



REGIONE
LOMBARDIA



COMUNE DI
INCUDINE



COMUNE DI
EDOLO



COMUNE DI
MONNO

PROGETTO ESECUTIVO

OPERE DI REGIMAZIONE IDRAULICA NEL TRATTO DI CONFLUENZA DEL TORRENTE VAL FINALE NEL FIUME OGLIO E REALIZZAZIONE DI AREE DI ACCUMULO/LAMINAZIONE SUL TORRENTE VAL FINALE, NEI COMUNI DI MONNO, INCUDINE E EDOLO. - CUP: G92B22000990002 -



RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA

Aggiornamento	DATA	OGGETTO	Elaborato n. T3
	Febbraio 2024	Prima stesura	

Il Progettista; D.L., C.S.P. e C.S.E.:
Ing. Girolamo Landrini



Il Responsabile del Procedimento:
Geom. Fabio Albertoni

Elaborazione dati e stesura progetto: STUDIO LANDRINI
Via Carlo Tassara n.4, 25043 Breno (BS) Tel. 0364 21076
e-mail: landrini@LANDRINIGEROLAMO.191.it

RELAZIONE IDROLOGICA

Sommario

Premessa.....	2
1. Inquadramento del bacino.....	2
2. Pluviometria.....	5
3. Portate al colmo di piena	8
3.1. Portate di pioggia netta.....	8
3.2. Trasformazione Afflussi-Deflussi	10
3.3. Confronto con il metodo di Bacchi (1999).....	11
3.4. Risultati	12
4. Trasporto solido e fenomeni di debris flow	14
4.1. Magnitudo di trasporto solido	14
4.2. Caratteristiche del trasporto solido e delle colate.....	19
4.3. Definizione dell'idrogramma totale di progetto.....	21
Conclusione.....	23

Premessa

La seguente relazione ha come scopo l'analisi delle caratteristiche idrologiche e di trasporto solido del bacino della Val Finale e della sua confluenza nel fiume Oglio in Comune di Incudine (BS) al fine di valutare il dimensionamento delle opere di protezione idraulica.

La realizzazione delle opere è ritenuta di grande importanza a causa dell'evento di colata detritica verificatosi nell'agosto 2021. In tale evento il materiale proveniente dalla Val Finale ha ostruito il fiume Oglio nei pressi dell'immissione dei due corsi d'acqua, provocandone una fuoriuscita lungo il percorso della vicina strada statale 42.

Verranno qui prima definite le caratteristiche geomorfologiche del bacino e la pluviometria dell'area, successivamente le portate al colmo di piena e la stima del trasporto solido e dei fenomeni di colate detritiche di progetto.

1. Inquadramento del bacino

Il bacino della Val Finale sottende una ripida vallata alpina di modeste dimensioni, caratterizzata da una parte in quota molto ripida di prati, ghiaioni e rocce che si incanalano a scendere in versanti boscosi. Non vi sono insediamenti od opere antropiche che possano influenzare il terreno o la permeabilità dell'area.

Tabella 1: Caratteristiche topografiche del bacino

Torrente	Area [Km ²]	Lunghezza asta principale [km]	Pendenza media versanti [°]	Quota media m.s.l.m.	Quota max m.s.l.m.	Quota min m.s.l.m.
Val Finale	5,45	4,75	35,7	1726	2794	835

Dal DTM 5x5 disponibile sul geoportale di Regione Lombardia è stato inoltre possibile creare mappe di elevazione e pendenza delle aree.

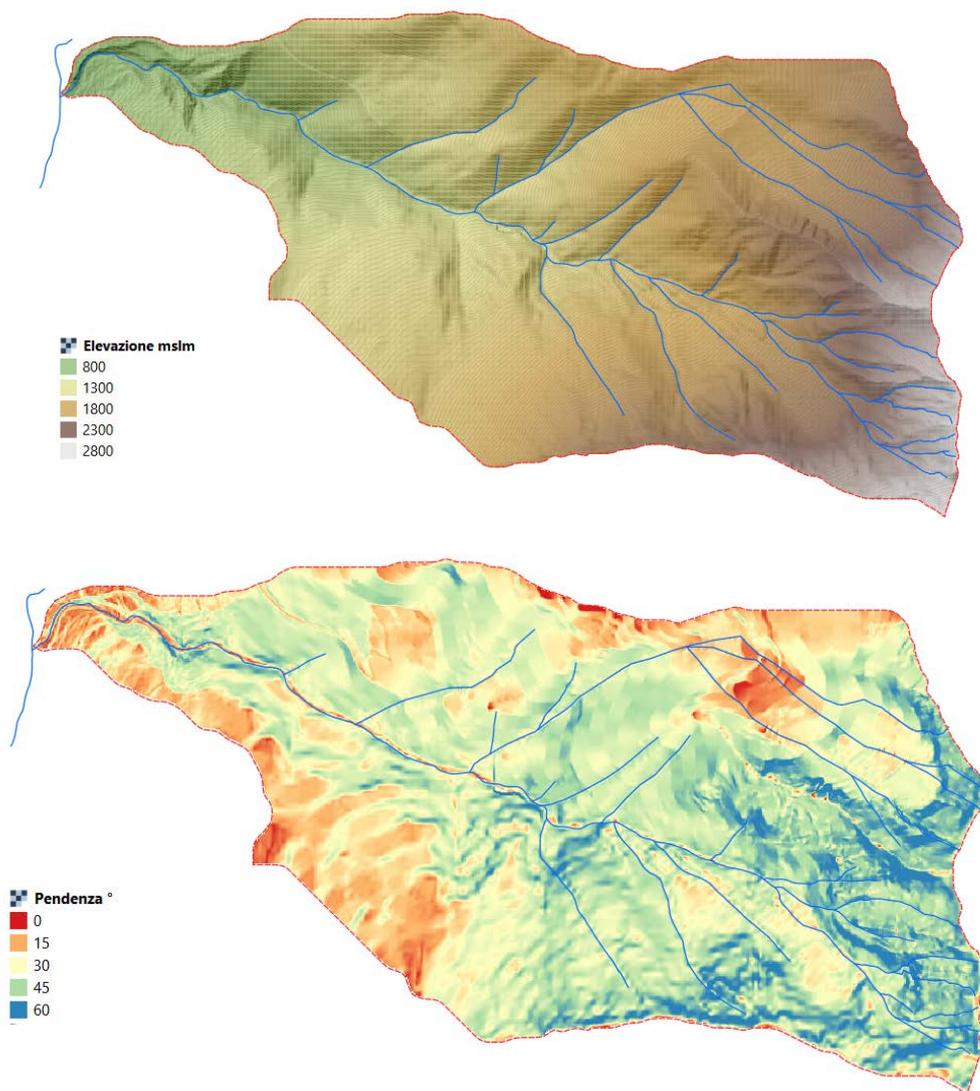


Figura 1: Altimetria e pendenza del bacino ricavate dai raster 5x5 (Geoportale Lombardia)

Sul geoportale è inoltre possibile reperire informazioni areali sull'uso del suolo (e quindi la sua copertura) e la classe e tipologia di impermeabilità data dal substrato geologico.

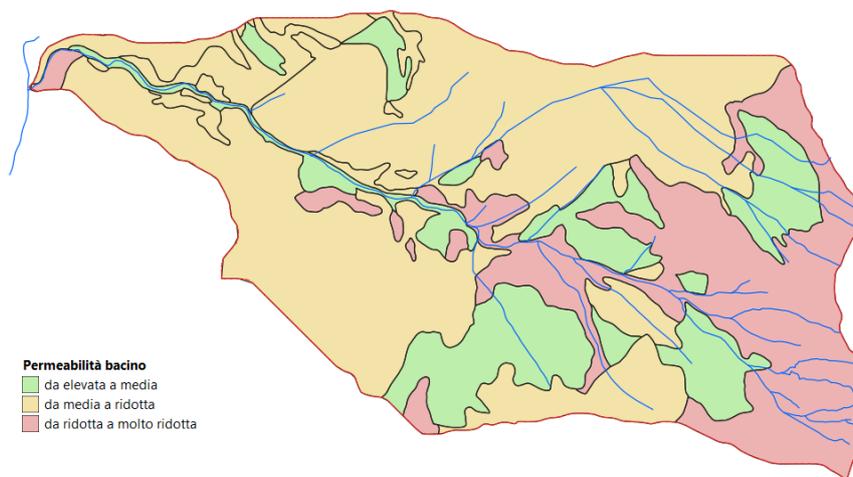
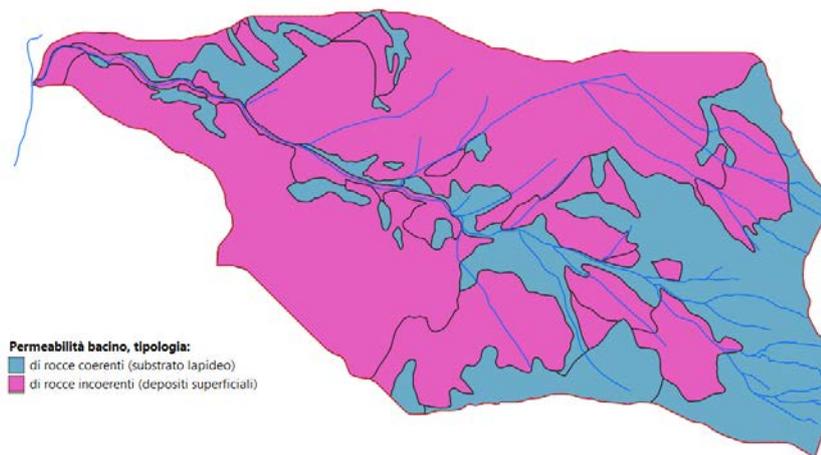


Figura 2: Livello e tipologia di permeabilità del bacino (Geoportale Lombardia)

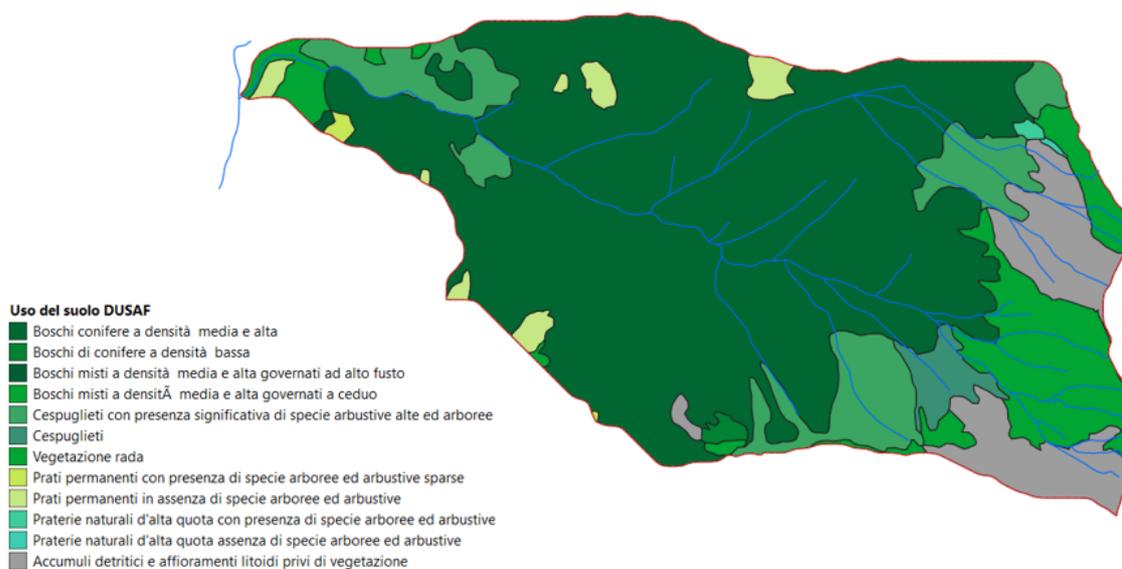


Figura 3: Copertura del suolo DUSAF (Geoportale Lombardia)

2. Pluviometria

Ai fini della stima della portata al colmo di piena, è conveniente definire la sollecitazione meteorica di progetto mediante ietogrammi sintetici con caratteristiche legate ad analisi statistiche di sintesi delle piogge intense e di breve durata, che sono responsabili dei valori più elevati di intensità di precipitazione media. Nel caso in esame le curve sono state costruite attraverso i valori forniti dal Portale Idrologico Geografico di ARPA Lombardia (<http://idro.arpalombardia.it/pmapper-4.0/map.phtml>). Sul portale sono accessibili i valori dei parametri delle curve di possibilità pluviometrica interpolate per tutta la superficie del territorio lombardo. I parametri forniti sono quelli relativi al modello probabilistico GEV (Generalized Extreme Value) di tipo scala-invariante, nel quale la massima altezza di precipitazione h per una certa durata d e per un assegnato tempo di ritorno T è rappresentata dalla legge a tre parametri mostrata di seguito dove $a = a_1 \cdot w_T$:

$$h = a_1 \cdot w_T \cdot d^n = a \cdot d^n \quad [1]$$

$$w_T = \varepsilon + \frac{\alpha}{k} \left\{ 1 - \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right]^k \right\} \quad [2]$$

I parametri sono forniti per un grid di celle rettangolari, la media dei valori è utilizzata come parametro di calcolo. Considerando una durata di precipitazione variabile tra 1 e 24 ore, i parametri medi assumono i seguenti valori:

Tabella 2: Parametri regionalizzati della distribuzione GEV da <http://idro.arpalombardia.it/pmapper-4.0/>

Parametri regionalizzati distribuzione GEV da ARPA Lombardia				
a1 medio	n medio	Alpha medio	K medio	Epsilon medio
18,0236	0,445875	0,291034	-0,133118	0,783299



Figura 4: Raster dei parametri GEV di Regione Lombardia interpolato con l'area del bacino per il calcolo dei parametri medi

I valori di w_T e del parametro a al variare del tempo di ritorno T ottenuti sono riportati nella seguente tabella:

Tabella 3: parametri w_t e a calcolati dai parametri regionalizzati GEV

T	w_t [-]	a [mm/h ⁿ]
5	1.27	22.83
10	1.55	27.88
20	1.84	33.23
50	2.27	40.95
100	2.63	47.41
200	3.02	54.46

Una volta ottenute le LSPP dell'area, si può passare alla determinazione dello ietogramma di progetto e della portata di piena dei vari bacini. Il tempo di corrivazione t_c dei bacini è uno dei parametri fondamentali usati per la determinazione dello ietogramma di progetto. In mancanza di misure di portata alla chiusura del bacino, t_c può essere stimato sulla base delle pendenze e della forma geometrica ed estensione dell'area. Qui la sua determinazione avviene con la formula di Giandotti, una delle più utilizzate in letteratura:

$$t_c = \frac{4 \cdot \sqrt{S} + 1,5L}{0,8 \cdot \sqrt{H_m - h_0}} \quad [3]$$

Dove con S è indicata la superficie del bacino espressa in km², con L la lunghezza dell'asta principale espressa in km, con Hm l'altitudine media del bacino, espressa in m, riferita al livello medio del mare e con h₀ la quota della sezione di chiusura, anch'essa in m, sempre riferita al livello del mare.

Per la stima delle portate al colmo è stato adottato uno ietogramma di progetto rettangolare, di durata pari alla durata critica ed intensità di pioggia costante per tutto l'evento e pari a:

$$I = a \cdot d^{n-1} \quad [4]$$

Ovvero l'altezza di precipitazione ottenuta dalle LSPP relativa alla durata critica divisa per la durata critica stessa per ogni tempo di ritorno T. Questo ietogramma è utilizzato in quanto le dimensioni dei bacini sono ridotte, la morfologia scoscesa e la superficie quasi completamente coperta da vegetazione, la quale avrebbe un effetto smorzante su eventuali picchi.

Nella seguente tabella si mostrano le intensità critiche calcolate per ogni tempo di ritorno T per ogni durata critica.

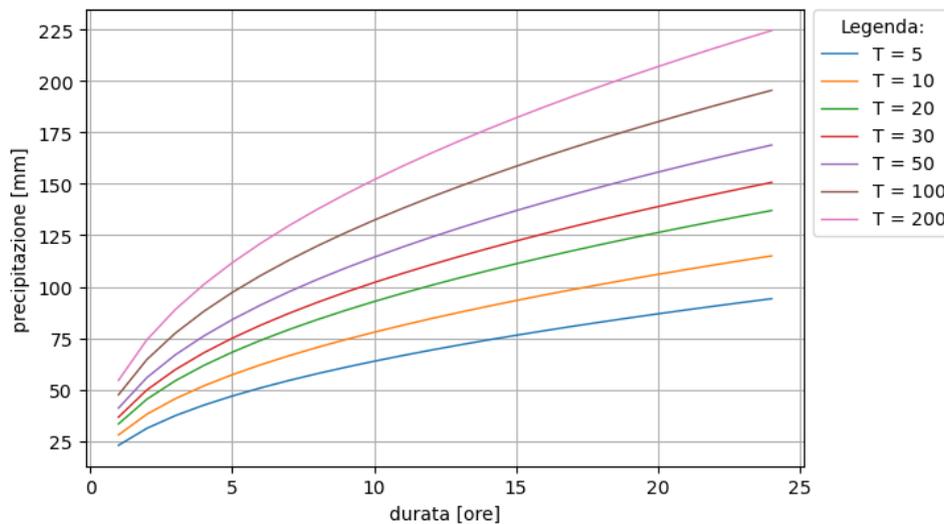


Figura 5:LSPP calcolate sui parametri medi GEV del portale di regione Lombardia

Tabella 4: intensità critiche puntuali e ragguagliate con la formula di Marchetti e la formula di Papiri con il tempo di corrivazione

I Critica [mm/h]	
	tc =0.69 h
T = 5	28.05
T = 10	34.26
T = 20	40.83
T = 50	50.33
T = 100	58.26
T = 200	66.92

3. Portate al colmo di piena

Una volta definito lo ietogramma di piogge lorde di progetto, è necessario scegliere un modello di deflusso superficiale per determinare la quantità di perdite per infiltrazione o accumulo nei bacini e di un modello di formazione di piene per ottenere l'idrogramma di piena alla sezione di chiusura del bacino. Per il calcolo delle infiltrazioni son stati usati due modelli: il metodo percentuale e il metodo del Soil Conservation Service (1972) detto anche Curve Number (SCS-CN). Per il modello di formazione di piene è stato usato il metodo cinematico, noto anche come metodo della corrivazione.

3.1. Portate di pioggia netta

La portata di pioggia netta si ottiene moltiplicando la pioggia lorda per un coefficiente che può essere costante, come nel metodo percentuale, o variabile nel tempo come nel metodo SCS-CN modificato. Il metodo SCS-CN stima le perdite per infiltrazione sull'ipotesi che ci sia una relazione tra la massima capacità di immagazzinare acqua nel terreno S e l'infiltrazione totale effettiva P per una precipitazione di una certa durata. Il metodo tiene conto anche di una perdita iniziale I_a prima di cui non si ha alcun deflusso superficiale. La relazione fra questi elementi restituisce la portata di deflusso superficiale Q come dall'espressione [5]. Il valore di S è dato dall'espressione [6], in cui CN è il Curve Number, un parametro che va virtualmente da 0 a 100. La perdita iniziale è definita da [7] in mancanza di elementi per una stima più precisa.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \text{ mm} \quad [5]$$

$$S = 254 + \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \text{ mm} \quad [6]$$

$$I_a = 0.2 S \quad [7]$$

Il parametro CN dipende da vari fattori. Il primo è il tipo di suolo, che può ricadere in 4 categorie A, B, C, D, dove la prima classe indica terreni sabbiosi o ghiaiosi e molto profondi, difficili da saturare, mentre l'ultima superfici argillose o limose compatte con una bassissima capacità di infiltrazione.

Il secondo fattore è la copertura del suolo (strade, residenziale, industriale, prato, bosco, campi...) che in base alla precedente classe di terreno assegna un valore di CNII da 0 a 100. Questo valore andrà poi corretto in base alla condizione di umidità antecedente del terreno (AMC I, II, III) attraverso le formule [8] e [9]:

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)} \quad [8]$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)} \quad [9]$$

Il metodo SCS-CN è formalmente un metodo che lega una precipitazione lorda cumulata di una certa durata al suo deflusso superficiale, e non la precipitazione lorda di un intervallo dt al relativo deflusso del medesimo istante. Ciò detto, la dimensione temporale può essere ottenuta in maniera molto semplice sottraendo il deflusso superficiale calcolata al tempo $t-dt$ a quello calcolato al tempo t .

Il valore del parametro CN nel caso presente è assunto in base seguenti ai valori dedotti dalla permeabilità e dall'uso del suolo DUSAF degli shapefiles di regione Lombardia. I valori di CN per le diverse classi DUSAF sono state adattate dai valori provenienti da “Rosso Renzo, *Consulenza tecnico scientifica nell'ambito del progetto shakeup-2 caratterizzazione idrologica del regime di piena in Lombardia: bacini tributari del lago di Como mappatura dell'indice di assorbimento e del massimo volume specifico di ritenzione potenziale del terreno relazione finale*, Arpa Lombardia, 2004”, calibrati sull'area della vicina Valtellina.

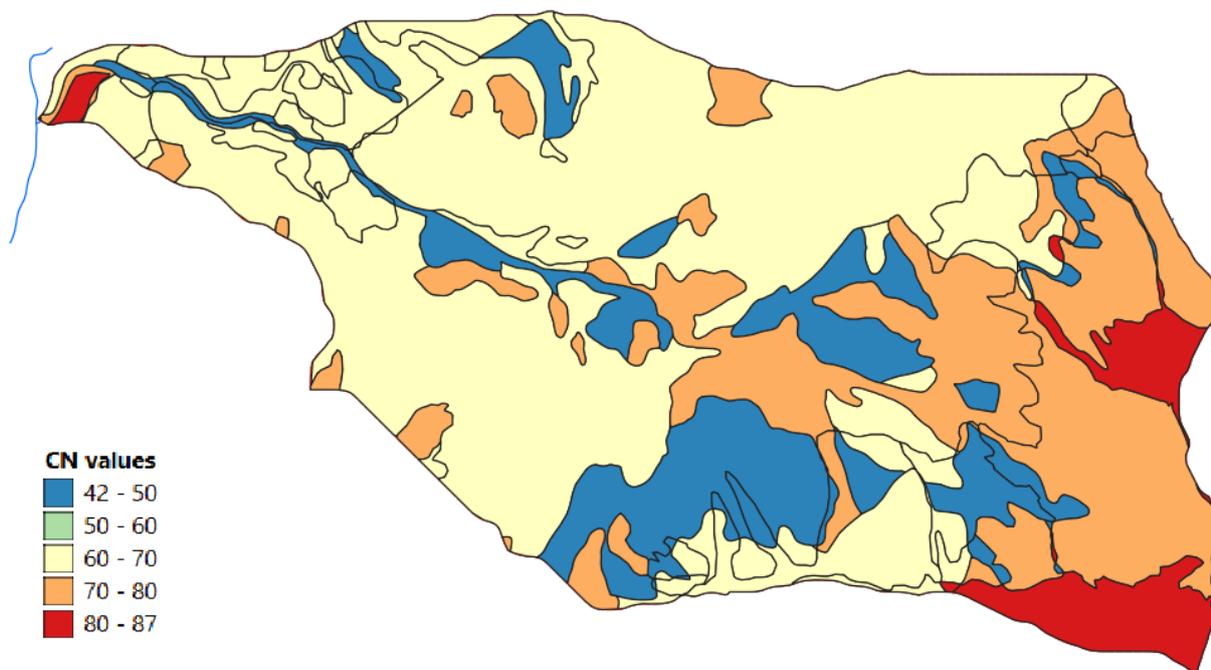


Figura 6: Valori del Parametro CN_{II} ricavati dal database DUSAF di uso del suolo e dalla permeabilità.

