caratterizzata da un tempo di ritorno di meno di 100 anni) la città di Sondrio, prossima allo sbocco del torrente in Adda, ha corso il rischio di essere inondata in quanto il notevole volume di sedimenti depositato lungo il tratto cittadino del Mallero ha determinato una crescita del livello del fondo di qualche metro, con conseguente innalzamento della superficie dell'acqua.

Dopo tale evento si sono rese disponibili notevoli quantità di dati e misure relativi alla geometria, all'idraulica del torrente Mallero e alla pluviometria del bacino idrografico della Valmalenco, sia in relazione all'evento del 1987 che per gli anni successivi.

Anche per questo motivo, il Torrente Mallero e in particolare l'alluvione dell'87 sono stati scelti come casi studio per creare e validare modelli che simulassero il trasporto solido in fiumi montani.

Per prevedere l'evoluzione morfologica del Mallero è stato utilizzato il modello numerico sviluppato dall'Università ETH di Zurigo (Basement 2.2) già descritto al **Cap. 2** ed applicato ai casi test del **Cap. 3**.

4.1 Descrizione dell'ambito territoriale di riferimento

4.1.1 Il bacino

Il bacino del torrente Mallero si trova in Valmalenco nella provincia di Sondrio. Il Mallero è il principale corso d'acqua della valle, nasce in località Pian di Lupo alla quota di 1650 m s.l.m. e sfocia nel fiume Adda in prossimità della città di Sondrio (quota 280 m s.l.m. circa) dopo un percorso di circa 24 Km. Numerosi sono gli affluenti; i principali sono: il torrente Lanterna (in corrispondenza di Chiesa Valmalenco, 1000 m s.l.m.), il torrente Torreggio (in località Torre S. Maria, 750 m s.l.m.) e il torrente Antognasco (Arquino, 450 m s.l.m.).

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Il bacino idrografico del torrente Mallero si estende per una superficie di quasi 320 Km²; i limiti del bacino idrografico coincidono con gli spartiacque naturali, costituiti a Nord dal Pizzo Bernina (che segna anche il confine Italia-Svizzera), a Est dal Pizzo Canciano, a Sud dal Sasso Bianco, a Ovest dal Monte Sissone. Il punto altimetricamente più elevato è costituito dal Pizzo Bernina (4050 m s.l.m.), mentre il punto con la quota minore è costituito dalla sezione di immissione in Adda (280 m s.l.m.).

Nella Valmalenco si possono distinguere 6 sottobacini principali indipendenti caratterizzati dai seguenti confini naturali (**Fig. 4.1**):

- le sorgenti del Mallero superiore;
- il torrente Mallero a Chiesa;
- il territorio costituente il bacino del torrente Lanterna;
- dalla confluenza con il torrente Lanterna fino allo sbocco in Adda;
- la valle del torrente Torreggio;
- la valle del torrente Antognasco;

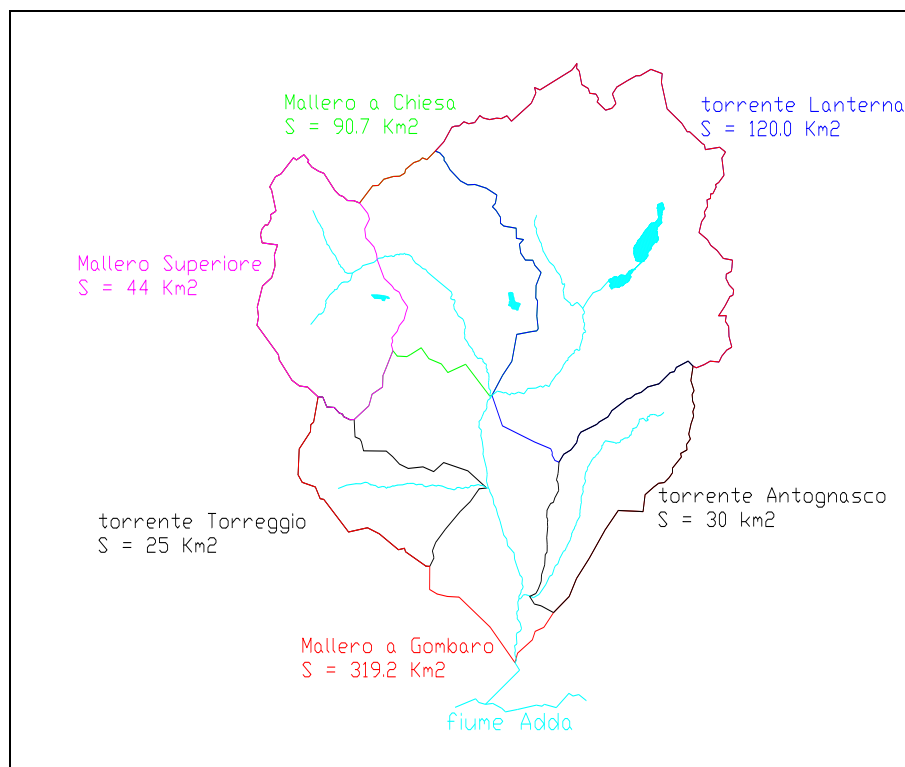


Fig. 4.1 – I sottobacini della Valmalenco

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

In **Fig.4.2** è rappresentata una veduta completa della Valmalenco; si possono riconoscere il Pizzo Bernina e la città di Sondrio, cioè i limiti estremi della valle.

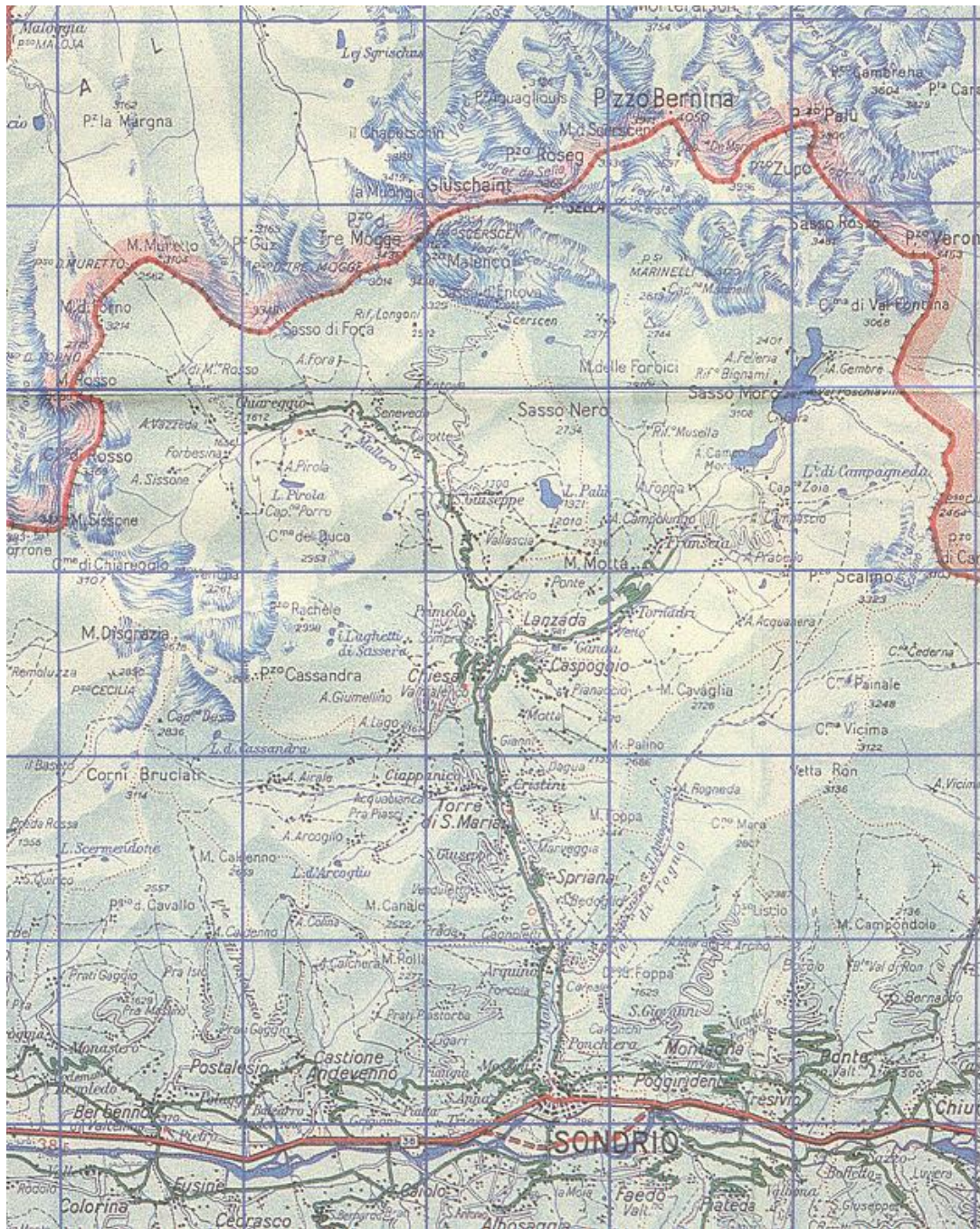


Fig. 4.2– Bacino idrografico della Valmalenco

4.1.2 Granulometrie e pendenze

Il Mallero ha una lunghezza di 27 Km e attraversa tratti con pendenza e granulometria molto variabili tra di loro: nella parte superiore del fiume i valori di pendenza dell'alveo vanno da 4% a 40% con una media dell'8% circa. Negli ultimi 2 km a monte della confluenza invece la pendenza è circa dell'1% con alcuni valori locali di 0.1%.

Viene in seguito riportata la **Tab . 4.1** allo scopo di riassumere le caratteristiche granulometriche e le pendenze medie dei differenti tratti fluviali. Questa documentazione è tratta dalla relazione *Piano Valtellina; Studi idraulici*, all'interno del *Piano Valtellina* del 1990 [17].

Località	Pendenza S [%]	d ₅₀ [mm]
Pian del lupo	3	167
A monte di Chiareggio	3	166
Chiareggio	4	348
A valle di Chiareggio	7	512
Sabbionaccio – San Giuseppe	2	79-118
Val Rosera	7	120
Cave di serpentino	> 10	360-1640
Curlo	10	968
Confluenza torrente Lanterna	5	73-85
Chiesa Valmalenco	4 – 6	80
A valle di Chiesa Valmalenco	4 – 6	313-669
A monte di Torre S. Maria	4 – 6	162-212
A valle di Torre S. Maria	8	140-85
A monte di Spriana	4	84-127
Tra Spriana e Arquino	8	247-772
A valle di Arquino	8	772
Cassandre	3 – 6	540-1180
Sondrio	1	40-73

Tab. 4.1– Granulometrie e pendenze in diversi tratti del Mallero

I tratti principali che compongono il Mallero sono rappresentati nella seguenti **Fig. 4.3** e **Fig. 4.4** tratte dalla Tesi di Mauri e Spagnolatti (2009).

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

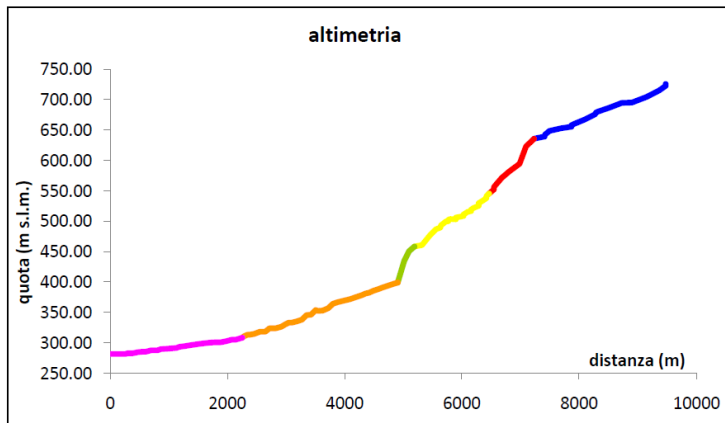


Fig. 4.3– Tratti del torrente Mallero - profilo

L'analisi proposta in questo capitolo si concentra sui tratti arancione e fucsia; il tratto arancione è quello di avvicinamento all'abitato di Sondrio; il tratto fucsia è il tratto cittadino (corrispondente ai due chilometri a monte della confluenza con l'Adda) che è oggetto di maggiore studio, poiché rappresenta la zona più vulnerabile ad una esondazione.

Prima di entrare in città, il Mallero attraversa 1800 metri in una profonda e stretta gola denominata "Cassandre". In questo tratto, la pendenza non elevata (3% circa, grazie anche alla presenza di alcune briglie e di una cascata naturale), e la ridotta larghezza della sezione trasversale generano i massimi valori di tirante idrico dell'intera asta. Il tracciato non è rettilineo bensì sconnesso, con una doppia curva a metà percorso. La granulometria del fondo è costituita esclusivamente da grossi massi il cui diametro medio è superiore ai 60 cm.

Superate le Cassandre il Mallero arriva a Sondrio (località Gombaro). Il tratto cittadino è a bassa pendenza (1% circa), chiuso tra alti argini in una sezione di circa 30 metri. La granulometria del fondo è varia, con elevata percentuale di ghiaia (il diametro medio è infatti attorno ai 7 cm, decrescente verso lo sbocco).

In corrispondenza dell'uscita da Gombaro, dove inizia il lungo rettilineo cittadino che conduce in Adda, il torrente affronta una brusca curva verso destra; è in questo punto che si verificano i maggiori rischi di esondazione per il tratto cittadino; rischio accresciuto dal deposito solido dovuto al rallentamento dell'acqua in uscita dalle Cassandre (Fig.4.5).



Fig. 4.4– Tratti del torrente Mallero - orto foto



Fig. 4.5– L'entrata del Mallero a Sondrio

4.1.3 Pluviometria

Il presente paragrafo descrive sinteticamente il problema della distribuzione spaziale e temporale delle piogge; le principali fonti a cui si è fatto riferimento sono quelle pubblicate dalla Regione Lombardia e dal Servizio Idrologico Italiano. L'analisi idrologica risale al 1989, a seguito dell'alluvione dell'87 [18]. Nella seguente **Tab. 4.2** sono elencate le stazioni pluviometriche da cui sono stati ricavati i dati, mentre la loro posizione è stata individuata sulla mappa in **Fig. 4.6**.

Nome stazione	Codice	Quota [m s.l.m.]	Ubicazione
Spriana	P1	650	Ponte sul Mallero
Cucchi	P2	680	Comune di Torre, sponda sinistra
Torre S. Maria	P3	720	Ponte sul Mallero
Ganda di Lanzada	P4	970	Centrale ENEL sul torrente Lanterna
Chiesa Valmalenco	P5	1022	Ponte sul Mallero
Curlo	P6	1051	Ponte sul Mallero
San Giuseppe	P7	1430	Ponte sul Mallero
Campo Franscia	P8	1518	Valle del Lanterna
Laghi di Chiesa	P9	1610	
Alla Braccia	P10	1650	Valle del Torreggio
Alpe Costa	P11	1690	Bassa Val di Togno
Piazza Cavalli	P12	1710	Pendici del monte Palino

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Alpe Entova	P13	1900	Bacino del Mallero superiore
Campo Moro	P14	1971	Centrale ENEL – valle del Lanterna
Funivia al Bernina	P15	2014	Lago Palù
Alpe dell'Oro	P16	2030	Bacino del Mallero superiore

Tab. 4.2– Elenco stazioni pluviometriche

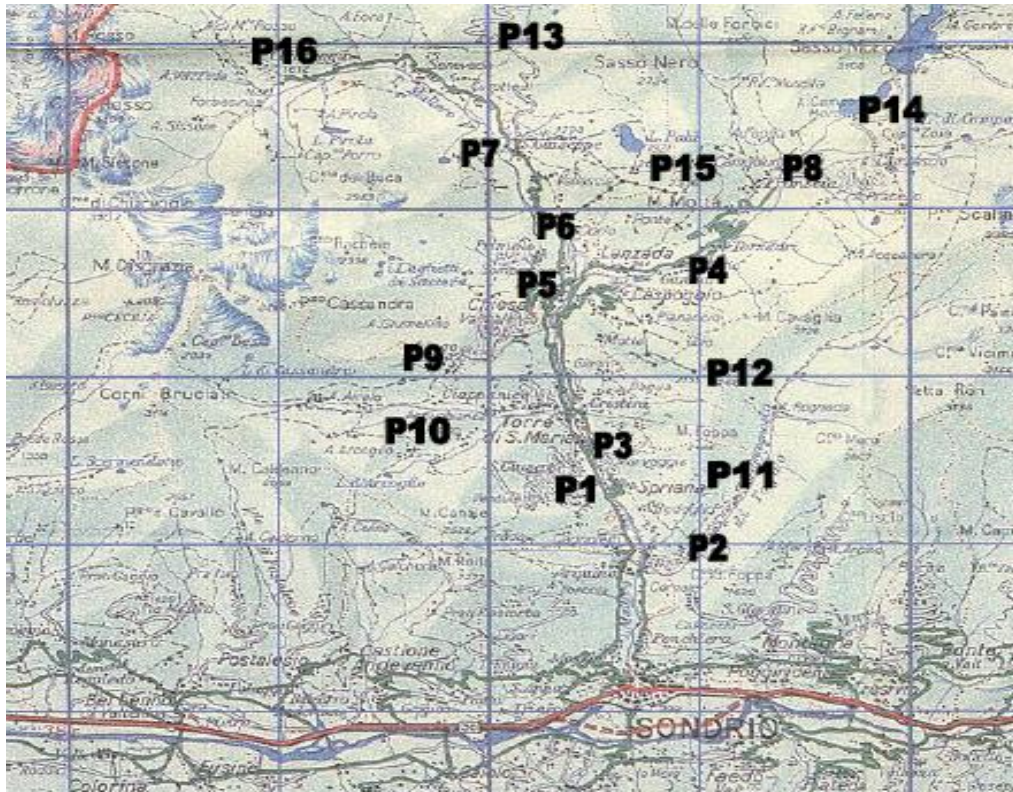


Fig.4.6– Posizione delle stazioni pluviometriche

Dall'analisi dei dati pluviometrici raccolti negli anni non si hanno a disposizione sufficienti informazioni per costruire un modello statistico basato sulle osservazioni precedenti. Citando l'elaborato di Tesi di Del Curto (2000), è però possibile costruire un modello afflussi-deflussi per stimare la portata di piena nel bacino del Mallero; con questo fine, il bacino è stato diviso in 6 zone omogenee dal punto di vista pluviometrico (vedi Fig. 4.1 nel Par. 4.1.1).

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

In **Tab. 4.3** sono elencate le zone considerate omogenee, indicando la superficie sottesa e i pluviometri di competenza.

Bacino	Area [km ²]	Pluviometri di competenza
Mallero Superiore	45,0	P13, P14, P15, P16
San Giuseppe, Chiesa, Lanzada	65,0	P4, P5, P6, P7
Bacino t. Lanterna (esclusa Lanzada)	100,0	P8, P14
Bacino t. Torreggio	25,0	P9, P10
Bacino t. Antognasco	30,0	P11, P12
Chiesa – Sondrio	54,0	P1, P2, P3
TOTALE	319,0	

Tab. 4.3 – Zone pluviometriche omogenee

4.1.4 Idrometria

A seguito dell'analisi contenuta nel lavoro della suddetta Tesi, è stata ricavata la curva annua delle portate relative alla città di Sondrio.

Il Centro Monitoraggio Geologico ha fornito i valori di altezza d'acqua, rilevata ogni 30 minuti da cinque idrometri sul torrente Mallero ed uno sul torrente Lanterna, nel periodo gennaio 1992-luglio 1999. L'elenco delle stazioni è riportato in **Tab. 4.4**.

Nome stazione	Codice	Quota [m s.l.m.]
Sondrio, ponte Eiffel	I1	298
Ponte di Spriana	I2	650
Torre S. Maria	I3	720
Chiesa Valmalenco	I4	1022
Curlo	I5	1051
Ganda di Lanzada (Lanterna)	I6	970

Tab. 4.4 - Elenco stazioni idrometriche

Le stazioni idrometriche sono uniformemente distribuite sul territorio; gli strumenti coprono tutte le sezioni significative del bacino del Mallero, ad eccezione del torrente Torreggio che non è monitorato. Soltanto per le sezioni di Sondrio (**Fig. 4.7**), Lanzada e Torre S. Maria è stata fornita la scala delle portate grazie alla quale è possibile risalire ai valori di portata degli eventi registrati.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

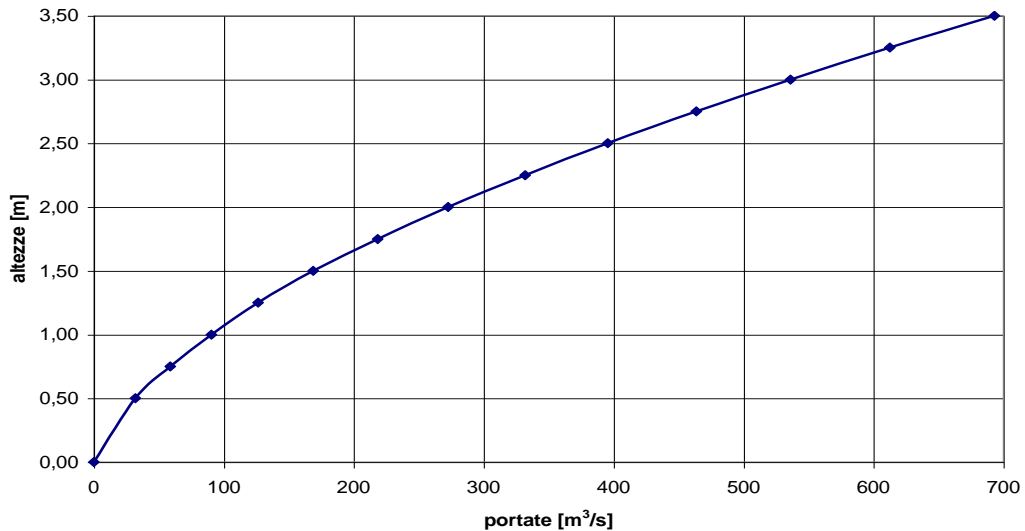


Fig. 4.7- Scala delle portate sezione idrometrica di Sondrio

Dagli idrometri del Centro di Monitoraggio, la stazione più significativa e meglio monitorata è quella di Sondrio, per la quale sono disponibili 7 anni completi di osservazioni. Le misure idrometriche sono state quindi trasformate in portate attraverso la conoscenza della cosiddetta rating-curve di **Fig. 4.7** per ottenere infine la curva annua delle portate. In **Fig. 4.8** sono confrontate le curve di durata della portata dei sette anni disponibili.

Come osservato anche in riferimento ai dati pluviometrici, l'esiguo numero di anni di osservazione non consente di elaborare precisi modelli statistici sulle portate di piena. Avendo tuttavia a disposizione i dati di pioggia per lo stesso periodo temporale, è comunque possibile tarare i parametri di un eventuale modello afflussi-deflussi.

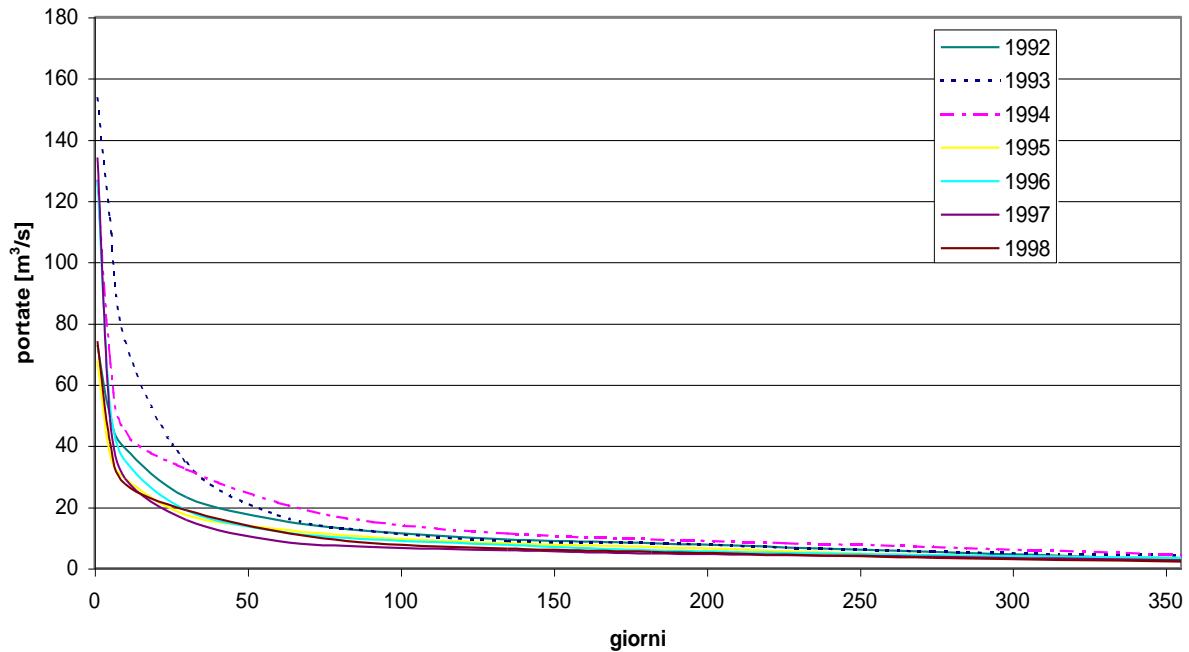


Fig. 4.8 - Curva di durata delle portate

Si osserva, per gli anni di misurazioni svolte, che la portata massima raggiunta a Sondrio è di $160 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.1.5 Le alluvioni del 1987

In assenza di deposito di sedimenti sul fondo del torrente Mallero, la città di Sondrio non è in particolare rischio di alluvione; infatti la portata di picco per un tempo di ritorno di 100 anni è pari a $640 \text{ m}^3/\text{s}$, mentre la massima portata transitabile nel fiume è di $690 \text{ m}^3/\text{s}$.

L'evento del 1987 fu invece diverso e può essere riassunto nel seguente modo: la parte centrale del mese di luglio si caratterizzò per la presenza sul Mediterraneo di un vasto anticiclone di origini atlantiche, mentre si spinsero verso l'Europa correnti fredde provenienti dall'artico costrette dall'anticiclone a scorrere verso l'Inghilterra e quindi sull'Europa centro meridionale. In questo contesto meteorologico, il 17 luglio un vortice ciclonico profondo si posizionò sulla Manica. Sulla Savoia e sulle Alpi andarono a contrastarsi la fredda circolazione nord atlantica e le correnti anticicloniche molto calde provenienti dal Mediterraneo centrale. La realizzazione dello zero termico avvenne a più di 4000 m, e ciò fu causa di precipitazioni acquose anche a quote normalmente interessate da ghiacciai perenni. La zona prealpina ed Alpina centrale, e in particolare la zona di Sondrio, diventarono quindi teatro di fenomeni di precipitazione particolarmente violenti, con temporali che si abbattono soprattutto sulla Valtellina e la Valchiavenna. Proprio in provincia di Sondrio si registrò un picco di 305 millimetri in un solo giorno, mentre a Como il lago Lario esondò a quota 265. Tutta la pioggia si riversò

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

inevitabilmente lungo i corsi fluviali minori che confluirono nel fiume Adda, e che già prima di queste piogge, ovvero dalla fine di giugno, erano già stati interessati da numerosi temporali con un accumulo di pluviometria tra i 300 mm e i 450 mm. Queste precipitazioni avevano già reso i terreni e le coperture alluvionali completamente saturi tanto da non poter smaltire ulteriori apporti pluviometrici. L'Adda valtellinese è caratterizzato, nei suoi 125 chilometri di sviluppo, dalla confluenza di ben 105 affluenti tutti a loro volta riceventi una miriade di torrenti delle convali. Così sollecitati dal punto di vista pluviometrico, questi corsi d'acqua con le accentuate pendenze che li caratterizzano, determinarono nel fondovalle un effetto devastante sia per le conseguenze idrauliche, sia perché in presenza di un territorio geologicamente delicato e particolare come quello della Provincia di Sondrio, con formazioni rocciose alpine intensamente deformate e fratturate, venne favorita una forte attività erosiva.

Le conseguenze dell'alluvione furono gravi: ci furono 53 morti, migliaia di sfollati, 4000 miliardi di lire fu il valore complessivo dei danni provocati. Molte furono le zone colpite dal disastro naturale dell'alluvione, tra cui la Valmalenco e l'abitato di Sondrio che rimase sull'orlo dell'esondazione causa incipiente straripamento del torrente Mallero (**Fig. 4.9**).



