POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Modellazione e studio di fenomeni erosivi originati da colate detritiche

Relatore
Prof. Claudio Scavia

Candidato
Alessio Marinozzi
238648

Marzo 2021

Written in LaTeX on 17 marzo 2021

This work is subject to the CC BY-NC-ND Licence

Indice

Elenco delle figure v

Elenco delle tabelle ix

Sommario 1

Abstract 2

1 Introduzione 3
1.1 Aspetti generali 3
1.2 Obiettivi 4
1.3 Organizzazione 4

2 Colate detritiche 6
2.1 Caratteristiche 6
2.2 Geomorfologia delle colate detritiche 7
2.2.1 Zona d'innesco 7
2.2.2 Zona di propagazione 7
2.2.3 Zona di accumulo 9
2.3 Classificazione delle colate detritiche 9
2.3.1 Classificazione in base al materiale solido coinvolto (Du et al., 1986) 10
2.3.2 Classificazione in base alla morfologia della colata (Hutchinson, 1988) 10
2.3.3 Classificazione in base al regime di moto (Takahashi, 1991) . 10
2.3.4 Classificazione in base alla densità della miscela di acqua e detriti (Wang, 1994) 11
2.3.5 Classificazione di movimenti franosi, Cruden & Varnes (1996) 11
2.3.6 Classificazione di Hungr et al. (2001) 13
2.3.7 Ulteriori sistemi di classificazione 15

3 Misure di mitigazione del rischio da flussi detritici 19
3.1 Interventi non strutturali 20
3.2 Interventi strutturali 20
3.2.1 Opere di consolidamento 21
3.2.2 Opere di trattenuta 23
3.2.3 Canale di smaltimento 28

4 Modellazione numerica e reologia 30
4.1 Generalità della modellazione numerica 30
4.2 Modellazione con continuo monofase e bifase, metodi integrati . . . 33
4.2.1 RASH^{3D} 33
4.3 Modellazione discreta (DEM) 34
4.4 Modellazione ibrida continuo-discreto (LBM-DEM) 34
4.5 Erosione 35
4.5.1 Implementazione dell'erosione in un modello numerico 39
4.6 Reologia 40
4.6.1 Legge reologica Voellmy 41

5 Caso di studio 43
5.1 Introduzione 43
5.2 Descrizione del problema 46
5.2.1 Preparazione del sito 47
5.2.2 Descrizione dei test 50
5.2.3 Risultati ottenuti dai test 58

6 Modellazione numerica del caso di studio 69
6.0.1 Descrizione del modello topografico utilizzato 69
6.0.2 Fase di calibrazione del modello numerico 72

7 Modellazione numerica con opere di difesa 84
7.1 Modellazione numerica con presenza di baffle 84
7.2 Modellazione numerica con briglia filtrante a fessura 93

8 Considerazioni finali 99

9 Software utilizzati 101

10 Bibliografia 102

Elenco delle figure

2.1 Elementi geomorfologici caratteristici di una colata detritica (Chiarle et al.) 6
2.2 Zone caratteristiche di una colata detritica (VanDine, 1996) 7
2.3 Zona di trasporto 8
2.4 (a) rappresentazione della distribuzione della geometria dei detriti secondo Bardou, 2003 (b) sezione longitudinale di una colata detritica (Pierson e Costa, 1987) 8
2.5 studio delle velocità massime per diversi tipi di flusso (Hungr Bovis, 2001) 15
2.6 Classificazione dei flussi (Pierson & Costa, 1987) 16
2.7 Classificazione dei flussi secondo Takahashi (2007) 18

3.1 Briglie di consolidamento (VanDine, 1996) e soglie di stabilizzazione (D'Agostino, 2005) nella zona di testa 21
3.2 opere di consolidamento nella zona di transito (trasversali sulla sinistra, longitudinali a destra) 23
3.3 Briglia frangi colata 24
3.4 esempi di bacini di deposito con diverse conformazioni 24
3.5 Esempi di briglie filtranti aperte a finestre (a), a fessura (b). 26
3.6 Esempi di briglie filtranti aperte reticolo (c), a pettine (d). 27
3.7 Reti flessibili ad anello prima e dopo l'evento 27
3.8 Rappresentazione di diverse tipologie di barriere aperte (Hubl et al., 2003). 28
3.9 vista di un canale di smaltimento in fase costruttiva a sinistra, a destra in fase di esercizio (Pirulli, 2014) 29

4.1 Schema generale di un codice di dinamica molecolare (MD) 31
4.2 tecniche di simulazione e principali metodi sviluppati nella modellazione numerica (Pirulli Leonardi, 2019) 32
4.3 Esempio di modellazione con particelle (DEM). 34
4.4 Esempio di clalcolo del numero di Bagnold per una tipica distribuzione granulometrica, si può distinguere la zona di regime viscos, la zona di regime collizionale, e la zona intermedia. 35
4.5 Differenti tipi di fluido in funzione del comportamento viscoso. . . 41
4.6 Legge reologia Voellmy, grafico della tensione di taglio(a), grafico viscosità apparente (b). 42

5.1 Media annuale delle precipitazioni in Corea del Sud dal 1971 al 2012 (Chan e Kyung 2016) 43
5.2 Raggruppamento ogni 5 anni dei 42 anni di dati di precipitazioni annuali medie in Corea (Chan e Kyung, 2016) 44
5.3 Media mensile delle precipitazioni degli ultimi 10 anni (2001-2010) rispetto agli anni precedenti (1971-2000). (Chan Kyung,2016) . . . 44
5.4 relazione tra precipitazioni annuali medie e il numero di frane per anno (Chan Kyung, 2016) 45
5.5 Numero di decessi a causa di fenomeni franosi in Corea del Sud dal 1089 al 2012 (Chan Kyung, 2016) 45
5.6 Posizione Geografica del sito dove si svolgono i test nella Regione di Gangwon, Corea del Sud. 46
5.7 Inquadramento del sito dei test nella Regione di Gangwon, Corea del Sud. 46
5.8 Vista dall'alto del cassone completato (Google Earth), sezione schematica del cassone (a destra) 47
5.9 9 punti di controllo (in alto), 10 punti GPS e stazioni Lidar (in basso) (Sangyeon et al., 2016) 49
5.10 schema seguito dai coreani per l'analisi del debris flow artificiale (Sangyeon et al., 2016) 50
5.11 Step di processazione dei dati Lidar per ottenere il modello DEM:a) nuvola di punti originale, (b) punti filtrati, (c) generazione file TIN, (d) generazione DEM con risoluzione 10cm (Sangyeon et al., 2016) 50
5.12 profilo longitudinale del canale (a sinistra) e immagine Lidar con linea di flusso tracciata in bianco (a destra), (Chan Kyung, 2016) 51
5.13 test 1, posizione delle videocamere (punti 1, 2, in corrispondenza della canaletta,e nella punto in cui avvene una brusca variazione di direzione), dei sensori (celle di carico, sensori a ultrasuoni, celle piezometriche), drainage box con sezione quadrata (Chan Kyung, 2016) 52
5.14 immagini dell'esecuzione del test 1 riprese dalla telecamera in posizione 1 (figura5.13) 53
5.15 test 2, posizione delle videocamere punto 1 e 2, dei sensori (celle di carico su trave IPE, sensori a ultrasuoni, celle piezometriche), ed elementi frangicolata (3, 4, 5) (Chan Kyung, 2016) 54
5.16 Schema geometrico (a) e fasi realizzative (b) delle contromisure . . 55
5.17 Trave IPE con celle di carico. 56
5.18 Immagini dell'esecuzione del test 2 riprese dalla telecamera in posizione 1 (figura5.13) 57
5.19 baffle colpiti dalla colata durante il test (in alto), materiale solido raccolto dal baffle (in basso). 58
5.20 Classificazione dei terreni secondo il sistema UCS 60
5.21 Curva granulometrica del materiale all'interno del cassone (Chan Kyung, 2016) 61
5.22 Curva granulometrica del materiale all'interno della prima fila di baffles (Chan Kyung, 2016) 61

5.23 classificazione UNI EN ISO 14688-2 (Chan Kyung, 2016) 62
5.24 Foto aerea con evidenziate la sezione longitudinale e le sezioni trasversali. 63
5.25 Variazione delle quote lungo la sezione longitudinale prima e dopo la colata (Sangyeon et al., 2016) 63
5.26 Variazione delle quote lungo sei sezione trasversali significative prima e dopo la colata (Sangyeon et al., 2016) 64
5.27 sovrapposizione dei dati topografici di erosione-deposizione con vista aerea(Chan Kyung, 2016) 65
5.28 Variazione altezza topografica lungo il canale dopo il test 1 e il test 2 (Chan Kyung, 2016) 65
5.29 Stima della velocità per il test 2 con metodo diretto e metodo indiretto (Chan Kyung, 2016) 66
5.30 Confronto delle velocità test 1 e test 2 (Chan Kyung, 2016) 66
5.31 Confronto altezza del flusso media per il test 1 e il test 2 (Chan Kyung, 2016) 67

6.1 Curve di livello del bacino con spaziatura 5m (QGIS) 70
6.2 Raster delle curve di livello del bacino con spaziatura 5m (QGIS) . 70
6.3 Griglia di punti con spaziatura 1m (QGIS) 71
6.4 Modellazione cassone (QGIS) 72
6.5 Altezza massima del flusso, calibrazione preliminare (senza erosione) 73
6.6 Velocità massima del flusso, calibrazione preliminare (senza erosione) 73
6.7 Test di calibrazione del modello numerico tenendo conto dell'effetto dell'erosione (Hmax). 74
6.8 Test di calibrazione del modello numerico tenendo conto dell'effetto dell'erosione (Vmax). 75
6.9 Altezza massima del flusso, simulazione test 1 76
6.10 Velocità massima del flusso, simulazione test 1 77
6.11 Profondità massima erosa, simulazione test 1 78
6.12 Variazione della quota altimetrica a causa della deposizione-erosione, simulazione test 1 78
6.13 Mappa variazione della quota altimetrica a causa della deposizione-erosione, simulazione test 1 79
6.14 Energia del flusso, simulazione test 1 79
6.15 Altezza massima del flusso, simulazione test 2 80
6.16 Velocità massima del flusso, simulazione test 2 80
6.17 Profondità massima erosa, simulazione test 2 81
6.18 Variazione della quota altimetrica a causa della deposizione-erosione, simulazione test 2 82
6.19 Mappa variazione della quota altimetrica a causa della deposizione-erosione, simulazione test 2 82
6.20 Energia del flusso, simulazione test 2 83

7.1 Altezza del flusso, simulazione test 2 (baffle) 85
7.2 Velocità del flusso, simulazione test 2 (baffle) 85

7.3 Profondità massima erosa dal flusso, simulazione test 2 (baffle) . . . 86
7.4 Variazione della quota altimetrica a causa della deposizione-erosione, simulazione test 2 (baffle) 86
7.5 Energia del flusso, simulazione test 2 (baffle) 87
7.6 Altezza massima del flusso, confronto caso con e senza baffle. 88
7.7 Velocità massima del flusso, confronto caso con e senza baffle 88
7.8 profondità massima erosa, confronto caso con e senza baffle 89
7.9 Deposizione-erosione, confronto caso con e senza baffle 90
7.10 Mappa variazione della quota altimetrica a causa della deposizione-erosione, confronto caso con e senza baffle (baffle) 91
7.11 Dettaglio mappa variazione della quota altimetrica a causa della deposizione-erosione, confronto caso con e senza baffle (baffle) . . . 91
7.12 Energia del flusso, confronto caso con e senza baffle 92
7.13 Modellazione briglia a fessura (Silt) in QGis 93
7.14 Altezza del flusso, simulazione test 2 (Slit) 94
7.15 Velocità del flusso, simulazione test 2 (Slit) 94
7.16 Profondità massima erosa dal flusso, simulazione test 2 (Slit) 95
7.17 Variazione della quota altimetrica a causa della deposizione-erosione, simulazione test 2 (Slit) 95
7.18 Mappa variazione della quota altimetrica a causa della deposizione-erosione, simulazione test 2 (Slit) 96
7.19 Dettaglio mappa variazione della quota altimetrica a causa della deposizione-erosione, simulazione test 2 (Slit) 97
7.20 Energia del flusso, simulazione test 2 (Slit) 98

Elenco delle tabelle

2.1 Classificazione in base al volume della frana (Fell,1944) 9
2.2 Classificazione delle frane secondo Varnes (1978) 12
2.3 Classificazione delle frane secondo Cruden e Varnes, 1996 12
2.4 Caratteristiche del materiale coinvolto nelle frane di tipo flusso (Hungr et al. 2001); sono evidenziati i materiali tipicamente coinvolti nei flussi. 14
2.5 Classificazione deifenomeni franosi di flusso secondo Hungr et al. (2001); in evidenza i flussi più comuni. 15
2.6 tipologia di flussi in funzione della concentrazione solida in volime C_v e della densità (Pierson & Costa, 1987) 16

4.1 Sommario cronologico delle formulazioni per l'erosione. 39

5.1 Valori di densità umida della debris flow campionati dai 4 buffle. . 58
5.2 Valori tipici di densità secondo diversi autori. 59
5.3 Valori tipici di densità naturale (Carter and Bentley, 1991) 59
5.4 Stima della forza d'impatto con equazioni empiriche secondo diversi autori. 68

6.1 Valori dei parametri relativi alla reologia e all'erosione impiegati per la calibrazione del modello numerico. 72

Sommario

Le colate detritiche restano ancora oggi dei fenomeni caratterizzati da una rilevante aleatorietà dettata dal fatto che non si conosco in maniera dettagliata tutti i meccanismi fisici che le caratterizzano. Ciò nonostante, tali eventi saranno in futuro sempre più preponderanti sul nostro territorio, sia per la naturale predisposizione morfologica, ma soprattutto per via dei cambiamenti climatici e della crescente antropizzazione del territorio.

La mitigazione del rischio da fenomeni di flusso risulta problematica proprio per quanto detto finora. Gli interventi di prevenzione si basano su mappe di rischio ottenute dalla rielaborazione dei dati storici e da simulazioni numeriche. Per l'esecuzione delle simulazioni è necessario, oltre alla scelta di un modello matematico adatto, definire una legge reologica che permetta di riprodurre quanto più possibile il reale comportamento del materiale.

Le colata detritiche oggetto di questo studio sono state ottenute sperimentalmente in un campo prove in grande scala situato nella Regione di Jinbu in Corea del Sud. Sono disponibili dati sperimentali di altezza e velocità di flusso direttamente registrati dall'osservazione dei test. L'esperimento viene modellato numericamente tenendo conto in particolare dell'azione erosiva che la colata manifesta durante lo scivolamento lungo il versante, al fine di utilizzare un modello numerico in grado di riprodurre più fedelmente il reale comportamento di tale fenomeno; infatti l'erosione può alterare significativamente l'intensità del flusso. I dati ricavati dalla simulazione numerica, preceduta da una preliminare calibrazione del modello, sono stati poi confrontati con i dati registrati in sito per valutarne l'effettiva corrispondenza, e verificare la bontà del lavoro eseguito.

Dalla modellazione numerica si possono ricavare i valori di velocità e altezza massima del flusso, ovvero i parametri fondamentali con cui si andranno a progettare le opportune opere di difesa. Grazie quindi ai risultati dell'analisi numerica, vengono infine valutate le capacità di abbattimento del rischio di una serie di strutture anti-colata.

Abstract

Debris flows, also known as debris flow, are landslide movements of debris and water, frequently characterized by a high amount of moving mass, which can reach high speeds by sliding downstream. Due to their nature and their high kinetic energy these phenomena often represent a threat to mountain and hilly areas. They can cause extensive damage to buildings and infrastructure, even causing loss in terms of human life. The debris flows still remain phenomena characterized by a significant uncertainty dictated by the fact that all the physical mechanisms that characterize them are not known in detail. Nevertheless, these events will in the future be more and more preponderant on our territory, both due to the natural morphological predisposition, but above all due to climate change and the growing anthropization of the territory.

Risk mitigation from flow phenomena is problematic precisely because of what has been said so far. Prevention interventions are based on risk maps obtained from the re-elaboration of historical data and numerical simulations. For the execution of the simulations it is necessary, in addition to the choice of a suitable mathematical model, to define a rheological law that allows to reproduce as much as possible the real behavior of the material.