Da essi sono state infatti ricavate le classi di permeabilità A-D e i corrispettivi valori.

Tabella 5: Valori medi di CN number sul bacino. Per i calcoli è utilizzato il CN_{III} che considera la situazione sfavorevole di terreno già saturo da precipitazioni precedenti

CN _I medio	CN _{II} medio	CN _{III} medio
49	67	83

Il valore di calcolo adottato è quello del CN_{III}, in quanto considera un terreno saturo da precipitazioni precedenti (situazione più sfavorevole).

3.2. Trasformazione Afflussi-Deflussi

Il Metodo Cinematico o della Corrivazione, fa parte della famiglia dei modelli di formazione di piena lineari. Questi modelli hanno la caratteristica di definire la relazione ingresso-uscita attraverso equazioni differenziali di tipo lineare a coefficienti costanti.

Il metodo cinematico si basa su alcune considerazioni:

- la formazione della piena è dovuta unicamente ad un trasferimento della massa liquida;
- ogni goccia di pioggia si muove sulla superficie del bacino seguendo un percorso immutabile che dipende solo dal punto in cui è caduta;
- la velocità di una goccia non è influenzata dalla presenza di altre gocce;
- la portata defluente è data dalla somma delle portate elementari provenienti dalle diverse parti del bacino, che si presentano nello stesso istante alla sezione di chiusura.

La portata uscente dal bacino $q(t)$ si definisce in generale come integrale di convoluzione della portata di pioggia netta $p(t)$ moltiplicata per l'idrogramma unitario istantaneo $u(t)$ come in [10]:

$$q(t) = \int_0^t u(t-\tau) \cdot p(\tau) d\tau \quad [10]$$

Nel caso del metodo della corrivazione $u(t)$ si definisce come in [25]:

$$u(t) = \frac{1}{S} \cdot \frac{ds}{dt} \quad [11]$$

Dove S è la superficie totale e ds/dt l'espressione differenziale che rappresenta la curva Area-tempi, ovvero la relazione tra la superficie parziale del bacino e i relativi tempi di ruscellamento. Per un ietogramma di pioggia rettangolare, metodo di depurazione percentuale e una curva Area-tempi lineari esiste una soluzione analitica. La formulazione analitica per il valore di portata al colmo va a coincidere in questo caso con la formula razionale come espressa in [12].

$$Q_{max} = \emptyset \frac{A I_{critica}}{3,6} \quad [12]$$

Dove A è in km^2 , $I_{critica}$ in mm/h e \emptyset è il coefficiente di afflusso costante.

Nel momento in qui però si vuole utilizzare un modello di deflusso superficiale più avanzato come SCS-CN lo ietogramma delle piogge nette diventa irregolare e/o utilizzare una curva Aree-tempi irregolare occorre utilizzare un approccio numerico. Definito un intervallo temporale dt pari al tempo di corrivazione t_c diviso un numero n l'area totale si divide in n aree di isocorrivazione A_i (di uguale tempo di ruscellamento fino alla chiusura del bacino). A_1 è l'area più a monte, A_n quella adiacente al punto di chiusura. Vengono assunte come condizioni al contorno le 2 aree fittizie A_0 e A_{n+1} di

superficie nulla, dove la prima indica il limite superiore del bacino e la seconda la sezione di chiusura del bacino. L'equazione discretizzata diventa quindi:

$$Q(i,t) = q(i,t) \cdot A_i + Q(i-1, t-1) \quad [13]$$

Dove la portata in ogni area A_i al tempo t $Q(i,t)$ corrisponde alla portata di deflusso superficiale di A_i al tempo t $q(i,t) \cdot A_i$ sommata alla portata al precedente tempo $t-1$ dell'area immediatamente a monte $Q(i-1, t-1)$. L'altezza di deflusso superficiale $q(i,t)$ può essere calcolato ogni istante con il metodo percentuale oppure con il metodo SCS-CN, sottraendo in quest'ultimo caso il valore calcolato sulla cumulata dall'istante iniziale a $t-1$ a quello calcolato dall'istante iniziale a t . Qualora la curva Area-tempi si assuma lineare, queste aree A_i saranno di uguale estensione pari all'area totale divisa per n . Ad ogni A_i può essere assegnato un diverso valore di percentuale o CN se necessario.

Nel caso d'interesse è stato usato il metodo cinematico con curva Area-tempi lineare, applicando sia il metodo percentuale che quello SCS-CN per il deflusso superficiale. Sia il coefficiente di afflusso del metodo superficiale che CN son stati assunti omogenei e pari ai valori descritti in precedenza (0.20 e 88 (CN_III) rispettivamente).

3.3. Confronto con il metodo di Bacchi (1999)

Come elemento di confronto, è utile calcolare la portata di picco considerando anche la relazione proposta da Bacchi et al. (1999), sviluppata in uno studio relativo alla valutazione delle portate di piena nella Provincia di Brescia. Tale relazione è valida per bacini con area drenante variabile da 1 a 40 km², in cui la portata al colmo di assegnata frequenza viene calcolata, secondo il metodo di regionalizzazione, come prodotto di una portata indice $m(Q_c)$ legata all'area drenata A (è l'area sottesa dalla sezione interessata) e di un coefficiente di crescita X_T espresso in funzione del tempo di ritorno T :

$$Q_{c,T} = X_T \cdot m(Q_c) \quad [14]$$

dove:

$$m(Q_c) = 3,24 \cdot A^{0,73} \quad [15]$$

$$X_T = 1 + 0,53 \cdot \frac{\exp \left[0,0521 \left(-\ln \left(-\ln \left((T-1)/T \right) \right) \right) \right] - 1,033}{0,072} \quad [16]$$

3.4. Risultati

I risultati del calcolo dell'altezza di pioggia netta e delle relative portate al colmo per tempi di ritorno da 5 a 200 anni sono mostrati nelle seguenti immagini.

Tabella 6: Portate al colmo di piena calcolate con il metodo della corrivazione depurato con SCS CN e con il metodo percentuale. E' presente anche il confronto con la formula empirica di Bacchi.

T	Q CN m ³ /s	Q perc. 20% m ³ /s	Q Bacchi m ³ /s
T = 5	2.87	8.49	15.14
T = 10	5.88	10.37	18.69
T = 20	9.91	12.36	22.22
T = 50	16.98	14.75	27.00
T = 100	23.78	17.08	30.73
T = 200	31.95	19.62	34.59

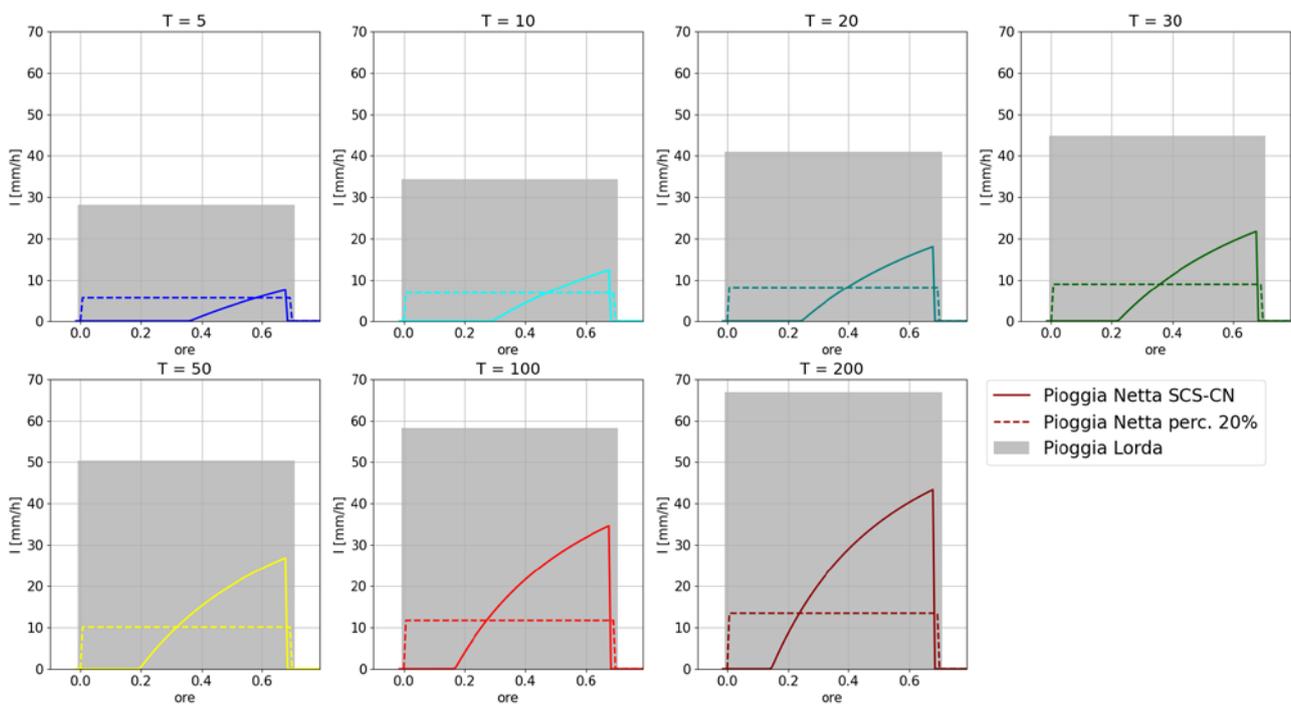


Figura 7: Depurazione e idrogrammi di pioggia lorda e netta con il metodo sns cn e percentuale a confronto.

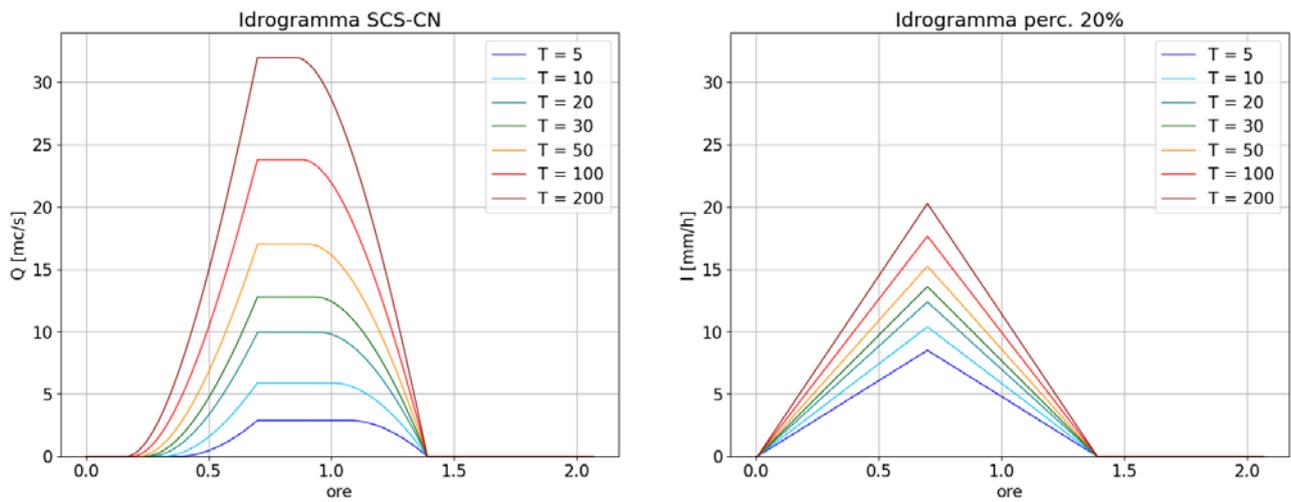


Figura 8: Idrogrammi di piena con il metodo della corrivazione e depurazione delle piogge con il metodo SCS CN a confronto con il metodo percentuale.

Il metodo percentuale sembra sottostimare in maniera netta le portate in gioco rispetto agli altri due metodi per tempi di ritorno alti.

Il metodo della corrivazione con SCS CN è dunque scelto per le portate al colmo da adottare in quanto molto più vicino all'indicazione della formula di Bacchi.

4. Trasporto solido e fenomeni di debris flow

Ai fini di una corretta valutazione delle opere idrauliche in progetto è fondamentale tenere conto, oltre della portata idraulica della Val Finale, anche del trasporto solido e in particolare dal trasporto solido eccezionale dovuto ad eventi estremi.

La parte alta del bacino è infatti caratterizzata da pareti rocciose ad elevata pendenza seguite da ghiaioni e depositi detritici provenienti dalle stesse. Questa situazione fa sì che possano franare verso valle detriti caratterizzati anche da dimensioni considerevoli, come dimostrano i grossi massi localizzati lungo il percorso del torrente.

La parte medio inferiore del bacino è caratterizzata da una pendenza dell'asta fluviale tra i 10 e i 20 ° ma incanalata tra versanti piuttosto ripidi. Questi versanti, seppur vegetati, possono essere soggetti a fenomeni franosi caratterizzati da materiale più fine rispetto a quello che si trova nei depositi detritici a monte.

Per effettuare una valutazione del possibile evento volumetrico di trasporto solido (magnitudo) si fa riferimento ai dati forniti dalla Regione Lombardia derivati dal sito SI.BCA. Una volta effettuata la stima del volume solido, si deve invece definire un idrogramma di progetto basato sulle portate liquide e sulla concentrazione volumetrica solido-liquido.

4.1. Magnitudo di trasporto solido

Per magnitudo di un bacino si intende il massimo volume rimovibile nel bacino stesso ed è definita secondo diverse formule empiriche esistenti in bibliografia. Tali formule empiriche prendono in considerazione diversi parametri come l'area del bacino, le caratteristiche del conoide e i dati specifici riguardanti la geomorfologia.

Regione Lombardia mette a disposizione i dati relativi ai principali metodi empirici di calcolo della magnitudo dei suoi bacini:

- *Bottino, Crivellari & Mandrone (1996)*

Formula empirica basata sulla sull'area del bacino e sull'interpolazione delle misure effettuate su diverse colate detritiche della zona di di Ivrea nel 1993.

$$M = 21241 \times Ab^{0.28} \quad [17]$$

dove Ab è l'area del bacino.

- *Crosta, Ceriani, Frattini & Quattrini (2000):*

$$M = 1000 \times K \times Ab \times Mb^{0.8} \times Scl_c \times (I_F)^{-2} \quad [18]$$

in cui:

$K = 5.4$ per fenomeni di debris flow

Ab = Area del bacino

Mb = Indice di Melton

Hmax = Quota massima del bacino

Hmin = Quota minima del bacino

Scl_c = pendenza del collettore sul conoide

I_F = Indice di frana

- *D'Agostino et al. (1996):*

$$M1 = 39 \times Ab \times Scl^{1.5} \times (IG) \times (IT)^{-0.3}$$

$$M2 = 36 \times Ab \times Scl^{1.5} \times (IG) \times (1 + CS)^{-1}$$

[19]

in cui:

Scl = Pendenza dell'asta principale

IG = dipende dai litotipi costituenti il bacino (4 per rocce metamorfiche e 5 per le coperture)

IT = Indice di trasporto basato sulla classificazione di Aulitzky (1 per fenomeni di debris flow)

CS = Coefficiente di sistemazione (pari a 0 per bacini in area alpina privi di opere di sistemazione)

Di seguito la tabella con i valori riportati da regione Lombardia per il bacino della Val Finale:

Tabella 7: Tabelli del valore dei principali parametri del bacino fornita da Regione Lombardia sul portale SIBCA.

PARAMETRI:	VALORI	Untà
Magnitudo BOTTINO	34,127	m ³
Magnitudo D'AGOSTINO	110,126	m ³
Magnitudo CERIANI	49,265	m ³
Magnitudo BIANCO	104,922	m ³
Coefficiente di deflusso	0.46	-
Indice di franosità	0.87	-
Densità di drenaggio	3.91	1/km
Tempo di corrivazione	0.69	h
Pendenza media asta principale	0.37	m/m
Lunghezza totale idrografica	4.75	km
Distanza massima reticolo coprente	4.96	km
Area planimetrica	5.44	Km ²

Area effettiva	10.28	Km ²
Rapporto aree	0.53	-
Indice Melton	0.84	-
Pendenza media bacino	0.74	m/m

Come si può ben vedere il calcolo della magnitudo per un bacino varia moltissimo a seconda del metodo scelto e dei parametri utilizzati.

È importante dunque fare alcune considerazioni: la magnitudo in sé non è necessariamente la quantità di detriti movimentabile in un singolo evento ma piuttosto il volume totale trasportabile a valle in una serie consecutiva di eventi; pertanto a seconda dell'utilizzo che si deve fare del valore di magnitudo può essere opportuno scegliere una formula specifica.

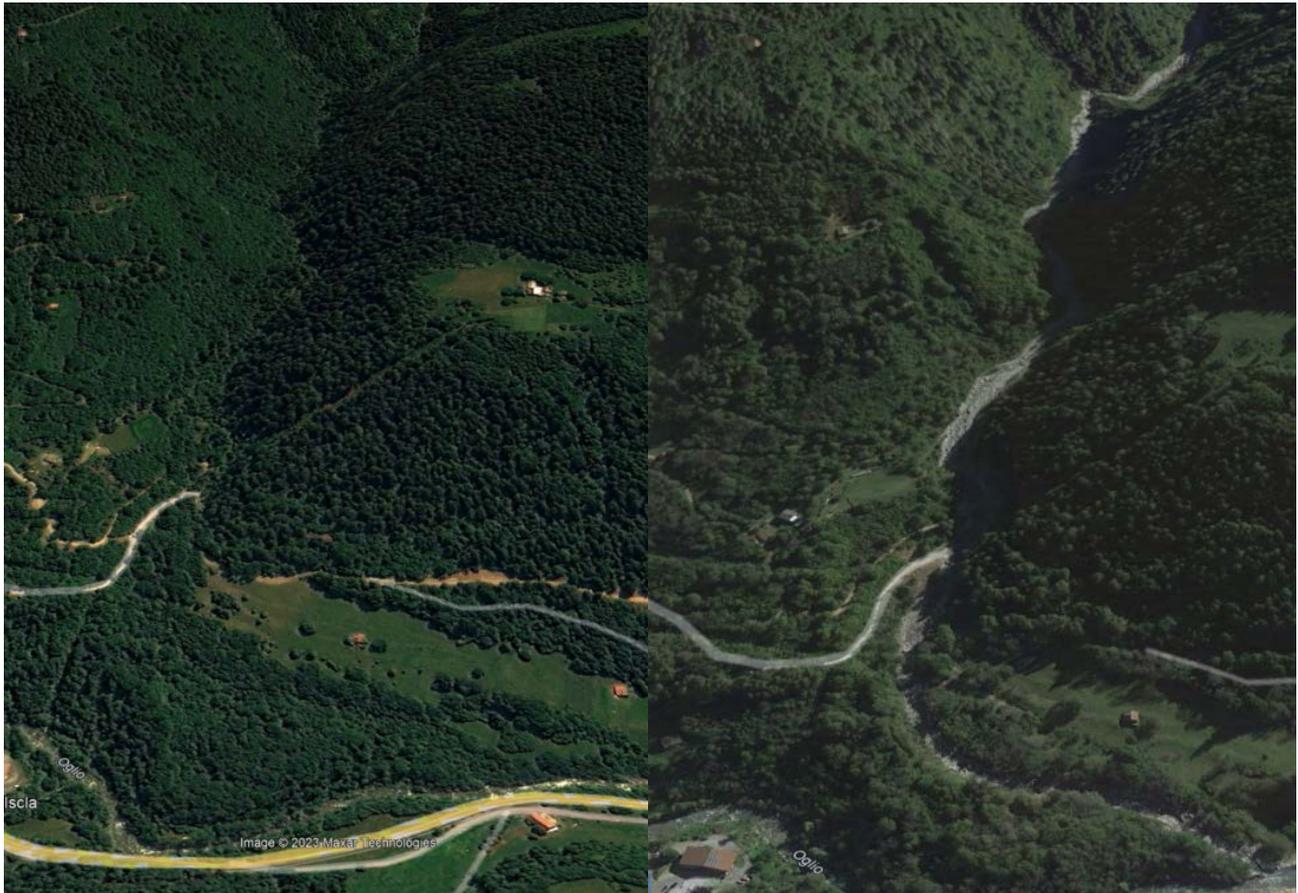
In questo caso la magnitudo è necessaria per la verifica delle opere idrauliche di progetto nell'ambito di un singolo evento di trasporto solido/colata detritica. Utilissimo per la scelta di un valore di magnitudo è l'osservazione di fenomeni di trasporto detritico già accaduti: l'evento più recente e notevole è quello avvenuto il 16 agosto 2021.



Figura 9: Immagine aerea dell'immissione della Val Finale nel Fiume Oglio a seguito dell'evento del 16 agosto 2021.

Di seguito sono riportate le immagini satellitari relative a prima di tale evento e dopo, dalle quali si può vedere come tutto l'alveo centrale della Val Finale sia stato caratterizzato da un forte flusso detritico che ha sia scavato sia depositato un volume considerevole i detriti arrivando persino a ostruire il fiume Oglio a valle e provocandone la fuoriuscita.

