

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale

Corso di laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il territorio

Indirizzo di Difesa del Suolo e Prevenzione dai Rischi Naturali



Tesi di laurea Magistrale

Aspetti idrogeologici dell'evoluzione delle sponde e dell'alveo del Torrente Anza (Verbania)

Relatore prof. Francani Vincenzo

Correlatore dott. Colombo Loris

Laureando: Daniele Magri

Matr. 783545

Anno Accademico 2013/2014

Indice

INTRODUZIONE	10
CAPITOLO 1.....	13
LO STATO DELL'ARTE: TEORIA SUL TRASPORTO SOLIDO E SULL' APPORTO IN ALVEO	13
1.1 MOTO INCIPIENTE	14
1.1.1 Il criterio di Shields (1936).....	15
1.2 PORTATA SOLIDA.....	20
1.2.1 La formula di Du Boys (1879)	21
1.2.2 La Formula di Meyer-Peter Müller (1948).....	22
1.2.3 La Formula di Smart e Jäggi	23
1.2.4 Correzioni di Wong e Parker (2006)	24
1.2.5 Altre Formulazioni importanti	25
1.3 LE FORME DI FONDO	26
1.4 EVOLUZIONE DEGLI ALVEI	27
1.4.1 L'Equazione di Exner (1925) per la dinamica del fondo	27
1.5 IMPERMEABILIZZAZIONE DEL FONDO ALVEO	29
1.6 GLI ASSETTI MORFOLOGICI IN CORSI D'ACQUA MONTANI.....	30
1.7 FENOMENI LOCALIZZATI.....	37
1.8 GLI APPORTI DI MATERIALE DAL BACINO.....	38
1.8.1 Apporti da erosione dei versanti	38
1.8.2 Metodo di Gavrilovic (1962).....	38
1.8.3 Modello RUSLE (1978).....	40
1.8.4 Apporti di materiale da frana	42
1.8.5 Apporti da altre fonti.....	44
1.8.6 Applicazione del metodo di Gavrilovic per stimare l'importanza del contributo erosivo in fiumi montani e di pianura	45
Analisi di Sensitività	47
CAPITOLO 2.....	49
INTERAZIONE VERSANTI ALVEO	49
2.1 DINAMICA DEI VERSANTI E DELL'ALVEO NEL TORRENTE ANZA	49
2.1.1 Località Prequartera	49
2.1.2 Località Campioli	50
2.1.3 Tendenza evolutiva del versante e necessità di interventi	52

2.1.4 Dinamica dei versanti e dell'alveo del sito di Pestarena	53
2.2 PREVEDIBILITÀ DELL'EVOLUZIONE MORFOLOGICA DELLE SPONDE E DELL'ALVEO: EFFETTI DELLE FLUTTUAZIONI IDROMETRICHE SULLA PIEZOMETRIA.....	54
2.3 METODOLOGIA PER L'INDIVIDUAZIONE DELLA FREQUENZA DI ACCADIMENTO DI EVENTI PERICOLOSI IN ALVEO.....	62
2.3.1 Modelli Teorici e loro modifiche: il modello di Carslaw and Jaeger e il modello di Yao-Ming Hong e Shiun Wan	63
<i>Carslaw e Jaeger modificata</i>	63
2.3.2 L'applicazione della teoria dei segnali al Torrente Anza.	70
CAPITOLO 3.....	83
CALCOLO DELLE VARIAZIONI DELL'ALVEO.....	83
3.1 MODELLAZIONE NUMERICA.....	85
3.1.1 Hec-Ras	85
3.2 INFLUENZE ESTERNE.....	91
3.2.1 Influenza di modeste quantità di materiale solido	96
3.2.2 Materiale da frana in alveo	98
3.2.3 Restringimento dell'alveo	108
3.2.4 PRESENZA DI UN LAGO.....	111
CONCLUSIONI	115
Bibliografia.....	119
ALLEGATO A: SEZIONI UTILIZZATE DEL TORRENTE ANZA.....	121
ALLEGATO B: Coefficienti e funzioni.....	125

Indice delle Figure

CAPITOLO 1.....	13
FIG 1.1 Schema delle forze (Shields)	15
FIG 1.2 Abaco di Shields.....	17
FIG 1.3 Fattore correttivo per la pendenza.....	17
FIG 1.4 Confronto con parametri critici per differente sommergenza.....	18
FIG 1.5 Confronto fra la formula originale e con le correzioni di Wong e Parker.....	24
FIG 1.6 Rappresentazione grafica della continuità del materiale solido.....	27
FIG 1. 7 Esempio di evoluzione della sezione in una canaletta sperimentale in sabbia.....	28
FIG 1.8 Andamento della permeabilità nel tempo per 5 diversi esperimenti.....	29
FIG 1.9 Rapporto fra sinuosità e pendenza per alvei in pianura.....	30
FIG 1.10 Schema Step-pool.....	32
FIG 1.11 schema planimetrico di un tratto d'alveo con morfologia a riffle-pool.....	32
FIG 1.12 esempio di fiume a rami intrecciati (Rakaia River, Nuova Zelanda).....	33
FIG 1.13 Classificazione di Shumm 1963.....	34
FIG 1.14 Affluenti del torrente Maè.....	35
FIG 1.15 diagramma di Hjulstrom	36
FIG 1.16 esempio di erosione al piede e di apporto di materiale in alveo	43
CAPITOLO 2.....	49
FIG 2.1 Confronto tra la CTR del 1991 (a) e l'ortofoto del 2007 (b) del sito di Campioli.....	51
FIG 2.2 Dominio e differenti posizione dei pozzi (viola), dei punti di misura piezometrica (rosso) e rappresentazione della lente argillosa.....	55
FIG 2.3 Modello analizzato da Pinder.....	63
FIG 2.4 Modello analizzato da Huang e Wan.....	65
FIG 2.5 Metodo di Janbu semplificato.....	79
FIG 2.6 Fattore di sicurezza e versante in frana con altezza di falda 3 m (innalzamento idrometrico).....	80
FIG 2.7 Fattore di sicurezza e versante in frana con altezza di falda 3,3 m (innalzamento idrometrico e da precipitazioni).....	80
CAPITOLO 3.....	83
FIG 3.1 Immagine aerea con sovrapposta cartografia di conoidi e aree in frana (Progetto RiskNat, ARPA Piemonte).....	83
FIG 3.2 Schema del calcolo conveyance in Hec-Ras.....	86
FIG 3.3 Interazione dei sedimenti con un ponte	92

FIG 3.4 Esempio di profilo altimetrico del corso d'acqua idealizzato.....	93
FIG 3.5 Curva granulometrica utilizzata.....	94
FIG 3.6 Profilo altimetrico del corso d'acqua.....	96
FIG 3.7 Schemi di scivolamento superficiale.....	98
FIG 3.8 Evoluzione della sezione 2 con 8000 m ³ di frana.....	101
FIG 3.9 Evoluzione della sezione 8 con 8000 m ³ di frana.....	101
FIG 3.10 Evoluzione della sezione 8 con 35000 m ³ di frana.....	102
FIG 3.11 Sezione con ostruzione di 1.5 m di larghezza	109
FIG 3.12 Erosione della sezione 7 senza ostruzioni.. ..	110
FIG 3.13 Erosione della sezione 7 con ostruzione a monte di 1.5 m.....	110
FIG 3.14 Profilo utilizzato per il calcolo del sedimento in arrivo in un lago.....	111
FIG 3.15 Variazione della sezione di ingresso al lago.....	112

Indice dei Grafici

CAPITOLO 1.....	13
GRAFICO 1.1 Analisi di sensitività per il torrente Anza.....	47
CAPITOLO 2.....	49
GRAFICO 2.1 Portate uscenti dal dreno in base alla sua posizione in verticale.....	56
GRAFICO 2.2 Gradienti calcolati in diverse posizioni in base alla profondità del dreno.....	58
GRAFICO 2.3 Gradienti calcolati in diverse posizioni in base al tipo di modello utilizzato.....	59
GRAFICO 2.4 Gradienti calcolati in diverse posizioni confrontando le differenze fra lente argillosa estesa e ridotta.....	60
GRAFICO 2.5 Rappresenta quattro possibili funzioni $H(t)$ ottenute variando n e β	66
GRAFICO 2.6 Rappresenta i livelli idrometrici nella sezione considerata.....	71
GRAFICO 2.7 Dati di pioggia giornalieri nella stazione di Ceppo Morelli.....	71
GRAFICO 2.8 Variazioni del livello di falda legate al fiume ed alle piogge.....	72
GRAFICO 2.9 Ingrandimento dei risultati ottenuti.....	73
GRAFICO 2.10 Approssimazione dei dati di innalzamento della falda dovuto alle variazioni idrometriche	74
GRAFICO 2.11 Approssimazione dei dati di innalzamento della falda sommando variazioni idrometriche e dovute alle precipitazioni	74
GRAFICO 2.12 Confronto fra le derivate prime dei due segnali.....	69
GRAFICO 2.13 Trasformata di Fourier per le variazioni piezometriche legate al comportamento idrometrico	75
GRAFICO 2.14 Funzione di trasferimento calcolata a partire dai risultati numerici.....	76
GRAFICO 2.15 Funzione di trasferimento calcolata a partire dalle formule approssimanti.....	77
CAPITOLO 3.....	83
GRAFICO 3.1 Variazioni delle sezioni scalate rispetto alla situazione senza apporti laterali.....	84
GRAFICO 3.2 Andamento portate nel tempo.....	95
GRAFICO 3.3 Relazione fra materiale immesso e distanza del disturbo	97
GRAFICO 3.4 Variazione dell'alveo con frane.....	99
GRAFICO 3.5 Variazione del Profilo con frana da 8000 m^3	100
GRAFICO 3.6 Variazione del Profilo con frana da 35000 m^3	100
GRAFICO 3.7 Variazione dell'alveo normalizzato sul caso senza frane	102

GRAFICO 3.8 Esempio di approssimazione con linea polinomiale.....	103
GRAFICO 3.9 Variazione dei coefficienti “b” e “c” per portata pari a 3.44 m ³ /s	105
GRAFICO 3.10 Variazione dei coefficienti “d” “e” e “f” della polinomiale rappresentante l’andamento del coefficiente “b”	107
GRAFICO 3.11 Variazione dei coefficienti “d” “e” e “f” della polinomiale rappresentante l’andamento del coefficiente “c”	107
GRAFICO 3.12 Ingrandimento del tratto finale del profilo al variare delle dimensioni dell’ostacolo.	108
GRAFICO 3.13 Distanza dell’erosione aumentata dovuta ad un ostacolo posto al centro della corrente	109

Indice delle Tabelle

CAPITOLO 1.....	13
TAB 1.1 Formule per il calcolo del moto incipiente	19
TAB 1.2 Coefficienti del modello di Gavrilovic.....	39
TAB 1.3 Coefficiente C di uso del suolo.....	42
TAB 1.4 Dati del torrente Anza.....	45
TAB 1.5 Parametri utilizzati per il torrente Anza.....	46
TAB 1.6 Stima dell'erosione del Bacino.....	46
CAPITOLO 2.....	49
TAB 2.1 Caratteristiche del terreno considerato.....	71
TAB 2.2 Alcuni valori statistici delle serie utilizzate.....	78
TAB 2.3 Proprietà del terreno.....	79
CAPITOLO 3.....	83
TAB 3.1 Volume di materiale depositato in cinque anni nella sezione di controllo al variare dei casi.....	78
TAB B.1 Parametri funzione interpolante della variazione della quota piezometrica valutata con Carlslaw e Jager.....	125
TAB B.2 Parametri funzione interpolante della variazione della quota piezometrica valutata con Carlslaw e Jager a cui sono aggiunte le modifiche dovute alle precipitazioni.....	125

INTRODUZIONE

L'evoluzione dell'alveo dei corsi d'acqua in prima approssimazione può essere prevista in base alle portate e all'entità del trasporto solido. In questo lavoro si sono voluti approfondire altri fattori che possono determinare le variazioni nella sezione di flusso e nella forma dell'alveo, esaminando in particolare le conseguenze di un apporto di materiale solido derivante da corsi d'acqua laterali e da frane.

E' quindi di rilevante interesse lo studio dei meccanismi idro-geologici che favoriscono le frane lungo l'alveo, e degli eventi che possano determinare condizioni di criticità, dei quali uno dei più frequentemente osservati consiste nella genesi di elevati gradienti piezometrici lungo le ripe fluviali in occasione delle piene. Lo studio prende in considerazione un aspetto particolare di questi eventi, che consiste nel fatto che, nel corso delle piene possono realizzarsi contemporaneamente le condizioni di un aumento del gradiente per più di una causa.

Il sommarsi di una piena ordinaria del corso d'acqua alle precipitazioni avvenute sul bacino, possono portare ad una oscillazione della falda che, può creare gradienti idraulici superiori a quelli critici all'erosione sotterranea della sponda.

Questo lavoro si pone lo scopo proporre una metodologia che possa individuare in prima approssimazione la frequenza di accadimento che massimizza la sovrapposizione degli effetti in corrispondenza di una sezione tipo del torrente Anza.

Il primo capitolo vuole fornire lo stato dell'arte sia del trasporto solido sia dell'evoluzione geomorfologica di un alveo, fornendo una breve trattazione teorica riguardante il moto incipiente, le formule di trasporto e di variazione del fondo alveo.

Il secondo capitolo presenta invece il caso di studio del torrente Anza e la metodologia utile ad individuare quale possa essere la frequenza di accadimento di instabilità di una sezione tipo del corso d'acqua soggetta contemporaneamente ad un onda di piena ordinaria (fusione glaciale) e ad eventi di precipitazione distribuita uniformemente sul piccolo bacino di studio.

Il lavoro vuole mostrare come sia possibile identificare lo stato di criticità di alcuni tratti spondali in base alla frequenza di accadimento delle condizioni di elevato gradiente idraulico, e come l'apporto di materiale detritico dalle ripe che è la conseguenza del loro stato di dissesto possa modificare la forma delle sezioni di flusso e dell'alveo. Si è a tal fine utilizzato un software commerciale (Hec-ras). Tramite l'applicazione di questo strumento di calcolo si è verificata l'effettiva importanza dei colamenti laterali e delle importanti immissioni di materiale solido, nel modificare la morfologia dell'alveo, e si è comprovata l'utilità di tale metodo di indagine ai fini di un' indicazione delle opere utili a evitare dissesti in alveo.

Parole chiave: Trasporto solido, sovrapposizione degli effetti, erosione sotterranea

CAPITOLO 1

LO STATO DELL'ARTE: TEORIA SUL TRASPORTO SOLIDO E SULL' APPORTO IN ALVEO

Il trasporto solido nei corsi d'acqua a superficie libera è determinato dall'azione di trascinarsi che la corrente liquida esercita sul fondo dell'alveo; il materiale che viene rimosso dal fondo, viene trasportato con balzi, rotolamenti oppure in sospensione. [Allen, 1994].

L'alveo di un corso d'acqua può subire mutamenti progressivi nel tempo, in relazione alle sue caratteristiche:

- planimetriche, e quindi al suo percorso;
- altimetriche (pendenze);
- alla forma delle sezioni;
- alla distribuzione granulometrica del materiale di fondo, cui sono legati i valori di scabrezza.

Le modifiche dell'alveo possono essere conseguenza di eventi limitati nel tempo (piene, alluvioni), oppure al regime normale del corso d'acqua. In ogni caso, terminato il transitorio evolutivo, si possono avere situazioni di equilibrio statico, in cui i fenomeni di trasporto solido sono assenti, o di equilibrio dinamico tra erosione e deposito del materiale movimentato. E' inoltre opportuno distinguere i fenomeni distribuiti, che coinvolgono l'intera sezione d'alveo su tratti estesi longitudinalmente, dai fenomeni concentrati, limitati a zone specifiche della sezione, ovvero a tratti limitati dell'alveo, e legati alla presenza di singolarità geometriche nel corso d'acqua.

I fenomeni di movimentazione e sedimentazione di materiale solido sono principalmente collegati a caratteristiche del materiale coinvolto come granulometria e coesione, e alla portata del corso d'acqua.

Il trasporto avviene principalmente in due metodi:

- In sospensione, le particelle fini vengono trasportate con lunghi salti, per lo più rimanendo circondate da acqua;
- Di fondo, le particelle rimangono a contatto con il fondo alveo, scivolando o rotolando, al più facendo piccoli salti.

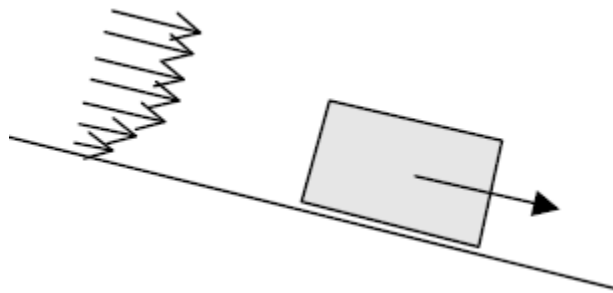
È necessario ricordare che affinché il fluido sia considerabile Newtoniano la quantità di sedimento in sospensione deve essere molto bassa rispetto all'acqua. [Graf, 1998].

1.1 MOTO INCIPIENTE

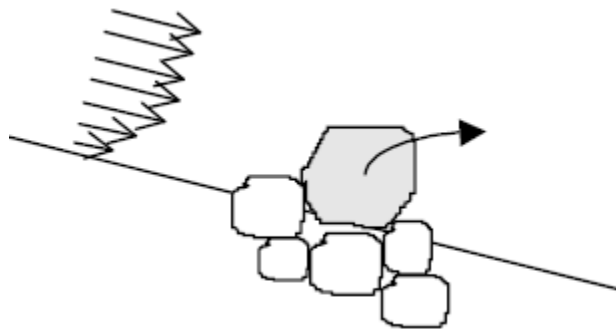
Il moto incipiente definisce una soglia, in funzioni delle caratteristiche geometriche e geotecniche dell'alveo e di quelle della corrente idrica, oltre cui la corrente viene considerata in grado di mettere in moto il materiale solido. [Przedwojski, 1995]

Gli schemi concettuali legati al moto incipiente sono essenzialmente tre:

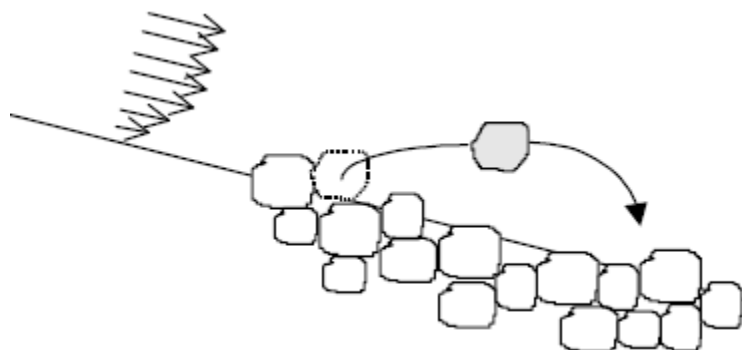
- Strisciamento, la particella striscia sul fondo, le forze idrodinamiche devono superare la reazione vincolare dell'attrito.



- Ribaltamento (senza attrito), le forze idrodinamiche devono far ruotare la particella intorno a un suo punto.



- "Saltelli", la particella inizialmente è incastrata nel fondo e le forze devono sollevarla.



Di seguito verranno presentati le principali teorie legate al moto incipiente.

1.1.1 Il criterio di Shields (1936)

Shields nel 1936, a seguito di esperimenti di laboratorio, elaborò un criterio per cui il distacco delle particelle solide dipende dalla granulometria del sedimento e dalle caratteristiche di tipo idraulico della corrente.

Le ipotesi semplificative del problema alla base della teoria di Shields sono:

- Materiale del fondo omogeneo e non coesivo
- Fondo orizzontale
- Alta sommergezza, cioè il diametro delle particelle solide è molto inferiore all'altezza della lama d'acqua che vi transita sopra.

Date queste ipotesi le forze attive sul granello risultano essere le seguenti:

- "Pc" forza di portanza della corrente, diretta perpendicolarmente alla direzione della corrente fluida, tende a sollevare il granello.
- "Gt" peso immerso.
- "Att" forza di attrito, risultante dalle forze di contatto fra la particella e quelle limitrofe
- "T" forza di trascinamento della corrente, forza idrodinamica che la corrente esercita parallelamente al fondo.

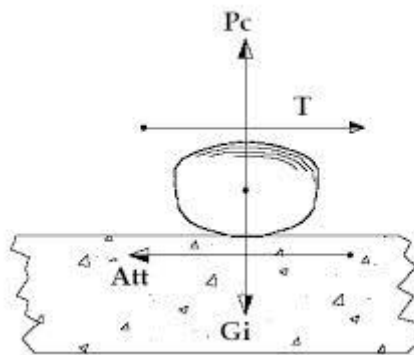


Fig. 1.1 schema delle forze

Date le ipotesi semplificative prime esposte, le uniche forze che possono contribuire al moto sono quella di attrito e quella di trascinamento.

$$T = \frac{C_r \alpha_1 d^2 \rho u^2}{2} \quad (1.1)$$

$$A_{tt} = C_A (\gamma_s - \gamma_w) \alpha_2 d^3 \quad (1.2)$$

In queste formule gli elementi citati sono:

- ρ densità dell'acqua [kg/m^3]
- γ peso specifico [N/m^3]
- α_1, α_2 fattori di forma

- d diametro medio delle particelle
- C_A coefficiente di attrito, dipende dalla forma e dalla natura delle particelle
- C_r coefficiente di resistenza idrodinamica, dipende dalla forma delle particelle e dal numero di Reynolds della corrente.

Ipotizzando una distribuzione locale delle velocità logaritmica del moto uniforme:

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{d}{k_e} \right) + B \left(\frac{k_e u^*}{v} \right) \quad (1.3)$$

In cui “ u^* ” è la velocità d’attrito, mentre “ k_e ” risulta essere la scabrezza equivalente della parete.

Inserendo la formula (1.3) nella (1.1), ricordando che le condizioni di moto incipiente corrispondono all’inizio del moto, cioè a forza di attrito e di trascinamento uguali, e svolgendo i calcoli è possibile individuare il “parametro di mobilità di Shields”

$$\theta = \frac{u_*^2}{g \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d} \quad (1.4)$$

Bisogna ricordare che questo parametro dipende direttamente dal numero di Reynolds della velocità di attrito.

Il parametro di Shields è adimensionale e rappresenta lo sforzo che agisce sui granelli del fondo del corso d’acqua in esame. Se si ipotizza il moto come successione di moti uniformi, tale sforzo è esprimibile come:

$$\tau = \gamma R j \quad (1.5)$$

- γ peso specifico dell’acqua [N/m^3]
- R raggio idraulico [m]
- j cadente energetica nel tratto in considerazione.

Con questa formulazione Shields ha ottenuto un abaco empirico in cui in funzione del parametro θ e del numero di Reynolds è possibile delimitare una zona di movimento da una di stabilità.

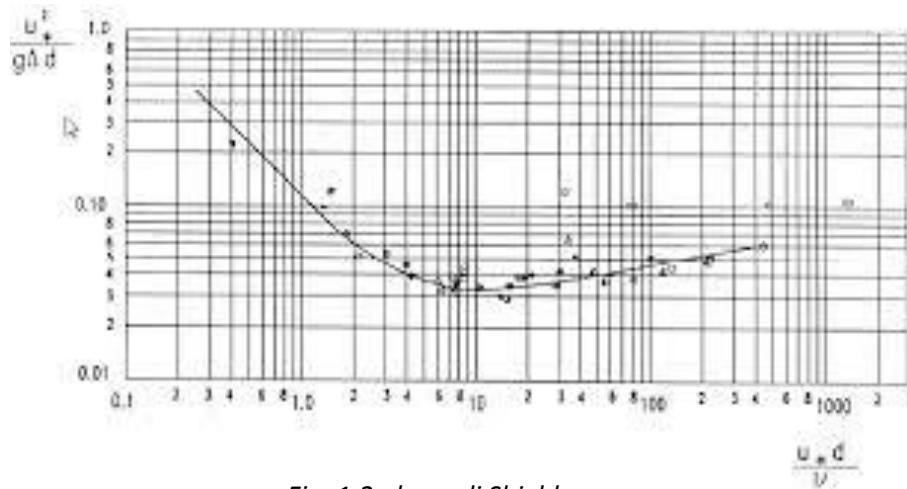


Fig. 1.2 abaco di Shields

Questa curva, presentante il numero di Reynolds relativo ai grani in ascissa e il parametro di Shields in ordinata e può essere suddivisa in tre parti:

- $Re^* < 2$ è un tratto rettilineo decrescente, in cui la velocità critica delle particelle dipende solamente dalla viscosità del fluido, si ha movimento solo se il diametro delle particelle è sufficientemente piccolo. Si ha un moto di tipo viscoso.
- $2 < Re^* < 200$ è un tratto curvilineo in una scala bilogarithmica, in cui si raggiunge un minimo in corrispondenza di $\theta \approx 0.04$.
- $Re^* > 200$ l'andamento torna a essere rettilineo e la curva assume valori pressoché costanti intorno a un asintoto calcolato da Shields pari a 0.06. Questo valore è stato modificato numerose volte a seconda delle ipotesi poste alla base del problema.

La teoria di Shields presenta delle ipotesi semplificative abbastanza lontane dalle condizioni reali, negli anni successivi vari studi hanno introdotto dei coefficienti correttivi al parametro θ per tenere conto di:

- Pendenza del fondo

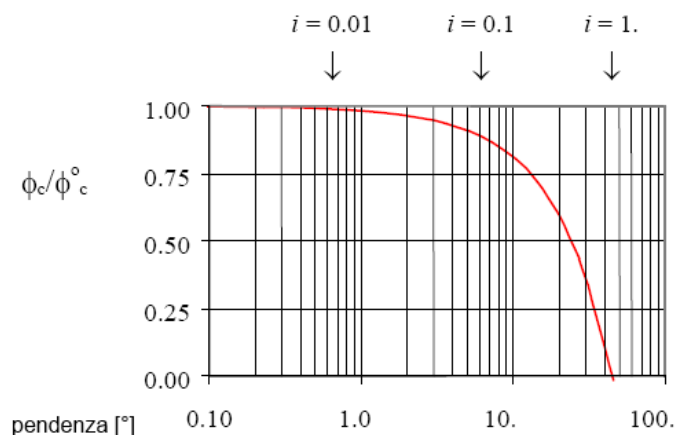


Fig. 1.3 fattore correttivo per la pendenza

[Armanini, Scotton 1994]

- Pendenza trasversale [Lane 1953]

- Bassa sommergenza

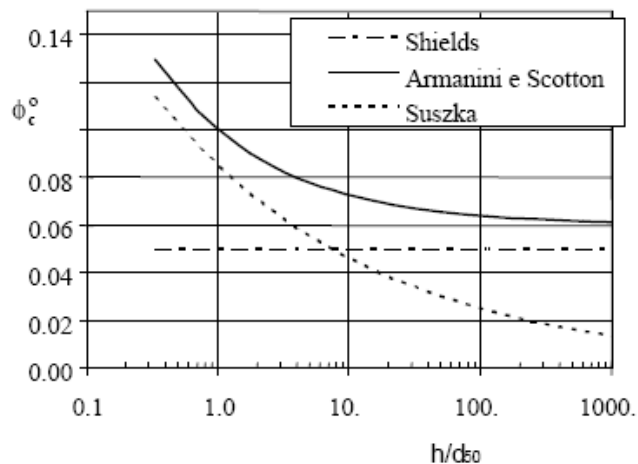


Fig. 1.4 confronto con parametri critici per differente sommergenza

[Armanini, Scotton 1990, Suzka 1991]

- Disomogeneità del materiale di fondo che influenza il moto incipiente attraverso due fenomeni. Il primo consiste nel fatto che le particelle di diametro inferiore risultano “protette” da quelle più grandi, mentre la mobilità di quest’ultime aumenta per la vicinanza di quelle fini. Questo fenomeno viene detto di “nascondimento” ed è stato molto studiato da numerosi autori tra i quali Egiazaroff nel 1963.

Un secondo fenomeno che si manifesta è quello del “corazzamento statico” il quale si realizza partendo dal fatto che le particelle più fini vengono asportate più facilmente, quindi la superficie del fondo alveo rimane con pezzature più grossolane per uno stato pari a due, tre volte il diametro dei grani più grossi. Questo fenomeno può risultare pericoloso nel momento in cui la portata aumenti al di sopra di una certa soglia e la “corazza” si rompa, improvvisamente una grande quantità di materiale fine verrebbe erosa aumentando notevolmente la portata solida.

[Armanini, Scotton 1994]

- Influenza della forma, è un fattore minimo, ma che può avere degli effetti in caso di forme dei grani particolarmente allungate. [Jansen 1979]
- Ordinamento e consolidazione dei sedimenti, importante soprattutto per sedimenti ghiaiosi. [Knighton 1984]
- Esclusione delle forze ortogonali, Shields tralasciò la portanza della corrente semplificando il fenomeno a piano; per alti valori di Reynolds la portanza però diventa importante. [Yang 1973].

A partire dal parametro di Shields sono state scritte numerose altre relazioni che mettano in relazione anziché gli sforzi, le portate o le pendenze per esempio, ma sono tutte riconducibili alla teoria sopra presentata.

Una volta definito il criterio per il moto incipiente è però necessario valutare l’entità della portata solida che la corrente trasporta realmente.

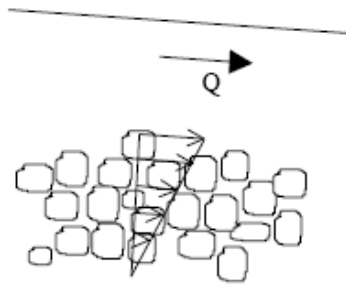
Tab. 1.1 formule per il calcolo del moto incipiente

Riferimento	Formula	Note
Shields	$\phi_c = 0.05$	$h/d > 6$
Shields	$\phi_c = 0.05 \cos \theta \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \beta} \right)$	$h/d > 6$
Armanini e Scotton	$\phi_c^\circ = 0.06 \left(1 + 0.67 \sqrt{\frac{d}{h}} \right)$	
Armanini e Scotton	$\phi_c^\circ = 0.06 \left(1 + 0.67 \sqrt{\frac{d}{h}} \right) \cos \theta \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \beta} \right)$	
Graf e Suszka	$\phi_c = 0.042 10^{2.2 i}$	$i = 0.02 \div 0.2$
Suszka	$\phi_c^\circ = 0.0851 \left(\frac{h}{d_{50}} \right)^{-0.266}$	$h/d = 0.5 \div 50$
Suszka	$\phi_c^\circ = 0.0851 \left(\frac{h}{d_{50}} \right)^{-0.266} \cos \theta \left(\tan \beta - \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho} \tan \theta \right)$	$h/d = 0.5 \div 50$
Neille	$F_c = 1.24 \left(\frac{h}{d_{50}} \right)^{0.12}$	
Neille	$F_c = 1.58 \left(\frac{h}{d_{50}} \right)^{0.10}$	
Aguirre-Pe e Fuentes	$F_c^\circ = 0.9 + 0.5 \ln \left(\frac{h}{d} \right) + 13 \frac{d}{h}$	$h/d = 0.2 \div 30$
Aguirre-Pe e Fuentes	$F_c^\circ = \left[0.9 + 0.5 \ln \left(\frac{h}{d} \right) + 13 \frac{d}{h} \right] \sqrt{\cos \theta (\tan \beta - \tan \theta)}$	$h/d = 0.2 \div 30$
Bettes	$\frac{q_c}{\sqrt{gd^3}} = \frac{0.134}{i} \ln \frac{1.221}{i}$	$i = 0.002 \div 0.1$ ($h/d = 1 \div 100$)
Bathurst <i>et al.</i>	$\frac{q_c}{\sqrt{gd^3}} = 0.15 i^{-1.12}$	$i = 0.002 \div 0.1$ ($h/d = 1 \div 100$)

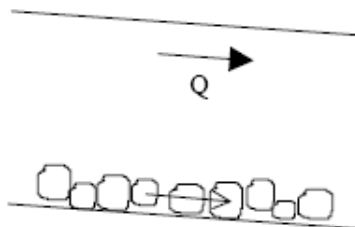
1.2 PORTATA SOLIDA

Una volta determinato il superamento della soglia di moto incipiente, è necessario valutare la quantità di solido movimentato.

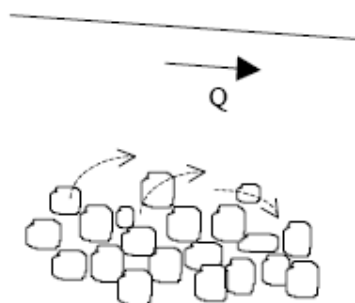
Il fenomeno del trasporto solido di fondo può essere schematizzato attraverso tre comportamenti non escludenti, bensì complementari fra loro.



- “Strato limite”, trascinato dagli sforzi tangenziali, uno spessore di particelle solide viene messo in movimento, all’aumentare della profondità le velocità sono progressivamente decrescenti.
- Moto Superficiale, solo uno strato superficiale di solido è considerato in moto, le particelle rotolano o strisciano su quelle sottostanti che però sono ferme.



- “Saltelli”, il moto delle particelle non viene schematizzato come un fenomeno continuo ma che avviene per “salti” finiti delle particelle superficiali, seguiti da tempi di riposo.



A partire dai diversi schemi concettuali la letteratura propone differenti formule che legano i parametri idraulici al trasporto solido. Di seguito ne vengono presentate solo alcune

1.2.1 La formula di Du Boys (1879)

La formula di Du Boys deriva da considerazione teoriche sul meccanismo di distacco dei granelli che compongono il fondo alveo. La prima ipotesi è che il fondo del corso d'acqua sia composto da strati di spessore costante pari al diametro medio delle particelle, che scorrono l'uno sull'altro con velocità decrescenti linearmente con la profondità. Gli strati superficiali vengono messi in movimento quando l'azione tangenziale della corrente supera lo sforzo critico di Shields. Analogamente gli strati sotto stati sono movimentati per l'azione di attrito di quelli superficiali.

Nello strato più profondo la forza di attrito risulta in equilibrio con l'azione di trascinamento, e considerando che il maggior movimento si ottiene in quello più superficiale, si può arrivare a ricavare la seguente formula:

$$q_s = \frac{\varepsilon v_s}{2 \tau_{cr}^2} \tau (\tau - \tau_{cr}) \quad (1.6)$$

In cui:

- v_s velocità del singolo strato
- ε spessore degli strati
- τ sforzo tangenziale

La prima parte della formula (1.6) può essere considerata funzione solo del diametro delle particelle solide, allora solitamente la formula di Du Boys viene espressa come:

$$q_s = K \tau (\tau - \tau_{cr}) \quad (1.7)$$

Numerosi studi (Schocklish 1914, Straub 1934, ecc.) hanno dimostrato che il moto del fondo di un corso d'acqua non è per niente riducibile a quello proposto da Du Boys. Allo stesso tempo è necessario riconoscere che questa formulazione offre dei buoni risultati a numerosi esperimenti di laboratorio ma anche a prove in campo. Gli autori sopra citati hanno anche realizzato delle formule alternative per il calcolo della costante "K".

Donat nel 1929, invece, dimostrò la formula di Du Boys da un punto di vista matematico e quindi rimuovendo le ipotesi del moto erronee introdotte dall'autore. Supponendo che la portata solida sia una funzione dello sforzo tangenziale sul fondo, sviluppabile in serie di potenze, e arrestando lo sviluppo al termine quadratico si ottiene:

$$q_s = a_0 + a_1 \tau + a_2 \tau^2 \quad (1.8)$$

Imponendo le condizioni: idrostatica e di moto incipiente:

$$a_0 = 0 \quad (1.9)$$

$$a_1 = -a_2 \tau_{cr} \quad (1.10)$$

Si può notare come si ottenga la formula di Du Boys (1.7), evitando appunto ipotesi sulla cinematica delle particelle.

1.2.2 La Formula di Meyer-Peter Müller (1948)

Questa formulazione è stata ricavata per via sperimentale, in seguito a numerosi esperimenti svolti presso il Politecnico di Zurigo. Questa teoria ha il grosso vantaggio di essere valida per granulometrie non uniformi, anche se mantiene la limitazione di essere pensata per alvei con pendenze modeste.

In questa formula la portata viene misurata come peso immerso e non secco, e la scabrezza viene suddivisa in due termini, il primo relativo alla resistenza esercitata dalle forme di fondo, e il secondo legato alle singole particelle.

La formula completa si presenta come segue:

$$\frac{Ri_f}{\left(\frac{\rho_s}{\rho}-1\right)d_{50}} \left(\frac{k_s}{k'_s}\right)^{\frac{3}{2}} - 0.047 = 0.25 \frac{G_s'^{\frac{2}{3}}}{\rho^{\frac{2}{3}}\left(\frac{\rho_s}{\rho}-1\right)gd_{50}} \quad (1.11)$$

Dove:

- R, raggio idraulico [m];
- i_f , pendenza del fondo;
- ρ , densità dell'acqua [kg/m^3];
- ρ_s , densità del materiale solido [kg/m^3];
- d_{50} , diametro medio delle particelle solide [m];
- k_s , coefficiente di Strickler relativo alle forme di fondo [$\text{m}^{1/3}/\text{s}$];
- k'_s , coefficiente di Strickler dovuto ai singoli granelli [$\text{m}^{1/3}/\text{s}$];
- 0.047, parametro limite di Shields, secondo Zeller;
- G'_s , portata solida per unità di larghezza espressa come peso immerso [N/ms];
- g, accelerazione di gravità [m/s^2];

Il termine di scabrezza, relativo ai singoli granelli può essere espresso tramite la formula di Müller:

$$k'_s = 26d_{90}^{(-1/6)} \quad (1.12)$$

È doveroso notare come in condizioni di moto incipiente la formula si riconduca a una simile a quella di Shields proposta nel “Paragrafo 1.2.1”, infatti è necessario porre la portata solida nulla e le due scabrezze uguali, in quanto si presuppone non siano ancora presenti forme di fondo.

La formulazione di Meyer-Peter Müller fornisce risultati molto vicini alla realtà per alvei con granulometrie modeste, comprese fra 0.4 e 29 mm, e pendenze inferiori al 2%. Nel caso di pendenze superiori infatti Smart (1984) ha notato una certa sottostima del materiale solido.

1.2.3 La Formula di Smart e Jäggi

La Formula di Smart e Jäggi nasce come un’evoluzione di quella di Meyer-Peter Müller, infatti si prefigge lo scopo di considerare pendenze maggiori rispetto a quella originale, raggiungendo il 21%. Pendenze più vicine a quelle dei versanti che non dei corsi d’acqua.

I due autori hanno così ottenuto una formula adimensionale presentata qui di seguito:

$$\Phi = 4 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} i_f^{0.6} \theta^{0.5} (\theta - \theta_{cr}) \left(\frac{u}{u^*} \right) \quad (1.13)$$

Dove:

- i_f , pendenza del fondo;
- θ , tensione tangenziale adimensionale;
- u , velocità della corrente [m/s];
- u^* , velocità d’attrito della particella [m/s];

Tenendo in considerazione la non uniformità del materiale, il rapporto fra i diametri è approssimabile a 1.05, così come il valore critico della variabile θ a 0.05, considerando i consigli degli stessi autori.

Armanini (1990) ha dimostrato che questa formulazione ottiene buoni risultati per pendenze comprese fra il 3% e il 20%.

1.2.4 Correzioni di Wong e Parker (2006)

Il lavoro dei due autori parte dal ripetere le analisi sulle banche dati usate da Meyer-Peter Müller, senza la volontà di riscrivere una nuova formulazione, ma solo, alla luce di numerosi nuovi studi, rivedere i coefficienti e le correzioni apportate nel tempo alla teoria originale.

Questo lavoro porta a riscrivere la formula originale come segue:

$$q_s = 3.97(\tau_b^* - 0.0495)^{1.50} \quad (1.14)$$

$$\text{Con } \tau_b^* = \frac{\tau_b}{\rho R g D_m} \quad (1.15)$$

Dove:

- τ_b , sforzo di taglio sul fondo [Pa];
- ρ , densità dell'acqua [kg/m^3];
- R , raggio idraulico [m];
- g , accelerazione di gravità [m/s^2];
- D_m , media aritmetica del diametro del sedimento [m].

Le variazioni sono tutte interne ai coefficienti numerici espressi e risultano proprio da un'analisi statistica dei dati usati originariamente.

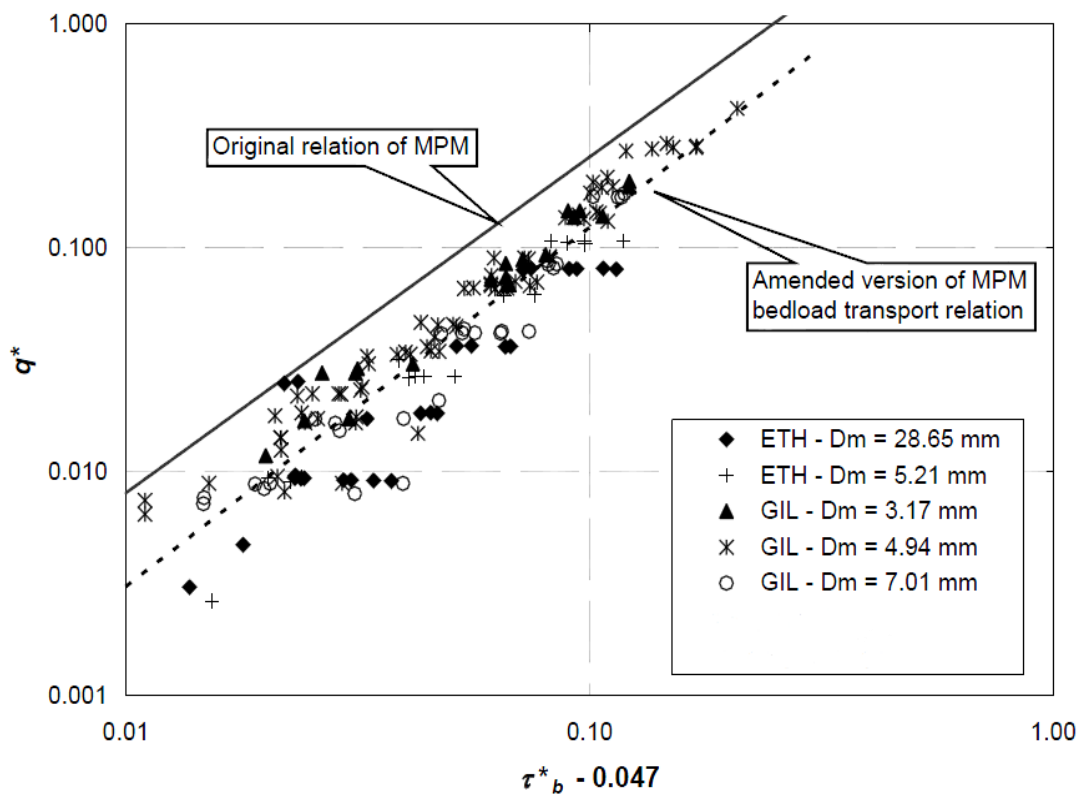


Fig. 1.5 confronto fra la formula originale e con le correzioni di Wong e Parker

Le principali correzioni riguardano l'introduzione di effetti laterali al fondo alveo e l'esistenza o meno di effetti di forma. Il primo punto era già stato analizzato da Vannoni e Brooks nel 2002, ottenendo una formulazione identica alla (1.14) ma con coefficienti numerici lievemente diversi.