Fig. 4.9 – Livello raggiunto dalle acque del Mallero in occasione dell'alluvione dell'87

Nella Valmalenco, valle geograficamente posta sopra il capoluogo di provincia, venne evacuato l'abitato di Torre di Santa Maria, dove il torrente Torreggio travolse parecchie abitazioni. Per quanto riguarda il Mallero, il pericolo di alluvione non è stato causato dalla portata d'acqua eccessiva, ma dall'accumulo di detriti che avvenne nella parte del fiume con pendenza bassa che

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

portò all'innalzamento del letto e ne ridusse drasticamente la portata transitabile. In seguito a ciò vennero impegnate delle ruspe (**Fig. 4.10**) per dragare il materiale allo scopo di diminuire la quota del pelo libero e quindi il rischio di esondazione.



Fig. 4.10– Livello raggiunto dalle acque del Mallero in occasione dell'alluvione dell'87



Fig. 4.11 - Soglia temporanea al ponte Eiffel

4.1.6 Calcolo idrogramma di piena

Per valutare la risposta del bacino a un evento intenso di breve durata, è stato usato l'idrogramma di piena stimato nell'87, dagli studi del Piano Valtellina (1990), ricavato con il modello afflussi deflussi di Nash in base alle misurazioni pluviometriche. La durata totale dell'idrogramma è di 51 ore e il picco massimo è di quasi 500 m³/s (Fig. 4.12).

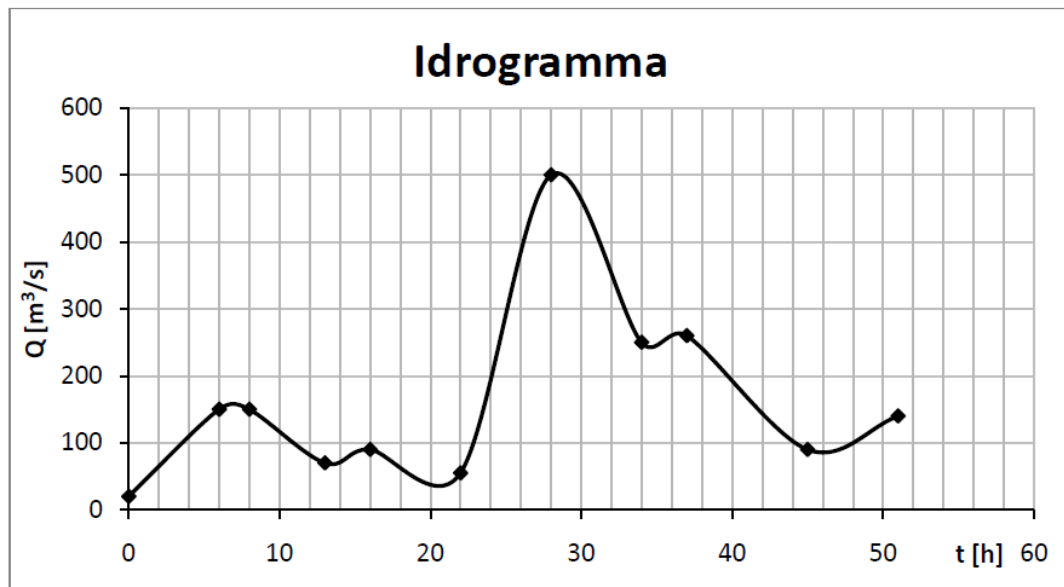


Fig. 4.12 – Idrogramma piena '87

Stime post evento che non hanno considerato il volume di detriti rimosso dalle ruspe indicano un volume totale di sedimenti coinvolti pari a 3×10^6 m³. Il volume dei sedimenti che è stato eroso nei 5 km prima della confluenza era di 7×10^5 m³; un volume di 2.2×10^5 m³ si è depositato nel tratto cittadino, con un aumento della quota di fondo di 5 m presso il ponte Garibaldi, 3 m presso il ponte Eiffel e 2 m presso il ponte della ferrovia. Infine un volume pari a 3.5×10^5 m³ è stato convogliato nel fiume Adda. In accordo con gli studi tecnici eseguiti, il pericolo di esondazione non è stato solo durante la portata di picco, ma anche alla fine dell'evento a causa di un forte incremento della quota di fondo che ridusse significativamente la portata transitabile (160 m³/s) [19].

4.2 Analisi monogranulare

Vista l'importanza del caso studio, a lungo studiato dal Politecnico di Milano, sono disponibili numerose simulazioni con cui confrontarsi, per verificare che le modifiche apportate, come premesso nei **Par. 1.5** (obiettivi del presente elaborato di Tesi) e **Par. 3.4** (strategie che verranno applicate al caso reale), diano dei contributi migliorativi alla riproduzione dell'evento del 1987.

4.2.1 Simulazioni pregresse con Basement 1.7

Il punto di partenza per l'analisi del caso reale del **Par. 4.3** è stato il confronto con i risultati ottenuti da Colombo e Giuriani (**Par. 1.4.4**) che avevano studiato un tratto di fiume che va dalla confluenza del fiume Mallero con il fiume Adda fino a 4.8 km a monte (**Fig. 4.13**).

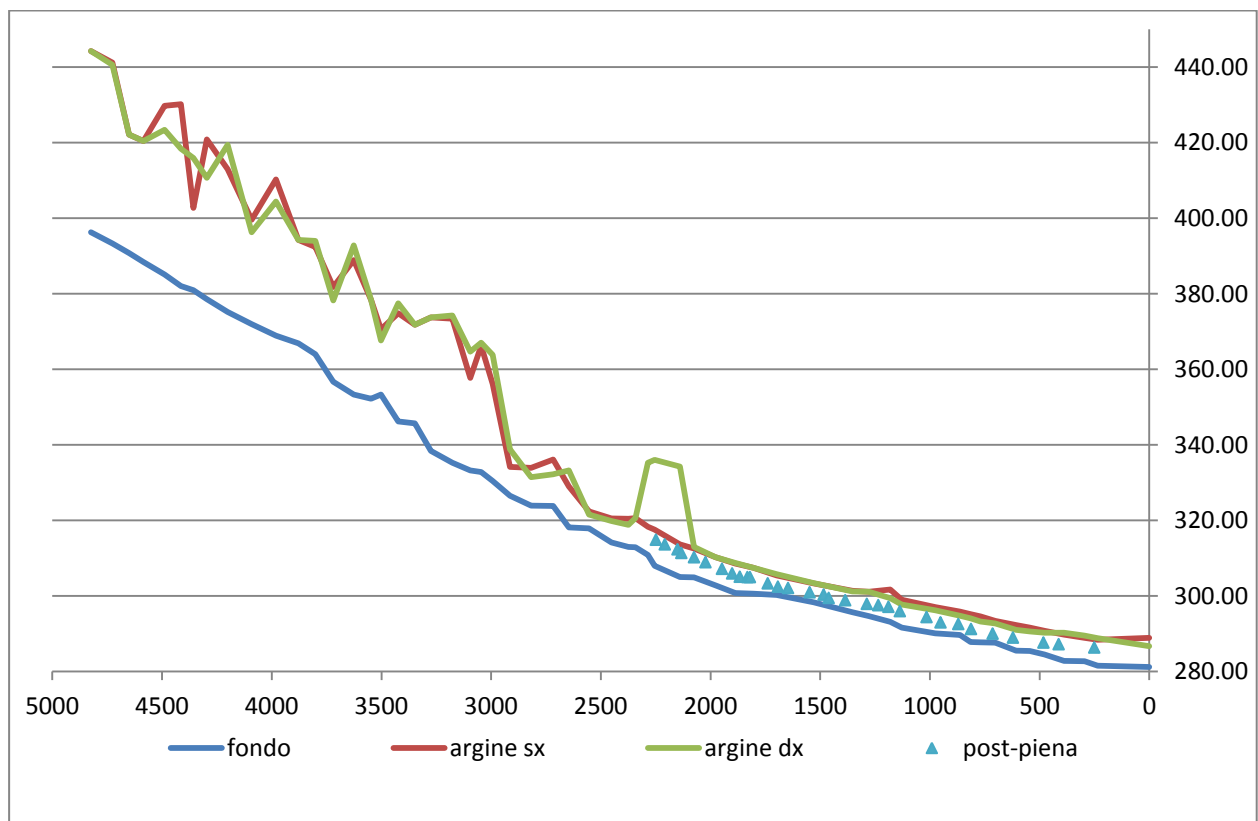


Fig. 4.13– Profilo del tratto finale del Mallero

Le pendenze sono nell'ordine del 3-4% nella prima parte a monte del fiume mentre verso valle diminuiscono fino a 2.6%. La pendenza media nel tratto cittadino è di 1.2% con minimi intorno allo 0.1-0.2%. In questo tratto, la geometria delle sezioni è caratterizzata da una forma quasi rettangolare con larghezze in media di 20-40 m.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Le sezioni utilizzate per la costruzione del modello sono 57, numerate dalla 36 (sezione di monte) alla 92 (sezione di valle); la loro forma si basa su una semplificazione trapezoidale della geometria ottenuta da rilievi topografici.

Di seguito vengo mostrati due esempi di sezioni, in cui la linea azzurra è quella effettivamente misurata, mentre quella rossa è la semplificazione proposta, che mantiene orizzontale il fondo, e conserva l'altezza degli argini.

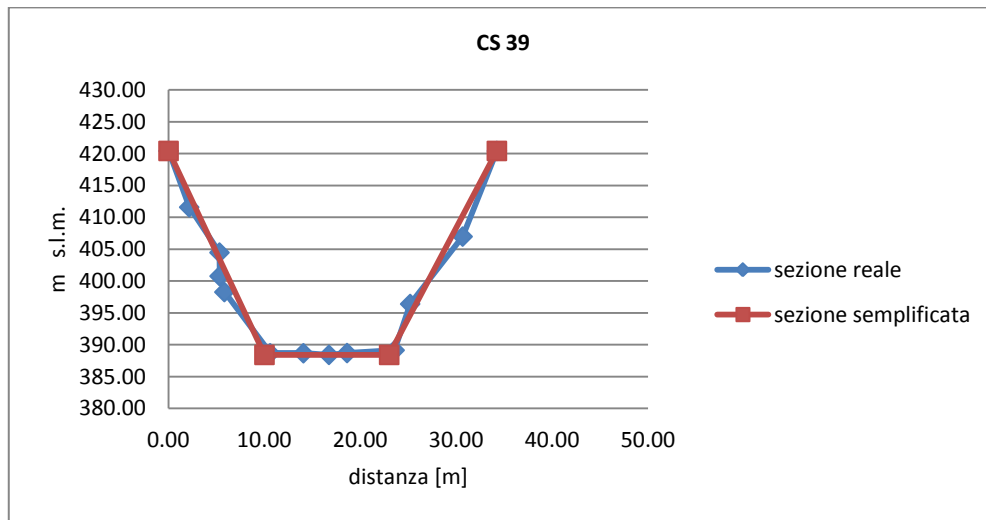


Fig. 4.14 – Semplificazione sezione 39

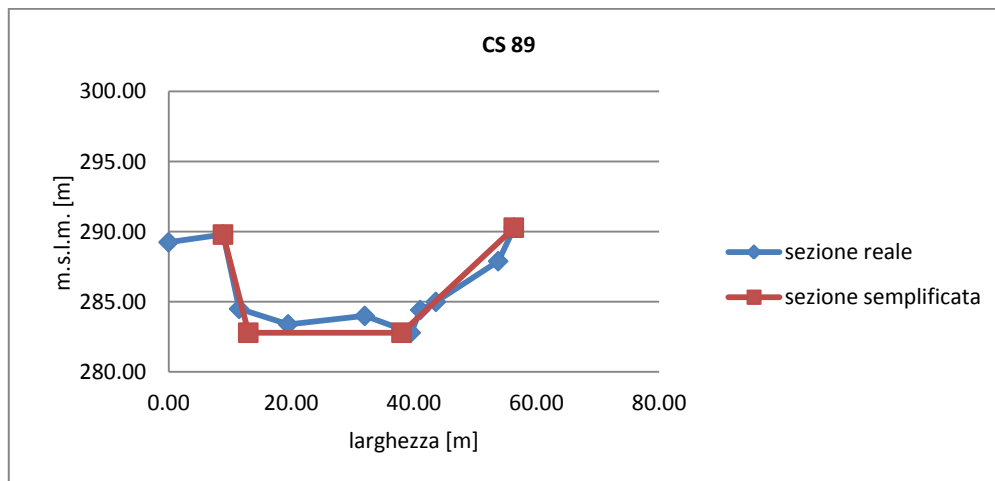


Fig. 4.15 – Semplificazione sezione 89

Dal momento che la condizione al contorno di valle imposta per la portata solida prevede che l'altezza del fondo rimanga inalterata (e ciò è del tutto irrealistico e porterebbe a risultati del tutto sbagliati), è stato aggiunto un tratto di alveo prismatico fittizio con pendenza dello 0.1 % e geometria della sezione uguale alla sezione 91 con un passo di 50 m. Il fine è di rendere

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

indipendente il modello dalle condizioni al contorno che non sono del tutto rappresentative della realtà e propagherebbero tale errore.

Come condizioni di monte sono stati inseriti un idrogramma corrispondente a quello calcolato durante studi post-evento utilizzando un modello di afflussi-deflussi di Nash (vedi **Par. 4.1.3** e **Par. 4.1.4**). La durata dell'idrogramma è di 60 ore con un picco di portata pari a $500 \text{ m}^3/\text{s}$.

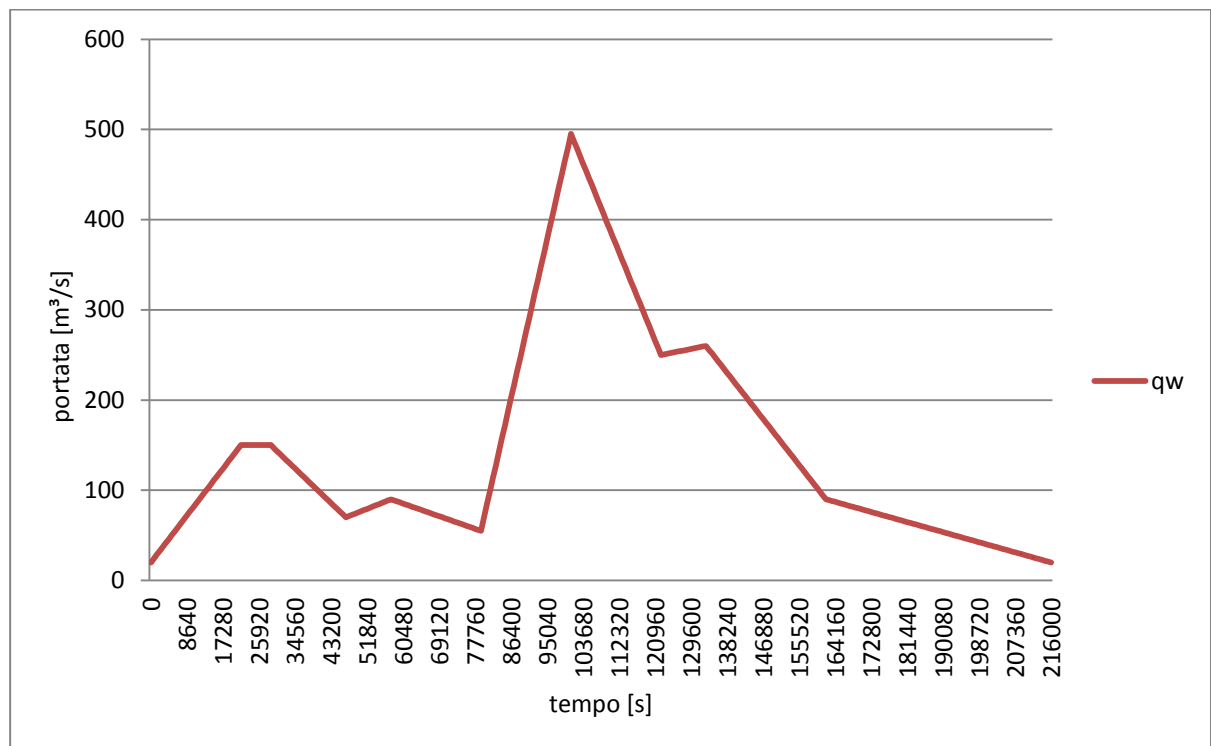


Fig. 4.16 – Idrogramma in ingresso

Inoltre si è dovuto ricreare un sassogramma rappresentativo dell'evento. Il vincolo che si è imposto, è stato quello del volume totale di sedimenti immessi nell'alveo come fonte esterna. Dal **Par. 4.1.6**, si evince che i volumi erosi a monte di Sondrio nell'87 furono pari a $7 \times 10^5 \text{ m}^3$. Imposta tale condizione, l'andamento scelto è stato quello di un sassogramma proporzionale al quadrato dell'idrogramma. Si è giunti in questo modo ad un sassogramma che sottende un volume di 697000 m^3 e di andamento mostrato in **Fig. 4.17**, in accordo con il volume di 7×10^5 dichiarato precedentemente.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

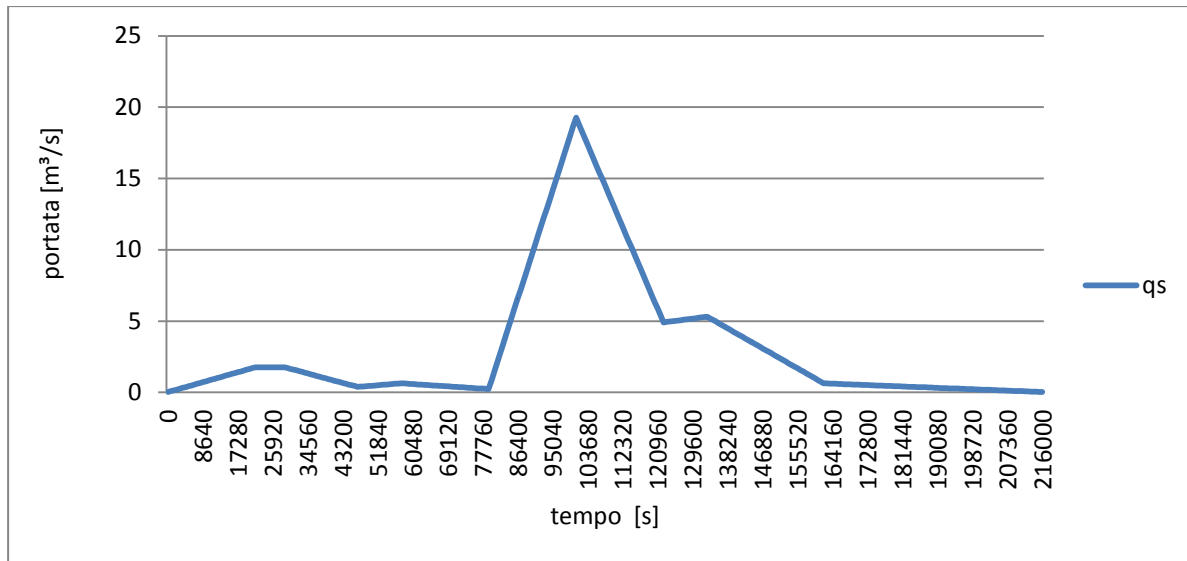


Fig. 4.17– Sassogramma in ingresso

Questo grafico in Fig. 4.18 rappresenta il risultato finale della Tesi di Colombo e Giuriani (2011) per il modello con un sassogramma in ingresso che simula la portata realmente occorsa nel luglio dell'87 (Gli istanti per cui sono plottati i profili del fondo sono: $t_1 = 40\,000$ s, $t_2 = 110\,000$ s, $t_4 = 216\,000$ s).

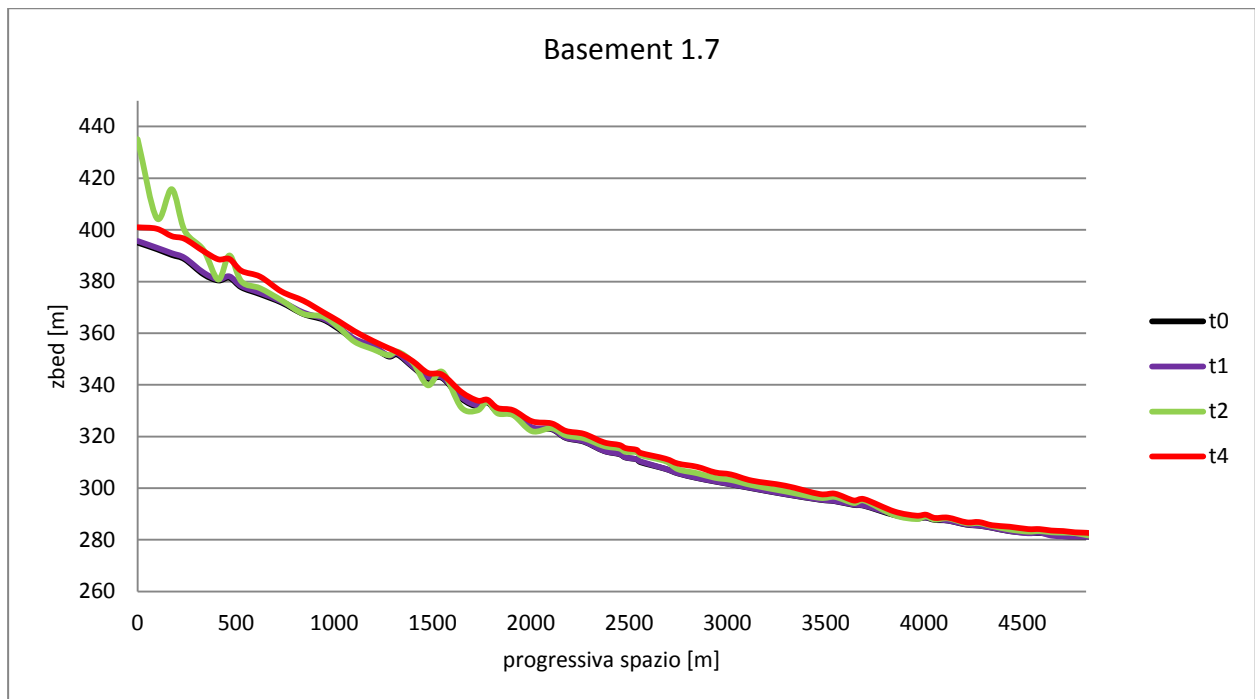


Fig. 4.18 – Profilo dell'alveo in accumulo nella simulazione con Basement 1.7

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Dal momento che l'elevata scala dell'asta fluviale non consente una visualizzazione ottimale (a causa dell'elevata variazione di quota tra monte e valle), vengono riportate le differenze rispetto alla quota del fondo all'istante iniziale.

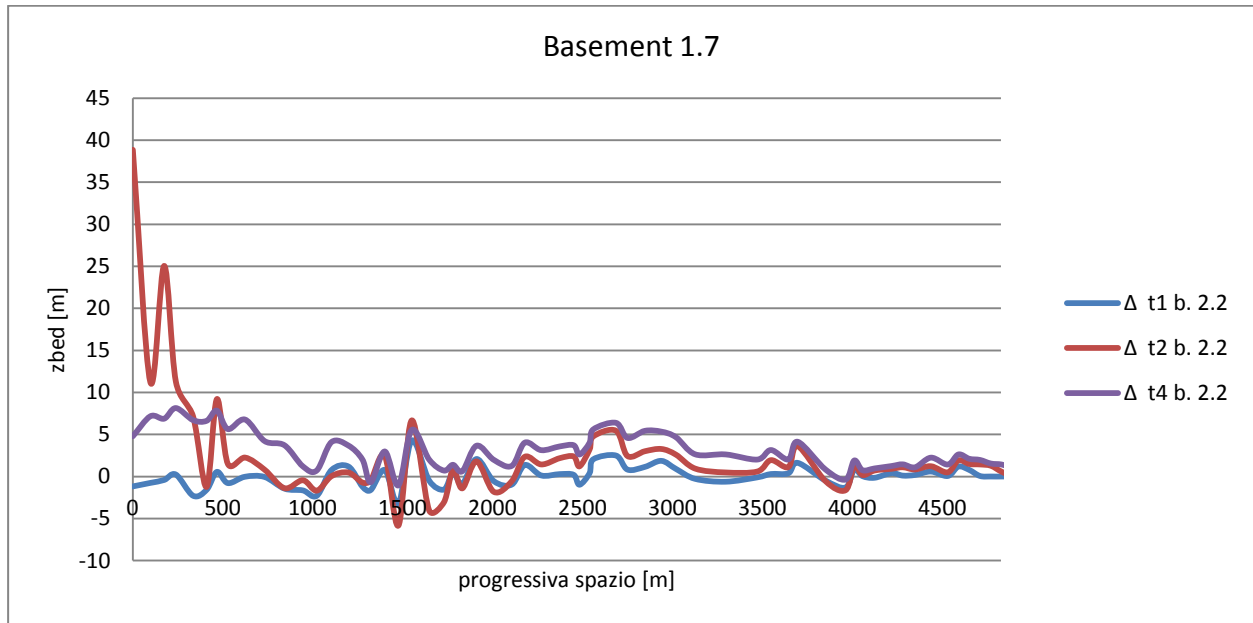


Fig. 4.19 – Aumento del fondo nella simulazione con Basement 1.7

Si nota che, per le sezioni di monte, l'andamento del profilo dell'alveo è coerente col sassogramma immesso come condizione di alimentazione solida: all'istante t_1 (prima del picco di piena) l'alveo è rimasto invariato; al t_2 (istante in cui il sassogramma raggiunge il picco) il livello del fondo è massimo, per poi tornare a decrescere al t_4 ; per quanto riguarda le sezioni di valle, invece, esse sono sempre in accumulo; in particolare maggiore è il tempo trascorso dall'inizio della simulazione, maggiore è l'innalzamento del fondo, come se non dipendesse dall'alimentazione effettivamente avvenuta.

4.2.2 Nuove simulazioni con la versione Basement 2.2

Di seguito viene proposto il confronto tra i risultati illustrati al precedente **Par. 4.2.1** (ottenuti utilizzando la versione 1.7 del codice Basement) e i risultati ottenuti utilizzando la versione più recente disponibile dello stesso codice, con tutti i dati ed i parametri in ingresso identici. Nella nuova versione sono richiesti però dei parametri di calibrazione aggiuntivi (quale, ad esempio lo spessore del volume di controllo) che prima venivano imposti di default e che quindi possono generare delle incongruenze.

4.2.2.1 Alimentazione alluvione '87

Il primo confronto prevede la sovrapposizione tra i risultati ottenuti con le due successive versioni del codice Basement, per un'alimentazione solida coincidente con quella di **Fig. 4.17**.

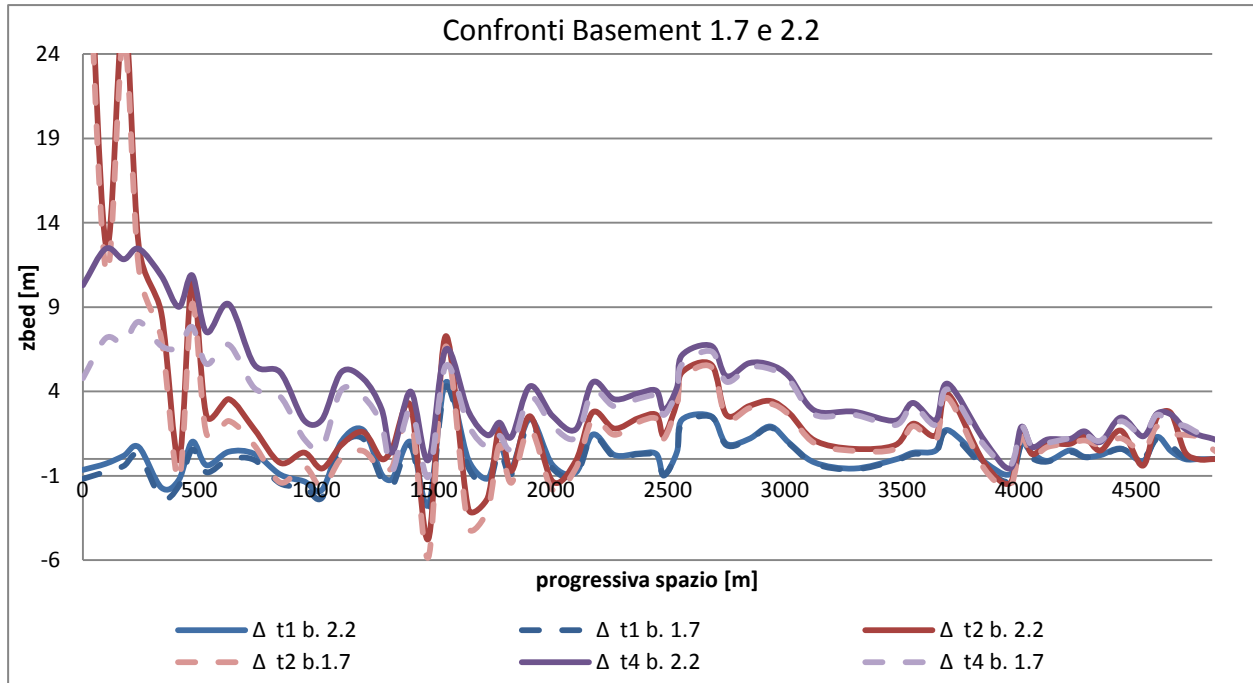


Fig. 4.20 – Confronto tra i risultati in accumulo ottenuti dalle due differenti versioni di Basement (1.7 e 2.2)

La sovrapposizione tra la simulazione attuale e quella precedente è molto buona, a meno di alcune differenze, anche importanti, ma solo nelle sezioni iniziali, quelle in cui viene immessa la portata solida, che vanno via via esaurendosi e che sono nulle nel tratto di interesse, quello cittadino.