The debris flows covered by this study were experimentally obtained in a large-scale test field located in the Jinbu Region of South Korea. Experimental height and flow velocity data directly recorded from the observation of the tests are available. The experiment is modeled numerically taking into account in particular the erosive action that the flow manifests during the sliding along the slope, in order to use a numerical model able to reproduce more faithfully the real behavior of this phenomenon; in fact, erosion can significantly alter the intensity of the flow. The data obtained from the numerical simulation, preceded by a preliminary calibration of the model, were then compared with the data recorded on site to evaluate the actual correspondence, and verify the quality of the work performed.

From the numerical modeling it is possible to obtain the values of speed and maximum height of the flow, that is the fundamental parameters with which the appropriate defense works will be designed. Thanks to the results of the numerical analysis, the risk abatement capabilities of a series of anti-pouring structures are finally evaluated.

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Aspetti generali

Le colate detritiche sono dei fenomeni franosi contraddistinti dallo scivolamento di materiale detritico misto ad acqua lungo un versante. La natura del flusso della colata possiede un'elevata variabilità, influenzata fortemente dalla granulometria del materiale coinvolto e dalla quantità di acqua presente. Questi eventi generalmente non sono accompagnati da segnali premonitori che consentirebbero di definire con esattezza i volumi in gioco, spesso elevati, i quali possono raggiungere velocità sostenute, anche di 25 m/s durante il moto verso valle; inoltre la difficoltà nel progettare opportune opere di difesa in grado di risultare efficaci nel contrastare l'elevata capacità distruttiva, fanno sì che le colate detritiche siano fenomeni caratterizzati da elevata pericolosità.
La pericolosità di un evento franoso viene definita come la probabilità che appartiene ad un particolare evento, caratterizzato da una certa intensità, di manifestarsi in una determinata area e in un determinato lasso temporale. Lo studio della pericolosità di un evento si basa quindi sull'individuazione di diversi fattori quali: previsione topologica, previsione spaziale, previsione temporale, previsione dell'intensità, e previsione dell'evoluzione. Sono proprio questi fattori che risultano maggiormente difficoltosi da valutare per le colate detritiche. La stima della pericolosità degli eventi franosi viene poi riportata in carte di pericolosità, che costituiscono un strumento utile per la mitigazione del rischio frane.

Sul territorio italiano ad oggi sono state registrate oltre 614.000 frane, ovvero i due terzi delle frane totali raccolte nella banca dati europea, questo a conferma del fatto che l'Italia è un paese con un alto rischio idrogeologico e fortemente soggetto a fenomeni di instabilità. Questi dati sono contenuti nell'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (IFFI), un database periodicamente aggiornato dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). L'IFFI costituisce una valida banca dati in termini di omogeneità e copertura del territorio, da interrogare per poter valutare la pericolosità, e più in generale,come supporto per la pianificazione territoriale.

Un fattore sicuramente fondamentale per l'innesco di questo tipo di eventi è il clima, infatti è proprio la presenza di acqua a provocare il movimento di materiale sciolto predisposto alla mobilitazione. Per cui le piogge brevi ma intense, tipiche nei temporali estivi, e le piogge di minore intensità ma di lunga durata, sono tra le principali cause scatenanti delle colate detritiche. Va notato che a causa dei continui cambiamenti climatici a livello globale, aree precedentemente definite sicure o a basso rischio possono acquisire un rischio più elevato. Comunque risulta complicato correlare questi eventi franosi con i cambiamenti climatici per via della variabilità dei fenomeni stessi, e ciò richiederebbe una disponibilità di dati registrati di almeno 30 anni.

Le colate detritiche sono ancora oggetto di studi per via delle numerose incertezze riguardanti la modalità di classificazione, i fenomeni fisico-meccanici che regolano tali eventi e le variabilità climatiche.

1.2 Obiettivi

La difficoltà nello studiare e comprendere le colate detritiche ha comportato un notevole sviluppo e utilizzo di modelli matematici che consentono di svolgere simulazioni numeriche. Proprio grazie alle simulazioni numeriche si possono studiare questi rapidi movimenti di versante e calcolare la velocità e l'altezza del flusso e prevedere le distanze percorse. Le simulazioni numeriche permettono di formulare varie ipotesi variando i parametri che regolano il comportamento del flusso, e con i dati ottenuti dalle simulazioni si è in grado di stabilire quale potrebbe essere l'area interessata dalla colata e di conseguenza progettare le opportune opere di difesa anche in relazione ai dati di velocità e altezza di flusso ottenuti. Per questi motivi le simulazioni numeriche sono degli strumenti conoscitivi molto importanti, e pertanto il loro sviluppo e crescita nell'accuratezza permette una migliore previsione e controllo delle colate detritiche.

1.3 Organizzazione

Tale lavoro di tesi ha lo scopo di analizzare e implementare il modello numerico utilizzato per la modellazione del caso di studio in Corea del Sud, tenendo conto dell'azione erosiva che è stata esercitata dalla colata riprodotta artificialmente durante i test.
L'elaborato è organizzato come segue: nel Cap. 2 vengono descritte le colate detritiche e la relativa classificazione. Nel Cap. 3 vengono trattate le misure di mitigazione del rischio per le colate detritiche. Nel Cap. 4 viene descritta la modellazione numerica utilizzata per trattare i fenomeni franosi in questione. Nel Cap. 5 si prende in considerazione il caso oggetto di studio in Corea del Sud, dopo una descrizione generale del territorio coreano viene inquadrato il sito dove si svolgono gli esperimenti, successivamente si descrivono i test di calibrazione del modello numerico tramite un processo di back analysis e i risultati ottenuti. Nel Cap. 6 vengono effettuati dei test implementando il modello numerico, precedentemente

tarato, con delle opere di difesa poste lungo il canale; in fine nel Capitolo 7 si traggono delle conclusioni riguardo i risultati ottenuti con la modellazione numerica e le potenzialità di questo strumento.

Capitolo 2

Colate detritiche

Le colate detritiche sono fenomeni naturali che si manifestano con un flusso di acqua e materiale detritico,di varia granulometria e natura, lungo incisioni di versante con un'acclività sostenuta. L'elevata rapidità che può raggiungere il flusso in discesa e la scarsa presenza di segnali premonitori conferiscono a questi particolari eventi un forte potere distruttivo.

2.1 Caratteristiche

La natura del flusso delle colate detritiche ha un'elevata variabilità dovuta a numerosi fattori in gioco, su tutti il contenuto d'acqua e la granulometia dei detriti, quest'ultima infatti presenta un ampio range dovuto alla possibile compresenza di limi e argille con detriti dal diametro anche di qualche metro.Nelle colate detritiche sulla scala del bacino possiamo individuare tre zone principali che caratterizzano questi particolari fenomeni.

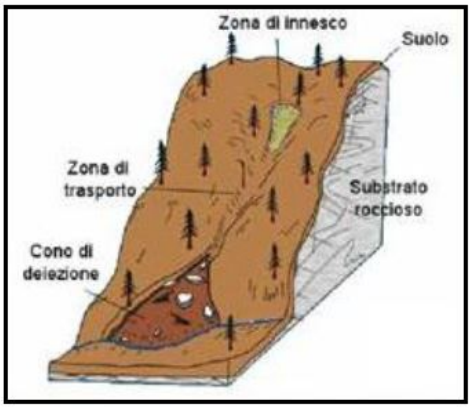

Figura 2.1: Elementi geomorfologici caratteristici di una colata detritica (Chiarle et al.)

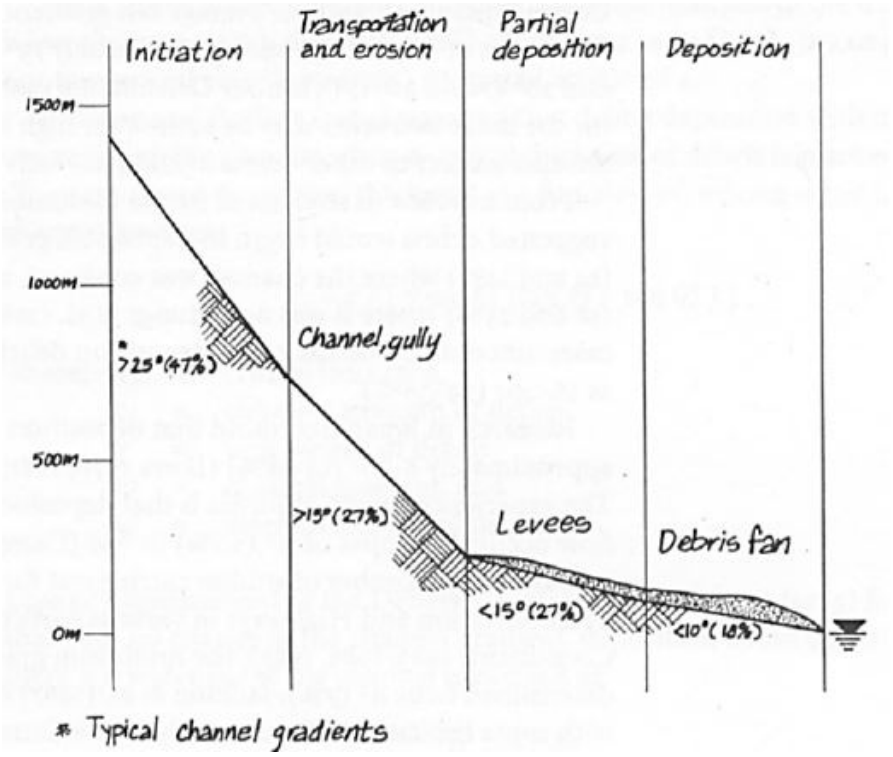

Figura 2.2: Zone caratteristiche di una colata detritica (VanDine, 1996)

2.2 Geomorfologia delle colate detritiche

2.2.1 Zona d'innesco

La zona d'innesco (triggering) di una colata detritica identifica la zona di partenza da cui si mobilita il flusso. L'innesco può verificarsi quando si presentano le cause predisponenti definite da VanDine (1996), queste sono la presenza di materiale detritico non consolidato, una marcata acclività del versante superiore a 25°, la scarsa presenza di vegetazione e la presenza di acqua in quantità sufficiente a mobilitare i detriti, infatti molto spesso questi fenomeni si innescano in seguito a copiose piogge che saturano il terreno con conseguente aumento delle pressioni interstiziali e la riduzione delle tensioni efficaci.

2.2.2 Zona di propagazione

La zona di propagazione come visibile in figura (Figura 2.1) è la zona in cui avviene il trasporto e l'erosione. La canalizzazione del flusso risulta spesso ben riconoscibile da sezione trapezoidale, inoltre il moto del materiale provoca l'asportazione della vegetazione lasciando segni evidenti dopo il passaggio. Lungo il canale percorso la colata può esercitare un'azione erosiva con una pendenza del versante superiore ai 10°-15° (VanDine 1996) con conseguente accrescimento del volume del flusso. L'erosione ha effetto sulla natura della colata causando una variazione della velocità di discesa generalmente compresa tra 0.5 m/s e 25 m/s, per via della variazione

granulometrica, della sezione del canale e della concentrazione dei sedimenti. Durante la discesa del materiale si può identificare una prima ondata di bassa intensità chiamata "precusory surge", caratterizzata da elevata fluidità che precede la colata vera e propria. Segue il fronte d'onda con trasporto di materiale grossolano in testa al flusso che anticipa il corpo centrale della colata, il quale ha una superficie liberà pressochè parallela al letto del canale e una distribuzione granulometrica più eterogenea. Il corpo centrale conferisce l'energia necessaria al fronte d'onda per mobilitare i detriti di maggiori dimensioni. In fine la coda della colata è costituita dalle particelle più fini con tirante idrico via via più basso fino al progressivo esaurimento della colata. Oltre a questo movimento longitudinale si può identificare un movimento ascendente dei detriti di granulometria maggiore, dovuto alla presenza di turbolenze interne al flusso, che vengono spinti dal fronte d'onda ai lati del canale di propagazione dove possono depositarsi formando degli argini laterali. Questo andamento del flusso fa si che il comportamento del fronte della colata sia prevalentemente di tipo attritivo, mentre la parte centrale del corpo del flusso che spinge in avanti il fronte ha un comportamento più simile a quello di un fluido viscoso.
La combinazione di questi comportamenti differenti spiega il manifestarsi dei flussi in maniera intermittente con colate in successione.

immagini/zonatrasporto, (Brus

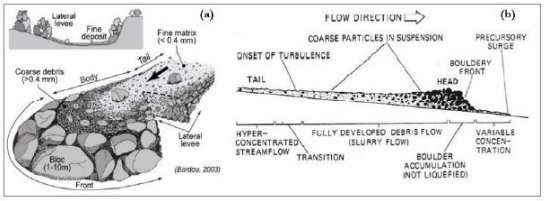

Figura 2.4: (a) rappresentazione della distribuzione della geometria dei detriti secondo Bardou, 2003 (b) sezione longitudinale di una colata detritica (Pierson e Costa, 1987)

Figura 2.3: Zona di trasporto

2.2.3 Zona di accumulo

La zona di accumulo costituisce la parte più a valle della colata, qui il materiale trasportato dal flusso durante la discesa rallenta a causa di diversi fattori: la presenza di ostacoli naturali e/o artificiali, la diminuzione del confinamento del flusso per via di un aumento della sezione del canale, e su tutti la riduzione della pendenza del terreno al di sotto di un range stabilito da diversi autori di 10°-15° (VanDine 1996; Hungr et al. 1984), permettendo così al materiale di depositarsi. Il rallentamento del materiale avviene gradualmente con l'interruzione del moto, prima vengono interessati i detriti di dimensioni maggiori presenti sul fronte, ma questo non necessariamente comporta l'arresto dell'intero corpo. Infatti, la componente più fluida può proseguire scavando dei canali attraverso i detriti deposti, trasportando materiale più fine. Il continuo accumulo di materiale da colate detritiche successive a valle accresce la pendenza del zona di deposito (5°-20°) e le conferisce la tipica forma a conoide dovuta alla perdita di confinamento del flusso.

2.3 Classificazione delle colate detritiche

La classificazione delle colate detritiche risulta particolarmente complessa per via della grande variabilità del fenomeno, pertanto si trovano differenti classificazioni di vari autori in funzione dei diversi paramentri tenuti in considerazione. Un esempio di classificazione basata sui volumi in gioco è la classificazione di Fell del 1944 riportata nella tabella 2.1

Descrizione	**Volume** $[m^3]$
Estremamente grande	$> 5 \cdot 10^6$
Molto grande	$> 1 \cdot 10^6 \div 5 \cdot 10^6$
Da media a grande	$> 2{,}5 \cdot 10^5 \div 1 \cdot 10^6$
Media	$> 5 \cdot 10^4 \div 2{,}3 \cdot 10^5$
Piccola	$> 5 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^4$
Molto piccola	$> 5 \cdot 10^2 \div 5 \cdot 10^3$
Estremamente piccola	$< 5 \cdot 10^2$

Tabella 2.1: Classificazione in base al volume della frana (Fell,1944)

2.3.1 Classificazione in base al materiale solido coinvolto (Du et al., 1986)

In funzione del materiale solido coinvolto distinguiamo:

- Mud flow, il cui flusso è composto per oltre il 15% del contributo solido da sabbia e argilla, con un comportamento assimilabile a quello di un fluido newtoniano.
- Mud-rock flow, dove si riscontra una presenza di rocce di diametro superiore a 10 cm e il quantitativo di argilla non va oltre il 3-5%; le caratteristiche della componente argillosa vanno poi ad influenzare il comportamento complessivo del flusso.
- Water-rock flow, in cui sabbia grossolana, ciottoli e blocchi di roccia costituiscono prevalentemente la componente solida.

2.3.2 Classificazione in base alla morfologia della colata (Hutchinson, 1988)

- Colamenti fangosi traslazionali, la cui componente solida principale è l'argilla, sono fenomeni lenti caratterizzati da una zona di accumulo espansa, e possono assumere conformazioni a ventaglio, lobate, elongate o inclinate.
- Colate traslazionali detritiche, sono causate principalmente da improvvise precipitazioni di grande intensità, molto frequenti in ambiente montano, con conseguenti movimenti di materiale molto rapidi. La componente solida principale di questi fenomeni è costituita da detriti grossolani.
- Colamenti detritici viscosi, hanno la peculiarità di essere fenomeni molto lenti, della durata anche di qualche giorno. Il materiale possiede una struttura metastabile sciolta con elevato contenuto d'acqua.