1.2.5 Altre Formulazioni importanti

Einstein (1960) parte da un principio completamente differente da quelle presentate finora. Infatti non si basa sul superamento di una soglia critica per l'inizio del movimento, bensì sulla possibilità che questo si verifichi.

A seguito di numerose osservazioni, l'autore arrivò a produrre le seguenti considerazioni:

- Durante il moto, vi è un intenso scambio di particelle fra il fondo alveo e la corrente;
- La velocità della corrente solida verso valle è nettamente minore di quella liquida, e il movimento delle particelle avviene tramite spostamenti molto rapidi e periodi di tregua relativamente lunghi.
- La lunghezza media degli spostamenti delle particelle, non dipende dalle caratteristiche della corrente liquida, ma solo dalle dimensioni dei grani.
- Le velocità medie di trasporto delle singole particelle sono condizionate dalle diverse durate dei tempi di riposo, legate alle condizioni idrauliche della corrente.

Partendo da queste considerazioni Einstein definì il moto incipiente come una condizione dinamica, in cui il numero di particelle che si depositano nell'unità di tempo su una superficie di fondo di area unitaria, è uguale a quello di particelle che nello stesso tempo vengono asportate, dalla stessa superficie, dalla corrente.

Yang nel 1963 derivò per via empirica una formula per valutare la concentrazione di materiale solido trasportato dalla corrente. Inizialmente la teoria era adatta solo ad alvei in sabbia, più tardi (1983) lo stesso autore tramite regressioni statistiche ottenne una formula simile, per letti ghiaiosi.

La teoria si basa sulla definizione di un'energia di flusso, come la quota parte di energia potenziale dissipata per unità di peso dell'acqua, espressa tramite la velocità della corrente e la pendenza del fondo.

1.3 LE FORME DI FONDO

Quale diretta conseguenza del trasporto solido si possono verificare, sul fondo degli alvei, le cosiddette "forme di fondo". I sedimenti, muovendosi, tendono infatti a conformare il letto dell'alveo secondo ondulazioni di varia misura, forma e disposizione (ripples, dune, antidune). Queste forme si muovono e possono creare delle macro-scabrezze.

Generalmente il fenomeno delle forme di fondo risulta poco rilevante per i torrenti, mentre può avere effetti significativi nel caso dei fiumi.

Menduni (1994) definisce le forme di fondo come: "l'effetto della parte deterministica del trasporto solido, e la loro presenza è importante ai fini della valutazione della profondità dell'acqua [...]".

Il meccanismo di avanzamento di queste forme dipende dalla velocità della corrente: nel caso di lenta, le particelle risalgono nel lato controcorrente della forma e cadono a valle di essa, in questo modo si ottiene una duna. I ripples si formano invece per sforzi bassi, in letti con diametri minori al millimetro, per cui sono le prime forme a "nascere" in un alveo.

L'aumento della velocità della corrente porta allo spianamento delle dune, e al conseguente nascere delle antidune, onde di bassa ampiezza in fase con quelle superficiali, il loro movimento procede da valle verso monte.

La previsione delle forme di fondo può essere effettuata tramite la valutazione del numero di Froude medio della corrente.

$$Fr = \frac{V}{(gh)^{1/2}} \quad (1.16)$$

Dove:

- V, velocità media della corrente [m/s];
- h, altezza media dell'acqua [m].

Ripples e dune si formano con $Fr < 1$, mentre le antidune per valori superiori all'unità.

1.4 EVOLUZIONE DEGLI ALVEI

Finora è stato considerato il problema da un punto di vista locale, se e come si muove del materiale solido all'interno di un corso d'acqua, ma i problemi principali legati al trasporto solido sono da trattare tramite una visione d'insieme.

I principali problemi infatti sono collegati alla realtà del sistema, dato un corso d'acqua con una certa portata, è necessario valutare a distanza di tempo come evolve il letto del fiume; oppure qualora una frana entri in alveo come viene portata a valle.

1.4.1 L'Equazione di Exner (1925) per la dinamica del fondo

Il fondo del canale sarà soggetto a variazioni spazio temporali, in particolare vi sarà erosione o sedimentazione, secondo le caratteristiche della corrente e del materiale solido.

Una volta valutata l'entità del trasporto solido che si genera, la variazione della quota di fondo può essere ricavata dalla formula di Exner, che rappresenta l'equazione di continuità della fase solida nell'alveo.

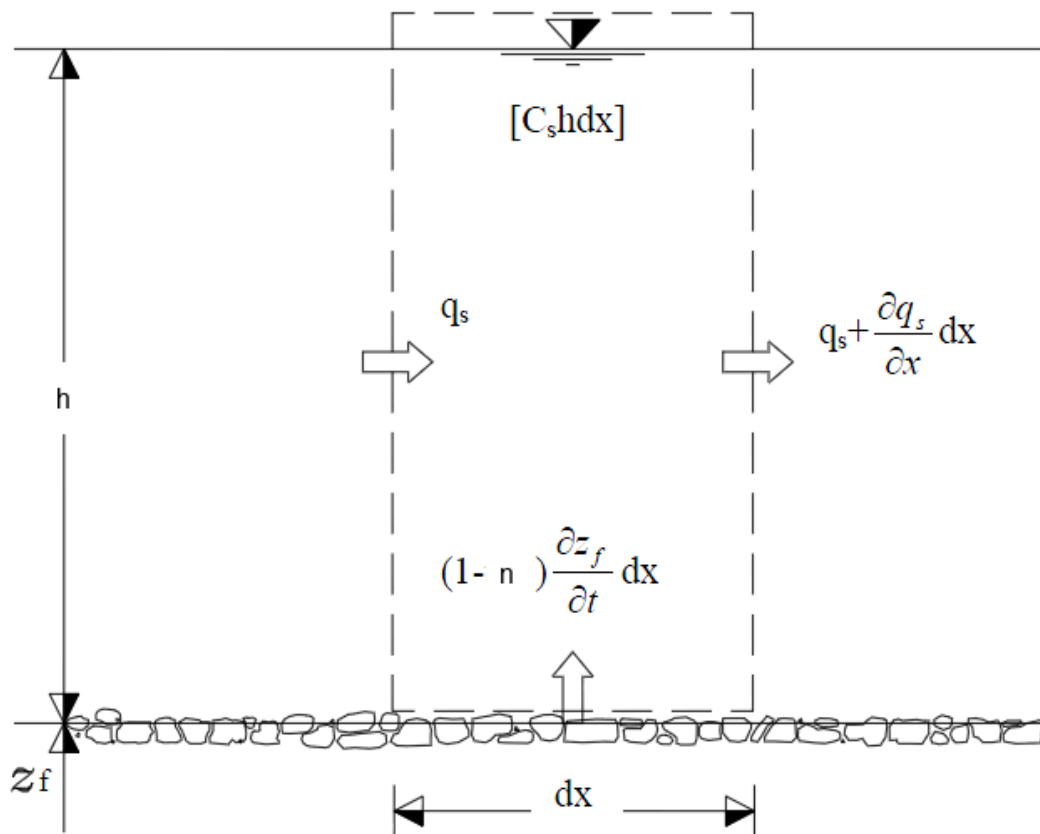


Fig. 1.6 rappresentazione grafica della continuità del materiale solido

L'equazione si presenta nella seguente forma:

$$\frac{\partial z_f}{\partial t} + \left(\frac{1}{1-n}\right) \left[\frac{\partial \tilde{C}_s h}{\partial t} + \frac{\partial C_s V h}{\partial x} \right] \approx \frac{\partial z_f}{\partial t} + \left(\frac{1}{1-n}\right) \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0 \quad (1.17)$$

In cui:

- z_f , quota del fondo alveo [m];
- n , porosità dei sedimenti costituenti il canale;
- C_s , concentrazione in volume della fase solida;
- \tilde{C}_s , concentrazione in volume della fase solida nella sezione trasversale;
- V , velocità media della corrente [m/s];
- h , profondità della corrente [m];
- $q_s = C_s V h$, portata solida per unità di larghezza, che è una funzione della portata liquida secondo una delle formule di trasporto citate nel "Paragrafo 2.3".

Ghilardi nel 1990 e altri autori successivamente hanno mostrato come la seconda parte dell'equazione sia valida solo nel caso in cui la portata solida di fondo sia nettamente superiore a quella in sospensione.

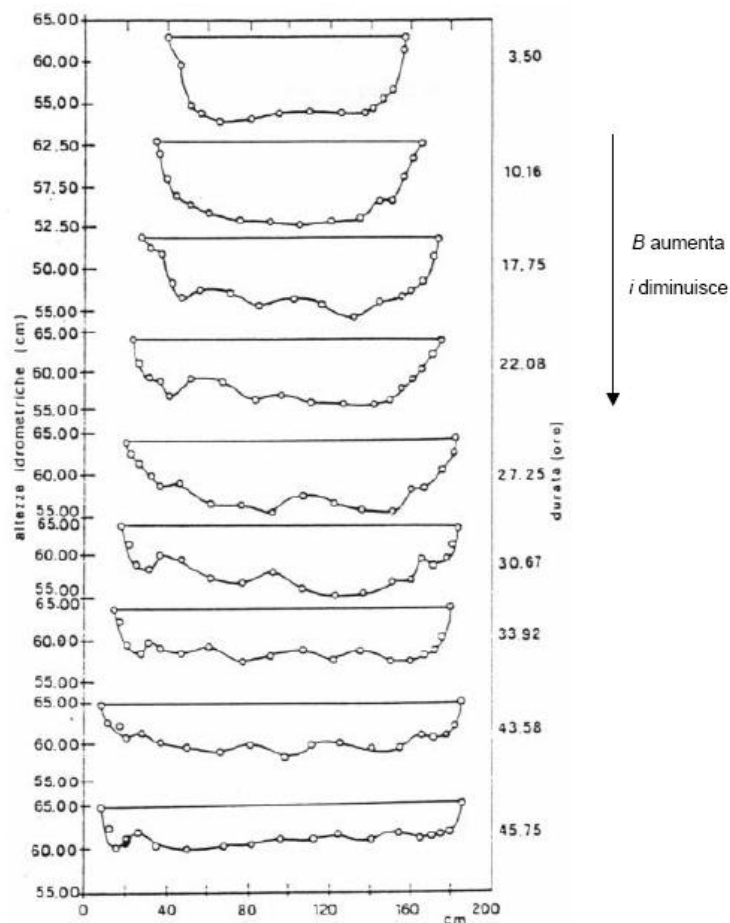


Fig. 1.7 esempio di evoluzione della sezione in una canaletta sperimentale in sabbia

1.5 IMPERMEABILIZZAZIONE DEL FONDO ALVEO

Un altro effetto osservabile in un alveo con materiali di differenti granulometrie è quello dell'impermeabilizzazione del fondo. Questo fenomeno è collegato a quello del corazzamento e del nascondimento, infatti il processo fisico è simile, ma comporta una conseguenza seppur logica molto poco analizzata.

Nel 1992 Schächli studiò come il fenomeno di corazzamento per cui uno strato di materiale fine si deposita e viene protetto dall'erosione da materiale più grossolano comporti anche una sensibile riduzione di permeabilità. Questo fenomeno risulta importante per i vari processi di filtrazione e alimentazione della falda che possono avvenire in presenza di un corso d'acqua.

Schächli studiò in quale condizioni il fenomeno del corazzamento si verificasse e fino a che punto resistesse sotto l'azione di grosse piene. Tutti questi ragionamenti vennero svolti utilizzando come parametro di riferimento il coefficiente critico di Shields.

Ovviamente questo fenomeno è strettamente legato al trasporto solido, infatti dipende dal parametro di Shields, dalla disponibilità di materiale della corretta granulometria e dalle condizioni della corrente.

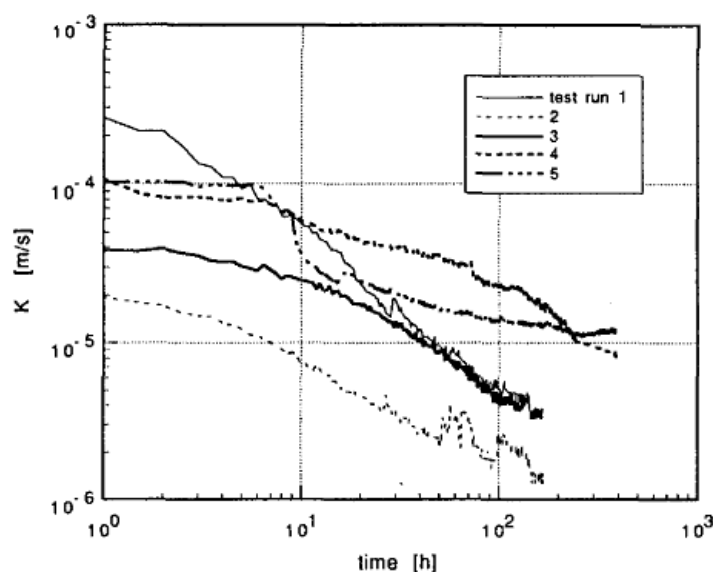


Fig. 1.8 andamento della permeabilità nel tempo per 5 diversi esperimenti

1.6 GLI ASSETTI MORFOLOGICI IN CORSI D'ACQUA MONTANI

Il tracciato planimetrico assunto da un corso d'acqua viene definito come configurazione d'alveo. In realtà non è possibile definire suddivisioni nette, ma esiste una serie di pattern di tracciati d'alveo caratterizzata da variazioni progressive delle caratteristiche geometriche. Il parametro di Sinuosità (P = rapporto tra lunghezza del canale e quella della valle entro cui scorre il corso d'acqua) si adatta ad esprimere queste condizioni di continuità nella variazioni morfologiche di un fiume [Leopold et al. (1964)].

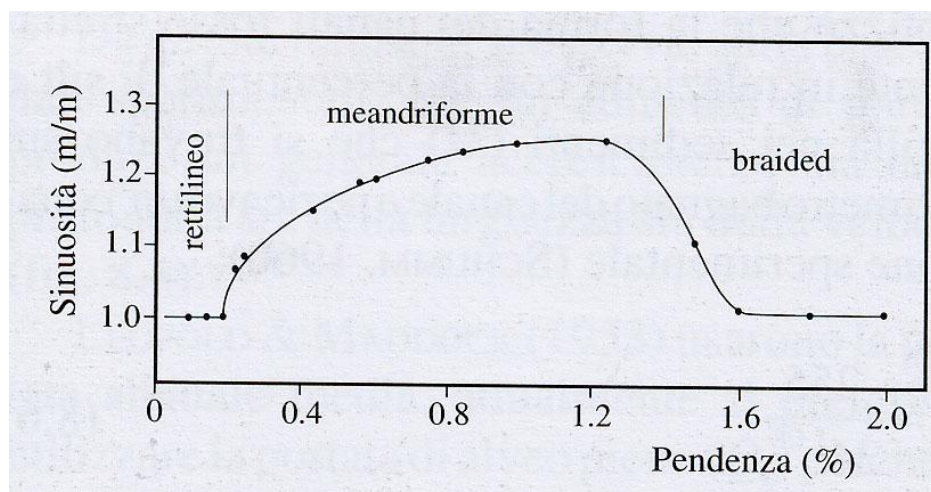


Fig. 1.9 rapporto tra sinuosità e pendenza per alvei di pianura

Il reticolo idrografico di molti bacini alpini può essere scomposto in due distinte tipologie di canale: incisioni colluviali e tratti alluvionali. Il reticolo alluvionale sottintende tutti i tratti di quei collettori il cui letto è costituito dai sedimenti che il flusso idrico è in grado di trasportare e selezionare. A differenza di un canale in roccia, un tratto alluvionale è soggetto ad un'evoluzione della sua geometria abbastanza dinamica nel tempo, potendo dar luogo, sia spazialmente che temporalmente, all'alternarsi di fenomeni di erosione e di deposizione. Come reticolo colluviale viene intesa la porzione del reticolo idrografico che si sviluppa nella parte superiore del bacino idrografico, caratterizzata da incisioni più o meno evidenti del substrato, causate prevalentemente dalla concentrazione del deflusso idrico superficiale. La limitata profondità di incisione e il carattere effimero dei deflussi nella rete colluviale sembrano non garantire la mobilitazione di gran parte del sedimento che può essere immesso nel canale [Dietrich e Dunne, 1978]. Il deflusso intermittente può rimuovere parte di tale materiale, ma non è tale da determinare processi di selezione e trasporto assimilabili a quelli che avvengono nella rete idrografica principale [Montgomery e Buffington, 1997; D'Agostino e Vianello, 2005].

Nei tratti colluviali di bacini montani a forte pendenza sono anche possibili trasporti di sedimento in forma massiva (colate detritiche o fangose), legati talora al processo di formazione stessa del canale e determinati da una molteplicità di fattori, quali apporto di

materiale da canali in roccia superiori, franamenti superficiali di versante, rilasci impulsivi di sedimenti accumulatisi nel tempo nel reticolo per l'azione di intrappolamento indotta dalla vegetazione in alveo o dai detriti legnosi.

Il reticolo colluviale assume importanza, poiché costituisce la componente elementare del reticolo idrografico. Le tipologie colluviali possono essere considerate gli elementi iniziali della rete idrografica e rappresentano la forma di transizione da impluvio non inciso a rete idrografica [Montgomery e Dietrich, 1989].

Nell'ambiente alpino-dolomitico lo sviluppo di tale tipologia morfologica è favorito dalla litologia dei suoli. I canali colluviali si generano nei terreni morbidi e propensi all'azione di modellamento da parte del deflusso superficiale. Trattasi di substrati di origine sedimentaria a prevalenza limoso-argillosa.

Bacini idrografici a predominanza calcarea-dolomitica non presentano reticoli effimeri colluviali.

A valle del reticolo colluviale i corsi d'acqua si presentano, generalmente, a debole tortuosità, e per questo vengono identificati come rettilinei.

I canali rettilinei si trovano prevalentemente nei settori montani e pedemontani dei bacini idrografici e sono caratterizzati da pendenze abbastanza elevate e da una granulometria dei sedimenti grossolana ed eterogenea. Il campo di pendenze tipico si colloca generalmente sopra al 2%, anche se non mancano esempi di canali rettilinei su pendenze più ridotte. Altre caratteristiche che possono presentarsi sono: l'assenza di pianure alluvionali estese, affioramenti rocciosi lungo le sponde e nel letto, presenza poco sviluppata di corpi sedimentari centrali, sezioni di forma abbastanza confinata e con profilo del fondo piuttosto incassato nella valle.

La forma di trasporto solido che si considera caratterizzante è il trasporto di fondo. Questo può essere affiancato anche da fenomeni di moto dei sedimenti in forma ancora più massiva, colate detritiche (debris flow). Le colate si verificano in quei corsi d'acqua a forte torrenzialità, che presentano pendenze medie superiori ai 15°, che sottendono bacini dell'estensione superiore ai 5 ha, e con forte deposito di materiale solido [D'Agostino, 1996].

A seconda delle pendenze del tratto del corso d'acqua si realizzano differenti strutture morfologiche. Per pendenze dell'ordine del 3-4% si verifica la struttura a "rapidi e step pools".

Le prime unità si presentano come degli scivoli dove si concentrano (anche per alcune decine di metri) sedimenti più grossolani. Questi conferiscono alle rapide una buona stabilità. Le rapide si accompagnano ad una forte scabrezza dell'alveo che, per la distribuzione casuale dei massi più grossi, dà luogo ad una dissipazione energetica di tipo quasi continuo [D'Agostino et al., 2001]. Talora all'interno di un tratto a rapida, alcuni degli

elementi più grossolani risultano parzialmente allineati in senso trasversale; si formano così delle successioni di gradini.

Gli step pool si sviluppano con un profilo longitudinale a gradinata, che si traduce, dal punto di vista idraulico, in una successione di salti (step) e di pozze (pool). Le perdite energetiche avvengono, lungo il torrente, ad impulsi e sono concentrate nelle pool. Gli step sono costituiti dall'allineamento trasversale di una o due file dei sedimenti più grossolani che compongono l'alveo.

Grazie alla presenza di continui salti idraulici, queste strutture, specie in condizioni di magra, sono fortemente dissipative, mentre le perdite energetiche si attenuano, quando gli step vengono annegati da valle dall'altezza della corrente.

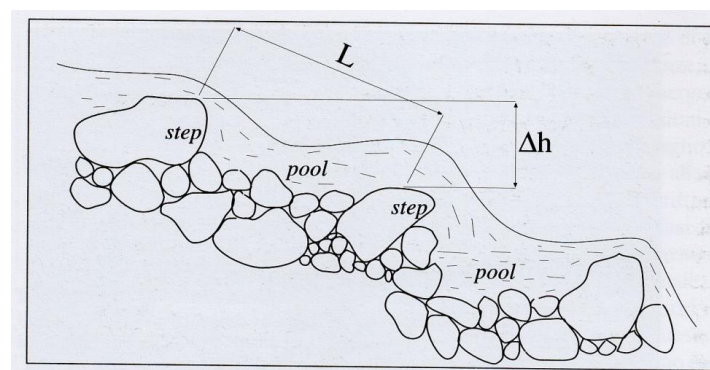


Fig. 1.10 schema step pool

Un'altra successione morfologica assai ricorrente nei corsi d'acqua rettilinei e, in particolare, negli alvei con fondo in sabbia e/o ghiaia, è quella dei riffle pool. Queste unità si osservano più frequentemente nei settori pedemontani dei bacini idrografici in un campo di pendenze del fondo compreso tra lo 0.5% e il 3%. I riffle, analogamente alle rapide, sono dei tratti dove il canale aumenta la sua pendenza e dove sono presenti le granulometrie più grossolane. Il tratto a riffle si localizza quasi in corrispondenza dell'inizio di una barra laterale, segue quindi una lunga pool, che ha il suo punto di massimo sviluppo trasversale al termine e poco a valle della barra. Il successivo riffle è indotto dalla presenza di una barra laterale localizzata sulla sponda opposta rispetto alla precedente.

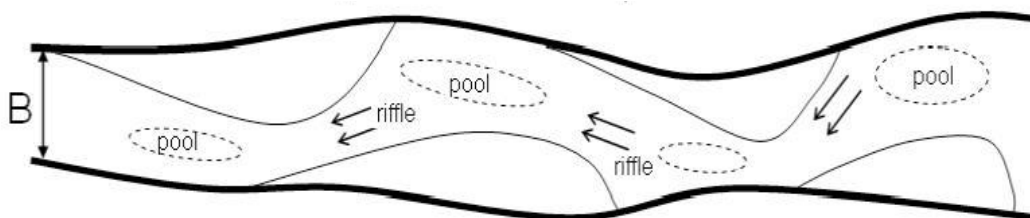


Fig. 1.11 schema planimetrico di un tratto d'alveo con morfologia a riffle-pool

La genesi dei riffle pool sembra da attribuire al fatto che, pur essendo il canale rettilineo, l'andamento sinusoidale del filone principale della corrente induce la formazione di corpi

sedimentari alternati, ai quali si accompagnano, specie in condizioni di magra e di morbida, fenomeni accelerativi (nel riffle) e decelerativi (nel pool) del flusso.

Su pendenze del fondo più contenute rispetto ai canali rettilinei (approssimativamente in un campo compreso tra lo 0.01% e il 2-3%) si può osservare la tipologia fluviale a rami intrecciati (detta anche braided), caratterizzata da un fitto intreccio o reticolo di canali di dimensioni simili, separati da barre longitudinali mediane (isole). I fiumi braided sono molto attivi, dotati di alta energia e capacità di trasporto per cui distruggono e ricostruiscono continuamente le loro strutture sedimentarie.



Fig. 1.12 esempio di fiume a rami intrecciati (Rakaia River, Nuova Zelanda)

Quando il fiume percorre regioni con pendenza inferiore al 2% tende a divagare, a formare delle sinuosità che aumentano via via la loro curvatura, allontanandosi dalla linea di deflusso formando un meandro.

Le barre sono corpi sedimentari mobili di un alveo fluviale; tuttavia tali corpi possono esistere anche in alvei fluviali fissi, ovvero costretti a mantenersi in una sede rigida costituita da roccia massiva e da opere artificiali resistenti. La presenza di barre è sempre correlata al trasporto solido di fondo e aumenta all'aumentare di questo ed all'aumentare della variabilità della portata. I principali tipi di barre sono: le barre laterali (Side bar), le barre di meandro (Point bar), le barre di flesso (Cross-over bar), le barre longitudinali (Longitudinal bar) e le barre di braided (braid bar). Le barre longitudinali sono generalmente alternate in sponda dx ed in sponda sx in alvei rettilinei o a bassa sinuosità. Quando invece la sinuosità dell'alveo cresce si formano le barre di meandro nella parte interna della curva. Al crescere del trasporto di fondo, tali barre si associano alle barre di flesso. Se il trasporto solido di fondo si accresce ulteriormente iniziano a presentarsi le barre longitudinali non collegate alla sponda del canale. Tali barre determinano la presenza di alvei multicanale. Al crescere del trasporto solido le barre longitudinali aumentano di numero e di superficie, l'alveo tende a

diminuire la sinuosità mentre aumenta la sinuosità del o dei canali e la loro mobilità. Si viene così a creare un vero e proprio alveo intrecciato via via con un maggior numero di canali.

Esistono dei criteri di classificazione dei fiumi che considerano le forme e le caratteristiche di trasporto solido in atto al loro interno, ne sono stati proposti diversi, qui ne verranno presentati due, uno per la sua semplicità e l'altro per collegare numerosi fattori in un solo metodo.

Una delle più seguite è quella proposta da De Horatiis (1930), secondo la quale i torrenti vengono divisi in due categorie: torrenti in fase di erosione e torrenti in fase di trasporto. I torrenti in erosione sono quelli in cui l'energia della corrente è superiore a quella necessaria per trasportare a valle i materiali provenienti da monte e dai versanti e viene quindi anche utilizzata per erodere il letto, in modo da saturare la capacità di trasporto. E' possibile distinguere quando l'erosione sia a prevalente componente verticale (erosione del fondo) ed in questo caso si parla propriamente di torrenti in fase di scavo, od orizzontale (erosione delle sponde).

I torrenti in fase di trasporto sono quelli in cui tutta l'energia viene impiegata per trasportare il materiale a valle; il letto del torrente non viene scavato ma ha tendenza ad alzarsi dove si verifica una diminuzione di pendenza del fondo. E' abbastanza normale, ad esempio, che nel tratto di valle, in corrispondenza del conoide, il torrente diventi un torrente di deposito. Un'altra classificazione possibile è quella di Schumm (1963) e viene riassunta in maniera ottimale nella "Figura 1.13". Questo metodo consente anche di ottenere delle indicazioni sul tipo di trasporto solido, la sua quantità, l'interazione con la forma dell'alveo e altri elementi.

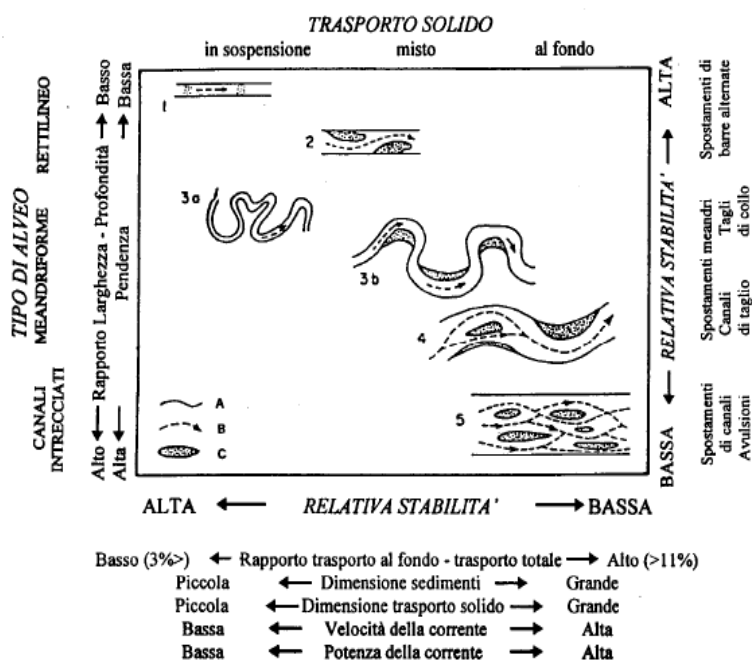


Fig. 1.13 Classificazione di Schumm 1963

Queste classificazioni fanno riferimento allo stato erosivo del corso d'acqua, e collegano anche il trasporto alla forma dell'alveo come è logico che sia, conseguentemente a ciò diventa però fondamentale tenere presente che la quantità di materiale in trasporto o erodibile presente non dipende esclusivamente dal fiume stesso ma anche da tutti i suoi affluenti e da quanto materiale il bacino porta in alveo. Questa considerazione diventa palese se si osservano gli studi svolti su vari torrenti e fiumi, come nel caso del torrente Maè.

Il torrente Maè è un affluente del Piave, sul quale sono stati calcolati i vari apporti di materiale solido dai suoi immissari, si può notare (Figura 2.14) che la quantità in metri cubi è assolutamente rilevante e non sarebbe ipotizzabile definire il bilancio di detriti alla diga di chiusura senza tenerne conto. Difatti immaginando di non considerare solamente i conoidi con un bacino inferiore ai 20 km² si arriverebbe a trascurare ben 18950 m³/annui.

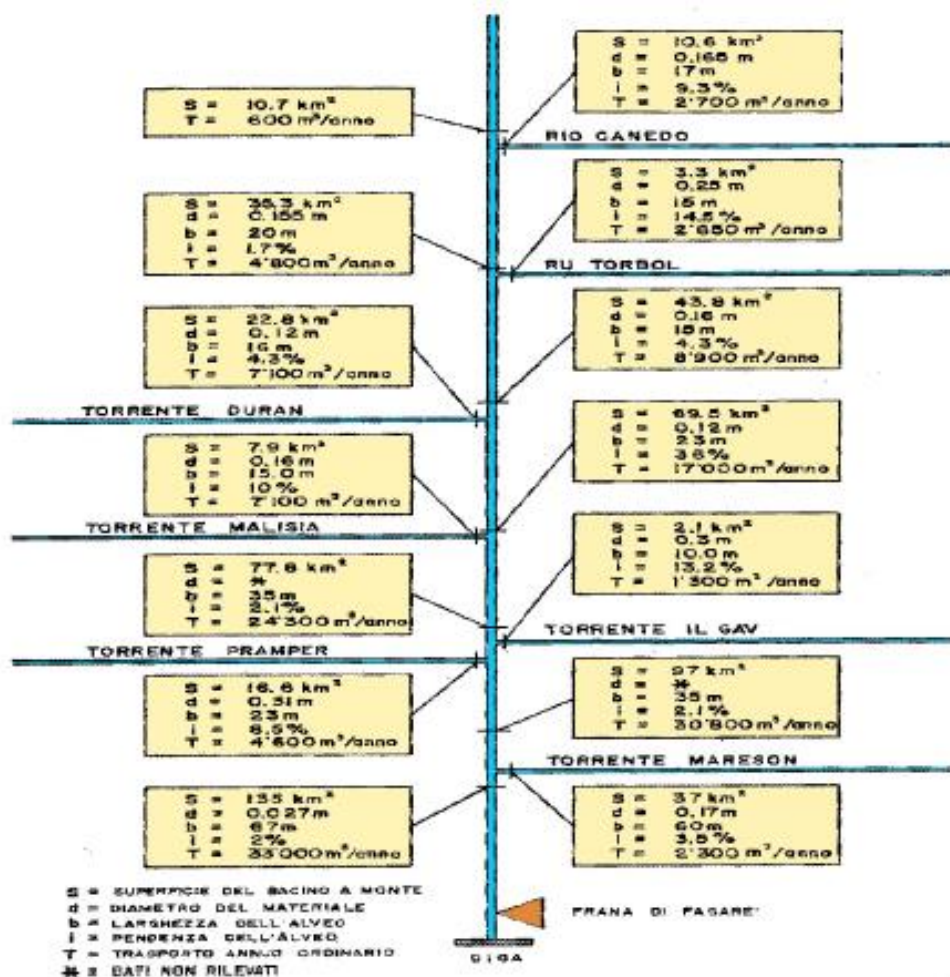


Fig. 1.14 Affluenti del torrente Maè

È possibile intuire la pericolosità di un territorio analizzando i fattori predisponenti sopra elencati, ricercando con foto aeree e documentazione storica l'esistenza di fenomeni simili nel passato e applicando delle formule empiriche e/o dei modelli numerici per ottenere dei risultati più quantitativi. Purtroppo sono fenomeni di tipo improvviso quindi è necessario

agire prima che si manifestino i sintomi di inizio di una colata e conseguentemente il miglior metodo è quello di arrivare a definire delle soglie di allerta legate alla piovosità.

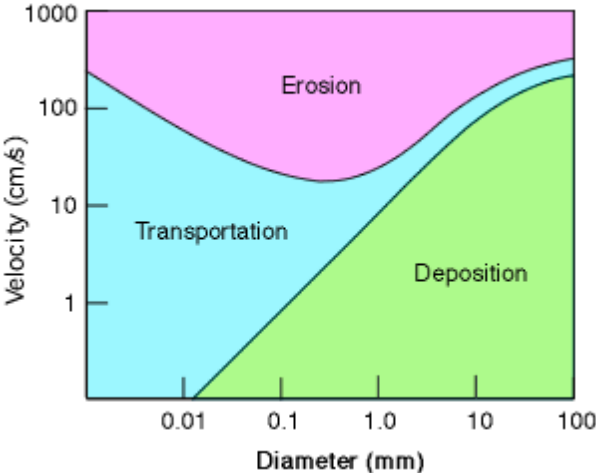


Fig. 1.15 diagramma di Hjulstrom

1.7 FENOMENI LOCALIZZATI

Oltre ai fenomeni erosivi distribuiti, caratterizzanti l'intera sezione d'alveo e determinati dall'azione di trascinamento della corrente nel suo insieme, sono di rilevante importanza, nei problemi idraulici, i fenomeni localizzati a zone ristrette dell'alveo, dovuti ad accelerazioni locali create a loro volta da singolarità geometriche (curve, opere idrauliche, ecc).

L'argomento non viene approfondito in questo lavoro; per una definizione quantitativa degli effetti erosivi è necessaria una trattazione specifica per ogni situazione di campo di moto.

Ad esempio, la presenza delle pile e spalle dei ponti all'interno della corrente è causa dell'insorgere di moti vorticosi, con conseguenti aumenti di velocità in prossimità del fondo. Quale effetto di tali accelerazioni locali si instaurano processi erosivi alla base delle strutture, che arrivano facilmente a profondità pari a due volte le dimensioni trasversali delle strutture medesime; vengono così scoperte le fondazioni, mettendo a rischio la stabilità dell'opera.

La lama d'acqua in caduta da una briglia crea un campo di moto fortemente turbolento alla base dell'opera, caratterizzato da notevole capacità erosiva. Anche in questo caso la buca di erosione che si può creare qualora il fondo non sia opportunamente protetto può compromettere le fondazioni e quindi la stabilità della struttura.

La corrente, veloce lungo lo scivolo, ritorna lenta attraverso un risalto. Tale fenomeno, fortemente dissipativo, è accompagnato da intensi scambi energetici (ovverosia moti vorticosi) che esercitano sul fondo azioni erosive anche di notevole entità

1.8 GLI APPORTI DI MATERIALE DAL BACINO

1.8.1 Apporti da erosione dei versanti

Esistono delle formule empiriche per valutare l'erosione e quindi la quantità di materiale che viene asportata da un bacino idrografico e che viene convogliata all'interno di un corso d'acqua. Come facilmente intuibile valutare analiticamente questo fenomeno è pressoché impossibile a causa del grandissimo numero di variabili da dover tenere in esame, così varia autori hanno proposto delle formule empiriche e di maggior applicabilità per risolvere il problema.

Uno degli elementi più importanti per valutare l'erosione di un bacino, e che è la principale causa di modificazione di questo fenomeno, è l'utilizzo del suolo. Il cambio d'uso del terreno comporta una modifica nella condizione erosiva del bacino [Zorn, Komac, 2007].

I due modelli più semplici e utilizzati sono quello di Gavrilovic e quello RUSLE, di seguito ne verrà fornita una rapida presentazione. I due modelli si assomigliano abbastanza sia per quanto riguarda la formulazione che per i risultati, anche se uno è di origine americana e l'altro russa [Mikos et al. 2006].

Se invece si pensa al materiale che può entrare in alveo da frana, non esiste altro metodo che lo studio del singolo movimento e la valutazione delle sue dimensioni e velocità.

1.8.2 Metodo di Gavrilovic (1962)

Il metodo di Gavrilovic permette di valutare il volume annuo di materiale eroso da un bacino idrografico. La sua formulazione originale è stata scritta nel 1962 ma in seguito è stata corretta dallo stesso autore e successivamente da Lazarevic sino al 1985.

Questo metodo si basa sulla valutazione di alcuni parametri di semplice estrazione e su formulazioni matematiche. Lo scopo principale era quello di valutare l'evoluzione dei terreni agricoli, l'equazione nacque a seguito dell'utilizzo di numerosi dati reali della Serbia.

$$\dot{V} = \pi h \sqrt{X^3 Y^3 S \left(\frac{\langle T \rangle}{10} + 10 \right) (\phi + \sqrt{I})^3} \quad (1.18)$$

In cui:

- h: precipitazione media [mm/y];

- X: coefficiente tabellato relativo alla protezione del suolo da parte della vegetazione;
- Y: coefficiente tabellato in funzione dell'erosibilità del suolo a causa della sua litologia;
- S: superficie del bacino [km²];
- <T>: è temperatura media annua [°C];
- Φ: coefficiente che esprime il tipo dei processi di erosione e la loro forza;
- i: pendenza media del bacino.

Tab. 1.2 coefficienti del modello di Gavrilovic

Soil protection coefficient	Xa
Mixed and dense forest	0.05–0.20
Thin forest with grove	0.05–0.20
Coniferous forest with little grove, scarce bushes, bushy prairie	0.20–0.40
Damaged forest and bushes, pasture	0.40–0.60
Damaged pasture and cultivated land	0.60–0.80
Areas without vegetal cover	0.80–1.00
Soil erodibility coefficient	Y
Hard rock, erosion resistant	0.1–0.3
Rock with moderate erosion resistance	0.3–0.5
Weak rock, schistose, stabilised	0.5–0.6
Sediments, moraines, clay and other rock with little resistance	0.6–0.8
Fine sediments and soils without erosion resistance	0.8–1.0
Erosion and stream network development coefficient	φ
Little erosion on watershed	0.1–0.2
Erosion in waterways on 20–50% of the catchment area	0.3–0.5
Erosion in rivers, gullies and alluvial deposits, karstic erosion	0.6–0.7
50–80% of catchment area affected by surface erosion and landslides	0.8–0.9
Whole watershed affected by erosion	1.0

Il coefficiente di erodibilità del suolo può anche essere espresso come l'inverso della resistenza del terreno alla caduta delle gocce di pioggia, usualmente viene dedotto da prove in laboratorio, o da tabelle presenti in letteratura.

Il coefficiente "X" è quello che include l'utilizzo del terreno e viene stimato a partire dalla cartografia e foto aeree, utilizzando successivamente le tabelle esistenti.

Questa formulazione offre buoni risultati se applicata a bacini idrografici o a sue porzioni idrologiche [Zorn, Komac, 2007].

1.8.3 Modello RUSLE (1978)

Revised Universal Soil Loss Equation, introdotto negli anni '50 dal Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti, si basa su un'equazione empirica, che valuta la perdita di suolo annuo di un terreno agricolo, avendo come ipotesi di base che tutto il materiale eroso venga poi trascinato via e si trascurino, quindi, quei possibili fenomeni di deposito. Il calcolo di tale volume di materiale, adottando il modello di USLE, presenta la seguente forma:

$$\dot{V} = R K L_S C P \quad (1.19)$$

Con:

- V: tasso di perdita di suolo medio stimato [t/ha anno];
- R: fattore erosività della pioggia [MJ mm/(ha h anno)];
- K: fattore erodibilità del suolo [t ha h/(ha MJ mm)];
- L_S : fattore topografico;
- C: copertura del suolo;
- P: fattore di influenza del controllo artificiale, considera le eventuali opere di protezione del territorio.

La formula per il calcolo della perdita di suolo media annua, che nel nostro caso può essere interpretata come la perdita di sedimenti media annua dai versanti del bacino, è basata su un semplice calcolo moltiplicativo tra quattro fattori adimensionali (L, S, C, P), che vanno a modificare una perdita di suolo di base. Tale perdita di base, denominata erosione potenziale, rappresenta sinteticamente l'aggressività dell'agente erosivo (R) e le caratteristiche del suolo erodibile (K), entrambi parametri dimensionali.

Il fattore di erosività di pioggia e deflusso, è unico per tutto il bacino; negli Stati Uniti sono state proposte varie formulazioni per il suo calcolo in funzione della precipitazione.

$$R = Ci^\alpha \quad (1.20)$$

Sia C che α sono due coefficienti numerici che variano in base alla formulazione utilizzata.

Il fattore "K" esprime l'attitudine del suolo ad essere eroso, ed è esprimibile attraverso una formula:

$$K = 0.0034 + 0.0405 \cdot e^{\left[\frac{-1}{2} \left(\frac{\log D_g + 1.659}{0.7101} \right)^2 \right]} \quad (1.21)$$

$$D_g = e^{(0.01 \sum f_i \ln m_i)} \quad (1.22)$$

Con:

- D_g : media geometrica dei diametri delle particelle del suolo [mm];
- f_i : valore % della frazione di particelle di suolo compresa nella i -esima classe;
- m_i : media aritmetica del diametro delle particelle comprese nell' i -esima classe.

Il fattore C , di copertura ed uso del suolo, prende in considerazione il tipo di vegetazione o coltura esistente e i tipi di interventi eseguiti. Indica la tendenza del suolo al ruscellamento; è collegato al tipo ad allo stato di sviluppo della vegetazione, alla biomassa del terreno, alle modalità di lavorazioni attuali ed agli effetti residui di precedenti lavorazioni. Matematicamente tale fattore C può essere valutato come segue:

$$C = \frac{\sum C_i R_i}{100R} \quad (1.23)$$

Dove:

- C_i : stadio di sviluppo della coltura delle varie fasi;
- R : fattore di erosività della pioggia;
- R_i : pioggia media relativa alle varie fasi.