4.2.2.2 Erosione

Il successivo confronto con l'obiettivo di validare l'attuale risultato è quello effettuato per il caso in erosione, ovvero non alimentando l'alveo a monte. Tale condizione, che non si è mai verificata, era stata analizzata da Mauri e Spagnolatti prima e da Colombo e Giuriani poi per valutare il comportamento del tratto cittadino del Mallero al variare della portata solida immessa a monte. Di seguito viene riportato il profilo finale ottenuto con la versione 2.2, insieme al grafico della variazione in quota delle sezioni.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

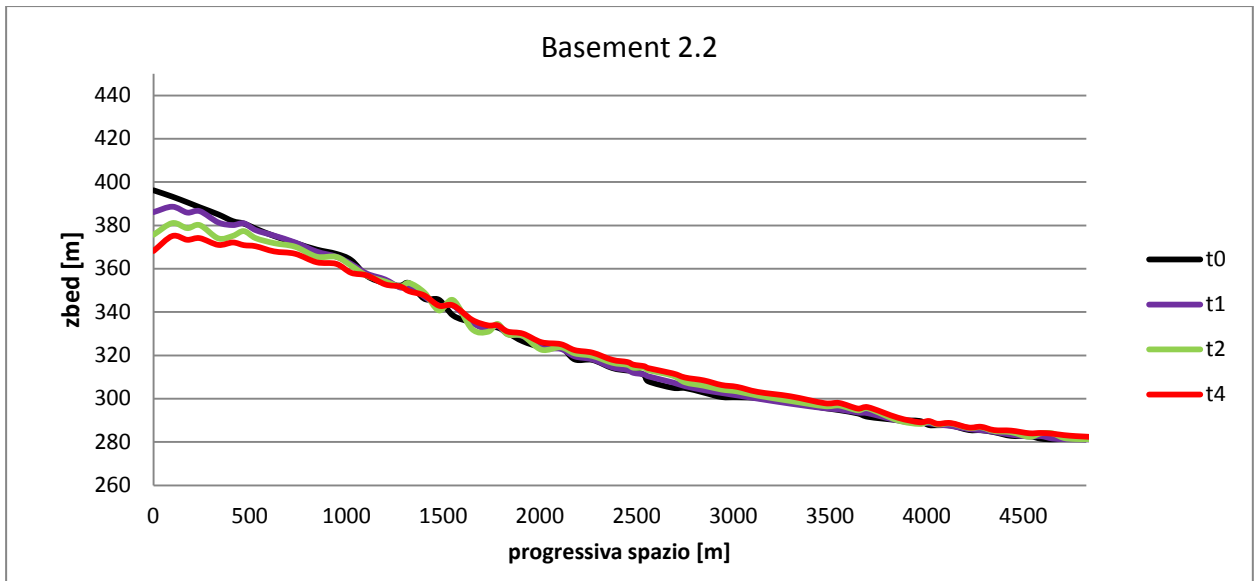


Fig. 4.21 – Profilo dell'alveo in erosione nella simulazione con Basement 2.2

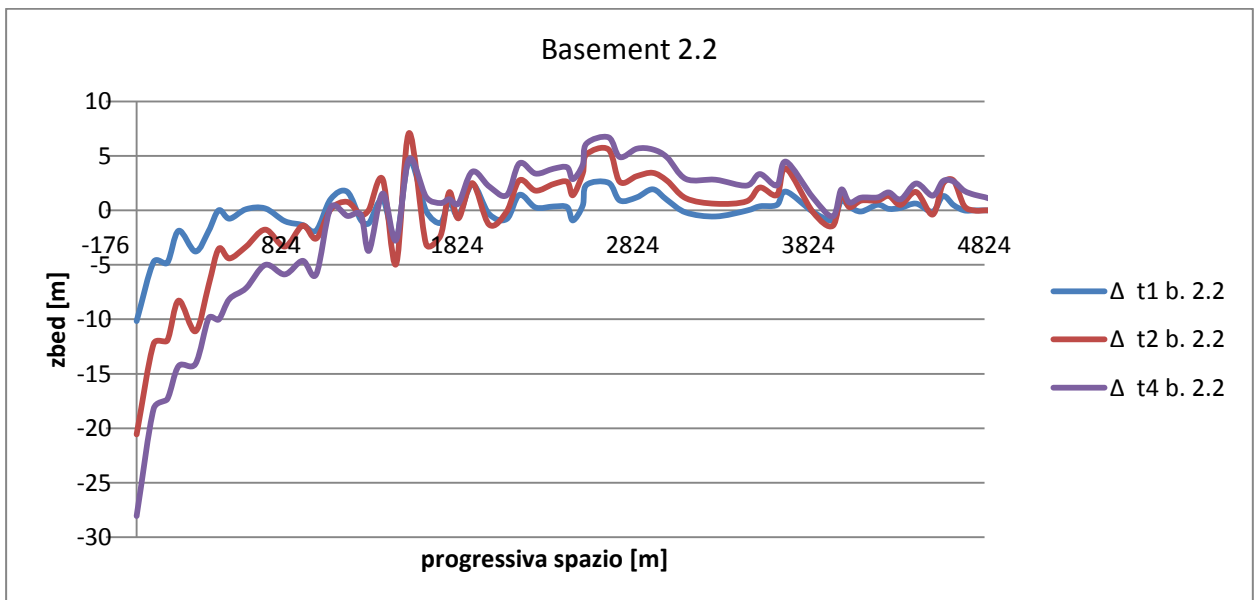


Fig. 4.22 – Erosione del fondo nella simulazione con Basement 2.2

Infine viene presentato un confronto tra le due versioni (si ricorda che in quella più recente è data la possibilità di calibrare alcuni parametri che invece nella versione 1.7 venivano imposti di default):

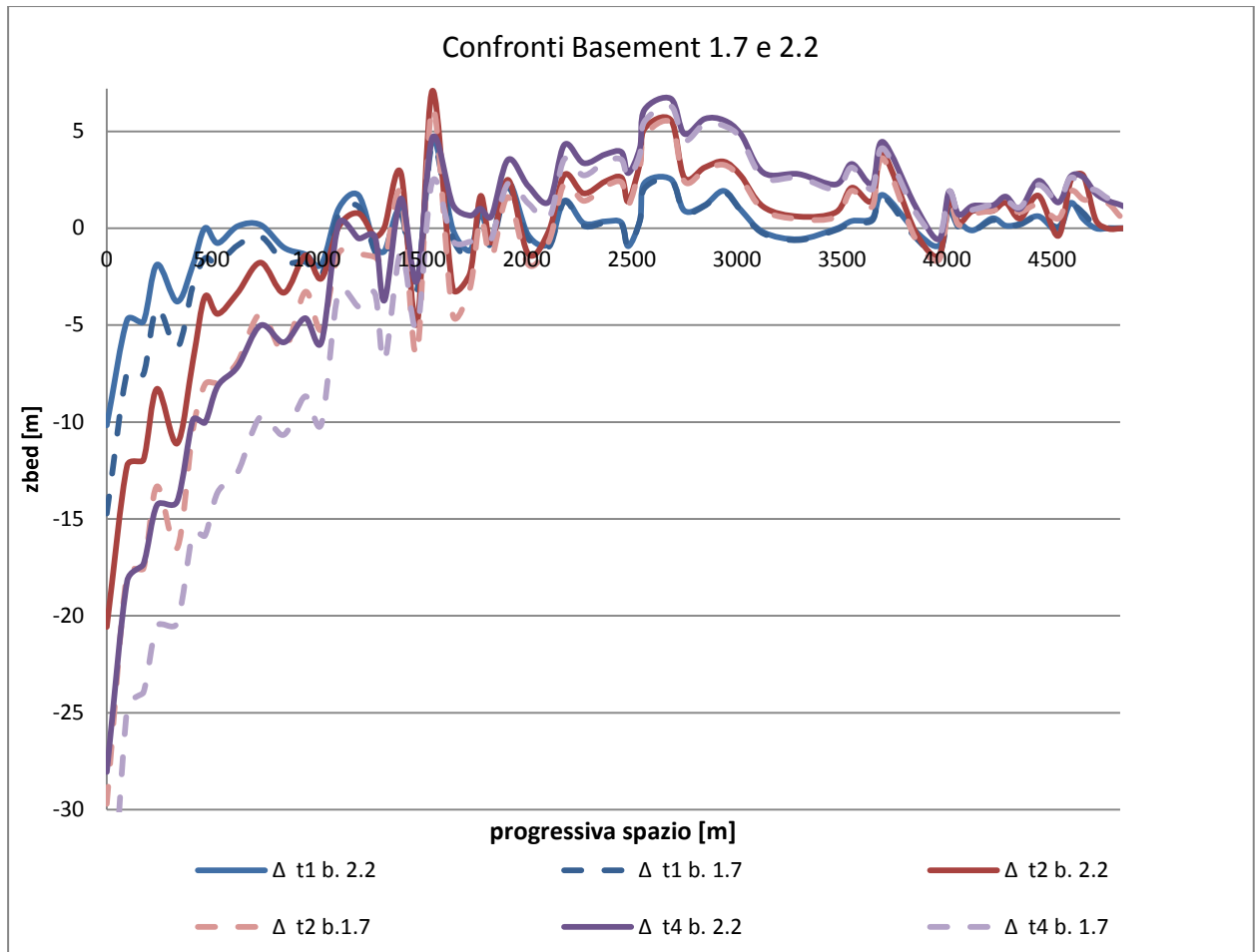


Fig. 4.23 – Confronto tra i risultati in erosione ottenuti dalle due differenti versioni di Basement (1.7 e 2.2)

Anche qui le sovrapposizioni sono buone, a parte alcune differenze (ma fuori dal tratto di interesse), che sono proporzionali al volume eroso, e quindi la tendenza generale tra tali divergenze nei risultati è quella di aumentare all'aumentare del tempo, a causa dei maggiori volumi coinvolti, e di diminuire spostandosi verso valle, dove le sezioni sono meno sensibili ai sedimenti imposti come alimentazione solida.

4.2.2.3 Scelta istanti caratteristici

I risultati proposti nei precedenti grafici visualizzano il profilo in alcuni specifici istanti temporali, per i quali sono disponibili i dati da confrontare con l'attuale simulazione, e che sono quindi stati mantenuti per questi primi confronti. Di qui in avanti, però, si scelgono altri istanti caratteristici, che sono quelli in concomitanza con i più significativi cambi di pendenza dell'idrogramma di piena.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

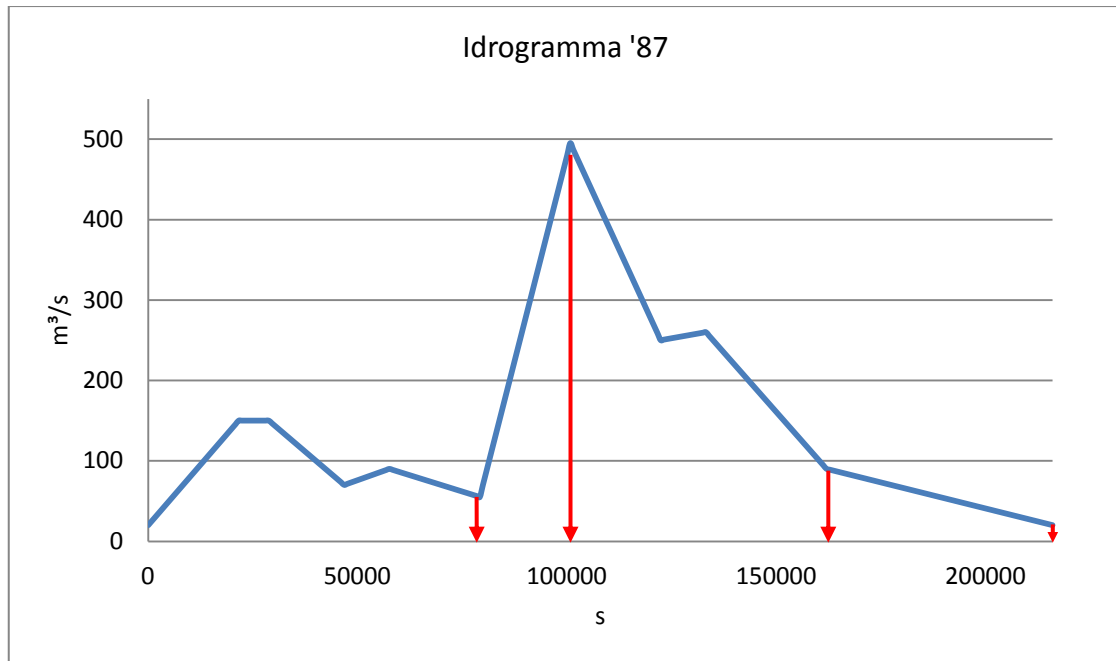


Fig. 4.24 – Scelta degli istanti caratteristici in funzione dell'idrogramma di piena

Per lo studio successivo del comportamento dell'alveo, verranno quindi scelti gli istanti:

- t_1 , immediatamente precedente al picco (77 000 s);
- t_2 , in concomitanza con la portata massima (100 000 s);
- t_3 , all'estremità inferiore del picco (161 000 s);
- t_4 , alla fine dell'evento (216 000 s).

Questo è il primo grafico con plottati tali istanti, con andamento del tutto analogo ai grafici precedenti (cfr. ad esempio, la Fig. 4.18), ma con valori associati ad istanti differenti.

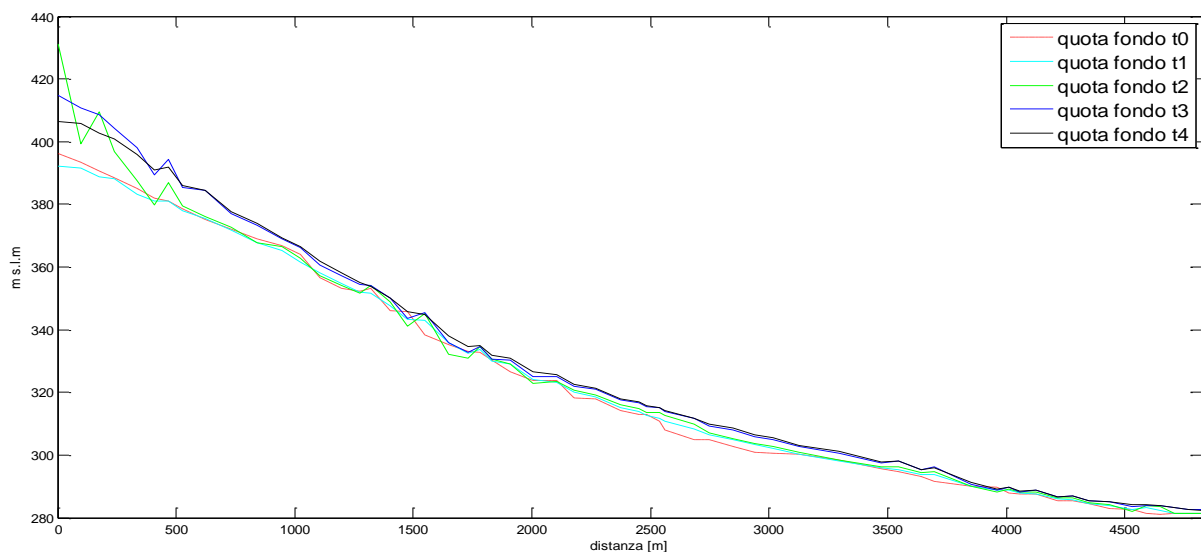


Fig. 4.25 – Profilo dell'alveo in accumulo nella simulazione con Basement 2.2

4.3 Analisi plurigranulari

A seguito dei risultati ottenuti nel Cap. 3, ci si è posti l'obiettivo iniziale di rendere più realistica la simulazione; in particolare si vuole eliminare l'esemplificazione fatta negli studi pregressi di ridurre una complessa distribuzione granulometrica ad un unico diametro ottenuto come media.

4.3.1 Creazione del modello

Di seguito verranno proposti alcuni studi volti alla scelta della geometria, dei parametri numerici e della granulometria, col fine di creare il modello che meglio riproduce l'alluvione dell'87.

4.3.1.1 Scelta del fondo d'alveo (corazzato a monte)

A seguito di indagini di campagna, è stato valutato che nella parte alta del Mallero di nostro interesse il d_{50} sia pari ad 80 mm, mentre nella parte inferiore sia pari a 10 mm. Tale variazione rispecchia il fenomeno del corazzamento già descritto al **Par. 3.3.2**; si vuole riprodurre tale situazione di distribuzione granulometrica del fondo lungo l'asta fluviale. A questo scopo, il fiume viene scarsamente alimentato, e gli viene assegnato un fondo misto uniformemente distribuito al 50 % di sedimenti di 80 mm e 10 mm di diametro rispettivamente. Di seguito la distribuzione delle percentuali dei sedimenti sul fondo dell'alveo all'istante iniziale:

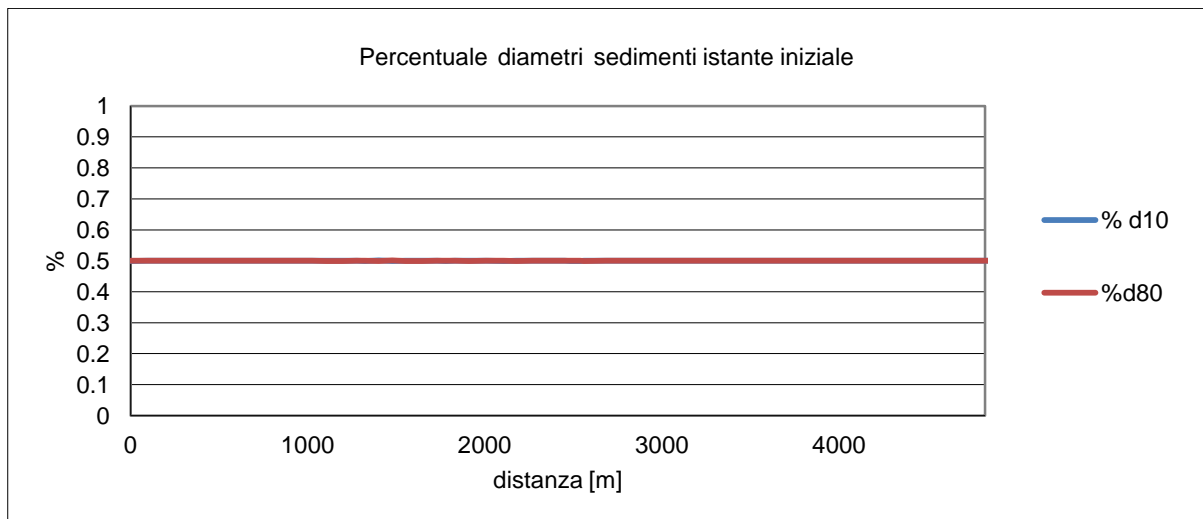


Fig. 4.26 – Distribuzione delle percentuali dei sedimenti al tempo iniziale

Come idrogramma in ingresso, è stata imposta la portata corrispondente al valore che caratterizza il Mallero per 180 giorni all'anno, ovvero $10 \text{ m}^3/\text{s}$; il tempo di simulazione è stato scelto sensibilmente maggiore a quelli usati negli altri casi (un mese); inoltre, per evitare un'eccessiva erosione dell'alveo, quest'ultimo è stato alimentato a monte con una portata solida (anch'essa di diametri pari al 50 % di 80 mm e 10 mm) pari a circa un terzo la portata solida

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

all'equilibrio, in modo tale che quest'immissione solida non alterasse troppo il comportamento d'alveo.

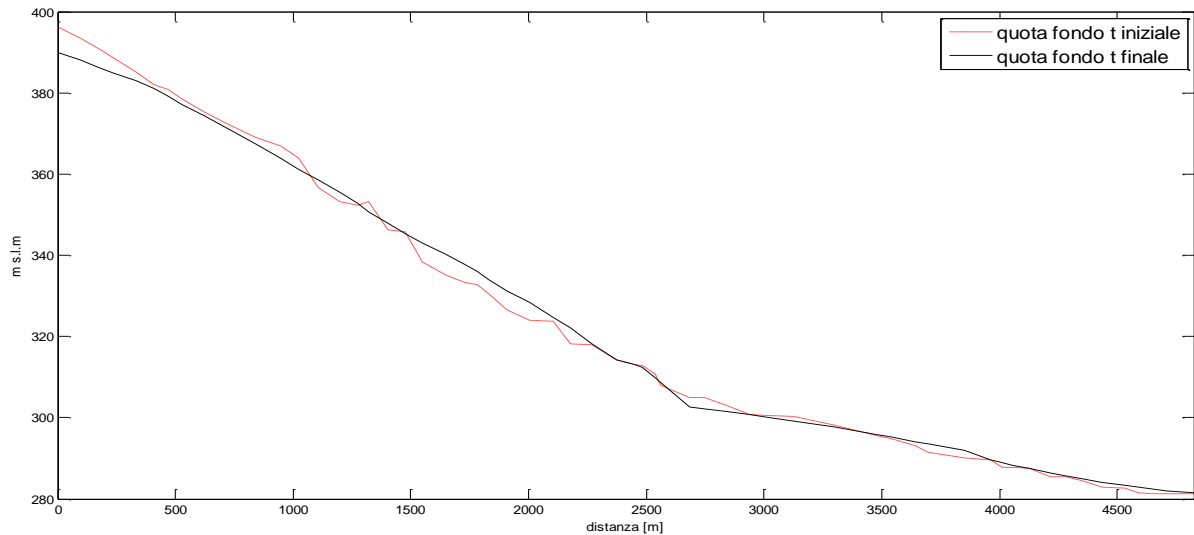


Fig. 4.27 – Ricostruzione del profilo all'equilibrio dopo un mese di simulazione

Questo è il profilo dell'alveo, ovviamente in erosione; ma la cosa che desta maggior interesse è la distribuzione delle percentuali granulometriche del fondo, rappresentata in **Fig. 4.28**.

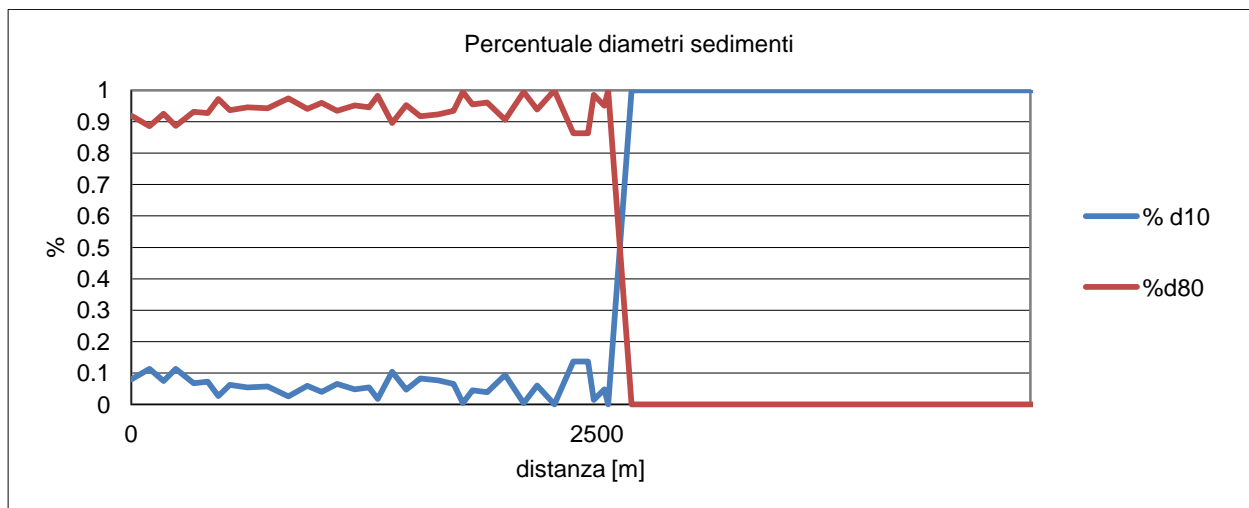


Fig. 4.28 – Distribuzione delle percentuali dei sedimenti dopo un mese di simulazione

È ben evidente che a monte vi sono alte percentuali di 80 mm (e, quindi, basse percentuali di 10 mm) a riprova del fatto che la corrente esercita un'azione corazzante nei confronti dell'alveo, ovvero trasporta più a valle i sedimenti più piccoli. Infatti a valle si invertono le distribuzioni delle percentuali dei sedimenti (questo perché, a valle, si depositano i sassi piccoli).

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Pertanto nelle successive simulazioni il fondo verrà caratterizzato da un diametro pari ad 80 mm a monte e un diametro pari a 10 mm a valle.

Dalla **Fig. 4.27** è evidente che l'alveo presenta un accentuato cambiamento di pendenza, che è congruente con la distribuzione di percentuali di **Fig.4.28** che varia bruscamente in corrispondenza della sezione in cui si ha il cambio di pendenza. L'utilizzo di due soli suoli (uno formato esclusivamente da sedimenti di diametro pari ad 80 mm, a monte, ed uno formato da sedimenti di diametro di 10 mm, a valle) è comunque diverso dalla variazione continua che ci può essere in un fiume e che porta a profili più regolari senza evidenti punti angolosi. Si ritiene però che il caso possa essere sufficientemente rappresentativo anche senza la creazioni di suoli intermedi da assegnare alle sezioni immediatamente a monte e valle del cambio di pendenza (con proporzioni dei diametri che dovrebbero variare in maniera graduale da 0-100 a 100-0, passando, ad esempio, per le combinazioni 20-80, 40-60, 30-70, 90-10).

4.3.1.2 Scelta dei parametri numerici

Come era stato fatto per il caso delle simulazioni dei casi test nel **Cap. 3**, anche ora si vuole eseguire un'indagine di sensitività ai valori che maggiormente influenzano tali casi test, ovvero lo spessore del volume di controllo (la cui influenza è stata più volte studiata nel corso della Tesi) ed il parametro di up_{wind} (che dovrebbe regolarizzare il deposito dei sedimenti). Quindi viene eseguita tale simulazione alcune volte confrontando poi i risultati ottenuti combinando tra loro questi due parametri.