2.3.3 Classificazione in base al regime di moto (Takahashi, 1991)

Sulla base del regime di moto possiamo fare una prima distinzione tra colate detritiche viscose (macroviscose), caratterizzate dal moto laminare, con un comportamento variabile in funzione della concentrazione dei sedimenti nella corrente e della viscosità del flusso interstiziale; e colate detritiche inerziali, che a loro volta possono essere classificate in:
- Stony debris flow (corrente detritica matura o pietrosa), dove la distribuzione granulometrica dei sedimenti risulta omogenea su tutta la profondità del flusso, questo grazie alla cospicua concentrazione di sedimenti almeno pari al 20% della componente solida, e dato l'elevato numero di particelle solide nel flusso si verificano urti e contatti, che generando sforzi attritivi interni permettono ai granuli anche più fini di rimanere in sospensione, conferendo alla colata un regime di moto assimilabile a quello laminare.
- Immature debris flow (corrente detritica immatura), presentano un flusso che nella parte più vicina al piano di scivolamento è costituito prevalentemente da sedimenti,

mentre nella parte più alta da acqua con eventuali particelle in sospensione. Come per le stony debris flow il moto è governato dagli sforzi tangenziali dovuti agli urti.
-Turbolent mud flow (corrente fangosa turbolenta), sono flussi di materiale fine, i cui diametri non superano l'ordine del centimetro, mantenuti in sospensione dagli sforzi tangenziali turbolenti del fluido interstiziale. All'interno della colata sono presenti vortici ad indicare la natura turbolenta del fenomeno.
-Hybrid of stony and muddy debris flow (corrente detritica ibrida), costituisce un insieme delle caratteristiche delle colate detritiche appena descritte, infatti la parte inferiore della corrente del flusso di tipo detritico in regime laminare, può essere matura o immatura, mentre la corrente superiore è caratterizzata da materiale solido più fine in sospensione per via della forte turbolenza.

2.3.4 Classificazione in base alla densità della miscela di acqua e detriti (Wang, 1994)

- Debris flow viscosi, seguono un regime di moto laminare dove il fronte ha un avanzamento ad intermittenza, con un alto valore dello sforzo tangenziale di soglia.
- Debris flow non viscosi, in cui il regime di moto risulta essere inequivocabilmente turbolento e il flusso si comporta come fluido newtoniano.
- Debris flows sub viscosi, hanno caratteristiche intermedie tra i debris flow viscosi e i debris flow non viscosi, dove il regime del flusso è di tipo turbolento e continuo e il valore di sforzo tangenziale di soglia risulta più basso rispetto ai debris flow viscosi.

2.3.5 Classificazione di movimenti franosi, Cruden & Varnes (1996)

La classificazione di Varnes (1978) e successivamente rivista da Cruden (1996) è uno dei sistemi di classificazione dei fenomeni franosi più utilizzati a livello internazionale. I criteri di classificazione sono fondamentalmente due:

- **il cinematismo**, e per quanto riguarda i tipi di movimento possibili, Varnes individua il crollo (fall) con cui va ad indicare il distacco di materiale fratturato in maniera improvvisa da pendii o zone in aggetto; ribaltamento (topple) per indicare una rotazione del materiale che si distacca compiendo una rotazione rispetto ad un punto specifico o una base di appoggio; scorrimento o scivolamento che a seconda della forma della superficie su cui avviene si suddivide in traslazionale, se la superficie e piana o rotazionale se la superficie è concava; espansione laterale (lateral speard) per descrivere movimenti in cui domina una distribuzione laterale del materiale causata da fenomeni come la liquefazione; colate o flussi (flow) per rappresente quei movimenti di materiale assimilabili a quello di fluidi viscosi; ed infine il complesso (complex) con il quale va ad indicare tutti quei fenomeni complessi il cui movimento è frutto di una combinazione dei precedenti.

- **il materiale coinvolto** nei fenomeni franosi secondo Varnes sono classificati in roccia (rock), detrito (debris) e terreno (earth), in particolare il detrito si distingue dal terreno sulla base delle dimensioni granulometriche dei detriti, i cui diametri siano superiori a 2 mm, mentre per il terreno le particelle devono avere una dimensione inferiore ai 2 mm con una percentuale in termini di materiale coinvolto superiore all'80%

TIPO DI MOVIMENTO		TIPO DI MATERIALE		
		ROCCIA (rock)	DETRITO (debris)	TERRA (earth)
CROLLO (fall)		Crollo in roccia (Rock fall)	Crollo di detrito (Debris fall)	Crollo di terra (Earth fall)
RIBALTAMENTO (topple)		Ribaltamento in roccia (Rock topple)	Ribaltamento di detrito (Debris topple)	Ribaltamento di terra (Earth topple)
SCORRIMENTO (slide)	TRASLAZIONALE	Scorrimento in roccia (Rock slide)	Scorrimento di detrito (Debris slide)	Scorrimento di terra (Earth slide)
	ROTAZIONALE			
ESPANSIONE LATERALE (lateral spread)		Espansione in roccia (Rock spread)	Espansione di detrito (Debris spread)	Espansione di terra (Earth spread)
COLATE o FLUSSI (flow)		Colata in rocca (Rock flow)	Colata di detrito (Debris flow)	Colata di terra (Earth flow)
COMPLESSI (complex)		Combinazione di due o più tipi principali di movimento		

Tabella 2.2: Classificazione delle frane secondo Varnes (1978)

Questa classificazione se pur semplice e di facile utilizzo tralascia un aspetto fondamentale dei movimenti franosi ai fini ingegnerististi, e cioè la velocità con cui questi avvengono perché da questa dipenderà l'entità dei probabili danni; per tale motivo Cruden e Varnes nel 1996 hanno incrementato il dettaglio della classificazione introducendo la correlazione tra velocità di movimento e i probabili danni associati.

CLASSE DI VELOCITA'	DESCRIZIONE	VELOCITA' [mm/s]	VELOCITA' TIPICA	DANNI PROBABILI
7	Estremamente rapida	$5 \cdot 10^3$	5 m/s	Catastrofe di eccezionale violenza. Edifici distrutti per l'impatto del materiale spostato. Molti morti. Fuga impossibile.
6	Molto rapida	$5 \cdot 10^1$	3 m/min	Perdita di alcune vite umane. Velocità troppo elevata per permettere l'evacuazione delle persone.
5	Rapida	$5 \cdot 10^{-1}$	1,8 m/ora	Evacuazione possibile. Distruzione di strutture, immobili ed installazioni permanenti.
4	Moderata	$5 \cdot 10^{-3}$	13 m/mese	Alcune strutture temporanee o poco danneggiabili possono essere mantenute.
3	Lenta	$5 \cdot 10^{-5}$	1,6 m/anno	Possibilità di intraprendere lavori di riabilitazione e restauro durante il movimento. Le strutture meno danneggiabili possono essere mantenute con frequenti lavori di riabilitazione se il movimento totale non è troppo grande durante una particolare fase di accelerazione.
2	Molto lenta	$5 \cdot 10^{-7}$	16 mm/anno	Alcune strutture non permanenti possono essere danneggiate dal movimento.
1	Estremamente lenta			Impercettibile senza strumenti di monitoraggio. Costruzione di edifici possibile con precauzioni.

Tabella 2.3: Classificazione delle frane secondo Cruden e Varnes, 1996

Quindi sulla base della classificazione di Cruden e Varnes tra i flussi d'interesse troviamo:

- *Colate in roccia*, identificano i flussi di materiale roccioso che assumono un comportamento fluido ad alta viscosità, caratterizzati spesso da movimenti lenti.

- *Colate di detriti (debris flow)*, raggruppano quei fenomeni di velocità superiore ai precedenti, dove il flusso è costituito da acqua e sedimenti prevalentemente di granulometria maggiore del millimetro.

- *Colate di terra (earth flow)*, indicano tuitti quei flussi di materiale fine e saturo generalmente non molto rapidi.

Inoltre Cruden e Varnes introducono un'ulteriore distinzione tra le debris flow che avvengono all'interno di incisioni di versante, quindi sono fenomeni confinati; e debris avalanches o valanghe di detriti, dove il flusso non essendo incanalato ha la possibilità di espandersi notevolmente e interessare vaste aree, queste differiscono dalle debris flow per la quantità di massa mobilitatà, dell'ordine dei metri cubi.
Propiro per la semplicità nel reperire le informazioni necessarie per determinare il tipo di fenomeno (granulometria e morfologia del deposito), la classificazione di Cruden e Varnes risulta essere di facile utilizzo e quindi di largo impiego, ma per questa sua caratteristica spesso si raggruppano fenomeni nella stessa classe, anche se questi possono risultare molto diversi tra loro; inoltre la designazione di una determinata classe si basa sulla discriminazione della granulometria (superiore o inferiore a 2mm), che però è soggetta ad una rilevante variabilità in base ai punti di campionamento del materiale in sito, in quanto i depositi di eventi franosi presentano una forte non omogeneità sia laterale che verticale.

2.3.6 Classificazione di Hungr et al. (2001)

Proprio per quanto affermato nel precedente paragrafo, Hungr sosteneva che la classificazione di Varnes non fosse adatta per descrivere adeguatamente le colate detritiche (Hungr et al., 2001). Hungr propone una classificazione basata oltre che sulla composizione della matrice dei flussi, anche sul contenuto interno d'acqua che viene espresso attraverso i limiti di Atterberg.
I limiti di Atterberg descrivono attraverso il limiti del contenuto d'acqua, la transizione di uno stato fisico del terreno ad un altro, e vengono indicati con limite solido ω_S, limite plastico ω_P e limite liquido ω_L (Lancellotta, 2014).
I limiti di Atterberg o limiti di consistenza permettono di individuare il campo plastico come segue:

- ω_L, è dato dal rapporto tra la massa liquida presente nei pori e la massa totale di un campione di terreno, ed indica il contenuto d'acqua oltre il quale si verifica il passaggio da stato plastico a stato liquido;

$$\omega_L = \frac{M_{wL}}{M_s} \tag{2.1}$$

- ω_P, corrisponde al contenuto d'acqua al di sotto del quale un cilindretto di materiale dal diametro di 3,2 mm inizia a manifestare fessurazione superficiale in seguito alla lavorazione manuale di rollatura.

- I_P, indice di plasticità è ottenuto dalla differenza tra il limite liquido e il limite plastico, e identifica l'ampiezza del campo plastico di un materiale, e a seconda dell'estenzione possiamo fare una distinzione tra materiali coesivi e non coesivi (I_P minore);

$$I_P = \omega_L - \omega_P \tag{2.2}$$

- I_L, indice di liquidità è definito come il rapporto della differenza tra il contenuto d'acqua naturale e il limite plastico del campione, e l'indice di plasticità. Indica lo stato corrente del materiale e in particolare si può definire un flusso di terra ($I_L > 0.5$) e un fluddo di fango ($I_L < 0.5$);

$$I_L = \frac{\omega_n - \omega_P}{I_P} \tag{2.3}$$

Una prima classificazione stilata da Hungr (Tab. 2.4) per i fenomeni franosi di tipo flusso si basa su quattro step, il primo riguarda l'origine dei materiali, il successivo distingue materiali coesivi da quelli non coesivi, il terzo distingue il contenuto d'acqua (saturo/secco), e il comportamento (plastico/liquido), infine nell'ultima sono riportati i nomi dei possibili flussi.

ORIGINE	CARATTERISTICHE	CONDIZIONI	NOME (italiano –inglese)
Classato (marina, lacustre, fluviale, eolica, vulcanica, antropogenica)	Non coesivo (indice plastico < 5%)	Secco o saturato	-Ghiaia (Gravel) -sabbia (sand) -limo (silt)
	Coesivo (indice plastico > 5%)	-Plastico ($w_L < 0,5$) -Liquido ($w_L > 0,5$)	-Argilla (Clay) -Argilla sensitiva (sensitive clay)
Non classato (residua, colluviale, glaciale, vulcanica, antropogenica)	Non coesivo (indice plastico < 5%)	Secco o saturato	-Detrito (Debris)
	Coesivo (indice plastico > 5%)	-Plastico ($w_L < 0,5$) -Liquido ($w_L > 0,5$)	-Terra (Earth) -Fango (mud)
Torba	Organico	Saturata	-Torba (Peat)
Roccia	frammentata	Secca o saturata	-Roccia (Rock)

Tabella 2.4: Caratteristiche del materiale coinvolto nelle frane di tipo flusso (Hungr et al. 2001); sono evidenziati i materiali tipicamente coinvolti nei flussi.

Hungr prosegue aumentando il dettaglio della classificazione dei flussi in seguito ad uno studio riguardante le velocità su diverse tipologie di eventi come visibile nella figura, in cui sono riportate le velocità massime per vari tipi di flusso; queste velocità rappresentano misurazioni locali in posizioni casuali, per tanto non possono essere complessivamente rappresentative del singolo fenomeno osservato.

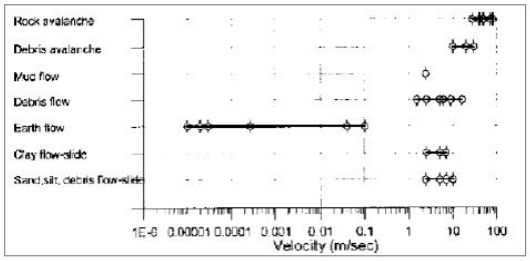

Figura 2.5: studio delle velocità massime per diversi tipi di flusso (Hungr Bovis, 2001)

In definitiva Hungr giunge alla seguente classificazione:

MATERIALE	CONTENUTO D'ACQUA	CONDIZIONI SPECIALI	VELOCITA'	NOME (italiano –inglese)
Limi, sabbie, ghiaie, detriti (talus)	Asciutto, umido o saturo	-Pressione interstiziale non eccessiva -volume limitato	Varie	Colate di sabbia (limo, ghiaia, detrito) non liquefatta/o. Non-liquified sand (silt, gravel o debris) flow
Limi, sabbie, detriti, rocce tenere	Saturo	-Materiale liquefacibile -acqua costante	Estremamente rapide	Scorrimenti di flusso di sabbia (limo, detrito, roccia tenera). Sand (silt, debris, weak rock) flow slide
Argille sensitive	Pari o superiore al limite liquido	-Liquefazione in situ -contenuto di acqua costante	Estremamente rapide	Scorrimenti di flusso in argilla. Clay flow slide
Torbe	Saturo	-Eccesso di pressione interstiziale	Da lente a molto rapide	Colate di Torbe. Peat flow
Argille o terre	Prossimo al limite plastico	-Movimenti lenti -plug flow	< Rapide	Colate di terra. Earth flow
Detriti	Saturo	-Canale definito -incremento del contenuto d'acqua	Estremamente rapide	Colate di detrito. Debris flow
Mud	Pari o superiore al limite liquido	-Colata di detrito a grana fine	> molto rapide	Colata di fango. Mud flow
Detriti	Presente acqua libera	-Alluvione	Estremamente rapide	Debris flood. Debris flood
Detriti	Saturo o parzialmente saturo	-No canale definito -relativamente superficiale -zona di innesco ripida	Estremamente rapide	Valanghe di detrito. Debris avalanche
Roccia frammentata	Vario, principalmente asciutto	-Roccia intatta all'innesco -grandi volumi	Estremamente rapide	Valanghe di roccia. Rock avalanche

Tabella 2.5: Classificazione deifenomeni franosi di flusso secondo Hungr et al. (2001); in evidenza i flussi più comuni.

2.3.7 Ulteriori sistemi di classificazione

I sistemi di classificazione visti fin qui pur essendo stati migliorati nel tempo restano comunque di semplice e immediato utilizzo in quanto si basano sulle caratteristiche, macroscopie del materiale come, composizione del materiale, e tipo di movimento, mentre non vengono per nulla tenute in considerazione le caratteristiche microscopiche. Altri sistemi di classificazione (Pierson Costa, 1987; Davies, 1988; Coussot Meunier, 1996; Coussot Ancey, 1999), invece vanno a tener conto

anche delle proprietà microscopiche quali: granulometria, viscosità, concentrazione solida, gradiente di velocità.