L'intero ciclo delle varie tipologie di colture viene suddiviso in sei fasi, per facilitare e operazioni. Ad ogni fase corrisponde il relativo fattore C_i , ottenibile da tabelle che si trovano in letteratura in base alla tipologia di coltivazione. Bisogna considerare il fatto che durante le fasi del ciclo completo della coltura l'erosività della pioggia varia; tali valori C vengono quindi poi pesati rispetto al fattore di erosività della pioggia R .

Il modello RUSLE non è nient'altro che una revisione del più vecchio USLE risalente agli anni '30 ma pubblicato nel 1965.

Esiste un sito dell'Università Statale del Michigan per valutare l'erosione inserendo i dati online, ma è valido solo per gli USA e per terreni agricoli.

Questo metodo se utilizzato fuori da terreni agricoli richiede uno studio, di livello anche agrario per la valutazione dei comportamenti delle piante e la caratterizzazione delle stesse, quindi è piuttosto complesso da utilizzare se non con studi appositi.

Tab. 1.3 coefficiente C di uso del suolo

Classi di uso del suolo	Valori di C
Culture ortiche a ciclo primaverile-estivo	0,240
Aree urbane	0,030
Bacini d'acqua	0,000
Seminativi in aree prive non irrigue	0,240
Culture erbacee da pieno campo a ciclo primaverile-estivo	0,240
Vigneti irrigui	0,003
Vigneti non irrigui	0,003
Frutteti e frutti minori irrigui	0,003
Frutteti e frutti minori non irrigui	0,003
Oliveti irrigui	0,003
Oliveti non irrigui	0,003
Prati stabili non irrigui	0,050
Zone boschive	0,007
Sistemi colturali e particellari complessi	0,240
Culture temporali associate e colture permanenti	0,240
Aree agricole con presenza di spazi naturali	0,040
Prati stabili irrigui	0,050
Culture in serra e sotto plastica	0,240
Zone umide	0,003

1.8.4 Apporti di materiale da frana

Per quanto riguarda le frane di crollo o di scivolamento il fattore principale che può stabilizzare questi movimenti è una resistenza al piede, una esagerata erosione della sponda fluviale può essere una causa scatenante di questo tipo di smottamenti. Nel caso del crollo, addirittura un'area non soggetta a questo tipo di fenomeni, in quanto originariamente costituita da un versante integro, può, a causa dell'erosione, rilasciare blocchi di roccia a sbalzo che quindi possono dar vita a crolli.

Questa tendenza erosiva del reticolo idrografico si ripercuote sulla stabilità dei versanti; infatti sono molti i casi in cui corpi franosi quiescenti vengono rimobilizzati in seguito all'azione di scalzamento al piede operato dai corsi d'acqua. Piccoli crolli e ribaltamenti, spesso non cartografabili, sono molto frequenti lungo tutti i corsi d'acqua; infatti, la loro intensa azione erosiva causa lo scalzamento delle sponde, in terra o in roccia, con conseguente crollo e/o ribaltamento delle stesse. Anche depositi, che risultano coperti da

bosco e quindi non più attivi, possono essere coinvolti in alcune parti da rimobilizzazioni ad opera di movimenti franosi, innescati sia dallo scalzamento al piede esercitato dai corsi d'acqua sia da eventi meteorici intensi.



Fig.1.16 esempio di erosione al piede e di apporto di materiale in alveo

In questo lavoro non si vuole effettuare un presentazione delle differenti tipologie di frana, ma solo mettere in evidenza alcune peculiarità dell'interazione fra il fenomeno del trasporto solido e quelli che riguardano le dinamiche di versante.

Si può però affermare che sia in caso di scivolamento che in caso di crolli si renderà disponibile parecchio materiale per il trasporto ad opera del corso d'acqua.

L'erosione delle sponde e il conseguente franamento è influenzato da vari fattori, come la modifica delle pressioni dell'acqua all'interno del terreno legata all'innalzamento e abbassamento del fiume, e la presenza di vegetazione.

Gli effetti della vegetazione su un versante anche in prossimità dei corsi d'acqua sono molteplici e complessi, principalmente si possono dividere in meccanici e idraulici.

I fattori idrologici che influenzano la stabilità dei versanti possono essere così riassunti:

- intercettazione dell'acqua piovana da parte della apparato fogliare e conseguente riduzione dell'acqua disponibile all'infiltrazione;
- incremento della scabrezza della superficie dovuta alla presenza delle radici e dei gambi con conseguente incremento della portata infiltrante;
- emungimento d'acqua da parte delle radici e dispersione della stessa nell'atmosfera, con conseguente riduzione del contenuto d'acqua e dell'indice di saturazione;

- intercettazione dei raggi solari e parziale inibizione del processo di evapotraspirazione.

La presenza di apparati radicali nel terreno, come noto, modifica drasticamente il comportamento del materiale. A tutti gli effetti la singola radice si comporta come un'inclusione, le cui caratteristiche meccaniche influenzano il mezzo eterogeneo che ne risulta: la zolla.

Oltre agli effetti meccanici ed idraulici di cui ai punti precedenti, la presenza della vegetazione comporta anche una variazione della configurazione dei carichi agenti sul pendio.

Riferendoci qui unicamente ad alberi ad alto fusto, essa può infatti essere associata a due tipi differenti di carico distribuito:

- Uno permanente, associato al peso proprio dell'albero nel suo sviluppo in elevazione;
- Uno accidentale, dovuto all'intercettazione dei venti da parte della porzione in elevazione dell'albero, agente in modo prevalentemente in direzione tangenziale alla superficie del pendio.

1.8.5 Apporti da altre fonti

L'erosione delle sponde è una chiave dei processi morfologici fluviali, comportando conseguenze varie su aspetti geografici, sociali ed economici lungo il corso d'acqua. [Rinaldi e Darby, 2009].

La composizione del letto e delle sponde del corso d'acqua è fondamentale per la definizione delle quantità di materiale movimentabile, difatti come noto, tutte le formulazioni per la valutazione del trasporto solido considerano il diametro medio delle particelle. Questo comporta che molti fenomeni esterni possono modificare il trasporto solido di un fiume.

La presenza di Morene glaciali implica la disponibilità di grandi quantità di materiali di qualunque dimensione, questo comporta un aumento del detrito, ciò è osservabile anche empiricamente, infatti i corsi d'acqua nascenti da ghiacciai sono ricchi di solidi trasportati.

Allo stesso modo le Deformazioni Gravitative Profonde di Versante (DGPV) con i loro movimenti generano grosse quantità di detriti, questi in presenza di un corso d'acqua possono essere mobilizzati e trasportati a valle aumentando le quantità del trasporto solido.

Le DGPV implicano deformazioni plastiche, differenziali e spazialmente continue, con spostamenti estremamente lenti, anche dell'ordine di millimetri annui, lungo superfici di

discontinuità, variamente orientate e non necessariamente estese. Questo tipo di fenomeno si distingue soprattutto per fattori di scala, infatti il volume delle masse coinvolte è dell'ordine di centinaia di migliaia fino a parecchie decine di milioni di metri cubi, la profondità della deformazione arriva ad alcune decine o centinaia di metri, le estensioni in lunghezza e larghezza sono dell'ordine di chilometri. Le D.G.P.V. possono avere vistose ripercussioni sull'assetto morfologico dei versanti, infatti si riconoscono essenzialmente per gli effetti che producono in superficie: tipicamente nelle zone periferiche di versanti interessati da tali deformazioni si verifica l'insorgere di fenomeni franosi, generalmente crolli e scorrimenti, che danno origine a depositi detritici.

Gli affluenti al corso d'acqua principale possono contribuire con grandi quantità di detrito in ingresso, in base al percorso del fiume secondario e ai vari elementi presentati finora.

1.8.6 Applicazione del metodo di Gavrilovic per stimare l'importanza del contributo erosivo in fiumi montani e di pianura.

Il metodo di Gavrilovic risulta molto semplice da applicare ad un bacino imbrifero, i dati in ingresso risultano gli stessi che normalmente si raccolgono per considerazioni idrologiche oppure sono presenti in letteratura.

Il metodo di Gavrilovic, così come il RUSLE, richiederebbe uno studio abbastanza dettagliato sull'utilizzo del suolo nel territorio considerato. Per poter effettuare un'analisi simile si necessita di carte tematiche appositamente realizzate, dopo di che è necessario stimare le dimensioni delle aree occupate dai vari utilizzi e con queste stimare meglio l'erosione del bacino. Nel caso del torrente Anza la valutazione di utilizzo del suolo è piuttosto semplice in quanto nel tratto di bacino utilizzato ad esclusione di qualche centro abitato, il resto è bosco abbastanza fitto a causa dell'abbandono dei pascoli antichi.

Tab. 1.4 Dati del torrente Anza

h [mm/anno]	1400
T [°C]	4
S [km²]	157
i [-]	0.3

I dati sono ottenuti dal progetto Risk-Nat per quanto riguarda l'Anza, e gli annali ARPA per le precipitazioni e le temperature medie. Il progetto Risk-Nat contiene dei modelli digitali del terreno a cui sono state sovrapposte le immagini aeree, questo permette una visione tridimensionale e l'individuazione della maggior parte dei parametri geometrici inerenti un bacino.

La scelta dei parametri per il metodo di Gavrilovic, come già accennato, è la parte più complessa, di seguito sono riportati i coefficienti selezionati.

Tab. 1.5 Parametri utilizzati per il torrente Anza

X	0.05-0.2	0.1	Foresta densa
Y	0.6-0.8	0.6	Detriti morenici, argille, detriti, rocce resistenti
Φ	0.7	0.7	Erosione da ruscellamento, in alveo e superficiale

Nella terza colonna della tabella sono riportati i valori utilizzati per trovare la soluzione di “riferimento”.

Il torrente Anza scorre in una valle con una pendenza piuttosto elevata, stimata in circa il 30%, e su terreni modificati dai ghiacciai, e in cui i boschi sono cresciuti indistintamente dall’abbandono dei pascoli montani, conseguentemente a ciò i parametri scelti utilizzando la “Tabella 2.2” sembrano le più opportune.

Come si può notare osservando, sia i parametri scelti, che la “Tabella 1.5” i coefficienti non hanno sempre un valore netto ma rientrano in una classe, questo implica che vi sarebbe la necessità di calibrare il modello, per fare ciò però si necessita di dati reali a cui far riferimento.

Il modello RUSLE è stato calibrato per tutti gli Stati Uniti, purtroppo non esiste nulla di simile per l’Europa.

Tab. 1.6 Stima dell’erosione del bacino

Anza [m ³ /anno]
620

Si può osservare come i valori non siano molto dissimili nonostante le dimensioni dei bacini siano decisamente differenti e anche le pendenze. Questo si motiva con la scelta dei parametri legati al terreno e alla protezione dall’erodibilità. Da questo si può dedurre che i risultati dipendono molto dalla scelta dei parametri, conseguentemente è stata effettuata un’analisi di sensitività.

Analisi di Sensitività

Si è scelto di modificare i parametri della forma di Gavrilovic all'interno della scala proposta in "Tabella 1.4".

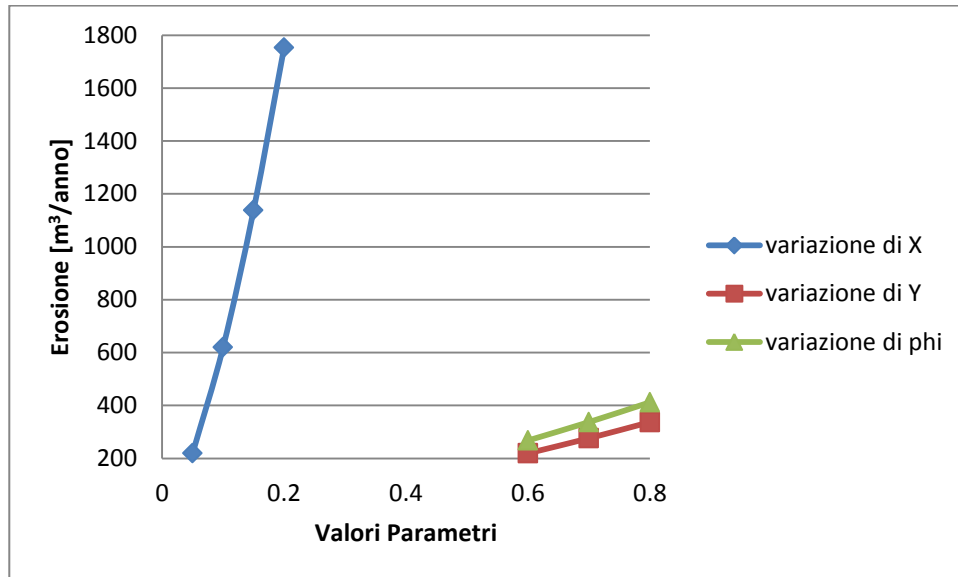


Grafico 1.1: analisi di sensitività per il torrente Anza

Dall'analisi di sensitività si nota una dipendenza molto forte della risposta dalla scelta dei tre parametri adimensionali di Gavrilovic. Nel torrente Anza si nota come Y e Φ siano legati e la risposta cresca in modo simile per i due parametri.

Dopo questi semplici calcoli è possibile affermare che il metodo Gavrilovic seppur molto semplice da usare non può fornire risposte adeguate, per l'erosione di bacino, senza una calibrazione dello stesso. Una formulazione come questa che non permette di individuare un risultato solido, ma che dipende da minime variazioni dei coefficienti non consente di trovare un valore di erosione ma solamente una classe di valori, anche questa piuttosto ampia. I valori variano da 217 a 1762 m³/annui per il torrente Anza.

CAPITOLO 2

INTERAZIONE VERSANTI ALVEO

2.1 DINAMICA DEI VERSANTI E DELL'ALVEO NEL TORRENTE ANZA

2.1.1 Località Prequartera

In questo capitolo si pone il problema di spiegare la dinamica dei versanti del torrente Anza, come esempio pratico di quale sia il problema su cui tutto questo lavoro è incentrato, infatti nel corso d'acqua esaminato è possibile riscontrare numerosi dei fenomeni che interessano questo elaborato, come frane in alveo, forti erosioni e bacini artificiali.

La zona di Campioli Prequartera risulta di particolare interesse dal punto di vista della dinamica dei versanti, in quanto su incarico del Comune di Ceppo Morelli (VB) sono stati messi in opera, secondo quanto indicato dalla Direzione Regionale dei Servizi Tecnici di Prevenzione della Regione Piemonte, un impianto di monitoraggio geo-meccanico ed una rete di monitoraggio microsismico per il controllo della frana di Campioli – Prequartera.

La frana è attualmente attiva e rappresenta un potenziale pericolo sia per il collegamento stradale (S.S. 495), che la lambisce in prossimità del piede e che è già stato peraltro pesantemente danneggiato ed interrotto in occasione degli eventi alluvionali della metà di Ottobre 2000, sia per gli abitati di Campioli e Prequartera che potrebbero essere coinvolti in varia misura da eventuali riattivazioni del fenomeno e, in particolare, dall'arrivo sia di blocchi sia di accumuli di detrito rilasciati da monte, come risulta dallo studio disposto dalla Regione Piemonte (Dicembre 2000).

Sulla base del rilevamento in sito e delle fotografie aeree, si possono distinguere nell'area di interesse una serie importante di dissesti dai quali può provenire materiale all'alveo del torrente. A Pestarena, l'intera parete in sinistra idrografica presenta problemi di stabilità, che si manifesta con evidenti discontinuità (fenditure) lungo i versanti, e abbondanti venute di materiale in alveo provenienti da un'estesa frana situata poco a monte dell'abitato. A valle, prima di entrare nella gola rettilinea, si vedono sia in sponda destra sia in sponda sinistra frane antiche (destra) e attuali (sinistra), quest'ultima impostata su canali. All'uscita della gola di Stabioli, si notano possibili dissesti in sponda sinistra, e la presenza in sponda destra di un possibile paleoalveo dell'Anza, molto rilevato sul fondo. Erosioni di sponda diffuse si trovano dall'uscita della gola rettilinea fino a Prequartera, dove in sponda sinistra si nota una lunga ed elevata parete di versante completamente in frana, con evidenti nicchie di distacco, e apporto rilevante di materiale in alveo. Complessivamente l'area appare interessata da una significativa dinamica erosiva e di trasporto, alla quale si aggiunge una continua modifica dell'alveo inseguito all'apporto di materiale di frana. Di conseguenza, è presente una notevole variabilità dell'assetto dell'alveo, che può portare a continue modifiche della forma delle scarpate.

2.1.2 Località Campioli

Il sito di Campioli è costituito da due settori (uno in destra ed uno in sinistra idrografica) aventi caratteristiche spiccatamente differenti. Nel seguito verranno trattati in maniera distinta.

In destra orografica del torrente Anza è presente un terrazzo (denominato ribasso Morghen) costituito prevalentemente da depositi antropici, classificati da ARPA come fanghi e accumuli.

La sponda destra è interessata da instabilità lungo l'orlo del terrazzo: sono infatti state rilevate piccole nicchie di frana e evidenze di erosione prodotte dai rivoli d'acqua che lo attraversano. Uno di questi rivi è alimentato da una sorgente che scaturisce dall'ingresso della miniera, per poi essere incanalata sotto il manto stradale e riaffiorare lungo il margine occidentale del terrazzo Morghen. Al di sopra dell'ingresso della miniera si rilevano dei detriti, anche molto grossolani, derivanti da fenomeni di crollo.

Da un confronto tra le Carte Tecniche Regionali (acquisite a partire dal 1991) e le ortofoto del 2007 si nota una sensibile variazione della morfologia della sponda destra del torrente Anza. Si segnala a tale proposito anche la modifica del perimetro dell'isolotto fluviale che ha subito evidenti fenomeni erosivi che gli hanno conferito una forma più arrotondata rispetto a quella rappresentata dalla Carta Tecnica Regionale.

Rilevare modificazioni della forma dei terreni permette di concludere che i suoli inquinati sono sottoposti a fenomeni naturali capaci di estendere la contaminazione delle aree poste a valle.

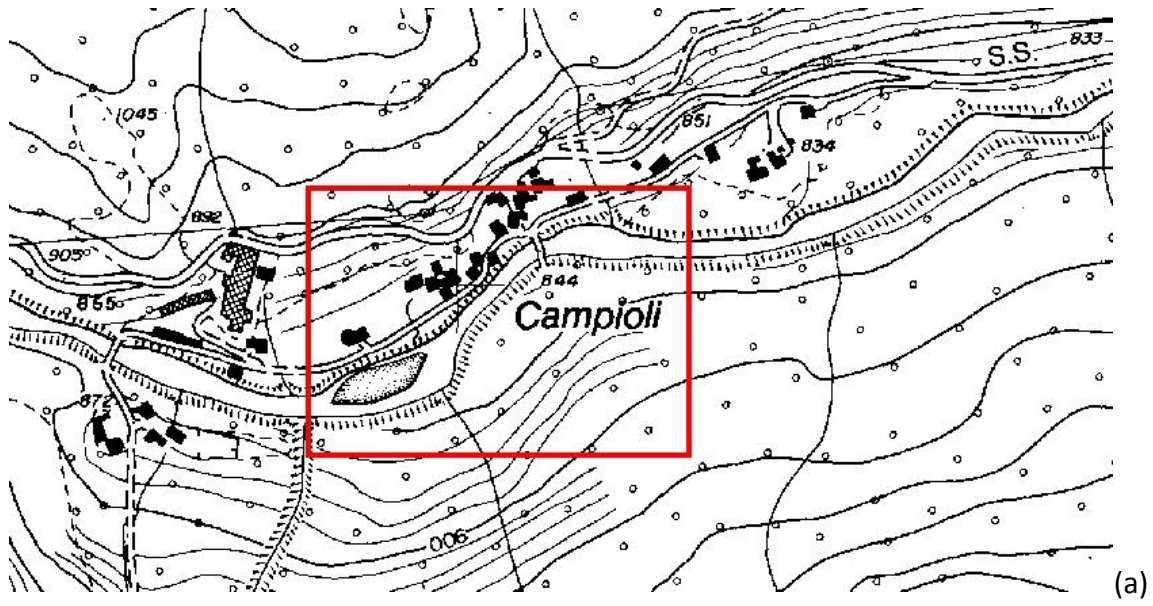


Fig.2.1: Confronto tra la CTR del 1991 (a) e l'ortofoto del 2007 (b) del sito di Campioli

2.1.3 Tendenza evolutiva del versante e necessità di interventi

L'esame compiuto permette di trarre indicazioni circa l'esistenza di aree dalle quali provengono contaminazioni. Si ricorda innanzi tutto che è segnalato dal Piano Regolatore del Comune di Macugnaga il fatto che le piene del torrente Anza possono incidere sulla stabilità delle sponde in tutto il tratto esaminato, in particolare sulla sponda destra, dove si trova il terrazzo in parte artificiale costruito anche con fanghi della lavorazione mineraria.

Questo tratto, posto di fronte all'abitato di Campioli, è soggetto a una limitata erosione di sponda, che produce modesti smottamenti e l'afflusso di sedimenti in alveo. Questo apporto è difficilmente valutabile dal punto di vista quantitativo, ma il fatto che lungo il terrazzo vi siano larghi tratti privi di vegetazione, e la sensibile riduzione del volume dell'isola fluviale, comprova che questa parte del torrente è in fase di sensibile evoluzione. Non si può quindi trascurare il fatto che il ripiano di sponda destra occupa una posizione molto esposta all'impatto delle piene, in quanto il flusso del torrente Anza esce dalla ristretta gola in roccia pochi metri a monte di questo settore, con velocità (e quindi capacità di scalzare il versante) molto pronunciata. Dal Piano Regolatore stesso del Comune si evince la segnalazione della necessità di opere di protezione delle sponde.

Al momento è prevedibile che il modesto dissesto idrogeologico rilevabile si possa ampliare, in particolare nel corso di piene importanti, con il rischio di un danno grave all'ambiente qualora venissero coinvolti nei fenomeni erosivi e di trasporto parte dei depositi che formano il terrazzo artificiale, in cui è segnalata la presenza di sostanze inquinanti.

In conclusione, appare necessario un razionale intervento di drenaggio delle possibili venute d'acqua dal torrente sovrastante il ribasso Morghen e l'esecuzione di opere di difesa spondali che prevengano l'aggravarsi dell'erosione alla sua base. Infine, va rilevato che la perdita di fanghi da un grande "sarcofago" registrata nel passato a Campioli, ha determinato un'estesa concentrazione di fanghi su terreni in sensibile pendenza, atta a permettere alle acque di dilavamento di asportare verso il torrente Anza materiale inquinato. Non appare fuori luogo sottolineare che la costruzione di un sistema di contenimento dei fanghi erosi dalle acque lungo il versante, ne consentirebbe la raccolta e il trasporto verso le discariche attrezzate.

2.1.4 Dinamica dei versanti e dell'alveo del sito di Pestarena

Rispetto al sito di Campioli, i terreni sono interessati da fenomeni erosivi meno evidenti. Tuttavia va sottolineato che i sarcofagi che hanno raccolto una parte dei fanghi, si collocano in una zona alluvionabile del torrente Anza. Possono così essere rimosse, anche senza l'asportazione dei sarcofagi da parte delle acque del torrente, consistenti quantità di fanghi immagazzinati. ARPA Piemonte logicamente ipotizza che parte del materiale immagazzinato nei contenitori sia stato rimosso dalla corrente del Torrente Anza in occasione di eventi di piena passati, e attualmente vi sono molti segni del fatto che l'azione di scalzamento della sponda del torrente, alla quale essi sono molto vicini, è arrivata a tal punto da lasciar credere imminente un collasso della sponda capace di coinvolgere queste ormai fatiscenti strutture. Fenomeni di erosione di sponda sono evidenti lungo la ripa sinistra poco a monte dell'abitato.

Risulta evidente che si tratta di un versante molto soggetto a variazioni, dovute all'instabilità delle ripe, e che questa è collegata con la complessa idrogeologia del bacino. La stabilità dei versanti si incrocia con i fenomeni di erosione dell'alveo, e le frane esistenti comportano la mobilitazione di detriti che entrano nel fenomeno del trasporto solido a opera del torrente posto alla base.

Di seguito saranno mostrati dei metodi utili per ricostruire le cause di questa problematica e prevederne gli sviluppi.

2.2 PREVEDIBILITÀ DELL'EVOLUZIONE MORFOLOGICA DELLE SPONDE E DELL'ALVEO: EFFETTI DELLE FLUTTUAZIONI IDROMETRICHE SULLA PIEZOMETRIA

Alcune frane in alveo possono essere legate a fenomeni di piping, per cui la variazione di livello del corso d'acqua nel tempo genera un flusso diretto dalla sponda fluviale verso il fiume che è in grado di trasportare con sé le più piccole particelle solide. Tale circolazione è in grado di creare delle vie preferenziali attraverso le quali può circolare l'acqua. Questo fenomeno col tempo può dar vita a delle frane che vanno a interessare l'alveo fluviale.

Il piping consiste nella rimozione, da parte del moto di filtrazione, delle particelle più piccole costituenti il corpo filtrante con la conseguente formazione di una zona a permeabilità maggiore che agisce da richiamo di acqua. Ne consegue quindi un aumento della velocità di filtrazione che diventa capace di erodere e trasportare via le particelle più grandi del mezzo creando veri e propri canali. Questo è un fenomeno particolarmente pericoloso e noto per tutte le opere in terra come argini e dighe in particolar modo quelle naturali.

Al fine di determinare l'eventuale pericolo di piping, normalmente si confrontano i gradienti idraulici all'interno del terreno con uno critico individuato da letteratura quale quello di Zaslavsky e Kassiff (1965).

$$J_{cr} = \frac{(G-1)(1-n) \cos \alpha}{a_1} \quad (2.1)$$

I dati necessari per il calcolo sono stati ricavati da Colombo, Cremonesi, Francani (2011), utilizzando come terreno di riferimento una sabbia, nel dettaglio: la gravità specifica dei granuli "G" adottata pari a 1.4, la porosità "n" a 0.28, il coefficiente correttivo "a₁" è consigliato con valore 2, mentre la pendenza della sponda "α" è definita dal dominio del problema. Il risultato è un gradiente critico pari a 0.102.

Per calcolare il gradiente della sponda naturale sono stati implementati dei modelli, tramite il software G-FLOW, che permette di modellare l'evoluzione del comportamento di un acquifero. Il fenomeno in considerazione è tanto più importante quanto il dominio è limitato orizzontalmente. Infatti, com'è possibile anche immaginare in natura, considerando torrenti montani, intorno all'alveo vi saranno vari strati di detrito fluviale, ma ad una distanza non particolarmente elevata sarà possibile individuare un substrato roccioso, in molti casi poco permeabile.

Per sviluppare i calcoli sul problema esposto precedentemente si è scelto di utilizzare un dominio con un'estensione totale di 48 m con al centro un corso d'acqua largo 4 m. il dominio è profondo 24 m. Sulla sponda destra del torrente è stata collocata una sponda sopraelevata di 6 m con un'inclinazione pari a 45°, al fine di tener conto delle elevate pendenze, inoltre si è deciso di rappresentare una stratificazione, conseguentemente a 16 m

di profondità ha inizio uno strato con permeabilità ridotta e pari a 10^{-4} m/s. Lo strato più superficiale invece è caratterizzato da valori più legati a sabbia e ghiaia, quindi con una permeabilità pari a 10^{-2} m/s. Il dominio è stato definito da delle condizioni al contorno di impermeabilità eccezion fatta per la sponda inclinata, la quale è caratterizzata da un dreno con carico nullo, come uno sbocco libero.

Questi calcoli oltre allo scopo di valutare la pericolosità del piping, fenomeno spesso sottovalutato, si pongono anche lo scopo di individuare un'eventuale soluzione, per esempio come l'introduzione di un dreno parallelo al corso d'acqua in base alla sua profondità di collocamento può o meno aiutare e mettere in sicurezza il versante. È necessario anche ricordare come molte frane di scivolamento siano direttamente collegate alla presenza d'acqua all'interno del versante, per cui la presenza di un dreno può permettere di aiutare anche questi casi, seppur sarebbe necessario un'analisi specifica per ogni smottamento.

Per poter avere dei risultati più plausibili, sono stati simulati differenti casi, nello specifico: si è modellato un innalzamento di 3 m del pelo libero del corso d'acqua, in breve tempo, per rappresentare le onde di piena tipiche dei torrenti alpini; una ricarica dovuta alla pioggia di 200 mm/giorno, che però non fa in tempo a influire sull'altezza del torrente; infine si è aggiunto una lente argillosa di circa un metro di spessore alla base della sponda sopraelevata, per mostrare l'importanza di uno studio geologico adeguato. Inoltre il dreno è stato simulato in sei differenti posizioni lungo l'asse verticale posto a 11 m dal fiume. Il dreno è stato modellato: in superficie, al centro della sponda, a livello del corso d'acqua, al centro del primo strato, sull'interfaccia fra i due materiali, sul fondo del dominio, conseguentemente all'interno del materiale meno permeabile.

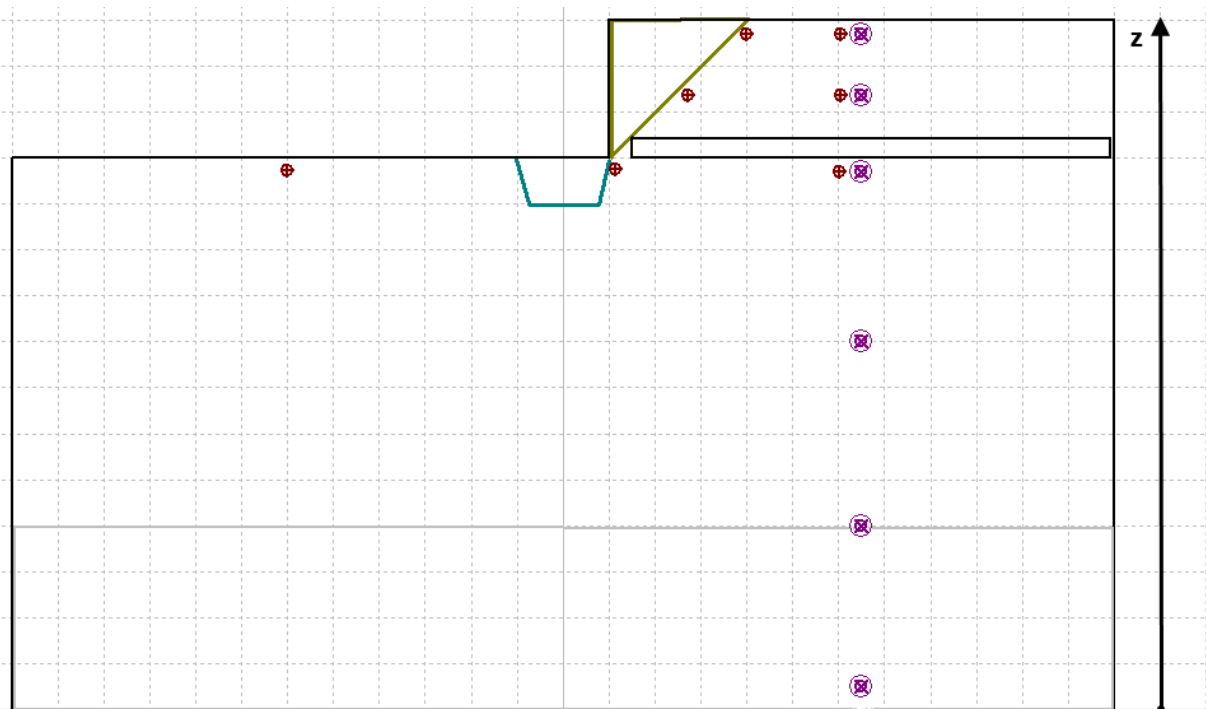


Fig. 2.2 dominio e differenti posizione dei pozzi (viola), dei punti di misura piezometrica (rosso) e rappresentazione della lente argillosa.

Si è dimostrato come in assenza di un dreno tutti i casi sopra esposti, presentino gradienti superiori a quello critico, causando il rischio di frana della sponda in alveo, questo comporterebbe l'aumento di trasporto solido con tutti i problemi esposti in precedenza. Tutti i modelli differenziano dagli altri per valori di portata uscente dal dreno, piuttosto che per i carichi idraulici, ma qualitativamente l'inserimento di un dreno anche di dimensioni modeste (1 m di diametro) risolve il problema del piping eccezion fatta che il collocamento del dreno nello strato più profondo, il quale avendo una permeabilità limitata non riesce a influenzare la superficie.

I risultati invece cambiano in maniera importante nel caso in cui si introduce una lente di argilla. In questo specifico caso, aumentano i punti in cui i gradienti superano quello critico, e l'introduzione di un dreno anche di diametro doppio al precedente, riesce a risolvere il problema solo se posto al centro del primo strato o sull'interfaccia fra i due materiali.

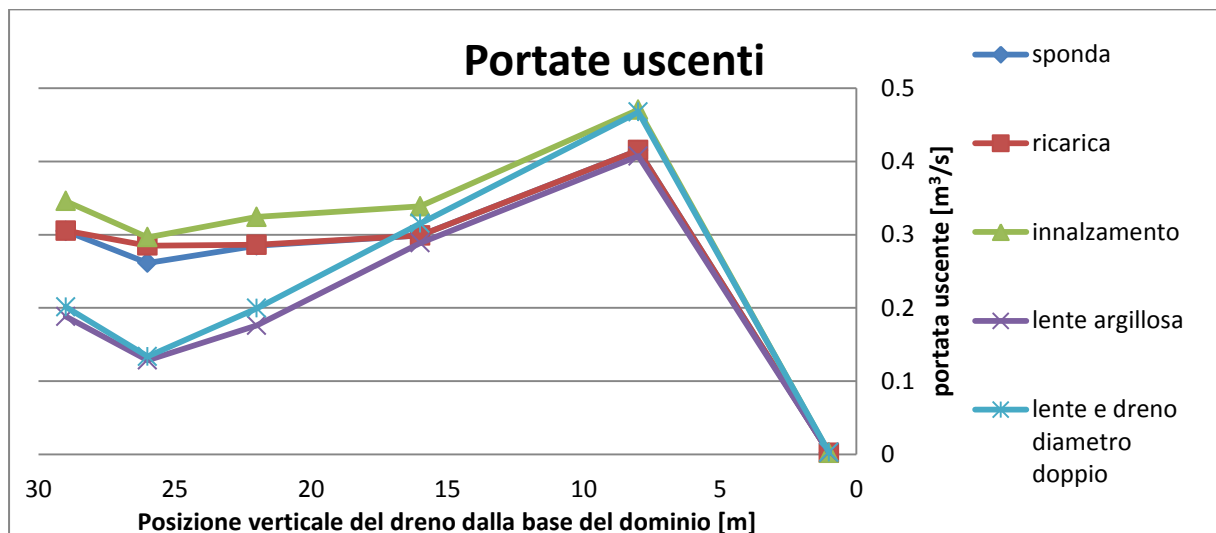


Grafico 2.1: Portate uscenti dal dreno in base alla sua posizione in verticale

Si può notare (Grafico 2.1) come le portate sono molto differenti, ma in alcuni casi risultano anche essere significative, conseguentemente sarebbe ipotizzabile realizzare una piccola vasca di raccolta e sfruttare l'acqua così immagazzinata per alimentare una mini centrale idroelettrica, dati i valori in esame non permetterebbe di ripagare l'investimento complessivo del dreno, ma quanto meno di ridurre i costi dell'opera col tempo, anche permettendo una manutenzione costante. Ovviamente è un'eventualità da analizzare nello specifico progetto, per valutare la fattibilità e l'economicità.

Di seguito saranno mostrati (Grafico 2.2) i grafici che mostrano come ogni singolo caso presenti valori di gradiente superiore al critico, si può anche notare come la ricarica di acqua sulla sponda legata alla pioggia, nonostante i valori abbastanza rilevanti, influenzi molto poco la simulazione, e nello specifico facendo variare quasi esclusivamente la portata

uscite dal dreno. Al contrario l'innalzamento del corso d'acqua fa variare i valori numerici di tutti i risultati, anche se qualitativamente non vi sono modifiche apprezzabili, come prevedibile è il caso in cui il dreno lavora maggiormente, con una maggiore portata uscente dal terreno.

L'inserimento di una lente argillosa, comporta importanti modifiche alla circolazione idrica nel sottosuolo, in particolare il fluido cercherà di aggirare la lente anziché attraversarla allungando così il suo percorso.

Inoltre si può osservare dai grafici, come la presenza di una lente argillosa, comporti un peggioramento dei gradienti, in quanto tutto il sistema risente meno delle variazioni.

Per convenzione il gradiente pericoloso (cioè diretto verso la sponda) assume segno negativo, per cui tutti i valori che possono dar vita a piping sono quelli inferiori al gradiente critico.

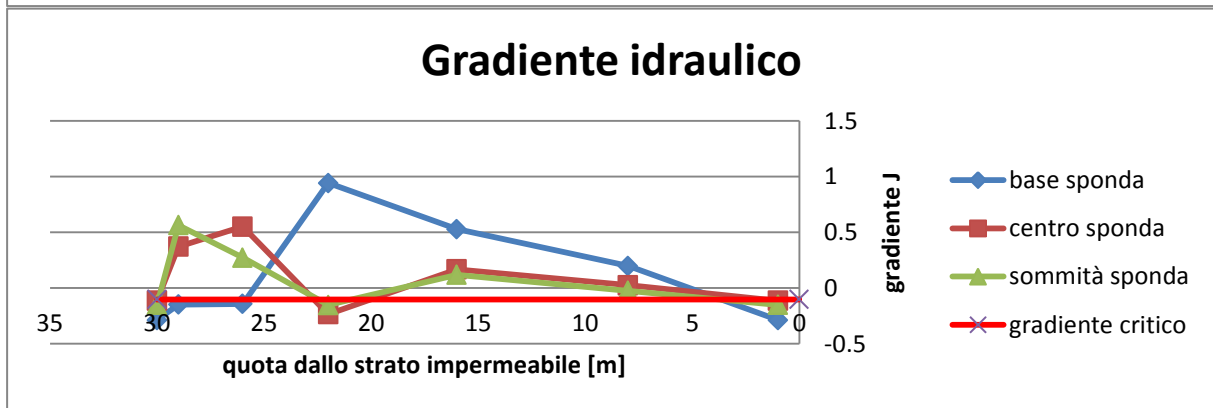
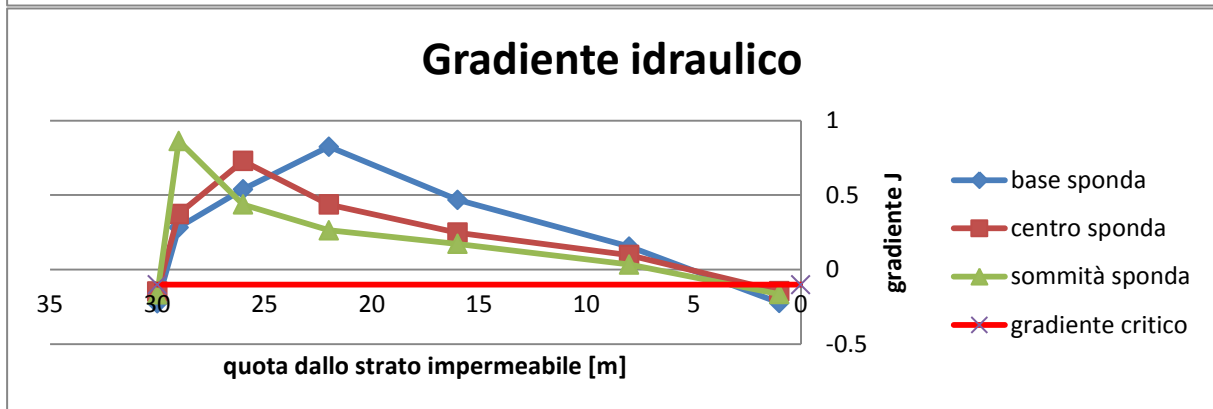
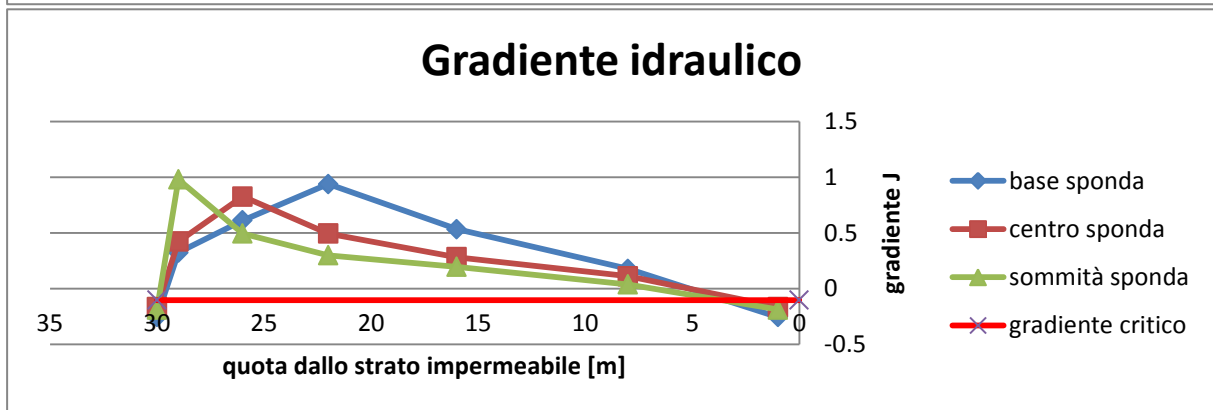
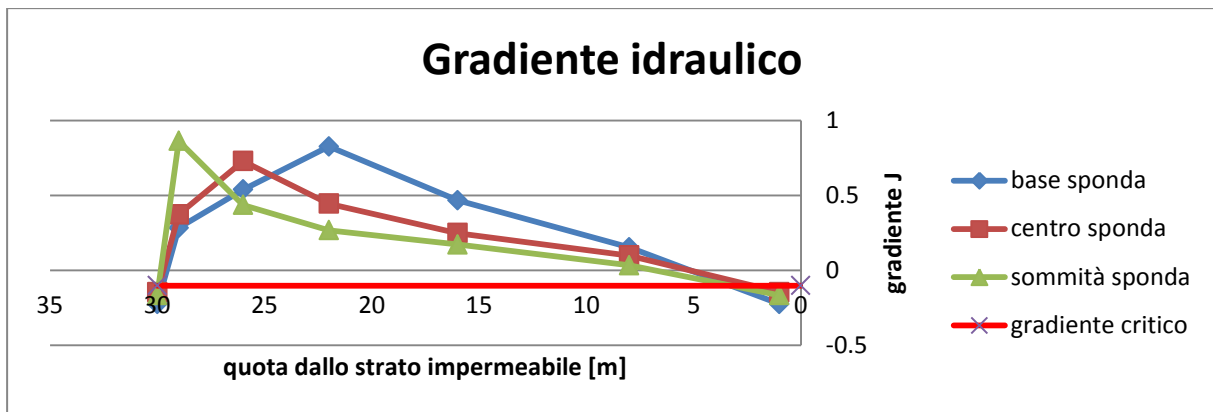


Grafico 2.2: Gradienti calcolati in diverse posizioni in base alla profondità del dreno sulla verticale. Nell'ordine dall'alto verso il basso: caso base, ricarica con pioggia sulla sommità della sponda, innalzamento del corso d'acqua, lente argillosa e diametro del dreno pari a 2m.