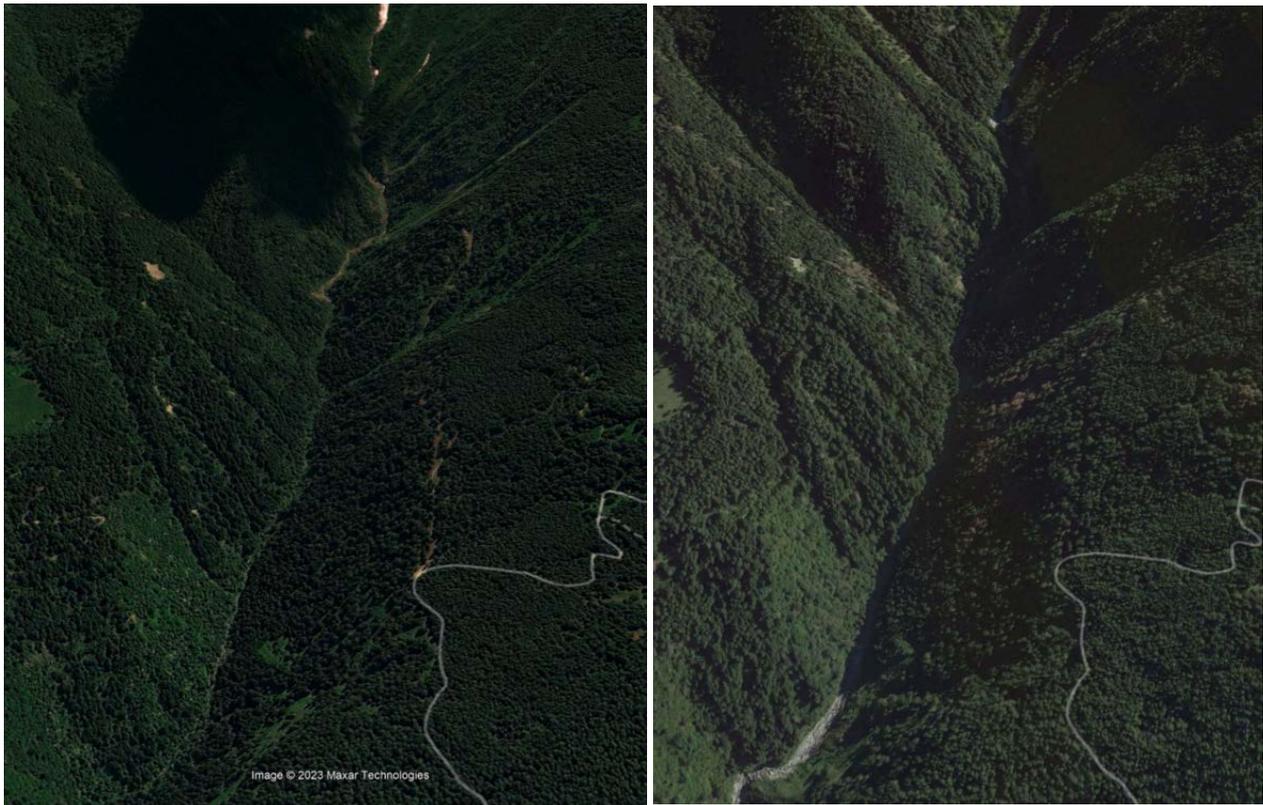
Appare quindi evidente che a favore di sicurezza è opportuno utilizzare i valori più elevati di magnitudo in quanto è evidente che il bacino possa produrre spostamenti solidi elevati nell'arco di un singolo evento estremo.



Bacino di valle Data: 06/2010 (Google Earth)

Bacino di valle Data: 09/2021 (Google Earth)

Figura 10: Confronto immagini satellitari prima e dopo l'evento di colata del 2021 per la parte bassa del bacino.



Bacino di monte Data: 06/2010 (Google Earth) Bacino di monte Data: 09/2021 (Google Earth)

Figura 11: Confronto immagini satellitari prima e dopo l'evento di colata nella parte alta del bacino

Come valore di riferimento per la magnitudo dell'evento di progetto viene quindi scelto il maggiore tra quelli proposti dal SiBCA, calcolato con il metodo D'Agostino:

Tabella 8: Valori di magnitudo di trasporto solido Regione Lombardia portale SIBCA

PARAMETRI:	VALORI	Untà
Magnitudo BOTTINO	34,127	m ³
Magnitudo D'AGOSTINO	110,126	m ³
Magnitudo CERIANI	49,265	m ³
Magnitudo BIANCO	104,922	m ³

4.2. Caratteristiche del trasporto solido e delle colate

Una volta definita la magnitudo dell'evento di progetto resta da stabilire l'idrogramma di trasporto solido, ovvero le portate solide in relazione al tempo in cui il volume di magnitudo è distribuito durante l'evento.

Per la definizione di questo idrogramma bisogna innanzitutto capire le peculiarità di un evento di flusso detritico o di un evento caratterizzato da un'alta concentrazione di sedimenti rispetto alle caratteristiche di un evento caratterizzato dal solo flusso d'acqua.

Come visto nel capitolo precedente, la pluviometria determina un concentrazione di acqua che va in ultima analisi a disegnare un idrogramma di progetto. È chiaro che l'eventuale flusso detritico, soprattutto un flusso estremo, non segue questo idrogramma di portata idrica.

Diverse osservazioni sul campo hanno infatti permesso di tracciare le principali caratteristiche delle colate detritiche soprattutto per quanto riguarda eventi originati dalla massiccia mobilitazione dei sedimenti presenti nel bacino a seguito di intense precipitazioni.

Questi fenomeni sono caratterizzati da una prima fase di distacco seguita da una seconda fase in cui, grazie alle pendenze e alla velocità, il flusso ingloba una grande quantità di materiale lungo il suo percorso aumentando esponenzialmente in massa. In ultima fase il flusso tende a rallentare e a depositare materiale lungo l'alveo e le zone esondate.

Le osservazioni hanno permesso anche di analizzare la particolare struttura di una colata. La parte frontale tende infatti ad accumulare tutto il materiale di granulometria maggiore trascinando con sé anche masse di dimensioni considerevoli. In coda a questo primo fronte c'è un flusso caratterizzato da particelle più fini.

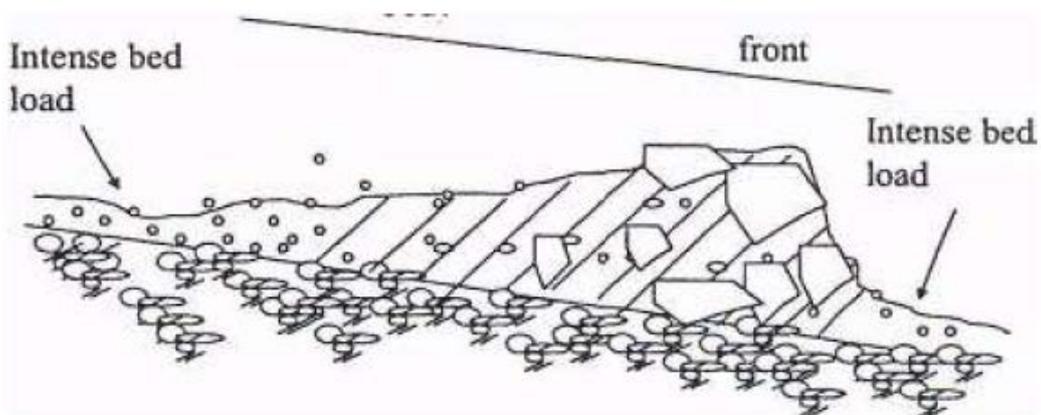


Figura 12: Schema di un fronte di colata

Una particolare attenzione va inoltre dedicata a capire quale fenomeno di trasporto solido si può incontrare, definito a seconda della concentrazione della frazione solida nel flusso del tipo e della granulometria del materiale coinvolto.

Con concentrazioni di solido superiori al 5% in volume si parla di flussi iperconcentrati in quanto la viscosità dell'acqua inizia ad aumentare in maniera sensibile.

All'aumentare della concentrazione, i fenomeni di turbolenza della matrice liquida dovuti alla presenza di solidi sempre più numerosi e grossolani determinano un cambiamento del flusso. In questo caso si parla di colate di fango o mudflow.

Aumentando ulteriormente la concentrazione solida e la dimensione dei grani inizia a instaurarsi un nuovo fenomeno determinato dalle dispersioni di energia causate dalla collisione dei singoli grani. Questo fenomeno aumenta proporzionalmente alla concentrazione e alla dimensione dei grani (si parla in questo caso di colata detritica o debris flow) fino ad arrivare ad una situazione in cui non c'è più un comportamento fluido bensì uno solido-plastico.

In estremo la concentrazione d'acqua smette di essere importante per il fenomeno o addirittura assente: si parla in questi casi di debris avalanche o rockfall (nel caso essa sia dovuta al solo distacco solido di grossi clasti).

In letteratura le definizioni di questi fenomeni non sono univoche. Nella seguente tabella è presentato un riassunto delle diverse concentrazioni in volume solido dei diversi tipi di flussi:

SOURCE	CONCENTRATION PERCENT BY VOLUME (S.G. = 2,65)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Beverage and Culbertson (1964)	High	Extreme	Hyperconcentrated				Mud Flow			
Costa (1984)	Water Flood		Hyperconcentrated			Debris Flow				
NRC from O'Brien & Julien (1984)	Water Flood		Mud Flood		Mud Flow	Landslide				
Takahashi (1981)			Debris or Grain Flow						Fall, Landslide, Creep, Sturzstrom, Pyroclastic Flow	
Chinese Investigators (Fan & Dou, 1980)	Sediment Laden		Hyperconcentrated Flow							
Pierson & Costa (1984)	STREAMFLOW Normal Hyperconcentrated			SLURRY FLOW (Debris Torrent), Debris & Mud Flow, Solifluction				GRAINULAR FLOW Sturzstrom, Debris Avalanche, Earthflow, Soil Creep		

Fast
↓
VELOCITY
↑
Slow

Figura 13: Tassonomie di flussi a trasporto solido e le diverse definizioni di letteratura (modificato da Philips (1888) e Bradley and McCutcheon (1985))

Ancora una volta è utile una valutazione basata sulle osservazioni in campo. Dal materiale accumulato in alveo durante l'ultimo evento dell'agosto 2021 si può intuire come l'elevata presenza di materiale grossolano e di veri e propri massi immersi in una matrice più fine sabbiose, talvolta limosa, suggerisca la presenza di possibili fenomeni caratterizzati sia da un'altra concentrazione di solidi che da una dimensione dei grani considerevole.

È quindi lecito considerare l'evento di progetto come un vero e proprio evento di colata detritica/debris flow in cui sia l'effetto dell'alta concentrazione di solidi e della loro dimensione sia il comportamento della matrice liquida sono fondamentali.

4.3. Definizione dell'idrogramma totale di progetto

Al fine di effettuare simulazioni numeriche dell'effetto della colata detritica sulle strutture in progetto è necessario passare dal volume totale trasportato nell'evento a un idrogramma vero e proprio definito da una durata e da una curva di portata.

Da una parte l'analisi idrologica ha portato alla definizione di una portata di picco duecentennale, dall'altra si è definito un volume detritico totale di progetto utilizzando le stime e le formule empiriche fornite da regione Lombardia. È infatti chiaro che la forma di questo idrogramma solido liquido influenzerà gli impatti del fenomeno.

Come già detto in precedenza, la caratteristica delle colate di detrito è quella di avere un fronte caratterizzato dalla maggior concentrazione di sedimenti e dalla maggior portata. Tenendo conto di ciò, si può assumere che un idrogramma di progetto di tipo impulsivo caratterizzato da portata molto alte per un breve periodo di tempo sia il più adatto.

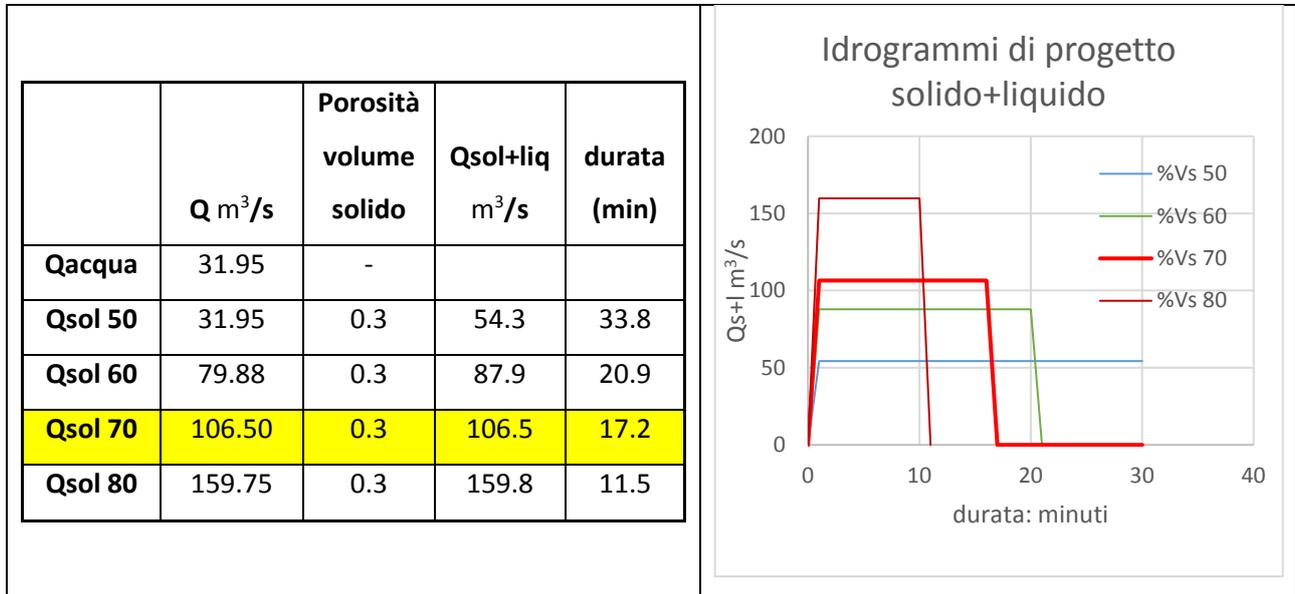
L'idrogramma solido liquido verrà dunque costruito con la seguente metodologia: partendo dalla portata di picco liquida di progetto per i 200 anni e dalla concentrazione volumetrica dei sedimenti si calcolerà la portata di picco e la durata che consenta il raggiungimento del volume solido di progetto. Bisogna inoltre considerare la porosità della frazione solida che a livello di volume e di portata andrà a inglobare gran parte se non la totalità dell'acqua.

La formula per il calcolo della portata di progetto è dunque:

$$Q_{sol+liq} = \max(Q_{acqua} + Q_{solida} - Q_{solida} \times \text{porosità}; Q_{solida}) \quad [20]$$

Nella tabella che segue vengono mostrati i risultati assumendo concentrazioni di solido crescenti dal 50 al 80% con una porosità del 30%.

Tabella 9: Tabella di calcolo della portata e dell'idrogramma di progetto solido e liquido



Per il caso in questione si assume un valore di concentrazione solida del 70% sul volume. Tale valore corrisponde a quello di una colata detritica ricca di matrice solida e di materiale anche di dimensioni considerevoli.

L'idrogramma di progetto sarà dunque quello ricavato per una concentrazione solida del 70% con portata di 106.50 m³/s (liq+sol).

Conclusione

La Val Finale è un piccolo bacino montano caratterizzato dal pericolo di eventi di trasporto solido molto elevati, come testimonia la colata detritica che il 16 agosto 2021 ha raggiunto il fiume Oglio ostruendo il passaggio e causandone la fuoriuscita sulla Strada Statale SS42.

In questa relazione sono state analizzate le caratteristiche morfologiche e pluviometriche del bacino della Val Finale al fine di determinare un idrogramma di portata solida e liquida per la verifica delle opere di protezione idrogeologica in progetto.

In prima battuta è stata analizzata la pluviometria del bacino e le sue caratteristiche morfologiche e di permeabilità per definire una portata liquida di progetto. Tale portata, definita con il metodo SNS-CN, è pari a $31.95 \text{ m}^3/\text{s}$.

In secondo luogo sono stati analizzati i dati forniti dal portale di Regione Lombardia per determinare un volume di trasporto solido totale attribuibile a un evento straordinario di colata detritica. Il valore individuato è pari a quello maggiore, calcolato con il Metodo D'Agostino, pari a $110,126 \text{ m}^3/\text{sec}$.

Infine utilizzando i dati raccolti è stato definito un ideogramma di progetto di portata solida e liquida da utilizzare per le verifiche idrauliche delle opere in progetto per una concentrazione solida del 70% con portata di $106.5 \text{ m}^3/\text{s}$.

RELAZIONE IDRAULICA

Sommario

Sommario	24
1. Premessa e inquadramento	25
2. Modello e parametri.....	29
2.1. Equazioni dei fluidi non newtoniani	29
2.2. Reologia dei fluidi non newtoniani	30
2.3. Modello di terreno e mesh.....	31
2.4. Deposito ed erosione del terreno	33
2.5. Sensitivity analysis e definizione dei parametri di progetto.....	34
3. Risultati.....	45
4. Conclusioni	57

1. Premessa e inquadramento

La seguente relazione ha come scopo la verifica idraulica delle opere previste per la riduzione del rischio idrogeologico della Val Finale.

Tali opere consistono nella realizzazione di una briglia a fessura a quota 910 metri e la ri-arginatura del tratto a monte e valle della briglia stessa in modo da proteggere gli argini dall'erosione e formare a monte un'ampia area di accumulo detritico.



Figura 14: Area dove andrà realizzata la briglia di progetto e zona di accumulo a monte di essa. Quest'area dovrà favorire il deposito dei materiali più grossolani.

Va chiarito che il manufatto che verrà definito “briglia”, pur avendo le medesime finalità idrauliche e funzionamento di una briglia a fessura (rallentare il flusso a monte favorendo la deposizione e la trattenuta di materiale e gestire il flusso idrico) ha caratteristiche costruttive molto diverse. Le briglie classiche a fessura sono composte infatti da un massiccio muro posto trasversalmente lungo l'alveo con un passaggio, la gaveta/fessura, attraverso cui dovrebbe poter passare tutto il flusso previsto.



Figura 15: Briglia a fessura "tipo". In questo caso la verifica idraulica consiste nella verifica che le portate di progetto possano transitare attraverso la fessura centrale, che può avere diverse forme. (Torrente Ble di Ono S. Pietro)

L'opera in progetto invece si configura come un massiccio rinforzo dello spessore di circa 15 metri sul lato sinistro che restringe la curva naturale dell'alveo andando a formare un canale di circa 30 metri di lunghezza e 4,00 m di larghezza.

Questa struttura, a differenza di una briglia classica, non costituisce un'interruzione ma piuttosto un tutt'uno con gli argini e i versanti circostanti, e non subirebbe danni o verrebbe meno alla sua funzione se alcuni detriti vi si accumulassero sopra durante grossi eventi di colata o a causa dell'otturazione del passaggio dovuta a massi di dimensioni particolarmente importanti.

L'obiettivo delle verifiche di seguito effettuate è quindi di dimostrare che le opere in progetto possano contenere e favorire la deposizione a monte della briglia dei sedimenti più pesanti, quali massi di grosse dimensioni, e al contempo disperdere l'energia cinetica della colata favorendo la deposizione nel tratto immediatamente a valle della stessa, mantenendo efficacia anche di fronte al massimo evento volumetrico teorizzabile per il bacino in questione.

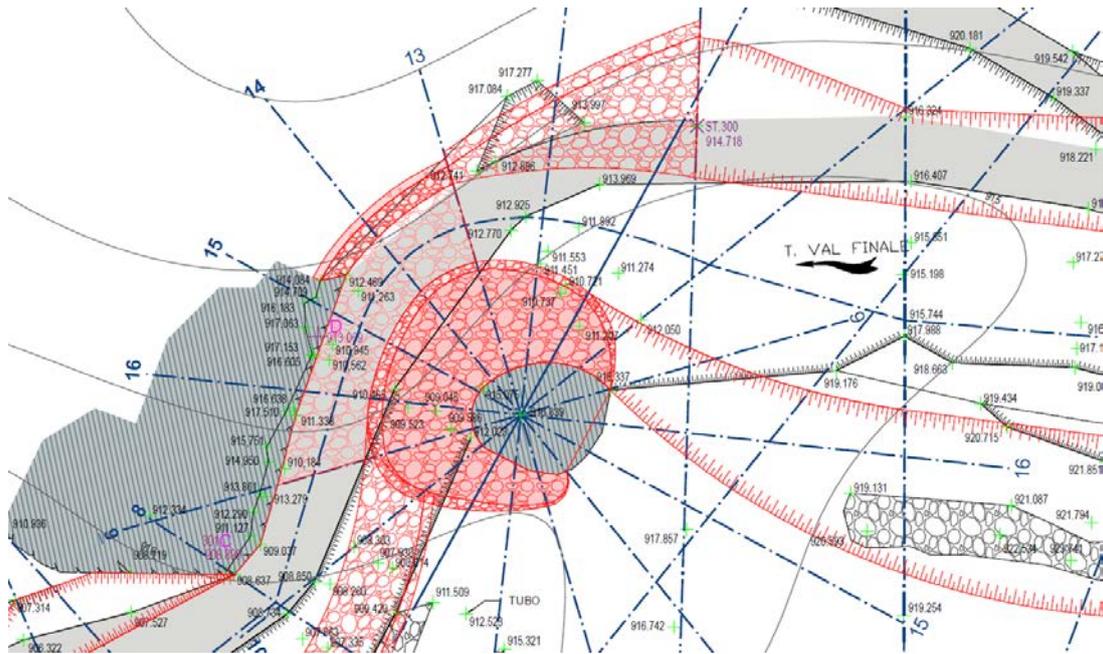


Figura 16: Estratto Planimetrico delle opere in progetto. Si nota la massiccia struttura sulla sponda sinistra di spessore 15 m circa.

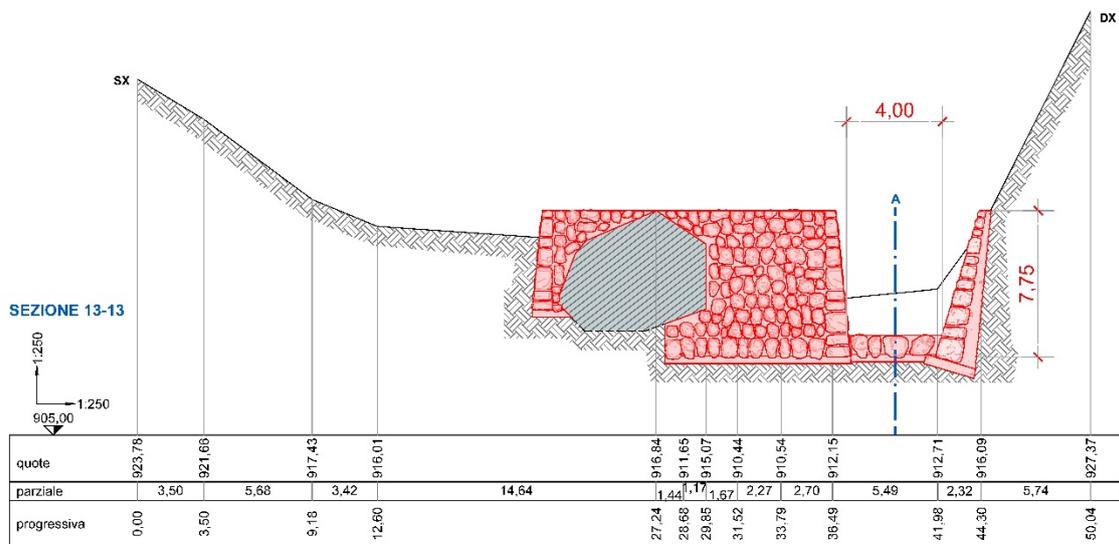


Figura 17: Sezione dell'opera in progetto.