- Pierson & Costa (1987) sviluppano una classificazione basata su due parametri fondamentali, la concentrazione dei sedimenti, e la velocità media, da cui dipendono le forze di tipo viscoso o inerziale del sistema e l'interazione tra fluido e sedimenti. All' aumento della concentrazione dei sedimenti si passa da un fluido newtoniano ad uno non newtoniano come riportato in tabella

Flow	C_v (%)	Densità (g/cm^3)
Water flow	0-20	1.0-1.33
Hyperconcentrated flow	20-47	1.33-1.80
Debris flow	47-77	1.80-2.30

Tabella 2.6: tipologia di flussi in funzione della concentrazione solida in volume C_v e della densità (Pierson & Costa, 1987)

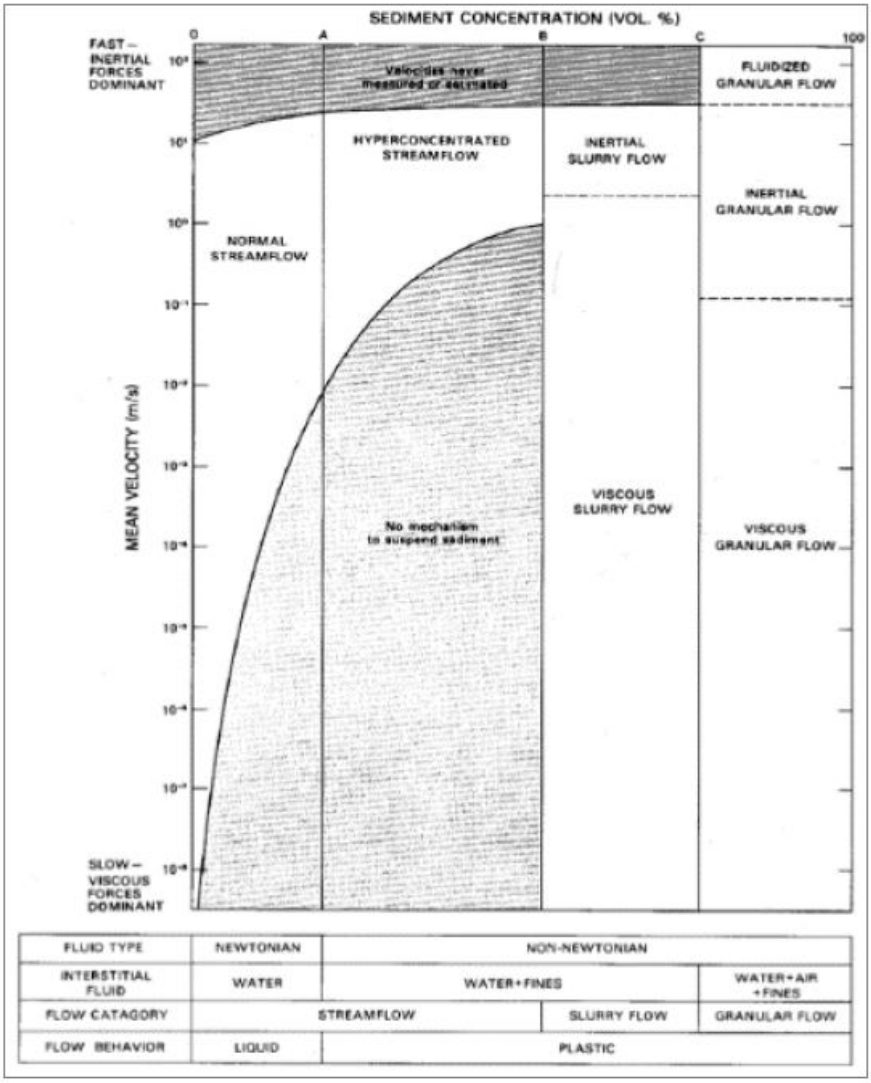

Figura 2.6: Classificazione dei flussi (Pierson & Costa, 1987)

- Takahashi (2007) introduce un sistema di classificazione basato sulla meccanica interna delle colate detritiche, in particolare fa rimento a dei parametri adimensionali ottenuti dal rapporto tra stati tensionali e la concentrazione della frazione solida Φ.

  T_{sq} tensione solida quasi-statica dovuta all'attrito tra particelle (tensione attritiva di Coulomb),
  T_c = tensione dovuta agli urti tra le particelle (tensione inerziale dei grani),
  T_t = tensione provocata dalla turbolenza (tensione inerziale del fluido),
  T_{fq} = tensione causata dalla deformazione dela colata (tensione Newtoniana quasi-statica),
  T = tensione totale.

  Le colate detritiche secondo la classificazione di Takahashi hanno un concentrazione solida variabile tra $0.20 < \Phi < 0.5$ e in funzione di tre coefficienti adimensionali:

  Numero di Reynolds

$$Re = \frac{\rho_f \cdot \mu_f \cdot h}{\eta} \tag{2.4}$$

  Permette la distinzione tra flusso laminare e turbolento, dove η è la viscosità dinamica del fluido, ρ_f è la densità del flusso, μ_f la velocità media e h l'altezza totale del flusso.

  Numero di Bagnold(1954)

$$Ba = \frac{\rho_p \cdot p^2 \cdot \lambda_p^{1/2} \cdot \dot{\gamma}}{\eta} \tag{2.5}$$

  Descrive come cambia il fluido in termini di reologia a causa della presenza di particelle granulari, dove d_p costituisce il diametro delle particelle, $\dot{\gamma}$ la velocità di deformazione e λ_p una funzione della frazione solida Φ.

  Rapporto di sommergenza:

$$\frac{h}{d_p} \tag{2.6}$$

  Il rapporto tra tensioni inerziali dei grani e quelle del fluido.
  Con questi criteri vengono individuate tre tipologie differenti di colate detritiche, come evidenziato nella figura:

  - Viscous (colate di detriti viscose):, la dissipazione dell'energia è dovuto prevalentemente alla viscosità del fluido e il moto risulta regolare;

  - Muddy (colate di detriti turbolente), il flusso ha un comportamento simile al moto turbolento dell'acqua ed il comportamento è governato dalle tensioni inerziali;

- Stony (Colate di detriti granulari), la presenza di materiale grossolano fa si che le tensioni inerziali dei grani generate in seguito a moti di collisione, determinino il comportamento globale della colata.

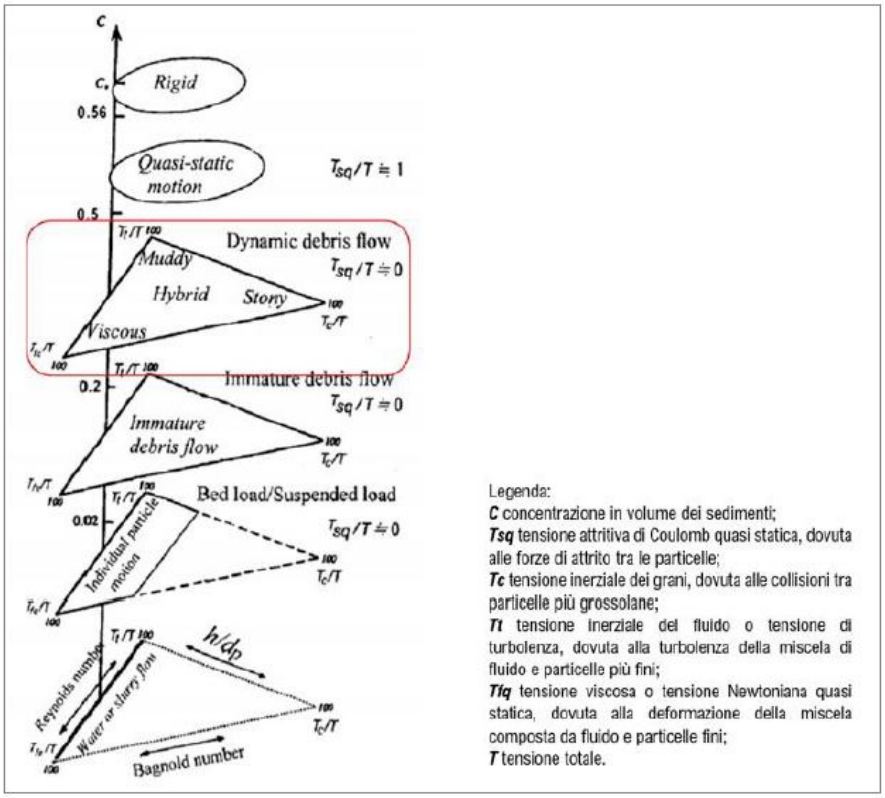

Figura 2.7: Classificazione dei flussi secondo Takahashi (2007)

La classificazione redatta da Takahashi per quanto dettagliata e complessa, risulta comunque avere una grande incertezza a causa della difficoltà nel misurare alcuni parametri necessari, come la concentrazione dei sedimenti o anche il gradiente di velocità, e soprattutto la classificazione non tiene conto della massa totale della colata strettamente correlata al rischio globale del fenomeno. Per queste ragioni tale sistema di classificazione resta prettamente teorico.

Capitolo 3

Misure di mitigazione del rischio da flussi detritici

Le colate detritiche, come abbiamo visto nel Cap. 2, sono fenomeni che godono di elevanta imprevedibilità, inoltre le caratteristiche del flusso, che è in grado di trasportare materiale solido anche di grandi dimensioni, e raggungere velocità elevate, conferiscono a questi fenomeni un'elevata energia d'impatto. Aggiungendo la difficoltà nell'individuare segnali premonitori e la natura intermittente che i flussi possono manifestare, attribuiscono alle colate detritiche un forte grado di pericolosità. Quando questi eventi vanno ad interessare zone urbanizzate o infrastrutture si introduce il concetto di rischio.

Il rischio è ottenuto dalla combinazione di tre fattori, quali la pericolosità, l'esposizione e la vulnerabilità.

$$R = P \cdot E \cdot V \tag{3.1}$$

La pericolosità (P) viene definità come la probabilità di accadimento dell'evento franoso di una certa intensità, in un dato luogo calcolata su un determinato intervallo temporale. Per la valutazione dell'intensità dell'evento necessaria per ottenere la pericolosità, si fa riferimento a diversi fattori come la velocità massima del flusso, la massa totale, volumi in movimento, ecc. Proprio in questa fase la modellazione numerica rappresenta un utile strumento per poter ricavare tramite le simulazioni i valori dei fattori necessari alla stima dell'intensità e quindi della pericolosità dell'evento, con cui si potranno poi realizzare le carte di pericolosità. Con il termine esposizione (E) si intende il valore degli elementi esposti al probabile evento franoso, non solo in termini di attività e beni, ma anche di persone. Infine il fattore di vulnerabilità (V) indica il grado di vulnerabilità degli elementi esposti. Possiamo inoltre esprimere il danno come il prodotta tra l'esposizione e la vulnerabilità, quindi possiamo scrivere :

$$D = E \cdot V \tag{3.2}$$

$$R = P \cdot D \tag{3.3}$$

Le colate detritiche rappresentano un fenomeno ad alto rischio soprattutto per le zone montane, dato dal fatto che la naturale morfologia del territorio favorisce il manifestarsi dei flussi, e spesso la difficoltà nel reperire aree antropizzabili ha portato l'uomo a costruire più frequentemente in prossimità di zone di conoide; pertanto soprattutto in queste situazioni è necessario intervenire per ridurre il rischio. Gli interventi di mitigazione del rischio hanno lo scopo di ridurre due dei tre fattori che costituiscono il rischio, ovvero la pericolosità e la vulnerabilità, in particolare gli interventi si dividono in strutturali e non strutturali, che a loro volta sono distinti in attivi e passivi. Nella scelta dell'intervento di mitigazione del rischio più adatto si deve tener conto di diversi aspetti, come i costi, l'impatto sul territorio e l'ambiente, l'aclività del pendio e l'accessibilità con macchine operatrici, l'efficienza nel tempo, ecc.; spesso può essere necessaria una combinazione di più interventi.

3.1 Interventi non strutturali

Gli interventi non strutturali sono così chiamati perchè non intervengono direttamente sulla massa della frana, ma sui fattori di esposizione e vulnerabilità che definiscono il rischio. Tra gli interventi finalizzati a ridurre l'esposizione troviamo la *pianificazione territoriale*, ovvero l'attuazione di tutte quelle strategie che vanno ad impedire l'urbanizzazione o anche l'espansione urbanistica in zone instabili, e dove necessario anche l'evacuazione dei centri abitati. Per quanto riguarda la vulnerabilità si possono adottare strategie dirette per *il consolidamento di edifici e/o infrastrutture* o indirette tramite la realizzazione di *sistemi di monitoraggio e allerta* coadiuvati da piani di emergenza e soccorso. Un'ulteriore possibilità su cui si sta facendo sempre più attenzione è quella di *aumentare la soglia di rischio accettabile*, infatti molto spesso informando la popolazione riguardo i fenomeni franosi e aumentandone la conoscenza porta ad accettare una soglia di rischio maggiore rispetto alle soglie di rischio involontario.

3.2 Interventi strutturali

Gli interventi strutturali racchiudono tutte quelle opere che interessano direttamente il corpo di frana. Si suddividono in interventi strutturali passivi e attivi. I primi hanno la funzione di controllare il flusso franoso fino al termine dell'evento tramite l'impiego di strutture difensive poste lungo il probabile percorso; gli interventi attivi invece mirano ad impedire che il flusso si inneschi riducendo la probabilità di accadimento (es: drenaggi, riprofilature di versante, elementi di sostegno, ecc.).

Per la progettazione di interventi strutturali è necessario un processo di analisi preliminare per conoscere in maniera più dettagliata possibile il problema, in modo da scegliere e dimensionare la tipologia d'intervento che meglio si adatta, e in seguito deve essere previsto un sistema di monitoraggio e manutenzione dell'opera per verificare l'efficacia e consentirne il corretto funzionamento.

Tra le opere strutturali si hanno:

- *Opere di consolidamento* del canale, possono essere realizzate in testata e/o nella zona d'innesco;
- *Opere di trattenuta* per il materiale di grosse dimensioni, permettendo la riduzione dell'energia del flusso;
- *Bacino di deposito* utilizzato per la deposizione dei sedimenti;
- *Canale di smaltimento* necessario per allontanare il flusso d'acqua e la frazione di materiale più fine dal bacino di deposito;
- *Opere passive accessorie* volte a proteggere e limitare i danni nei confronti di infrastrutture sensibili.

Queste opere possono essere impiegate singolarmente o come pù spesso accade combinate tra loro, questo significa che prima di scegliere quali opere progettare è necessario conoscere le caratteristiche specifiche del problema ed aver eseguito un'analisi costi-benefici per valutare la fattibilità economica.

3.2.1 Opere di consolidamento

Le *opere di consolidamento in testata* vengono realizzate solitamente in calcetruzzo armato, legno o gabbioni nella parte più alta del canale, nella zona interessata dal distacco di materiale. Le funzionalità di queste opere trasversali sono molteplici, infatti possiamo fare una distinzione tra *soglie di stabilizzazione*, la cui altezza non supera mai il profilo del terreno e servono a limitare l'erosione del materiale; e *briglie di consolidamento*, la cui altezza oltrepassa il profilo topografico pur restando opere relativamente basse, che hanno la funzione di ridurre la regressione della zona di distacco (Figura 3.1) e quindi limitare la quantità di materiale che può essere soggetto ad instabilità.

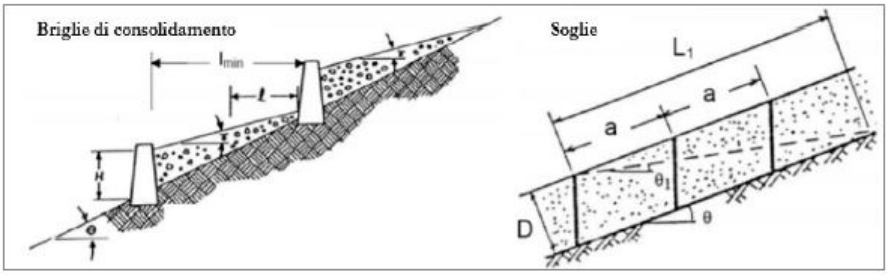

Figura 3.1: Briglie di consolidamento (VanDine, 1996) e soglie di stabilizzazione (D'Agostino, 2005) nella zona di testa

I principali parametri geometrici necessari al fine della progettazione di queste opere sono:
- *Pendenza di compensazione* γ, viene assunta con valori che vanno dai 6° ai 12°, il limite inferiore è stabilito per evitare che vi sia grande deposizione di detriti dal deflusso delle acque, mentre il limite superiore per evitare l'erosione che generalmente incorre oltre i 15°.