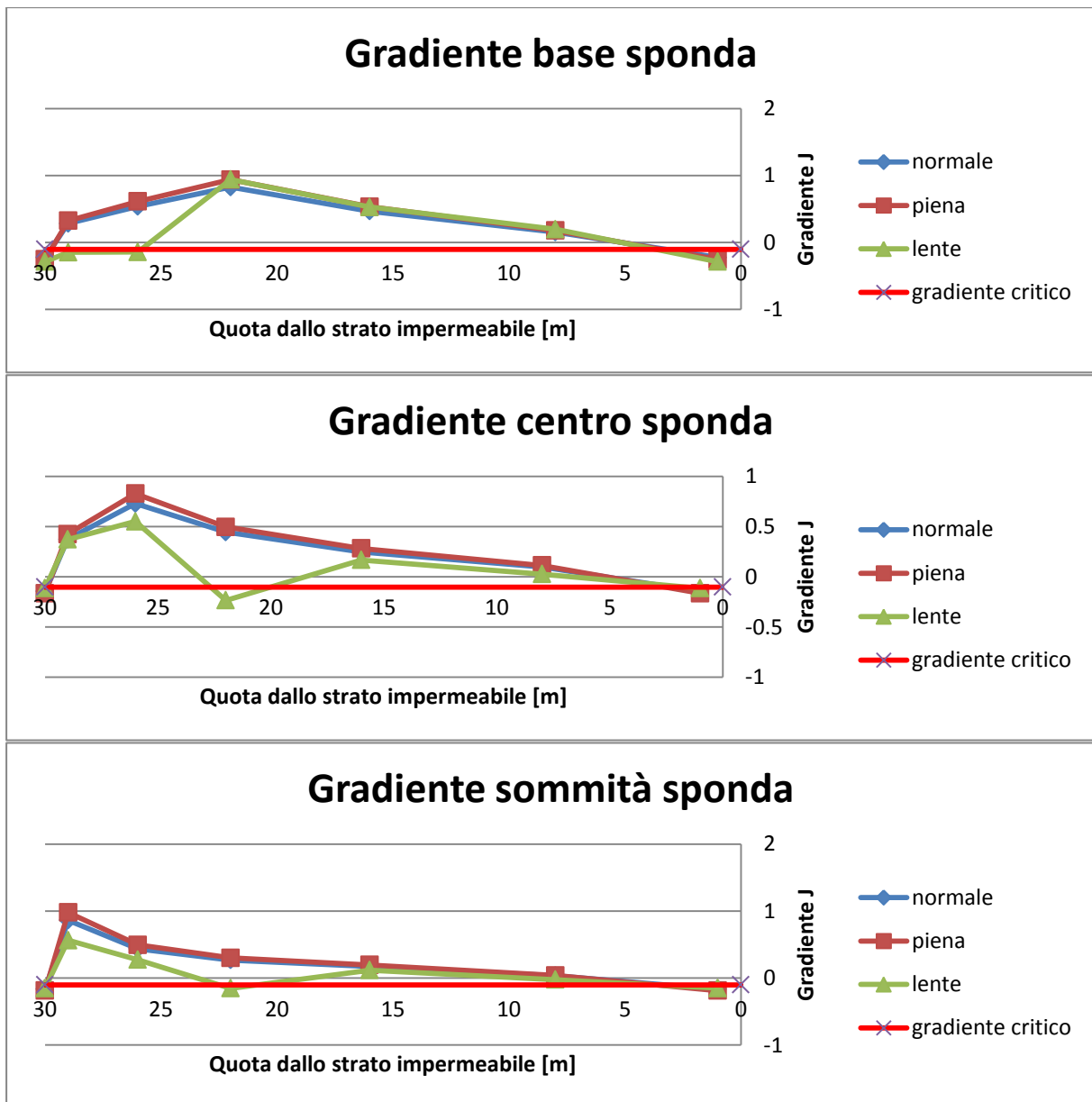


Grafico 2.3: Gradienti calcolati in diverse posizioni in base al tipo di modello utilizzato. Sono stati trascurati, al fine di migliorare la leggibilità, i casi di ricarica da pioggia e dreno di diametro 2m con lente argillosa per la loro elevata similitudine con gli altri casi.

Dal “Grafico 2.3” si può notare come per ottenere gradiente entro i limiti nel caso di lente argillosa sia necessario inserire il dreno in profondità all’interno dello strato, questo implicherebbe costi molto più elevati di realizzazione dell’opera rispetto ad un dreno superficiale. Inoltre anche piccole modifiche delle dimensioni della lente possono comportare importanti differenze nei risultati, difatti simulando il medesimo caso presentato, ma con una lente di 4 m più piccola in estensione, si ottengono gradienti minori e più facilmente risolvibili. Come è possibile osservare nel “Grafico 2.1” il dreno superficiale rimane inefficiente, ma è sufficiente collocarlo alla profondità di tre metri anziché di quattordici, fattore molto rilevante per tenere in considerazione i costi dell’opera.

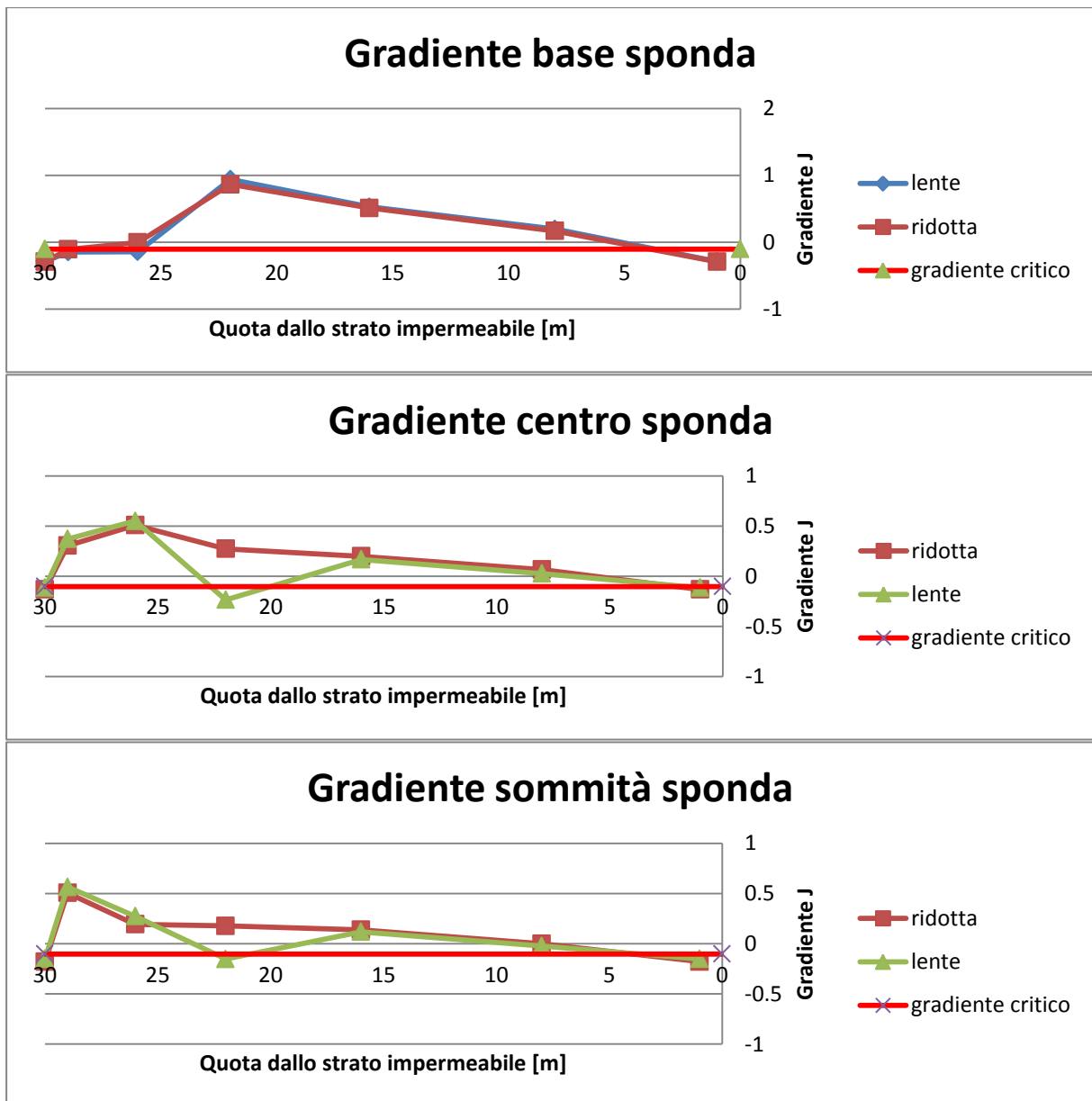


Fig. 2.4 Gradienti calcolati in diverse posizioni confrontando direttamente le differenze fra lente estesa e ridotta

Da quanto scritto finora si può evincere l'importanza di un adeguato studio geologico delle sponde fluviali anche per poter influire sul fenomeno del trasporto solido tradizionalmente trattato come semplice problema idraulico, difatti si è mostrato come l'applicazione di un dreno superficiale o quanto meno poco profondo possa risolvere problemi di piping alla base del franamento di numerosi versanti, senza necessità di opere idrauliche molto impegnative come vasche di accumulo o serie di briglie. Contemporaneamente si è potuto osservare come queste opere possano diventare inutili a causa di una scarsa conoscenza geologica del suolo in esame.

Una precisazione d'obbligo da fare è quella per cui un dreno superficiale e posto parallelamente al corso d'acqua può risultare difficile da realizzare se non addirittura pericoloso a causa dell'orografia del terreno, infatti bisogna fare attenzione affinché

eventuali avvallamenti non si trasformino in bacini di accumulo d'acqua, in particolar modo se questi corrispondono a valli laterali di frana.

Nel caso questi problemi siano scongiurati, la realizzazione di un dreno superficiale come una trincea, può aiutare la stabilizzazione delle sponde fluviali, diminuendo in maniera significativa la quantità di materiale disponibile per il trasporto solido, impedendo contemporaneamente la formazione di dighe naturali causate dal franamento dei versanti, conseguentemente aumentando la sicurezza anche a valle. Tutto questo con un'opera relativamente semplice e non particolarmente dispendiosa, inoltre è possibile, nei casi in cui la portata sia almeno intorno ai 1000 m³/giorno, realizzare un micro impianto idroelettrico, che permetterebbe di ammortare ulteriormente i costi dell'opera o quanto meno della sua manutenzione.

I costi di realizzazione di un impianto micro-idroelettrico variano a seconda di diversi parametri:

- Tecnologia utilizzata
- Condizioni ambientali
- Necessità o meno di realizzare uno sbarramento
- Entità delle piene
- Iter burocratico

Non è dunque mai possibile definire un costo al kilowattora dell'impianto, anche perché spesso è necessario redigere un progetto per eseguire un'analisi costi-benefici delle diverse soluzioni possibili. In ogni caso è però possibile affermare come anche per impianti molto piccoli l'investimento risulta essere vantaggioso, e questo depone a favore della realizzazione di opere di questo tipo.

2.3 METODOLOGIA PER L'INDIVIDUAZIONE DELLA FREQUENZA DI ACCADIMENTO DI EVENTI PERICOLOSI IN ALVEO

La causa che genera molto spesso l'instabilità delle sponde fluviali è la sovrapposizione degli effetti di una fase di piena del fiume e delle precipitazioni che avvengono sul bacino.

In questo capitolo si intende mostrare quindi come le precipitazioni e le variazioni idrometriche abbiano effetti sulla quota piezometrica in talune circostanze, e come questa possa rivelarsi problematica per la stabilità delle sponde fluviali, influenzando successivamente le quantità di materiale solido disponibili nell'alveo. Si vuole individuare quindi una metodologia per poter prevedere una frequenza di accadimento della sovrapposizione degli effetti in alcune sezioni critiche del corso d'acqua.

Si vuole osservare quando le due componenti, precipitazione sul bacino e onda di piena del fiume, possono sommarsi, dando un livello piezometrico critico che può generare fenomeni di piping (formando gradienti negativi lungo le ripe) in grado di apportare quantità di materiali significative nell'alveo.

La procedura ha però delle limitazioni soprattutto perché è stata applicata ad un bacino contenuto in cui si è dovuto tener conto della limitatezza dell'estensione dell'acquifero, in cui il substrato roccioso si può individuare a distanze limitate. Sono stati utilizzati alcuni modelli presenti in letteratura e modificati nei paragrafi successivi per poter raggiungere lo scopo finale. In particolare la metodologia si sviluppa mediante i seguenti passaggi:

- 1) calcolo della variazione del carico della falda in funzione dell'onda di piena;
- 2) calcolo della variazione del carico della falda in funzione della precipitazione;
- 3) somma delle due variazioni e individuazione delle funzioni interpolanti;
- 4) analisi dei due segnali mediante trasformata di Fourier nel dominio del tempo e delle frequenze;
- 5) analisi della funzione di trasferimento;
- 6) indicazione di una possibile frequenza di accadimento dell'evento peggiore.

Nei paragrafi successivi saranno mostrati i vari passaggi e come questi risultati possano rendersi utili.

2.3.1 Modelli Teorici e loro modifiche: il modello di Carslaw and Jaeger e il modello di Yao-Ming Huang e Shiun Wan

Carslaw e Jaeger modificata

Al fine di valutare la variazione del piano di falda con l'altezza idrometrica del corso d'acqua si è utilizzata una formulazione derivante dagli studi di Pinder per acquiferi confinati.

Il modello di partenza per Pinder è quello che verrà poi ripreso da Richards e Reynolds nel 1984 che prevede un acquifero con un dominio semi-infinito, limitato da un lato da un fiume completamente penetrante (Figura 4.1). La superficie piezometrica della falda varia solo a causa della variazione del livello idrometrico. La pioggia viene considerata solo nella piena fluviale e non come ulteriore acqua penetrante il terreno.

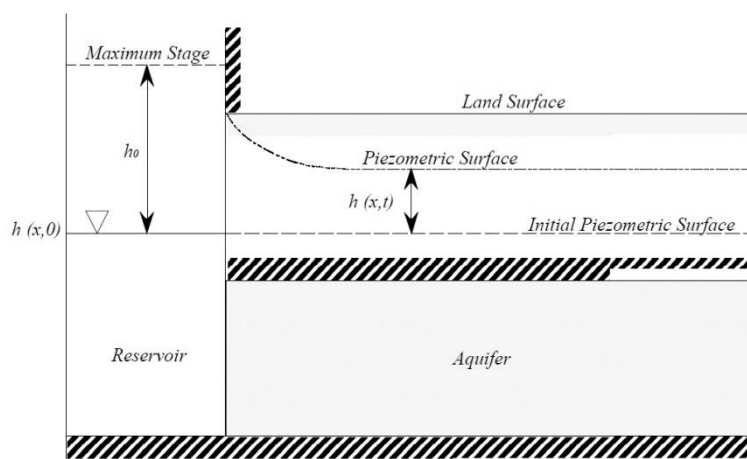


Fig. 2.3 modello analizzato da Pinder

Il modello monodimensionale è descritto dall'equazione non lineare

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{T}{S} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \quad (2.2)$$

dove h [m] è la fluttuazione del carico piezometrico nell'acquifero, x [m] è la distanza dal corpo idrico, t [s] è il tempo, S il coefficiente di immagazzinamento [/], T [m²/s] è la trasmissività e T/S la diffusività.

L'approccio discreto del modello di Pinder permette l'utilizzo di idrogrammi di piena del corpo idrico di qualunque tipo (anche con curve sinusoidali o asimmetriche).

Perché l'acquifero semi-infinito di Pinder sia risolvibile, sono necessarie delle condizioni iniziali ed al contorno.

$$h(0, t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ \Delta H_m & t > 0 \end{cases} \quad h(\infty, t) = 0 \quad h(x, 0) = 0$$

ΔH_m [m] rappresenta l'innalzamento istantaneo del corso d'acqua al tempo $t = m\Delta t$ con m numero intero. L'equazione di Pinder che risolve il problema è:

$$\Delta h_m = \Delta H_m \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{\frac{T}{S}t}} \right) \quad (2.3)$$

La funzione complementare di errore "erfc" è definita come $\operatorname{erfc}(x) = \int_x^\infty e^{-t^2} dt$ (2.4)

Per valutare il cambiamento del carico idraulico dell'acquifero " h_p " alla fine di ciascun passo bisogna considerare il numero totale di intervalli di tempo " p ".

$$h_p = \sum_{m=1}^p \Delta H_m \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{u}{2\sqrt{p-m}} \right) \right] \quad (2.5)$$

con u definito come $u = \frac{x}{\sqrt{\frac{T}{S}\Delta t}}$ (2.6)

Purtroppo il modelli di Pinder non prevede una barriera impermeabile se non alla base dell'acquifero, ipotesi non verificabile nella quasi totalità degli ambienti montani.

Il modello proposto da Carslaw e Jaeger nel 1959 pareva in grado di superare il problema dell'acquifero semi-infinito. È una formula, però, valida solo per intervalli di tempo limitati, al più di qualche ora. La formula è abbastanza complessa e può essere sostituita con degli abachi (De Marsily).

La formula è la seguente: (2.7)

$$h_{i+1} = h_i \left\{ 1 - \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{2nl + x}{2} \sqrt{\frac{S}{Tt}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{(2nl + 1)l - x}{2} \sqrt{\frac{S}{Tt}} \right) \right] \right\}$$

Con n numero di intervalli temporali, l [m] spessore dell'acquifero confinato, x [m] distanza fra il corso d'acqua e il piezometro.

Uno studio del Politecnico di Milano del 2011, ha dimostrato che affinché sia rispettata la condizione fisica per cui l'acquifero può avere un livello minore o al massimo uguale al corso d'acqua, la formula può essere leggermente variata come segue, affinché la si possa usare per intervalli di tempo maggiori.

$$h_{i+1} = h_i \left\{ 1 - \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left[-\operatorname{erfc} \left(\frac{2nl + x}{2} \sqrt{\frac{S}{Tt}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{(2nl + 1)l - x}{2} \sqrt{\frac{S}{Tt}} \right) \right] \right\}$$

(2.8)

La relazione di Carlslaw e Jaeger, presenta comunque delle limitazioni operative, difatti posizionando la barriera impermeabile troppo lontana dal fiume le soluzioni divergono e la rendono inefficace. Per il caso preso in esame le soluzioni iniziano a perdere significato per distanze della barriera impermeabile maggiori ai 15m.

Yao-Ming Huang e Shiun Wan

Yao-Ming Huang e Shiun Wan nel 2010 hanno pubblicato un articolo sul ruolo delle precipitazioni nella fluttuazione del livello di falda di un acquifero e il conseguente ruolo nell'innesco di movimenti franosi.

Si tratta di un metodo che prende in esame svariati parametri del terreno d'interesse, alcuni dei quali ricavabili solo empiricamente.

La teoria si basa su semplici equazioni di bilancio di flussi d'acqua nel terreno, includendo la pioggia infiltrata e il moto della falda. L'infiltrazione si basa su un modello a serbatoi lineari, in cui cioè la risposta del terreno è pari a quella di una serie di serbatoi in cui esiste un legame lineare fra il volume d'acqua invasata e la portata uscente.

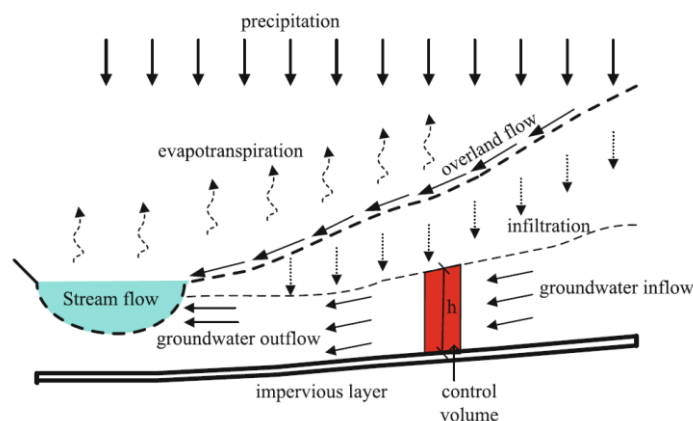


Fig. 2.4 modello analizzato da Huang e Wan

Lo sviluppo del modello parte da un'equazione di continuità idrologica $\frac{dS}{dt} = I - O$ (2.9) con "I" tasso di ingresso e "O" tasso di uscita dell'acqua dal volume di controllo "S".

Il tasso in ingresso è composto dall'acqua infiltratasi dal terreno e da quella proveniente dal terreno tramite moti di falda.

Con una funzione lineare per calcolare la variazione del tasso di ricarica dovuto alla pioggia si ottiene una funzione del tempo, che dipende solamente da parametri del modello che si vuole utilizzare.

$$H(t) = \frac{1}{\beta(n-1)!} \left(\frac{t}{\beta}\right)^{n-1} e^{-\frac{t}{\beta}} \quad (2.10)$$

Fisicamente $H(t)$ corrisponde ad un impulso unitario di infiltrazione di ricarica.

La formula è composta da n che corrisponde al numero di serbatoi lineari che si prende in considerazione e β che controlla la distribuzione di probabilità del tasso di infiltrazione. Per le finalità dello studio, i due ricercatori, consigliano che qualora si usassero dati di pioggia di tipo temporalesco, i valori di n e β siano:

$$2 \leq n \leq 5$$

$$1 \leq \beta \leq 4$$

Coerentemente $H(t)$ è una funzione che interseca una retta ed un esponenziale decrescente, conseguentemente assume una forma a “campana”.

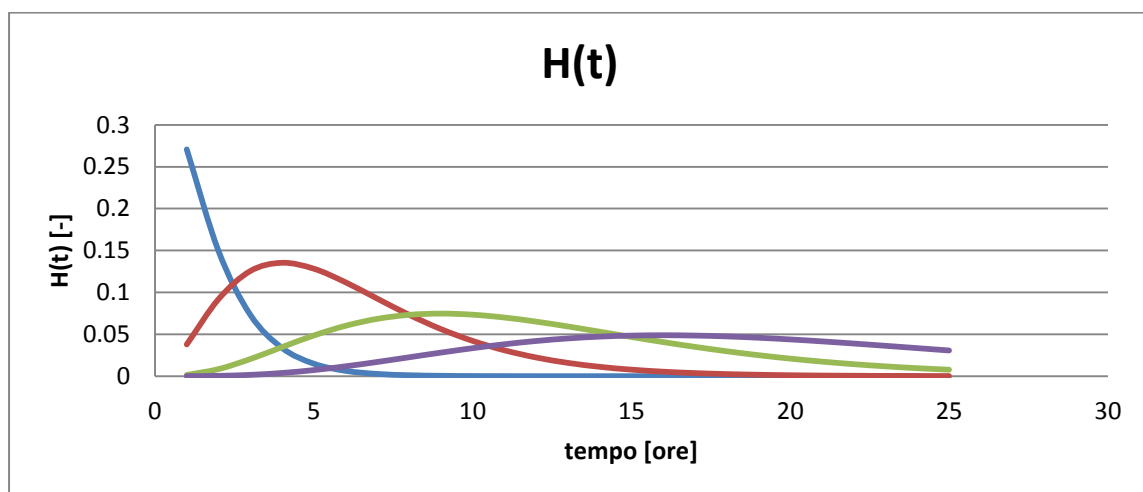


Grafico 2.5: rappresenta quattro possibili funzioni $H(t)$ ottenute variando n e β .

Risolvendo il problema attraverso un metodo numerico, otteniamo un metodo di calcolo basato su quattro coefficienti che combinati calcolano l'altezza dell'acquifero.

$$h_{i+1} = h_i + \frac{\Delta t}{6} (C_1 + 2 \cdot C_2 + 2 \cdot C_3 + C_4) \quad (2.11)$$

Questo metodo però si basa su di un numero considerevole di parametri:

- “N” numero totale di osservazioni;
- “n” numero di serbatoi lineari, gli autori consigliano $2 \leq n \leq 5$;
- “ β ” controlla la distribuzione del tempo del tasso d'infiltrazione, per regimi temporaleschi consigliato $1 \leq \beta \leq 4$;

- “ α ” tasso d’infiltrazione della precipitazione, in base ad altri studi $0,5 \leq \alpha \leq 1$;
- “ p ” porosità efficace, in seguito a svariati studi e per eseguire i calcoli a favore di sicurezza gli autori consigliano $0,05 \leq p \leq 0,5$;
- “ I ” raise number, $I = \frac{\alpha}{p} \cdot (A + 1)$, $1 \leq A \leq 5$. Alcuni studi valutano $\frac{\alpha}{p}$ pari a 8 tramite regressioni non lineari, mentre A indica il rapporto fra l’acqua infiltratasi sulla verticale e quella in apporto da altre sezioni. In ogni caso $2 \leq I \leq 48$;
- “ K ” coefficiente di deflusso, determinato in base al terreno di interesse ed all’intervallo temporale considerato, in questo studio considerato $0,02225 \leq K \leq 0,0005$.
- “ P_m ” pioggia caduta nell’intervallo di tempo m ;

Combinando i parametri sopra segnati si ottengono le formulazioni per i quattro coefficienti utili per il calcolo dell’altezza dell’acquifero.

$$C_1 = Kh_i + \sum_{m=1}^N P_m H[(N - m + 1)\Delta t] \quad (2.12)$$

$$C_2 = K \left(h_i + \frac{\Delta t}{2} C_1 \right) + \frac{1}{2} \left(I \sum_{m=1}^N P_m H[(N - m + 1)\Delta t] + \sum_{m=2}^{N+1} P_m H[(N - m + 1)\Delta t] \right)$$

$$C_3 = K \left(h_i + \frac{\Delta t}{2} C_2 \right) + \frac{1}{2} \left(I \sum_{m=1}^N P_m H[(N - m + 1)\Delta t] + \sum_{m=2}^{N+1} P_m H[(N - m + 1)\Delta t] \right)$$

$$C_4 = K(h_i + \Delta t C_3) + I \sum_{m=2}^{N+1} P_m H[(N - m + 1)\Delta t] \quad (2.13);(2.14);(2.15)$$

Questo modello, per essere utilizzato, necessita di essere implementato in software come Matlab.

Appare quindi evidente che il dissesto può essere prodotto dal superamento di valori critici della cadente piezometrica. Si è voluto analizzare la periodicità con la quale si possono verificare situazioni di particolare criticità nell’assetto della piezometria, tali da determinare un’accentuazione dell’erosione sotterranea. L’analisi è stata compiuta con l’applicazione della teoria dei segnali.

L'applicazione della teoria dei segnali per individuare la frequenza di accadimento

Un segnale è un'indicazione per indicare un ordine, un'informazione, una disposizione e per tale motivo si può considerare qualsiasi vettore di dati un segnale.

Una serie storica non è altro che un vettore di dati indicizzati nel tempo, e la comodità di considerarli un segnale sta principalmente nello studio che se ne può ottenere; infatti la descrizione dei dati risulta molto intuitiva ed è abbastanza semplice suddividere il fenomeno nelle sue componenti deterministiche e individuare l'eventuale presenza di valori anomali.

Si ritiene che le misure siano generate da un processo continuo, ma le osservazioni a istanti discreti producono una serie campionata. Per quanto riguarda il campo ambientale le serie di dati che si possono ritrovare sono piuttosto numerose e spaziano dalle portate fluviali, ai livelli di inquinamento atmosferico, alle misure geodetiche

Le serie di dati utilizzate in questo lavoro vengono considerate senza la presenza di valori anomali.

Un segnale può essere principalmente suddiviso in due componenti una deterministica e una aleatoria sulla quale non vi può essere alcun controllo. La componente deterministica a sua volta si suddivide in:

- Trend (o componente tendenziale) è la tendenza di fondo del fenomeno considerato, che si manifesta come variazione a bassissima frequenza, rappresentabile mediante una funzione polinomiale di grado basso (spesso lineare);
- Ciclo (o componente congiunturale) è l'alternanza di fluttuazioni, rappresentabile come serie di armoniche sinusoidali di frequenze multiple;
- Stagionalità (o componente stagionale) rientra nella ciclicità precedente ma può essere riferita al ciclo annuale, essendo costituita da variazioni che si riscontrano con analoga intensità negli stessi periodi di anno in anno.

Secondo Fourier ogni segnale può essere rappresentato da una serie pesata di funzioni sinusoidali.

Il considerare dei dati come un segnale permette di applicare tutta quella teoria che considera le caratteristiche del segnale stesso e in particolar modo la frequenza, la quale permette di rappresentare l'andamento temporale.

La frequenza, nella presente tesi, verrà utilizzata per individuare la periodicità della sovrapposizione degli effetti, considerando quindi quella in cui si ha il massimo che molto probabilmente può generare il caso peggiore per l'instabilità della sponda soggetta a piping. Per poter raggiungere questo scopo è necessario conoscere almeno la trasformata di Fourier e la funzione di trasferimento.

La trasformata di Fourier permette il passaggio dal dominio del tempo a quello delle frequenze per il segnale considerato. Si esprime in formole, per un generico segnale $x(t)$ come:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \exp(-2\pi ift) dt \quad (2.16)$$

Il passaggio nel dominio delle frequenze permette anche l'identificazione delle periodicità principali del segnale e di effettuare confronti per valutare i tempi di ripetizione.

Un altro importante elemento che verrà usato è la funzione di trasferimento definita come il rapporto della trasformata del segnale di uscita con quella di ingresso.

Se definiamo $X(s)$ trasformata del segnale in ingresso e $Y(s)$ trasformata del segnale in uscita, allora $H(s)$ è la funzione di trasferimento.

$$Y(s) = H(s)X(s) \Rightarrow H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (2.17)$$

2.3.2 L'applicazione della teoria dei segnali al Torrente Anza.

Si è deciso di applicare le formulazioni presentate nei paragrafi precedenti al caso del torrente Anza in particolar modo alla sezione fluviale a monte del bacino artificiale di Ceppo Morelli. Lo scopo ultimo è valutare se, come e con quali tempistiche, le precipitazioni modificano le altezze piezometriche e conseguentemente i gradienti idraulici, arrivando a poter creare situazioni di pericolo.

Sul sito di ARPA Piemonte è stato possibile ottenere serie storiche di precipitazioni e di portate dell'Anza, le prime sono misurate direttamente a Ceppo Morelli, mentre le seconde sono rilevate a Macugnaga. Per potere mettere in collegamento le due misure è stato necessario trasformare le Portate, ipotizzando una similitudine nelle caratteristiche del bacino, assolutamente ragionevole per le distanze in esame. Conseguentemente è stata applicata la traslazione di portata tramite la formulazione seguente:

$$q_2 = q_1 \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^m \quad (2.18)$$

Dove "A" rappresenta l'area dei rispettivi bacini, mentre "m" l'invarianza di scala a livello regionale, i cui valori risultano tabellati in letteratura e pari a 0.901 per le Alpi e Prealpi occidentali. È necessario precisare che questa formula si basa sull'ipotesi che le piogge siano distribuite spazialmente in modo omogeneo sul bacino; nel caso specifico gran parte della portata è legata alla fusione del ghiacciaio del Monte Rosa, e quella parte rimane costante lungo l'asta fluviale. Dal lavoro di Secchieri e Valentini (1992) si può vedere come in piccoli bacini montani con presenza di ghiacciai le portate nel corso degli anni abbiamo variazioni legate alle precipitazioni intorno al 5%, dimostrando come invece lo scioglimento nivale sia alla base di questi torrenti. Conseguentemente questo metodo di calcolo potrebbe causare delle sovrastime delle portate, ma ai fini di questo lavoro non risulta particolarmente influente questo problema.

A causa dell'incompletezza dei dati è stato possibile ricostruire i valori dal 2003 al 2006 compresi.

I dati di Portata così ottenuti, sono stati inseriti nel software Hec-Ras utilizzando il profilo presentato nel "Paragrafo 3.2" per ottenere i livelli idrometrici del torrente Anza, queste altezze sono state poi trattate con la Formula 4.7, ipotizzando una barriera impermeabile posta a 10 m dal corso d'acqua, giungendo così alle altezze di falda. I parametri utilizzati sono stati quelli esposti da Colombo, Cremonesi e Francani (2011) per acquifero con Ghiaia.

La sezione considerata è quella situata a monte del bacino artificiale di Ceppo Morelli, approssimata come rettangolare con una base di 10 m.

I dati ottenuti hanno così un campionamento quotidiano che è comodo per gestire durate di svariati anni ma non permette analisi sui tempi di risposta del bacino che in questo caso sono orarie.

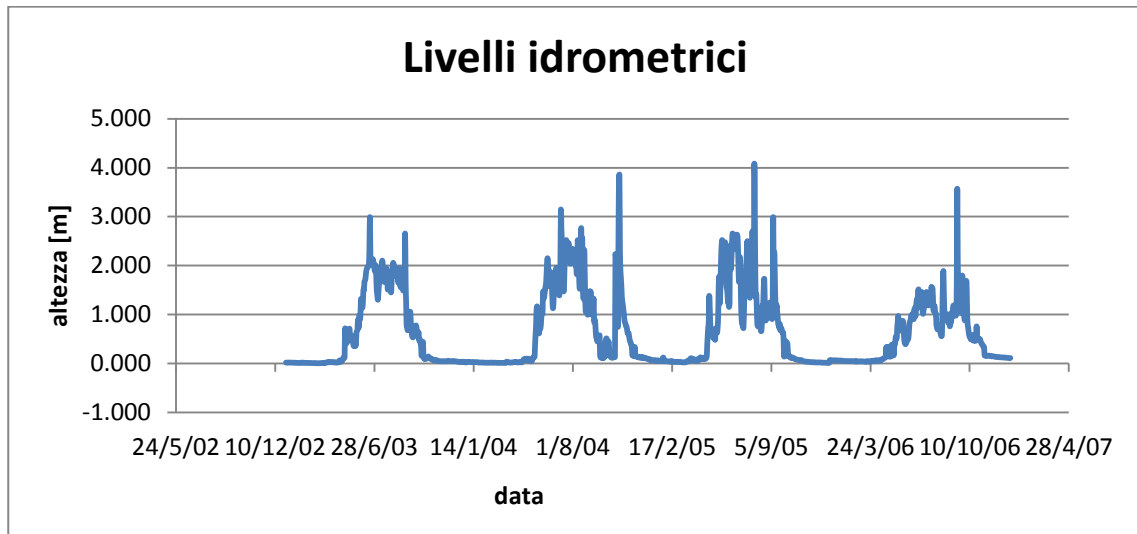


Grafico 2.6: rappresenta i livelli idrometrici nella sezione considerata lungo i quattro anni

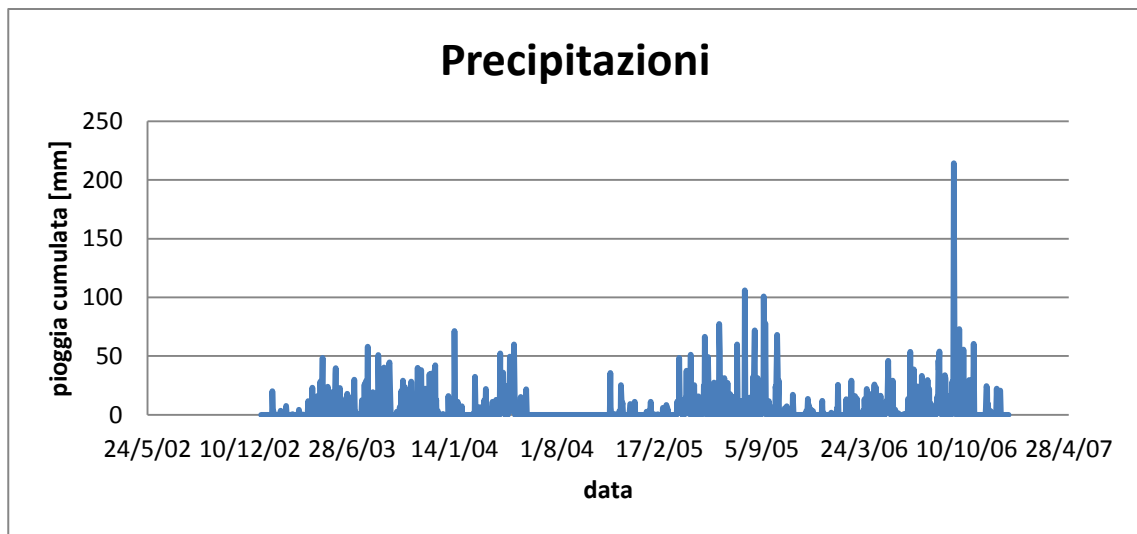


Grafico 2.7: dati di pioggia giornalieri nella stazione di Ceppo Morelli

Tab. 2.1: caratteristiche del terreno considerato

Materiale	n[-]	K [m/s]	S [-]	γ [N/m ³]	G [-]	b [m]	α [°]
Ghiaia e sabbia	0.28	$2 \cdot 10^{-2}$	10^{-2}	1800	1.4	10	45

Le precipitazioni, sono state suddivise in eventi, per poterli processare insieme con la formulazione di Huang e Wan. Questa suddivisione è obbligatoria in quanto la formulazione utilizzata, per come è costruita, non permette un abbassamento del livello di falda che

conseguentemente impedisce di processare serie storiche di dati. Come regola per la divisione degli eventi è stata adottata quella per cui in seguito a almeno cinque giorni senza precipitazioni si considerano fenomeni separati, questo è stato ispirato dalla tecnica per il calcolo del Curve Number del SCS-CN in cui l'umidità del suolo viene stimata osservando le precipitazioni dei cinque giorni precedenti. Ovviamente è una divisione artificiale che nella realtà dipende da moltissimi fattori, e dovrebbe tener conto dei reali tempi di risposta dell'acquifero, ma cercando un metodo rapido e trattando un acquifero piuttosto grossolano si è ritenuto accettabile questa suddivisione.

Processando i dati come esposto è stato possibile individuare le variazioni dell'altezza piezometrica a seguito di precipitazioni e di modifiche nel livello idrometrico dell'Anza. È necessario precisare come il livello del torrente sia fortemente influenzato anche dallo scioglimento nivale trattandosi di un corso d'acqua di origine glaciale.

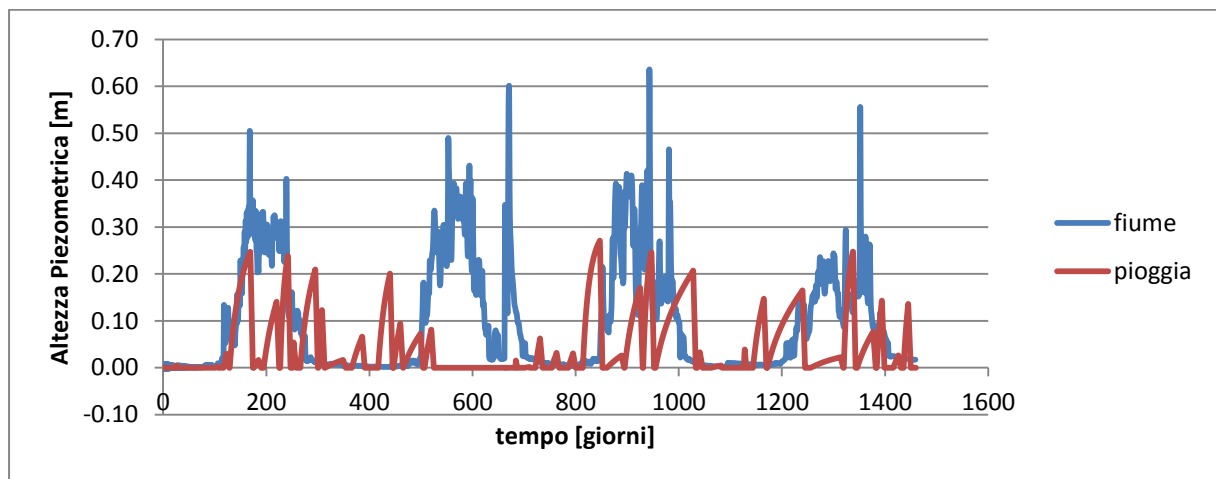


Grafico 2.8: variazioni del livello di falda legate al fiume e alle piogge

Ovviamente queste variazioni vanno sommate e si ottiene il reale innalzamento dell'acquifero, nel "Grafico 2.9" è possibile osservare un ingrandimento di circa quattro mesi per poter notare tutte le componenti e le loro differenze, in quanto rappresentare tutto l'arco temporale considerato non permette di cogliere le disuguaglianze.

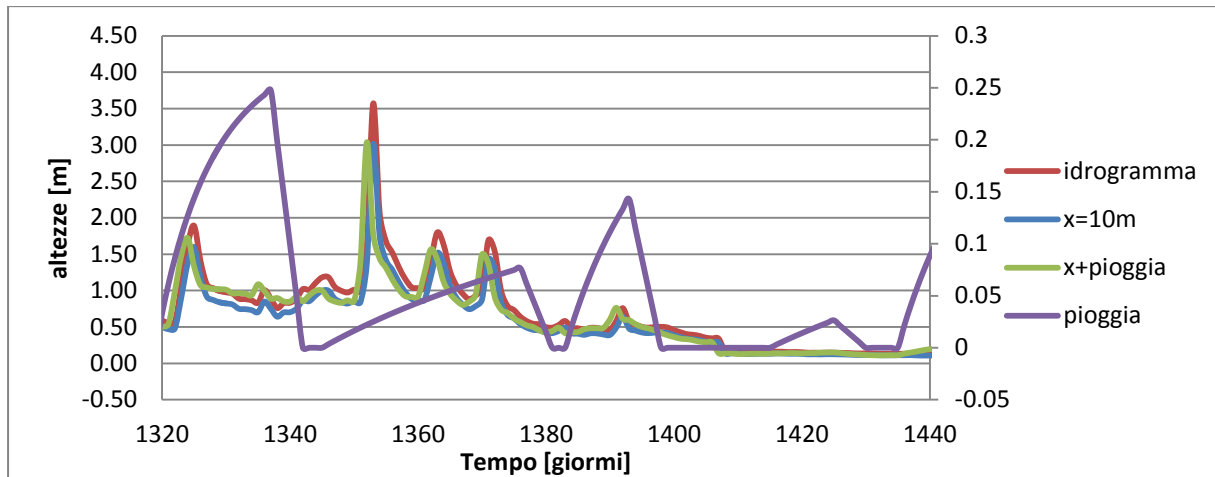


Grafico 2.9: ingrandimento dei risultati ottenuti: $x=10m$ si intende la variazione della falda per un acquifero esteso di 10 m e valutato con Carslaw e Jaeger. Le sole variazioni dovute alla pioggia usano l'asse secondario.