Verrà usato allo scopo il modello numerico HEC-RAS. Tale software è uno standard a livello mondiale per la modellazione monodimensionale e bidimensionale di fenomeni idraulici e da qualche anno ha implementato una libreria di modellazione di flussi non newtoniani in grado di simulare una vasta gamma di fenomeni idraulici caratterizzati da concentrazioni solide che ne alterano in maniera importante il comportamento come appunto le colate detritiche.

La precedente relazione ideologica definisce le caratteristiche di bacino e l'idrogramma solido-liquido di progetto che verrà utilizzato per la verifica delle opere.

Tabella 10: Caratteristiche topografiche del bacino della ValFinale

Torrente	Area [Km ²]	Lunghezza asta principale [km]	Pendenza media versanti [°]	Quota media m.s.l.m.	Quota max m.s.l.m.	Quota min m.s.l.m.
Val Finale	5,45	4,75	35,7	1726	2794	835

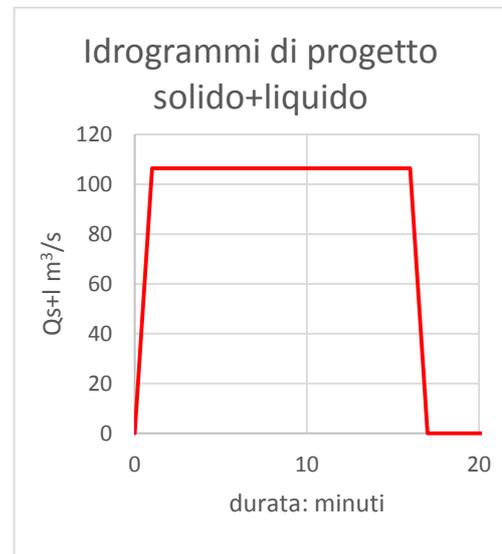
L'idrogramma di progetto è stato definito a partire dalla magnitudo, cioè dal volume totale di trasporto solido, fornita da Regione Lombardia e pari a 110.126 metri cubi (Metodo D'Agostino) e dalla portata di picco idraulica duecentennale (31,95 m³/s) definita dalla pluviometria e dalle caratteristiche geomorfologiche del bacino.

La portata e la durata dell'idrogramma di progetto sono stati ottenuti mettendo in relazione la portata idraulica e il volume solido assumendo una concentrazione volumetrica solida del 70%. I risultati ottenuti sono i seguenti:

Tabella 11: portate e idrogramma di progetto

$V_{trasporto\ solido}$ (D'agostino):	110,126 m ³
--	------------------------

	Q (m ³ /s)	Porosità volume solido	$Q_{sol+liq}$ (m ³ /s)	Durata (min)
Q_{idr_picco}	31.95			
$Q_{sol\ 70\%}$	106.5	0.3	106.5	17



2. Modello e parametri

Il modello numerico adottato per la verifica del corso d'acqua in condizioni di piena è quello implementato dal software HEC-RAS (US Army Corps of Engineering) nella sua versione bidimensionale.

Questa scelta è stata effettuata in quanto il modello monodimensionale non è in grado di riprodurre i fenomeni di espansione e variazione del flusso richiesti nella verifica delle opere in oggetto.

Per quanto riguarda il modello matematico utilizzato in questo caso è quello delle *Shallow Water Equations* con metodo Euleriano-Lagrangiano (SWE-ELM). Questo set di equazioni non trascura i termini inerziali del flusso ed è perciò in grado di simulare in modo più preciso gli effetti causati dall'immissione del t. Val Finale nell'Oglio con conseguente formazione di aree di stagnazione e moti non lineari.

2.1. Equazioni dei fluidi non newtoniani

Al crescere della concentrazione solida i fluidi iniziano a scostarsi dal comportamento normale dell'acqua limpida cambiando alcune dell'assunzione di base dell'idraulica classica.

In particolare eventi caratterizzati da un trasporto di sedimenti che contano più del 5% in volume del flusso necessitano di alcune necessarie modifiche alle equazioni del software.

Per il calcolo idraulico le equazioni differenziali utilizzate sono infatti quelle della conservazione della massa e della conservazione del momento. Si possono modellare con successo i fluidi non newtoniani semplicemente aggiungendo un parametro di perdite di carico che tenga conto della viscosità e delle perdite inerziali interne dovute alla concentrazione solida che ne altera il comportamento.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial s_c (A + A_o)}{\partial t} - q = 0 \quad (\text{Conservation of Mass})$$

$$\frac{\partial (s_m Q)}{\partial t} + \frac{\partial (\beta Q^2 / A)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \boxed{S_f} + \boxed{S_{ec}} + S_i \right) + L = 0 \quad (\text{Conservation of Momentum})$$

Friction Slope
(Manning's)

Contraction/
Expansion
Losses

Fattori di perdita di carico per fluidi newtoniani

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial s_c (A + A_o)}{\partial t} - q = 0 \quad (\text{Conservation of Mass})$$

$$\frac{\partial (s_m Q)}{\partial t} + \frac{\partial (\beta Q^2 / A)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \boxed{S_f} + \boxed{S_{ec}} + \boxed{S_i} \right) + L = 0 \quad (\text{Conservation of Momentum})$$

Friction Slope
(Manning's)

Contraction/
Expansion
Losses

Viscous and
Inertial Internal
Losses

Fattori di perdita di carico per fluidi non-newtoniani

Figura 18: Modifica delle equazioni di conservazione della massa e del momento per la simulazione di comportamenti non newtoniani

La modellazione del comportamento di fluidi non newtoniani passa quindi attraverso la definizione delle perdite di carico come effetto degli sforzi di taglio (shear stress) agenti sulla matrice.

La seguente equazione definisce la relazione tra lo sforzo di taglio, raggio idraulico e perdita di carico:

$$\tau = \gamma R S_f$$

Dunque la perdita di carico può essere espressa in funzione dello sforzo dalla seguente relazione:

$$S_f = \frac{\tau}{\gamma R}$$

Nel caso specifico di una colata di fango o di detriti, le perdite interne del flusso sono determinate dalla seguente relazione:

$$S_{MD} = \frac{\tau_{internal\ fluid}}{\gamma R}$$

2.2. Reologia dei fluidi non newtoniani

La reologia è lo studio della deformazione dei materiali in relazione allo sforzo, nel caso specifico si parla delle differenze reologiche tra il modello di fluido newtoniano e le variazioni non newtoniane. Nel caso di fluido newtoniano la relazione tra sforzo e deformazione è lineare con intercetta 0, nel caso invece di comportamenti non newtoniani l'intercetta non è più uguale a zero ed eventualmente la relazione sforzo deformazione non è più lineare.

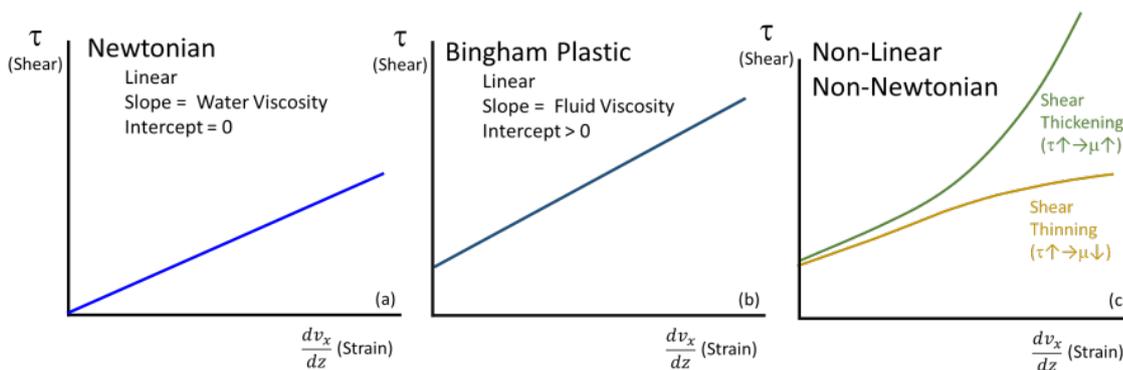


Figura 19: relazione sforzo/deformazione per modelli newtoniani e non newtoniani

A seconda di quale fenomeno si vuole simulare è opportuno scegliere un modello reologico adatto in quanto come si vede dai grafici diversi modelli hanno comportamenti opposti.

Nella figura seguente sono riassunti i vari modelli reologici e la situazione di utilizzo consigliata. Si nota come al crescere della concentrazione in modelli diventano sempre più complessi.

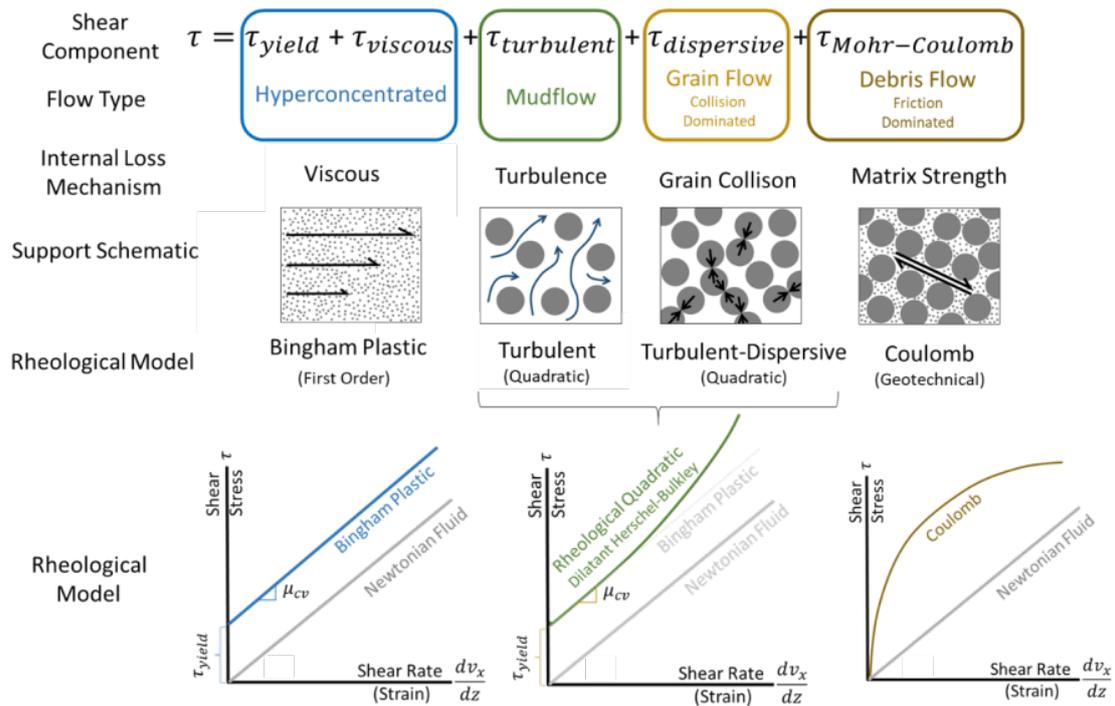


Figura 20: Termini di sforzo al crescere delle concentrazioni solide e modelli reologici rappresentativi

Per concentrazioni superiori al 60% la relazione tra deformazione e sforzo si scosta dall'andamento lineare ed è chiamata dilatante quando al salire dello stress la deformazione sulla matrice è sempre minore.

Questo modello, chiamato quadratico, ben rappresenta il comportamento delle colate di fango e di materiale detritico. A queste concentrazioni infatti le interazioni tra le particelle diventano importanti ma il fluido definisce comunque in maniera dominante il trasporto dei solidi.

Nel caso i detriti presenti nel flusso siano di numero e dimensione tale per cui la frizione tra essi diventi il fenomeno dominante, al crescere dello sforzo la deformazione della matrice aumenta con comportamento opposto a quello dilatante. In questo caso la matrice non ha più un comportamento di un fluido ma quella di un solido classico ed è necessario usare il modello geotecnico di Mohr-Coulomb.

2.3. Modello di terreno e mesh

Il modello digitale del terreno è stato eseguito utilizzando il DTM 5x5 di Regione Lombardia. L'area di progetto è poi stata affinata puntualmente a livello di raster utilizzando i dati di progetto in modo da avere una fedele riproduzione plano-altimetrica dell'area. Su questa base è stata creata la mesh per la computazione.

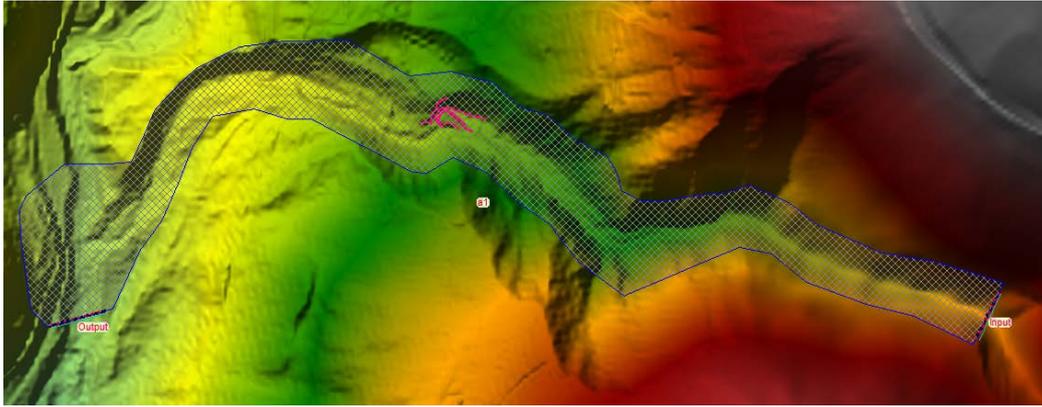


Figure 1: Mesh e modello 2D con condizioni al contorno. L'area di modellazione è molto più estesa dell'area di progetto in modo da rendere i risultati praticamente indipendenti dalle condizioni al contorno.

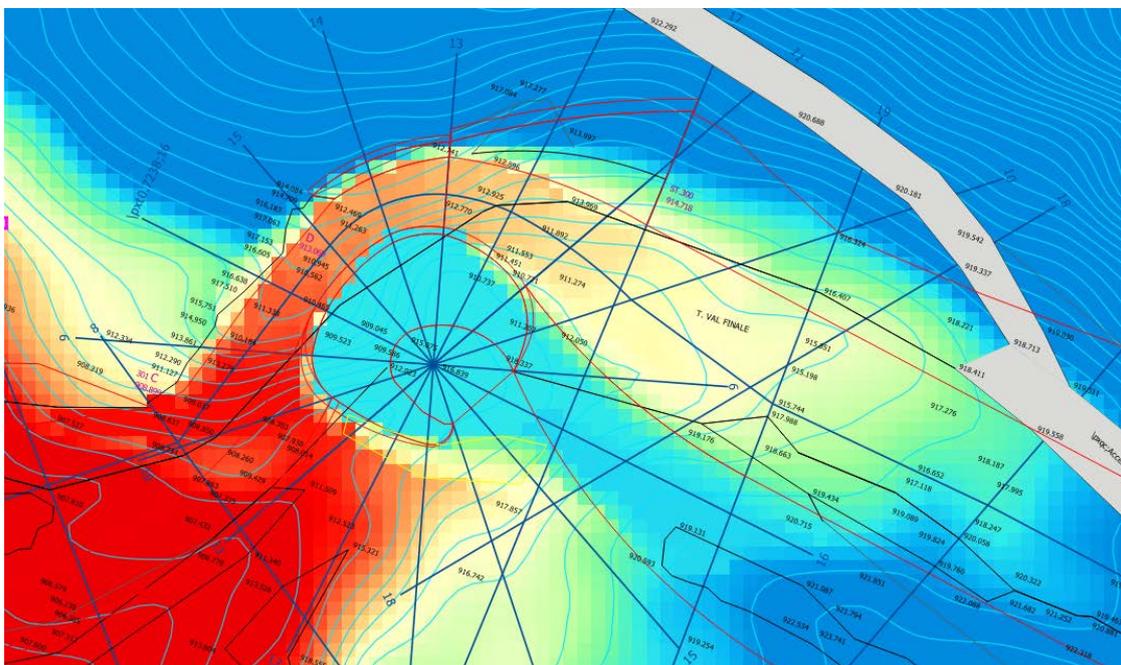


Figura 21: Modifica del terreno per la modellazione della briglia in progetto

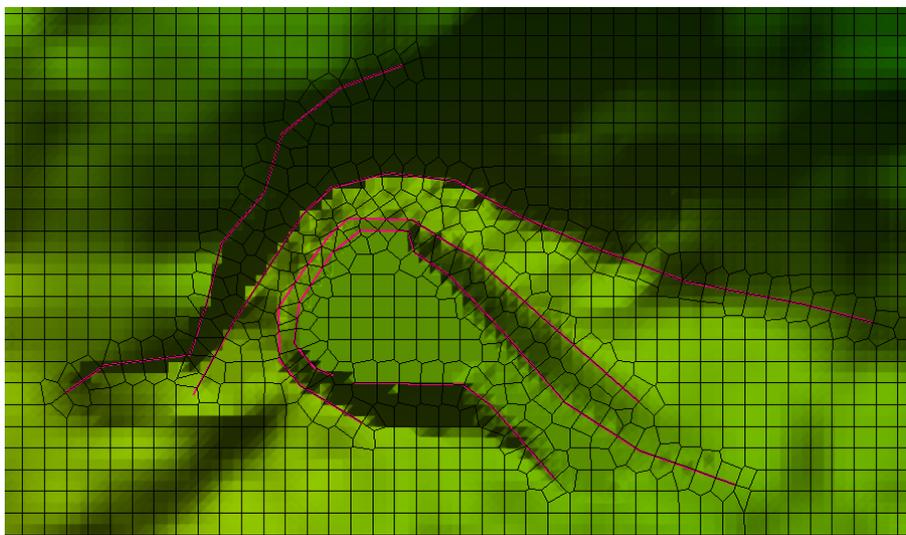


Figure 2: Modellazione del terreno e mesh di calcolo rifinita nei pressi della briglia.

Le condizioni al contorno sono state settate come idrogramma in entrata a circa 600 m a monte della briglia, mentre è stata settata una condizione al contorno di “*Normal Depth*” per il deflusso a valle con il parametro di “*Friction Slope*” settato al valore di 0,1 (10% di pendenza dell’alveo) dopo la confluenza nell’Oglio.

2.4. Deposito ed erosione del terreno

Un aspetto fondamentale quando si parla di colata detritica o comunque di un massiccio trasporto di materiale solido e liquido è quello che riguarda i cambiamenti del terreno dovuti all'erosione e al deposito di materiale lungo il percorso del flusso.

All'interno del bacino vi saranno infatti zone erosive in cui grazie alle pendenze elevate il flusso acquista energia e va a ingrossarsi acquisendo materiale dalle sponde e dal fondo, sempre che questi non siano composti da rocce compatte e quindi inerosibili. Nelle zone a pendenza minore, invece, il flusso tende a rallentare e si avrà la deposizione di sedimenti via via più fini al diminuire della velocità.

Nella modellazione di questi fenomeni va quindi valutata attentamente la possibilità di includere le dinamiche sopra descritte nel modello:

- per quanto riguarda la modellazione del deposito dei sedimenti, HEC-RAS permette nelle simulazioni dinamiche non newtoniane di definire quando la colata raggiunge un livello statico tale per cui non è più in grado di muoversi diventando quindi un sedimento;
- per quanto riguarda invece l'erosione del fondo dell'alveo non è ancora disponibile nel software una funzione che ne permetta la modellazione.

Nel caso in questione il fattore dell'erosione del fondo dell'alveo può essere ignorato. Questo poiché:

- la portata di progetto è stata determinata attraverso scelte molto conservative a favore di sicurezza; il volume dell'evento simulato è dunque tale per cui eventuali fenomeni di erosione dell'alveo non vanno a influire in maniera significativa sul flusso ma anzi sono già considerati nelle portate stesse.
- gli interventi in progetto andranno a rimuovere molto materiale detritico presente a fondo alveo nell'area immediatamente sopra la briglia. Al di sotto di questo strato di sedimenti si trova, per la maggior parte, un letto di roccia solida inerosibile: possiamo dunque osservare come in questo tratto l'erosione dell'alveo possa essere considerata irrilevante;
- nella zona della briglia sono in progetto rinforzi arginali e di fondo che ne devono appunto impedire l'erosione;

- scendendo verso valle le pendenze diventano sempre meno importanti e la presenza di aree di espansione fa sì che i fenomeni erosivi vengano ampiamente compensati dai tre fenomeni di deposito dei detriti.

Da queste considerazioni si può affermare che, per l'analisi del caso in questione, è ragionevolmente adatto l'utilizzo di un modello non erosivo ma ugualmente in grado di definire il sedimento solido di deposito alla fine della colata.



Figura 22: Tratto a monte della briglia. Si notano i fianchi rocciosi dell'alveo che emergono dai detriti movimentati nel 2021.

2.5. Sensitivity analysis e definizione dei parametri di progetto

Il parametro principale su cui ci si basa anche per la scelta del modello da utilizzare è la concentrazione volumetrica di materiale solido. Questa è stata stimata di valore pari al 70% nella precedente relazione.

A questo punto i due modelli utilizzabili per modellare un flusso avente una concentrazione solida elevata sono quello di O'Brain (quadratico dilatante) e il modello clastico di flusso granulare basato sull'equazione di Columb-Mohr.

In quest'ultimo caso il modello dipende da un solo parametro:

- ϕ (angolo interno di frizione): i valori di questo angolo dipendono dal mix solido-liquido ma tipicamente sono tra $2,5^\circ$ e 15° .

Nel secondo caso i parametri fondamentali sono 3:

1. Yield Stress (sforzo di deformazione plastica);
2. la viscosità dinamica;
3. la dimensione rappresentativa dei grani.

Il primo parametro esprime lo sforzo minimo necessario per mettere in movimento la massa liquida e solida e lo sforzo di sotto il quale la colata si ferma e si deposita. Inoltre il suo valore determina la curvatura del rapporto tra sforzo e deformazione assieme al secondo parametro: la viscosità dinamica del mix.