- *Distanza tra due briglie consecutive* (l_{min}) si definisce all'interno di due limiti che dipendono dalla lunghezza della buca di scavo (l) per evitare l'impatto del flusso sull'opera sottostante, dall'altezza della briglia (H) e la differenza di pendenza tra profilo primitivo e il profilo di compensazione del canale, per evitare che il flusso possa scavare del materiale nella zona di copertura della fondazione dell'opera di monte. I valori di (l) e (H) sono calcolati sulla base della portata di progetto del canale e della larghezza media della gaveta.

- *Profondità delle fondazioni* è funzione della profondità massima di erosione.

- *Angolo terreno in origine* Θ.

- *Angolo di equilibrio limite* Θ_1 oltre il quale può avvenire l'innesco (valori tipici 14°-15°).

- *Spaziatura (a)* tra soglie successive.

- *Profondità strato erodibile (D)*, con la quale si definisce la spaziatura.

Una volta in funzione il sistema di briglie si verifica a monte di ciascun elemento il fenomeno di interramento, ovvero per poter superare l'ostacolo provocato dalla briglia nei confronti del flusso, deve crescere il pelo libero della corrente e questo comporta una riduzione della velocità con conseguende deposizione del materiale solido; la dimensione granulometrica del materiale depositatà sarà quandi funzione della velocità e quindi dell'energia della corrente, che a sua volta dipenderà dalla pendenza di compensazione di progetto. Con il procedere dell'interramento l'altezza del pelo libero diminuisce per l'accumulo di materiale e quindi via via la velocità del flusso tenderà ad aumentare, ma contemporaneamente l'interramento porta una riduzione della pendenza che va a sfavore della velocità.

Le soglie di stabilizzazione svolgono il compito di ridurre l'azione erosiva del flusso su materiali facilmente suscettibili, tramite l'impiego di taglioni ancorati su un substrato roccioso che devono avere una lunghezza adeguata per permettere un corretto ammorsamento.
La fattibilità di queste opere è ovviamente legata all'accessibilità e alle caratteristiche del sito.

Le *opere di consolidamento nella zona di transito* vengono realizzate al fine di ridurre il fenomeno di erosione che il transito del flusso provoca lungo il canale, dato che questo comporta un aumento dei volumi della colata, con la conseguente crescità del potenziale distruttivo (Figura 3.2). Per tale motivo si può scegliere di adottare tali soluzioni di consolidamento, sia per quanto riguarda il fondo del canale che per le sponde. Le opere di consolidamento nella zona di transito si

dividono in opere di stabilizzazione trasversale con altezze variabli tra i 2.5m e i 7m che possono essere realizzate in calcestruzzo armato, in massi (muri a gravità) o in legno a seconda dell'altezza; e opere di stabilizzazione longitudinale volte a proteggere le sponde dall'asportazione di materiale per opera del flusso, le quali possono essere realizzate utilizzando rivestimenti in calcestruzzo gettato in opera o prefabbricato, pietre legate con malta o a secco, o anche gabbioni riempiti di materiale grossolano.

Figura 3.2: opere di consolidamento nella zona di transito (trasversali sulla sinistra, longitudinali a destra)

3.2.2 Opere di trattenuta

Le opere di trattenuta sono realizzate lungo il canale per favorire la deposizione del materiale solido che compone la colata detritica man mano che procede verso valle, controllando questo processo in modo da far depositare il materiale gradualmente. Tra le opere di trattenuta troviamo:

- *Briglie frangicolata*, sono opere con conformazione a pettine (Figura 3.3), hanno la funzione di interferire con il flusso diminuendone l'energia e la velocità per favorire la deposizione dei sedimenti nel bacino di deposito posto più a vale. Queste opere vengono impiegate a monte del conoide quando la velocità del flusso supera 1.5 m/s, vengono realizzate in cemento armato dato che devono resistere e trattenere i detriti di maggiori dimensioni trasportati dal fronte (Cap.2).

- Il *bacino di deposito* viene realizzato solitamente nelle zone di minor pendenza del conoide, quando non disponibili possono essere costruite delle vasche di deposito in successione. L'area designata per ospitare il bacino viene delimitata con argini in terra o calcestruzzo armato e all'uscita viene posta una briglia filtrante per consentire al livello del flusso di alzarsi prima di defluire e quindi favorire ulteriormente il deposito di materiale solito prima di far defluire il flusso d'acqua. Per la progettazione del bacino si fanno riferimento a linee guida, per cui la capacità d'invaso deve essere almeno del 40-50% del volume solido della colata di progetto, l'angolo d'inclinazione del fondo deve avere un valore compreso tra 3° e 8° a seconda che si tratti di colate di fango o detritiche, e la piazza di deposito deve risultare accessibile dalle macchine operatrici per consentire di vuotare l'area dal materiale accumulato (Figura 3.4).

Figura 3.3: Briglia frangi colata

Figura 3.4: esempi di bacini di deposito con diverse conformazioni

- Le *briglie filtranti*, sono opere strutturali trasversali che hanno lo scopo di trattenere il materiale solido, in realtà la loro funzione è più articolata in quanto è possibile ottenei dei vantaggi in termini di:

- **ritenzione**, grazie all'arresto di materiale e sedimenti, che poi dovranno essere rimossi meccanicamente;
- **dosaggio**, in quanto una parte dei sedimenti che si accumula a monte delle bliglie può essere trasportato a valle in maniera graduale dall'acqua di precipitazione;
- **filtraggio**, dato che vengono trattenuti i detriti più grossolani mentre la componente più fluida con i sedimenti più fini sono laciati passare;
- **dissipazione energetica**, infatti la colata perde energia a causa del rallentamento subito e dell'arresto dei massi di maggiori dimensioni trasportati dal fronte della colata.

All'inizio dell'impiego delle briglie (anni '60) esse venivano realizzate con un profilo pieno, per questo definite chiuse, proprio per la loro geometria erano sottoposte ha un'azione molto severa da parte della colata, e di conseguenza dovevano avere dimensioni maggiori e più impattanti rispetto alle briglie più moderne definite aperte. Attualmente le briglie filtranti dette anche selettive di tipologia aperta dispongono di finestre e aperture che consentono il passaggio dell'acqua mentre trattengono la componente solida, in questo modo la spinta idraulica della colata non sollecita eccessivamente l'opera, permettendo di progettare elementi con spessori e dimensioni più contenuti rispetto al passato. Tra le briglie aperte possiamo distinguere diverse tipologie:

- *briglie a finestre e a fessura* (Figura 3.5 a-b), hanno la funzione di trattenere temporaneamente i sedimenti dei flussi di piena che successivamente vengono riportati gradualmente a valle dalle portate ordinarie (dosaggio), e di ridurre l'energia. Queste briglie sono progettate in modo da lasciar passare senza particolare disturbo le portate ordinarie che svolgono una funzione autopulente asportando il materiale deopositatosi in seguito ad una portata di piena, ma non sempre questa funzione avviene, soprattutto nelle briglie a finestra, causandone l'intasamento.

- *briglie a reticolo e a pettine* (Figura 3.6 c-d), hanno la funzione di trattenere i detriti solidi di maggiori dimensioni e lasciar passare la componente più fluida (filtraggio), e dissipare energia. Queste barriere a differenza delle precedenti, hanno bisogno di una manutenzione immediata dopo il passaggio dell'ondata di piena per ripristinarne il corretto funzionamento, perchè il materiale trattenuto rimane ad ostruire l'opera. Risultano spesso utili nell'intercettare quei materiali che normalmente possono ostruire ponti e tombini, come ad esempio i tronchi. Tra le briglie aperte a reticolo possiamo trovare una particolare categoria di recente impiego, le *reti flessibili ad anelli* (Figura 3.7). Queste strutture nascono come reti paramassi, per arrestare la caduta del materiale solido lungo i versanti; proprio per la grande versatilità, la velocità d'istallazione, costi inferiori, un minor impatto ambientale, e una facilità nel ripristino rispetto alle briglie in calcestruzzo e acciaio stanno avendo sempre più largo impiego. Le reti flessibili vengono posizionate trasversalmente lungo il canale e ancorate alle sponde tramite ancoraggi a spirale o auto-perforanti e sostenute superiormente e inferiormente da cavi d'acciaio, la dimensione della maglia varia a seconda della granulometria del materiale da intercettare e spesso vengono impiegate due reti sovrapposte con aperture della maglia differenti; inoltre questi sistemi possono essere dotati di dissipatori energetici con la funzione di smorzare l'energia del flusso (Geobrugg).

Figura 3.5: Esempi di briglie filtranti aperte a finestre (a), a fessura (b).

- *Altre tipologie di briglie aperte* (Figura 3.8), la cui progettazione si basa su approcci sperimentali.

La progettazione delle briglie di trattenuta viene fatta sul volume relativo alla portata di picco considerando il filtro intasato, pertanto deve essere prevista per ogni tipologia di opera una gaveta con sezione solitamente trapezoidale per convogliare il flusso di piena al centro della barriera e limitarne l'azione erosiva sulle sponde. Un'altra problematica che riguarda spesso le briglie selettive è che difficilmente riescono a trattenere soltanto del materiale di dimensioni specifiche, ciò ne provoca spesso l'intasamento che dovrà essere risolto asportando il materiale meccanicamente. Altra considerazione va fatta sulla capacità di auto-svuotamento di alcune briglie, che anche se prevista può non avvenire e per questo a favore di sicurezza viene sempre trascurata. Per quanto riguarda il calcolo della volumetria del materiale accumulato, quindi dell'altezza dell'opera, e successivamente delle dimensioni del bacino di deposito necessarie, si procede per step successivi valutando il volume trattenuto. Si fissa un'altezza possibile della briglia e scegliendo un angolo di regressione del profilo del materiale accumulato rispetto all'orizzontale, compreso

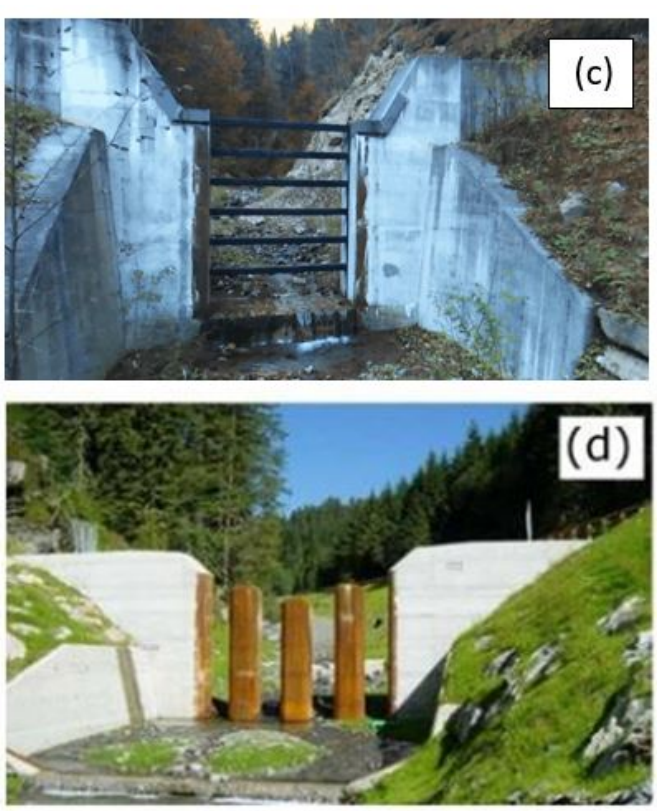

Figura 3.6: Esempi di briglie filtranti aperte reticolo (c), a pettine (d).

Figura 3.7: Reti flessibili ad anello prima e dopo l'evento

tra 3°e 8°; si valuta quindi in base alla topografia del bacino la volumetria utile a ospitare i sedimenti, e la si confronta con il volume solido della colata di progetto. Infine va puntualizzato che, l'efficacia delle briglie di trattenuta frequentemente viene raggiunto tramite la costruzione di opere disposte in serie lungo il percorso del flusso, ad esercitare un'azione di trattenuta in vari step; inoltre la singola opera può risultare sottodimensionata per un particolare evento, in quanto nella progettazione si fa riferimento ad una determinata probabilità di accadimento a cui corrisponderanno eventi con una certa portata di progetto.

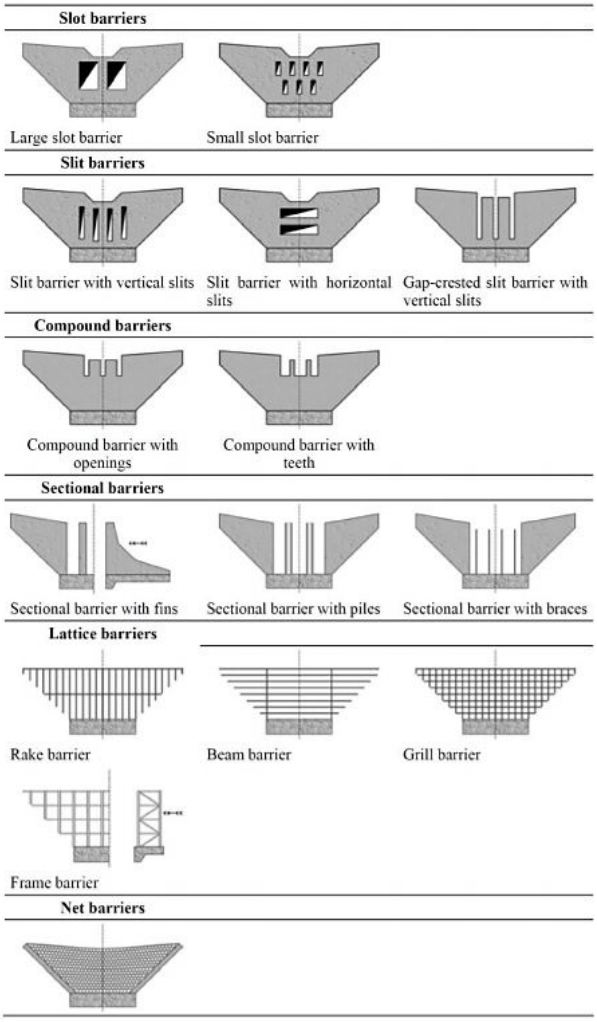

Figura 3.8: Rappresentazione di diverse tipologie di barriere aperte (Hubl et al., 2003).

3.2.3 Canale di smaltimento

Il canale di smaltimendo deve essere previsto a valle dell'ultima briglia di trattenuta e la confluenza del torrente con il collettore di fondo valle. Il canale deve essere opportunamente sistemato per accogliere ed allontanare il flusso proveniente da monte, tenendo sempre in considerazione della presenza di una parte solida di progetto, anche se le opere di trattenuta anteposte ad esso hanno funzionato correttamente. La sezione del canale può essere di vario tipo, tra le più efficaci troviamo: - *sezione parabolica* - *sezione ad U* - *sezione semicircolare*. Queste geometrie evitano l'eccessivo accumulo di materiale solido sul fondo e ne favoriscono l'allontanamento dei detriti depositati grazie al passaggio della portata ordinaria (funzione autopulente). Il canale deve essere appositamente rivestito per evitare l'eccessiva erosione del fondo e delle sponde (Figura 3.9), per questo scopo spesso si impiegano blocchi di materiale lapideo posto a secco o legati con malta cementizia, o inseriti in gabbioni metallici di contenimento.

Figura 3.9: vista di un canale di smaltimento in fase costruttiva a sinistra, a destra in fase di esercizio (Pirulli, 2014)

Per quanto riguarda la pendenza, occorre mantenerla il più possibile costante lungo tutto il tratto evitando bruschi cambi di inclinazione o di sezione, perchè la presenza di salti idraulici maggiore di 2 m può comportare un'eccessiva perdità di energia del flusso che rallenta e può verificarsi la fuoriuscita dagli argini. Quando non è possibile rispettare ciò per vincoli topografici i salti idaulici non devono comunque superare 0.5 m - 0.7 m; la stessa accortezza va tenuta per il tracciato che deve essere quanto più possibile rettilineo, e i cambi di direzione devono avvenire con ampi raggi di curvatura. Il franco idraulico è consigliabile che superi i 2m soprattutto se il canale di smaltimento attraversa un centro abitato o anche un'infrastruttura viaria.