È possibile osservare come la somma delle variazioni causate dall'idrogramma con quelle delle piogge causi un innalzamento dell'acquifero e un anticipazione temporale del picco. Quindi è possibile dedurre, come, considerando un acquifero morenico ghiaioso, la sua risposta sia più veloce di quella fluviale.

Lungo i quattro anni di simulazione si può notare come trascurare le precipitazioni possa causare differenze anche del 10%, ovviamente questo si ripercuote sui calcoli dei gradienti e conseguentemente sulla stima della sicurezza.

In questo lavoro si vuole stabilire con quali tempi le piogge possono causare un innalzamento considerevole del livello di falda che può causare problemi alle sponde o alle eventuali opere di drenaggio presenti. Per fare questo sono state considerate le variazioni piezometriche totali e quelle legate alla sola variazione del livello idrometrico; con l'ausilio del software Matlab sono state cercate le curve che meglio approssimano i dati a disposizione. Ovviamente, seppur il lasso temporale considerato è piuttosto breve si può notare una certa periodicità in questi dati.

Per trovare le funzioni che meglio interpolano i dati è stato utilizzato il "Curve Fitting Tool" di Matlab, che ha permesso di individuare nella somma di otto funzioni sinusoidali la miglior interpretazione, con in entrambi i casi un R^2 di circa 0.8. Ovviamente con queste funzioni sinusoidali i picchi vengono smorzati anche di molto, ma siccome l'obiettivo è individuare il tempo con cui piogge e piene si sommano in modo considerevole, non è importante rappresentare con estrema precisione il livello di picco, ma solo la sua esistenza. Il tool permette di utilizzare altre due tipologie di funzioni periodiche, la serie di Fourier e la Gaussiana in entrambi i casi però l'indice R^2 è risultato inferiore a indicare una peggiore rappresentatività dei dati. Tutte e tre le formulazioni comunque risultano abbastanza vicine come livello di approssimazione.

Sono stati approssimati in questo modo i livelli di falda dovuti dalla variazione del torrente e quelli a cui sono stati sommati gli effetti delle precipitazioni, ottenendo i seguenti risultati.

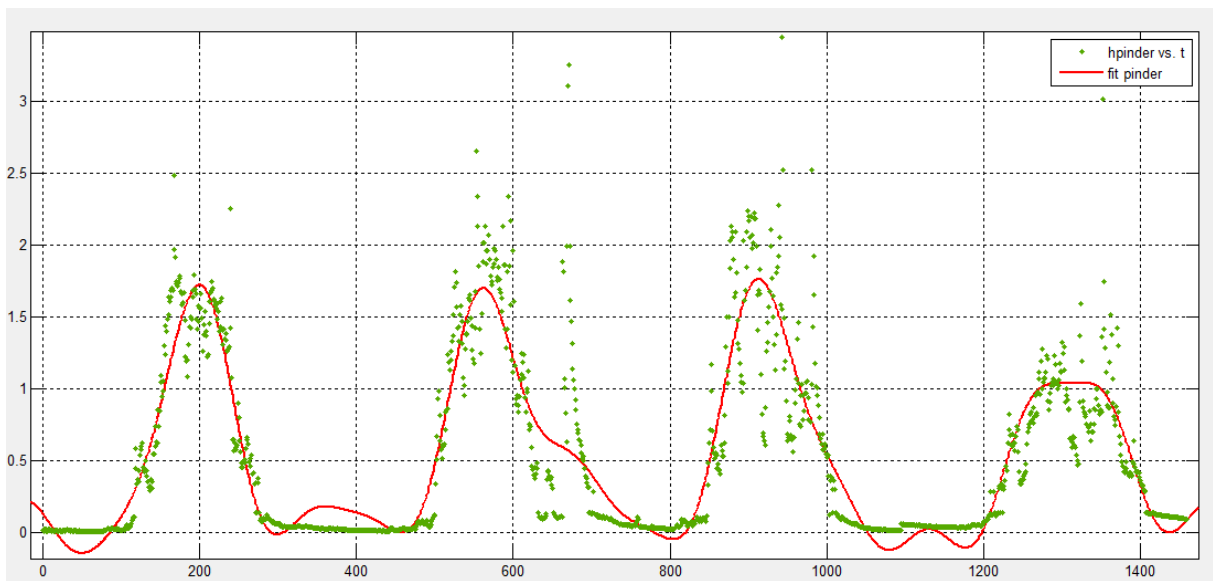


Grafico 2.10: approssimazione dei dati di innalzamento della falda dovuto alle variazioni idrometriche in cui si può vedere il trend stagionale dovuto allo scioglimento nivale

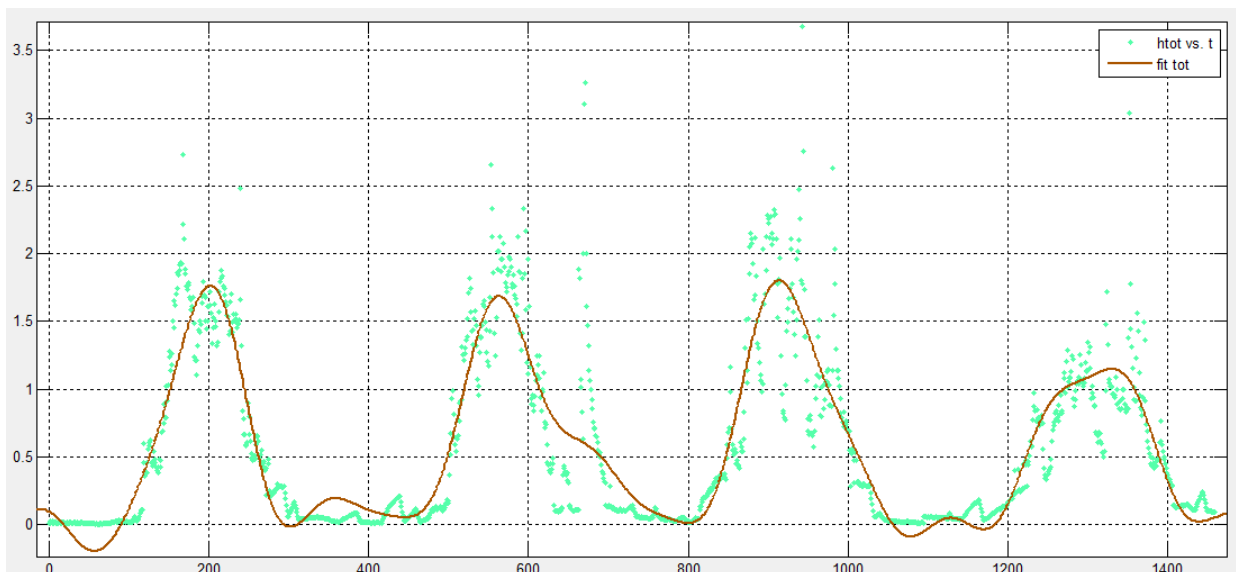


Grafico 2.11: approssimazione dei dati di innalzamento della falda sommando variazioni idrometriche e dovute alle precipitazioni

Le formule approssimanti sono rappresentate da:

$$f(x) = \sum_{i=1}^8 a_i \sin(b_i x + c_i) \quad (2.19)$$

I coefficienti numerici che definiscono le formule sono disponibili nell'“Allegato B”.

Il segnale così approssimato non valuta un possibile trend, infatti la serie storica non lo permette e inoltre vista la tipologia di dati vorrebbe dire analizzare eventuali cambiamenti climatici, ragionamenti che esulano di molto da questo lavoro.

Le due formulazioni possono apparire uguali a prima vista, ma sia confrontando i parametri numerici, sia compiendo un'analisi delle derivate prime che come noto nei loro zeri indicano i punti di massimo o minimo relativo (Teorema di Fermat).

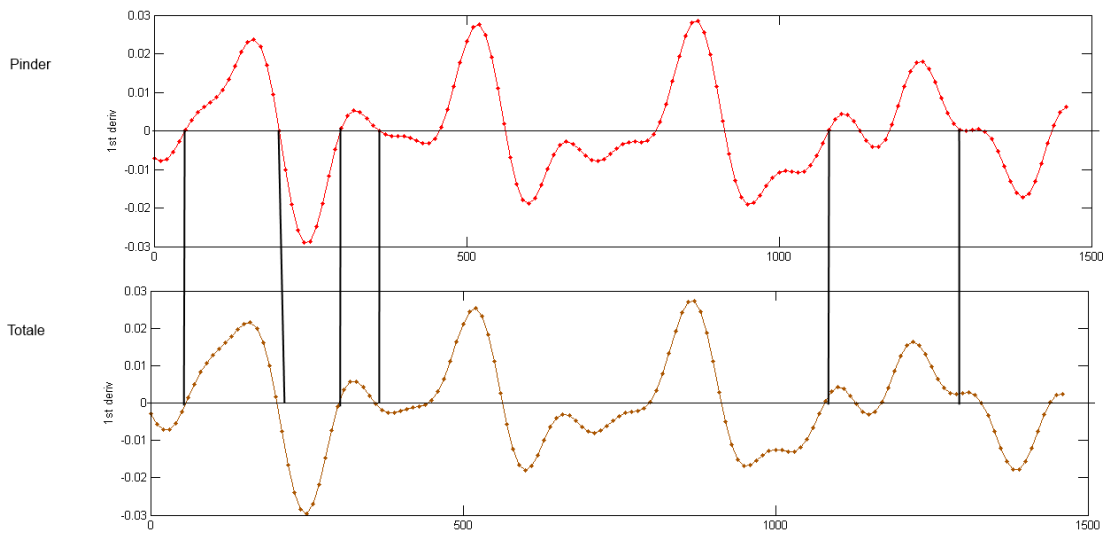


Grafico 2.12: confronto fra le derivate prime dei due segnali

Una volta individuate queste formule, tramite il “Signal Processing Tool” sempre all’interno del software Matlab si è deciso di trattare sia i risultati numerici che le funzioni approssimanti come segnali e ricercare la funzione di trasferimento che permette il passaggio da falda legata alle variazioni idrometriche a quella che tiene in conto delle precipitazioni.

Per individuare la funzione di trasferimento è stato necessario passare tramite la trasformata di Fourier.

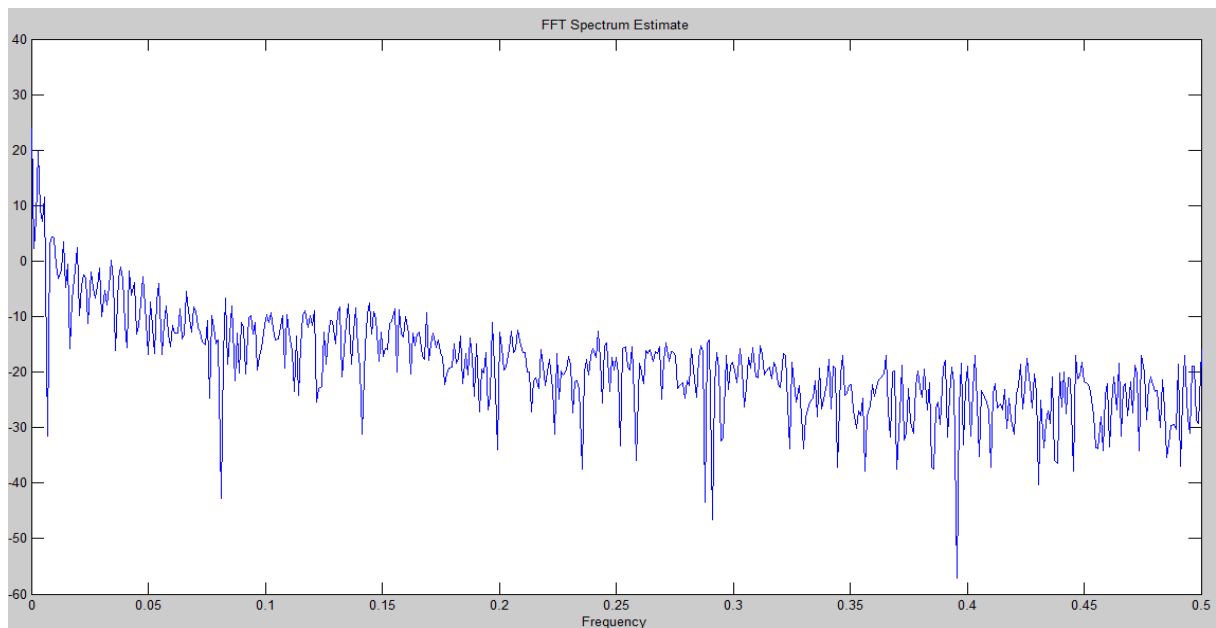


Grafico 2.13: trasformata di Fourier calcolata in Matlab per le variazioni piezometriche legate al comportamento idrometrico

La funzione di Trasferimento, ottenuta con Matlab, permette di individuare la frequenza nella quale i due sistemi hanno la massima amplificazione.

La funzione di trasferimento individuata partendo dalle relazioni approssimanti, ha una sua espressione analitica nota disponibile nell'“Allegato B”.

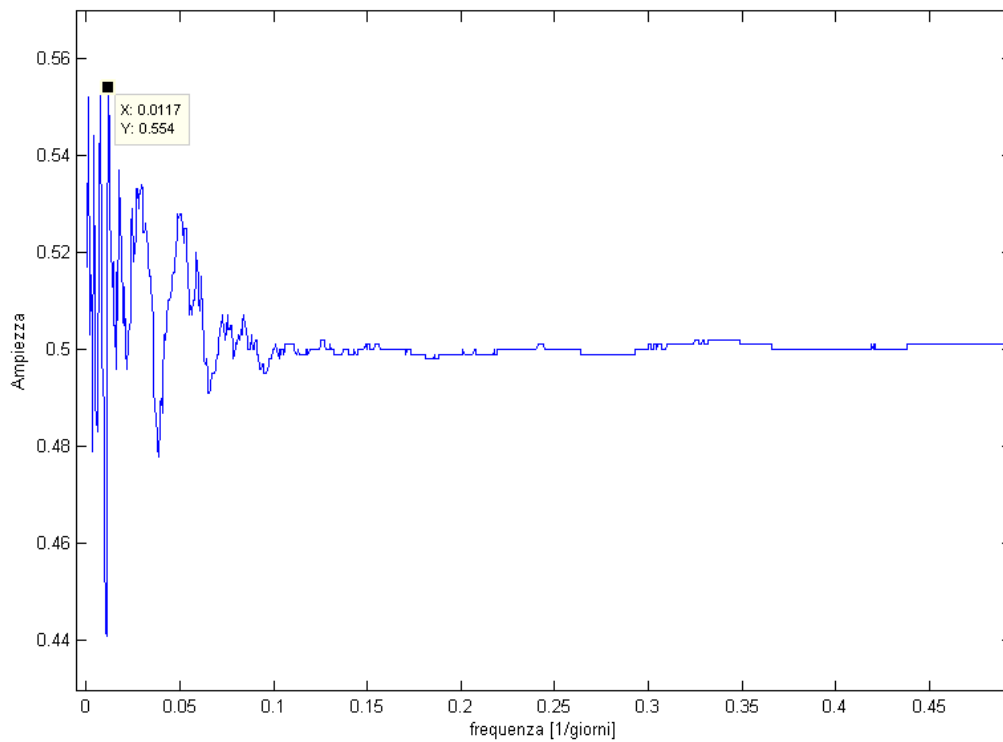


Grafico 2.14: funzione di trasferimento calcolata a partire dai risultati numerici

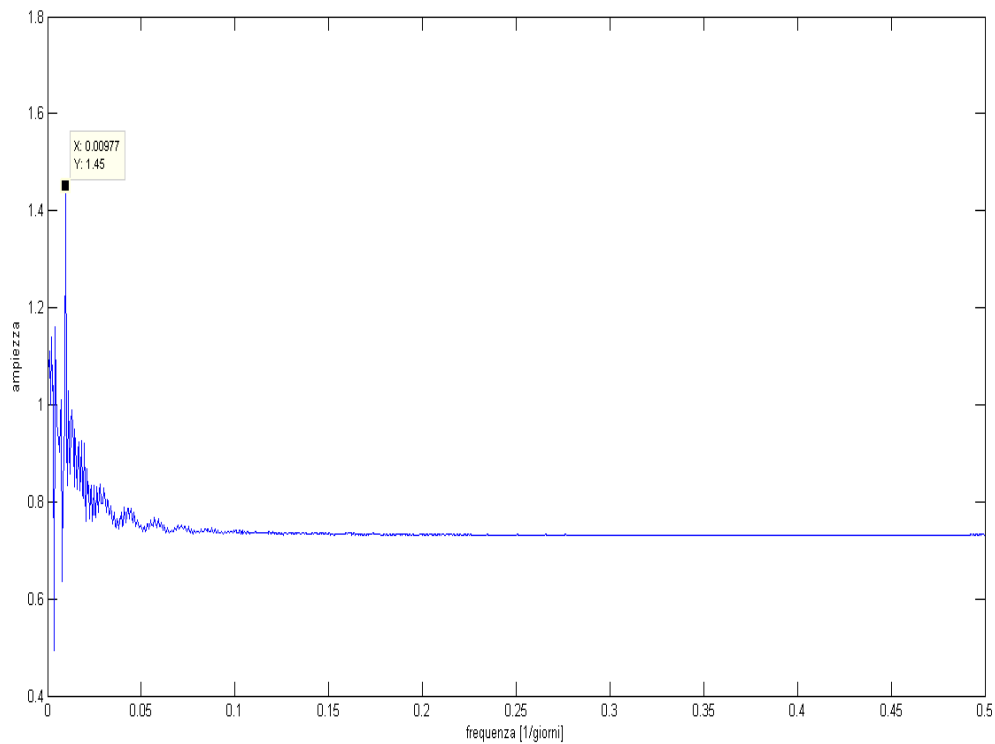


Grafico 2.15: funzione di trasferimento calcolata a partire dalle formule approssimanti

Dai grafici sopra rappresentati, delle funzioni di trasferimento, si può notare come la frequenza di massima amplificazione sia differente; infatti secondo i dati numerici le piogge aumentano la falda in maniera rilevante una volta ogni 86 giorni, mentre secondo le funzioni interpolanti ogni 100 giorni.

Da questi dati si evince in maniera certa come il trascurare le precipitazioni pluviometriche nel calcolo dell'innalzamento della falda e quindi dei gradienti di sponda sia un errore che può portare problemi più frequentemente di quanto normalmente si immagini. Infatti almeno tre volte all'anno le precipitazioni e le variazioni idrometriche si sommano causando variazioni della stima di decine di centimetri a seconda delle caratteristiche dell'acquifero e delle piogge.

Nel caso considerato anche l'altezza piezometrica media varia considerando le precipitazioni, passando da 0.51 m a 0.57 m, mentre la varianza resta circa la stessa pari a 0.41 m². Questa variazione della media, mostra come le modifiche dovute alle precipitazioni non siano elevatissime, ma esistano e per situazioni vicine al limite possono essere importanti.

Tab. 2.2: alcuni valori statistici delle serie utilizzate

	max	min	Media campionaria	Varianza campionaria	moda
Dati pluviometrici	214.2 mm	0 mm	4.65 mm	165.7 mm ²	0 mm
Portate	61.27 m ³ /h	0.13 m ³ /h	9.72 m ³ /h	119.7 m ⁶ /h ²	0.47 m ³ /h
Livello piezometrico pinderiano	3.45 m	0.04 m	0.51 m	0.40 m ²	N/D
Livello Piezometrico totale	3.68 m	0.04 m	0.57 m	0.42 m ²	N/D

La moda dei livelli piezometrici risulta non disponibile in quanto il software di Calcolo non trova due valori uguali in tutte le sue cifre decimali.

Le variazioni cicliche del carico piezometrico possono portare a instabilità i versanti per numerosi fattori, infatti queste modificazioni possono dare origine a fenomeni quali il piping, o qualora siano presenti dei terreni coesivi innescare meccanismi di rottura a fatica o semplicemente causare lo scivolamento di terreno a causa dell'eccessivo innalzamento del livello di falda. È difficile valutare il momento esatto in cui il piping provochi una frana ma sicuramente è un processo autoalimentante, che se permangono le condizioni idrogeologiche le lo hanno portato a nascere non si interromperà sino all'innescare del movimento franoso.

A dimostrazione dell'importanza di queste variazioni è sufficiente implementare un modello dei conchi per il versante considerato. Per questo esempio verrà utilizzato il metodo di Janbu semplificato, il quale ipotizza superfici dei conchi perfettamente lisce in modo che possano scambiarsi solo forze orizzontali, e di fare l'equilibrio in direzione verticale in modo da far scomparire anche queste ultime. Questo comporta che è necessario introdurre un legame costitutivo e nell'equilibrio globale, quindi FS risulti implicito.

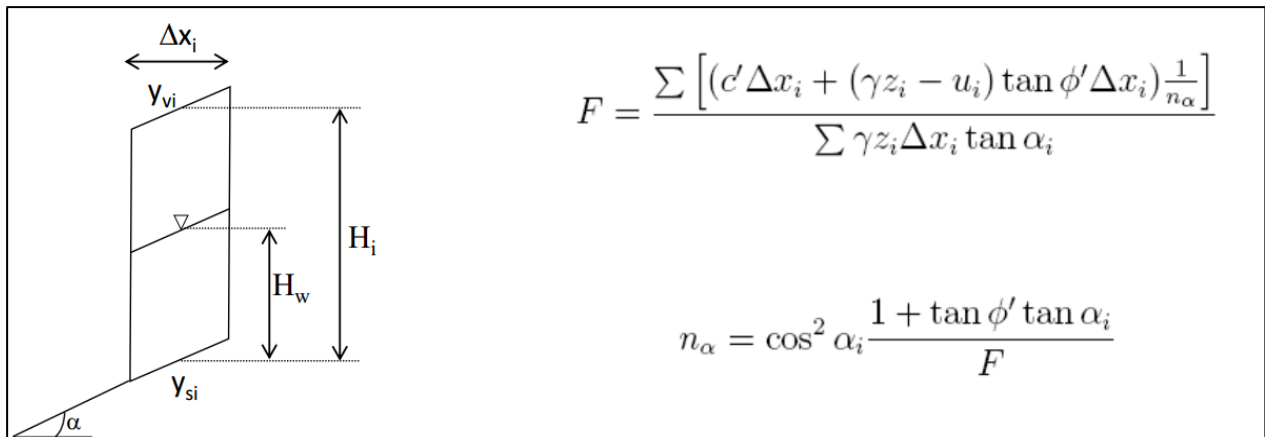


Fig. 2.5 il metodo di Janbu Semplificato

Grazie all'utilizzo del software Geo-Slope è stato possibile simulare il versante in condizioni di carico piezometrico massimo stimato per la variazione idrometrica e con l'aggiunta delle perturbazioni pluviometriche. Inoltre il software permette di impostare un numero a piacere di superfici di scorrimento, e lui cercherà il risultato meno sicuro. In questo esempio sono stati calcolati 1300 fattori di sicurezza. Le caratteristiche del terreno considerate sono state le seguenti:

Tab. 2.3: proprietà del terreno

Φ' [°]	c' [kPa]	γ [N/m ³]
30°	5	1800

Mentre il substrato (verde) è impermeabile e rigido. Le altezze piezometriche utilizzate corrispondono alla massima quota stimata con le formule di Carslaw e Jaeger, a cui nel secondo caso è stata aggiunta la massima variazione legata alle precipitazioni.

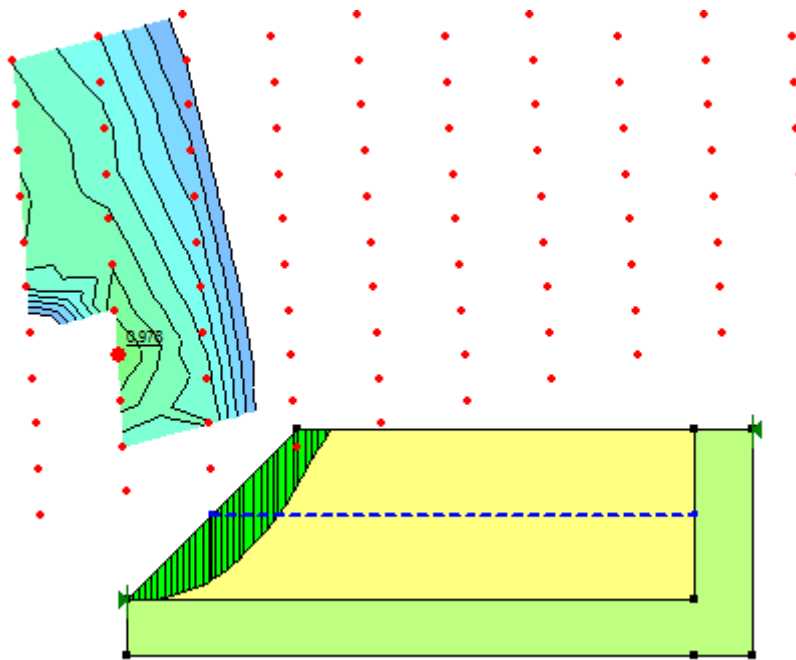


Fig. 2.6 fattore di sicurezza e versante in frana con altezza di falda 3,3 m (innalzamento idrometrico)

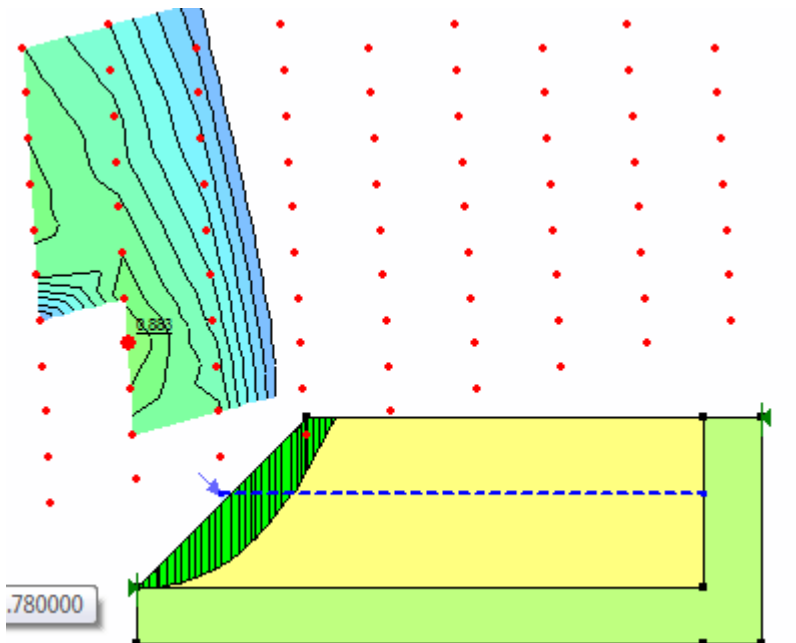


Fig. 2.7 fattore di sicurezza e versante in frana con altezza di falda 3,3 m (innalzamento idrometrico e da precipitazioni)

Come si può notare dalle immagini il fattore di sicurezza si modifica, mentre nel primo caso è molto prossimo a uno (0.976), nel secondo è già minore e indice di instabilità (0.883). In

questo caso entrambi i Fattori di Sicurezza non avrebbero garantito la resistenza del pendio ma si può vedere come variazioni di soli 30cm della quota piezometrica possano influire abbastanza significativamente sul versante. Questa è la prova dell'importanza di considerare tutte le fonti che possano influire sul versante, e di come ognuna possa col suo piccolo apporto portare all'evento catastrofico.

Questo modello assume l'ipotesi di isofrequenza, cioè al massimo innalzamento fluviale coincide la massima precipitazione e in questo caso l'innalzamento piezometrico. Questa ipotesi per bacini di queste dimensioni può anche essere utilizzata, ma non è necessariamente verificata. Allo stesso tempo bisogna precisare che in nessun modo si è tenuto dell'erosione al piede della sponda e di come questa nel tempo faccia mancare il sostegno al pendio sopra. La velocità con la quale la sponda inizia a essere erosa, valutata con il metodo di Shields è anche abbastanza limitata infatti è pari a $0.13 \text{ m}^3/\text{s}$. Bisogna però precisare che in quasi tutti gli alvei naturali l'acqua non arriva a lambire la sponda durante tutto l'anno, ma solo in alcuni periodi. Conseguentemente valutare l'effetto combinato dell'erosione spondale e scivolamento del pendio per mancanza del sostegno al piede, in termini di tempo di ritorno risulta essere molto complesso.

Conseguentemente a quanto detto finora è importante andare a valutare cosa succede in un alveo naturale con presenza di frane o altri fattori influenzanti il trasporto solido.

CAPITOLO 3

CALCOLO DELLE VARIAZIONI DELL'ALVEO

Nello specifico si è considerato il tratto del torrente Anza compreso tra Campioli e l'invaso artificiale di Ceppo Morelli, su cui insistono due conoidi di modeste dimensioni e una frana di grande dimensioni presso l'abitato di Prequartena.

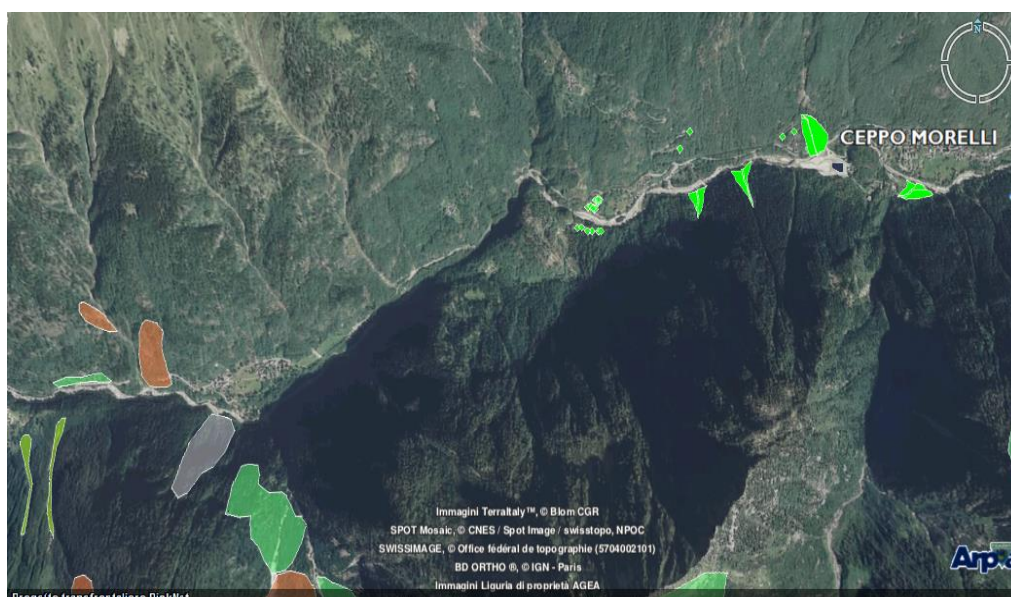


Fig. 3.1 Immagine aerea con sovrapposta cartografia di conoidi e aree in frana (Progetto RiskNat, ARPA Piemonte)

L'Anza è un torrente di piccole dimensioni, la lunghezza dell'asta principale è di circa 35 km, importante però è che nasce dal ghiacciaio del Belvedere (Macugnaga, VB) e sfocia nel Toce a Piedimulera. Il fatto di nascere da un ghiacciaio comporta una forte varianza stagionale di portata, infatti il periodo primaverile in cui si associano precipitazioni intense e scioglimento nivale è quello caratterizzato da valori maggiori. È un corso d'acqua in cui sono presenti numerosi sbarramenti artificiali per scopi idroelettrici, uno dei quali, quello di Ceppo Morelli, conclude il tratto analizzato in questo lavoro. Il torrente ha un regime pluviometrico abbastanza importante, infatti le precipitazioni medie annue raggiungono i 1400 mm/anno.

In "Figura 3.1" è possibile osservare un tratto del Torrente Anza, in cui grazie al Geoportale del progetto RiskNat, di cui è coordinatrice l'ARPA Piemonte, si vedono in verde acceso i conoidi lungo l'alveo e in colori semitrasparenti le frane.

In queste simulazioni si è rispettata la pendenza naturale dell'alveo, mantenendo le sezioni già usate precedentemente, essendo proprio quelle di questo tratto fluviale. Inoltre si sono considerati tre differenti casi, in cui si aggiunge, partendo da uno stato senza disturbi esterni, i due conoidi esistenti e visibili in "Figura 3.1". Ogni conoide, considerando che immette in alveo materiale solido legato al ruscellamento superficiale del versante e al piccolo rio

contenuto in esso, aggiunge al fiume 250 m^3 annui di terreno. È necessario ricordare che tutte le sponde del corso d'acqua non immettono nulla all'interno dell'alveo, al di fuori dei conoidi. La scelta di questa quantità di materiale è piuttosto bassa rispetto ai dati ottenuti con Gavrilovic, ma risulta comunque superiore alla stima minima, questo permette di osservare come anche con minime quantità di detriti derivanti dal bacino il profilo cambi e ne risenta, conseguentemente è importante tenere in considerazione questi fenomeni.

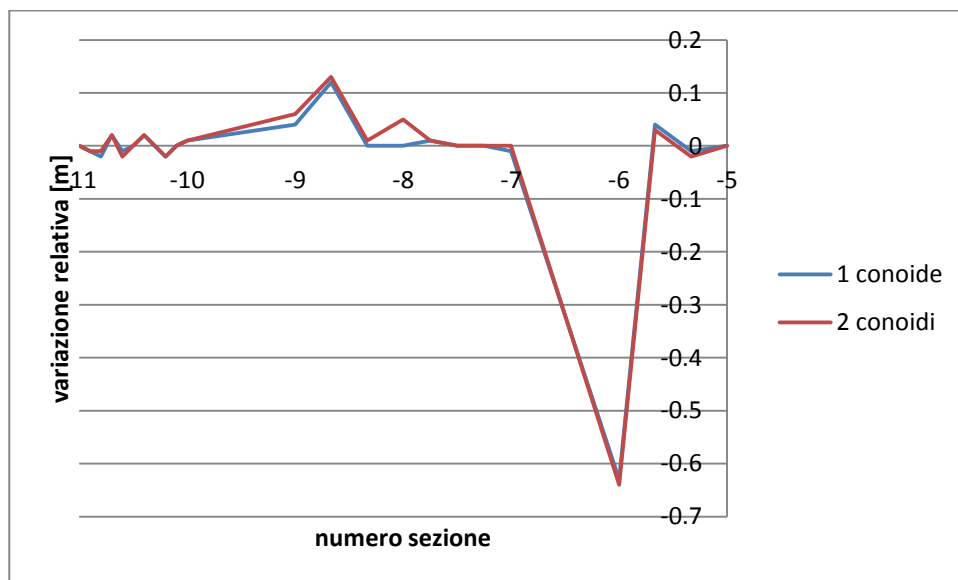


Grafico 3.1: variazioni delle sezioni scalate rispetto alla situazione senza apporti laterali

Nel “Grafico 3.1” è possibile osservare le variazioni di quota delle varie sezione includendo l’apporto di materiale da uno o due conoidi, queste differenze sono state scalate rispetto alla situazione “standard” in modo da apprezzare meglio le differenze che sono minime, ma che possono risultare di diversi metri cubi di differenza. Inoltre per certe opere umane anche pochi centimetri annui possono essere molto rilevanti. Le differenze rispetto allo stato “standard” invece sono anche abbastanza rilevanti, dell’ordine delle decine di centimetri, queste grandezze possono causare tranquillamente problemi, facendo scomparire franchi di sicurezza o intaccando le fondamento di opere in alveo.

Nella maggioranza dei casi gli apporti di materiale solido da conoidi o possibili frane in alveo non viene quasi mai considerata, questo può portare a degli errori di stima anche rilevanti.

Come si può notare, le quantità di materiale inserito in alveo per questa simulazione è decisamente minore a quello stimato con il metodo di Gavrilovic, questa scelta è legata al voler mostrare il comportamento del corso d’acqua, anche per modeste quantità di detrito, oltre a considerare che Gavrilovic stima la quantità di sedimento eroso dall’intero bacino, che non necessariamente arriva totalmente al corso d’acqua principale. Con questi calcoli si è mostrato bene come anche piccole quantità di materiale in ingresso laterale modifichino significativamente l’evoluzione del fondo alveo.

3.1 MODELLAZIONE NUMERICA

3.1.1 Hec-Ras

In questo capitolo si vuole effettuare una breve descrizione del software HEC-RAS[®], un programma, disponibile gratuitamente in rete, molto diffuso in campo tecnico per lo studio della propagazione delle piene in una rete di canali naturali o artificiali. In particolare le ultime versioni, rispetto alle precedenti, permettono di effettuare anche analisi di trasporto solido. Il software è stato realizzato dall'“Hydrologic Engineering Center, River Analysis System” del genio militare dell'esercito americano, da cui deriva anche il nome.

La più recente versione del software, permette di eseguire analisi monodimensionali, e normalmente viene suddiviso in quattro moduli:

- Analisi dei profili di corrente in moto permanente;
- Analisi in condizioni di moto vario;
- Modulo per l'analisi del trasporto solido e conseguenti variazioni d'alveo;
- Valutazione sulla qualità delle acque.

Il modulo 1 (Steady Flow Analysis) è predisposto per l'analisi di una corrente gradualmente variata; essa può far riferimento ad un canale singolo o ad una rete di canali, inoltre, l'analisi del profilo può essere condotta con riferimento ad una corrente lenta, veloce o mista.

Il modulo 2 (Unsteady Flow Analysis) permette di effettuare un'analisi in condizione di moto vario, per una rete di canali a pelo libero.

Il modulo 3 (Sediment Transport Analysis) restituisce l'analisi di variazione del fondo, a seguito di depositi o di erosioni dello stesso, dovuti alla presenza di trasporto solido; in genere l'analisi si riferisce a simulazioni su lunga scala temporale (solitamente in termini annuali).

Il modulo 4 (Water Quality Analysis) consente di valutare la qualità di un fiume, effettuando analisi della temperatura e di una limitata classe di materiali trasportati.

Di seguito verranno analizzati il primo e il terzo modulo che sono quelli più collegati a questo lavoro, in quanto utili al calcolo del trasporto solido.

Analisi di moto permanente

Questo modulo consente l'analisi ed il tracciamento di un profilo in condizioni di moto permanente per correnti stazionarie e gradualmente variate, in canali naturali o artificiali. Il software è in grado di calcolare profili lenti, veloci o misti, con riferimento a correnti monodimensionali.

I profili di corrente vengono calcolati in sezioni perpendicolari al corso d'acqua con il metodo iterativo "Standard Step", risolvendo l'equazione di conservazione dell'energia (3.1).

$$z_2 + h_2 + \frac{\alpha V_2^2}{2g} = z_1 + h_1 + \frac{\alpha V_1^2}{2g} + J \quad (3.1)$$

In cui:

- z , altezza della quota di fondo [m];
- h , altezza del tirante idrico [m];
- α , coefficiente di ragguaglio;
- V , velocità della corrente [m/s];
- J , perdite di energia [m];
- g , accelerazione di gravità [m/s²].

Le perdite di energia possono essere di tipo distribuito e quindi dovute alla scabrezza o concentrate legate a eventuali contrazioni o espansioni.

Dato che le sezioni trasversali considerate dal software possono avere parti con differenti valori di scabrezza, è necessario valutare quanto vale il "conveyance", cioè il deflusso per unità di perdita di carico nell'unità di lunghezza. Per fare ciò la singola sezione è suddivisa in strisce, ognuna delle quali caratterizzata dallo stesso valore di scabrezza, e per ciascuna di queste si calcola il valore di conveyance.

I conveyance calcolati per ciascuna striscia vengono raggruppati in macro-aree, golene e alveo principale. Il conveyance totale è dato dalla somma dei tre principali.

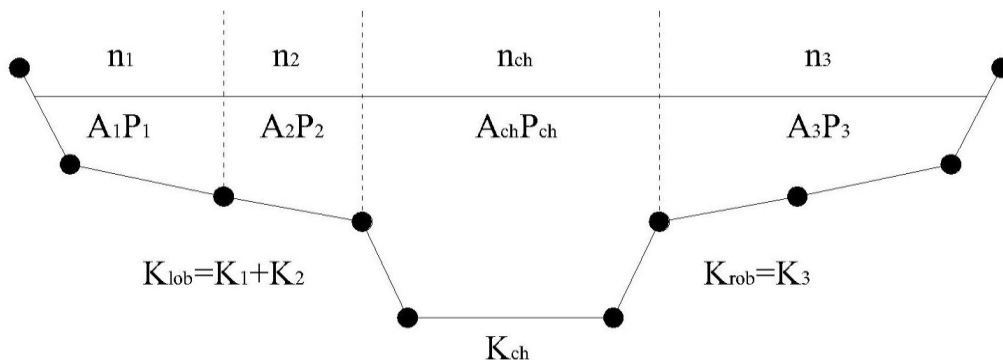


Fig. 3.2 Schema del calcolo del conveyance in Hec-Ras

Per la determinazione del profilo è, naturalmente, necessario assegnare le condizioni al contorno le quali saranno definite: a valle, nel caso di corrente lenta, a monte, nel caso di corrente veloce e, sia a valle che a monte, per una corrente mista. Diverse sono le tipologie di condizioni che possono essere scelte (quota del pelo libero, altezza di stato critico, tirante di moto uniforme, scala di deflusso).

Analisi di trasporto solido

Nell'analisi del trasporto solido l'approccio seguito è di tipo disaccoppiato, per cui, a monte della valutazione della portata solida trasportata dalla corrente, è necessario determinare le caratteristiche idrauliche della corrente. Il software si serve di un approccio idrodinamico semplificato: in particolare fa riferimento al caso di Quasi-Unsteady Flow. Nell'analisi di Quasi-Unsteady Flow si considera una successione di moti permanenti rispetto ai quali è calcolato il profilo di corrente; a partire dal profilo sono determinate: la portata solida e la conseguente variazione di fondo. L'utilizzo del moto quasi permanente permette di velocizzare di molto il calcolo, rispetto al moto vario.

Nell'ambito della successione di moti permanenti si definisce il Flow Duration: l'intervallo temporale durante il quale portata, temperatura o massa di sedimenti, si mantiene costante. Il Flow Duration viene poi suddiviso in Computational Increment, che indica l'intervallo di tempo alla fine del quale le caratteristiche idrodinamiche e geometriche del fondo vengono calcolate. La stabilità del modello è influenzata dalla scelta di questo intervallo temporale, in quanto la geometria del fondo cambia solo alla fine di questo; quindi, qualora il Computational Increment sia troppo lungo, la geometria dell'alveo non viene aggiornata frequentemente e i risultati del modello potrebbero variare.