		C.V.T.	
		0.4	0.2
Up_{wind}	0.5	Combinaz. 1	Combinaz. 2
	1	Combinaz. 3	Combinaz. 4

Tab. 4.5 – Combinazioni dei parametri numerici

Come si nota, la variazione di tali parametri è del tutto ininfluenza per la scala adottata (i quattro profili sono perfettamente coincidenti); pertanto verrà d'ora in poi prediletta la prima combinazione, ovvero i parametri di up_{wind} e c.v.t. saranno posti pari a 0.5 e 0.4 rispettivamente.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

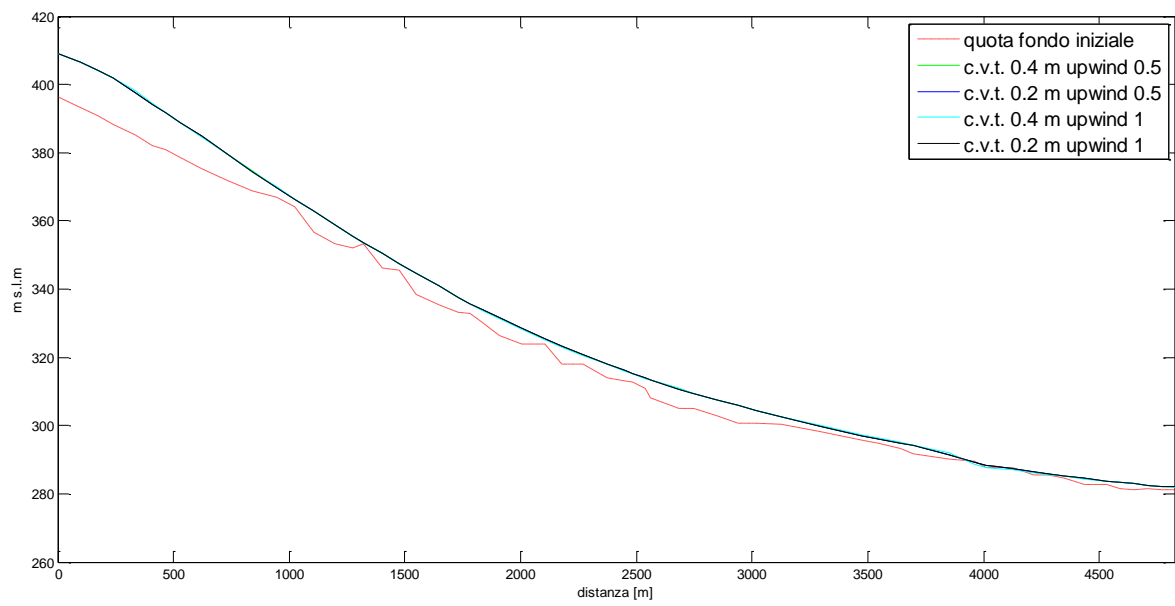


Fig. 4.29 – Sensitività del Mallero ai parametri numerici

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

4.3.1.3 Scelta della granulometria entrante

Dopo aver scelto i parametri che controllano la simulazione e i diametri che caratterizzano il fondo dell'alveo, ora si sceglie una distribuzione granulometrica per l'alimentazione solida coerente con le indagini sperimentali condotte sul sito del caso in esame; viste le osservazioni, si è deciso di utilizzare una granulometria non troppo complicata, ovvero una miscela composta da due diametri, in diversa proporzione, pari a 10 ed 80 mm (negli studi precedenti al nostro si era utilizzata una media di 40 mm).

Il fondo dell'alveo è composto, come già detto nel precedente paragrafo, da sedimenti di 80 mm a monte e 10 mm a valle; i diversi sassogrammi immessi sono invece riassunti nella seguente **Tab. 4.6**.

% d10	% d80	
100	0	Immissione di soli sedimenti "piccoli"
50	50	Immissione di granulometria conforme alle indagini
0	100	Immissione di soli sedimenti "grandi"
0	0	Nessun apporto solido

Tab. 4.6 – Differenti granulometrie dei sedimenti immessi

Il primo caso è quello che prevede di alimentare a monte con un sassogramma caratterizzato da un d_{50} molto piccolo (10 mm). Vengono di seguito visualizzati i risultati agli istanti elencati al **Par. 4.2.2.3**, ovvero in corrispondenza dei più significativi cambiamenti di pendenza dell'idrogramma.

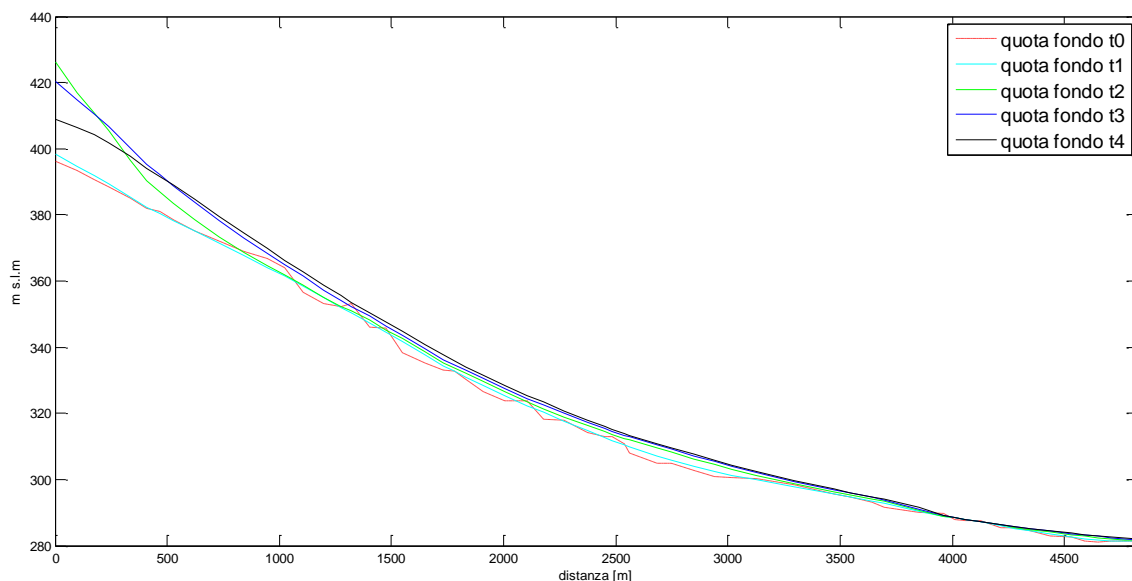


Fig. 4.30 – Profilo del Mallero a diversi istanti temporali con alimentazione "piccola"

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Concentrando l'attenzione sulla sezione iniziale si nota che, come prevedibile, l'innalzamento maggiore si ha in concomitanza del picco, ovvero al t_2 (100 000 s), poiché il picco di Q_w è anche il picco di Q_s , mentre gli altri livelli raggiunti dal fondo sono fortemente influenzati dalla storia di alimentazione. Infatti dopo il picco del sassogramma, il fondo decresce lievemente (al t_3 , linea blu) e decresce ulteriormente alla fine della simulazione (linea nera corrispondente ai 216 000 s).

Tale dipendenza dall'andamento del sassogramma si esaurisce però in uno spazio relativamente breve: già dalla sezione posta 750 m a valle dell'immissione, infatti, i livelli del fondo si dispongono in maniera proporzionale al tempo trascorso dall'inizio della simulazione (ovvero, maggiore è il tempo trascorso, maggiore è il livello di accumulo di sedimenti sul fondo dell'alveo, indipendentemente da quanto siano stati alimentati fino a quell'istante). Questo può comportare significative differenze nel tratto di maggior interesse, ovvero quello dalla sezione "curva" in poi, quello che interessa l'abitato di Sondrio, che è ingrandito nella seguente **Fig 4.31**.

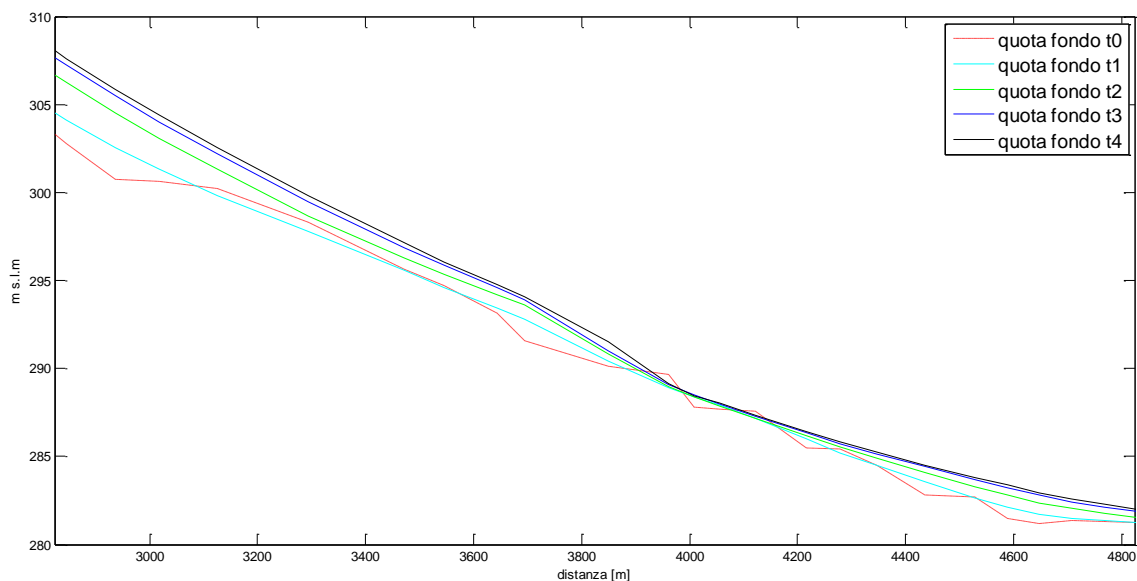


Fig. 4.31 – Profilo del Mallero a diversi istanti temporali con alimentazione "piccola", zoom tratto cittadino

Si nota che, a differenza delle sezioni in testa al tratto in esame, il livello di sovralimentazione raggiunto dal tratto d'alveo che attraversa Sondrio cresce con l'aumentare del tempo, ed è legato dell'effettivo andamento del sassogramma immesso.

Si osserva un comportamento particolare dell'alveo in corrispondenza della sezione 82 (3961 m); in questo tratto infatti la quota del fondo sembra non variare col tempo; per darne una spiegazione si è analizzato come varia il numero di Froude lungo l'alveo (**Fig.4.32**):

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

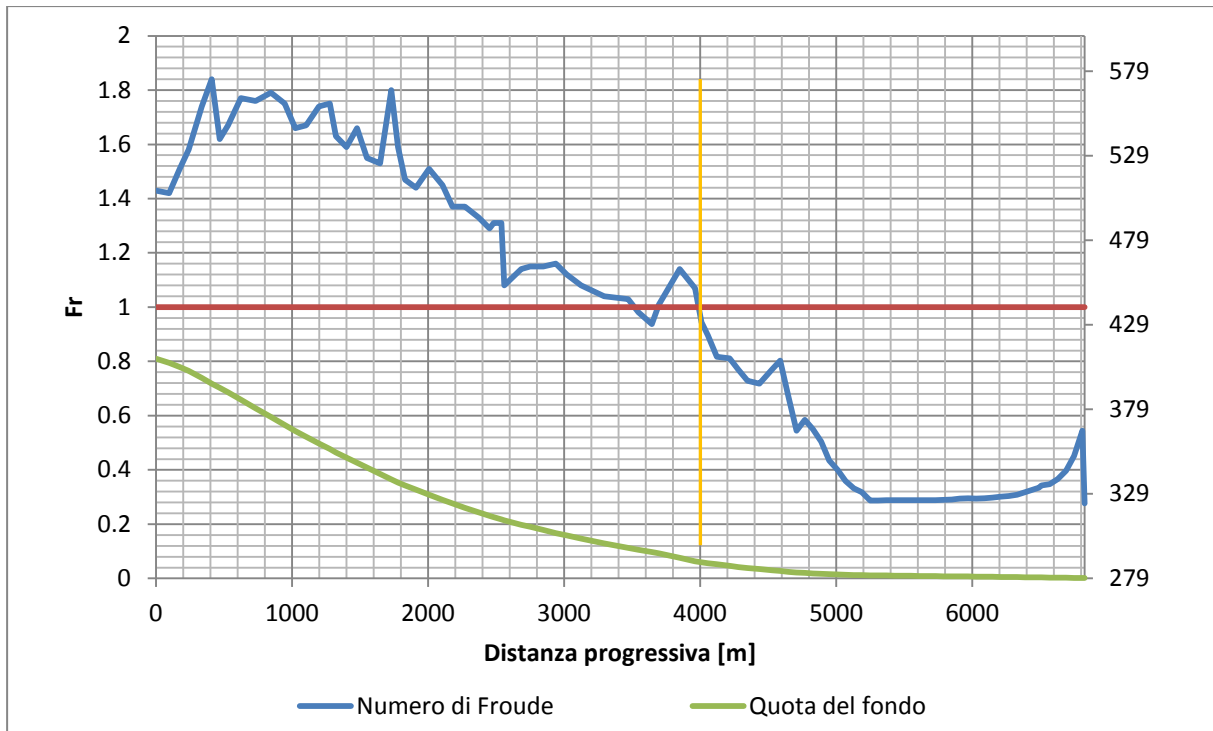


Fig. 4.32-Variazione del numero di Froude

Si osserva che proprio in corrispondenza della sezione CS 82, visualizzata con un tratto arancione) c'è il passaggio della corrente per l'altezza critica cioè da veloce a lenta che si traduce in un risalto idraulico; questo fenomeno potrebbe essere all'origine del diverso comportamento dell'alveo in quel punto.

Dei risultati assolutamente analoghi sono ottenuti per l'alveo alimentato con diverse granulometrie, dove, a meno dei valori assoluti raggiunti, il comportamento è del tutto identico. Per completezza vengono riportati tali profili, con i relativi ingrandimenti nel tratto cittadino.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Il secondo caso è quello alimentato con dei sedimenti di 10 mm e 80 mm rispettivamente, in proporzione del 50%; in **Fig. 4.33** è visualizzato il profilo del Mallero nell'intero tratto in esame; in **Fig. 4.34**, l'ingrandimento del tratto cittadino:

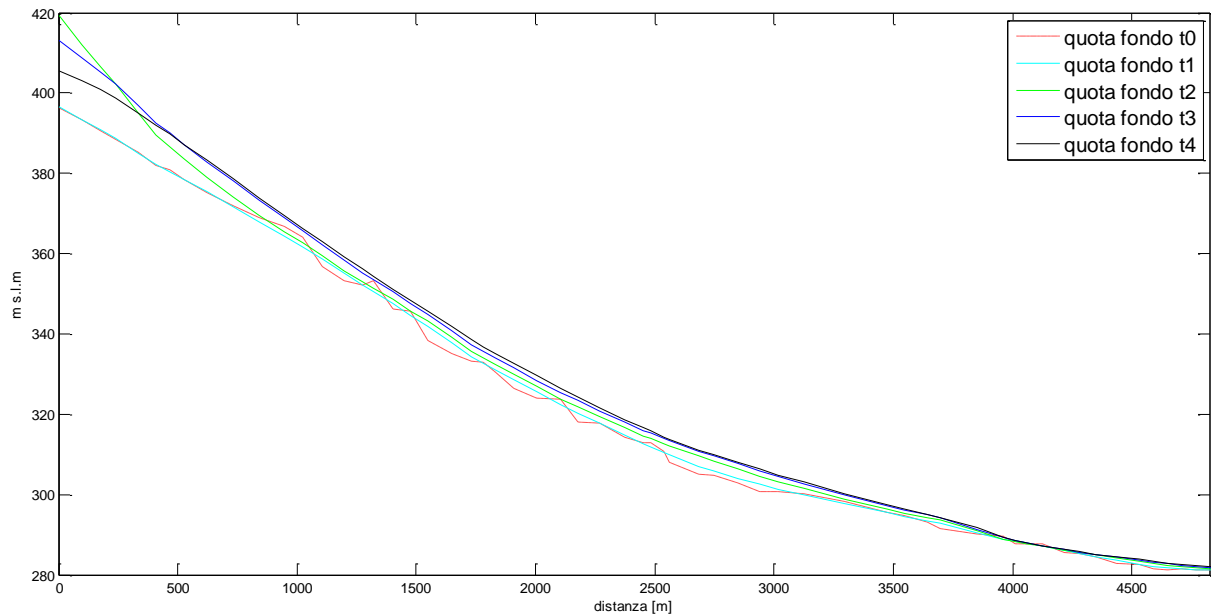


Fig. 4.33 – Profilo del Mallero a diversi istanti temporali con alimentazione “media”

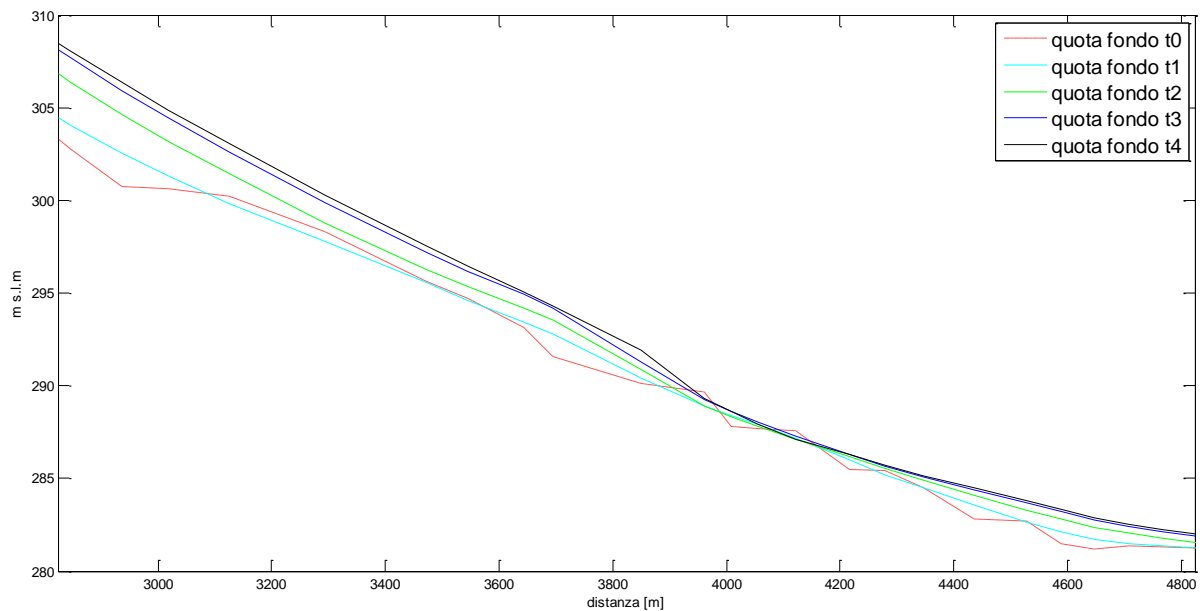


Fig. 4.34 – Profilo del Mallero a diversi istanti temporali con alimentazione “media”, zoom tratto cittadino

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Il terzo caso è riferito al sassogramma con valori dei diametri dei sedimenti pari a 80 mm.

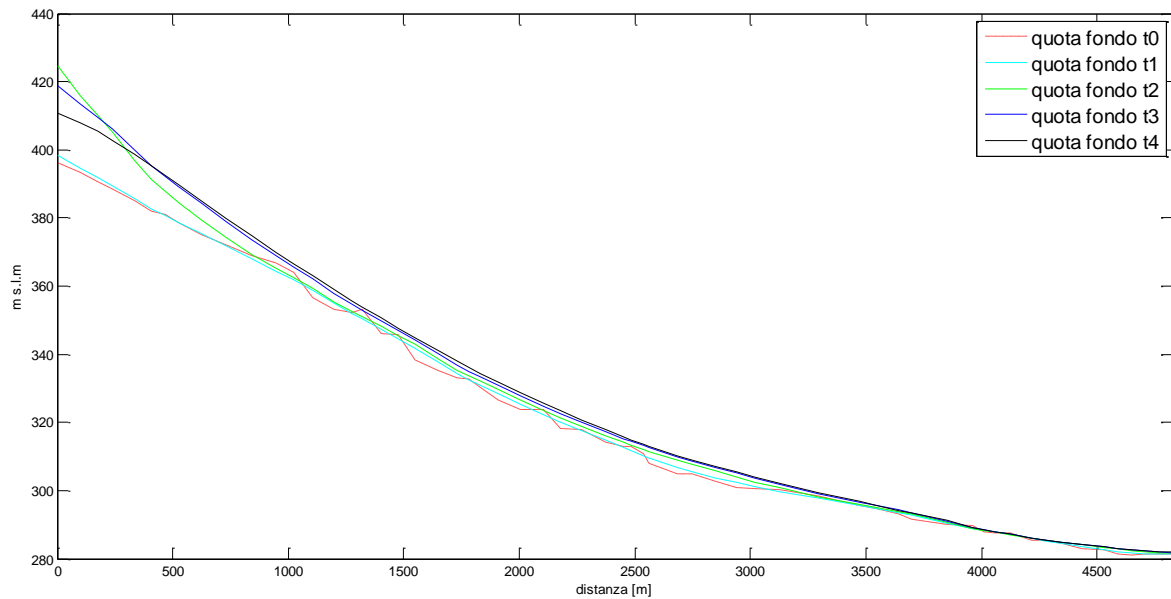


Fig. 4.35 – Profilo del Mallero a diversi istanti temporali con alimentazione “grossa”

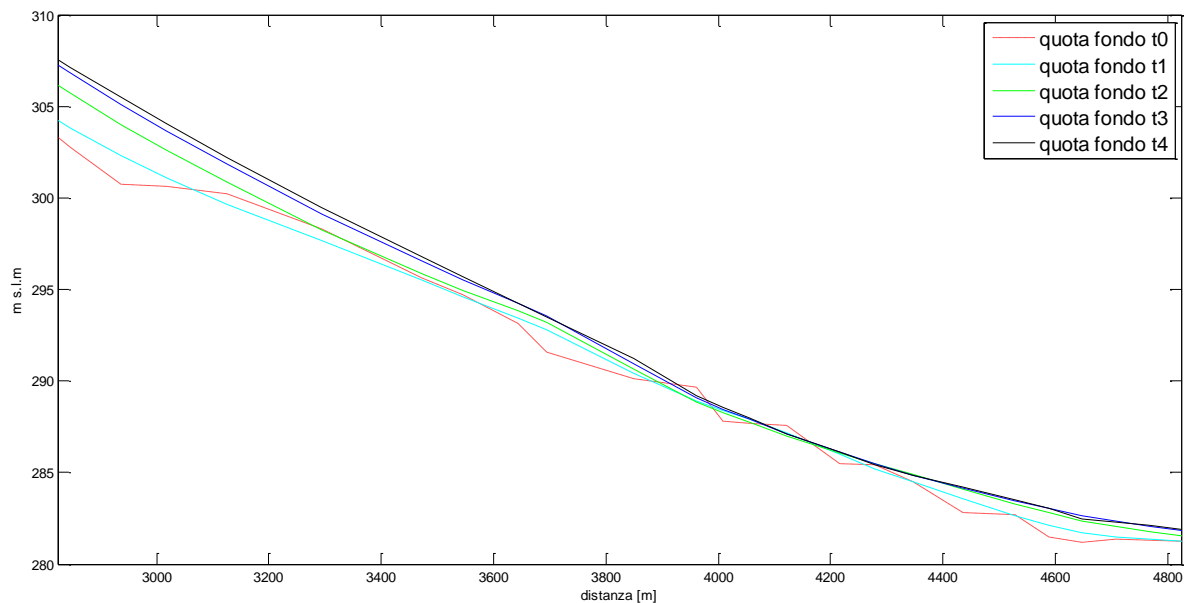


Fig. 4.36 – Profilo del Mallero a diversi istanti temporali con alimentazione “grossa”, zoom tratto cittadino

L’evoluzione morfologica del tratto cittadino, come premesso, è quindi indipendente dalla modalità di alimentazione. Si può verificare tale affermazione per mezzo del grafico mostrato in **Fig. 4.37**, in cui vengono sovrapposti i tre diversi risultati con alimentazione solida di diametri variabili, e dal suo zoom nel tratto cittadino, in cui è visibile la perfetta coincidenza dei profili nelle sezioni di valle.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

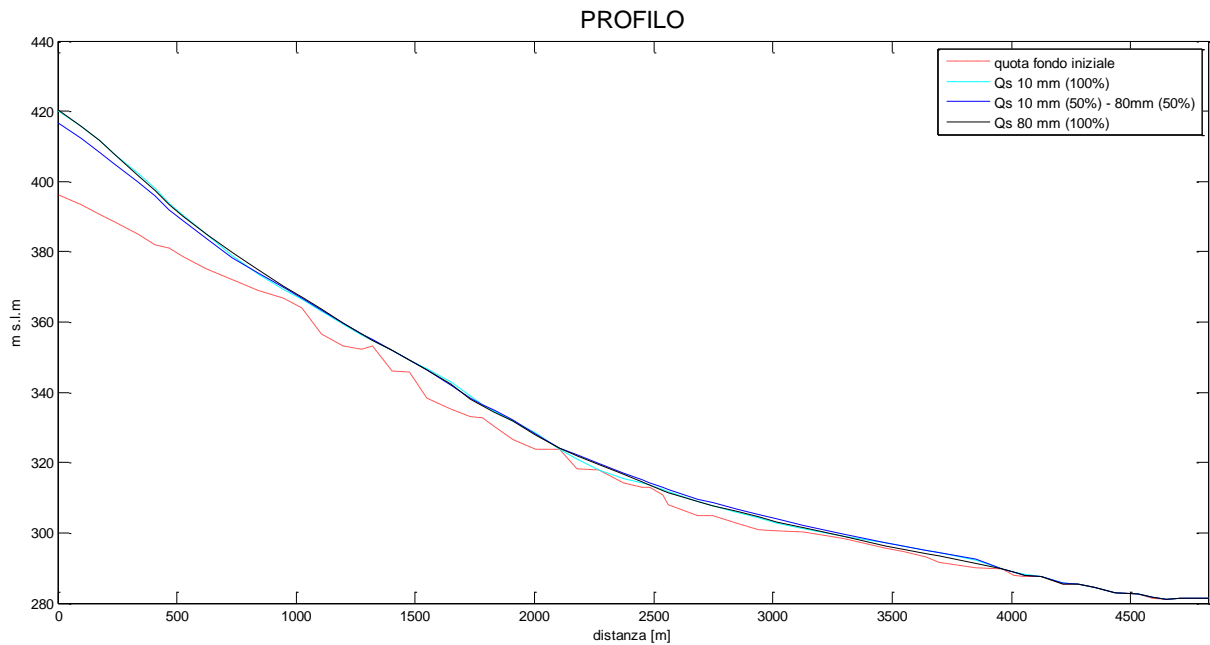


Fig. 4.37 – Profilo del Mallero alimentato con granulometrie di diversa grandezza

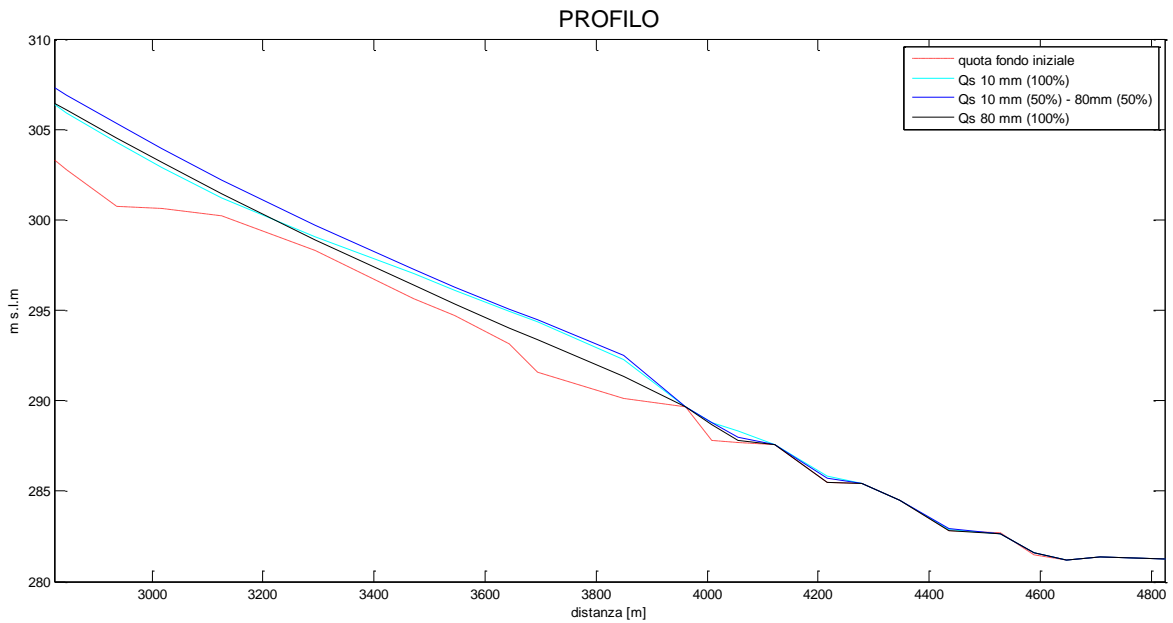


Fig. 4.38 – Profilo del Mallero alimentato con granulometrie di diversa grandezza, zoom tratto cittadino

Per validare tale ipotesi, il grafico di confronto appena proposto viene corredato del profilo ottenuto senza alimentazione dell'alveo (**Fig. 4.38**): in **Fig. 4.39** vi è l'andamento del profilo sotto tale, drastica, condizione di non alimentazione a diversi istanti temporali.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