Capitolo 4

Modellazione numerica e reologia

La modellazione numerica costituisce ad oggi uno dei più recenti strumenti per l'analisi di propagazione delle colate detritiche, in quanto è possibile stimare attraverso simulazioni di eventi i parametri caratteristici necessari per la progettazione, come la velocità del flusso, l'altezza massima e l'estensione di una colata. Una prima distinzione tra i vari approcci utilizzati per la modellazione di questi particolari fenomeni può essere identificata tra i modelli che utilizzano il continuo equivalente 3D, in cui il solido, e il liquido presenti nel flusso vengono considerati come un unico materiale con caratteristiche e proprietà omogenee su tutta la massa; e quelli che impiegano un approccio discreto, dove il materiale viene rappresentato per mezzo di singoli grani, e la dinamica interna del flusso viene governata dal contatto tra le particelle. La complessità delle colate detritiche, dove vi è la compresenza e l'interdipendenza tra la fase solida e la fase liquida, rende necessaria la trattazione del problema sfruttando modelli ibridi con cui è possibile ricostruire l'interazione tra particelle granulari e fluido.

4.1 Generalità della modellazione numerica

I due approcci fondamentali con cui si può rappresentare tramite la simulazione numerica il corpo di frana nelle colate detritiche sono il continuo e il discreto, in base ai quali si andranno a risolvere le equazioni del moto e di trasporto della massa. Nel campo del continuo come prima cosa occorre definire le equazioni differenziali parziali ottenute dall'equazione di conservazione della massa e della quantità di moto con riferimento ad un volume di controllo infinitesimale. La difficoltà risiede nel risolvere le equazioni differenziali parziali per via di numerosi fattori come la non linearità fisica e geometrica, la complessità nel definire le condizioni al contorno, ecc. Per questo si impiegano metodi alle differenze finite, volumi finiti o elementi finiti, con cui si vanno a trasformare le equazioni differenziali difficilmente risolvibili in equazioni algebriche di più facile trattazione, definendo a priori le condizioni iniziale e al contorno. La risoluzione delle equazioni algebriche ottenute avviene per mezzo di un processo iterativo fino al raggiungimento della convergenza, dopo aver discretizzato il dominio del problema con volumi, griglie o elementi a seconda del metodo utilizzato. Si può notare come ogni unità elementare con cui si rappresenta

il dominio può contenere un numero elevato di particelle, dell'ordine di 10^{16}, in termini di scala del problema ci troviamo nella fascia *macroscopica* (Figura 4.2). Nella scala macroscopica le proprietà fisiche (viscosità) sono generalmente note a priori , e i valori delle grandezze fisiche di velocità, pressione, densità, delle singole particelle che compongono il fluido vengono sintetizzate in un unico valore assegnato al nodo, o mediato su un volume finito, o possono assumere un andamento lineare o bilineare da un nodo all'altro.
Andando a considerare la scala della particella ci troviamo in una condizione del problema diametralmente opposta ovvero, la *scala microscopica*, dove per risolvere il problema occorre seguire un metodo di simulazione molecolare (MD) in cui è necessario definire le forze innterparticellari per poi risolvere il problema; inoltre occore calcolare la traiettoria delle particelle per ogni step temporale, quindi conoscere la velocità e la posizione nello spazio di ognuna di esse (Figura 4.2). Altra considerazione va fatta sull'intervallo di tempo scelto per lo studio delle particelle, dato che dovrebbe risultare inferiore al tempo di collisione ($10^{-12}s$). Tutto questo risulta impossibile da attuare per un sistema di grandi dimensioni.

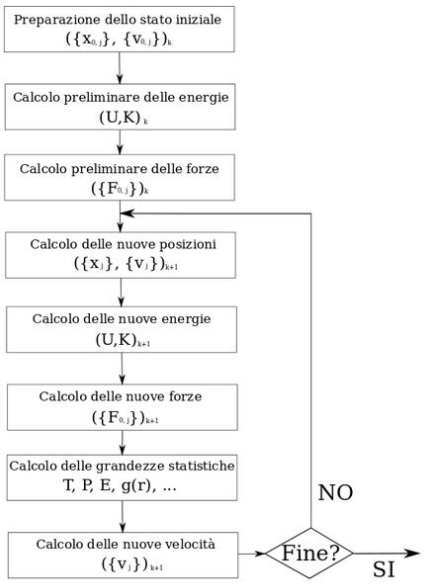

Figura 4.1: Schema generale di un codice di dinamica molecolare (MD)

Per risolvere questo inconveniente Boltzmann ha immaginato di colmare questa discrepanza tra scala macroscopica e microscopica con la statistica, andando a considerare il comportamento non delle singole particelle, ma di un gruppo di esse, dove le proprietà sono rappresentate tramite una funzione di distribuzione, ci troviamo nella *scala mesoscopica.* Questa semplificazione condotta da Bolzmann non risulta eccessiva ai fini del problema ingegneristico, dato che non è rilevante conoscere la posizione e la velocità delle singole particelle, bensi gli effetti risultanti dal comportamento del loro insieme.

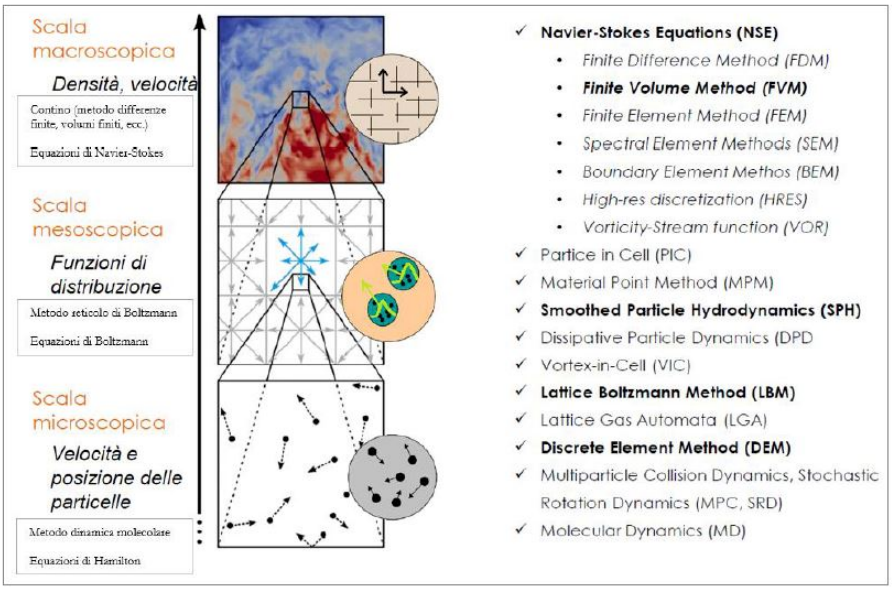

Figura 4.2: tecniche di simulazione e principali metodi sviluppati nella modellazione numerica (Pirulli Leonardi, 2019)

I risolutori classici di fluidodinamica (CFD) con i metodi ai volumi finiti o agli elementi finiti, presentano notevoli difficoltà nel gestire le interfaccie, in particolare nei problemi accoppiati in cui si combina il continuo e il discontinuo, ogni particella rappresenta una discontinuità. Con il metodo Latticee-Bolzmann (LBM) questo non accade, in quanto sfrutta i vantaggi sia dei sistemi microscopici che di quelli macroscopici, ottenendo grande flessibilità in termini di elaborazione delle condizioni al contorno, e di trattazione dei sistemi multifase e multicomponente. La principale problematica dell'approccio accoppiato è l'ingente onere computazionale richiesto, per cui risulta ancora oggi difficilmente applicabile sulla scala del bacino. Per quanto detto, generalmente ad oggi si applicano metodi basati sul continuo o sul discontinuo a seconda di quale riesce meglio a rappresentare il reale comportamento dell'evento. Si adottano approcci discreti quando risulta predominante l'interazione tra le particelle, sfruttando ad esempio un metodo agli elementi discreti (DEM); dall'altra parte quando il comportamento della colata detritica può essere paragonato a quello di un fluido, va definito un continuo equivalente per mezzo di una legge reologica opportuna. I modelli del continuo si dividono in: monofasico e bifasico. Nel primo, fase solida e liquida sono un tutt'uno, infatti il materiale viene descritto con proprietà intermedie tra il solido e il liquido (fluido equivalente); nel secondo caso la fase solida e liquida sono considerate come due continui distinti, con proprietà differenti. Le equazioni fondamentali su cui si basa la modellazione di un continuo equivalente, sono le equazioni di bilancio (conservazione della massa e della quantità di moto), anche note con il nome di equazioni di Navier-Stockes; oltre queste equazioni di bilancio occorre definire una legge reologica opportunamente calibrata attraverso dei parametri. Alla fase di calibrazione bisogna porre particolare attenzione, in quanto risulta particolarmente delicata nella modellazione numerica, perchè può influenzare notevolmente i risultati finali. Di seguito vengono descritti nell'ordine un approccio continuo, uno discreto e uno ibrido.

4.2 Modellazione con continuo monofase e bifase, metodi integrati

L'utilizzo di un modello continuo impone innanzitutto di definire un continuo equivalente, vanno imposte le condizioni al contorno cinematiche sulle superfici libere e sul fondo per non consentire lo scambio di massa a meno della presenza di erosione, la coordinata z viene scelta ortogonale alla topografia. La risoluzione del moto avviene tramite l'utilizzo del principio di conservazione della massa e della quantità di moto ((Hutter, 1989); (Hungr, 1995); (Denlinger Iverson, 2001)), una volta assunto per semplicità fluido incomprimibile ed omogeneo. Un'altra ipotesi che sta alla base dell'utilizzo di questo approccio è che il materiale in movimento debba avere un'altezza limitata rispetto all'estensione areale del problema, e il profilo di velocità lungo lo spessore del flusso (h) di propagazione deve essere nota a priori e costante lungo h. Esistono diversi solutori numerici come RASH^{3D} in grado di risolvere le equazioni di bilancio con le relative condizioni al contorno.

4.2.1 RASH^{3D}

Il risolutore numerico RASH^{3D} (Pirulli, 2005, Pirulli et al., 2007) si basa sulla risoluzione delle equazioni di Navier-Stockes mediate lungo la profondità, semplificando notevolmente la trattazione tridimensionale e quindi l'onere computazionale, in quanto si ottiene per ogni punto della massa fluida una soluzione media sulla base di un sistema di riferimento Eureliano, cioè un sistema di riferimento fisso nello spazio, che non varia con il moto del flusso. Con RASH^{3D} è possibile lavorare sulla reale topografia del problema implementandola tramite delle coordinate di punti (X,Y,Z), e il risolutore fornisce una soluzione unica per ogni punto della griglia. In RASH^{3D} la massa eterogenea viene modellata come un continuo equivalente il cui comportamento viene descritto dalle equazioni di bilancio della massa e della quantità di moto:

$$E_t = \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (v_x h)}{\partial x} + \frac{\partial (v_y h)}{\partial y} \tag{4.1}$$

$$\frac{1}{\rho}\tau_{zx} + g_x h - v_x E_t = \frac{1}{2}\frac{\partial (K_x g_z h^2)}{\partial x} = h(\frac{\partial v_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial v_x}{\partial y}) \tag{4.2}$$

$$\frac{1}{\rho}\tau_{zy} + g_y h - v_y E_t = \frac{1}{2}\frac{\partial (K_y g_z h^2)}{\partial y} = h(\frac{\partial v_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial v_y}{\partial y} + V_y \frac{\partial v_y}{\partial y}) \tag{4.3}$$

In RASH^{3D} il sistema di equazioni (4.1, 4.2, 4.3) viene risolto tramite l'utilizzo di una mesh di elementi finiti regolare piana, con maglia triangolare (Finite Volume Method), dove i termini presenti rappresentano:
- h= altezza del flusso;
- ρ = densità della massa;
- E_t= indice di erosione;
- K_x, K_y= coefficiente di spinta;

- v_x, v_y= velocità del flusso lungo le direzioni x e y mediata sulla profondità;
- $\tau_z x, \tau_z y$= resistenza al taglio;
- g_x, g_y, g_z= proiezione del vettore della forza di gravità nelle rispettive direzioni.

4.3 Modellazione discreta (DEM)

Uno dei modelli numerici utilizzati nella modellazione con approccio discontinuo è il modello agli elementi discreti (DEM). La prima grande differenza con i modelli continui sta in come viene schematizzata la massa del flusso, infatti vengono utilizzate singole particelle con forma e dimensione variabile e quindi è anche possibile riprodurre fisicamente una determinata distribuzione granulometrica nel flusso, che si avvicini quanto più possibile quella reale. Con questo strumento si è in grado di riprodurre anche il fenomeno della segregazione, e dato che le particelle possono interagire tra loro ma possono anche allontanarsi, risulta molto utile per testare l'effetto di barriere ed ostacoli. Per sfruttare al meglio questo comportamento degli elementi discreti spesso si modellano le particelle come corpi rigidi, con contatti tra di esse che però non sono puntuali, proprio per consentire una certa deformabilità.

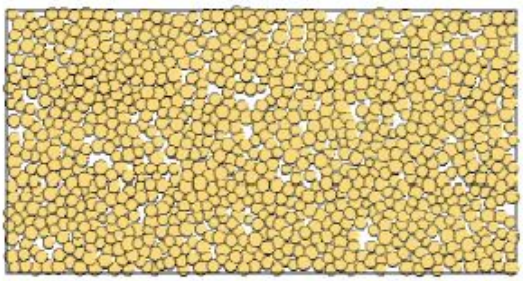

Figura 4.3: Esempio di modellazione con particelle (DEM).

La principale problematica di questi modelli è l'elevata capacità di calcolo richiesta, dato che se i grani fossero rappresentati con le reali dimensioni, il numero di elementi necessari a comporre il modello sulla scala del bacino sarebbe enorme, inoltre la presenza di elementi di diverse dimensioni fa si che una singola particella possa essere a contatto con molte particelle di più piccole dimensioni, ciò aumenterebbe notevolmente la domanda di calcolo, e quindi di fatto il modello discreto sarebbe impossibile da attuare con questo livello di precisione.

4.4 Modellazione ibrida continuo-discreto (LBM-DEM)

Le colate detritiche abbiamo visto come risultino essere dei fenomeni molto complessi da modellare per via della presenza di una fase solida e una liquida con interazione reciproca, inoltre la scala granulometrica all'interno del flusso detritico risulta molto variabile e allo stesso tempo anche le forze in gioco cambiano a seconda della scala considerata. Se andiamo a prendere in esame le particelle più piccole

(*piccola scala)* prevalgono le forze elettrostatiche, se passiamo alla *scala media*, la fanno da padrone le forze viscose, mentre su *larga scala* le forze predominanti diventano quelle di collisione interparticellare. Per defini in maniera rigorosa gli intervalli delle scale, Bagnold ha proposto dei valori limite al Numero di Bagnold (1954):

$$Ba = \frac{\rho_p \cdot p^2 \cdot \lambda_p^{1/2} \cdot \dot{\gamma}}{\eta} \tag{4.4}$$

Con valori inferiori a 40 prevalgono le forze viscose, mentre per valori superiori a 450 dominano le forze inerziali; per tutti i valori intermedi si ha una situazione ibrida (Figura 4.4).

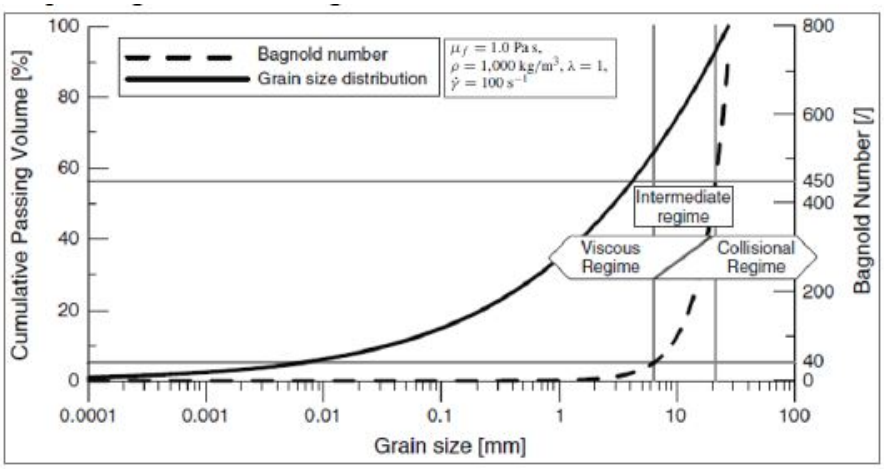

Figura 4.4: Esempio di clalcolo del numero di Bagnold per una tipica distribuzione granulometrica, si può distinguere la zona di regime viscos, la zona di regime collizionale, e la zona intermedia.