Il Computational Increment è a sua volta suddiviso in Bed Mixing Time Step che rappresentano gli intervalli temporali utilizzati per il calcolo delle erosioni e dei depositi delle particelle solide e alla fine di questi possono aversi dei cambiamenti nella composizione del fondo alveo.

Per l'analisi delle modificazioni del fondo alveo il programma utilizza l'equazione di Exner presentata nel "Paragrafo 2.5.1".

Hec-Ras è in grado di considerare particelle di diversa granulometria, il materiale solido viene suddiviso in classi. Per ciascuna di queste viene definita la capacità di trasporto potenziale, con riferimento alle condizioni idrodinamiche della corrente. La capacità di trasporto potenziale può essere valutata tramite una delle formule di trasporto solido presenti nel programma e già elencate nel capitolo 1. Dalla capacità di trasporto potenziale di ogni classe granulometrica, si determina un unico valore, rappresentativo di tutto il materiale solido.

$$T_{tot} = \sum_{j=1}^n \beta_j T_j \quad (3.2)$$

Con:

- T , capacità di trasporto solido;
- β_j , è la percentuale di presenza della j -esima classe granulometrica nel layer attivo.

La differenza tra capacità di trasporto e apporto solido non può essere direttamente convertita in variazione del fondo, in quanto esistono delle restrizioni fisiche ai fenomeni di erosione e deposito; HEC-RAS modella queste restrizioni con l'introduzione di:

- Un limite temporale di deposito;
- Un limite temporale di erosione;
- Il Sorting and Armoring.

Il limite temporale di deposito si basa su una definizione della velocità di sedimentazione delle particelle, in particolare si confronta la distanza verticale che una particella deve percorrere per raggiungere il fondo con la distanza che una questa percorre in un dato intervallo di tempo, ottenuta come prodotto della velocità di sedimentazione per l'intervallo temporale considerato. Questo confronto, comporta la definizione, per ogni classe granulometrica di un coefficiente di efficienza di deposizione.

$$C_d = \frac{V_s(i)\Delta t}{D_e(i)} \quad (3.3)$$

In cui:

- $V_s(i)$, è la velocità di sedimentazione di ogni classe granulometrica;
- D_e , altezza della colonna liquida all'interno della quale sono trasportate le particelle solide appartenenti alla classe granulometrica considerata,
- Δt , intervallo temporale.

Nel caso in cui, il denominatore risulti maggiore del numeratore, non tutto il sedimento trasportato potrà depositarsi nell'intervallo di tempo considerato, naturalmente la percentuale che sedimenterà sarà proporzionale al coefficiente di efficienza. Se invece il coefficiente sarà superiore all'unità tutto il surplus si trasformerà in deposito.

In Hec-Ras per il calcolo delle velocità di sedimentazione è possibile scegliere tra quattro formulazioni:

- Rubey: tale formulazione è valida per un ampio spettro di granulometrie;
- Toffaleti: valida per particelle quasi sferiche;
- Van Rijn: fa riferimento a particelle non sferiche con un preciso fattore di forma;
- Report 12: metodo iterativo che valuta la velocità di sedimentazione in funzione della variazione del numero di Reynolds.

Per il calcolo della profondità effettiva di trasporto " D_e ", dato che i sedimenti in sospensione non sono uniformemente distribuiti lungo la colonna d'acqua, si tiene conto del profilo di concentrazione che ciascuna classe granulometrica ha all'interno della corrente idrica. In particolare, per calcolare l'effettiva profondità di trasporto per ogni classe granulometrica, Hec-Ras, fa riferimento allo studio condotto da Toffaleti (1969).

Il limite temporale di erosione parte dalla constatazione che l'erosione è un processo che, come quello del deposito, dipende dal tempo e che, naturalmente, non è possibile pensare che vi possa essere un'erosione illimitata in un dato intervallo temporale. Poiché, sfortunatamente, il processo fisico che conduce alla limitazione temporale dell'erosione non è ben compreso come quello del deposito, le relazioni utilizzate sono più empiriche e generalmente meno accurate. In particolare il software, fa riferimento al concetto della "lunghezza caratteristica della portata", che permette di definire un coefficiente di asportazione il quale, moltiplicato per il deficit di materiale solido calcolato per la corrente idrica, consente di valutare la quantità di materiale che viene effettivamente erosa.

Un'altra limitazione al processo erosivo è legata ai fenomeni di sorting e armouring: che non sono nient'altro che il corazzamento ed il nascondimento presentati in precedenza. All'interno del software sono presenti due algoritmi per simulare questi fenomeni, entrambi si basano sulla divisione del fondo alveo in due strati uno attivo e uno inattivo. In particolare, il layer attivo è quella parte dello strato di fondo la cui granulometria definisce le percentuali della classe granulometrica che compaiono nella relazione per il calcolo della capacità di trasporto totale.

I due algoritmi sono:

- Exner 5;
- Active Method Layer.

Il primo algoritmo effettua un'ulteriore suddivisione del layer attivo, si ha così complessivamente uno schema a tre strati. Anche lo spessore degli strati si differenzia fra i due algoritmi, in particolare nel secondo metodo si assegna uno spessore maggiore al layer inattivo.

Una volta visto in che modo si determina la quantità di materiale eroso o depositato è necessario capire come questa sia distribuita nella sezione trasversale rispetto alla quale è stata calcolata. Questa massa di materiale può essere aggiunta o sottratta al volume di controllo relativo ad una data sezione trasversale, determinando una variazione della stessa.

La massa di materiale solido è espressa in termini volumetrici ed è distribuita in modo uniforme in direzione trasversale, mentre è distribuita rispetto a un cuneo in direzione longitudinale. Questo cuneo si sviluppa a partire dalla sezione di interesse e per tutto il volume di controllo, per cui arriva a metà fra la sezione precedente e quella d'interesse e a metà con quella successiva.

Come detto il volume si distribuisce uniformemente nella sezione trasversale e determina un innalzamento o un abbassamento dei punti rappresentativi della sezione, questo movimento costante è limitato alle zone che risultano soggette a possibili variazioni. La distribuzione del materiale eroso/depositato nella direzione longitudinale, avvenendo secondo il cuneo, tende a distribuire il materiale dando maggiore peso alla sezione d'interesse.

3.2 INFLUENZE ESTERNE

Il trasporto solido di un corso d'acqua può essere influenzato in modo significativo da apporti laterali, come confluenze e frane, il caso più estremo riguarda ovviamente i fenomeni di sbarramento totale o parziale dell'alveo.

Scivolamenti importanti possono modificare il tratto direttamente coinvolto, ma anche causare innalzamenti del pelo libero a monte e modificazioni dell'alveo a valle dovuto al nuovo apporto di materiale solido. Questo materiale potrebbe causare fenomeni di sovralluvionamento che possono modificare la sicurezza idrologica del corso d'acqua.

Una forte presenza di detriti lungo l'asta fluviale può facilitare la formazione di future colate detritiche, molto pericolose in caso di presenza di abitati o strutture, quali invasi artificiali e derivazioni del corso d'acqua. Inoltre possono esserci modifiche lungo il corso d'acqua delle zone di deposizione ed erosione, questi fenomeni possono interagire con opere civili creando problemi di vario genere. L'aumento di erosione in un tratto d'alveo può causare scivolamenti spondali, scalzare basi di ponti o rendere inutili delle opere come le briglie.

I fenomeni più pericolosi, come accennato, sono gli sbarramenti dell'alveo fluviale, sono infatti fra i più studiati in letteratura. Bisogna considerare che l'effetto, in caso di occlusione totale, è esattamente quello della rottura di una diga, conseguentemente si svilupperebbe una violenta onda di piena che a sua volta causerebbe una fortissima erosione a monte e un conseguente deposito a valle, dove solitamente si trovano gli abitati, aggravando la situazione già resa difficile dall'onda.

Anche una modificazione del trasporto solido molto meno evidente e disastrosa può avere effetti sulla comunità, infatti qualora un alveo subisca un'incisione eccessiva, oltre a mettere a rischio le strutture presenti può comportare un abbassamento del livello di falda, magari impedendo il prelievo di acqua da pozzi preesistenti.

A seguito di queste considerazioni, si evidenzia la necessità, nel campo tecnico scientifico, di studiare in maniera opportuna tali fenomeni. Per l'analisi dei casi di Dam Break esistono vari modelli in letteratura, alcuni che usano approcci più simili a correnti liquide altri che considerano anche l'enorme quantità di sedimenti, ovviamente quelli presentati finora nei capitoli precedenti non sono adatti a simulare la rottura di una diga in terra, che è un fenomeno molto più improvviso e estremo rispetto al normale trasporto solido.

I fenomeni che più possono influenzare il trasporto solido in un corso d'acqua sono quelli che comportano immissione di discreti quantitativi di materiale con granulometria non eccessiva, infatti più il diametro è fine e più facilmente le particelle verranno erose dall'acqua e trasportate.

Di seguito saranno riportati dei calcoli svolti con il software Hec-Ras per mostrare come gli apporti laterali di materiale possono influenzare significativamente il trasporto solido.

Inoltre l'apporto di materiale solido da affluenti, frane, erosione spondale, può causare un fenomeno autoalimentante, in quanto una corrente ricca di detriti è più erosiva dell'acqua limpida questo può portare ad un'accelerazione del fenomeno.

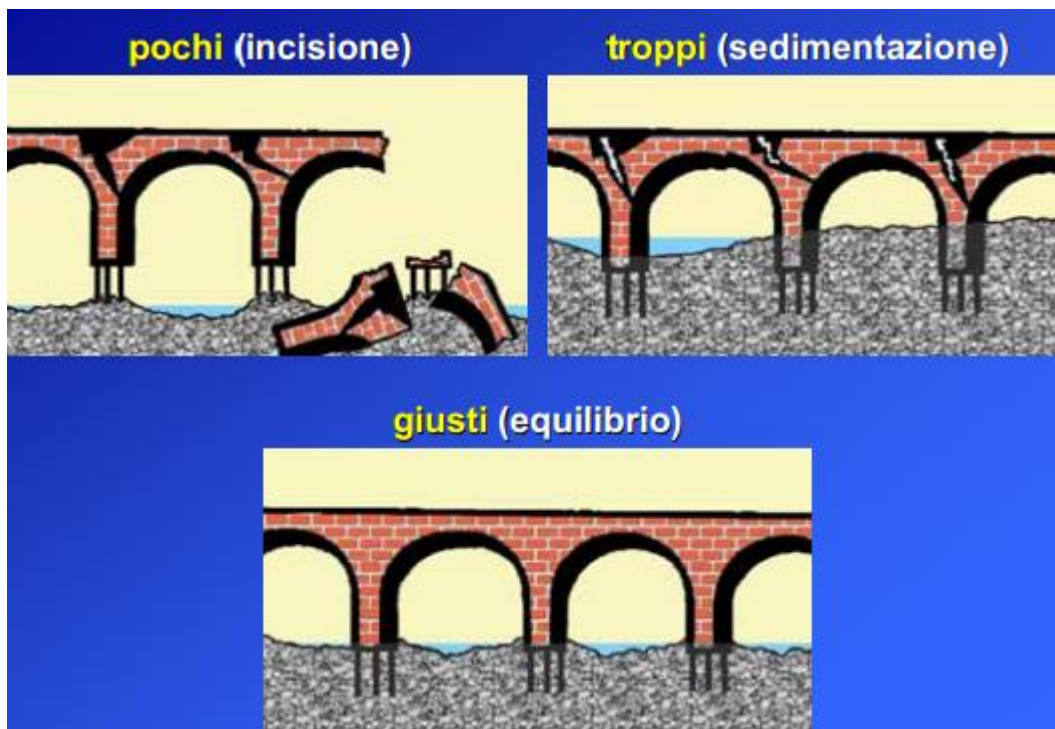


Fig. 3.3 interazione dei sedimenti con un ponte

Sfruttando le potenzialità del software Hec-Ras, si è deciso di modellare un corso d'acqua fluviale, rettilineo e con particolari caratteristiche atte a esaltare il fenomeno di trasporto solido. Inoltre nei capitoli precedenti si è mostrato come siano molti i fattori che possono influire sul trasporto e l'evoluzione del fiume, di seguito si cercherà di rappresentare questi fenomeni.

Nel caso specifico sono state utilizzate delle sezioni appartenenti ad un tratto del torrente "Anza" variandone però la distribuzione altimetrica, almeno inizialmente, in modo da ottenere un andamento con pendenze controllate. In particolare si è considerato un tronco fluviale di 3 km di lunghezza, e suddiviso in tre parti uguali. Nella prima si è posto una pendenza molto elevata pari all'8 %, questo comporta una discreta velocità dell'acqua e una relativa forza erosiva. Nel tratto successivo la pendenza viene dimezzata, e vengono introdotti degli apporti laterali molto consistenti, per simulare delle frane improvvise all'interno del corso d'acqua, si è comunque fatto in modo che questi apporti non

arrivassero a ostruire l'intera sezione e che lo scivolamento, seppur con discrete dimensioni, scendesse nell'arco di un anno intero. Infine si è simulata la presenza di un tratto pressoché pianeggiante in cui il materiale si depositi interamente.

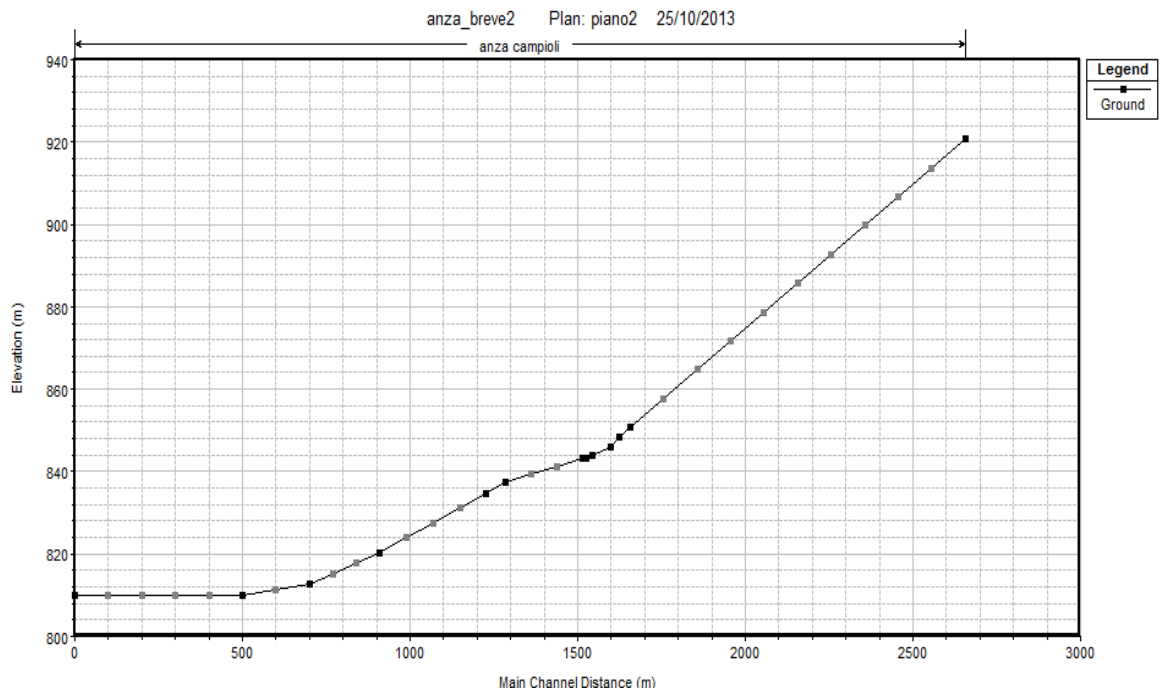


Fig. 3.4 esempio di profilo altimetrico del corso d'acqua idealizzato

Sono state sviluppate una serie di simulazioni in cui vengono fundamentalmente modificate le condizioni al contorno del trasporto solido. Più precisamente nel tratto con pendenza del 4 % si è inserito un movimento gravitativo superficiale avente uno spessore medio di 5 m e un'estensione sul versante pari a 50 m. Considerando la distanza fra una sezione e la successiva sono state eseguite dieci simulazione con un fronte in frana che varia da circa 100 m a 1 km.

Con delle simulazioni di questo tipo si può mostrare l'importanza degli afflussi laterali di materiale solido, mostrando come una frana di dimensioni piuttosto modeste può essere rilevante all'interno di un corso d'acqua.

In questo lavoro sono state svolte una serie di differenti simulazioni sul trasporto solido, che riguardano parecchi casi, e diversi "corsi d'acqua". Inizialmente verrà presentato un caso di un corso d'acqua idealizzato, mentre in seguito si effettueranno delle simulazioni prendendo come esempio il corso del Torrente Anza. Come base per tutte le simulazioni si è sfruttato un tratto del corso dell'Anza di circa 2 km in cui sono state ricavate dodici sezioni, a queste si aggiungono a seconda delle necessità delle interpolazioni in modo da avere risultati alle distanze necessarie e un'analisi più attendibile.

Per tutte le simulazioni svolte, ovviamente è necessario specificare le caratteristiche del materiale solido, si è utilizzata la stessa curva granulometrica sia per il fondo alveo che per il

materiale in ingresso. Questa curva è tipica per del materiale di un alveo torrentizio ed è rappresentata in “Figura 3.5”. Si è anche ipotizzato un peso specifico del materiale pari a 20 kN/m^3 .

Per modellare il trasporto solido è necessario anche valutare la portata da inserire nel software. Come già accennato, usualmente per questi calcoli si utilizzano portate annuali o con pochi anni come periodo di ritorno. Essendo queste simulazioni basate su geometrie delle sezioni prese dal torrente Anza, si è deciso di fare riferimento alle sue portate. Grazie agli annali online dell’ “ARPA Piemonte” è stato possibile individuare le portate dal 2003 al 2009 del torrente, con misurazioni nel comune di Macugnaga. Considerando che questo lavoro non si pone l’obiettivo di svolgere un’analisi idrologica del torrente Anza, sono stati considerati sufficienti questi dati per individuare una portata media annua ed un picco primaverile. Specificatamente la portata minima nelle simulazioni è pari a $3.44 \text{ m}^3/\text{s}$, con un picco di circa due mesi pari a $5.14 \text{ m}^3/\text{s}$. Per agevolare la simulazione come consigliato nel manuale di Hec-Ras e come è logico aspettarsi guardando i dati a disposizione è stata introdotta una portata intermedia di $4.29 \text{ m}^3/\text{s}$ per la durata di circa 36 giorni, riducendo il picco a circa 42 giorni.

Le simulazioni effettuate hanno tutte la durata di circa cinque anni, più precisamente hanno luogo dal 30 dicembre alle 00:00 e calcolano fino al 31 agosto; gli anni (1900, ecc.) riportati nelle simulazioni sono del tutto casuali e dipendono da problemi interni al software Hec-Ras.

Tutti i modelli hanno utilizzato la formulazione di Wong e Parker (Paragrafo 2.3.4) in quanto ritenuta molto affidabile e particolarmente adatta per il corso d’acqua in esame. [Wong e Parker 2006].

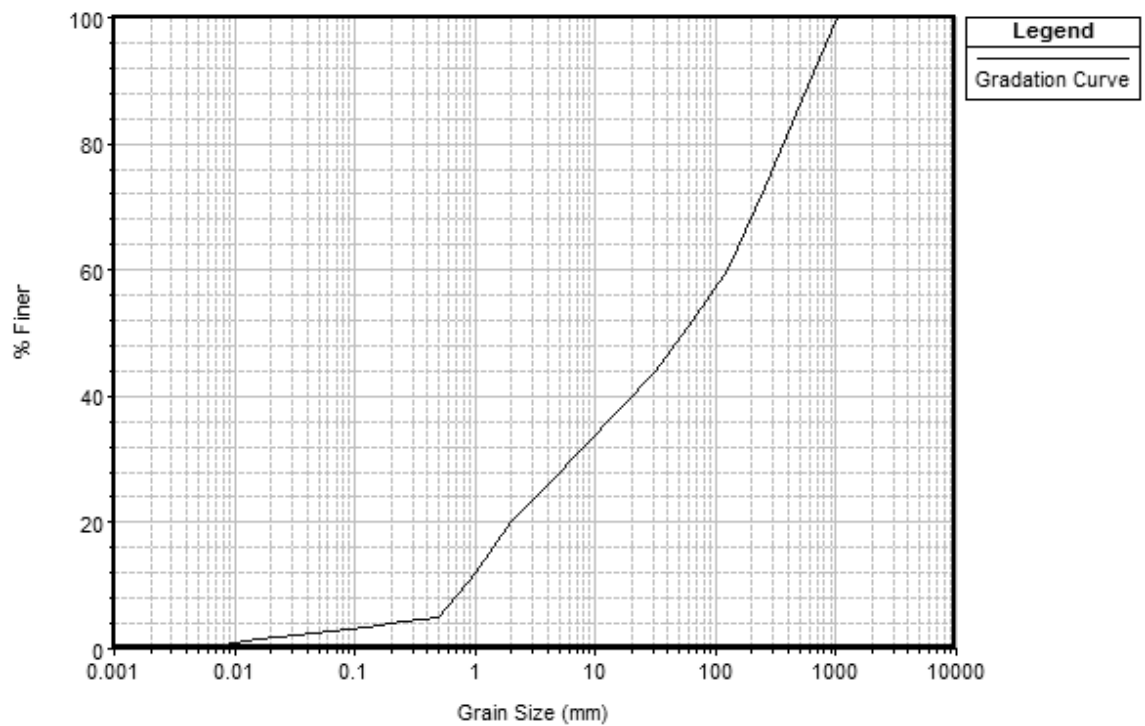


Fig. 3.5 curva granulometrica utilizzata

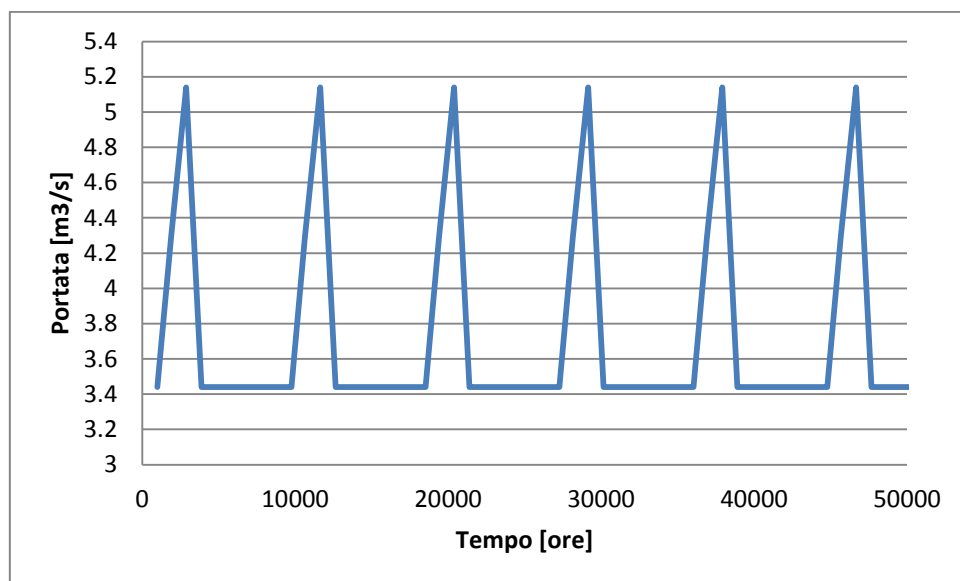


Grafico 3.2: andamento portate nel tempo

3.2.1 Influenza di modeste quantità di materiale solido

Per effettuare questa analisi si è utilizzato il profilo esposto in “Figura 3.7”, in cui sono state inserite una serie di sezioni fittizie, ad una distanza di 2 m una dall’altra, in questo modo si potrà evidenziare confrontando le differenti simulazioni a quale distanza si porteranno i disturbi. Rispetto al profilo proposto in “Figura 3.4” sono state variate leggermente le quote e soprattutto le pendenze.

Innanzitutto è necessario effettuare una simulazione allo stato “naturale”, cioè senza l’aggiunta di disturbi di alcun tipo, una volta individuato il tipo di comportamento del corso d’acqua, è possibile valutare gli effetti dei disturbi.

Il tratto centrale è caratterizzato: da una lunghezza di circa 350 m, da una pendenza di oltre il 3 %, ed è quello al cui inizio verrà introdotto del materiale con delle quantità dell’ordine di grandezza simili a quelle che possono essere causate da un conoide immissario al corso d’acqua. Nello specifico le simulazioni sono state effettuate con delle quantità di materiale solido piccole che partono da 10 m³ annui sino a 50. Si è potuto osservare che quantità maggiori di materiale solido hanno ripercussioni superiori a questa distanza, di seguito si mostrerà l’influenza di questi materiali.

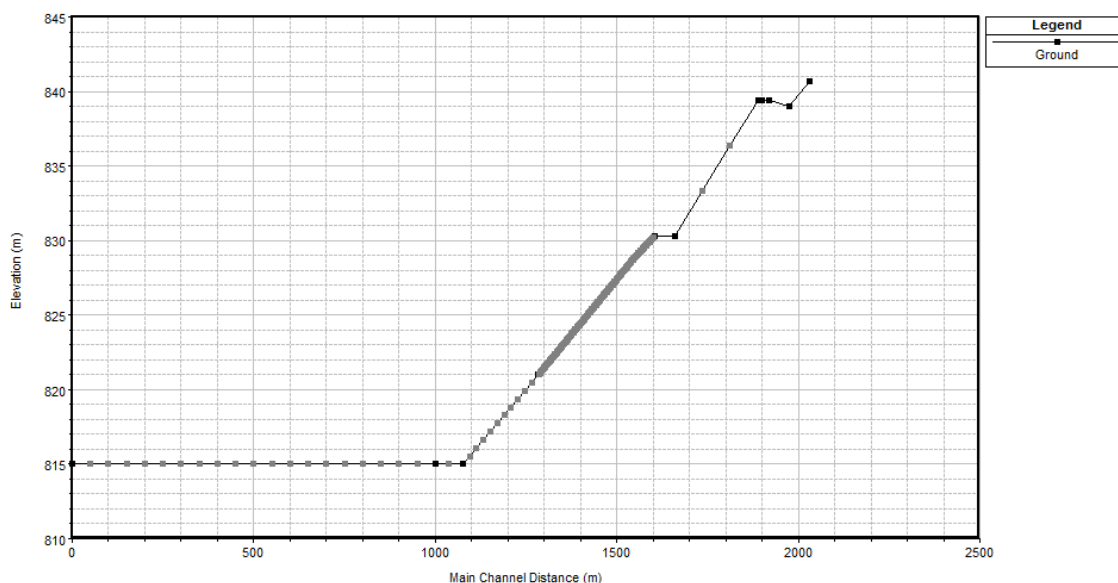


Fig. 3.7 profilo altimetrico del corso d’acqua

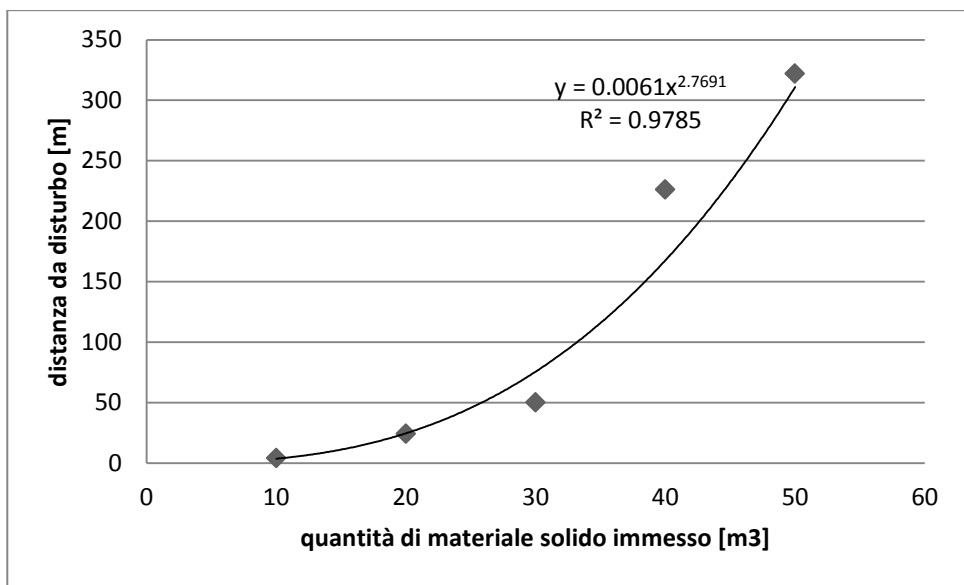


Grafico 3.3: relazione fra materiale immesso e distanza del disturbo

Nel “Grafico 3.3” si può osservare la distanza a cui arriva il disturbo, rispetto al normale comportamento del trasporto solido, al variare del volume immesso. Si evince facilmente che l’andamento è tutt’altro che lineare, infatti come riportato segue una legge di potenza con una buona precisione anche dal punto di vista statistico. Sarebbe possibile anche utilizzare una polinomiale di secondo grado, anche se con questi dati fornirebbe un rapporto “R quadro” inferiore.

La dispersione dei punti intorno alla linea può essere dovuta da numerosi fattori, difatti l’andamento individuato è del tutto empirico, i dati sono simulati su un caso verosimile e non in un alveo cilindrico, inoltre non esiste una formula in letteratura per valutare la distanza a cui si porta del materiale solido introdotto come in questo esempio. Bisogna anche ricordare la difficoltà nel individuare una formulazione generale per questi problemi data la grande quantità di variabili da considerare che possono distinguere un corso d’acqua da un altro. Considerando queste problematiche è lecito affermare che l’andamento è approssimato bene dalla legge di potenza riportata in “Figura 6.5”.

Sapere la distanza a cui si ripercuote l’immissione di materiale all’interno di un corso d’acqua può avere importanti effetti pratici, legati, in particolar modo, alle scelte di tipo gestionale ma anche di protezione civile. Difatti sapere la distanza a cui si possono propagare i sedimenti di una frana può permettere di scegliere più facilmente le azioni da intraprendere per il ripristino della normalità, e può aiutare a scegliere in fase di pianificazione eventuali opere per la sicurezza di infrastrutture.

3.2.2 Materiale da frana in alveo

Nelle seguenti simulazioni, si utilizza il profilo altimetrico presentato in “Figura 3.7”, con sezioni interpolate ogni 20 m di distanza massima, e a partire dal cambio di pendenza per ogni sezione sarà prevista una frana. Ogni simulazione avrà una sezione in più con terreno franoso in ingresso in alveo, fino a raggiungere 1 km.

Sarà modellizzata una frana di scivolamento superficiale di modeste dimensioni, 5 metri di spessore per un estensione di 50 m in direzione ortogonale al corso d’acqua. Date le precedenti due misure e la distanza fra le sezioni è possibile individuare il volume di terreno coinvolto, che avrà le caratteristiche presentate precedentemente, in questo modo si individuerà il peso come richiesto dal software Hec-Ras. Le sezioni interessate da franamento del versante laterale sono quelle a partire dalla numero 2.

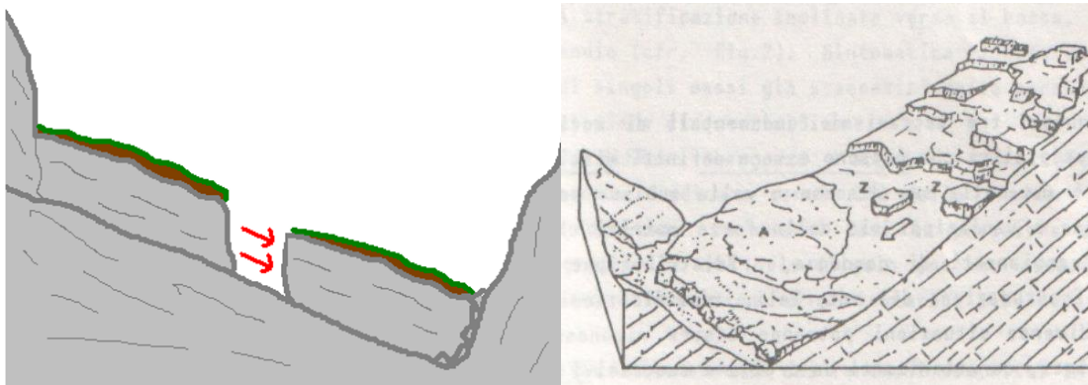


Fig. 3.7 schemi di scivolamento superficiale

Questo tipo di frane sono molto frequenti su pendii con pendenze elevate e spessori di terreno instabile abbastanza limitati, inoltre sono fortemente condizionate dalla presenza di acqua, conseguentemente la presenza di un corso d’acqua al piede può agevolare lo scivolamento.

Nelle simulazioni in esame, le frane saranno caratterizzate da un movimento piuttosto lento, difatti per rilasciare tutto il materiale interessato nel corso d’acqua impiegano un anno intero. Questo serve anche a evitare che si creino degli sbarramenti, infatti considerata la limitata dimensione delle sezioni, già con modeste quantità di solidi se rilasciate istantaneamente si potrebbero occludere.

Il materiale in alveo come facilmente intuibile tenderà a distribuirsi lungo il corso d’acqua portando a un appiattimento delle pendenze del fondo alveo, questo comporta che per grandi quantità di materiali le sezioni a valle della frana tendano comunque a riempirsi interamente di detriti, questo impedisce una corretta conclusione della simulazione a meno di non diminuire i volumi coinvolti. Data la velocità molto bassa di inserimento dei detriti in

alveo, la quantità di materiale necessario a intasare una sezione è comunque considerevole, difatti è di circa 35000 m³.

Nel “Grafico 3.4” si nota come al variare del materiale rilasciato in alveo si modifichi l’erosione e la deposizione dell’alveo. La figura in questione rappresenta la variazione del fondo alveo espressa come situazione “normale” a cui viene sottratta la quota del letto a seguito di un’analisi di cinque anni. Conseguentemente un valore positivo indica un abbassamento della quota del fondo. Sono presentate tre differenti analisi, delle cinque disponibili prima della saturazione dell’alveo, il numero con cui sono indicate corrisponde al numero di sezioni interessate da frana.

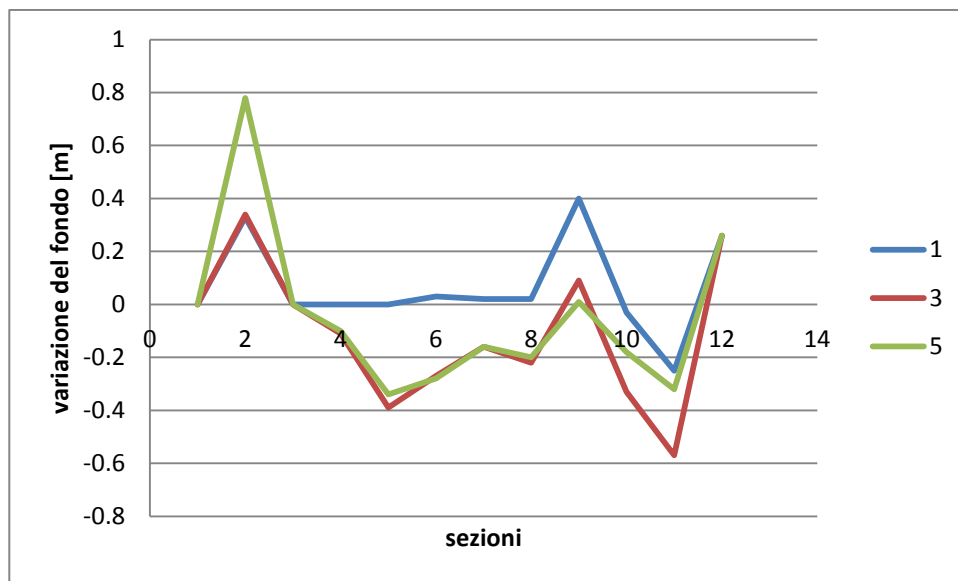


Grafico 3.4: variazione dell’alveo con frane

Si può notare come l’apporto di materiale inizialmente comporta un aumento di erosione anche importante, mentre successivamente si ha una maggiore deposizione a eccezione della sezione 9, che è quella in cui si ha l’appiattimento della pendenza dell’alveo, l’erosione in quel punto è legato proprio alla quantità di materiale depositato a monte e cerca di completare il livellamento dell’alveo.

Se si osserva (Grafico 3.5 e 3.6) un ingrandimento dei profili, in particolar modo del tratto finale del corso d’acqua considerato, si può notare proprio come l’introduzione del materiale in alveo tenda a aumentare l’effetto erosivo e di deposito, portando ad una regolarizzazione delle pendenze dell’alveo. Nella prima figura si può notare questo andamento nel caso di una frana limitata alla prima sezione (8000 m³), mentre nella seconda è rappresentato il caso limite prima dell’occlusione delle sezioni (35000 m³).

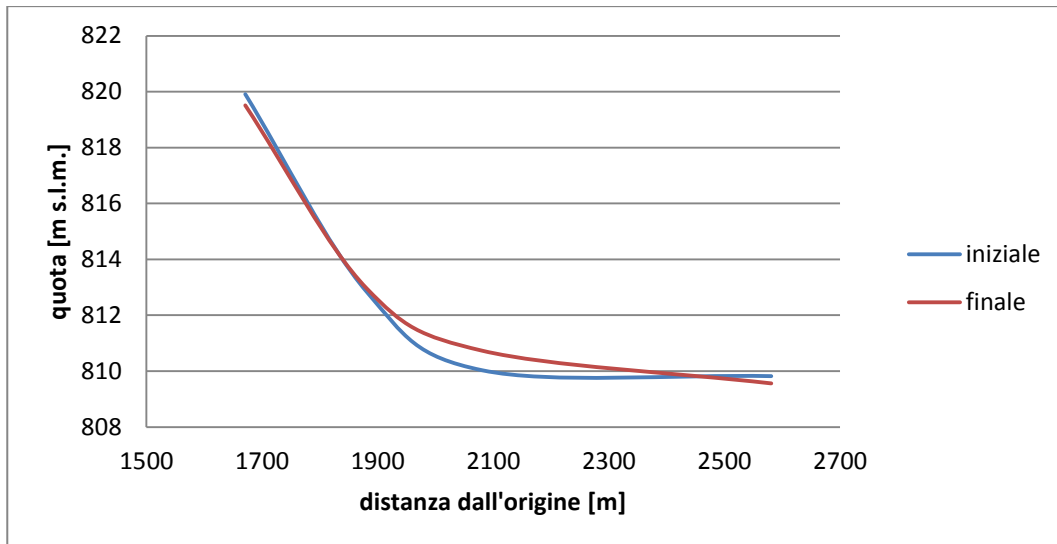


Grafico 3.5: variazione del profilo con frana da 8000 m³

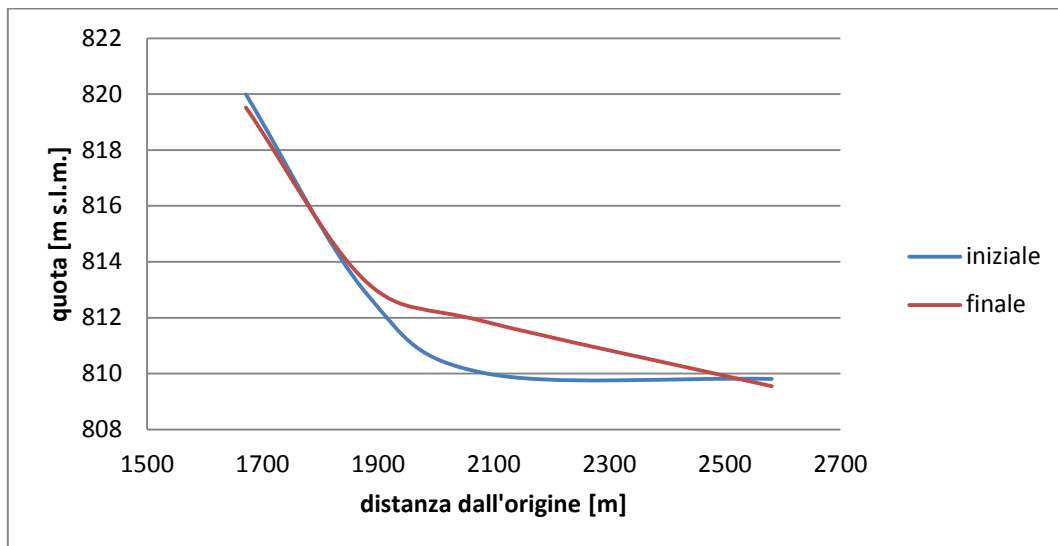


Grafico 3.6: variazione del profilo con frana da 35000 m³

Le simulazioni utilizzate calcolano l'erosione del corso d'acqua in assenza di attriti laterali per un anno, e successivamente viene introdotta la frana. Nel "Grafico 3.6" si può notare come nella sezione iniziale della frana, il trasporto comincia con erosione, in seguito allo scivolamento invece vi è un innalzamento del fondo alveo, seguito da una successiva erosione del materiale depositato. Trattandosi della sezione iniziale della frana varia piuttosto poco all'aumentare del materiale solido caduto in alveo, questo non è vero se si prende in considerazione un tratto più a valle.