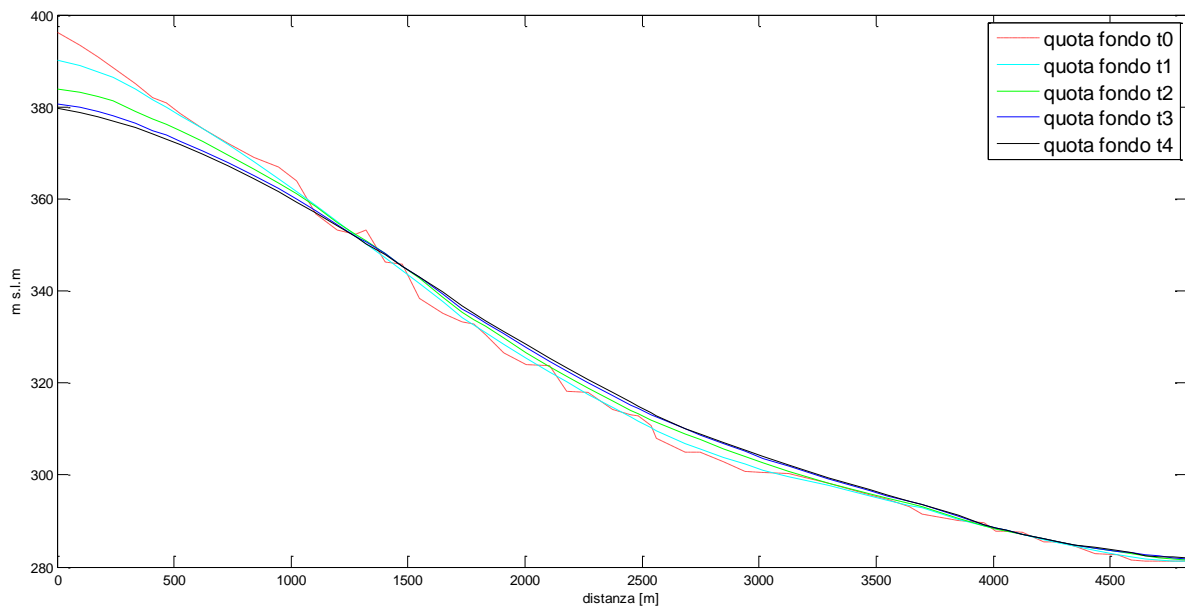


Fig. 4.39 – Profilo del Mallero a diversi istanti temporali senza alimentazione

Come prevedibile, con l'avanzare del tempo, avanza anche il livello di erosione delle sezioni iniziali. Ma anche in questo caso, da una certa sezione in poi, tale fenomeno si esaurisce e addirittura il letto del Mallero cresce (anche in questo caso, come per i precedenti casi di differente alimentazione, in maniera tanto maggiore quanto maggiore è il tempo trascorso dall'inizio della simulazione):

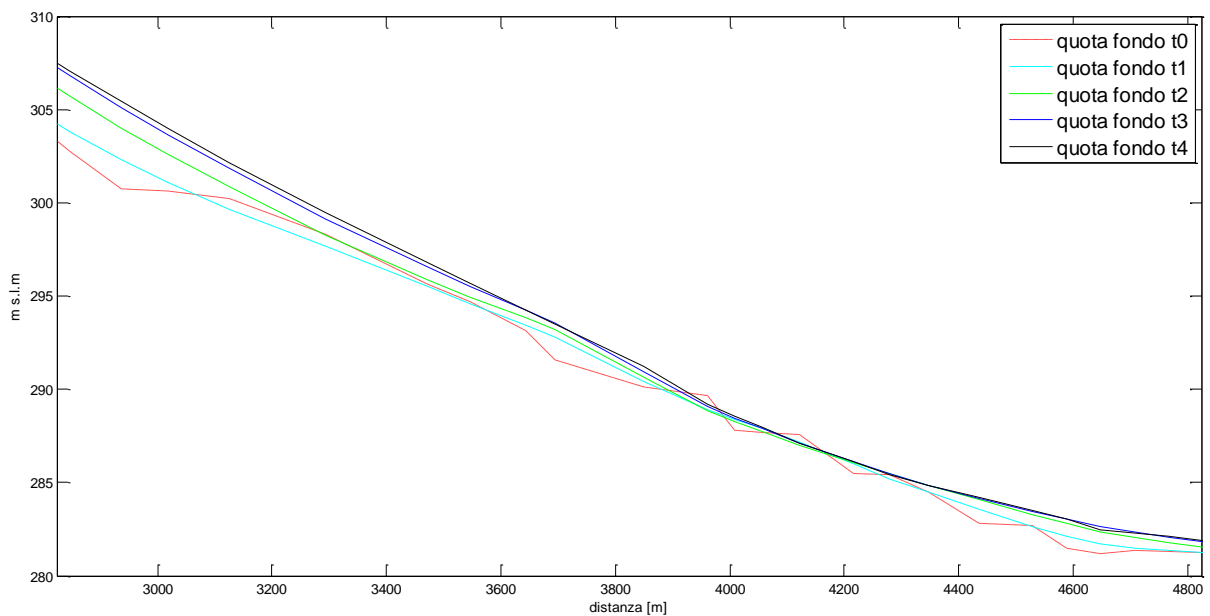


Fig. 4.40 – Profilo del Mallero a diversi istanti temporali senza alimentazione, zoom tratto cittadino

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Infine vengono messi a confronto tutti i precedenti risultati in un unico grafico (**Fig.4.41**), per poter valutare i diversi comportamenti in funzione della differente granulometria dell'alimentazione solida imposta a monte; inoltre è stata aggiunta l'analisi che era stata svolta nei precedenti studi (con unico diametro sia per il fondo che per l'alimentazione pari a 40mm).

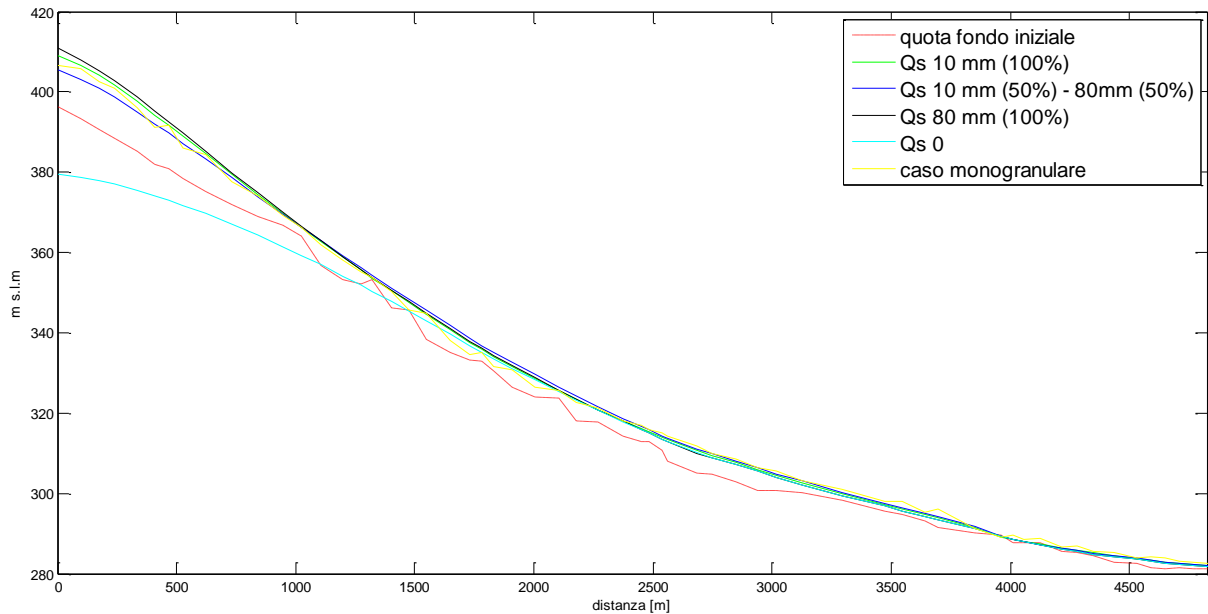


Fig. 4.41 – Profilo del Mallero all'istante finale con differenti simulazioni

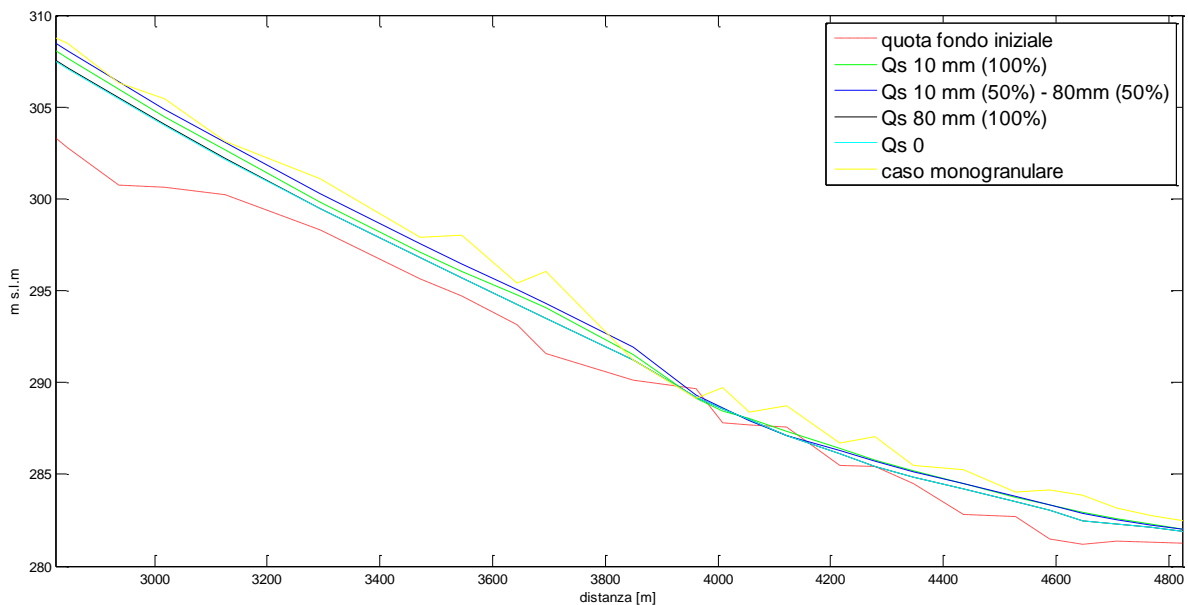


Fig. 4.42 – Profilo del Mallero all'istante finale con differenti simulazioni, zoom tratto cittadino

Si sottolinea come il comportamento dei risultati qui ottenuti sia più lineare se paragonato al caso monogranulare che era stato proposto precedentemente, raffigurato in linea gialla.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Tuttavia, confrontando le misure che sono state fatte dopo l'evento del 1987 con le analisi svolte per mezzo del calcolatore, si nota che queste (segnate con dei triangolini nella **Fig. 4.43**) sono ancora molto diverse dalle misure di campagna.

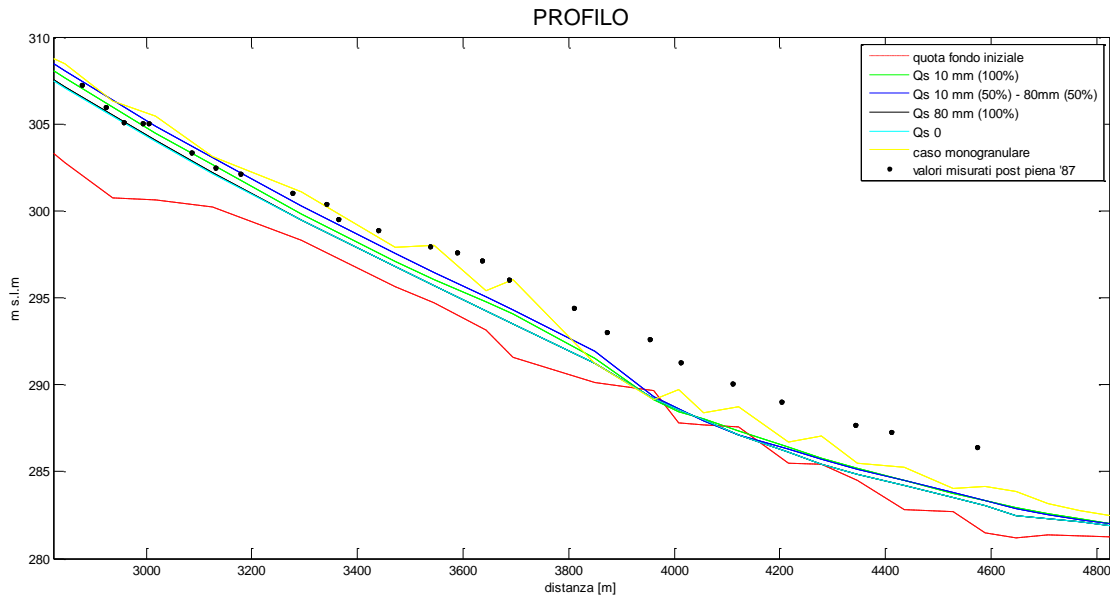


Fig. 4.43 – Confronto tra valori misurati e valori calcolati per il Mallero nel tratto cittadino

Visti i risultati fin qui ottenuti, viene scelto come sassogramma plurigranulare in ingresso quello che meglio rappresenta la realtà, ovvero quello con una granulometria mista tra 10 mm ed 80 mm.

Tuttavia dai confronti, il modello che meglio si avvicina ai valori misurati, rimane il modello monogranulare, per quanto possa essere un'approssimazione più grezza.

4.3.2 Indagini sul comportamento della piena dell' 87

Visti i risultati finora ottenuti, e scelta la più realistica modalità di alimentazione, si propone una serie di indagini per studiare con più attenzione l'evoluzione morfologica dell'evento alluvionale del 1987.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

4.3.2.1 Studio delle portate d'equilibrio e del grado di sovralimentazione

Per prevedere la predisposizione dell'alveo ad erodere piuttosto che ad accumulare, è particolarmente importante capire come questo venga alimentato. Il sassogramma dà informazioni sui valori assoluti di sedimenti che vengono immessi nell'alveo, ma questi hanno un senso solo se confrontati con la capacità di trasporto solida effettivamente trasportabile all'equilibrio per ogni classe granulometrica. Nella prossima tabella vengono calcolati, per ogni portata idrica caratterizzante l'evento del 1987, e per ogni diametro immesso, i valori della portata all'equilibrio (per la sezione in testa all'alveo):

T [s]	Q_w [m ³ /s]	h_0 [m]	Area bagnata [m ²]	Perimetro bagnato [m]	Raggio idraulico [m]	Velocità [m/s]	$Q_{Eq}(10\text{ mm})$ [m ³ /s]	$Q_{Eq}(40\text{ mm})$ [m ³ /s]	$Q_{Eq}(80\text{ mm})$ [m ³ /s]
0	10	0.28	3.36	12.582	0.267	2.976	0.006	-	-
25000	160	1.68	20.98	15.494	1.354	7.626	1.293	0.291	-
46000	85	1.1	13.56	14.288	0.949	6.268	0.659	0.001	-
60000	100	1.23	15.15	14.558	1.041	6.601	0.790	0.035	-
80000	85	1.1	13.56	14.288	0.949	6.268	0.659	0.001	-
100000	500	3.67	47.86	19.632	2.438	10.447	3.572	2.003	0.455
122000	240	2.21	28	16.596	1.687	8.571	1.912	0.706	-
133000	260	2.34	29.68	16.866	1.760	8.760	2.057	0.811	-
161000	100	1.23	15.15	14.558	1.041	6.601	0.790	0.035	-
216000	10	0.28	3.36	12.582	0.267	2.976	0.006	-	-

Tab. 4.7 – Calcolo portate di equilibrio

Di qui si può tracciare l'andamento della portata richiesta per l'equilibrio del trasporto solido.

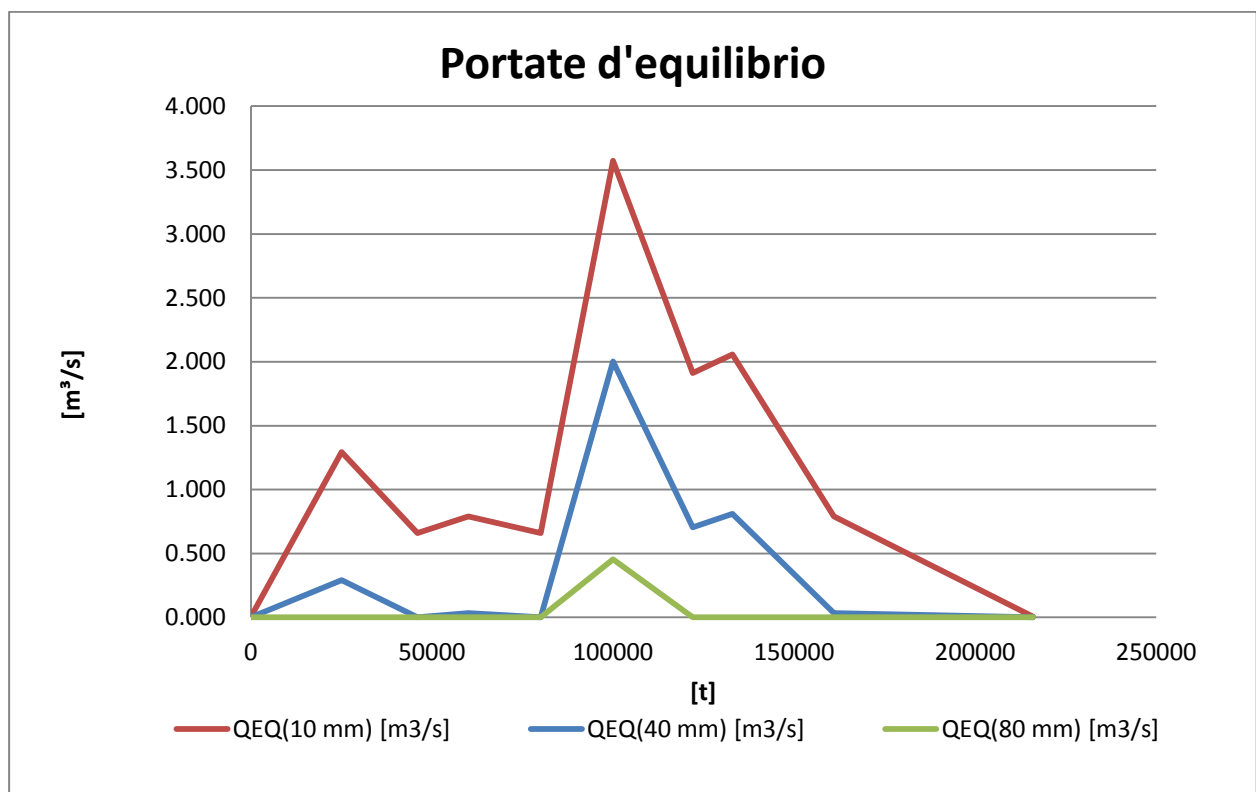


Fig. 4.44 – Valori delle portate d'equilibrio al variare del diametro

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Il grafico appena riportato sta ad indicare, per ogni istante temporale e, quindi, in funzione delle condizioni idrauliche per tale portata d'acqua, quanti sedimenti il fiume sarebbe in grado di trasportare.

Pertanto se i sedimenti immessi sono maggiori, l'alveo in tali istanti deposita i sedimenti della relativa classe granulometrica; se i sedimenti immessi sono inferiori, per raggiungere l'equilibrio l'alveo dovrà erodere. Laddove non vi è alcun valore per la portata all'equilibrio, il diametro a cui si riferisce risulta immobile in tali condizioni idrauliche (tipicamente diametri grossi per portate idriche piccole). Preme fare una precisazione riguardo alla curva grigia in **Fig. 4.45**: avendo generato un sassogramma in ingresso formato da due classi granulometriche in proporzione del 50%, i diametri immessi per ciascuna classe granulometrica saranno in realtà la metà della portata immessa (ad esempio, a 100 000 s la portata solida immessa è di 19 m³/s, ma è in realtà la somma di 9.5 m³/s di sedimenti di 10 mm di diametro e 9.5 m³/s di sedimenti di 80 mm di diametro). Pertanto tale curva rappresenta l'andamento del sassogramma riferito a ciascuna classe granulometrica presente.

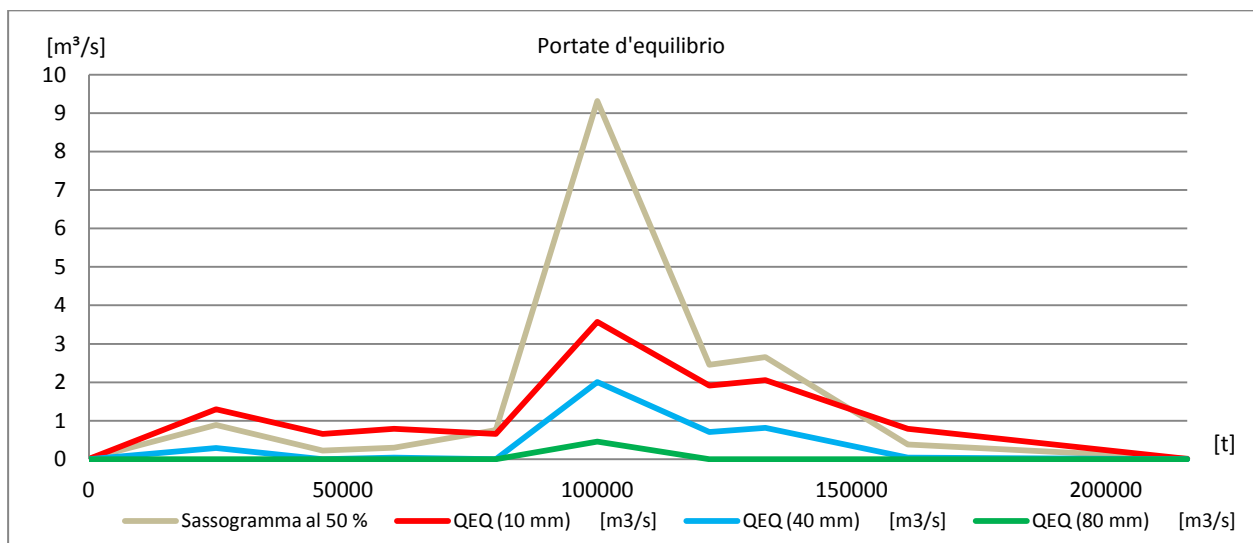


Fig. 4.45 – Valori delle portate d'equilibrio al variare del diametro

Come detto, questi valori danno un senso alla portata solida espressa per ogni istante dal sassogramma se rapportati con essa, attraverso il calcolo della costante di sovralimentazione K_S già introdotta al **Par. 3.1**, che si ricorda essere espressa come:

$$K_S = \frac{Q_S}{Q_{EQ}}$$

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Istanti t [s]	Portata idrica '87	Sassogramma 700 000 m ³	Sassogramma al 50 %	Q _{EQ} (10 mm) [m ³ /s]	Q _{EQ} (40 mm) [m ³ /s]	Q _{EQ} (80 mm) [m ³ /s]	K(s) 10 mm	K(s) 40 mm	K(s) 80 mm
0	20	0.03	0.015	0.006	-	-	2.394	-	-
25000	150	1.77	0.885	1.293	0.291	-	0.684	3.040	-
46000	73.2	0.45	0.225	0.659	0.001	-	0.341	-	-
60000	85.33	0.59	0.295	0.790	0.035	-	0.373	8.454	-
80000	84.33	1.51	0.755	0.659	0.001	-	1.145	-	-
100000	480.33	18.63	9.315	3.572	2.003	0.455	2.608	4.651	20.465
122000	250	4.91	2.455	1.912	0.706	-	1.284	3.480	-
133000	260	5.31	2.655	2.057	0.811	-	1.291	3.275	-
161000	94.25	0.76	0.38	0.790	0.035	-	0.481	10.890	-
216000	20	0.03	0.015	0.006	-	-	2.394	-	-

Tab. 4.8 – Calcolo costanti di sovralimentazione

Da questi valori si ricava l'andamento del grado di sovralimentazione o sottoalimentazione, a seconda della posizione rispetto all'equilibrio (retta grigia orizzontale al valore $K(S) = 1$). In questo grafico è evidente che per quasi un giorno (77 000 s) la portata di sedimenti di 10 mm è inferiore all'equilibrio, e pertanto tale granulometria verrà erosa dal fondo (se presente).

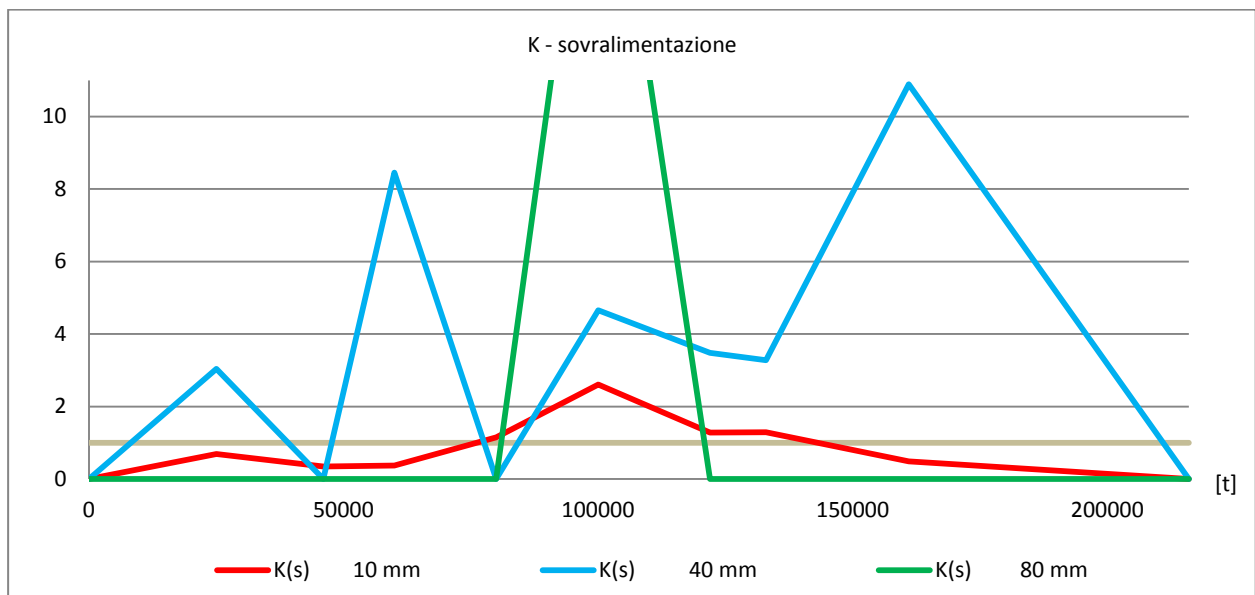


Fig. 4.46 – Valori delle costanti di sovralimentazione al variare del diametro

Si vuol far notare che dove il diametro risulta immobile per le condizioni idrauliche di detta corrente, il valore $K(S)$ risulta infinito per qualsiasi alimentazione diversa da 0, il che genera delle irregolarità nel grafico che ne schematizza l'andamento .

4.3.2.2 Corazzamento dell'alveo

Come era stato fatto per ricostruire la distribuzione granulometrica effettivamente presente nel Mallero prima della piena, a portata in regime costante, anche per l'evento alluvionale dell'87 è stata fatta un'analisi delle percentuali di solidi presenti sul fondo dell'alveo. Di seguito vengono presentati tre differenti grafici, ognuno per un istante temporale ben definito, che schematizzano l'andamento delle percentuali delle varie classi granulometriche presenti sul fondo dell'alveo.