L'approccio ibrido che combina il continuo e il discreto (DEM), può risolvere molte di queste problematiche legate alla modellazione dei flussi detritici. Nella modellazione ibrida la componente che viene modellata come un continuo fluido schematizza le particelle più fini che generano insieme all'acqua un fluido viscoso, mentre per i detriti di dimensioni maggiori responsabili della natura collisionale viene utilizzata la modellazione DEM.
La modellazione secondo il metodo Lattice-Boltzmann DEM permette quindi di sfruttare i vantaggi di entrambe le modellazioni (continuo-discreto), consentendo di gestire meglio le condizioni al contorno più complesse e di tener conto della tridimensionalità del problema. Inoltre andando a ridurre nel complesso il numero di elementi discreti necessari a descrivere il problema, diminuisce l'onere computazionale pur mantendo alto il livello di precisione dell'analisi.

4.5 Erosione

L'erosione è un aspetto molto rilevante per le colate detritiche, che va tenuto in considerazione sia perchè può comportare una variazione notevole dei volumi in movimento, ma anche perchè può portare ad un cambiamento nella composizione della massa fluida e quindi ad un differente comportamento reologico. Il tema

dell'erosione e del trascinamento del materiale a valle è stato oggetto di numerosi studi, per cercare di prevedere i possibili scenari e ridurre il rischio, inoltre sono stati implementati diversi risolutori numerici in modo da tenerne conto durante l'analisi del flusso (RASH^{3D}; Pirulli, 2005; Pirulli et al., 2007), andando a modificare la legge reologica nel codice.

Lo studio dell'erosione ha portato a numerose teorie in grado di definire questo complesso problema, e tra le diverse leggi ottenute, quella di McDougall & Hungr (2005) è stata scelta per implementare l'analisi numerica, in quanto sintetizza nel miglior modo, semplicità e accuratezza del risultato.
Il materiale solido presente lungo il canale percorso dal flusso della colata detritica, soggetto ad un processo di erosione e trasporto verso valle, si oppone al moto tramite due componenti: la resistenza inerziale che dipende dalla velocità del flusso, e la resistenza al taglio alla base (e.g. Perla et al., 1980). Pertanto un rapido cambiamento dello stato tensionale può portare alla mobilitazione del materiale, infatti una delle ipotesi più consolidate per spiegare l'elevata componente erosiva negli eventi riguardanti colate detritiche, si basa sulla liquefazione del materiale solido. In sostanza la sopraggiunta del flusso di colata detritica porta ad un aumento del peso sul terreno, con conseguente aumento delle pressioni interstiziali che portano ad una destabilizzazione del materiale, che quindi può essere più facilmente eroso. In particolare possiamo distinguere tre casi differenti di pressioni interstiziali (Sassa, 1988):

- *Nessuna generazione o dissipazione di sovrappressioni intertiziali*, situazione tipica nei canali argillosi, dove la pressione all'interno dei pori in corrispondenza del piano di scivolamento è regolata soltanto dalla massa del flusso;

- *Generazione di sovrappressioni interstiziali*, la pressione interstiziale dipende da come il materiale sul piano di scivolamento reagisce alla sollecitazione del materiale di frana;

- *Dissipazione di sovrappressioni interstiziali*, la pressione interstiziale maggiore si trova nel flusso di frana e viene dissipato dal terreno sottostante, per cui la distanza percorsa dalla colata dipende da come flusso e terreno interagiscono tra di loro.

Quindi il trasporto di materiale in condizioni sature o quasi sature favorisce la mobilitazione del materiale.

Per definire una legge in grado di descrivere il comportamento erosivo di una colata detritica occore conoscere la dinamica del fenomeno, la natura del materiale erodibile e le sue condizioni iniziali, quindi diventano fondamentali variabili come la densità, la dimensione delle particelle, la struttura del flusso, il grado di saturazione, l'angolo d'inclinazione del canale e quanto vicino si trova lo stato tensionale del materiale alla condizione di rottura, in termini di tensioni efficaci.

Le formulazioni raggiunte per la descrizione dell'azione erosiva delle colate detritiche si fondano su due tipi di approcci distinti. Un approccio riguarda le *leggi basate sui processi*, l'altro le *leggi empiriche*, ottenute dall'osservazione di test in laboratorio e degli eventi in sito. Per quanto riguarda l'approccio basato sui processi, le leggi che descrivono il fenomeno vengono ottenute dallo studio dei fenomeni fisici che governano tale evento, andando a valutare le possibili cause che destabilizzano il materiale. Diversi autori sostengono che la destabilizzazione del materiale sia dovuto alle forze di trascinamento che si generano sul fondo del canale (Medina et al., 2008), alla possibile perdita di resistenza del materiale in seguito all'azione rapida di carichi in condizioni non drenate (Sassa, 1988; de Joode van Steijn, 2003), alle forze d'impatto (Grigorian & Ostroumov, 1977; Sovilla et al., 2006), e alla liquefazione del materiale saturo del canale (Sassa, 1985).

Medina et al., (2008) in accordo con il ruolo principale giocato dalle forze di trascinamento assume che il materiale sottostante collassa quando la tensione di taglio sul letto del canale provocata dalla colata in movimento supera la tensione massima resistente, e il materiale che si mobilità diventa parte del flusso. Medina et al., (2008) in particolare propone due differenti approssimazioni per simulare l'effetto del trascinamento, un *approccio statico*, dove viene definito un equilibrio statico tra la tensione di taglio sulla superficie del canale generata dal flusso (τ) e la tensione resistente del materiale sul fondo del canale (τ_r), per cui la velocità risultante diminuisce a causa del trascinamento; e un *approccio dinamico*, partendo dall'approccio statico, il materiale eroso che viene incorporato nel flusso subice poi un'accelerazione fino ad arrivare alla stessa velocità del flusso. Questa visione del problema secondo Medina porta ad una notevole influenza nei risultati finali a seconda del valore dell'angolo d'attrito del letto del canale assunto.

Secondo l'approccio di Joode van Steijn (2003) in accordo con Sassa (1988), le sollecitazioni di taglio sulla superficie del canale sono indotte della variazione delle pressioni interstiziali dell'acqua. Durante lo scivolamento di una colata detritica, il materiale in movimento esercita un peso sul materiale sottostante e quindi un aumento delle pressioni interstiziali fino ad una profondità relativamente bassa, dove queste tornano a zero. Nella zona dove la pressione dell'acqua aumenta il sedimento può essere soggetto ad instabilità ed essere eroso, se in quell'area il materiale eroso è maggiore del quantitativo d'acqua che arriva, allora ci sarà un aumento della densità del flusso con una propensione maggiore alla sedimentazione; viceversa, quando l'acqua che affluisce è maggiore dei sedimenti o la pendenza della superficie del canale si riduce notevolmente e quindi il flusso rallenta, viene favorita la deposizione del materiale solido, la densità del flusso diminuisce e il processo di erosione del letto per effetto del sovraccarico riprende. Una problematica di questo approccio riguarda la deposizione e l'accumulo del materiale nei punti dove si verifica una forte riduzione di pendenza, in quanto nella realtà questo non avviene, e pertanto deve essere definità una velocità minima sotto la quale il flusso non può scendere da applicare al modello durante l'analisi.

Le formulazioni ottenute da **approcci empirici** si basano sulle esperienze e sulle

conoscenze pregresse. Un primo approccio introduce il concetto indice di rendimento Y_t dato dal prodotto del volume di terreno eroso per metro di lunghezza del canale (Hungr et al 1984). Da questa definizione Rickenmann et al. (2003) definiscono l'indice di erosione E_t, come un parametro dipendente dal tempo. Nel caso di condizioni sature del letto del canale, Takahashi Kuang (1986) hanno introdotto due differenti formulazioni dell'indice di erosione E_t a seconda se la condizione di saturazione del terreno viene raggiunta o meno. In generale, si suppone che l'erosione avvenga fintanto che la concentrazione di particelle solide trasportate all'interno del flusso (c) sia minore di una concentrazione di equilibrio (C_e) oltre la quale si avrebbe sedimentazione. Un ulteriore adattamento della formulazione di Takahashi Kuang (1986) è stata introdotta da Ghilardi Natale (1998), dove si tiene conto della condizione uniforme o non uniforme del flusso.
Una formulazione alternativa a quella di Takahashi per descrivere la condizione di erosione/deposizione è quella proposta da Egashira Ashida (1987) e Egashira (1993), dove viene definita una formula universiale, valida per le colate detritiche dove la dimensione delle particelle solide siano confrontabili alla dimensione dei sedimenti che compongono il letto del canale. Con tale formulazione si suppone che in un letto erodibile, la pendenza sia sempre superiore alla pendenza di equilibrio, quando questo non si verifica si ha sedimentazione del materiale (tasso di erosione negativo).
Brufau et al. (2000) hanno proposto una modifica alla formulazione di Egashira, S. Ashida, K. (1987) per superare la necessità di avere una pendenza superiore ad un valore di equilibrio per avere erosione, in quanto questa può comunque avvenire, come nel caso in cui il fronte del flusso avanza su una contropendenza.
Fino ad ora le formule viste non tengono conto dell'eterogeneità delle particelle solide del flusso rispetto al piano di scorrimento, ma considerano la dimensione della componente solida nel flusso e quella del letto del canale confrontabili, questo in realtà porta a non tener conto di un aspetto importante, per cui dal canale non potrebberro mobilitarsi massi di dimensini elevate; inoltre al crescere della dimensione delle particelle nel flusso, il coefficiente di erosione diminuisce. Per questo Egashira et al. (2001) hanno modificato la trattazione di Egashira (1993).
Papa et al. (2004) in accordo con quanto detto sopra definiscono la condizione critica di trascinamento del materiale, se la granulometria delle particelle del letto d_b sono maggiori di un valore critico d_b* l'erosione non avviene, al contrario quando il valore d_b è minore di d_b* si ha trasporto del materiale del letto. Il valore di d_b* si definisce come la profondità a partire dalla superficie del letto del canale dove τ è uguale a τ_y
Possiamo notare le formule introdotte da McDougall Hungr (2005) and Chen et al. (2006). Sono formule basate sulle considerazioni precedenti e su coefficienti sperimentali che vanno oppurtnamente tarati in base ai dati a disposizione. Proprio per l'immediateza e la semplicità d'impiego sono maggiormente utilizzate ai fini pratici.

Descriptor	Yield rate, Y_t; erosion depth, D_t; erosion rate, E_t	Author(s)
A	$E_t = \alpha_{10} hv\sqrt{\sin\theta}\left(\frac{f_1 h\rho \sin\theta}{f_2 b_0 d(\rho_s - \rho)} - 1\right)$	Egizarov (1963)
B	$Y_t = D_t \cdot W_t$	Hungr *et al.* (1984)
C	$E_t = \begin{cases} \alpha_1 \frac{c_e - c}{c^* - c_e}\frac{vh}{d} & c < c_e \\ \alpha_2 \left(\frac{c_e - c}{c^*}\right)\frac{vh}{d} & c \geq c_e \end{cases}$	Takahashi & Kuang (1986)
D	$E_t = \begin{cases} \alpha_0(\tau_t^* - \tau_{0b}^*)\sqrt{\frac{\tau_t}{\rho_w}} = \alpha_0\sqrt{gh}\sin^{3/2}\theta\left[1 - \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}c\left(\frac{\tan\varphi}{\tan\theta} - 1\right)\right]^{1/2}\left(\frac{\tan\varphi}{\tan\theta} - 1\right)(c_e - c)\frac{h}{d} & \text{unsaturated bed} \\ \alpha_1\left(\frac{c_e - c}{c^* - c_e}\right)\frac{vh}{d} & \text{saturated bed} \quad c < c_e \\ \alpha_2\left(1 - \frac{v}{\alpha_4 v_e}\right)\left(\frac{c_e - c}{c^*}\right)\frac{vh}{d} & v < \alpha_4 v_e \\ 0 & v \geq \alpha_4 v_e \quad c \geq c_e \end{cases}$	Takahashi *et al.* (1992)
E	$E_t = \begin{cases} \alpha_3 \frac{c_e' - c}{c^* - c_e}\frac{\tan\varphi - \tan\theta_f}{\tan\varphi - \tan\theta}\frac{vh}{d} & c > c_e' \\ \alpha_6\left(\frac{c_e' - c}{c^*}\right)\frac{vh}{d} & c \leq c_e' \end{cases}$	Ghilardi & Natale (1998)
F	$E_t = \alpha_7 v\tan(\theta - \theta_e)$ with $\tan\theta_e = \frac{[(\rho_s/\rho_w) - 1]c\tan\varphi}{[(\rho_s/\rho_w) - 1]c + 1}$	Egashira & Ashida (1987)
G	$E_t = c^* v\tan(\theta - \theta_b)$ θ_b is defined as in F	Egashira (1993); Egashira *et al.* (2001)
H	$E_t = \alpha_8 v\tan(\theta_f - \theta_e)$ with $\tan\theta_f = \frac{Sc}{\cos\theta}$	Brufau *et al.* (2000)
I	$E_t = \begin{cases} \alpha_9(v - v_e) & v > v_e \\ 0 & v \leq v_e \end{cases}$	Bozhinskiy & Nazarov (1999)
J	$Y_t = \alpha_{11} V_0 \frac{\rho}{\rho_w}(\sin\theta)^{\beta_{10}}$	Rickenmann *et al.* (2003)
K	$E_t = E_s hv$ with $E_s = \ln\left(\frac{V_t}{V_0}\right)\frac{1}{l}$	McDougall & Hungr (2005)
L	$Y_t = \alpha_{12}\frac{V_e}{A_e d_e}$	Chen *et al.* (2006)
M	$E_t = \frac{\tau - \tau_t}{\rho v}$	Medina *et al.* (2008)
N	$D_t = \frac{h(\rho_s\cos^2\theta\tan\varphi - \rho_s\sin\theta\cos\theta - \rho_w\tan\varphi)}{\rho\sin\theta\cos\theta - \rho\cos^2\theta}$	Sassa (1988); de Joode & van Steijn (2003)
O	$E_t = \sqrt{\frac{\sigma_0 - \sigma_0^*}{\rho_s(1 - \rho_s/\rho)}}$	Grigorian & Ostrovsky (1977); Sovilla *et al.* (2006)

Symbols used in this table are described in the Notation list.

PIRULLI AND PASTOR

Tabella 4.1: Sommario cronologico delle formulazioni per l'erosione.

4.5.1 Implementazione dell'erosione in un modello numerico

Un programma di calcolo agli elementi finiti che implementa l'azione di erosione-deposizione è Rash^{3D} (Pirulli 2005). Questo programma di calcolo ha origine da un programma di calcolo Swich per il flussi idraulici, e successivamente è stato aggiornato da Pirulli (2005) per permettere di risolvere problemi di moto di flussi granulari su domini 3D irregolari, consentendo di variare la reologia.
Le equazioni su cui si basa il risolutore numerico Rash^{3D} per la trattazione del problema del trasporto-deposizione del materiale solido del letto del canale derivano dalle equazioni di McDougall Hungr, 2004.