Il primo valore cresce con l'aumentare della dimensione e concentrazione dei grani e quindi della capacità di mantenere la forma in stato di quiete. Sono disponibili dei range in letteratura anche se la determinazione di un valore preciso è difficoltosa.

Per la definizione della viscosità dinamica verrà qui utilizzata la formulazione esponenziale che in base a un parametro B definito in letteratura per differenti tipi di suolo definisce una relazione tra viscosità e concentrazione volumetrica.

Tabella 12: Tabella dei valori tipici di Yield Stress, coefficiente di manning e viscosità dinamica con diversi riferimenti bibliografici

Parameter	Range of Values	References
Yield stress (Pa)	5 - 4,600	Floyd et al. 2020; Phillips 1988; Tiranti and Deangeli 2015
Dynamic Viscosity (Pa·s)	0.003 - 320	Floyd et al. 2020; Phillips 1988
Manning's n	0.021 - 0.96	Yochum et al. 2014

Type	Liquid Limit Cv	Range (Pa)
Typical Soil	65-80%	375-5,000
Kaolinite	40-50%	200-1,600
Sensitive Clays	35-60%	950-300k
Bentonite	5-20%	200-2E+17

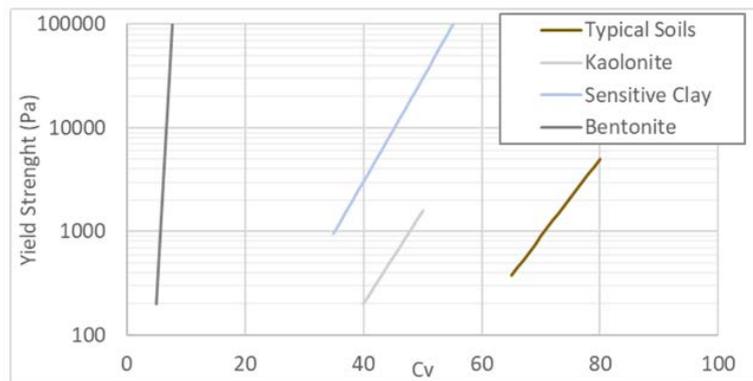


Figura 23: cambiamento dei valori di Yield stress per diversi tipi di suoli in funzione della concentrazione di solido, tabella e grafico (HEC-RAS Manual USACE)

Tabella 13: Valore del coefficiente esponenziale B per la determinazione della viscosità dinamica (manuale tecnico HEC-RAS USACE)

Coefficienti di O'Brien per il calcolo della viscosità	B
Bentonite	100
Argille sensibili	5
Kaolinite	8
Suolo tipico	8

Per quanto riguarda il terzo parametro, la dimensione dei grani, bisogna cercare una dimensione mediana dei detriti presenti nella matrice, tenendo conto che massi da parecchie tonnellate possono viaggiare assieme a piccole particelle di limo e sabbia.

Infine, bisogna stabilire sull'area un coefficiente di manning che tenga conto del terreno su cui il flusso procede: in questo caso si è scelto di considerare un valore di 0.15 data la natura dell'alveo, anche dopo gli interventi di ripristino dello stesso.

Data la difficoltà oggettiva di valutare i parametri specifici sono state effettuate multiple simulazioni con i seguenti range in modo da capirne l'effetto sul flusso e sull'opera idraulica in progetto.

Tabella 14: range di parametri simulati

Parametro	Range	Unità
Yield stress	1000 - 4000	Pa
esponente B per viscosità dinamica	3 - 15	-
Rapr gr size	1 - 300	mm
Angolo di frizione interna (Coulomb)	5 - 10	°

Si è scelto di effettuare tre simulazioni utilizzando il modello matematico *Clastic grain Flow* basato sulla reologia geotecnica di Coloumb-Mohr il cui unico parametro è *l'angolo interno di frizione*. Gli angoli scelti sono stati 5, 7.5 e 10 gradi.

Altre sette simulazioni sono state effettuate utilizzando il modello quadratico di O'Brian (reologia di tipo turbolento dilatante) variando il parametro *yield stress* tra i valori di 1000, 2500, 3000 e 4000 Pascal. La viscosità dinamica è stata invece calcolata attraverso il modello esponenziale utilizzando due valori diversi del coefficiente B: 3 e 8. Questi sono i valori tipici consigliati per materiali granulari e suolo tipico, ovvero un valore medio che riguarda suoli senza particolari caratteristiche plastiche.

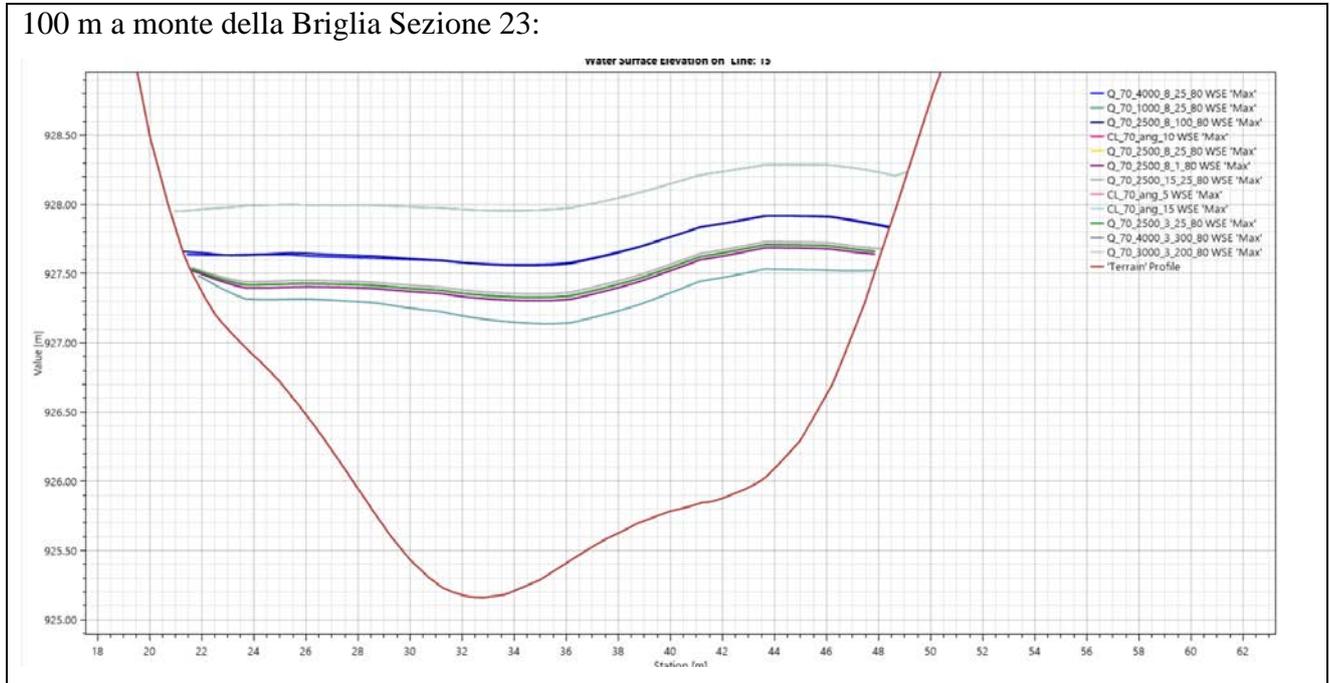
Si va ora a osservare il comportamento dei diversi set di parametri sul risultato della simulazione prendendo tre sezioni di esempio:

- una sezione a monte della briglia in progetto;
- una sezione nella zona di accumulo appena precedente alla briglia;

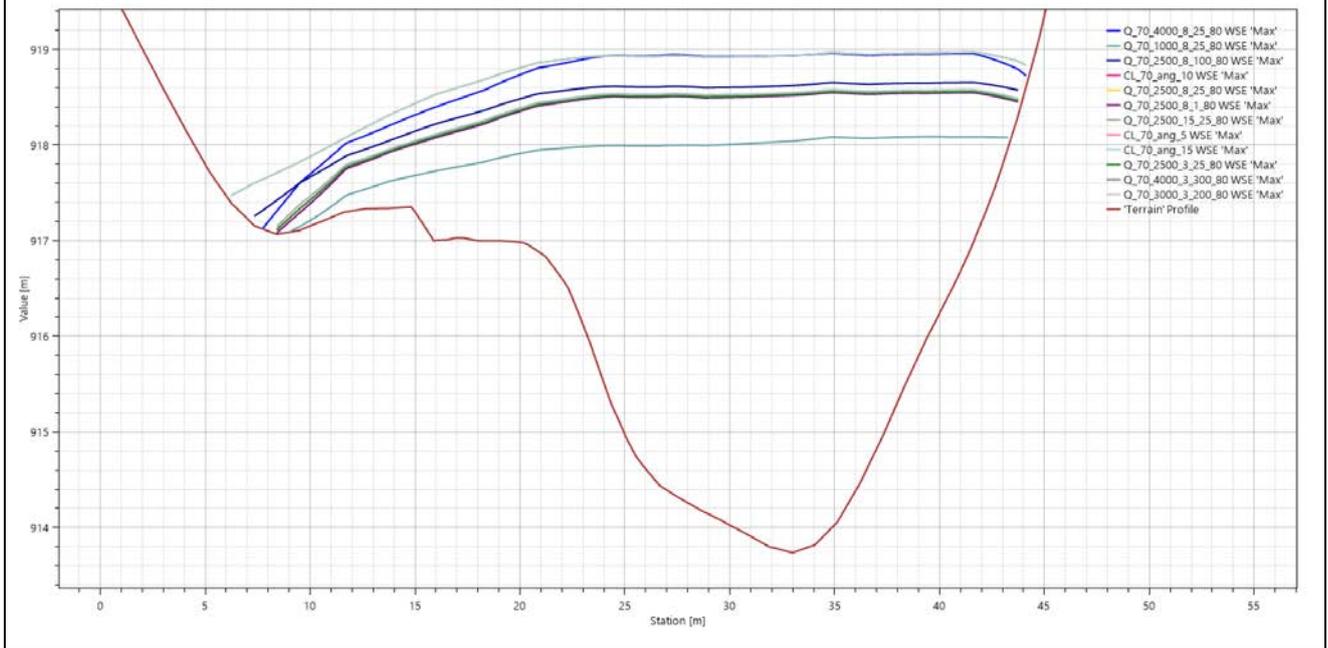
- una sezione del restringimento della briglia.

Su queste sezioni viene osservato il massimo livello raggiunto dalla colata nella sua fase acuta e il livello di deposizione a fine colata.

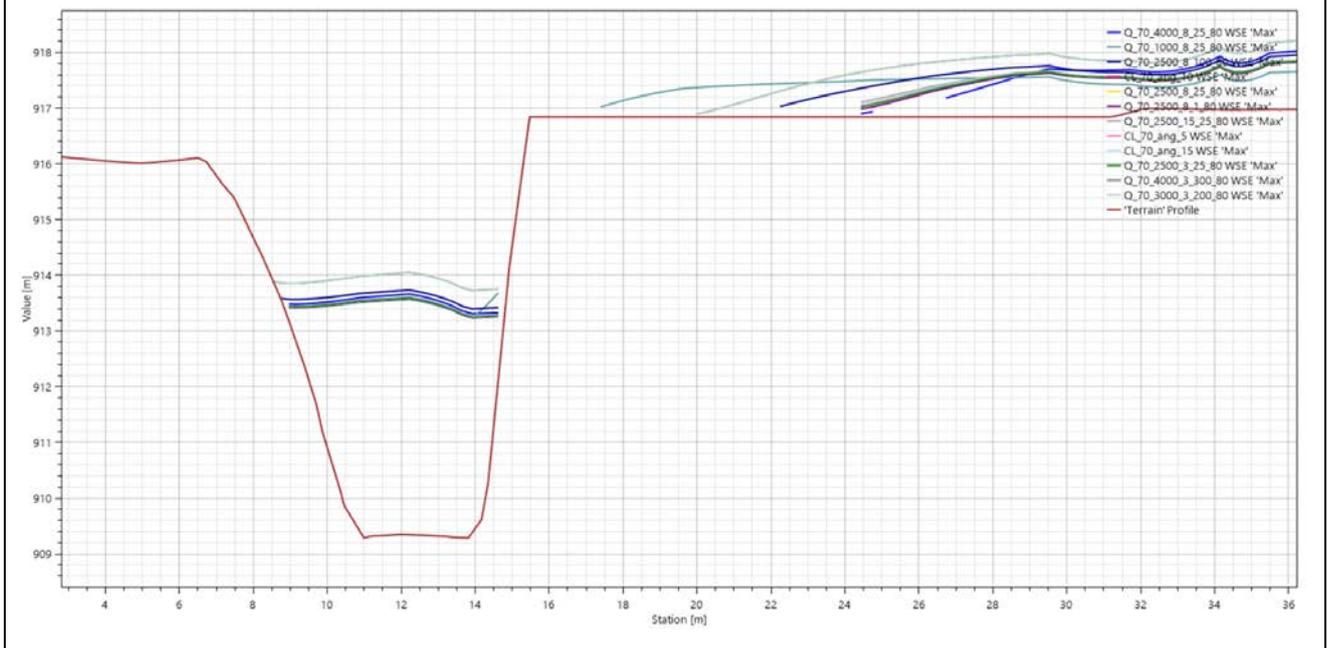
Massimo livello di colata:



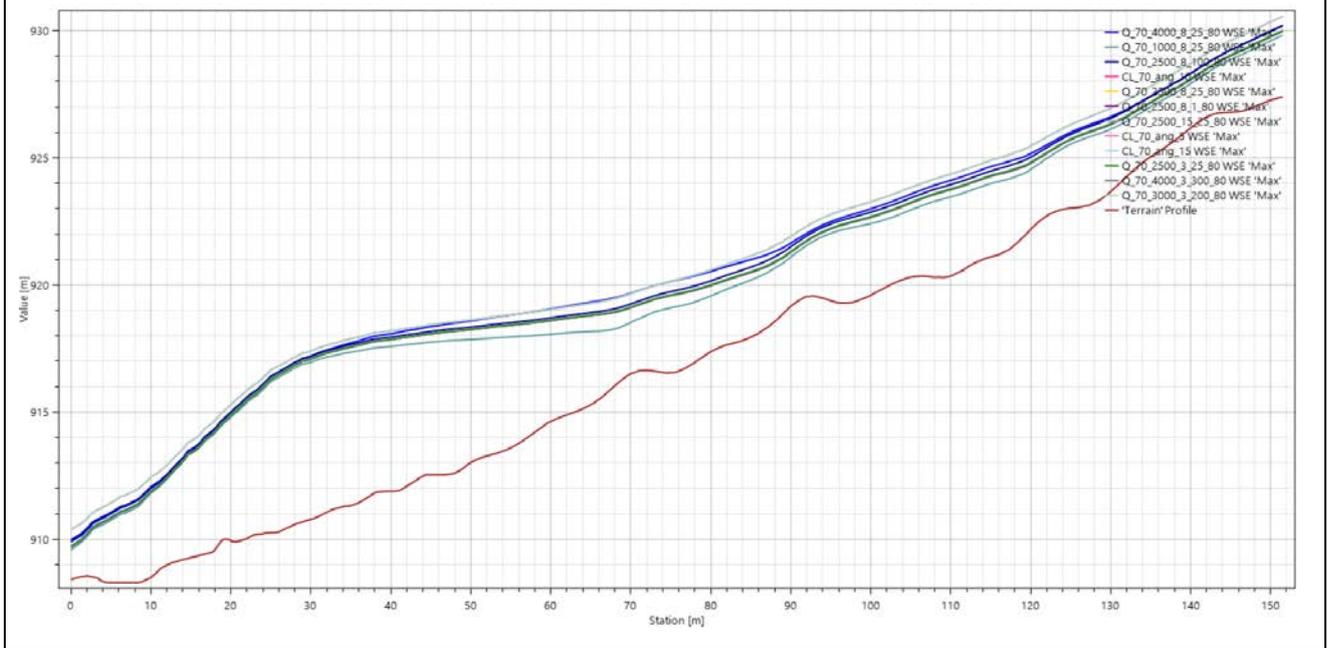
A monte della Briglia Sezione 19:



Sulla Briglia Sezione 16:

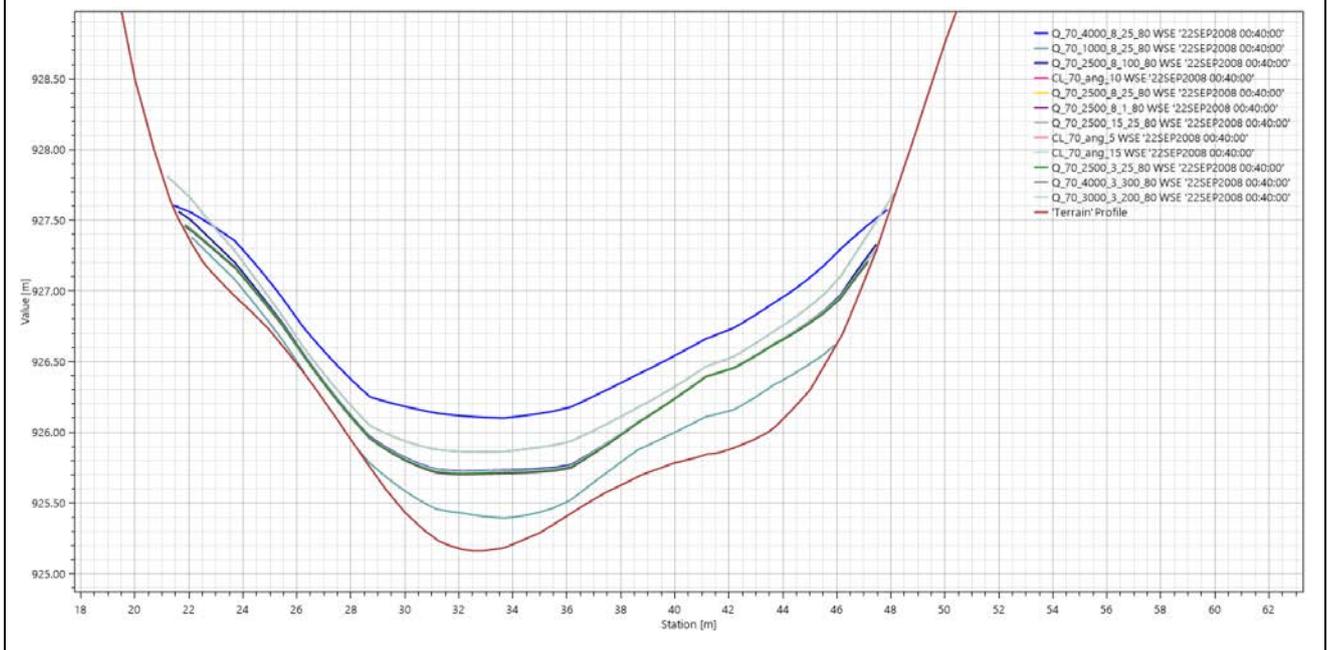


Profilo Sezioni 8-22:

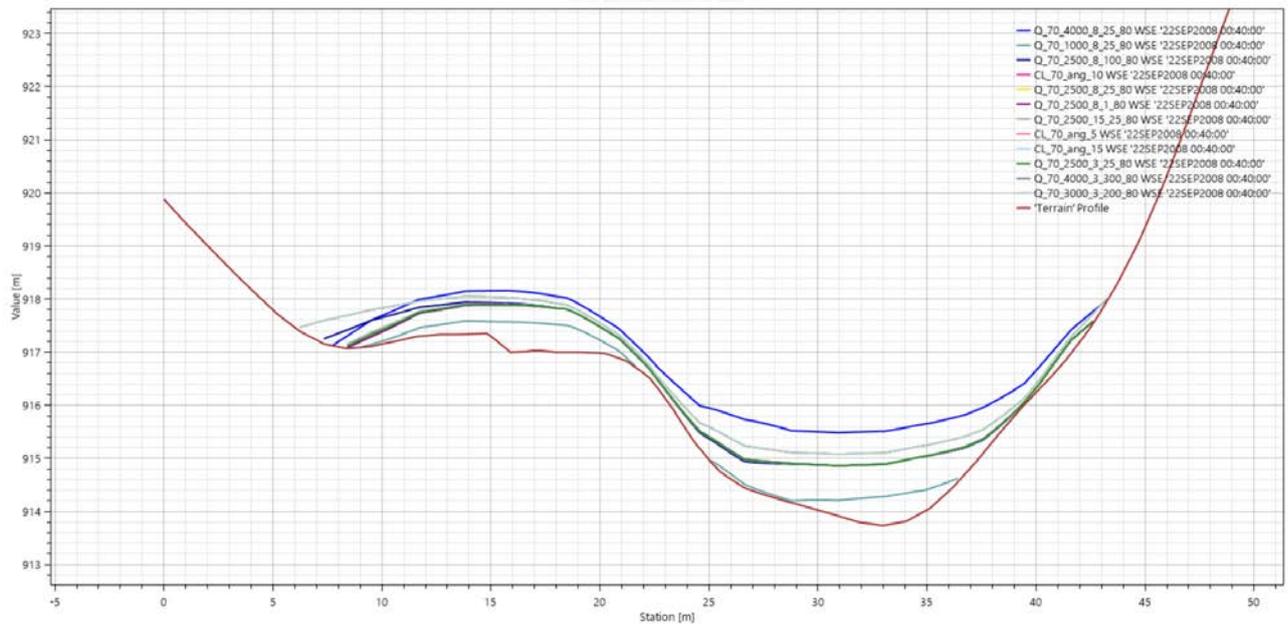


Deposito detritico a fine simulazione:

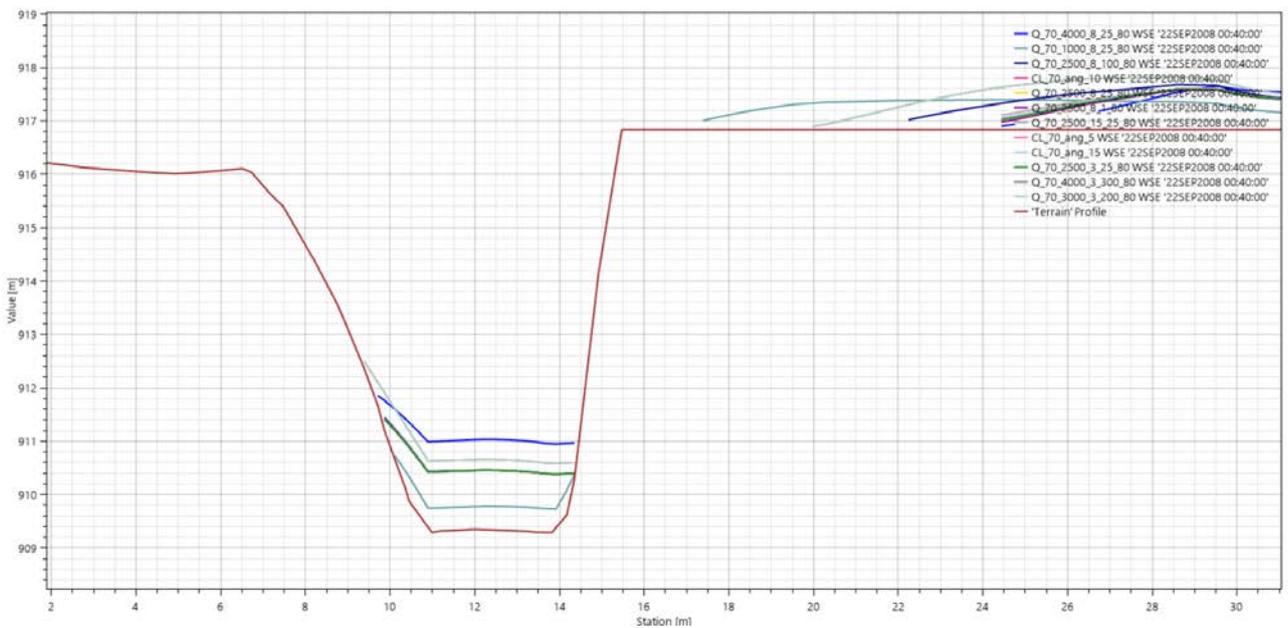
100 m a monte della Briglia Sezione 23:

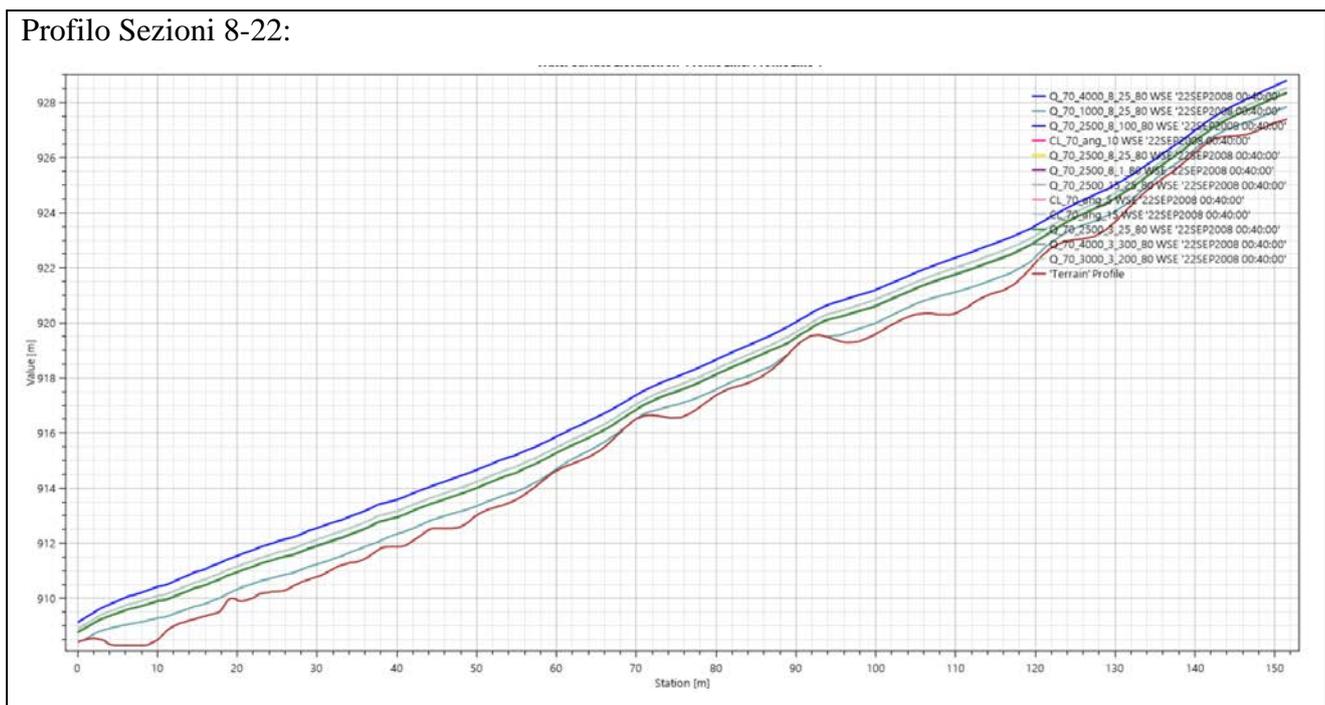


A monte della Briglia Sezione 19:



Sulla Briglia Sezione 16:





Dall'osservazione dei risultati delle simulazioni appare immediatamente evidente che nonostante l'ampio range di parametri utilizzati nelle diverse simulazioni, i risultati non hanno differenze sostanziali, specialmente tenendo conto della scala e delle incertezze del sistema in analisi.

L'unico parametro che influenza l'altezza di deposizione a fine simulazione è lo *yield stress* nel modello di O'Brien, mentre l'altezza di deposizione nelle simulazioni effettuate utilizzando il modello elastico granulare è praticamente sempre la stessa indipendentemente dall'angolo di frizione interna individuato e corrisponde alle simulazioni effettuate con il modello di O'Brien aventi uno *yield-stress* di 2500 Pascal.

L'altezza di deposizione dei detriti a fine colata è quindi direttamente proporzionale allo *yield stress* assegnato durante la simulazione.

Osservando le immagini catturate in alveo nel precedente evento di colata del 16 agosto 2021 si nota come il materiale grossolano accumulato lungo le sponde abbia di per sé un angolo di attrito interno elevato in quanto la pendenza dei depositi osservati è rilevante. Si può quindi concludere che una buona accuratezza del materiale depositato in alveo si possa ottenere con un coefficiente elevato.



Figura 24: Depositi di materiale grossolano a monte dell'area di realizzazione della briglia



Figura 25: Depositi di materiale grossolano a valle dell'area di realizzazione della briglia

Osservando ora i risultati sulle massime altezze di colata si può notare come lo *yield stress* resta uno dei parametri principali per definire il flusso della colata in quanto le simulazioni con lo stesso valore di questo parametro arrivano a risultati pressoché identici (pochi cm di differenza a pari

granulometria). Questo avviene tuttavia a patto che la dimensione rappresentativa dei grani in mm resti simile.

Il modello classico granulare dimostra risultati pressoché identici a quelli ottenuti con una dimensione rappresentativa dei sedimenti di 25 mm e uno *yield stress* di 2500 Pascal, mentre nel modello di O'Brian variando la dimensione rappresentativa dei grani si ottengono delle variazioni sensibili sulla forma della colata. Una colata con una dimensione superiore dei grani si espande infatti lateralmente in modo maggiore e raggiunge delle profondità paragonabili a quelle di colate con sedimenti più fini ma con uno *yield stress* superiore anche di 1000 Pa.

La scelta di un valore univoco di dimensione rappresentativa dei sedimenti in una colata non è per niente banale, infatti si può ben vedere dalle immagini come vi sia una grande quantità di ciottoli, clasti e addirittura massi superiori al metro di diametro mescolata ad altrettanto materiale fine sabbioso o limoso.

In questo caso è importante modellare con precisione come il flusso proveniente dalla parte alta del bacino sia rallentato dalla nuova briglia. Tale flusso sarà composto da una grande quantità di materiale grossolano soprattutto nel caso in cui parliamo di un evento estremo. Questo materiale sarà il primo a concentrarsi e depositarsi nella parte alta del bacino e perciò sarà quello che più conta nella determinazione dell'angolo di deposizione dei sedimenti e nel comportamento della colata nell'area di interesse.



Figura 26: accumuli sedimentari circa 200 m a monte della zona di realizzazione delle opere di progetto. Si può osservare la presenza prevalente di detriti grossolani.

La viscosità dinamica non appare invece molto importante nel caso specifico in analisi. Questo è probabilmente dovuto al range limitato di questa variabile, dovuto alla non presenza di minerali o formazioni particolari dotati di caratteristiche viscosi particolarmente elevate (es Argille, Kaolinite o Bentonite). L'alta concentrazione di sedimenti, anche grossolani, fa inoltre sì che l'attrito di tipo viscoso sia poco importante rispetto a quello turbolento e di collisione.

La composizione prevista dalla colata, che comprende una gran quantità di materiale granulare sia fine che grossolano di tipo non coesivo, indica comunque un coefficiente di viscosità dinamica basso.

Alla luce delle osservazioni effettuate e delle dovute valutazioni i parametri scelti sono dunque i seguenti:

- modello quadratico di O'Brian;
- Yield stress = 3000 Pa;
- Parametro B per la viscosità dinamica = 3;
- Dimensione rappresentativa dei sedimenti = 200 mm;

3. Risultati

I risultati della simulazione bidimensionale sono descritti nelle seguenti fasi:

1. Quando il fronte della colata arriva nei pressi della briglia, la portata oltre i $100 \text{ m}^3/\text{s}$ produce velocità a centro alveo superiori ai 3 m/s con un livello al centro del flusso anche di 3 m .

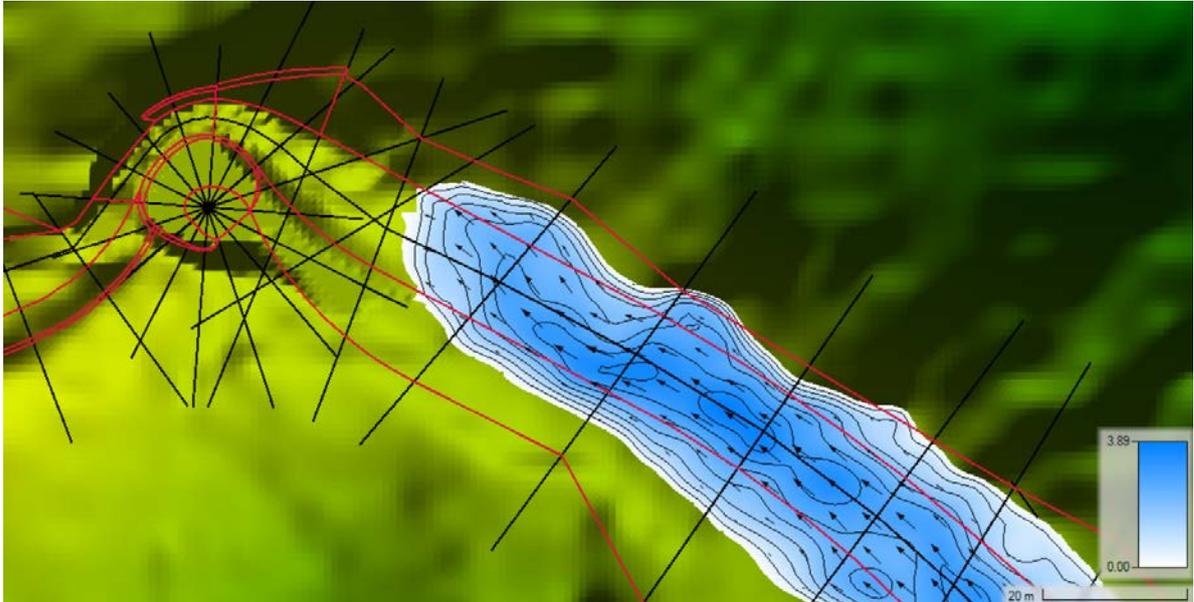


Figura 27: Colata detritica appena prima del momento dell'impatto con la briglia.

2. In 30 secondi avviene l'impatto con le strutture arginali della briglia e l'incanalamento del flusso per il passaggio delimitato dalla massiccia struttura del manufatto a sinistra e la sponda destra rinforzata aumentando localmente la velocità e la profondità.

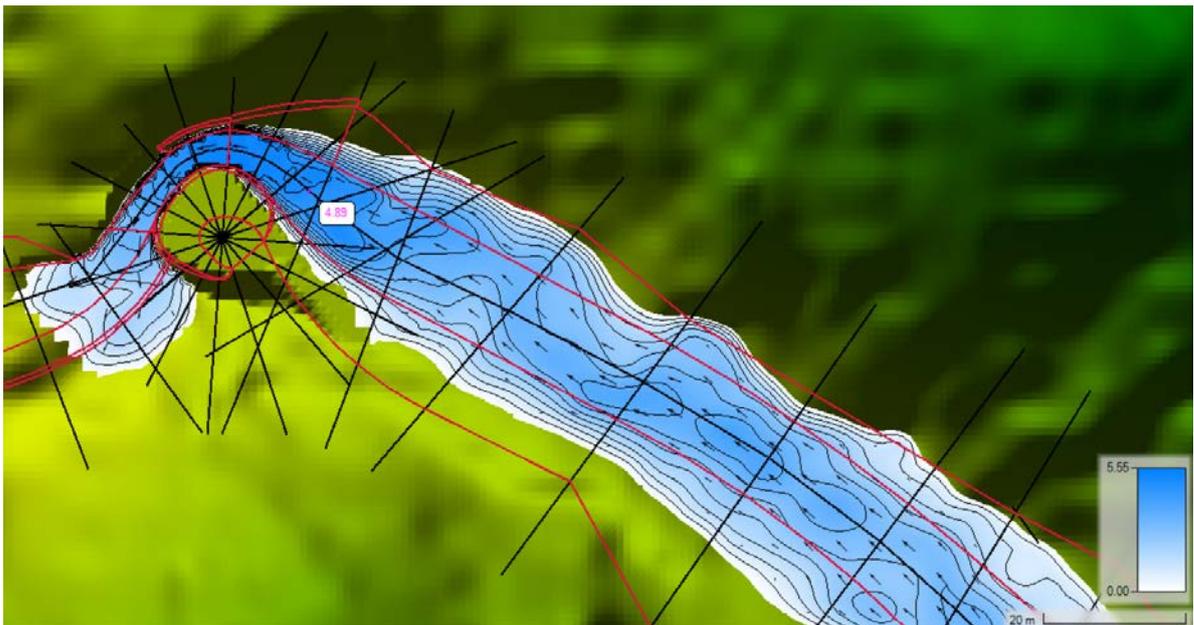


Figura 28: impatto del flusso con le massicce strutture rinforzate della briglia e incanalamento

3. Immediatamente dopo il primo impatto il restringimento causato dalla briglia e dalle opere arginali contigue per una lunghezza di circa 40 m a monte di esso, un improvviso rallentamento della corrente del flusso ne aumenta la profondità e tende ad espandere il flusso sulle aree laterali.

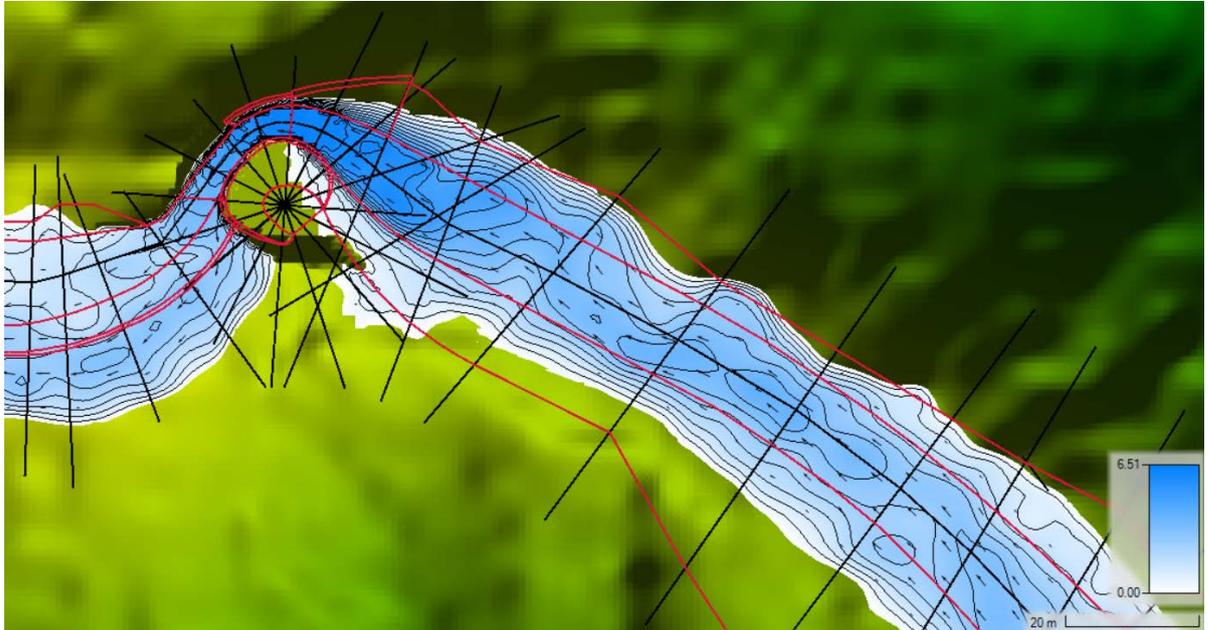


Figura 29: Rallentamento ed espansione del flusso a monte della briglia

4. Nel caso catastrofico in esame la portata si mantiene costante per 13 minuti. In questo lasso di tempo, circa 100.000 m³ di mix composto per il 30%, da acqua e il 70% da solidi si riversa attraverso l'area in esame aumentando il livello del flusso nell'area di rallentamento e depositando materiale sui lati, dove le velocità sono praticamente nulle. Parte del materiale depositato dal flusso tende addirittura a strabordare a sinistra della briglia raggiungendo la massima estensione dopo circa 6 minuti dall'impatto.

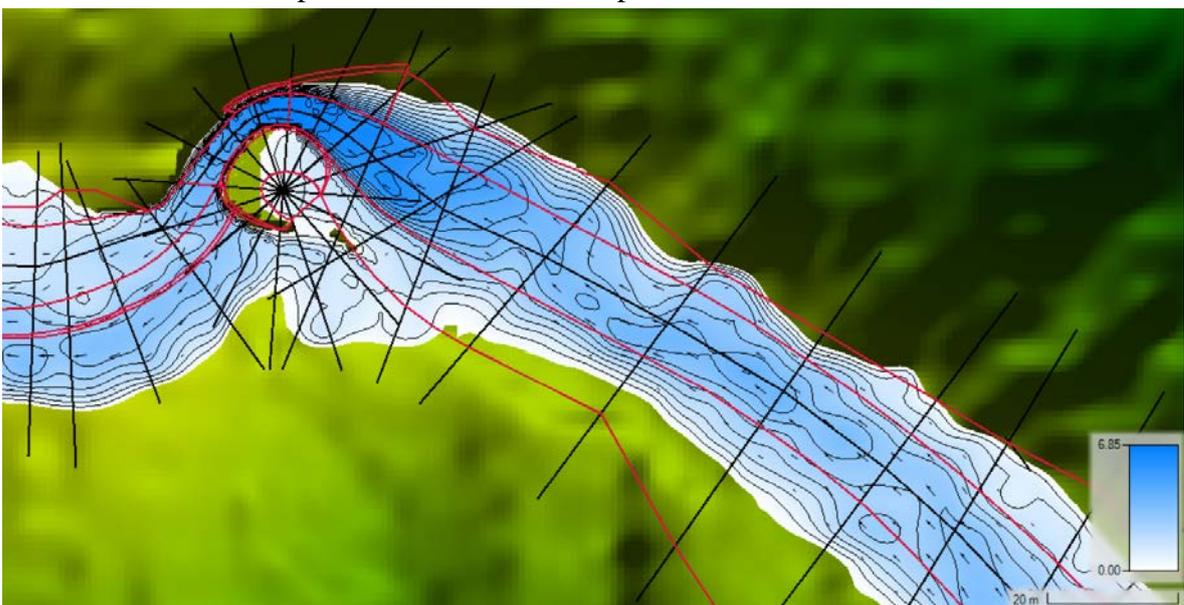


Figura 30: Deposizione e strabordamento sulle aree laterali

5. Al diminuire della portata in arrivo si verifica un ritiro del flusso che lascia nelle zone marginali una grande quantità di sedimenti. Sul lato sinistro della briglia, dove durante la massima intensità dell'evento si è osservato lo strabordamento di materiale, rimane un accumulo che va di fatto ad alzare questo argine.

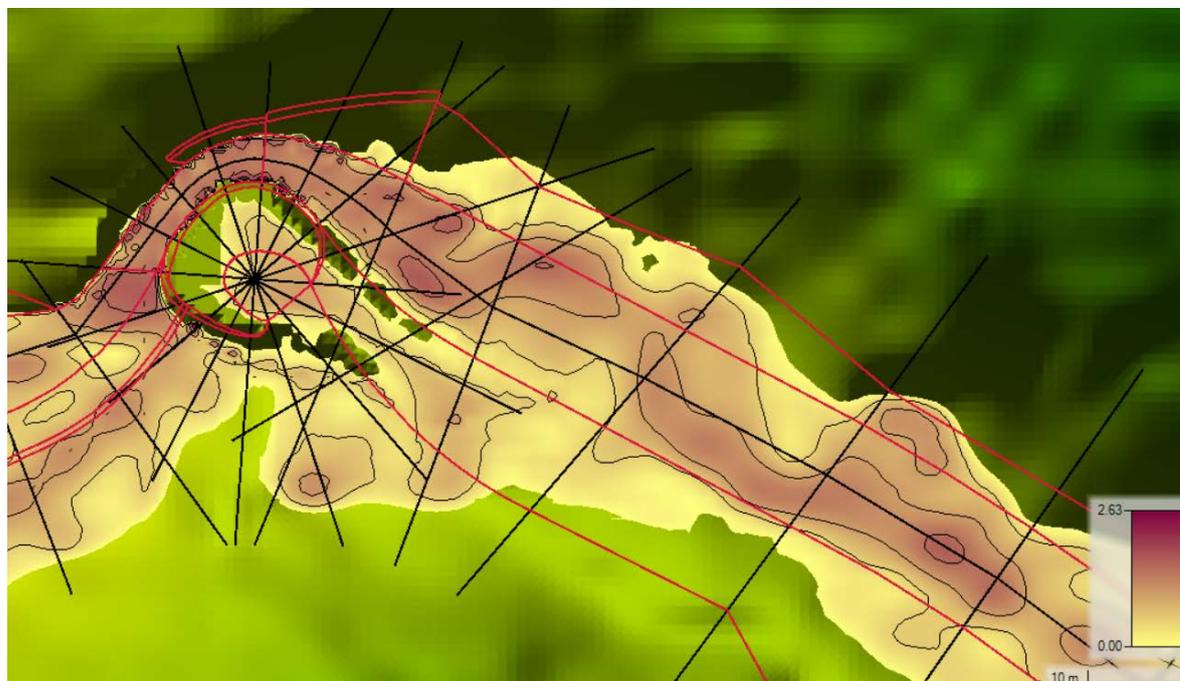


Figura 31: Deposito di sedimenti lasciati dalla colata

Nel grafico seguente vengono analizzate alcune delle grandezze fisiche del flusso registrate a centro alveo dalla sezione 8, appena a valle della briglia, alla sezione 23, circa 90 m a monte di essa.