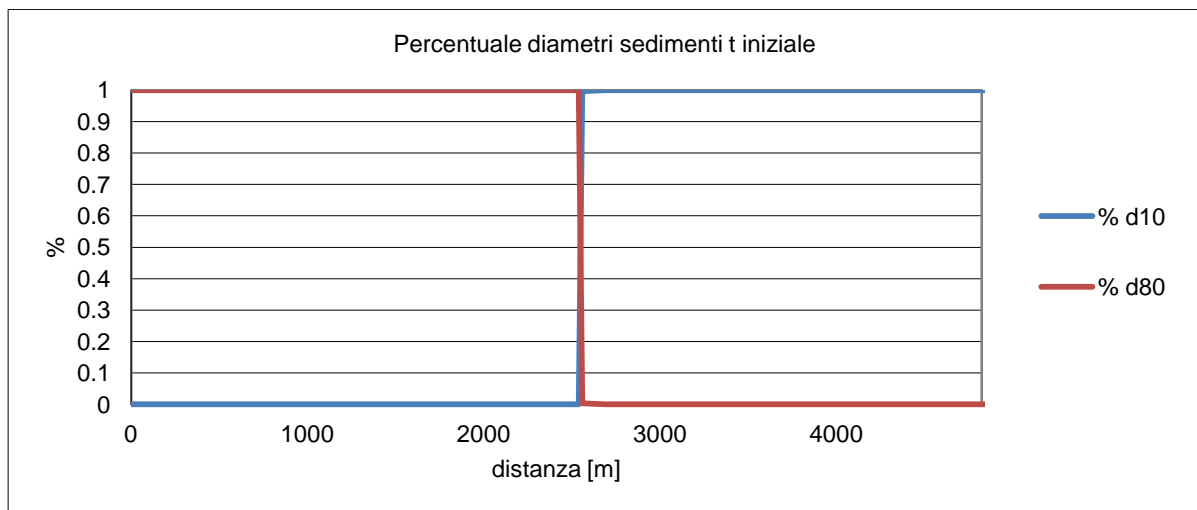


Fig. 4.47 – Andamento delle percentuali delle classi granulometriche al tempo iniziale

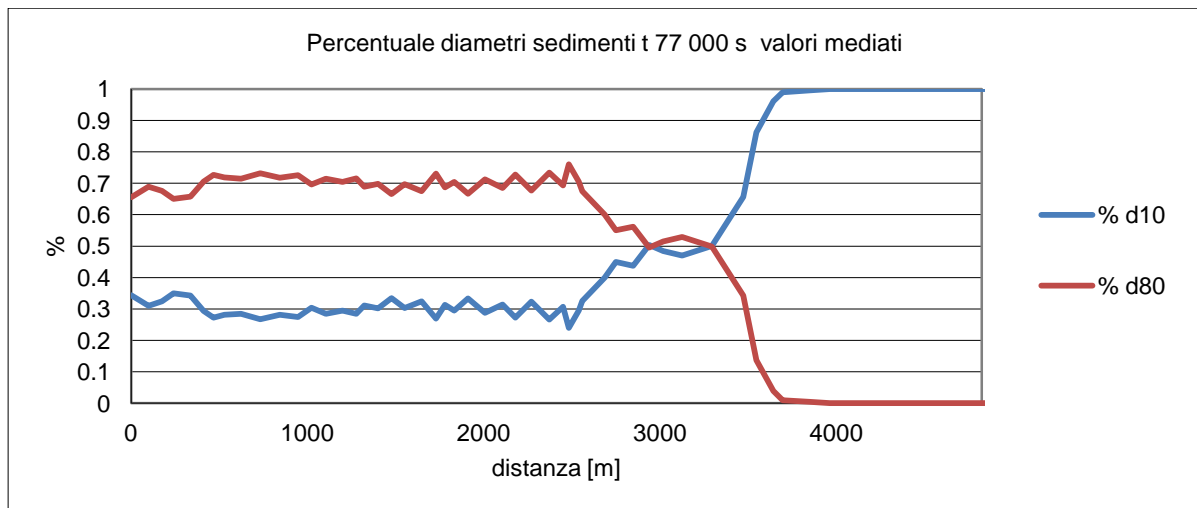


Fig. 4.48 – Andamento delle percentuali delle classi granulometriche prima del picco

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

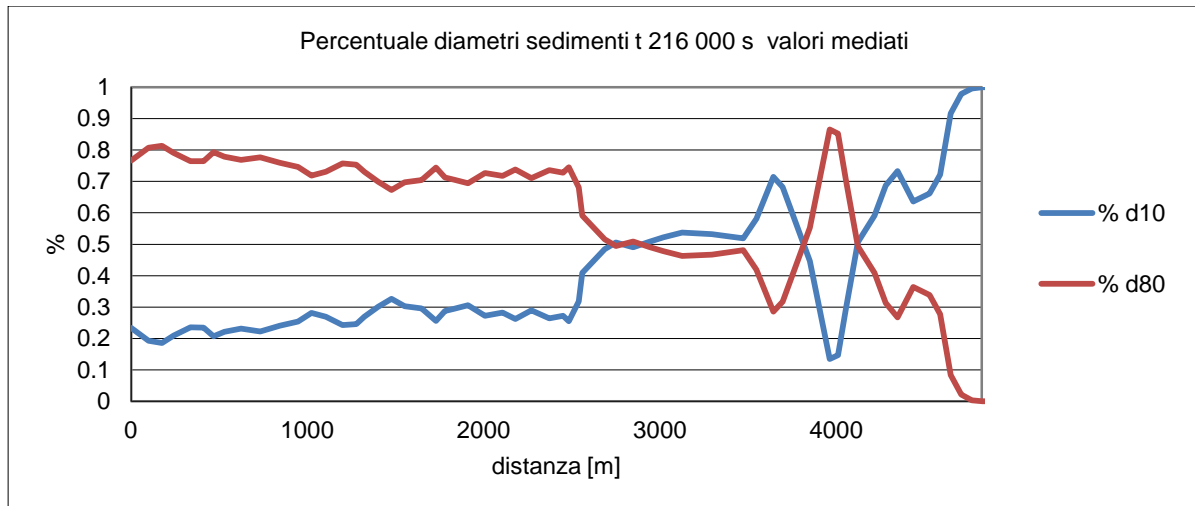


Fig. 4.49 – Andamento delle percentuali delle classi granulometriche al tempo finale

Dal confronto dei successivi istanti temporali, risulta evidente quanto segue:

- all'istante iniziale il fondo è costituito da sedimenti di 80 mm a monte, e da sedimenti di 10 mm a valle;
- a seguito dell'immissione di una granulometria bi-granulare, nei primi istanti si ha un certo mescolamento dei sedimenti, con una granulometria che è mediamente più grossolana a monte che a valle. Nelle sezioni finali l'immissione di tale granulometria non si riesce ad apprezzare, dal momento che, come già detto, tutto l'eccesso di sedimenti si è depositato prima di entrare a Sondrio; infatti dal 3° km in poi la granulometria rimane del tutto invariata (ovvero i sedimenti di 80 mm non raggiungono il tratto cittadino poiché si sono depositati prima di raggiungere tali sezioni);
- all'ultimo istante di simulazione, rappresentato nella **Fig. 4.49**, dopo che i sedimenti di 10 mm tornano ad essere minori della richiesta portata d'equilibrio, l'effetto del corazzamento torna a farsi sentire, asportando parte dei sedimenti di 10 mm a monte; sono altresì presenti delle "sacche di accumulo" di sedimenti tra 3 500 m e 4 000 m, in cui la granulometria subisce una notevole e localizzata variazione.

4.3.2.3 Altezze d'acqua

Sebbene sia stata molto spesso omessa, in questo paragrafo si vuole studiare il comportamento dell'acqua, che ovviamente è la causa principale dell'evoluzione morfologica sin qui descritta.

Nella prossima **Fig. 4.50**, viene infatti visualizzato il pelo libero dell'acqua che scorre al di sopra del fondo, calcolato per ognuno dei già citati istanti.

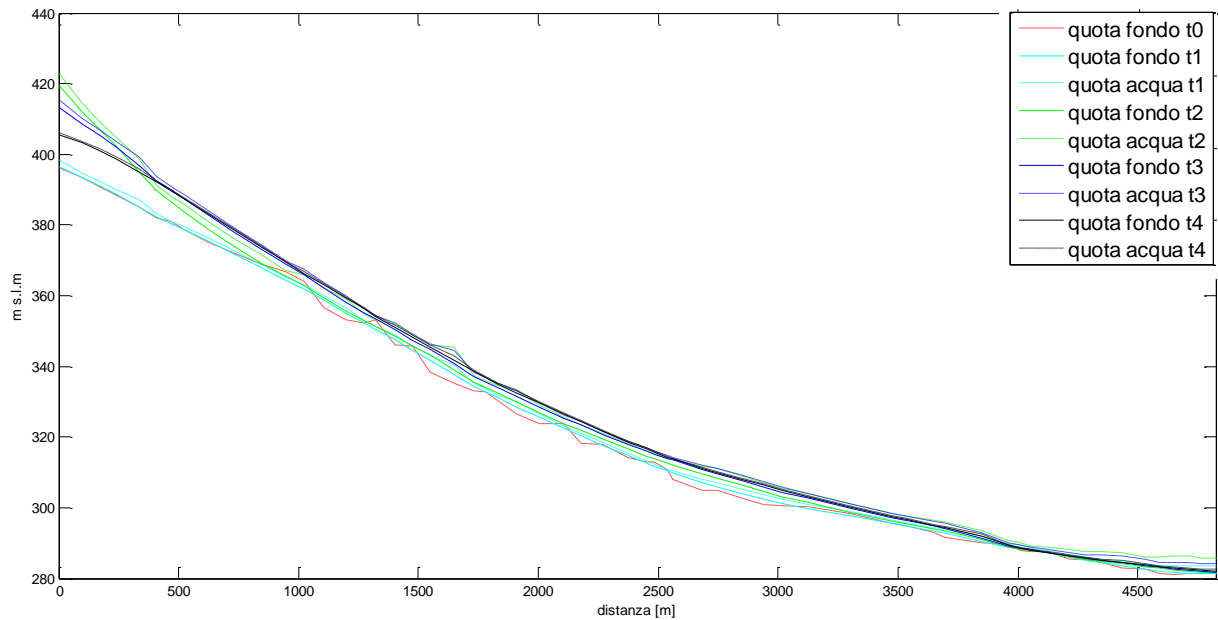


Fig. 4.50 – Profilo del fondo e del pelo libero dell'acqua

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Di visualizzazione più immediata è la variazione cui l'altezza d'acqua è soggetta nei vari istanti della simulazione nell'intero alveo ed ancor più nelle sezioni del tratto cittadino.

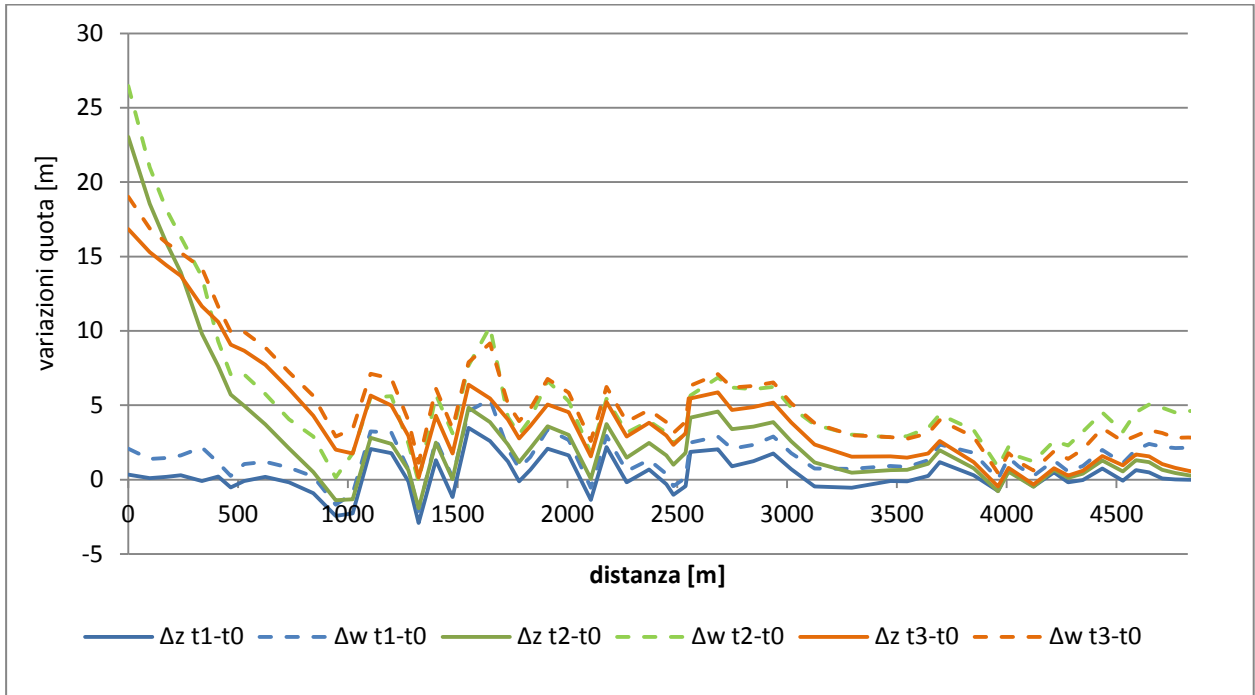


Fig. 4.51 – Variazione del fondo e del pelo libero dell'acqua

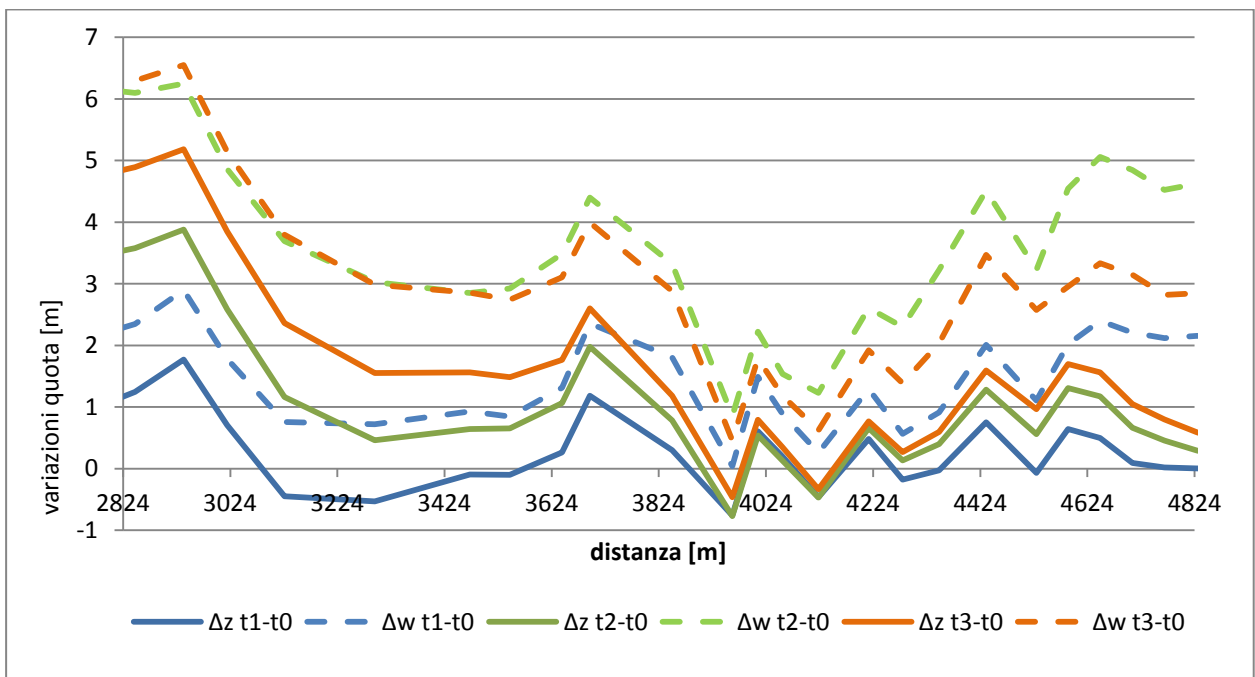


Fig. 4.52 – Variazione del fondo e del pelo libero dell'acqua, zoom tratto cittadino

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Ad influenzare fortemente la quota del pelo libero dell'acqua, vi è il carattere della corrente che passa dall'essere lenta all'essere veloce in funzione del suo numero di Froude (si ricorda che un numero di Froude superiore all'unità è indice di una corrente la cui velocità è superiore alla velocità di propagazione delle perturbazioni, e quindi è una corrente veloce); nel seguente grafico (**Fig. 4.52**) è riportato l'andamento di tale variabile relazionata al profilo del Mallero nell'istante in cui inizia il picco (t_1 , 77 000 s), per sottolineare come il Mallero passi ad avere una corrente di lenta in corrispondenza dell'entrata in città, ovvero all'altezza della sezione denominata "curva".

Ed è proprio in questa sezione particolare che desta maggior interesse il livello dell'acqua, soprattutto per problematiche legate all'esondazione, come vedremo nel prossimo paragrafo.

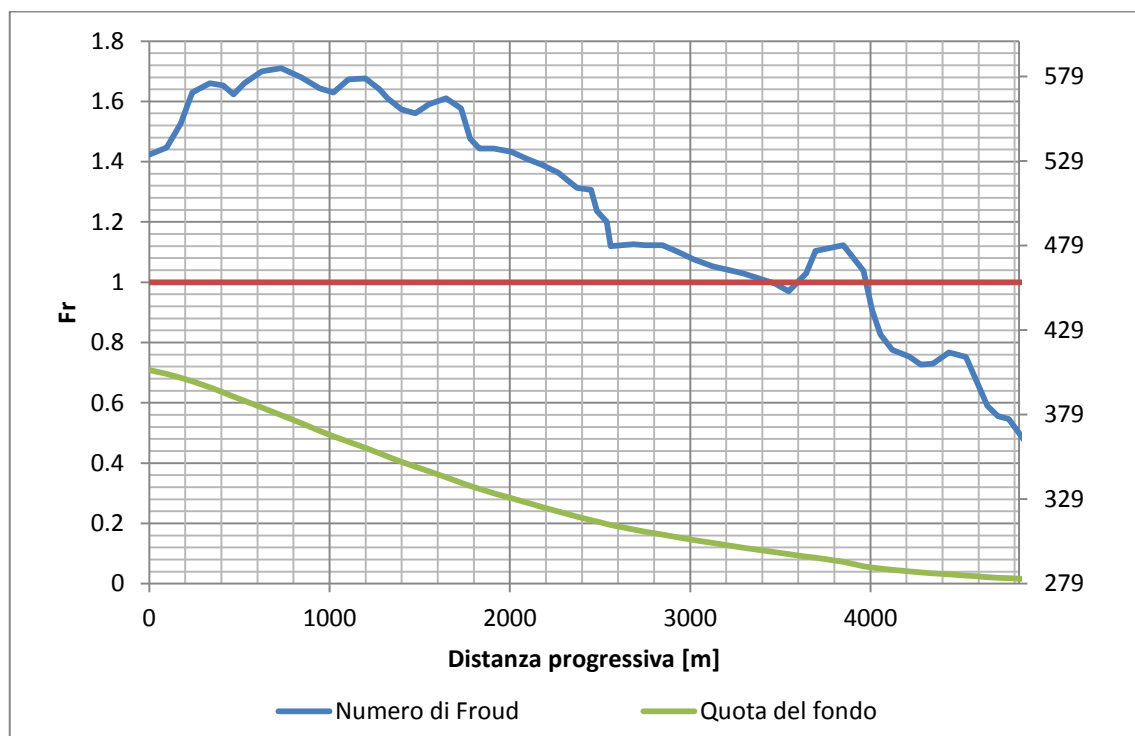


Fig. 4.54 – Variazione del numero di Froude

4.3.3 Analisi di dettaglio

Una tra le più importanti applicazioni delle analisi fatte fin ora è lo studio dell'evoluzione temporale del torrente in alcune sezioni considerate caratteristiche (la cui ubicazione è riportata in **Fig. 4.55**). In particolare desta maggior preoccupazione l'eccessivo innalzamento del fondo dell'alveo e la riduzione del franco.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

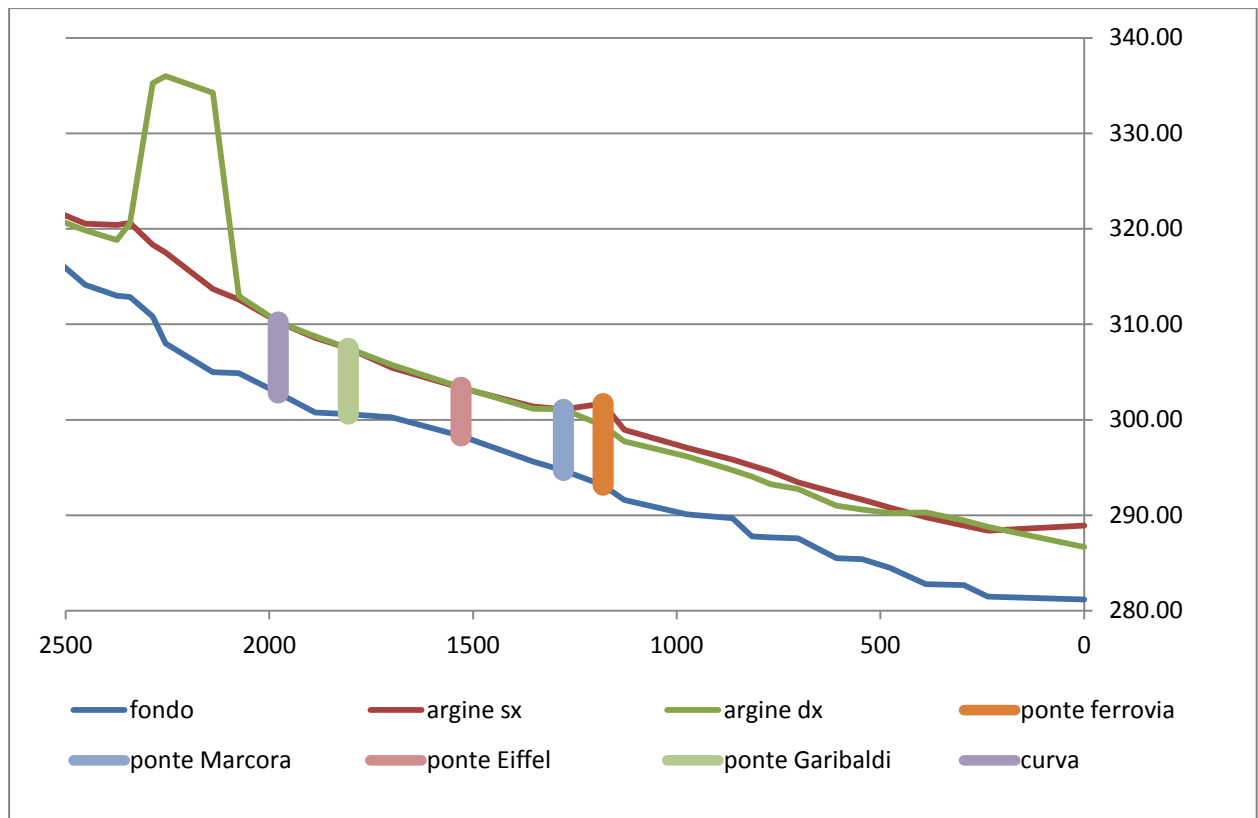


Fig. 4.55 – Ubicazione delle sezioni caratteristiche

4.3.3.1 Evoluzione delle sezioni critiche

Di seguito viene visualizzato l'innalzamento del profilo del fondo e del pelo libero dell'acqua al variare del tempo. La prima evoluzione presentata è quella della CS72, ovvero la "curva". La linea rossa orizzontale rappresenta il più basso dei due argini; fintantoché la linea azzurra dell'acqua si trova al di sotto di tale limite, non si ha esondazione.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

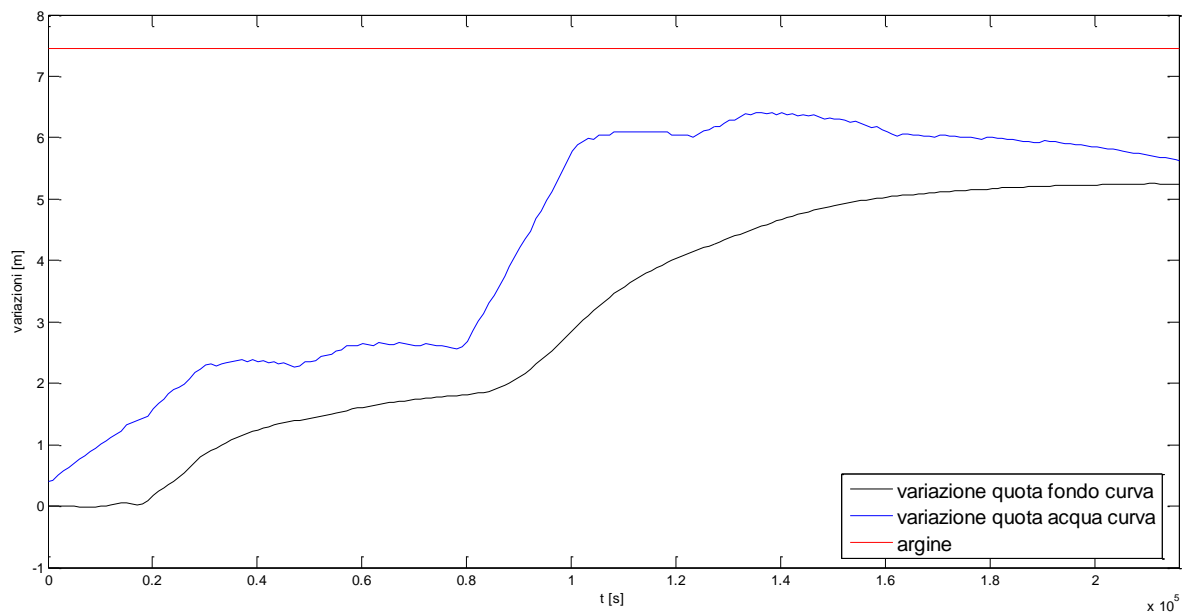


Fig. 4.56 – Evoluzione del letto e del livello d’acqua alla curva

È molto interessante studiare l’andamento di questo profilo, soprattutto rapportandolo all’idrogramma di piena che lo genera. Il tirante idrico (ovvero la differenza tra la linea azzurra e la linea nera) ha infatti lo stesso andamento dell’idrogramma, traslato della sola quantità di tempo necessario alla corrente per percorrere la distanza tra la sezione d’apertura e la sezione in esame; il tirante idrico raggiunge infatti il suo massimo in concomitanza col picco dell’idrogramma, mentre i valori minimi sono in corrispondenza dei minimi (gli istanti iniziale e finale). La quota del fondo, al contrario, non ha l’andamento dell’idrogramma: infatti ha una velocità massima di deposizione (la tangente alla curva nera) quando l’idrogramma è massimo, ma continua ad aumentare (seppur con una velocità inferiore) anche quando l’idrogramma è caratterizzato da valori inferiori, sebbene diminuisca tale velocità di deposizione.

Ne consegue che il punto di massima pericolosità (ovvero quello in cui il livello dell’acqua è più prossimo all’argine) non sia in concomitanza con il picco dell’idrogramma, ma sia ritardato, a causa dell’aumento del fondo che avviene con tempi più dilatati.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Un'ulteriore modalità di rappresentazione è di aiuto per capire l'evoluzione morfologica della sezione. È stato scelto di concentrarsi sui seguenti istanti:

- quello iniziale, che da un'idea delle condizioni precedenti all'evento alluvionale;
- quello in cui il tirante idrico è maggiore, ovvero in corrispondenza del picco dell'idrogramma, all'istante $t = 100\,000$ s
- quello in cui l'acqua ha raggiunto il suo livello massimo (e, conseguentemente, il franco è minore) che, come appena detto, non corrisponde al picco dell'idrogramma, ma è ritardato a causa della differente velocità di deposizione dei sedimenti sul fondo
- quello di ritorno alla portata idrica iniziale, che determina la fine dell'evento alluvionale.

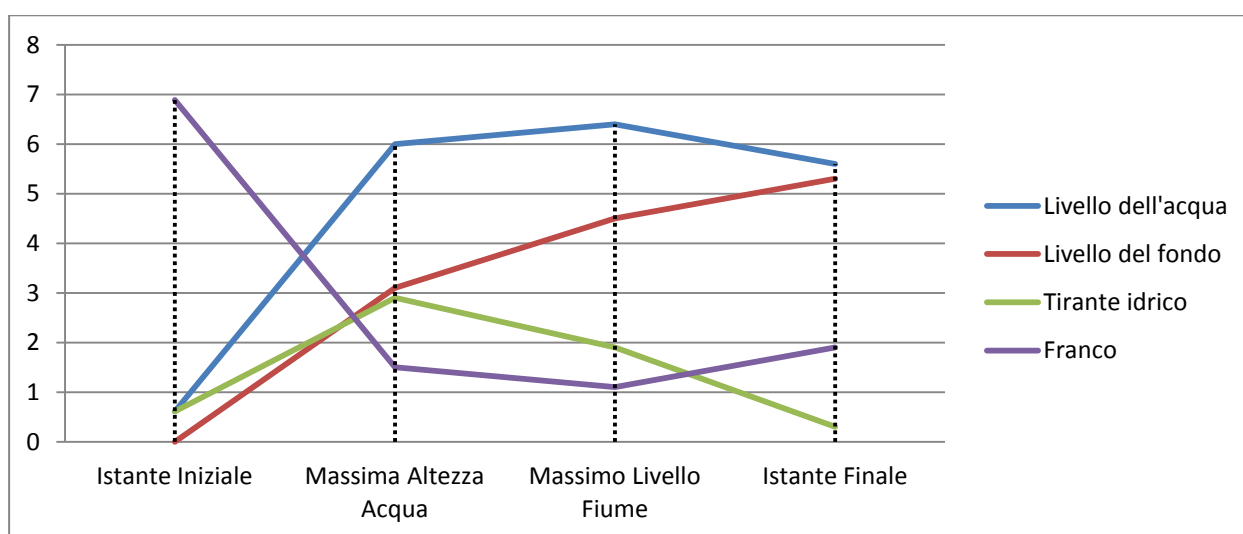


Fig. 4.57 – Variazione dei parametri di pericolosità alla curva

Si nota che:

- il tirante idrico (linea verde) ha lo stesso andamento dell'idrogramma di piena, ovvero è basso per valori di portate basse ed alto per valori di portate alte;
- il livello del fondo (linea rossa) è fortemente influenzato dalla portata, aumenta velocemente fino al picco massimo della portata idrica, e continua ad aumentare, ma in maniera ridotta, dopo tale istante, nonostante l'idrogramma sia caratterizzato da valori decrescenti;
- per tale motivo, nonostante la diminuzione del tirante idrico, il livello del pelo libero dell'acqua (linea azzurra) continua a crescere, e rimane molto alto anche quando l'idrogramma torna a valori di normalità;
- pertanto il livello del franco (linea viola) che prima dell'evento alluvionale era di quasi 7 m, raggiunge il limite inferiore di 1 m non quando la portata idrica è la maggiore, ma quando il livello del fondo è quasi massimo, e su di esso scorre una portata d'acqua tutto sommato esigua.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Il comportamento delle successive sezioni è del tutto analogo, con differenza solo rispetto ai valori assoluti raggiunti dalle quantità appena descritte.