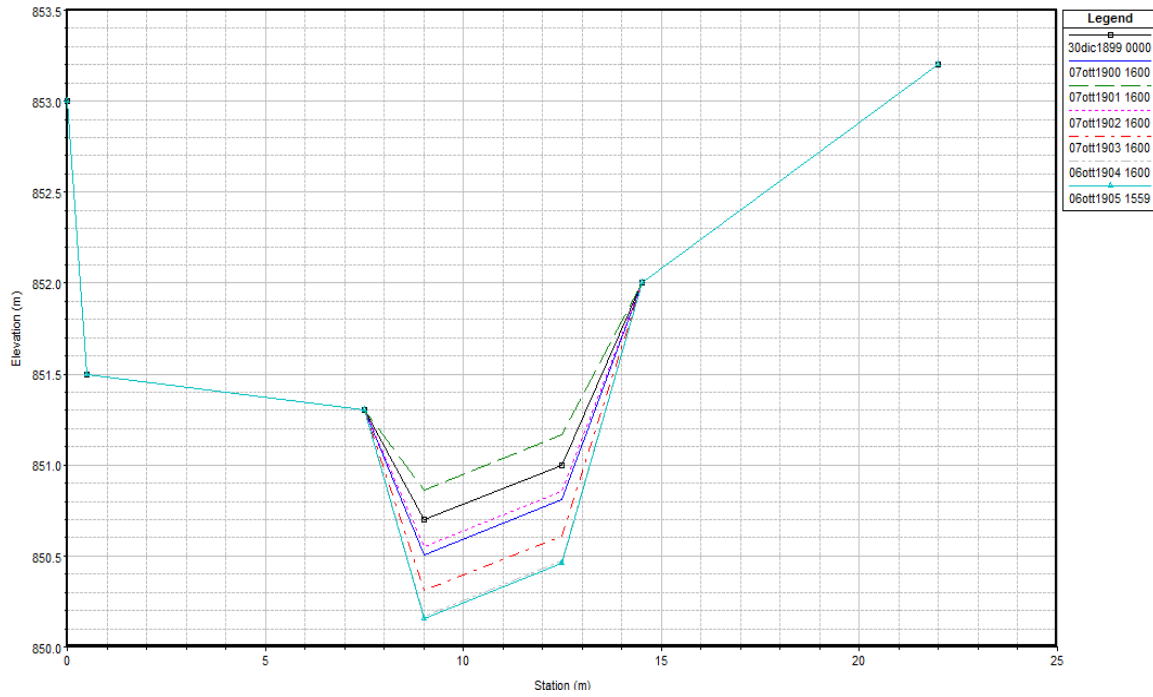


Fig. 3.8 evoluzione della sezione 2 con frana di 8000 m³

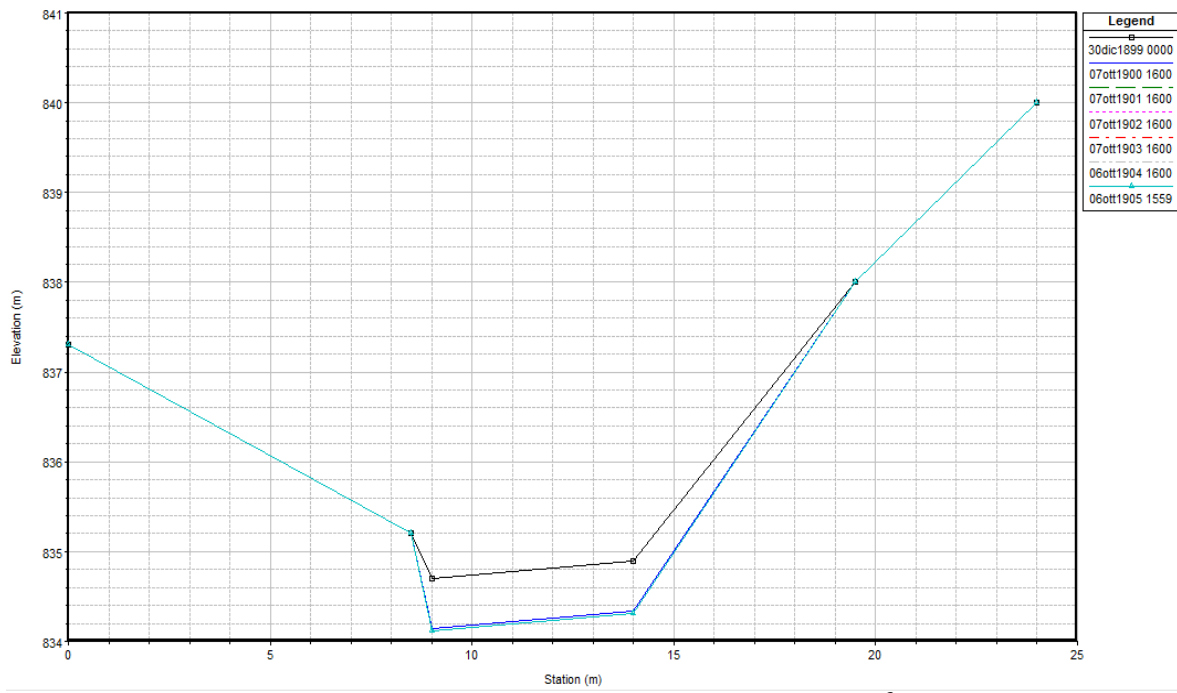


Fig. 3.9 evoluzione della sezione 8 con frana di 8000 m³

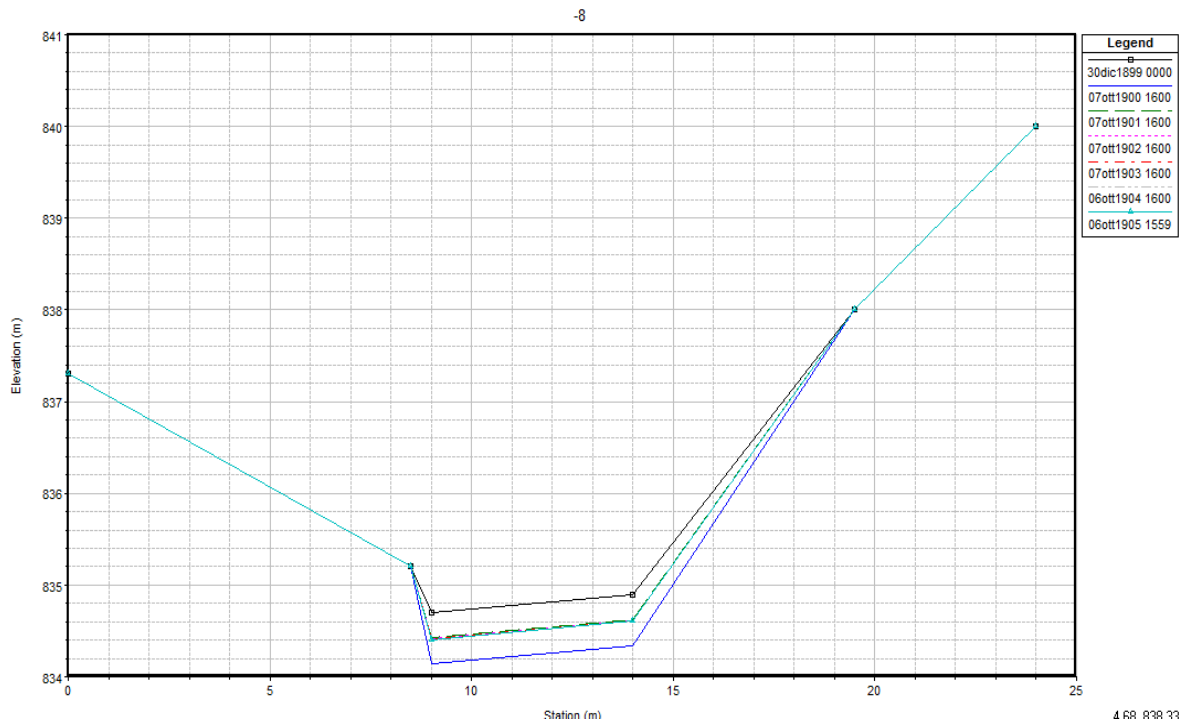


Fig. 3.10 evoluzione della sezione 8 con frana di 35000 m³

Nella “Figura 3.10” si osserva come a seguito di un’iniziale erosione, nel caso di frana importante si verifichi un deposito di materiale, cosa che non accade con quantità modeste di materiale solido.

In origine si era preventivata una frana che arrivasse un 1 km di estensione lineare, con un volume pari a 250000 m³ ma le sezioni sono risultate già intasate con una frana molto minore. Per poter vedere cosa succede con una frana di dimensioni così grandi è necessario innalzare le sponde delle sezioni, così facendo si è provato a simulare anche frane molto più grandi.

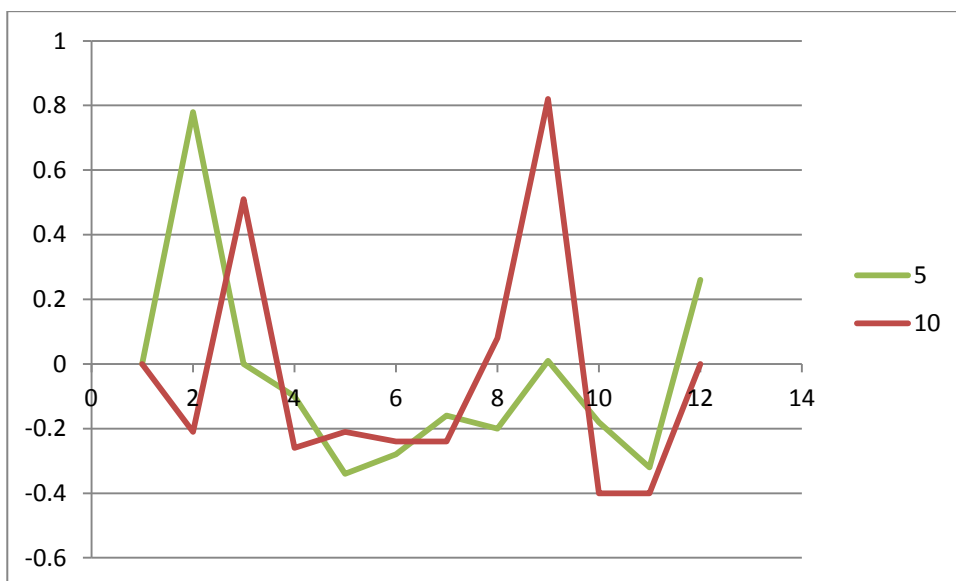


Grafico 3.7: variazione dell'alveo normalizzato sul caso senza frane

Si osserva facilmente (Grafico 3.7) che nel caso di frana di frana da 250000 m³ i fenomeni di erosione e deposizioni sono molto accentuati e raggiungono livelli elevati. In particolare a seguito del cambio di pendenza aumenta il livello di deposito. Questi valori sono però fin troppo esagerati e perdono fini pratici, in quanto nella realtà occluderebbero il corso d'acqua generando una diga naturale, che a sua volta potrebbe dar vita a una colata detritica. Quindi nonostante sia un fenomeno plausibile e molto pericoloso richiederebbe un altro tipo di modellazione.

In questo paragrafo si è mostrato come le frane in alveo influenzino in maniera molto importante l'evoluzione del corso d'acqua e siano importanti per sapere le quantità di materiali movimentate.

Valutazione del comportamento tramite approssimazioni polinomiali

Nel Paragrafo precedente è possibile osservare come il profilo del corso d'acqua si modifichi con l'immissione di frane in alveo. Si può facilmente notare come i profili, sono approssimabili con delle polinomiali di secondo grado.

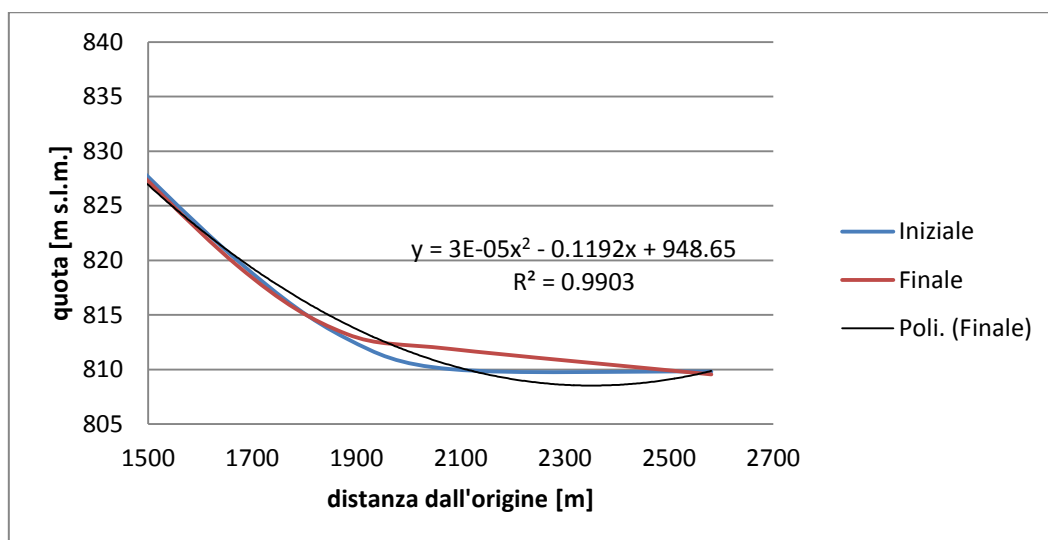


Grafico 3.8: esempio di approssimazione con linea polinomiale

Rappresentando la funzione polinomiale come segue:

$$ax^2 + bx + c = y \quad (3.1)$$

È possibile effettuare un breve studio su differenti casi per cercare un qualche tipo di collegamento fra i coefficienti della polinomiale e i casi fisici presi in esame.

Al fine di individuare un andamento prevedibile nei coefficienti sono state svolte differenti simulazioni Hec-Ras modificando le quantità di materiale franante nell'alveo e le portate liquide del corso d'acqua. In particolare la portata liquida è stata variata fra i $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ e i $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Le quantità di materiale franante, sono state modificate passando dai 4000 m^3 ai 100000 m^3 con undici step, per permettere di individuare un andamento ben rappresentabile dei coefficienti.

Effettuando le simulazione citate è stato possibile osservare come il coefficiente "a" vari solo con la portata, mentre resti costante al modificarsi delle quantità di materiale frananti in alveo, invece gli altri due parametri risentono di entrambi i mutamenti. In ogni caso la portata comporta modificazioni più significative nei parametri, rispetto a quanto non si riscontri per il materiale. Dai risultati ottenuti si può notare come all'aumentare della portata i coefficienti "a" e "b" tendano a diminuire il loro valore, questo è anche fisicamente spiegabile con il logico fenomeno che maggiori portate comportano un minor deposito e conseguentemente una variazione più piccola rispetto alla situazione iniziale. Questo non avviene con il coefficiente "c" che però è slegato alla variabile del materiale e aumenta con la portata seppur di poco.

Nel "Grafico 3.9" vengono riportati i valori dei coefficienti "b" e "c" per la portata pari a $3.44 \text{ m}^3/\text{s}$, al variare del materiale franante in alveo, si nota come anche il loro andamento sia abbastanza ben rappresentabile con una polinomiale di secondo grado. Per questa portata il coefficiente "a" risulta pari e costante a $2.0\text{e-}5$.

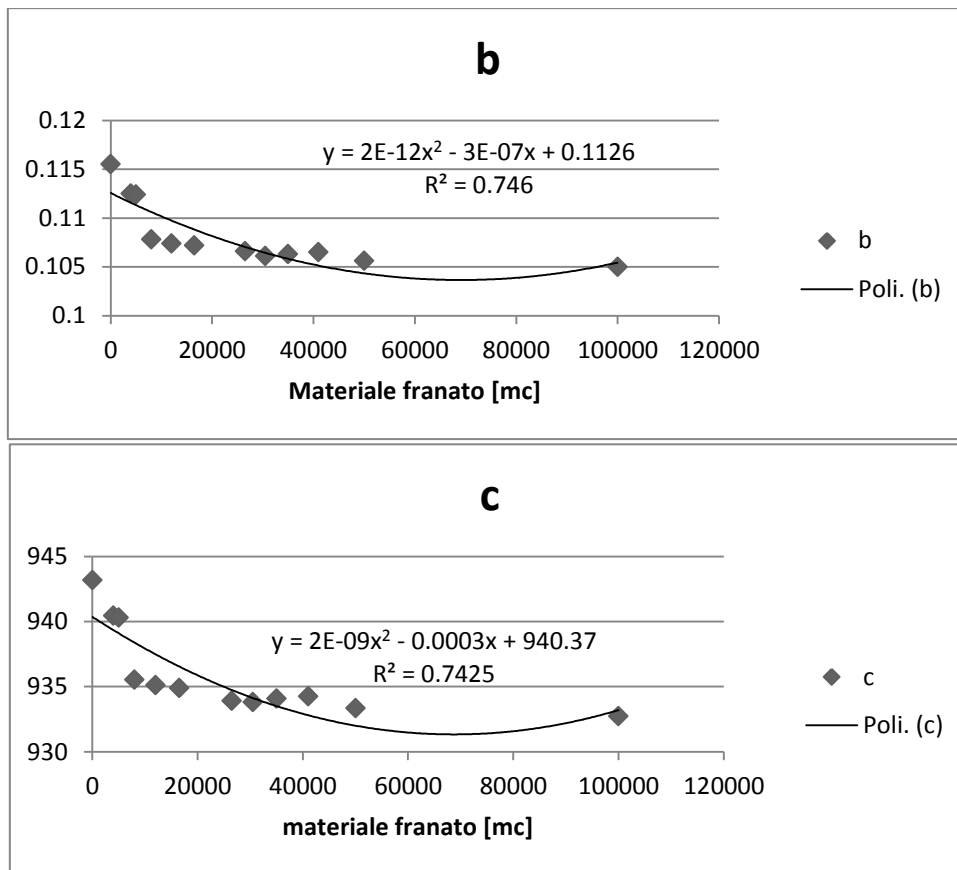


Grafico 3.9: variazione dei coefficienti "b" e "c" per portata pari a 3.44 m³/s

Questi modelli risultano anche abbastanza robusti, infatti non risentono di variazioni troppo piccole sia di portata che nelle quantità dei materiali, conseguentemente nel range di portate considerate, che sono anche quelle più probabili per il torrente Anza, è stato possibile valutare tre livelli. Questo ovviamente non costituisce un campione statistico in grado di fornire risultati estendibili a casi al di fuori di quello utilizzato e calibrato, ma forniscono ugualmente un'idea sul comportamento dei vari fattori considerati.

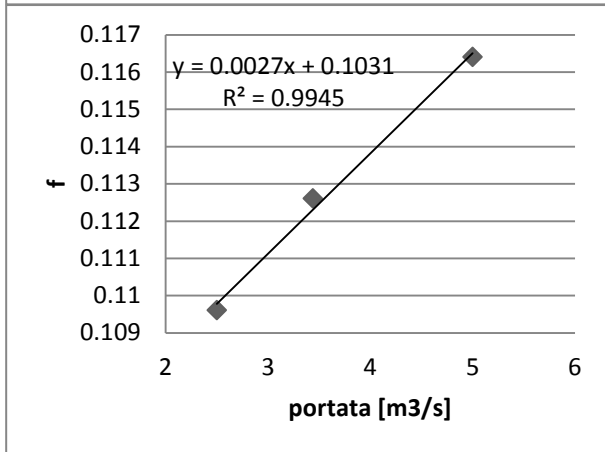
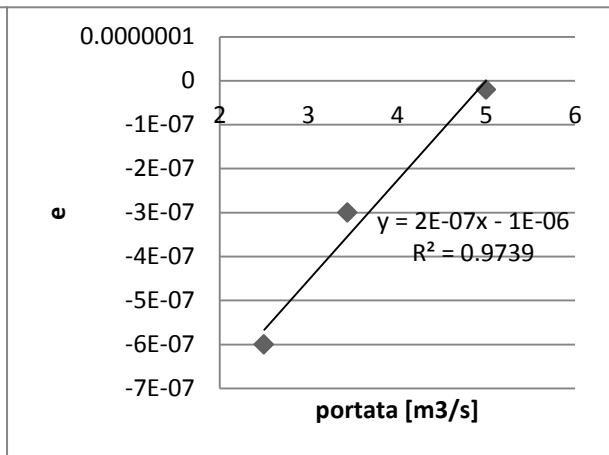
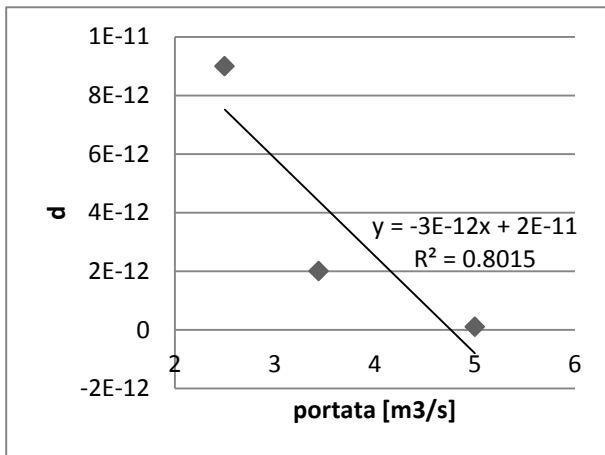
L'evoluzione dei parametri, come già scritto, è a sua volta approssimabile con una polinomiale di secondo grado, nei grafici successivi sarà possibile osservare come variano i loro coefficienti.

Per evitare confusioni la polinomiale riguardante i coefficienti sarà rappresentata nel seguente modo:

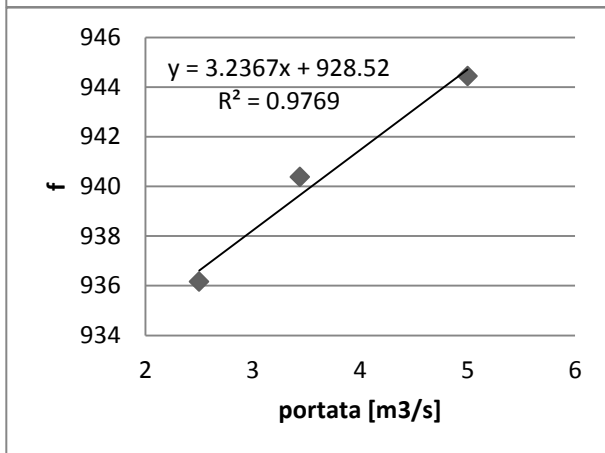
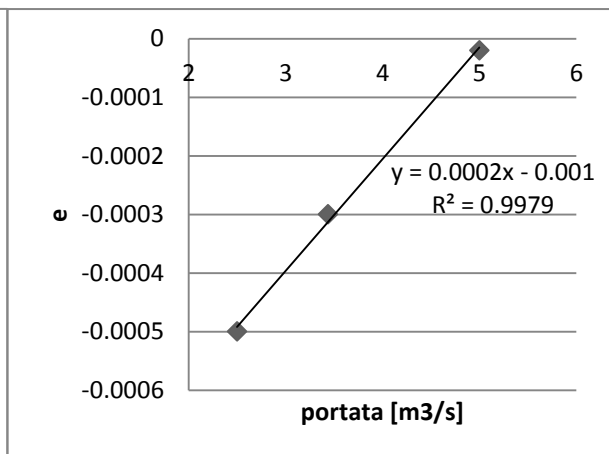
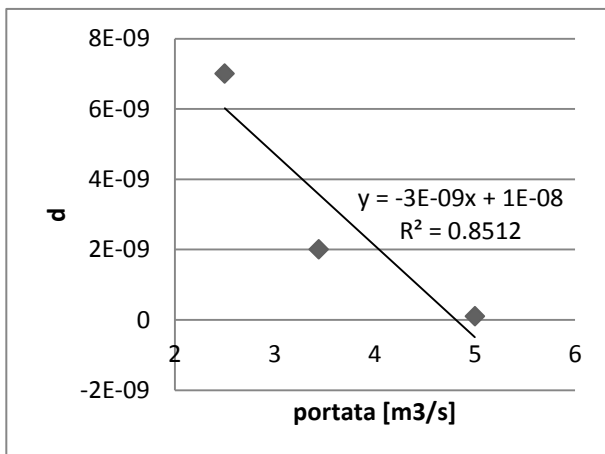
$$dx^2 + ex + f = y \quad (3.2)$$

Questi calcoli, mostrano come un modello adeguatamente calibrato può portare a prevedere l'evoluzione di un profilo, seppur in prima approssimazione, tramite il semplice calcolo di una polinomiale, i risultati così ottenuti non sono certamente utilizzabili a fini progettuali, ma come idea di massima sull'evoluzione possono risultare utili e molto speditivi, anche se questo prevede uno studio precedente del corso d'acqua e

conseguentemente la disponibilità di dati tali da poter utilizzare modelli più complessi e con maggiore precisione, ma più lenti. Calcoli molto speditivi, possono permettere di individuare per quali corsi fluviali può essere interessante approfondire gli studi a causa di un anomalo apporto di detrito non spiegabile dalla sola portata liquida, ma da ricondurre a importanti ingressi laterali.



Grafici 3.10: variazione dei coefficienti "d" "e" e "f" della polinomiale rappresentante l'andamento del coefficiente "b"



Grafici 3.11: variazione dei coefficienti "d" "e" e "f" della polinomiale rappresentante l'andamento del coefficiente "c"

3.2.3 Restringimento dell'alveo

Queste simulazioni utilizzano il medesimo profilo riportato in “Figura 3.7”, ma senza aggiungere del detrito solido in immissione nell'alveo. Lo scopo è quello di inserire un ostacolo al centro della sezione 6. Questo ostacolo può rappresentare varie cose, la pila di un ponte, piuttosto che un'un'isola fluviale non erodibile o un grosso masso. Le simulazioni cambiano la misura di questa ostruzione da una larghezza in sezione di 1.5 m sino a 0.3 m.

Un restringimento della sezione, a parità di portata comporta un'accelerazione della corrente, questo causa un'erosione aggiuntiva a valle dell'ostacolo. Nel caso di ostruzione di 1.5 m questo fenomeno è molto visibile, mentre come prevedibile si riduce con il rimpicciolimento dell'ostruzione.

Nel Grafico “3.12” è possibile notare il tratto finale del corso d'acqua interessato dal restringimento, si nota come un ostacolo di 1.5 m aumenti notevolmente l'erosione, al contrario in quel tratto per barriere di dimensioni piccole l'altezza del fondo alveo aumenta, infatti l'erosione è concentrata nel tratto più a monte e a quella distanza inizia la deposizione.

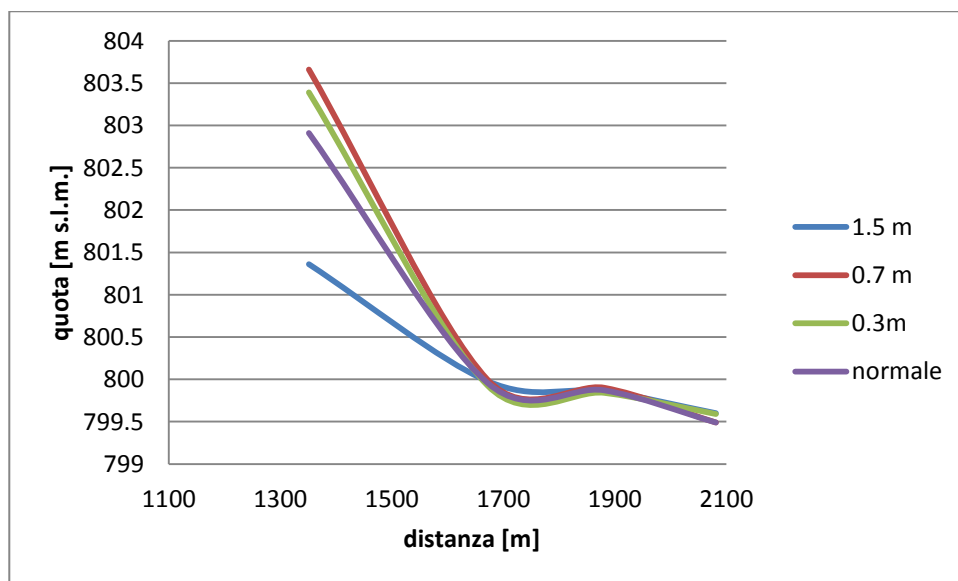


Grafico 3.12: ingrandimento del tratto finale del profilo in legenda le dimensioni dell'ostacolo

Infatti il tratto di erosione aumentata legato all'ostacolo cambia di circa 180 m fra i due casi con “barriera” di 0.7 e 0.3 m, mentre con 1.5 m l'erosione si protrae sino a 880 m a valle. Inserendo questi dati in un grafico è possibile notare che in questo caso, con i dati utilizzati, è possibile individuare una linea di tendenza che approssima molto bene i risultati ottenuti, di tipo polinomiale di secondo grado (Grafico 3.8).

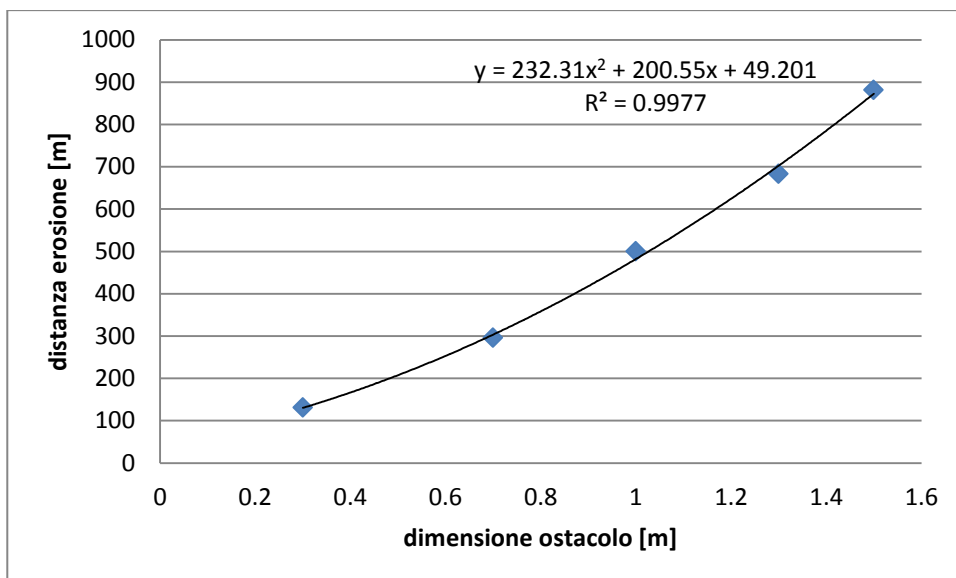


Grafico 3.13: distanza dell'erosione aumentata dovuta ad un ostacolo posto al centro della corrente

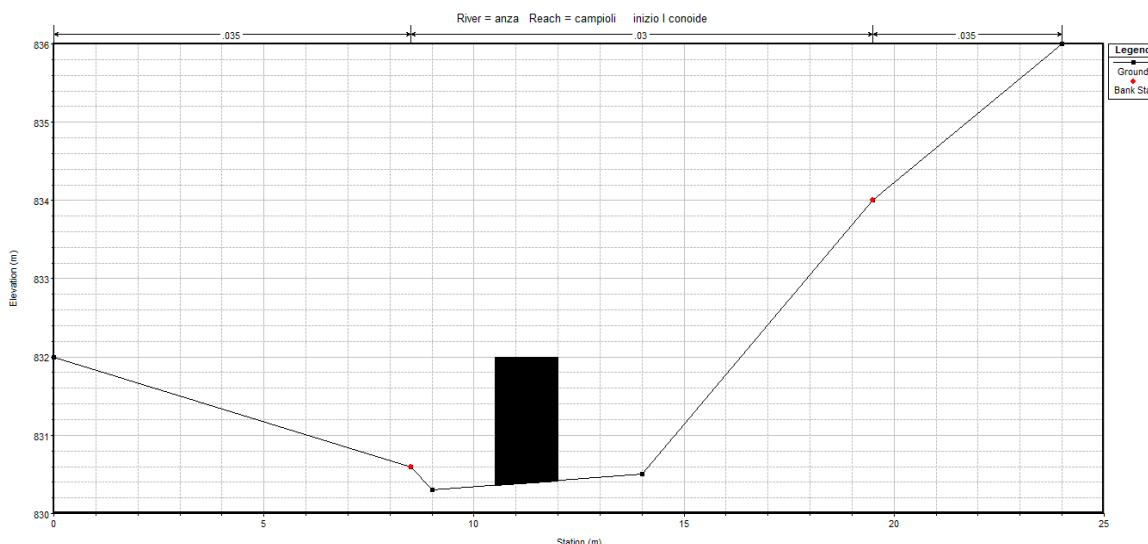


Fig. 3.11 sezione con ostruzione di 1.5 m di larghezza

Nelle "Figure 3.12 e 3.13" è possibile osservare la sezione 7, collocata a 50 m dall'ostruzione che presenta lo stesso identico andamento di erosione, ma con 50 cm di differenza fra le due situazioni. Questo è spiegabile proprio con il fenomeno già citato di accelerazione della corrente a causa del restringimento.

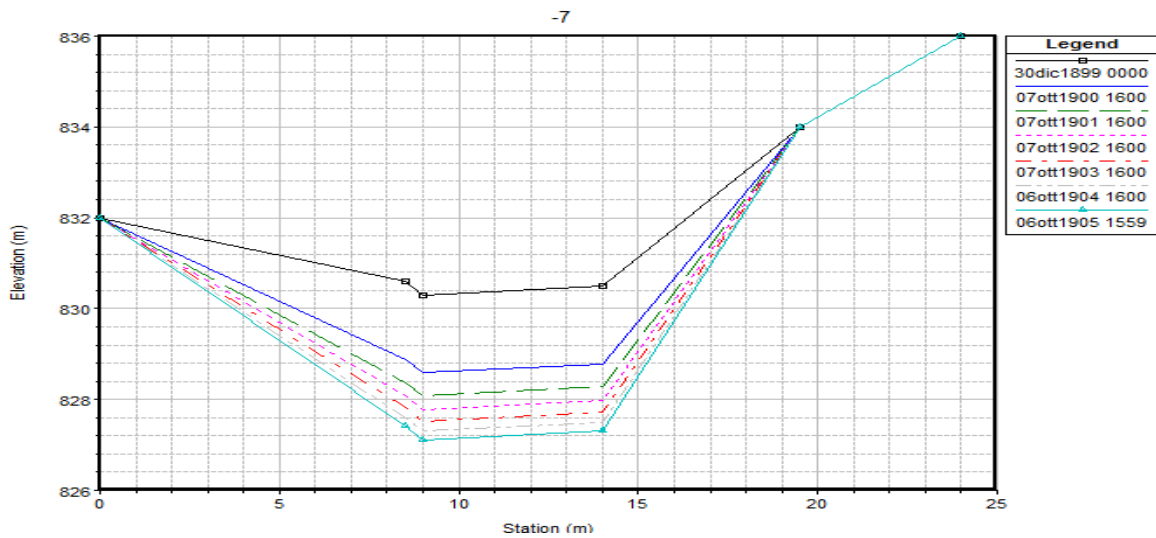


Fig. 3.12 erosione nella sezione 7 senza ostruzioni

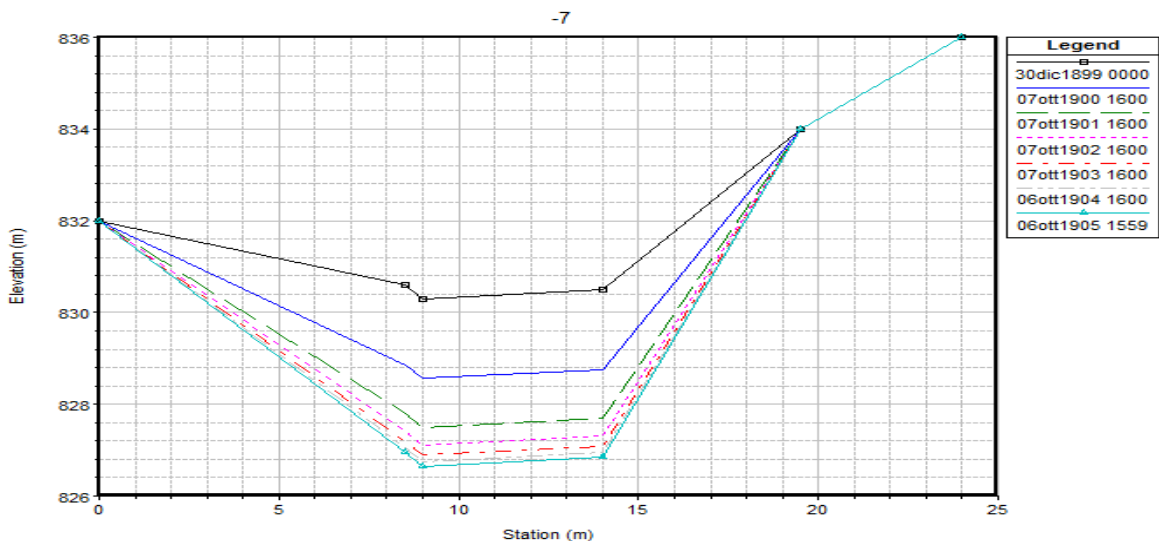


Fig. 3.13 erosione nella sezione 7 con ostruzione a monte di 1.5 m

La nascita di ostacoli lungo l'asta fluviale è fondamentale per poterne valutare l'evoluzione, purtroppo un modello monodimensionale come Hec-Ras non permette una perfetta modellazione degli ostacoli, a meno che questi non siano impermeabili e non erodibili, altrimenti sarebbe necessario ricorrere a software bidimensionali i quali richiedono una quantità di dati in ingresso notevolmente maggiore.

3.2.4 PRESENZA DI UN LAGO

In un gran numero di fiumi e torrenti alpini (ma non solo) sono presenti laghi artificiali lungo il corso d'acqua. Questi laghi non sono altro che dei tratti quasi pianeggianti in cui si accumula acqua per i più differenti scopi, da quello idroelettrico, a quello agricolo, potabile o altri. In questi piccoli bacini lacustri, come da definizione, la velocità della corrente risulta molto bassa, favorendo la deposizione di tutti i detriti erosi dal corso d'acqua più a monte. I laghi naturalmente sono destinati all'interrimento, questo però precluderebbe il loro utilizzo anche solo a fini ricreativi, tanto più causerebbe grossi danni economici per altri scopi. Uno dei principali problemi dei bacini artificiali italiani è proprio l'interrimento, che può arrivare a essere irreversibile e impedire un corretto sfruttamento del lago.

In queste simulazioni si è ipotizzato la presenza di un lago alla fine del tratto considerato, per poter osservare quanto materiale solido giungerebbe nei vari casi, favorendo l'interrimento del bacino. Per effettuare questi confronti si è utilizzato il profilo presentato in "Figura 3.14" inserendo delle sezioni interpolate poste a 50 m l'una dall'altra in modo da velocizzare la simulazione e l'ottenimento dei risultati.

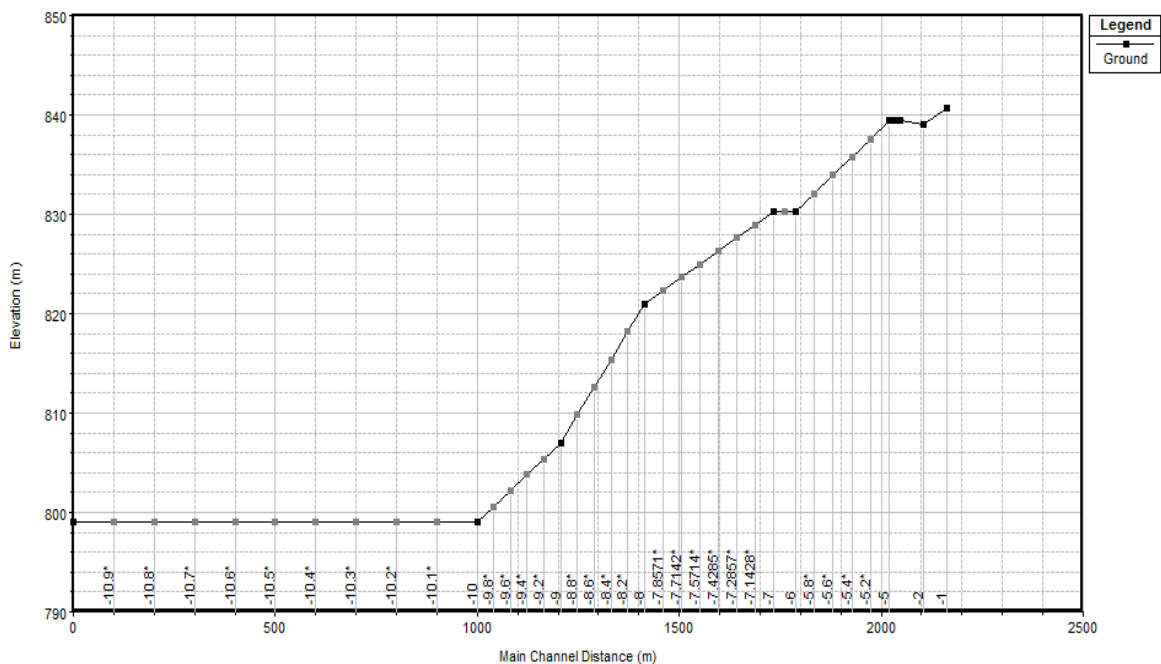


Fig. 3.14 profilo utilizzato per il calcolo dei sedimenti in arrivo in un lago

In questo profilo le pendenze variano fra il 3 % e il 6 % con una media intorno al 3.5 %, escludendo ovviamente la parte pianeggiante caratterizzata dal "lago"; quest'ultimo è modellato come uno slargamento consistente della sezione con pendenza pressoché nulla; non è stata inserita alcuna opera di sbarramento alla fine del tratto considerato in simulazione.

Ricordando quanto scritto nel “Paragrafo 3.1-Analisi di Trasporto Solido” è possibile capire come il materiale venga depositato in una sezione da Hec-Ras, questo permette di andare a calcolare il volume in ingresso al lago, una volta nota la variazione della sezione d’interesse, risultato fornito dal software.

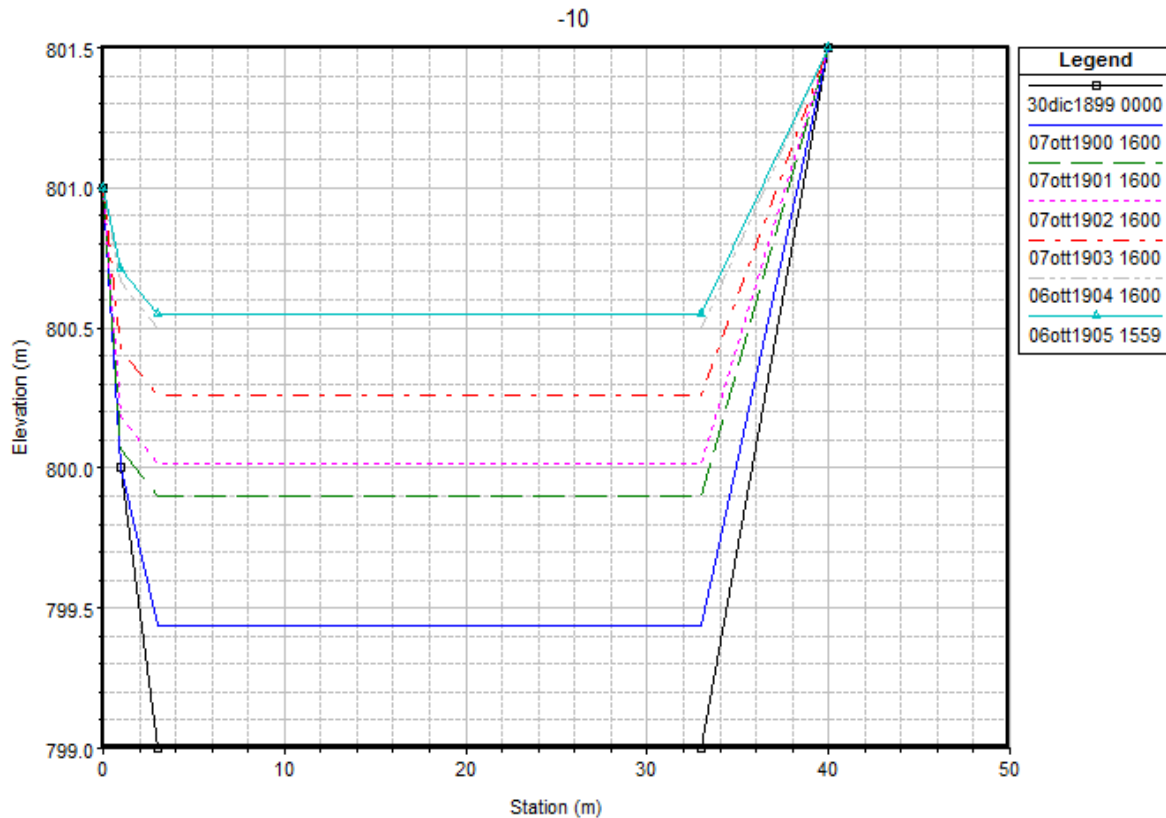


Fig. 3.15 variazione della sezione di ingresso al lago

La presenza di un lago comporta la raccolta di tutto il materiale trasportato che a causa delle ridottissime velocità dell’acqua nel bacino viene depositato. Questo fenomeno avviene sia in bacini naturali che artificiali e questo può causare problemi di vario tipo, anche economici. Per quanto riguarda gli aspetti puramente calcolatori, invece, un lago è molto utile per stimare le quantità di materiale trasportato dal fiume stesso. A monte del lago il trasporto solido non risente della sua presenza a meno che questi non modifichi i profili di corrente.