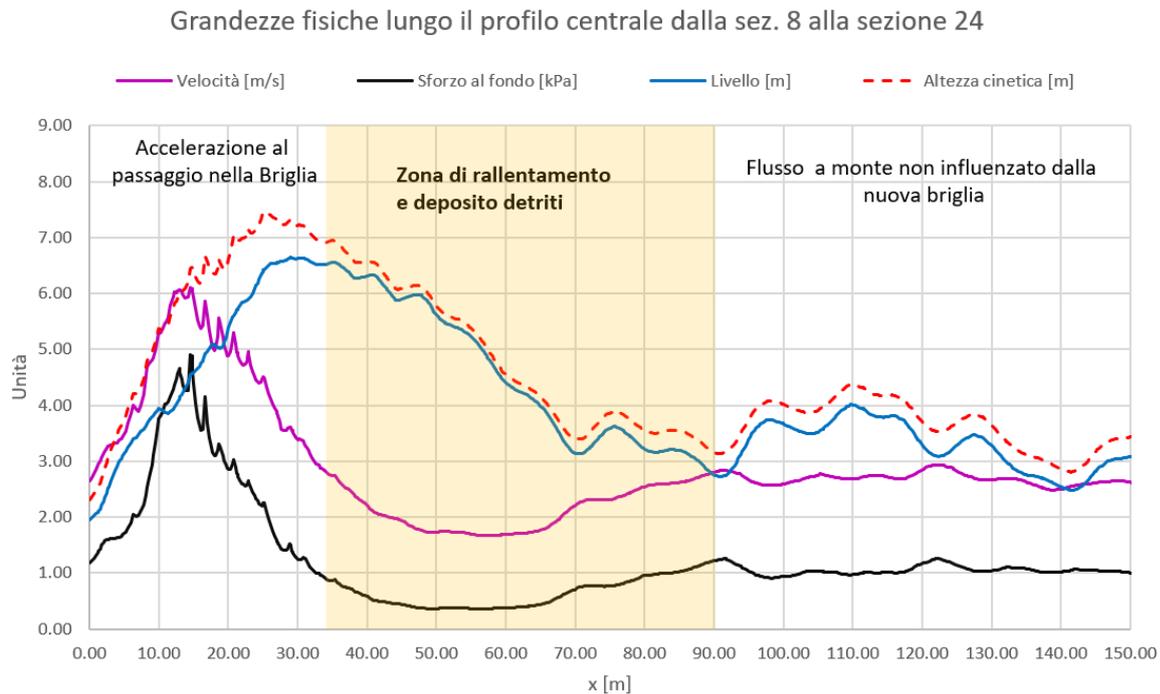


Figura 32: Valori delle grandezze principali sul profilo a centro alveo dalla sezione 8 alla sezione 24.

Come osservato dalle mappe di inondazione durante le varie fasi del processo di colata si può vedere come i manufatti in progetto provochino un forte rallentamento del flusso a monte degli stessi per un'estensione di circa 70 metri. In particolare, è interessante notare come la velocità nel tratto imperturbato prima della zona di rallentamento si attesti a centro alveo su valori compresi tra 2 e 3 m/s, mentre cala su valori vicini a 1.5 m/s nella zona di deposito. Questa variazione di velocità comporta un dimezzamento dello sforzo al fondo presente al centro alveo che passa da valori di circa 1000 kPa a valori inferiori ai 500-600 kPa con conseguenze sul trasporto solido.

Come si può osservare nelle seguenti immagini, l'effetto dell'espansione del flusso nella zona di rallentamento determina la formazione di ampie aree caratterizzata da velocità di flusso estremamente basse, pari a poche decine di cm/s.

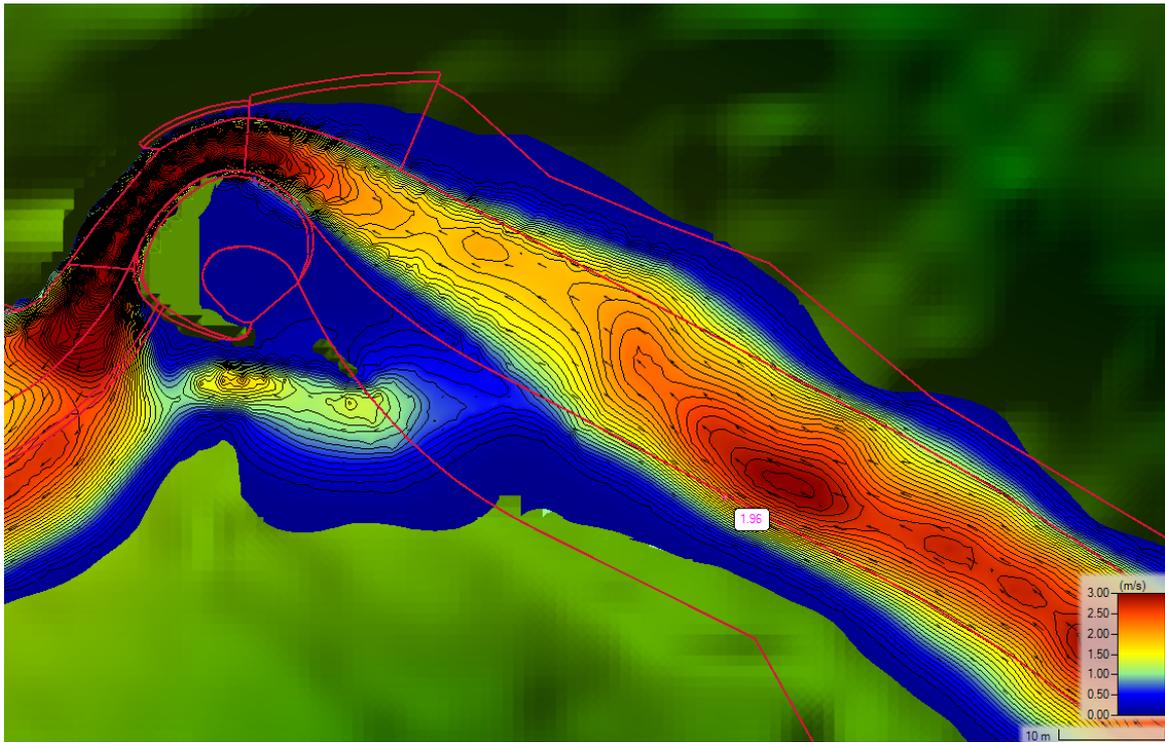


Figura 33: Distribuzione della velocità del flusso in condizioni di picco.

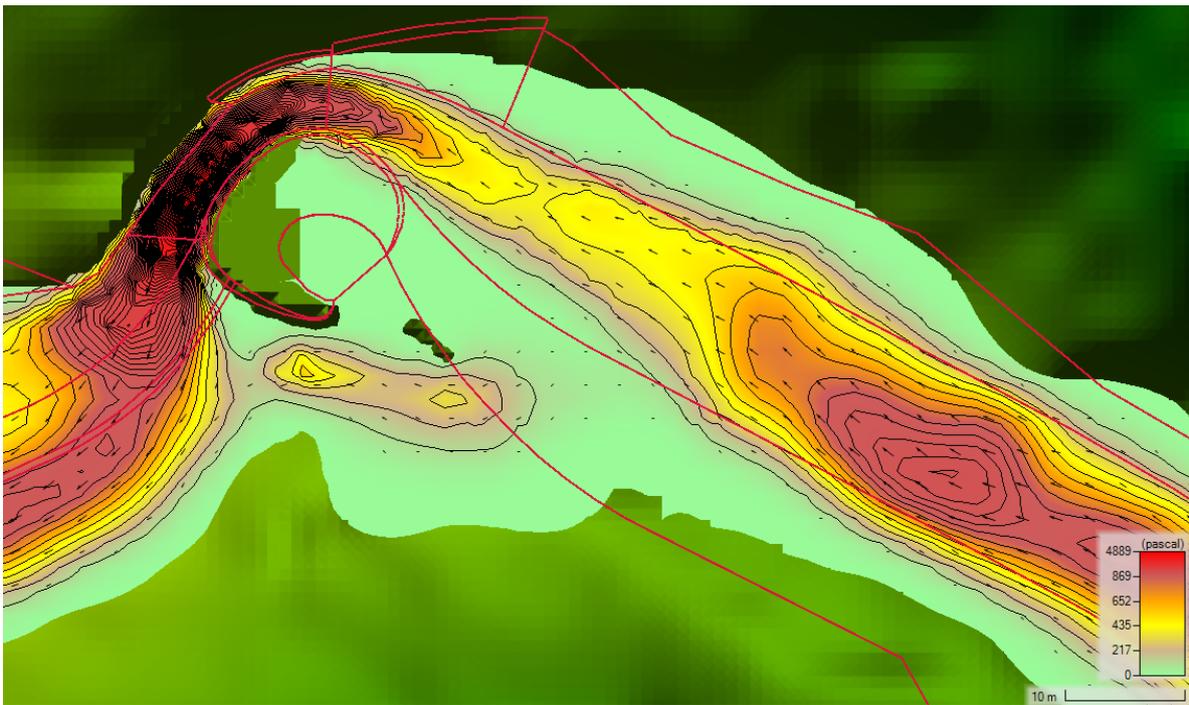


Figura 34: Valori dello sforzo di taglio al fondo del flusso in condizioni di picco.

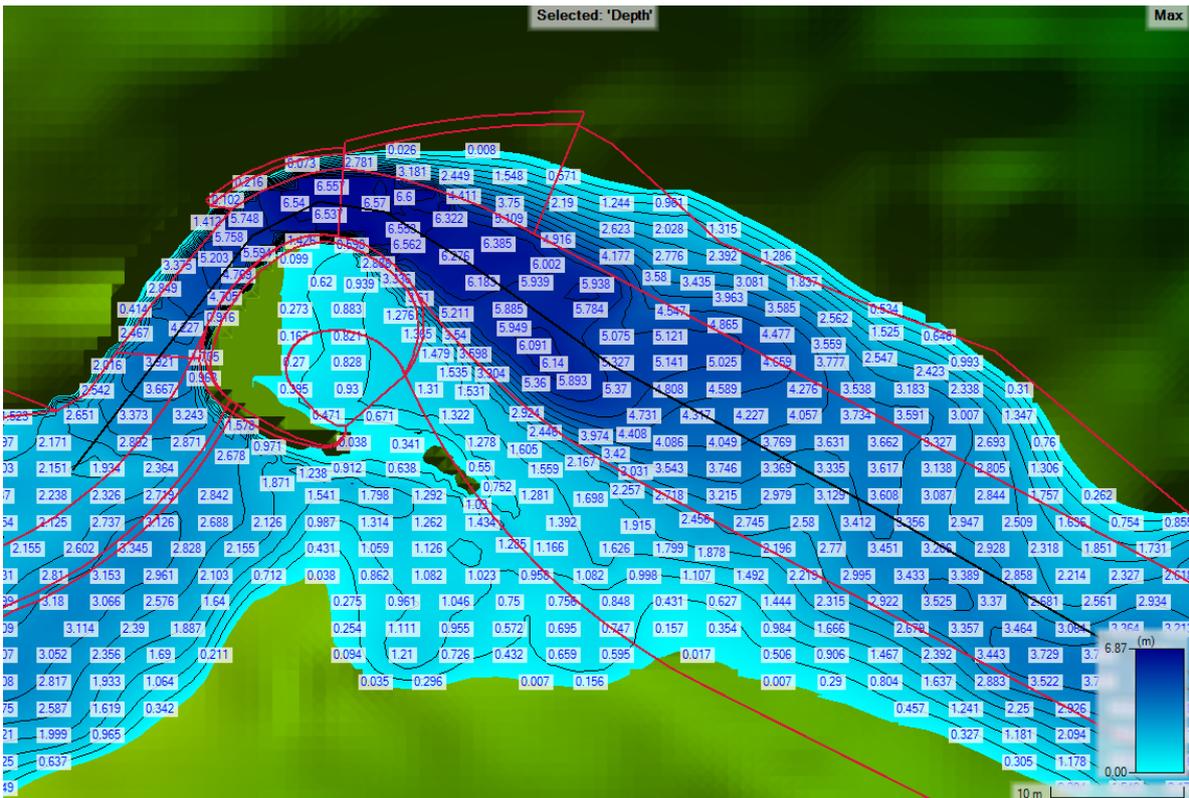


Figura 35: Profondità del flusso in condizioni di picco.

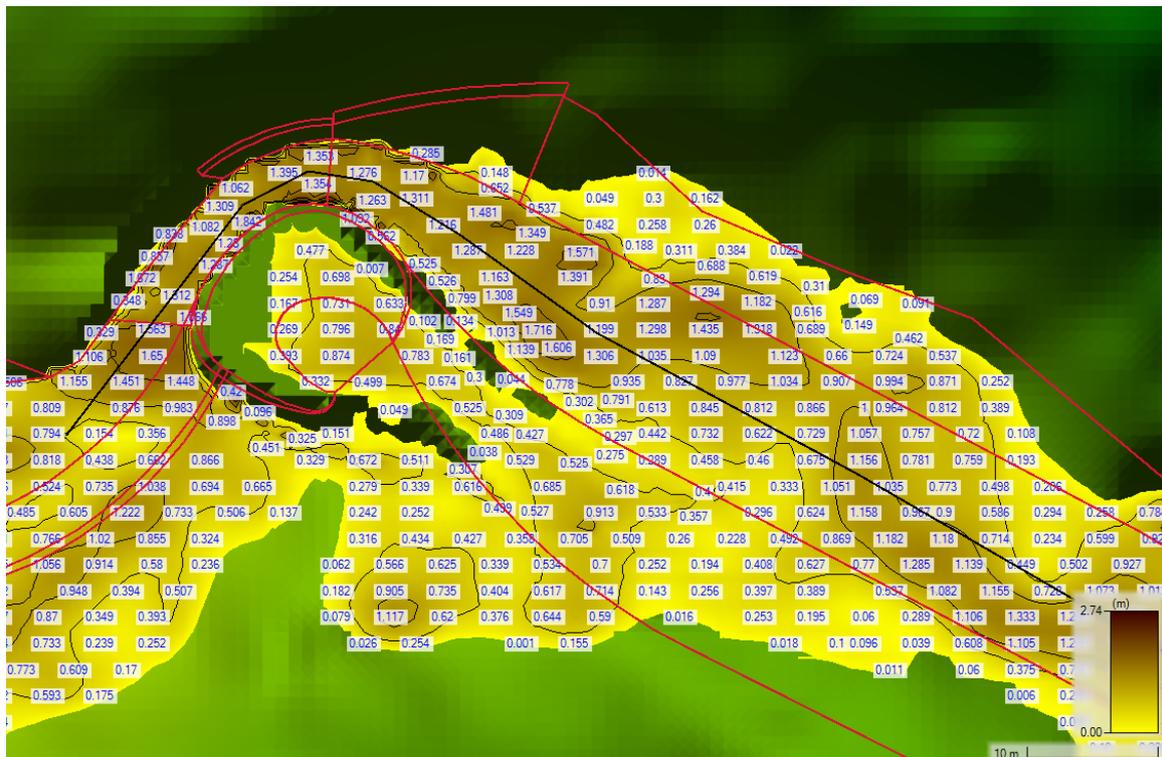


Figura 36: Deposito detritico a fine simulazione

Per capire quanto sia importante per le dinamiche di trasporto solido la riduzione di velocità operata dal manufatto è possibile utilizzare come riferimento il seguente diagramma di Hjulströms. Questo

diagramma mette in relazione la velocità del flusso, e quindi lo sforzo al fondo, con i diametri del materiale in alveo.

In base alla velocità, si osservano quindi delle zone di deposito, di trasporto di fondo e di trasporto in sospensione di materiali di varie granulometrie.

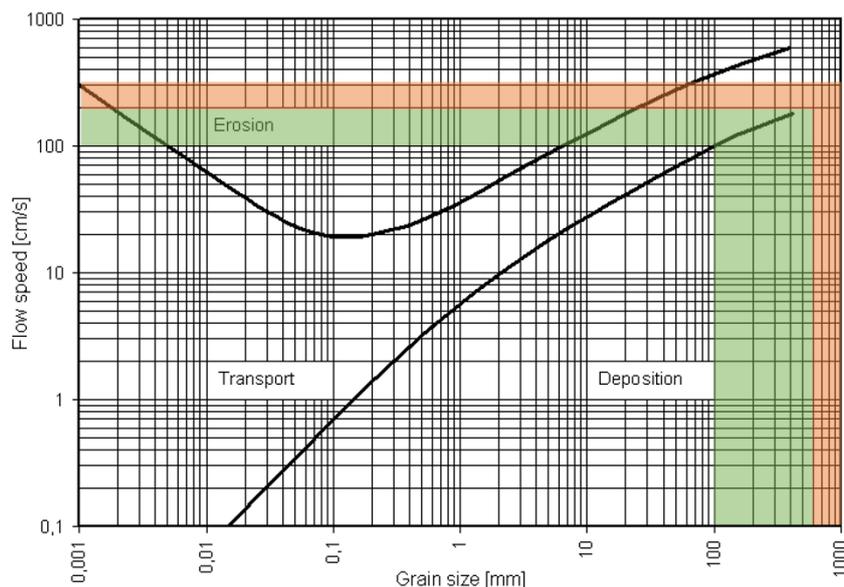


Figura 37: Diagramma di Hjulströms, in rosso è evidenziato il range di deposito per velocità tra i 2 e i 3 m/s (prima del rallentamento dovuto alla briglia), in verde per il range 1-2 m/s (rallentamento dovuto alla briglia).

Si vede chiaramente dal diagramma che il passaggio da un range di velocità di 2-3 m/s ad un range di velocità di 1-2 m/s comporta un aumento considerevole del range di sedimenti che vanno a depositarsi in quanto l'energia del flusso non è più in grado di trasportarli con sé.

Se una velocità di 2 metri al secondo può infatti trasportare ciottoli con diametri fino a 60 cm, calando di 1 m/s si ottiene la deposizione di sedimenti fino a 10 cm di diametro. Questo fenomeno comporta che tutti i sedimenti più grossolani tenderanno a depositarsi a monte della briglia, soprattutto nelle zone laterali di stagnazione.

Nella seguente tabella vediamo invece il calcolo della capacità delle opere realizzate calcolata dall'uscita della briglia (sez. 8 di progetto) alla sezione 27, posta 200 metri a monte della briglia e limite dell'area di svasso prevista.

Sezione di misura	A sezione deposito [mq]	A sezione h max [mq]	V media colata sulla sezione [m/s]	Volume tra sez. i e sez. i-1: deposito [mc]	Volume tra sez. i e sez. i-1: h_max [mc]
8	10.2	35.9	2.97	-	-
15	5.8	24.5	4.35	144	543
13	16.1	56.3	1.89	104	383
12	9.9	70.8	1.50	64	311
17	60.6	136.9	0.78	331	977
19	39.8	113.3	0.94	663	1653
20	47.7	96.1	1.11	751	1798
21	85.8	135.3	0.79	1412	2449
22	50.0	94.3	1.13	1405	2376
23	100.1	144.3	0.74	1467	2332
24	98.5	139.3	0.76	1376	1964
25	85.1	137.7	0.77	1490	2248
26	51.1	89.2	1.19	548	913
27	10.5	42.3	2.52	630	1345
Totale				10385	19292

I risultati ottenuti dal modello indicano che, in regime di massima portata (106,5 m³/s) la capacità a monte della briglia sia di quasi 20.000 m³ di materiale in movimento.

A fine simulazione il materiale depositato nella vasca corrisponde a circa 10.400 m³, pari a circa il 10% del materiale totale transitato durante l'intero evento di colata.