La sezione riportata in questa pagina è la CS74, corrispondente al ponte Garibaldi.

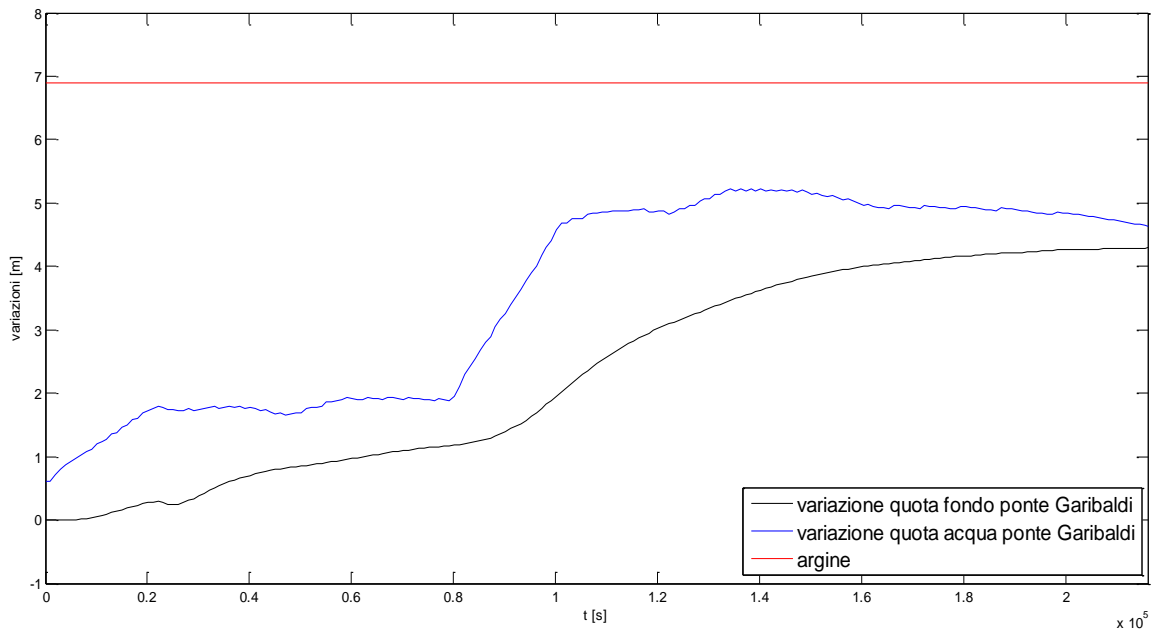


Fig. 4.58 – Evoluzione del letto e del livello d'acqua al ponte Garibaldi

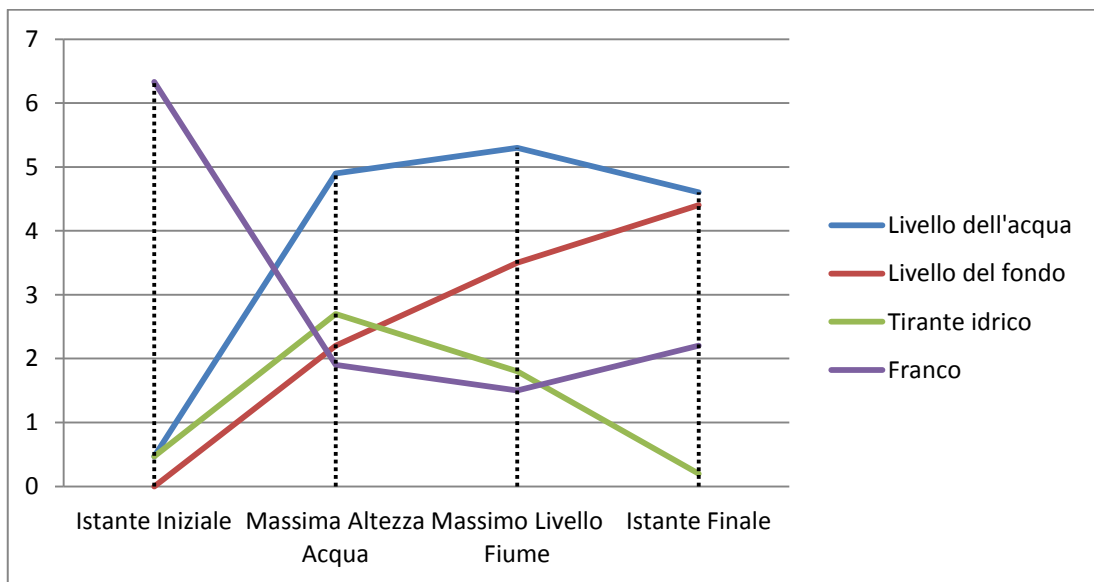


Fig. 4.59 – Variazione dei parametri di pericolosità al ponte Garibaldi

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Ora vengono invece riportati i grafici relativi alla sezione CS76, in corrispondenza del ponte Eiffel. Anche qui l'evoluzione morfologica e l'innalzamento del pelo libero dell'acqua hanno lo stesso andamento già descritto per le precedenti sezioni.

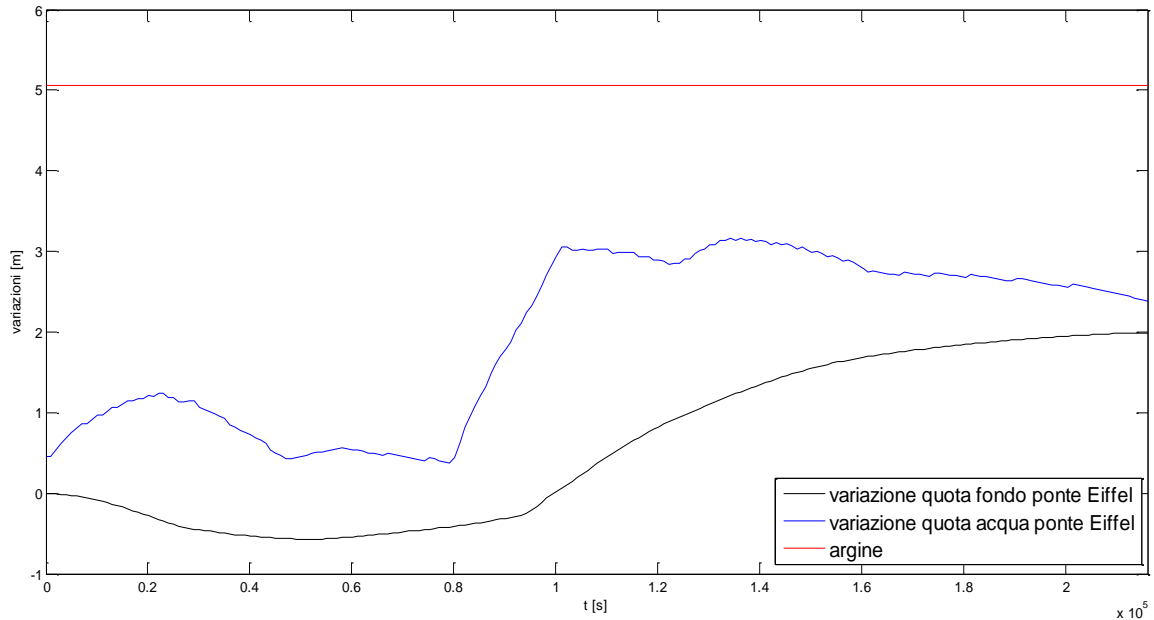


Fig. 4.60 – Evoluzione del letto e del livello d'acqua al ponte Eiffel

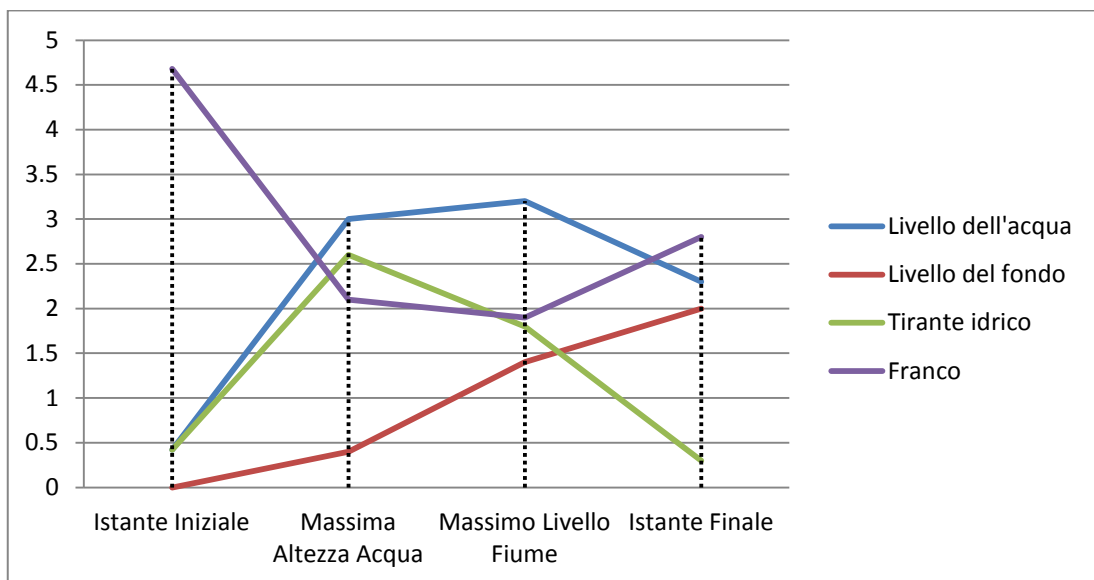


Fig. 4.61 – Variazione dei parametri di pericolosità al ponte Eiffel

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

In questa pagina gli andamenti si riferiscono al ponte Marcora (CS78). Si nota una tendenza generale a diminuire il livello di innalzamento del fondo (mentre l'altezza del tirante idrico rimane simile a quella delle precedenti sezioni); questo è dovuto al fatto che ci si sta spostando verso valle, e quindi la maggior parte dei sedimenti che eccedono l'equilibrio sono già stati depositati nelle sezioni a monte; pertanto l'effetto dell'accumulo di sedimenti si apprezza in maniera molto inferiore.

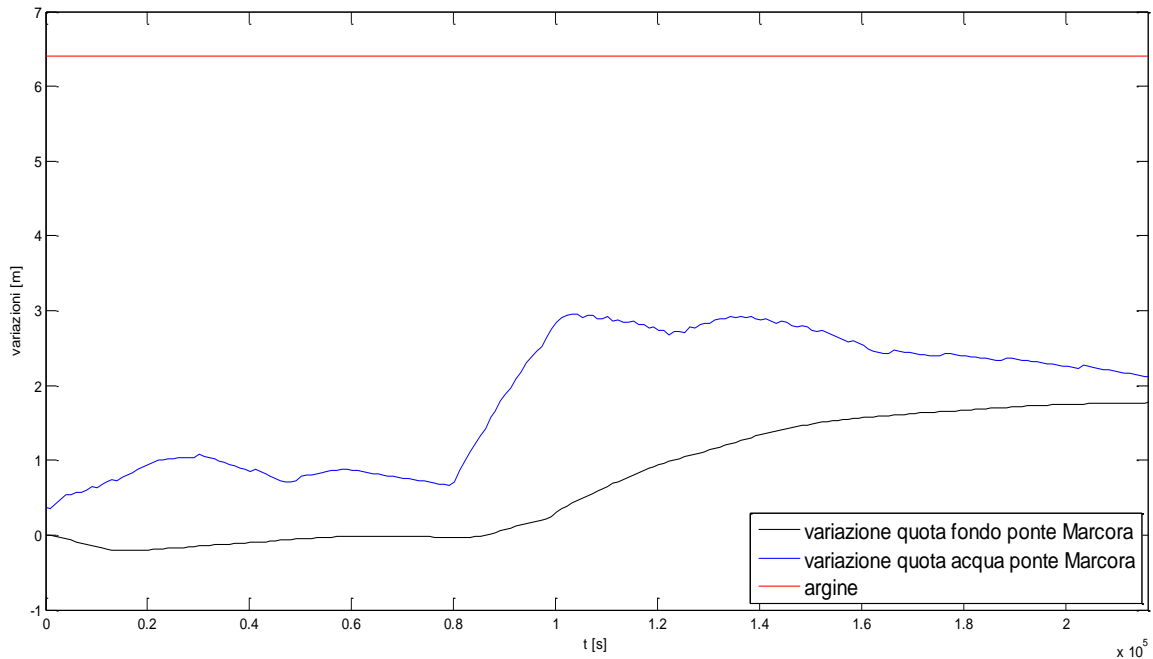


Fig. 4.62 – Evoluzione del letto e del livello d'acqua al ponte Marcora

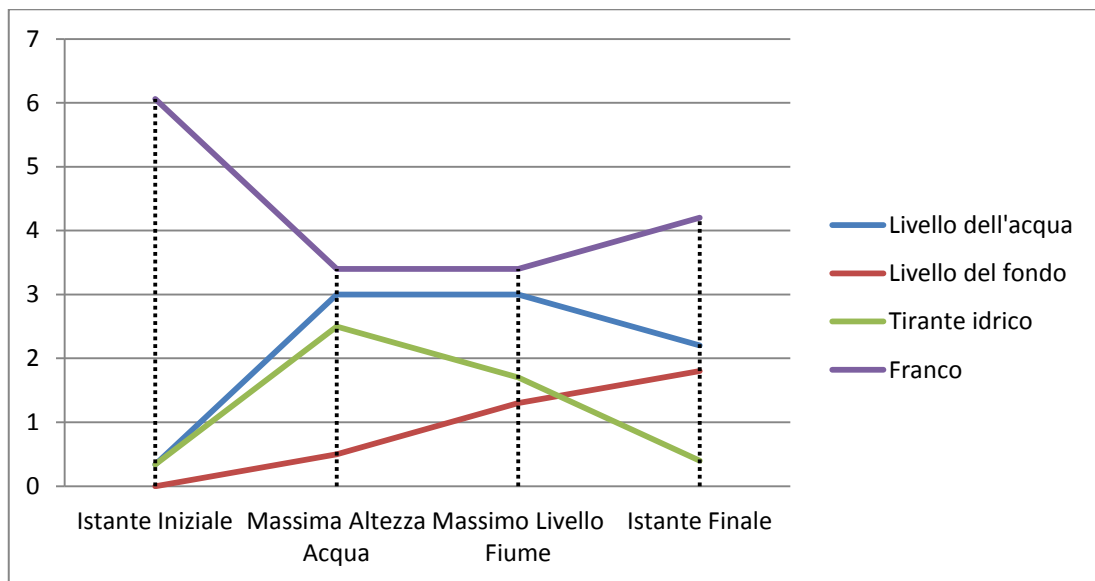


Fig. 4.63 – Variazione dei parametri di pericolosità al ponte Marcora

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

L'ultima sezione monitorata è quella in corrispondenza del fiume della ferrovia, la sezione CS79. Questa sezione è la più valle tra quelle analizzate, infatti è quella in cui il livello del fondo si assesta sotto i 2 m, tant'è vero che il livello minimo del franco (che rimane comunque al di fuori di qualsiasi soglia di allerta), si ha esattamente in concomitanza col valore massimo del tirante idrico.

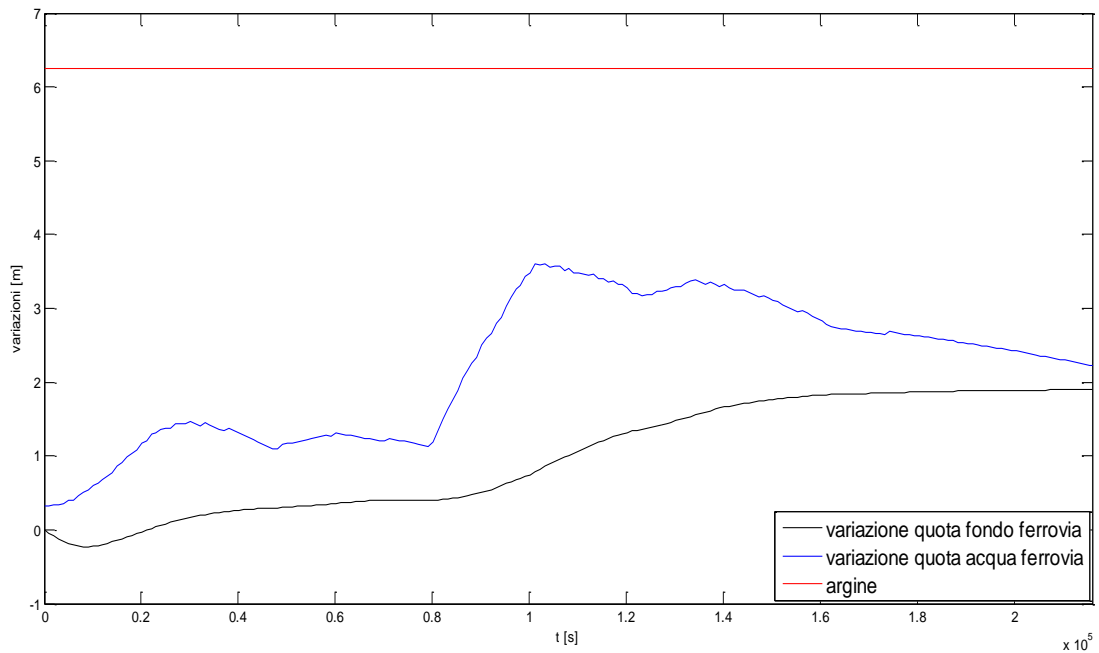


Fig. 4.64 – Evoluzione del letto e del livello d'acqua al ponte della ferrovia

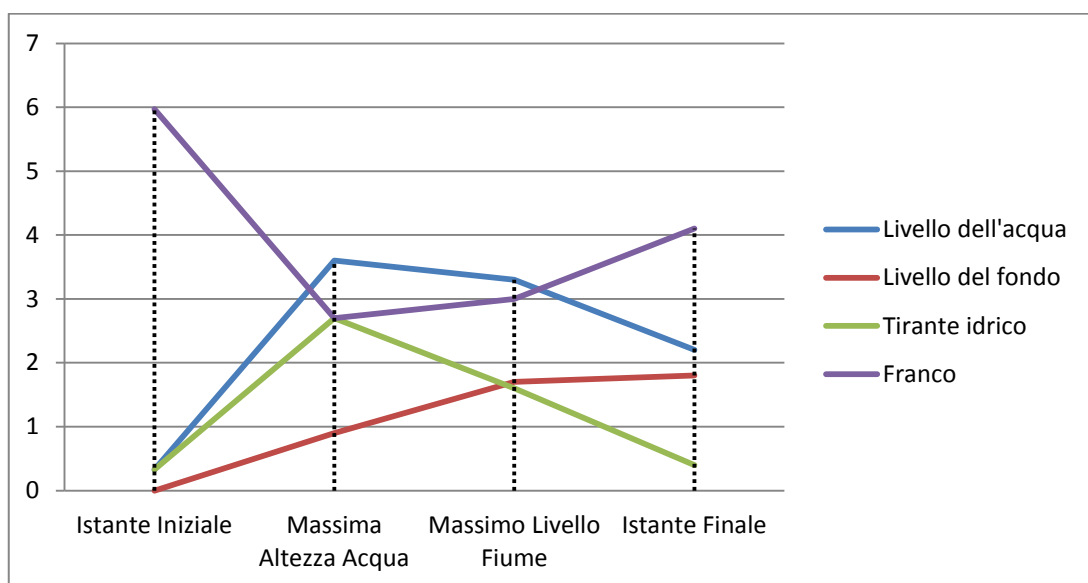


Fig. 4.65 – Variazione dei parametri di pericolosità al ponte della ferrovia

4.3.3.2 Evoluzione dei parametri di pericolosità

Come detto nel precedente paragrafo, l'andamento dei parametri nelle varie sezioni è qualitativamente molto simile; quello che varia sono i valori assoluti raggiunti durante l'evento, che come tendenza generale hanno quelli di essere "smussati" procedendo verso valle.

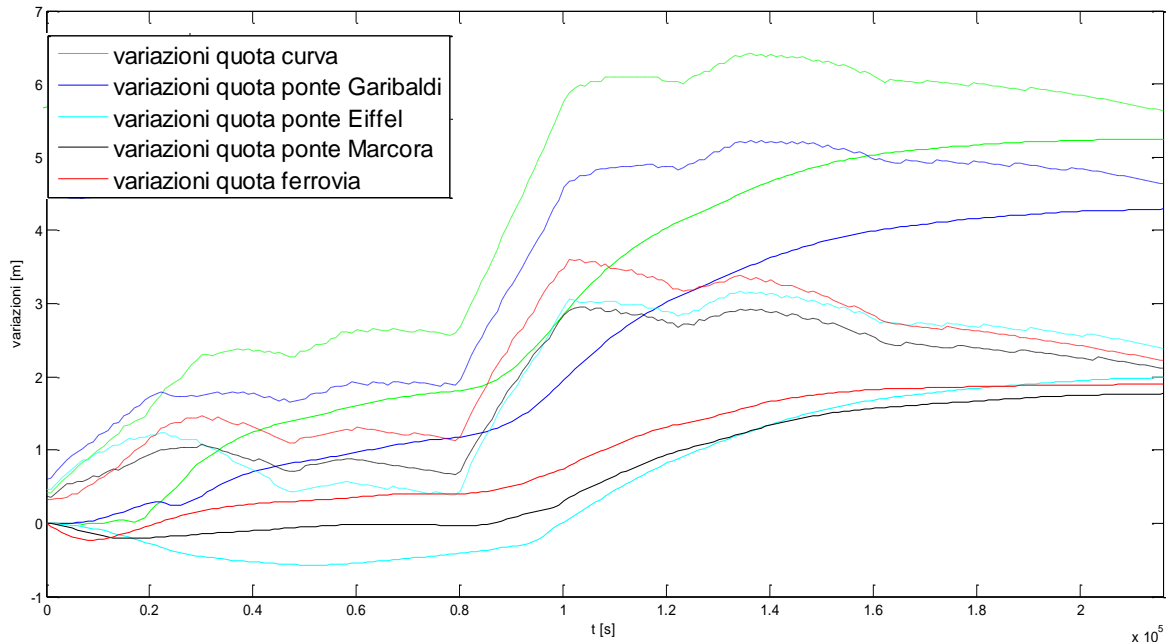


Fig. 4.66 Profili del fondo (continua) e dell'acqua (tratteggiati) sotto ai ponti di Sondrio

Si vogliono di seguito confrontare questi parametri uno ad uno. Le altezze del tirante idrico sono tutto sommato costanti nelle varie sezioni, e variano solo in funzione dell'istante in cui vengono monitorate, poiché dipendono unicamente dalla portata d'acqua.

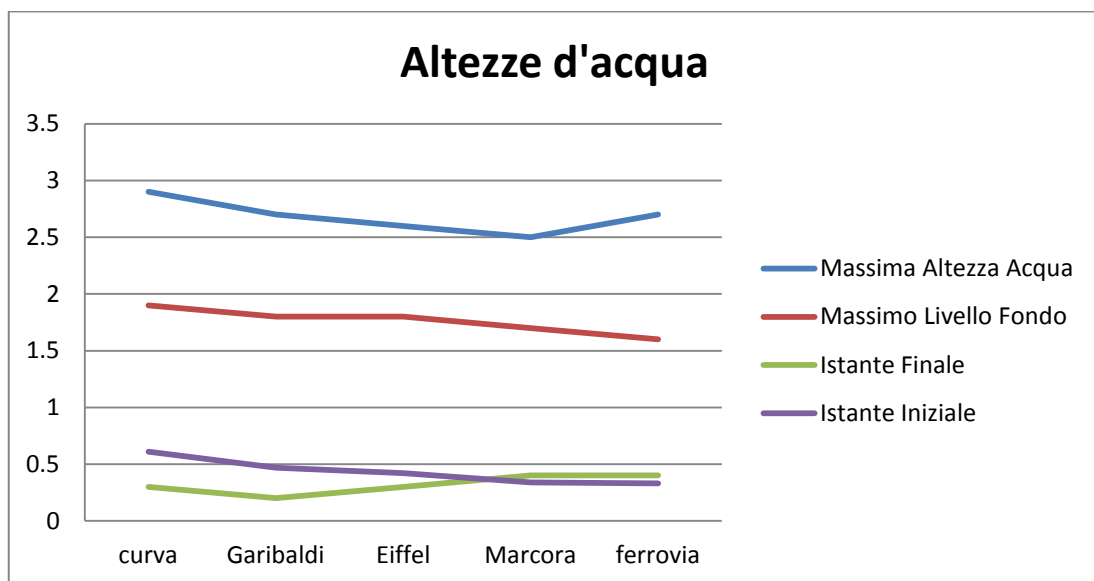


Fig. 4.67 – Altezza d'acqua al variare del tempo e della sezione

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Per quanto riguarda l'innalzamento del fondo, il fenomeno è molto più accentuato nella sinistra del grafico (sezioni di monte) e tende ad annullarsi a valle (ponte ferroviario); inoltre come era ovvio già dai risultati ottenuti nel precedente paragrafo, il fenomeno è tanto più rilevante quanto più è avanzato nel tempo.

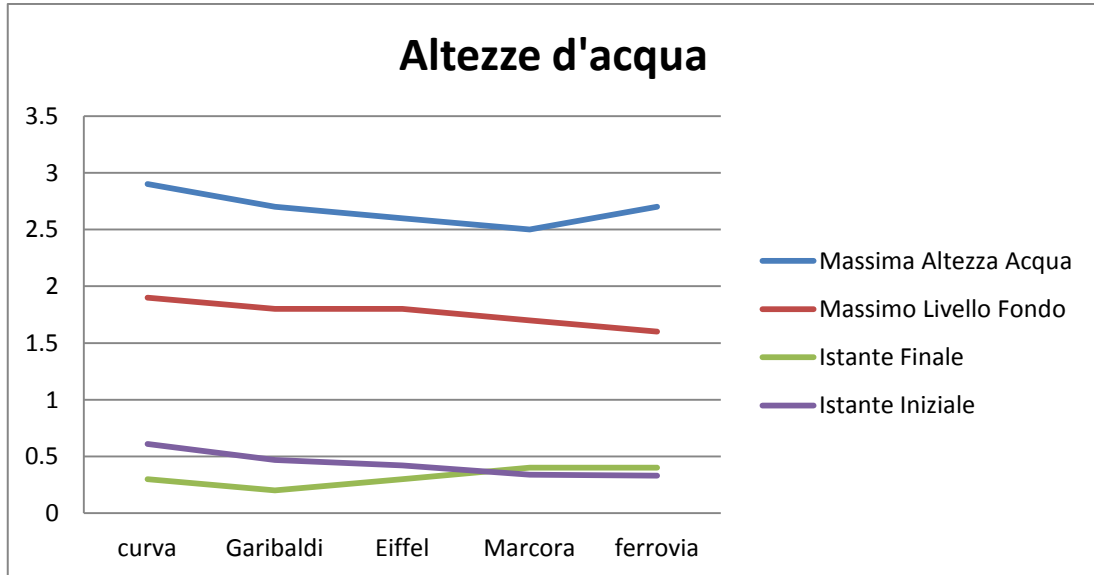


Fig. 4.68– Aumento del fondo al variare del tempo e della sezione

Dopo l'evento del 1987 si sono evidenziati degli accumuli di sedimenti, misurati sotto alcuni ponti di Sondrio, i cui valori sono riportati nella seguente **Tab. 4.E**, nella quale si mettono confronto con i valori calcolati nella simulazione.