Tramite l’utilizzo del software Hec-Ras si è mostrato come i fattori che possono influire sul trasporto solido siano numerosi, alcuni anche difficili da controllare e strettamente connessi, infatti lo scivolamento di frane in alveo può anche portare alla nascita di restringimenti dell’alveo, sia in materiale erodibile che non come dei grossi massi. Si è potuto osservare proprio come un restringimento d’alveo comporti un eccesso di erosione a valle dell’ostacolo, materiale che però deve essere depositato con conseguenti problemi di sovralluvionamento.

È stato evidenziato come l'ingresso di materiale solido in alveo che provenga da conoidi secondari e sia di modeste entità o che sia originato da frane modifica comunque il trasporto solido a valle dell'immissione. Ovviamente maggiore è la quantità di materiale e più l'alveo ne risente, sino ad arrivare alla condizione limite di occlusione della sezione e formazione di una diga naturale. Le variazioni del profilo fluviale, si è mostrato sono ben approssimabili con delle polinomiali di secondo grado i cui coefficienti devono essere opportunamente calibrati sul corso d'acqua ma che una volta individuati permettono di stimare l'evoluzione del profilo a seguito di un evento franoso in maniera molto rapida seppur approssimata.

Si è mostrato come la presenza di un lago comporti il deposito di tutto il materiale trasportato e che se influenzato dai fenomeni sopra citati può essere molto importante e compromettere la funzionalità del bacino sia esso artificiale o naturale. In compenso come verrà presentato di seguito permette la stima del materiale trasportato dall'alveo e conseguentemente la valutazione dei modelli realizzati.

Stima del trasporto solido

Svolgendo le simulazioni con l'aggiunta di materiale in ingresso laterale alla sezione 7, si può notare come in realtà al lago la quantità di materiale in arrivo risulti essere circa sempre la stessa, con variazioni minime. Al medesimo tempo si notano variazioni lungo il tratto d'alveo compreso fra l'immissione e il lago, questo spiega la costanza del risultato nel punto d'osservazione scelto. A causa anche della geometria, prima di avere variazioni significative nell'ingresso del bacino lacustre, si ha un occlusione della sezione in cui viene immesso il materiale, una diga naturale così formata impedisce una corretta valutazione del trasporto solido con la teoria presentata in precedenza.

Grazie alle analisi svolte, come spiegato precedentemente, è possibile stimare la quantità di materiale solido in deposito all'imbocco del lago in circa 3600 m³ in cinque anni. Dalla "Figura 3.15" si nota come l'innalzamento del fondo e quindi l'apporto di materiale non sia costante per ogni anno, nonostante non siano presenti disturbi esterni al trasporto solido, è però necessario considerare che non esiste alcun valido motivo per considerare il tratto del corso d'acqua in equilibrio, conseguentemente è normale che il fiume si modelli per giungere a quello stato, e questo non è un processo costante e uniforme.

Tramite Hec-Ras è stato possibile osservare come variava il deposito di materiale nella sezione di controllo nei differenti casi calcolati, al fine di verificare la diversità dei risultati e osservare come varino i volumi in base alle differenti situazioni.

Tab. 3.1: Volume di materiale depositato in cinque anni nella sezione di controllo al variare dei casi

Caso	Materiale entrante [m³]	Volume depositato [m³]
Restringimento della sezione	0	2620
Frana di 8000 m ³	8000	1630
Frana di 35000 m ³	35000	3510
Presenza di due conoidi laterali	500 all'anno	1270
Presenza di lago a Valle	0	3600

È necessario ricordare come il tratto di torrente considerato sia ancora piuttosto vicino alla sorgente e conseguentemente questi valori seppur non elevatissimi risultano molto significativi. Si può notare come il valore vari in base ai casi simulati, il valore più alto coincide con quello stimato in presenza di lago, infatti in questo caso nessun tutti i sedimenti vengono depositati a causa del rallentamento della corrente. Bisogna anche precisare come questi valori siano fortemente influenzati da cosa succede a monte, da quanti tratti di deposito o erosione vengono a crearsi, non possono certamente rappresentare l'intero fenomeno di trasporto.

CONCLUSIONI

L'evoluzione dell'alveo dei corsi d'acqua può essere prevista in base alle portate e all'entità del trasporto solido. In questo studio si sono voluti approfondire gli altri fattori che possono determinare variazioni nella sezione di flusso e nella forma dell'alveo, esaminando in particolare le conseguenze di un apporto di materiale solido derivante da corsi d'acqua laterali e da frane. Si sono quindi sperimentate, con l'utilizzo di alcune relazioni analitiche dedotte dall'applicazione degli studi che compaiono in letteratura e con l'impiego di un codice di calcolo, alcune metodologie per capire come si possono generare gli apporti solidi al fiume.

Il metodo presentato per la soluzione del problema proposto si compone di diverse fasi, delle quali la prima comprende la valutazione della variazione del carico piezometrico in funzione dell'idrometria nel corso di una piena applicando le relazioni derivanti dalla teoria di Pinder(1959), ad esempio quella di Carslaw e Jaeger (1969).

Viene successivamente calcolata la variazione della piezometria in funzione dell'infiltrazione derivante dalle precipitazioni atmosferiche , con l'applicazione delle relazioni di Hong e Wan (2010).

Ottenute le due oscillazioni della falda, è necessario sommarle e individuare quale funzioni possono adeguatamente interpolare i dati a disposizione.

Nella seconda fase si focalizza l'attenzione sulla caratterizzazione dei picchi in termini temporali, che porta a individuare la corretta frequenza con la quale questi picchi si manifestano .

Per individuare quale frequenza massimizza i due fenomeni è necessario utilizzare la funzione di trasferimento e quindi effettuare la trasformata di Fourier dei due segnali.

Individuata la funzione di trasferimento, la massima ampiezza della stessa coincide con la frequenza di massimizzazione dei due eventi, e permette di individuare il periodo di accadimento dell'evento peggiore.

Questo metodo, con i risultati esposti precedentemente , si pone come base per successivi elaborati di ricerca; è ragionevole ipotizzare infatti che utilizzando serie storiche di maggiore durata sia possibile ricostruire dati per tempi di ritorno rilevanti, per quanto riguarda gli eventi estremi.

Si è constatato che, in questo caso, affinché la frequenza di accadimento non sia influenzata dalle piene ordinarie, potrebbe rivelarsi utile applicare un filtro al segnale, in modo da eliminare quella parte che potrebbe diventare un rumore.

Conoscendo le caratteristiche del versante e le probabili condizioni di collasso, con serie storiche più consistenti (almeno 20 anni di finestra temporale e frequenza di campionamento oraria) diventa più probabile poter assegnare un tempo di ritorno ai movimenti franosi lungo l'asta fluviale. Di conseguenza, questo metodo potrebbe essere utile per valutare in quali posizioni lungo le ripe fluviali di un piccolo bacino è possibile intervenire con opere di drenaggio o comunque di messa in sicurezza per evitare fenomeni di instabilità.

A titolo di esempio di applicazione del metodo, si è affrontato il problema di verificare se le sponde di un torrente montano del bacino del Fiume Toce (il torrente Anza) possono essere poste in condizioni di rischio di frana da eventi come quelli citati.

Nonostante la serie temporale di analisi sia piuttosto breve (4 anni), si è potuto mostrare come con la metodologia presentata nel capitolo 2 è possibile individuare una ripa soggetta ad incipiente collasso dovuto alla somma delle variazioni in falda causate sia alla variazione idrometrica che alle precipitazioni.

Data la brevità del periodo considerato ed alle semplificazioni del metodo non è stato possibile verificare il metodo né validarlo. E' stato possibile però calcolare se vi possa essere instabilità in corrispondenza della ripa, ed il risultato in prima approssimazione sembra confermare la forte influenza della somma dei due effetti sulla piezometria. Si è constatato infatti che più di una volta all'anno anche in condizioni ordinarie, le portate del torrente (dovute agli effetti congiunti delle piogge e della fusione del ghiacciaio del Belvedere) possono determinare condizioni critiche nel versante, con avvicinamento ai valori limiti del fattore di sicurezza ipotizzabile sulla base delle caratteristiche granulometriche e litologiche dei terreni.

Si è constatato infatti che i fenomeni catastrofici possono essere eccezionali e collegati con episodi piovosi di periodo secolare o plurisecolare, oppure ordinari, derivanti dal sommarsi di più componenti del dissesto che vengono ciclicamente ad assumere simultaneamente valori elevati.

Questa tesi ha cercato di mostrare anche l'importanza dell'evoluzione dell'alveo fluviale per quello che può riguardare la sicurezza idrologica di un territorio, infatti si è visto come una frana in alveo, anche qualora non causi problematiche di debris flow, può portare a significative variazioni del fondo a valle. Questo in caso di piena può comportare grossi problemi, sia in termini di esondazioni, che favorire la formazione di colate detritiche, entrambi fenomeni molto dannosi.

Con l'ausilio del software Hec-Ras o altri, è possibile definire delle soglie di materiale in alveo pericolose, perché possono stravolgere il corso d'acqua, questo permette di valutare eventuali opere di messa in sicurezza e procedure di intervento per la protezione civile, anche utilizzando metodi molto speditivi.

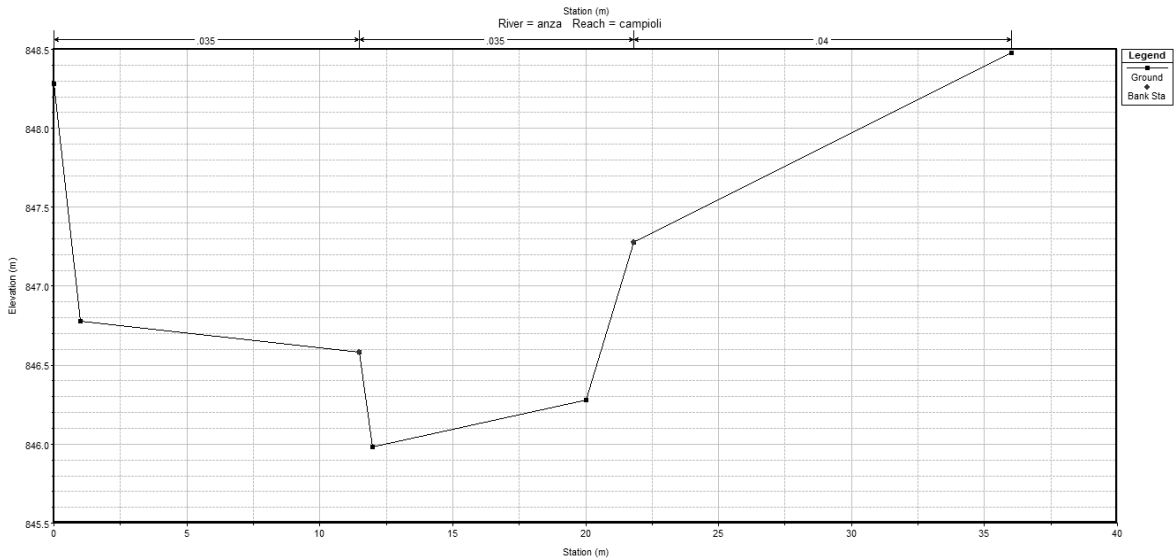
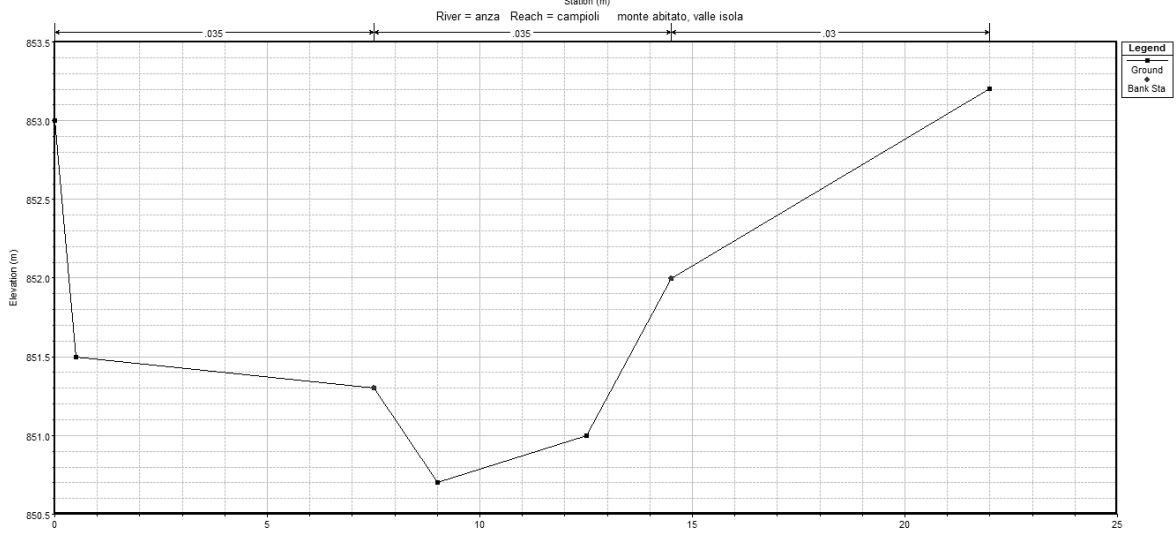
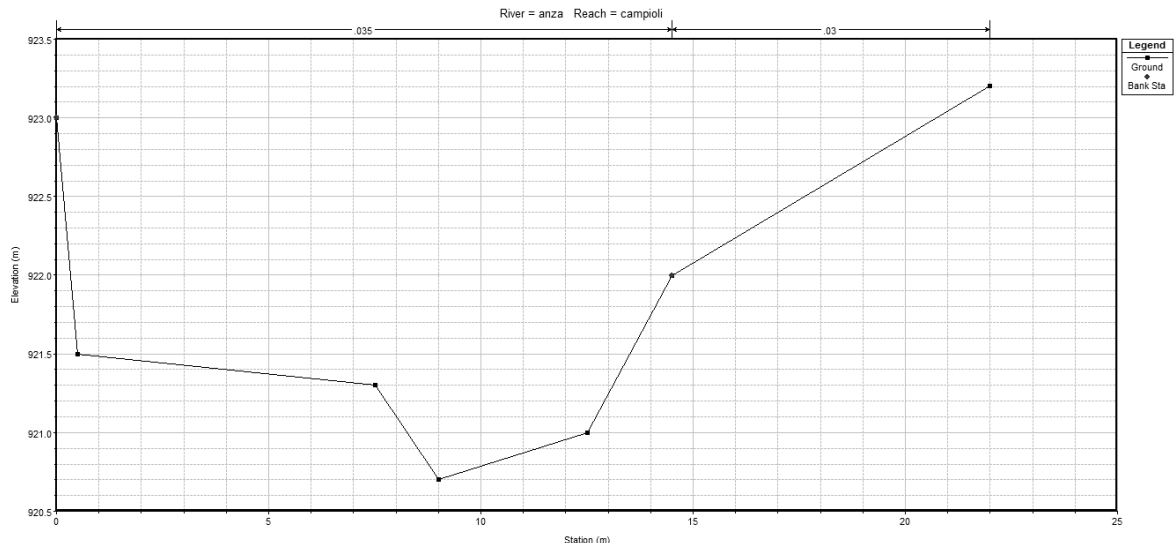
La tesi ha portato a concludere che è necessario provvedere alla messa in sicurezza dei versanti e delle sponde fluviali, per evitare un eccessivo apporto di materiale detritico e conseguente trasporto a valle, in modo da prevenire i rischi legati alle interazioni con le opere civili e il pericolo di colata detritica, in quanto limita di molto la disponibilità di materiale in alveo. In taluni casi è preferibile intervenire sul problema alla sua origine, cioè sui versanti e gli apporti di materiale in alveo, in quanto le opere di sistemazione del fondo alveo risultano insufficienti.

Bibliografia

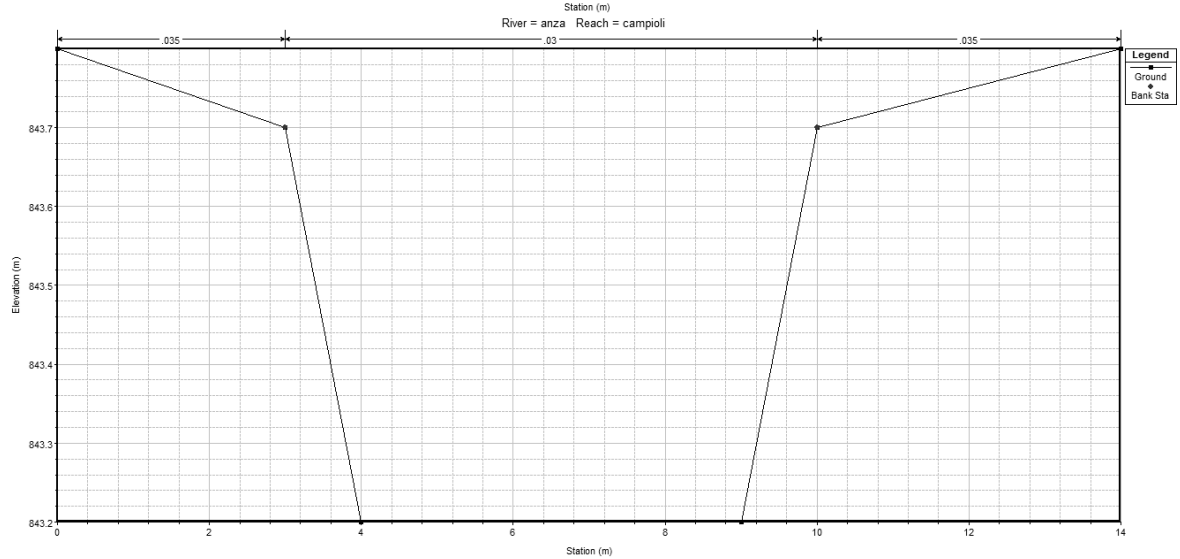
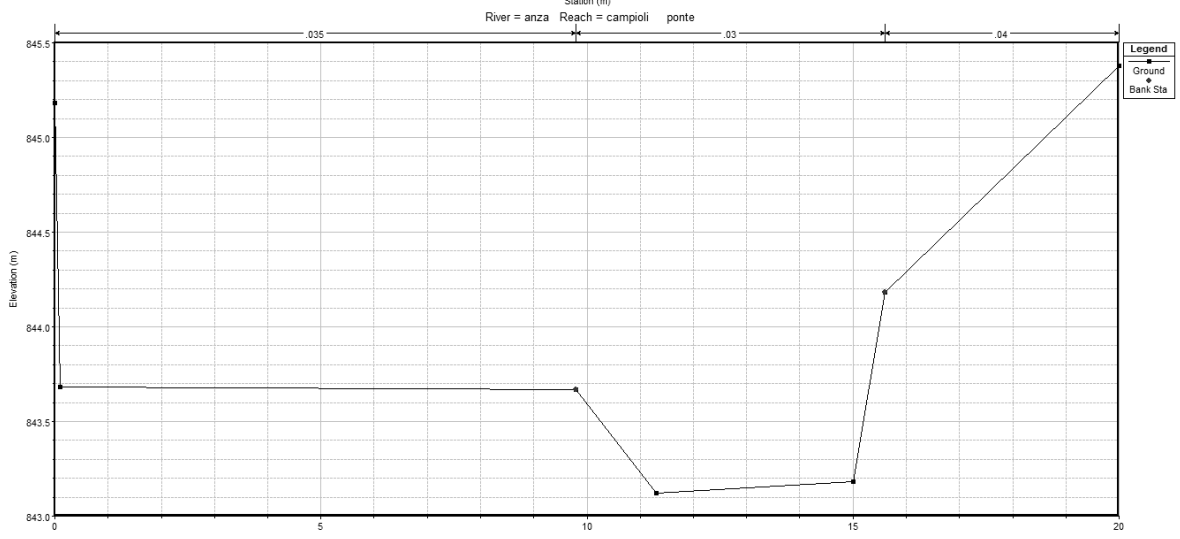
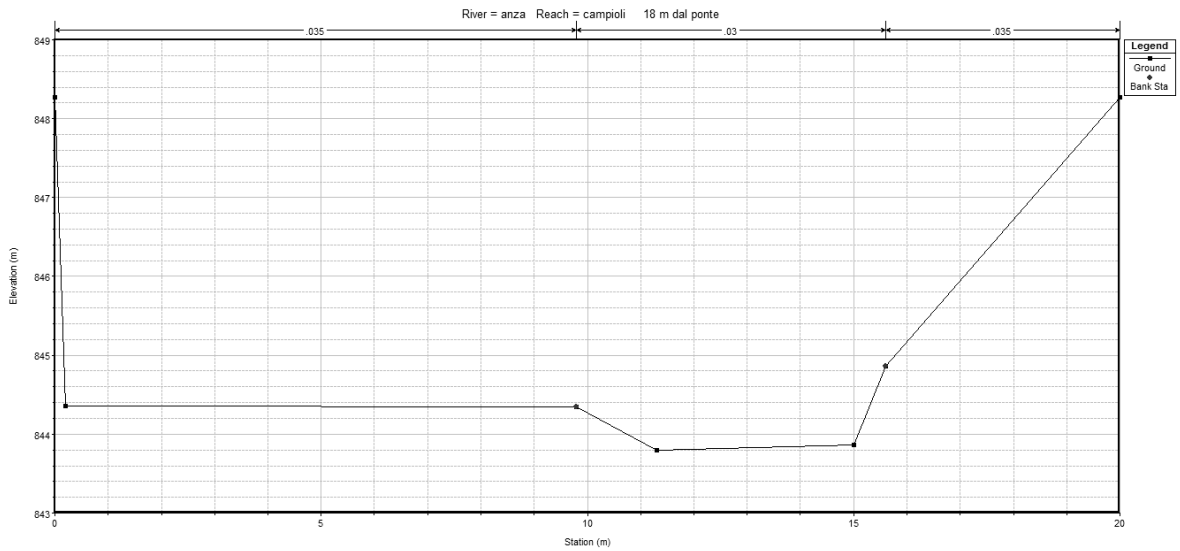
- Autorità di Bacino del fiume Po (1999), Progetto di Piano Stralcio per l'assetto Idrogeologico (PAI) – Interventi sulla rete idrografica e sui versanti – Adda Sopralacuale (Valtellina e Valchiavenna).
- Banca Dati Idrologica e Meteorologica, ARPA Piemonte.
- Banca Dati, ASP Varese.
- Berardi (2009), Dispensa “Dinamica degli inquinanti”.
- Bonacina (2010), tesi di laurea “Valutazione della produzione di sedimenti di un bacino alpino”, Relatrice prof.ssa Longoni.
- Buffington, Montgomery (1999), “Effects of sediments supply on surface textures of Gravel Bed River” Water Resource Research Journal Vol.35, N. 11
- Colombo, Cremonesi, Francani (2011) “Strutture idrogeologiche critiche per la stabilità delle ripe dei corsi d'acqua”, Italian Journal of Engineering Geology and Environment
- Di Silvio (2006), “Interrimento dei serbatoi artificiali: problematiche e soluzioni”, Università di Ferrara.
- Di Silvio, Nones, Guarino (2008), “Fiume Adige, Bilancio di Sedimenti a scala di Bacino e effetti sulla costa”.
- Engineering, Vol. 110, N. 3
- Franzetti, Guadagnini e Ballio, “Appunti di Trasporto Solido”
- Fugazza (2004), Dispensa “Effetti Idraulici Prodotti dai Ponti nei corsi d'acqua”.
- Fugazza (2010), Dispensa “Sistemazione dei Bacini Montani”.
- Lenzi (2005), Dispensa “Riqualificazione degli ambiti fluviali ed ingegneria naturalistica – Il trasporto solido dei corsi d'acqua”.
- Mancini, Corbari, “Appunti del corso di Sistemazione dei Bacini Idrografici”.
- Meyer-Peter and Müller (1948), Formulas for bed-load transport, International Association of Hydraulic Structures Research
- Montaldo, Ravazzani, Mancini (2010) “On the prediction of the Toce alpine basin floods with distributed hydrologic models”, Hydrological Processes
- Palumbo (2008), Tesi di dottorato “La propagazione delle piene negli alvei a fondo mobile”

- Paris et al. (2008), “Realizzazione del primo stralcio della rete di monitoraggio su tre corsi d’acqua della Regione Toscana”, Servizio Idrogeologico Regionale.
- Progetto Transfrontaliero RiskNat, coordinatore ARPA Piemonte, Servizio Geoportale.
- Renard, Foster, Weesies, McCool, Yoder (1996), “Predicting Soil Erosion by Water: a guide to conservation planning with the RUSLE”.
- RUSLE online, Michigan State University, www.iwr.msu.edu/rusle/
- Schalchli (1992) “The clogging of coarse gravel river beds by fine sediments”, Hydrobiologia Journal.
- Secchieri e Valenti (1992) “I ghiacciai della Val d’Ultimo e i loro apporti ai bacini idrici sottostanti”
- Shields (1936), “Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement”, California Institute of Technology
- Smart (1984), “Sediment Transport Formula for steep channels”, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, N. 3
- Wong and Parker (2006), “Re-Analysis and Correction of bedload relation of Meyer-Peter and Müller using their own database”, Journal of Hydraulic Engineering
- Yang and Huang (2001), “Applicability of sediments transport formulas”, International Journal of Sediment Research, Vol. 16, N. 3
- Yao-Ming Hong, Shiun Wan, “Forecasting groundwater level fluctuations for rainfall-induced landslide”, Springer Science+Business Media B.V., 2010

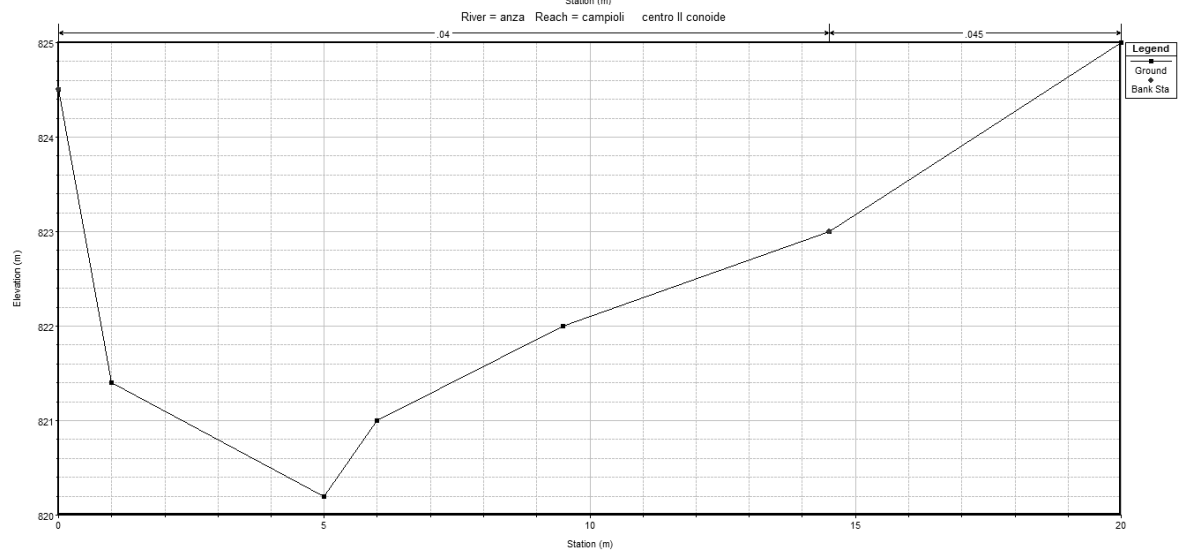
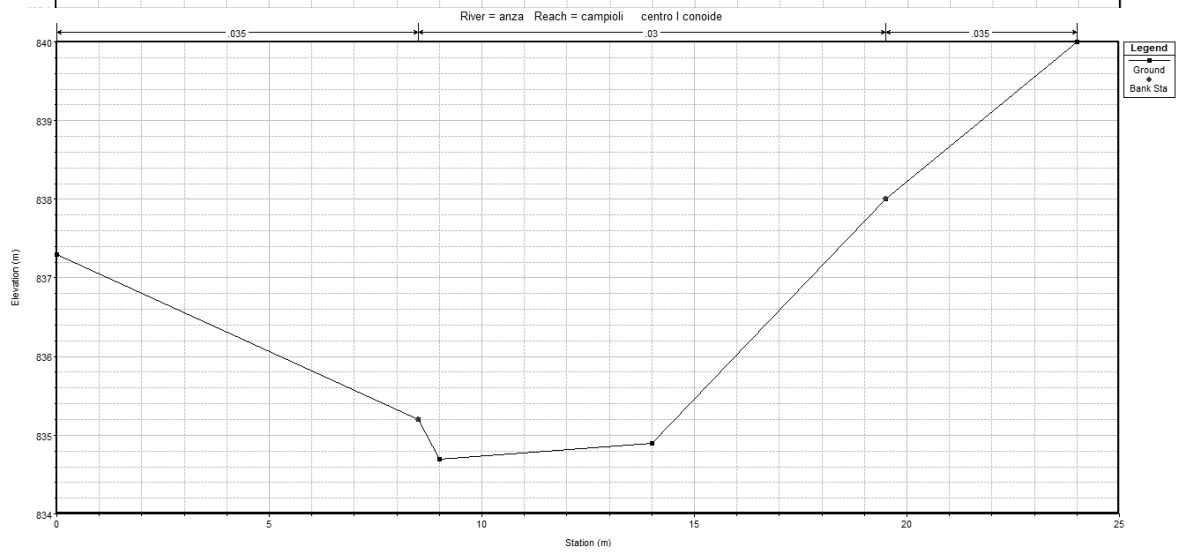
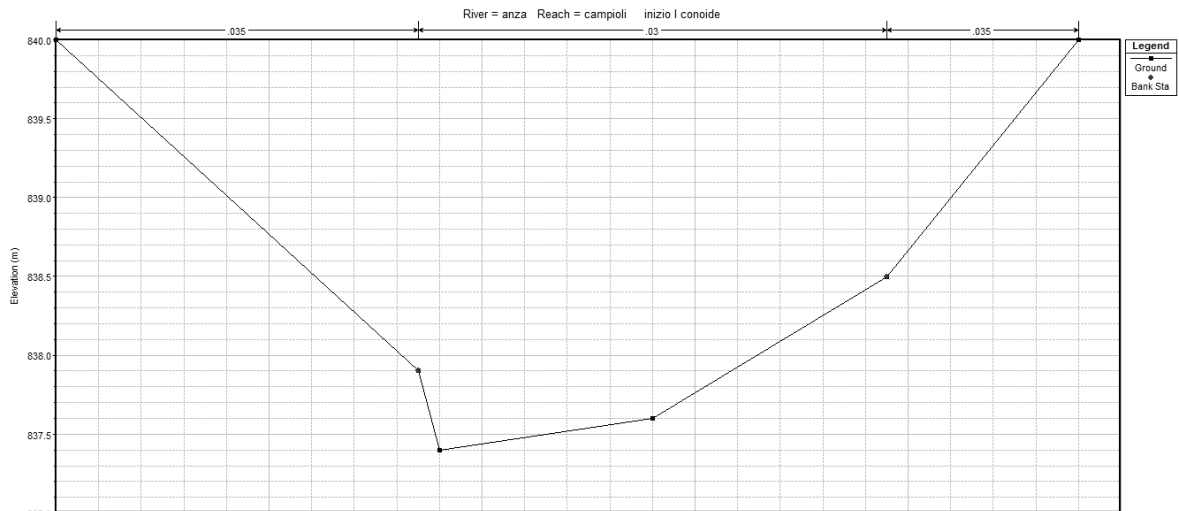
ALLEGATO A: SEZIONI UTILIZZATE DEL TORRENTE ANZA



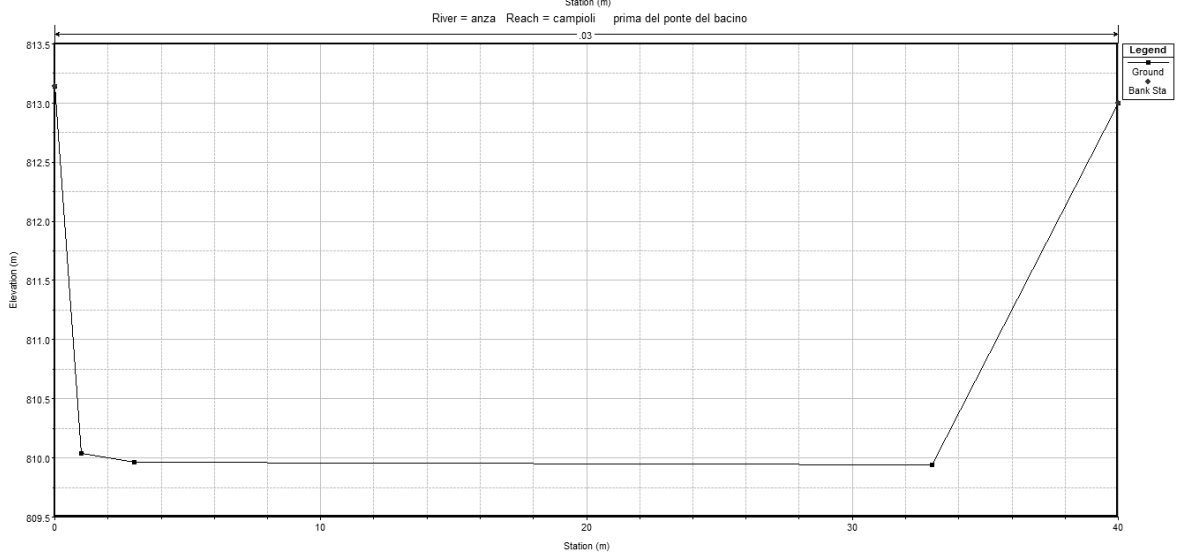
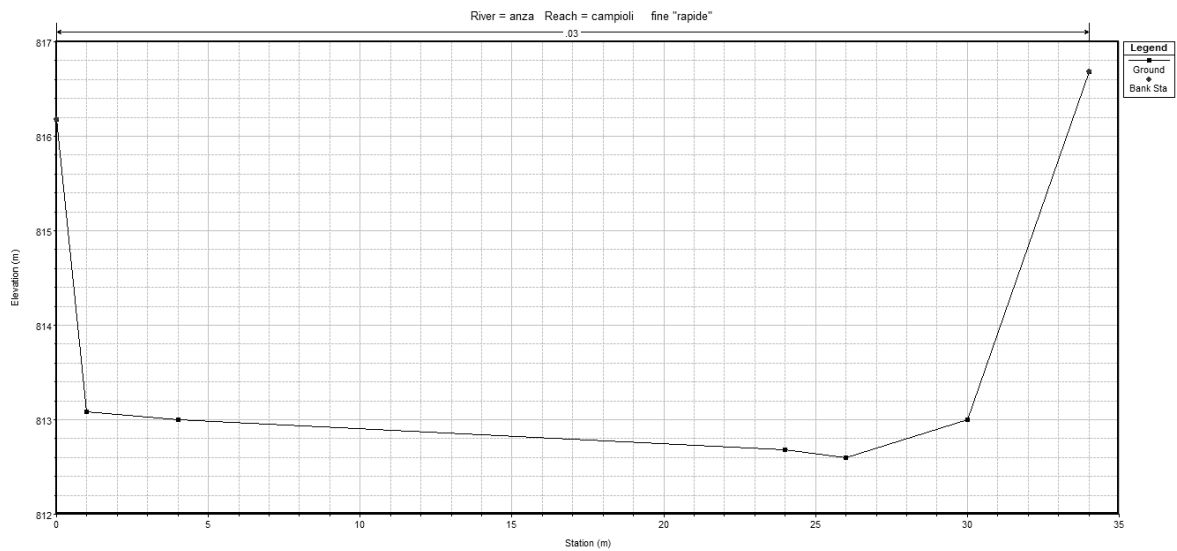
Sezioni dall'alto verso il basso 1,2,3



Sezioni dall'alto verso il basso 4,5,6



Sezioni dall'alto verso il basso 7,8,9



Sezioni dall'alto verso il basso 10,11

La sezione 12 è identica alla 11

ALLEGATO B: Coefficienti e funzioni

Funzione interpolante:

$$f(x) = \sum_{i=1}^8 a_i \sin(b_i x + c_i) \quad (\text{B.1})$$

Tabella B.1: parametri funzione interpolante della variazione della quota piezometrica valutata con Carslaw e Jager

i	a	b	c
1	2.068	0.001654	-0.4231
2	0.7219	0.01726	-1.99
3	0.2681	0.0341	1.299
4	5.874	0.003403	1.508
5	4.622	0.003793	4.42
6	0.1378	0.02545	-2.471
7	0.1206	0.03759	-0.0629
8	0.1087	0.05425	2.839

Tabella B.2: parametri funzione interpolante della variazione della quota piezometrica valutata con Carslaw e Jager a cui sono aggiunte le modifiche dovute alle precipitazioni

i	a	b	c
1	1.126	0.001905	-0.2734
2	0.7378	0.01723	-1.965
3	0.2486	0.03407	1.245
4	0.7926	0.003702	1.268
5	0.375	0.005768	2.992
6	0.1341	0.02549	-2.629
7	0.1227	0.03737	0.1689
8	0.095335	0.05508	2.196

La funzione di trasferimento ottenuta dividendo le due trasformate delle funzioni sopra, assume la seguente espressione:

$$\begin{aligned}
& ((3689 * \pi * (\text{dirac}(w - 1723/10000)/\exp((393 * i)/200) - \text{dirac}(w + 1723/10000) \\
& \quad * \exp((393 * i)/200)) * i)/5000 + (1227 * \pi * (\text{dirac}(w - 3737/10000) \\
& \quad * \exp((1689 * i)/10000) - \text{dirac}(w + 3737/10000)/\exp((1689 * i)/10000)) \\
& \quad * i)/10000 + (1907 * \pi * (\text{dirac}(w - 1377/25000) * \exp((549 * i)/250) \\
& \quad - \text{dirac}(w + 1377/25000)/\exp((549 * i)/250)) * i)/20000 + (1243 * \pi \\
& \quad * (\text{dirac}(w - 3407/100000) * \exp((249 * i)/200) - \text{dirac}(w \\
& \quad + 3407/100000)/\exp((249 * i)/200)) * i)/5000 + (1341 * \pi * (\text{dirac}(w \\
& \quad - 2549/100000)/\exp((2629 * i)/1000) - \text{dirac}(w + 2549/100000) \\
& \quad * \exp((2629 * i)/1000)) * i)/10000 + (563 * \pi * (\text{dirac}(w \\
& \quad - 4392630932552087/2305843009213693952)/\exp((1367 * i)/5000) \\
& \quad - \text{dirac}(w + 4392630932552087/2305843009213693952) * \exp((1367 \\
& \quad * i)/5000)) * i)/500 + (3963 * \pi * (\text{dirac}(w \\
& \quad - 8536230820109095/2305843009213693952) * \exp((317 * i)/250) \\
& \quad - \text{dirac}(w + 8536230820109095/2305843009213693952)/\exp((317 \\
& \quad * i)/250)) * i)/5000 - (3 * \pi * (\text{dirac}(w \\
& \quad + 6650051238572293/1152921504606846976)/\exp((374 * i)/125) \\
& \quad - \exp((374 * i)/125) * \text{dirac}(w \\
& \quad - 6650051238572293/1152921504606846976)) * i)/8)/((1087 * \pi \\
& \quad * (\text{dirac}(w - 217/4000) * \exp((2839 * i)/1000) - \text{dirac}(w \\
& \quad + 217/4000)/\exp((2839 * i)/1000)) * i)/10000 + (2681 * \pi * (\text{dirac}(w \\
& \quad - 341/10000) * \exp((1299 * i)/1000) - \text{dirac}(w + 341/10000)/\exp((1299 \\
& \quad * i)/1000)) * i)/10000 + (689 * \pi * (\text{dirac}(w - 509/20000)/\exp((2471 \\
& \quad * i)/1000) - \text{dirac}(w + 509/20000) * \exp((2471 * i)/1000)) * i)/5000 \\
& \quad + (7219 * \pi * (\text{dirac}(w - 863/50000)/\exp((199 * i)/100) - \text{dirac}(w \\
& \quad + 863/50000) * \exp((199 * i)/100)) * i)/10000 + (603 * \pi * (\text{dirac}(w \\
& \quad - 3759/100000)/\exp((629 * i)/10000) - \text{dirac}(w + 3759/100000) \\
& \quad * \exp((629 * i)/10000)) * i)/5000 - (2937 * \pi * (\text{dirac}(w \\
& \quad + 7846783760354201/2305843009213693952)/\exp((377 * i)/250) \\
& \quad - \exp((377 * i)/250) * \text{dirac}(w \\
& \quad - 7846783760354201/2305843009213693952)) * i)/500 + (517 * \pi \\
& \quad * (\text{dirac}(w - 1906932168619725/1152921504606846976)/\exp((4231 \\
& \quad * i)/10000) - \exp((4231 * i)/10000) * \text{dirac}(w \\
& \quad + 1906932168619725/1152921504606846976)) * i)/250 - (2311 * \pi \\
& \quad * (\text{dirac}(w + 8746062533947541/2305843009213693952)/\exp((221 \\
& \quad * i)/50) - \exp((221 * i)/50) * \text{dirac}(w \\
& \quad - 8746062533947541/2305843009213693952)) * i)/500)
\end{aligned}$$

(B.2)