Di seguito sono mostrati i profili delle sezioni più rappresentative ottenute:

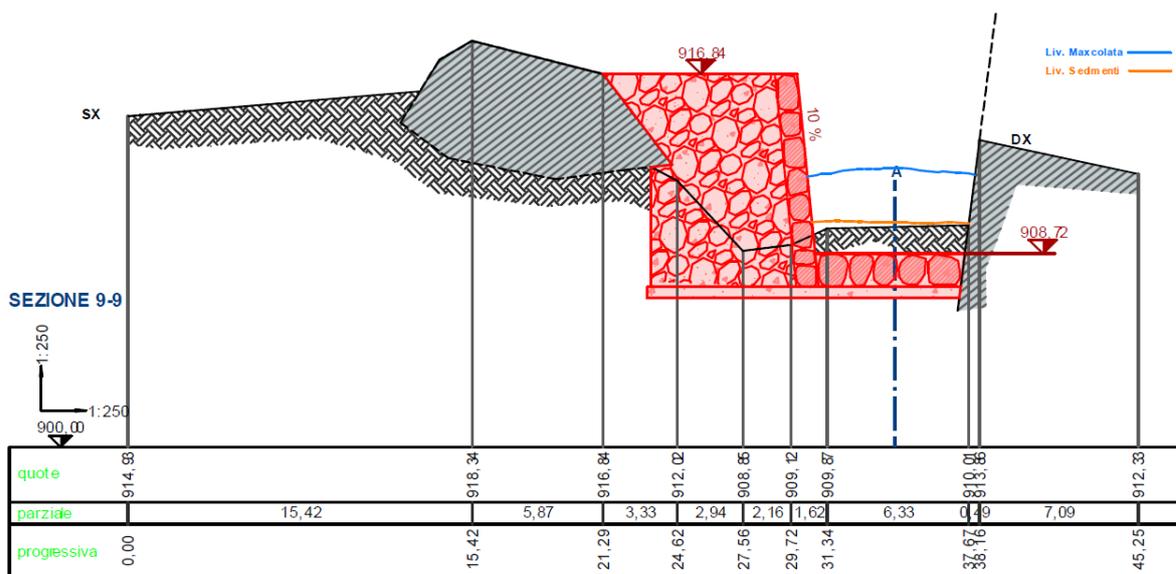


Figura 38: Sezione 9 nel tratto finale del passaggio della briglia. In Blu è marcato il livello massimo raggiunto dalla colata, mentre in arancio i depositi a fine simulazione

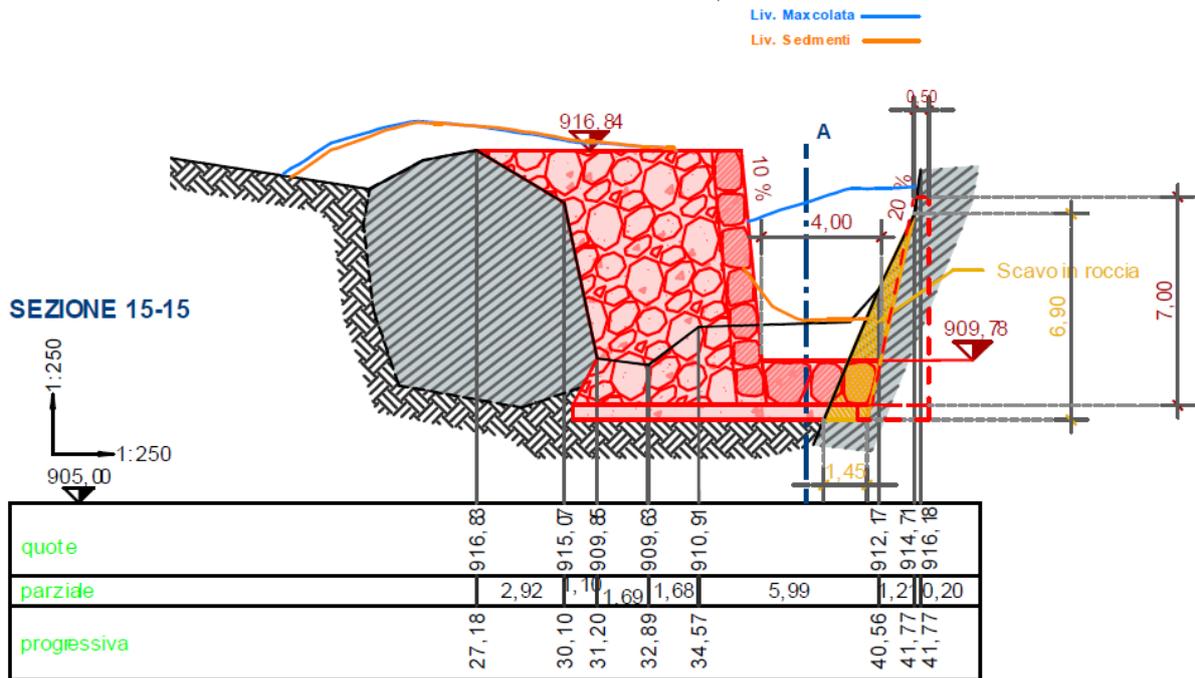


Figura 39: Sezione 15 a metà del passaggio della briglia. In Blu è marcato il livello massimo raggiunto dalla colata, mentre in arancio i depositi a fine simulazione

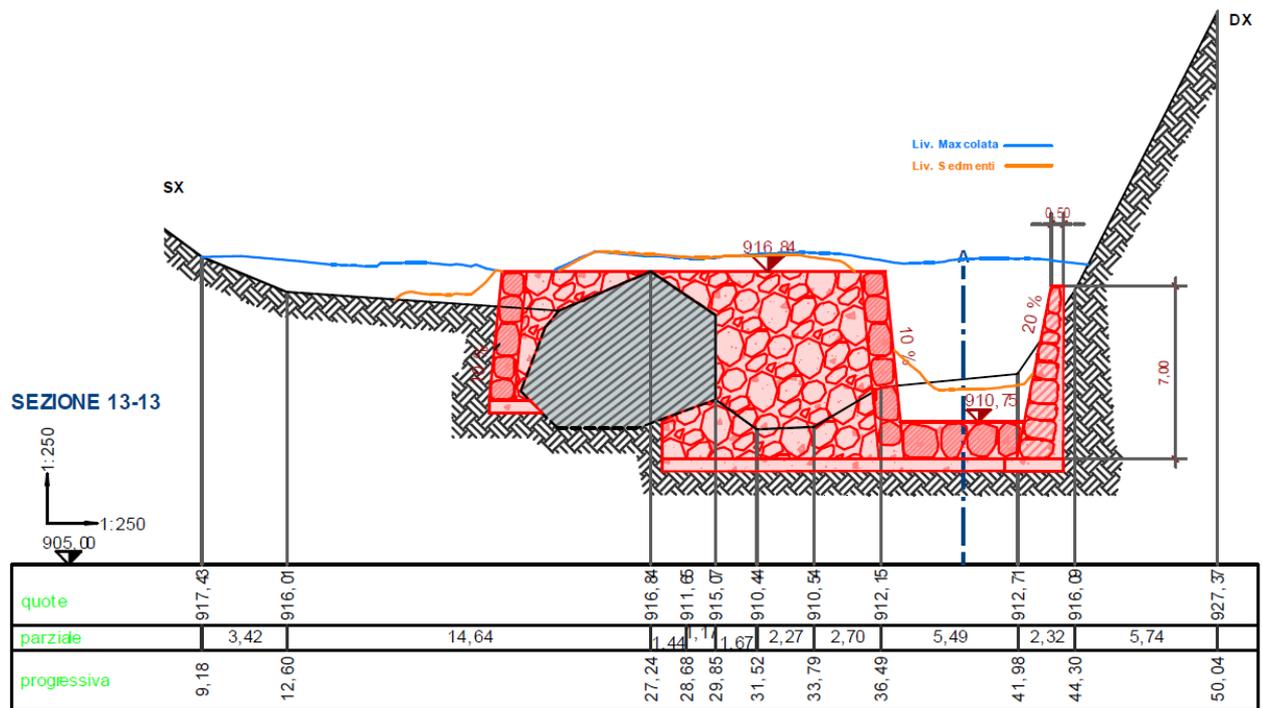


Figura 40: Sezione 13 all'inizio del passaggio della briglia. In Blu è marcato il livello massimo raggiunto dalla colata, mentre in arancio i depositi a fine simulazione

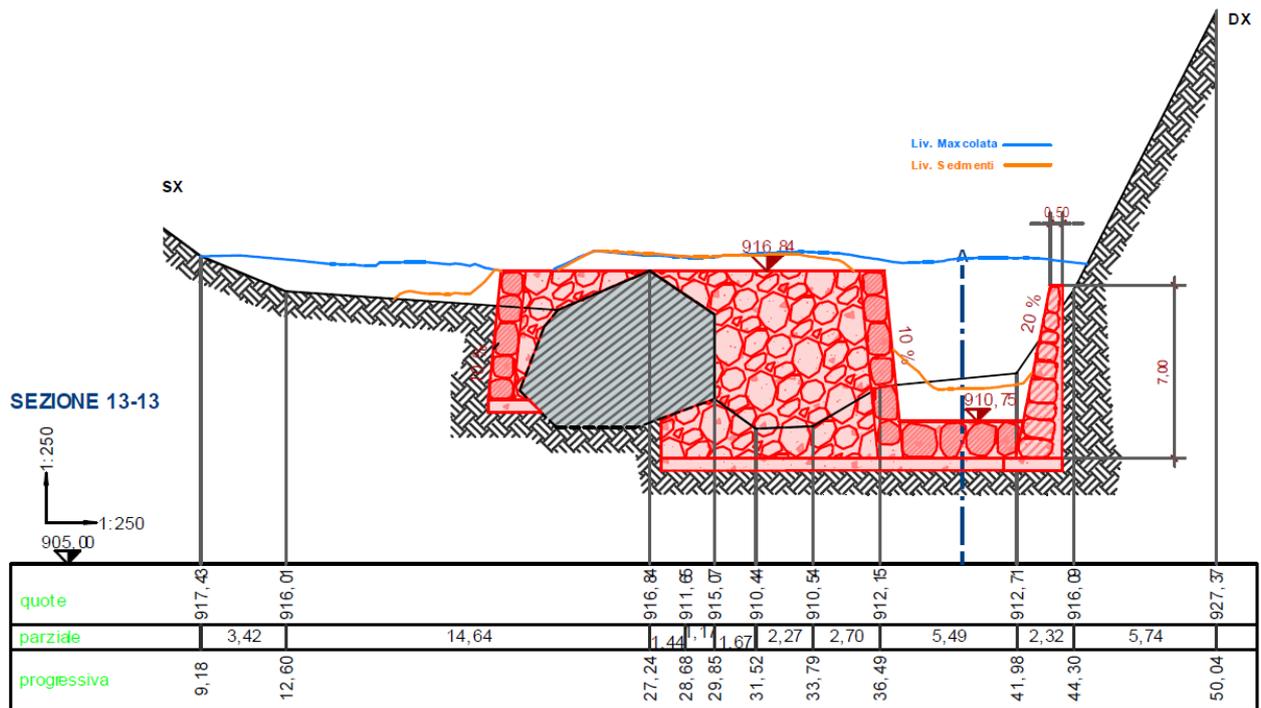


Figura 41: Sezione 13 all'inizio del passaggio della briglia. In Blu è marcato il livello massimo raggiunto dalla colata, mentre in arancio i depositi a fine simulazione

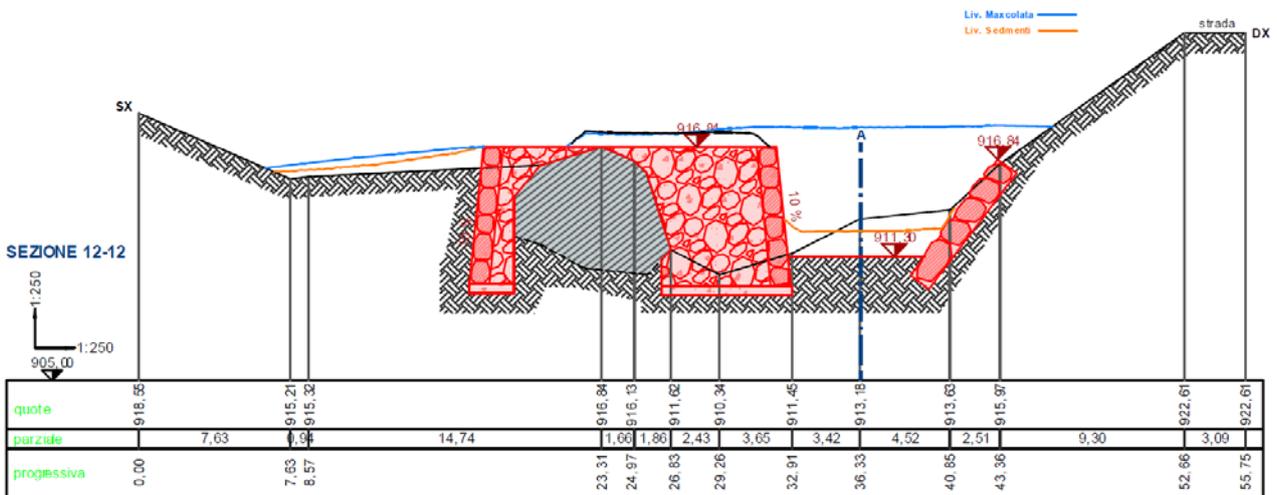


Figura 42: Sezione 12 all'inizio del restringimento prima del passaggio della briglia. In Blu è marcato il livello massimo raggiunto dalla colata, mentre in arancio i depositi a fine simulazione.

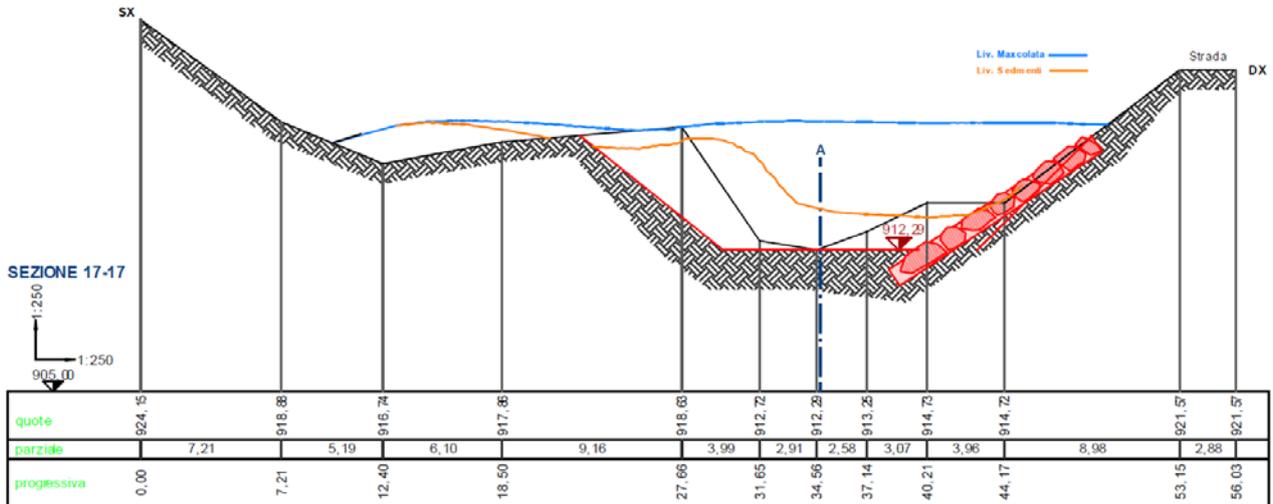


Figura 43: Sezione 17 sezione dell'alveo appena a monte della briglia della briglia. In Blu è marcato il livello massimo raggiunto dalla colata, mentre in arancio i depositi a fine simulazione.

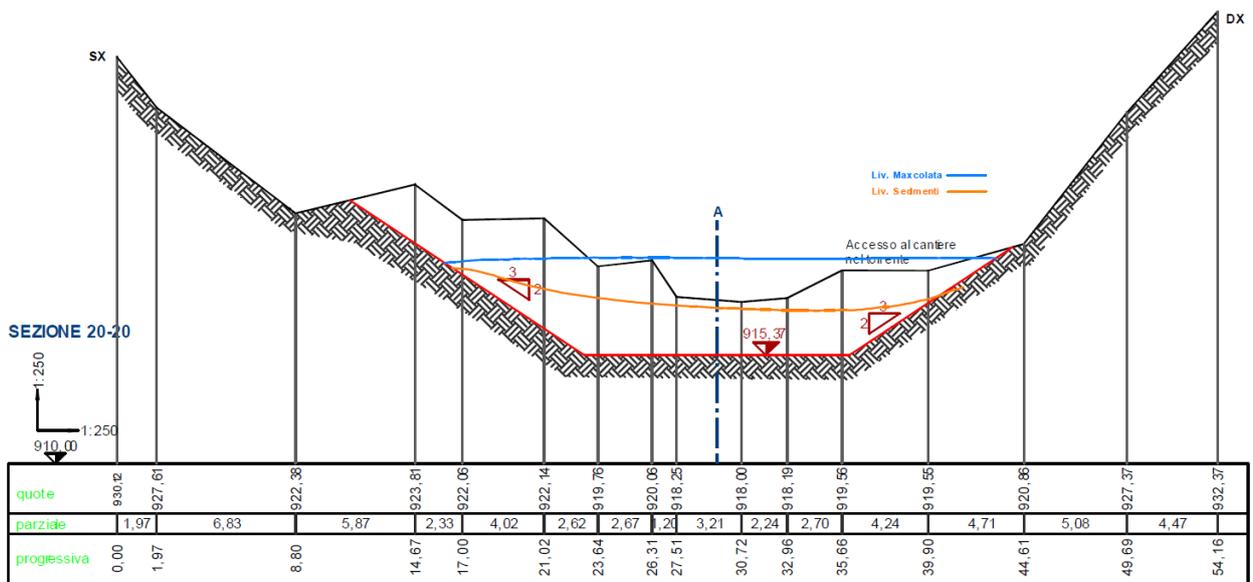


Figura 44: Sezione 20 nella zona di accumulo a monte della briglia. In Blu è marcato il livello massimo raggiunto dalla colata, mentre in arancio i depositi a fine simulazione.

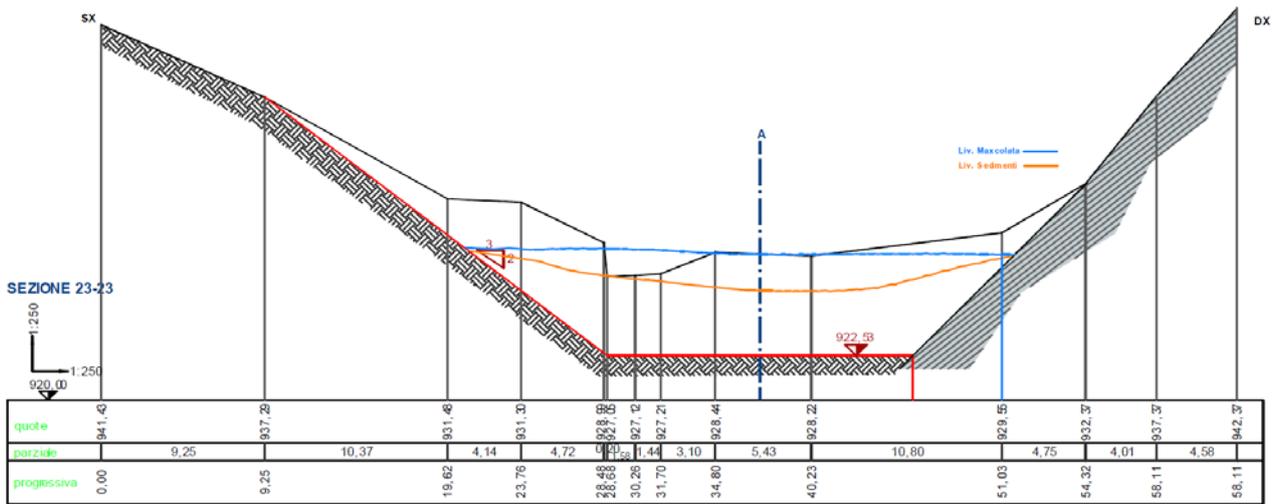


Figura 45: Sezione 23 nella zona di accumulo a monte della briglia. In Blu è marcato il livello massimo raggiunto dalla colata, mentre in arancio i depositi a fine simulazione.

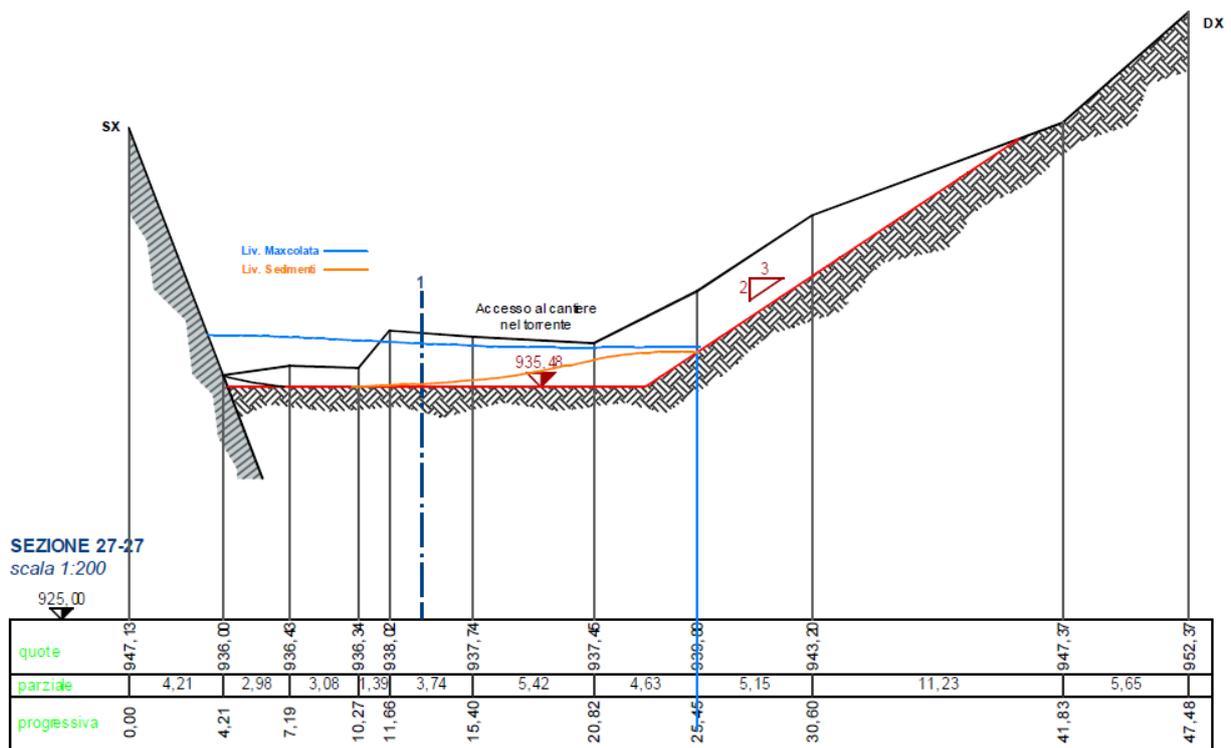


Figura 46: Sezione 27 a monte della briglia, ultima sezione di svaso e ripristino dell'alveo in progetto. In Blu è marcato il livello massimo raggiunto dalla colata, mentre in arancio i depositi a fine simulazione.

4. Conclusioni

In questa relazione si è verificato il funzionamento idraulico delle opere previste nel bacino della Val Finale per la protezione idrogeologica dell'area.

Le opere previste consistono nella realizzazione su una curva del torrente posta a 910 m.s.l.m. di un massiccio manufatto che funziona come una briglia a fessura, incanalando il flusso attraverso un restringimento e producendo a monte una zona di rallentamento della corrente e di accumulo dei sedimenti solidi.

Per la verifica del manufatto si è utilizzata una portata solida e liquida riferita al massimo evento di colata detritica teorizzabile per il bacino in questione. Le caratteristiche di questo evento sono un volume di 110.126 metri cubi di colata detritica, riversata a valle come portata di $106.5 \text{ m}^3/\text{s}$ per una durata di 17 minuti.

Il modello matematico scelto è stato il solver idraulico bidimensionale di Hec-Ras (USACE), utilizzando le equazioni euleriane complete e modellando il flusso come fluido non-newtoniano nella formulazione quadratica di O'Brian che tiene conto dell'attrito viscoso, turbolento e di interazione delle particelle solide nella matrice solido-liquida.

Per stabilire i migliori parametri di utilizzo del modello si è svolta una sensitivity analysis e un confronto di dati di letteratura e da manuale. Questo ha permesso di stabilire quali fossero i parametri più significativi e quali valori fosse più opportuno utilizzare nel caso specifico.

Le simulazioni effettuate hanno permesso di verificare che anche di fronte ad un evento estremo come quello simulato le opere riescono a favorire la deposizione del materiale a monte della briglia. Durante tutto l'evento di colata infatti si crea un risalto e rallentamento della corrente nella zona di accumulo a monte dove avviene la sedimentazione del materiale più grossolano per una capacità di più di 10.000 metri cubi di sedimenti.