	Fondo calcolato	Fondo misurato	Differenza
Curva	5.3		
Garibaldi	4.4	5	12 %
Eiffel	2	3	33%
Marcora	1.8		
ferrovia	1.8	2	10%

Tab. 4.9 – Calcolo costanti di sovralimentazione

Quindi la simulazione può considerarsi sufficientemente precisa da un punto di vista ingegneristico che solitamente, per il fenomeno dell'evoluzione morfologica di un torrente, si accontenta di precisioni ben inferiori.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

L'aumento del livello d'acqua, come detto in precedenza, sarà dato somma del tirante idrico calcolato per ogni istante e per ogni sezione e del livello raggiunto dal fondo.

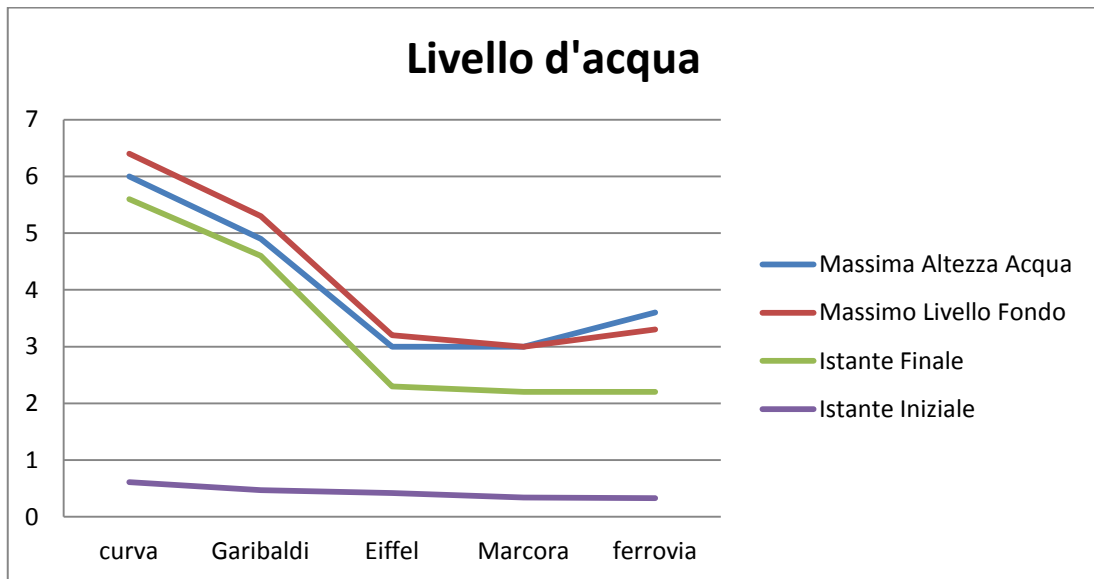


Fig. 4.69– Aumento del livello d'acqua al variare del tempo e della sezione

Pertanto la notevole diminuzione del franco è molto più marcata per le sezioni a monte dell'alveo e per gli istanti terminali, quelli in cui l'elevazione del fondo ha raggiunto livelli massimi.

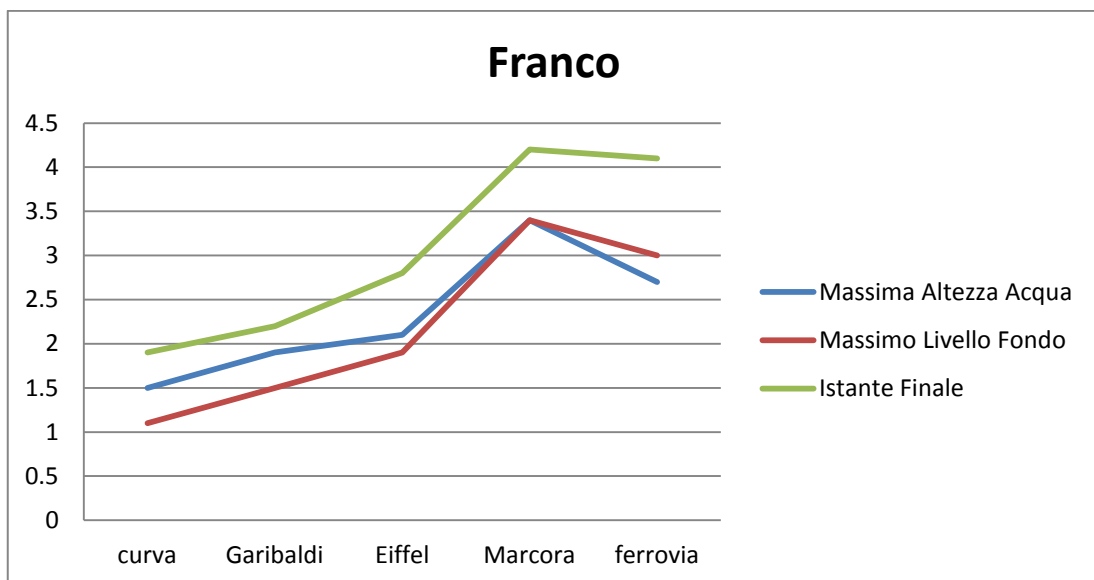


Fig. 4.70– Diminuzione del franco al variare del tempo e della sezione

4.4 Considerazioni sui risultati

Il presente capitolo è dedicato allo studio del torrente Mallero (ultimi 5 Km prima della confluenza con l'Adda) con lo scopo di simulare l'alluvione che ha interessato la Valtellina nel 1987 e valutare gli effetti di un'analisi plurigranulare.

Per prima cosa sono stati riprodotti i risultati ottenuti da Colombo e Giuriani (2011) che si servivano della versione 1.7 del programma Basement; il confronto con la versione 2.2 (utilizzata nella presente tesi) ha generato una buona sovrapposizione che migliora spostandosi verso valle; inoltre si è osservata una tendenza generale dei risultati a divergere all'aumentare del tempo a causa di maggiori volumi coinvolti.

Successivamente è stata introdotta l'analisi plurigranulometrica al caso del Mallero; per prima cosa è stata eseguita una simulazione per verificare il corazzamento dell'alveo: si è osservato che dopo una simulazione di un mese, a monte erano restati i diametri maggiori e a valle quelli minori, come previsto. È seguita un'analisi sensitiva ad alcuni parametri numerici che però non ha portato sostanziali cambiamenti nel profilo dell'alveo; in seguito si è fatta variare la granulometria entrante e si è osservato che il livello di sovralimentazione raggiunto dal tratto d'alveo che attraversa Sondrio (ultimi 2 Km) cresce con l'aumentare del tempo ma è legato dell'effettivo andamento del sassogramma immesso.

Per capire se in questo contesto l'analisi plurigranulare portasse a dei risultati migliori del caso monogranulare, sono stati messi a confronto i valori del fondo misurati dopo la piena dell'87 sia con l'analisi plurigranulare (della presente Tesi) che con quella monogranulare (di Colombo e Giuriani); il confronto non ha prodotto i risultati aspettati, in quanto risulta che il secondo caso rappresenti un'approssimazione migliore; l'analisi plurigranulare è in linea di principio più aderente alla realtà, ma la parametrizzazione diventa più complessa in quanto aumentano i gradi di libertà del sistema in esame.

Infine per verificare se il nostro modello fosse realistico, si sono confrontati i risultati delle simulazioni con i valori degli accumuli di sedimenti di alcune sezioni caratteristiche (curva di ingresso a Sondrio e in corrispondenza di alcuni ponti) misurati in occasione dell'evento alluvionale.

Si nota una tendenza generale del fondo a diminuire il proprio innalzamento spostandosi verso valle, dovuto al fatto che la maggior parte dei sedimenti che eccedono l'equilibrio sono già stati depositati nelle sezioni a monte e pertanto l'effetto dell'accumulo di sedimenti si apprezza in maniera molto inferiore.

Confrontando i valori misurati con quelli calcolati, si osservano delle differenze dell'ordine del 10% che possono essere ritenuti accettabili.

CONCLUSIONI

Lo studio del trasporto solido, in particolare negli alvei montani, è molto importante per la valutazione del rischio nelle applicazioni di prevenzione, gestione del territorio, di pianificazione delle zone di insediamento e di salvaguardia della vita umana. Il presente elaborato di Tesi prende come punto di partenza i lavori pregressi svolti dal Politecnico di Milano sullo studio del trasporto solido in fiumi di montagna cercando di risolvere le criticità incontrate; nello specifico si prefissava i seguenti obiettivi:

- Studio di immissione di una portata solida laterale: per modellare l'apporto solido dovuto ad una sorgente laterale, per valutare gli effetti che si hanno a monte dell'immissione e per capire se il comportamento a monte di tale sezione influenzi significativamente l'alveo a valle;
- Modellazione di una briglia: per tentare di risolvere il problema dell'impossibilità di riprodurre l'interrimento delle briglie sorto nel lavoro di Mauri e Spagnolatti (2009);
- Analisi con granulometria variabile: per dare una rappresentazione più fedele di un alveo e capire se ci sono differenze importanti con l'analisi monogranulare;
- Simulazione di un evento reale (la piena del '87 - il fiume Mallero): per riprodurre l'alluvione che ha interessato la Valtellina nell'87 ed in particolare il comportamento del Mallero, con il modello a disposizione (Basement 2.2) , verificando nello specifico che i risultati ottenuti siano confrontabili con valori misurati dopo l'evento.

I primi 3 obiettivi sono stati sviluppati con riferimento a casi sintetici che di volta in volta hanno simulato uno specifico scenario. Per semplificare i calcoli si è modellato un canale rettangolare lungo 1 Km, largo 20 m e con una pendenza del 5%. Si è scelto un idrogramma costante con portata in ingresso di 200 m³/s ed un coefficiente di scabrezza di Strickler pari a 35 m^{1/3}/s.

Le portate solide a monte e laterale (ovvero imposta in una sezione intermedia), variano di simulazione in simulazione. Per prima cosa sono state eseguite delle simulazioni unicamente con portata solida variabile a monte per vedere se il modello proposto fosse in grado di riprodurre il comportamento reale dell'alveo. Si è osservato, infatti, che nel caso in cui la portata in ingresso fosse inferiore a quella critica si otteneva erosione; nel caso di portata solida superiore, si otteneva accumulo, come ci si aspettava. Per standardizzare la lettura dei risultati si è introdotta una costante di sovralimentazione:

$$K = \frac{Q}{Q_{Eq}}$$

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Successivamente sono state condotte delle analisi per studiare il comportamento dell'alveo in seguito all'immissione di una portata laterale per valori di K_L che vanno da 0 a 5. Si osserva che al crescere della K_L il picco del deposito di sedimenti aumenta, come era facile aspettarsi. Le analisi hanno anche dato un'indicazione di ciò che succede a monte dell'immissione laterale: i risultati mostrano che per portate solide molto alte (quattro volte maggiori rispetto alla portata di equilibrio) si osserva un forte accumulo di sedimenti nella sezione di monte; il deposito di sedimenti nella sezione di immissione laterale è infatti così elevato da ostacolare il deflusso dell'acqua che rende la corrente lenta subito a monte di tale tratto; per questo motivo la portata solida in ingresso si deposita nelle sezioni iniziali e non viene trasportata a valle. Per immissioni laterali inferiori, invece, si osserva a monte la tendenza a mantenere la pendenza di equilibrio.

Si è poi svolta un'ulteriore analisi: viene considerato un tratto di alveo fittizio (dall'immissione della portata laterale fino alla fine) volendo analizzare se considerare solo quel tratto comporta delle differenze nella simulazione rispetto al caso in cui venga considerato l'intero alveo. Per questo motivo sono state fatte delle simulazioni utilizzando l'alveo fittizio per confrontare due modelli: il primo con un apporto solido sia a monte che laterale (a schematizzare un fiume nella sua totalità); il secondo caso con un apporto solamente a monte (a schematizzare solo un particolare tratto del fiume); il profilo del secondo modello è stato traslato fino al punto di immissione della portata laterale del secondo (CS 10) e poi sono stati confrontati. Si è osservato che nel caso in cui la portata laterale è piccola ($K < 4$), ciò che succede a monte influenza il tratto di valle (il valore di K nel punto di immissione è dato da $K_S + K_L$); un K_L pari a 4 o maggiore, invece, è sufficientemente grande da disconnettere monte da valle (dal punto di vista dell'immissione di portata solida) e quindi il valore di K nel punto di immissione è dato solo da K_L , risultando indipendente dall'alimentazione di monte. In conclusione se si verifica uno scenario di alimentazione estrema, come avviene nel caso di una piena intensa si può considerare solo il tratto di interesse senza dover conoscere cosa succede a monte di tale tratto.

La modellazione di una briglia (non prevista dal programma in uso) è stata affrontata con riferimento alla valutazione dei fenomeni generati dall'immissione della stessa lungo l'alveo, in particolare l'interrimento delle briglie; nel lavoro di Tesi svolto da Mauri e Spagnolatti (2009), che si erano serviti del programma Rhyme per le simulazioni, erano sorti infatti dei problemi legati proprio a questo fenomeno.

Dal momento che il programma non prevede l'inserimento di una briglia, si è ricorso ad un espediente che consiste nel rendere inderogabili le sezioni dove dovrebbe esserci la briglia. Per valutare la bontà dell'approssimazione della briglia modellata, si sono messi a confronto alvei in

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

presenza od in assenza di briglia (cioè in cui le sezioni interessate erano considerate erodibili od inerodibili rispettivamente); nel caso di sovralimentazione, la tendenza dell'alveo in assenza di briglia è quella ad avere un elevato valore di deposito lungo tutto l'alveo, fino alla sezione in cui si raggiunge la portata solida d'equilibrio; in presenza di briglia invece si ha tutto il deposito del volume di sedimenti in eccesso a monte della briglia, mentre a valle si ha erosione del fondo dell'alveo. In caso di sottoalimentazione, invece l'introduzione della briglia impedisce che l'erosione sia troppo accentuata; in particolare, come prevedibile, le sezioni della briglia rimangono invariate (cosa che non avviene in assenza di briglia, ovvero con sezioni erodibili, dove l'erosione si ha anche in tali sezioni).

Per verificare la correttezza dei risultati è stato eseguito un bilancio di massa e cioè è stato verificato che la quantità di sedimenti immessa a monte del sistema fosse pari alla somma dei sedimenti depositati lungo l'alveo (al negativo, se erosi dal fondo in un caso sottoalimentato) e dei sedimenti uscenti dal sistema: si può confermare la veridicità e la correttezza dei valori, in quanto l'errore finale risulta essere del tutto trascurabile ai fini di una valutazione ingegneristica (0.1 per mille, sufficientemente piccolo rispetto alle precisioni tipicamente ottenute nei fenomeni morfologici).

Si è infine valutato come viene restituito dal modello l'interrimento e lo svuotamento delle briglie: sono stati plottati i profili degli alvei a diversi istanti temporali, ed è stato osservato un comportamento globale soddisfacente anche se sono presenti dei disturbi in corrispondenza della briglia, le cui cause sono da attribuire alla diversa modalità di mediare le sezioni facenti parte della briglia e quelle che non lo sono (si è infatti applicata la media mobile solo per le sezioni non facenti parte delle briglie).

Da questo studio si conclude che se l'interrimento è elevato la briglia viene sommersa da valle e poi si comporta come se fosse erodibile; se invece il volume invasabile dalla briglia non è elevato, non vengono alterate significativamente le dinamiche di deposito che sono di maggior interesse per questo studio.

L'analisi della granulometria variabile è un accorgimento che raffina i risultati ottenuti negli studi pregressi nei quali erano stata seguita l'ipotesi di monogranularità; lo scopo è di analizzare come la granulometria influenzi i profili del fondo dell'alveo e come la curva granulometrica vari lungo il tratto di alveo considerato ed al passare del tempo.

Per prima cosa si è voluto analizzare il fenomeno del corazzamento e cioè della tendenza dei sedimenti di diametro minore a depositarsi verso valle, lasciando l'alveo formato da sedimenti più grossolani che lo proteggono da un'ulteriore erosione.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Per fare ciò ci si è serviti di un'analisi svolta dai programmatori del codice Basement per validare il programma, che confrontava i risultati ottenuti da un modello fisico con quelli ottenuti dal loro stesso software. Il caso analizzato è di sottoalimentazione; si osserva che il profilo tende ad erodere per portarsi alla pendenza di equilibrio; per quanto riguarda la curva granulometrica, invece, si osserva che col passare del tempo le curve sono caratterizzate da diametri maggiori, indice del fatto che l'alveo si sta corazzando. Successivamente è stata eseguita un'analisi cambiando lo spessore del volume di controllo che è un importante parametro di calibrazione nelle analisi plurigranulari. Si osserva che all'aumentare di questo parametro aumenta l'erosione ed invece diminuisce l'effetto del corazzamento.

Si è poi cercato di riprodurre un esperimento descritto in un articolo (Sklar e al., 2009), ma il modello riprodotto con il programma Basement, non è riuscito a riprodurre i risultati ottenuti sperimentalmente; in particolare né lo spostamento del picco a valle, né la posizione del picco stesso. Ne segue che la scelta iniziale di riprodurre l'esperimento per validare il nostro modello è stata abbandonata per compiere un'analisi sensitiva variando sia parametri geometrici (aumento della lunghezza del canale), che fisici (diminuzione del diametro dei sedimenti in ingresso) che del modello (aumento del tempo di simulazione e variazione dello spessore del volume di controllo). L'aumento della lunghezza del canale e del tempo di simulazione non hanno migliorato la soluzione; diminuendo di due ordini di grandezza il diametro di sedimenti immessi, si osserva lo spostamento del picco; all'aumentare del volume di controllo, invece, aumenta il valore del picco e le variazioni del fondo si esauriscono entro una distanza minore, lasciando le sezioni più a valle inalterate. In conclusione il risultato non è stato soddisfacente anche tenendo conto che l'articolo non forniva una descrizione completa dei dati.

Infine l'analisi plurigranulometrica è stata applicata al canale rettangolare utilizzato come caso test per la portata laterale e la briglia. Sono state eseguite diverse simulazioni variando di volta in volta il diametro dei sedimenti in ingresso a monte e il diametro dei sedimenti presenti sul fondo. Si osserva un aumento della velocità di propagazione dei sedimenti in ingresso al crescere della differenza di diametro tra i sedimenti di fondo e di ingresso; all'aumentare del diametro dei sedimenti in ingresso (tenendo il fondo corazzato) diminuisce la relativa velocità di propagazione.

Anche in questo caso è stata eseguita un'analisi di sensitività al volume di controllo: in caso di accumulo non si riscontrano differenze; in caso di erosione invece si osserva un aumento dell'erosione all'aumentare del volume di controllo come era già stato osservato nell'analisi di sensitività al volume di controllo sul caso studio dei programmatori di Basement.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Eseguiti i casi test elencati sin qui, ci si è dedicati alla simulazione di un evento reale ed in particolare l'alluvione che ha interessato la Valtellina nel 1987, soffermandosi sullo studio del torrente Mallero; in particolare tutta l'analisi si è concentrata sugli ultimi 5 Km prima della confluenza con l'Adda.

Il punto di partenza è stata l'analisi svolta da Colombo e Giurani (2011): sono stati confrontati i risultati ottenuti con la precedente versione di Basement (1.7), con quelli riprodotti per mezzo della versione più recente del medesimo programma (Basement 2.2). Si è ottenuta una buona sovrapposizione; in particolare si è osservata una tendenza generale dei risultati a divergere all'aumentare del tempo a causa di maggiori volumi coinvolti, mentre la sovrapposizione era migliore spostandosi verso valle.

Successivamente l'analisi plurigranulometrica generata nel precedente caso test è stata applicata al caso del Mallero. L'obiettivo è stato di valutare se una suddetta analisi di onere computazionale maggiore, comportasse dei miglioramenti nei risultati o se lo studio monogranulare potesse già considerarsi una buona approssimazione.

Per prima cosa è stata eseguita una simulazione per verificare il corazzamento dell'alveo: a questo fine, al tempo iniziale i sedimenti del fondo sono stati imposti per il 50% con diametro di 80 mm e per l'altro 50% con diametro di 10 mm per ricreare una mistura uniforme sul tratto. Come portata idrica si è considerato il valore di 10 m³/s, che caratterizza il fiume per 180 giorni l'anno, e una portata solida minore di quella di equilibrio. Si è osservato che dopo una simulazione di un mese, effettivamente a monte erano restati i diametri maggiori e a valle quelli minori, cosa che è concorde con le previsioni avanzate.

Il passo successivo è stata un'analisi sensitiva all'upwind (parametro numerico che regolarizza il deposito dei sedimenti) ed allo spessore del volume di controllo (che però non ha portato sostanziali cambiamenti nel profilo dell'alveo) oltre che alla granulometria entrante; in questo caso si è osservato che il livello di sovralimentazione raggiunto dal tratto d'alveo che attraversa Sondrio (ultimi 2 Km) cresce con l'aumentare del tempo, ed è slegato dell'effettivo andamento del sassogramma immesso.

Il confronto dei valori del fondo misurati dopo la piena dell'87 con l'analisi plurigranulare (della presente Tesi) e quella monogranulare (già ottenuta in precedenza) non ha portato a dei risultati aspettati, in quanto risulta che il secondo caso rappresenti un'approssimazione migliore. Nonostante l'analisi plurigranulare è in linea di principio più aderente alla realtà, la parametrizzazione diventa più complessa in quanto aumentano i gradi di libertà del sistema in esame.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

Infine è stato studiato come varia il livello d'acqua col passare del tempo e al variare delle sezioni.

Si osserva che il livello raggiunto dall'acqua è influenzato dal carattere della corrente (veloce o lenta) e cioè dal numero di Froude; si osserva che all'ingresso a Sondrio il Mallero passa da una condizione di corrente veloce ad una di corrente lenta.

Per verificare se il nostro modello fosse realistico, si sono confrontati i risultati delle simulazioni con i valori degli accumuli di sedimenti di alcune sezioni caratteristiche (curva di ingresso a Sondrio e in corrispondenza di alcuni ponti) in occasione dell'evento alluvionale.

La quota del fondo non ha l'andamento dell'idrogramma: infatti ha una velocità massima di deposizione quando l'idrogramma è massimo, ma continua ad aumentare anche quando l'idrogramma è caratterizzato da valori inferiori, sebbene diminuisca tale velocità di deposizione. Ne consegue che il punto di massima pericolosità non sia in corrispondenza del picco dell'idrogramma, ma sia ritardato, a causa dell'aumento del fondo.

Si nota una tendenza generale del fondo a diminuire il proprio innalzamento spostandosi verso valle, dovuto al fatto che la maggior parte dei sedimenti che eccedono l'equilibrio sono già stati depositati nelle sezioni a monte e pertanto l'effetto dell'accumulo di sedimenti si apprezza in maniera molto inferiore.

Confrontando i valori misurati con quelli calcolati, si osservano delle differenze dell'ordine del 10% che per un'analisi ingegneristica può essere considerata accettabile e quindi da questo punto di vista il nostro modello può essere rappresentativo della realtà.

Le analisi fatte rispondono agli obiettivi di partenza; per migliorare ed ampliare l'analisi proposta si potrebbe analizzare la risposta del fiume in seguito all'inserimento di briglie che, per semplificare i calcoli, non sono state considerate nella presente analisi.

SIMBOLOGIA

θ parametro di mobilità di Shields [-]

u velocità della corrente [m/s]

u^* velocità d'attrito sul fondo [m/s]

g accelerazione di gravità [m²/s]

ρ_s densità dei sedimenti [Kg/m³]

ρ densità dell'acqua [Kg/m³]

d diametro dei sedimenti [mm]

Δ densità relativa del grano immerso [-]

τ_0 sforzo tangenziale al fondo [KN/m²]

Re_* numero di Reynolds [-]

θ_{cr} parametro di mobilità di Shields critico [-]

ν viscosità cinematica dell'acqua [m²/s]

i_f pendenza critica del fondo [-]

q_s è la portata solida per unità di larghezza [m²/s]

β è il coefficiente di ragguaglio della quantità di moto [-]

c_b è la concentrazione di materiale sul fondo [%]

Q_w portata liquida [m³/s]

A è l'area della sezione [m²]

d_{90} diametro dei sedimenti al 90% di passante [mm]

d_{50} diametro dei sedimenti al 50% di passante [mm]

d_{30} diametro dei sedimenti al 30% di passante [mm]

F_g forze di gravità [N]

F_i forze d'inerzia [N]

F_f forza d'attrito [N]

F_p forza idrostatica [N]

F_s forza dinamica [N]

V velocità dell'acqua in condizione di moto uniforme [m/s]

S_0 è la pendenza longitudinale del canale [-]

S_f è la cadente piezometrica [-]

t coordinata temporale [s]

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

x coordinata spaziale [m]

τ_b è lo sforzo sul fondo [Pa]

p_w è il perimetro bagnato [m]

h è l'altezza d'acqua [m]

B è la larghezza della superficie libera [m]

C concentrazione di volume mediata sulla sezione [-]

p rappresenta la porosità del materiale d'alveo [-]

Q_S portata solida di monte [m³/s]

Q_L portata solida laterale [m³/s]

z_b quota di fondo alveo [m]

χ rappresenta coefficiente di Chezy [m^{1/2}/s]

R_h è il raggio idraulico [m]

ΛU matrice caratteristica della matrice dei coefficienti [-]

AU matrice dei coefficienti [-]

λ_i equazioni delle linee caratteristiche [-]

Fr numero di Froude [-]

ξ_i coefficiente di nascondimento [-]

σ scarto quadratico medio per gli errori sulle altezze [m]

K costante moltiplicativo della portata di equilibrio [-]

BIBLIOGRAFIA

- [1] Del Curto C., *Evoluzione morfologica del torrente Mallero*, Tesi di Laurea Politecnico di Milano, 1998.
- [2] Mauri M. e Spagnolatti M., *Modellazione dell'evoluzione morfologica del torrente Mallero durante un evento alluvionale e ripercussioni sulla città di Sondrio*, Tesi di Laurea Politecnico di Milano, 2009.
- [3] Bottà U. e Meroni G., *Realizzazione di una cassa di espansione nell'alto Mallero per la riduzione del rischio allagamento*, Tesi di Laurea Politecnico di Milano, 2010.
- [4] Colombo S. e Giuriani G., *Evoluzione morfologica dei fiumi montani -Propagazione della condizione di alimentazione solida imposta a monte*, Tesi di Laurea Politecnico di Milano, 2011.
- [5] Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea, *Direttiva 2007/60/CE del parlamento europeo e del consiglio relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni (Floods Directive)*, 2007.
- [6] www.wikipedia.it, *Alluvione della Valtellina del Luglio 1987*.
- [7] Jaeggi M., *Some aspects of the sediment transport during the 2005 floods in Switzerland*, Annals of Warsaw University of Life Sciences, 2008.
- [8] Rickenmann D., Koschni A. *Sediment loads due to fluvial transport and debris flows during the 2005 flood events in Switzerland*, Hydrological Processes, 2010.
- [9] *Lecture note on Saint Venant Equations*, Politecnico di Milano, 2011
- [10] De Vries M., *Considerations about non-steady bedload transport in open channels*, Delft Hydraulics, 1965.
- [11] Tritthart M., Schober B., Habersack H., Doppler C., *Non-uniformity and layering in sediment transport modelling 1: flume simulations*, Journal of Hydraulic Research Vol.49, 2011.
- [12] Papanicolaou A. N., Bdour A., Winclein E., *One-dimensional hydrodynamic/sediment transport model applicable to steep mountain streams*, Journal of Hydraulic Research Vol.42, 2004.

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO

- [13] Cao Z., Day R.; Egashira S., *Coupled and Decoupled Numerical Modeling of Flow and Morphological Evolution in Alluvial Rivers*, Journal of Hydraulic Research Vol.128, 2002.
- [14] Swiss Federal Institute of Technology di Zurigo, *Reference Manual*, Basement 2.2, 2011.
- [15] Swiss Federal Institute of Technology di Zurigo, *User Manual*, Basement 2.2, 2011.
- [16] Skar L., Fadde J., Venditti J., Nelson P., Wydzga M., Yantao C., Dietrich W., *Transaltion and dispersion of sediment pulses in flume experiemnts simulating gravel augmentation below dams*, Water Resources Research Vol. 45, 2009.
- [17] Regione Lombardia, *Piano di riassetto idrogeologico. Studi idraulici e sul trasporto solido*, Piano Valtellina, 1990.
- [18] Regione Lombardia. *Analisi idrologiche, idrogeologiche ed ambientali, Caratteristiche idrologiche della rete idrografica. Modello afflussi-deflussi*, Piano Valtellina, 1990.
- [19] Radice et al., *Is it advisable to disregard sediment transport processes in flood hazard evaluations? The case of the Mallerio river*, 2011.