Alla base dell'implementazione del modello numerico in Rash^{3D} vi sono 3 assunzioni:

- l'altezza del flusso varia gradualmente rispetto alle dimensioni complessive della colata,
- il materiale è incomprimibile,
- la superficie del flusso è in condizione di superficie libera (stress free).
da queste ipotesi abbiamo ottenuto le equazioni (4.1, 4.2, 4.3) viste nel paragrafo 4.2.1. Nelle equazioni compare l'indice di erosione E_t, che possiamo scrivere come:

$$E_t = \frac{\partial z}{\partial t} = E_S \cdot hv \tag{4.5}$$

Questo indice permette di tener conto dell'effetto dell'erosione prodotta dalla colata, con un giusto compromesso tra semplicità e accuratezza. L'indice E_s che compare nall'equazione 4.5 viene definito come rapporto di crescita ed è dato appunto dal rapporto tra il logaritmo naturale del rapporto tra il volume finale V_f dato dalla somma del volume iniziale e il volume eroso, e il volume iniziale V_0 Nel risolutore numerico Rash^{3D} è l'operato che manualmete individua le zone in cui vi è erosione e di che entità assumerla in base al valore di E_s considerato.

$$E_s = ln\frac{V_f}{V_0} \tag{4.6}$$

4.6 Reologia

Parallelamente alla definzione del modello numerico con cui rappresentare il problema occorre stabilire quale comportamento sia meglio attribuire al materiale soggetto a movimento, in funzione delle caratteristiche di deformabilità, per questo entra in gioco la reologia. Per lo studio della reologia di un fluido si vanno a considerare gli spostamenti e le deformazioni del corpo nel tempo, sulla base di tre principi cardine:

- *Conservazione della massa*
- *Conservazione della quantità di moto*
- *Conservazione dell'energia*

e sulle equazioni costitutive.
Nella definizione della reologia per le colate detritiche, la grandezza fisica che domina le caratteristiche di moto del flusso è la viscosità. Se facciamo una distinzione tra moto laminare, in cui gli infiniti strati sottili che compongono il fluido scorrono l'uno sull'altro in seguito all'applicazione di un'azione di taglio τ da cui dipende la velocità di deformazione $\dot{\gamma}$:

$$\dot{\gamma} = \frac{\gamma}{dt} = \frac{dx}{dy \cdot dt} = \frac{du}{dy} = \frac{u_{max}}{h}; \tag{4.7}$$

e il moto turbolento, dove si generano delle tensioni tangenziali interne al fluido di natura turbolenta, determinando un moto caotico a causa della prevalenza delle forze inerziale su quelle viscose; appare complicato inquadrare quale regime di moto

meglio si adatta ai flussi detritici, in particolare Bagnold individua una concentrazione limite del solido nella colata pari al 9% in volume (Bagnold, 1954), oltre la quale è più opportuno far riferimento a modelli reologici con spiccate caratteristiche viscose.
La viscosita dinamica η è la grandezza con cui si descrive l'opposizione al fluire, che un corpo esercita in condizioni di sforzo. Indica la capacità di scorrimento di un fluido soggetto ad un azione di taglio e viene espressa come:

$$\eta = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} = \frac{F/A}{\dot{\gamma}}, \tag{4.8}$$

dove σ è la tensione di taglio superficiale.
La relazione che lega lo sforzo di taglio applicato e la velocità di deformazione (η) può essere di tipo lineare o non lineare a seconda della natura del fluido. Generalmente i fluidi si possono distingure in:

- *Fluido newtoniano*, in cui la viscosità è costante ad una data temperatura, e segue una legge lineare (Figura 4.5)
- *Fluido non newtoniano*, dove la viscosità non segue una legge lineare, ma varia con la velocità di deformazione. In questa categoria troviamo i fluidi *pseudoplastici* con una viscosità decrescente al crescere di $\dot{\gamma}$, i *fluidi dilatanti* con comportamento opposto ai precedenti e i *fluidi alla Bingham*, che sono suscettibili a deformazione solo dopo aver superato un valore soglia dello sforzo di taglio.

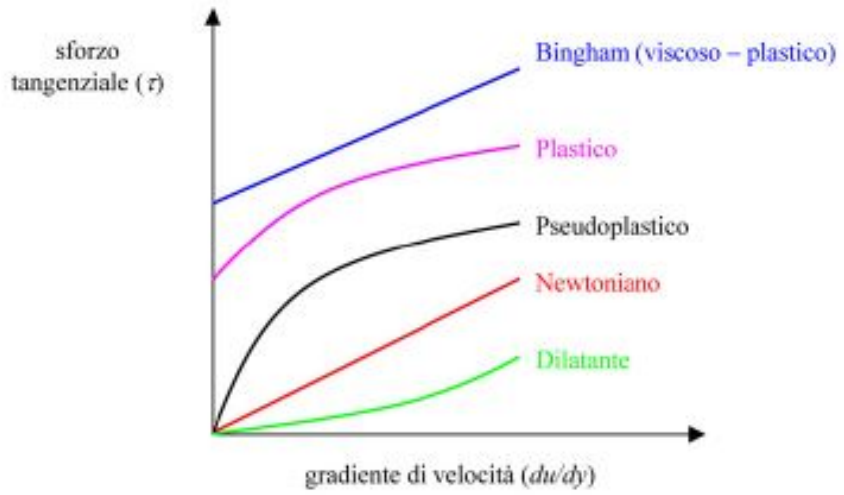

Figura 4.5: Differenti tipi di fluido in funzione del comportamento viscoso.

4.6.1 Legge reologica Voellmy

In questo paragrafo viene descritta la legge di Voellmy, una legge reologica ottenuta dalla combinazione della *legge di Bagnold* e della *legge attritiva*, che è stata utilizzata per questo lavoro nel codice di calcolo Rash^{3D}. La legge reologica introdotta

da Bagnold permette di descrivere il fenomeno di segregazione dei detriti solidi di maggiori dimensioni che si manifesta frequentemente nelle colate detritiche. Secondo Bagnold a causa delle collisioni che avvengono tra le particelle all'interno del flusso, si genera una *pressione dispersiva*, che spinge la componente solida più grossolana verso l'alto (Bagnold, 1954). Secondo gli studi di Bagnold la pressione dispersiva cresce con l'aumentare del diametro delle particelle e del gradiente di deformazione con una proporzionalità quadratica. Per questo nelle colate detritiche troviamo in corrispondenza del fronte, dove gli sforzi di taglio sono maggiori, i detriti più grossolani. La legge attritiva nota anche come legge di Coulomb ci dice che la resistenza alla deformazione di un flusso detritico dipende direttamente dalla pressione misurata in ogni punto in funzione dell'altezza della colonna di flusso e dall'angolo di attrito interno, il quale viene opportunamente modificato tenendo conto del contributo dell'acqua (angolo d'attrito apparente), per consentire il passaggio ad un continuo equivalente.

La legge reologica Voelly per fluidi non Newtoniani viene sintetizzata con l'eq:

$$\sigma = p \cdot \tan(\varphi_a) + \rho_f \cdot g \cdot \frac{u_f^2}{\xi}, \tag{4.9}$$

dove al primo termine abbiamo la componente attritiva, composto dalla pressione e dalla tangente dell'angolo d'attrito, mentre al secondo abbiamo il termine dipendente dalla turbolenza (ξ) e dalla velocità del fluido al quadrato.
Nei grafici in Figura 4.6 possiamo notare come la componente attritiva domini alle basse velocità di deformazione, mentre per valori più elevati prevalga la legge di Bagnold.

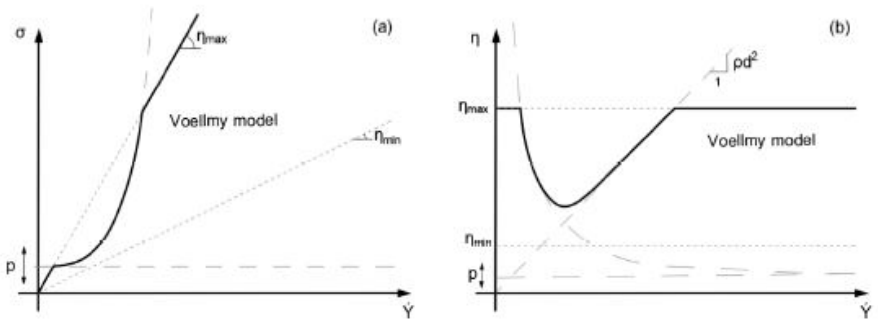

Figura 4.6: Legge reologia Voellmy, grafico della tensione di taglio(a), grafico viscosità apparente (b).

Capitolo 5

Caso di studio

5.1 Introduzione

La Corea del Sud è una penisola che si estende dal continente asiatico verso l'arcipelago del Giappone ricoprendo una superficie di 100.210 Km^2 con oltre 51 milioni di abitanti. La capitale è Seul. Il territorio è suddiviso in quattro Regioni, e risulta prevalentemente montuoso, sebbene le vette più alte non superino i 2000 m di altitudine.
Il clima della penisola è tipicamente continentale, con inverni freddi ed estati calde ed umide, il territorio è interessato dalla stagione dei monsoni e le maggior parte delle precipitazioni cadono proprio nel periodo estivo, con una quantità di pioggia media annuale che oscilla tra i 1200 mm e i 1500 mm. Proprio le precipitazioni medie annue hanno visto un incremento considerevole nel corso degli anni sul territorio coreano, in particolare possiamo notare dalla figura 5.1 come si sia passati da una media annua di circa 1300 mm agli inizi degli anni '70 fino ad arrivare ad oltre 1400 mm nel 2012; ciò è anche visibile nel grafico (figura 5.2) dove sono raggruppati ogni 5 anni i valori medi annuali di precipitazioni in Corea, e si può notare come l'incremento sia dell'11%, cioè pari a 140mm.

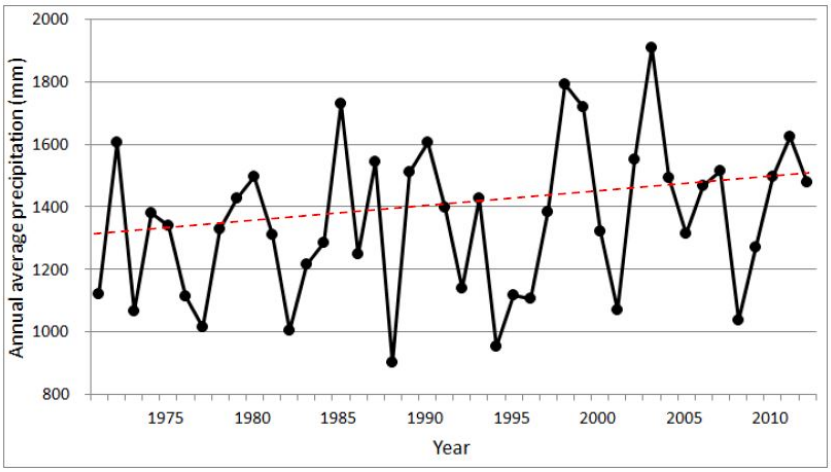

Figura 5.1: Media annuale delle precipitazioni in Corea del Sud dal 1971 al 2012 (Chan e Kyung 2016)

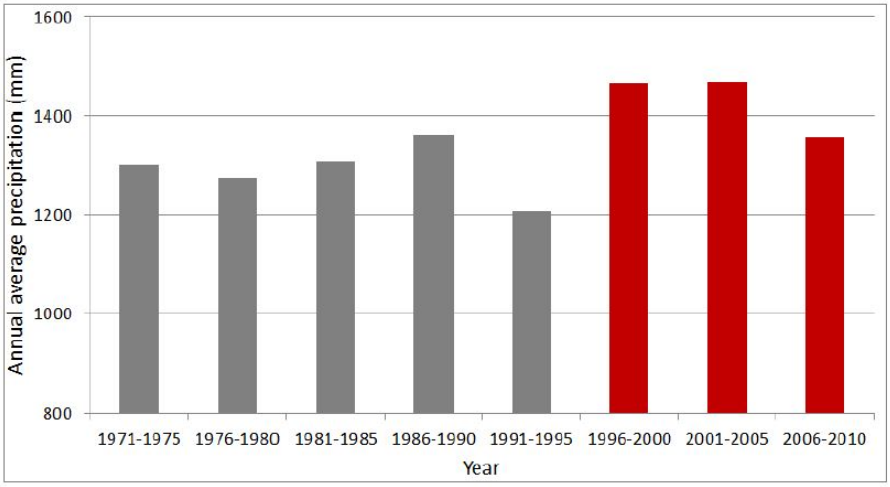

Figura 5.2: Raggruppamento ogni 5 anni dei 42 anni di dati di precipitazioni annuali medie in Corea (Chan e Kyung, 2016)

Le precipitazioni sul territorio coreano cadono per il 60% della quantità media annuale nel periodo estivo che va da inizio Giugno a fine Agosto come visibile dalla figura 5.3. Inoltre si può notare come l'incremento del valore medio annuo delle precipitazioni sia proprio concentrato in questa fascia stagionale, il che si traduce in una tendenza ad avere nel periodo estivo piogge brevi ma intense. In particolare possiamo notare come l'aumento negli ultimi anni sia pari al 33% (2001-2010).

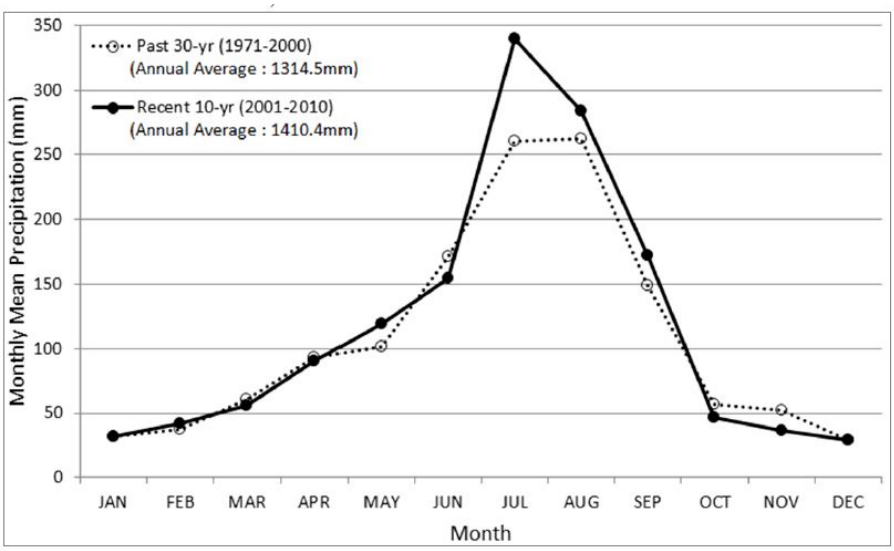

Figura 5.3: Media mensile delle precipitazioni degli ultimi 10 anni (2001-2010) rispetto agli anni precedenti (1971-2000). (Chan Kyung,2016)

Le piogge intense sono una delle cause scatenanti della maggior parte delle frane in Corea del Sud, come si può notare dal grafico (Figura 5.4). La quantità di pioggia media annua è strettamente correlata con il numero di eventi franosi, infatti in corrispondenza di un aumento della prima si registra un incremento dei fenomeni di instabilità con una chiara riduzione del rischio nell'anno successivo pur avendo un quantitativo di pioggia maggiore, ben visibile per l'anno 2002 e 2006.

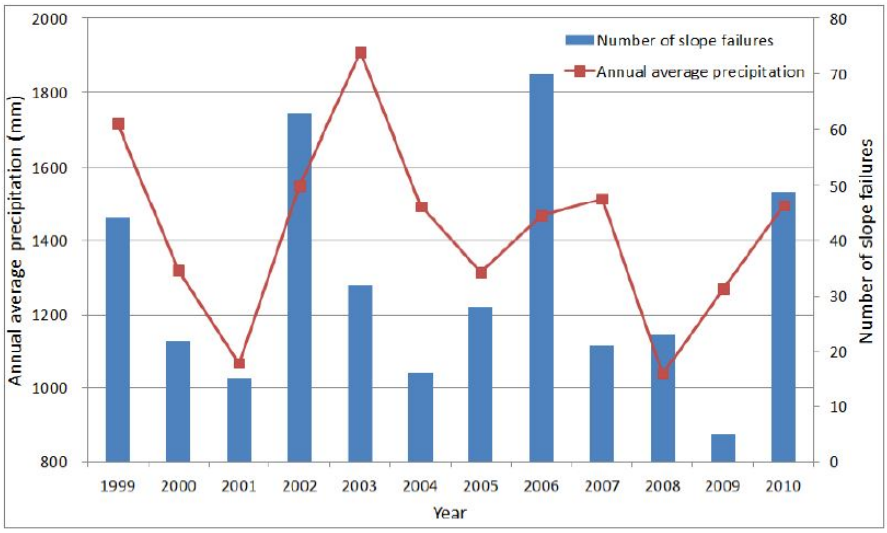

Figura 5.4: relazione tra precipitazioni annuali medie e il numero di frane per anno (Chan Kyung, 2016)

Mediamente gli eventi franosi in Corea del Sud causano 30 morti all'anno (figura 5.5) provocando danni a edifici, infrastrutture e beni per un valore stimato di circa 1000 milioni di dollari.

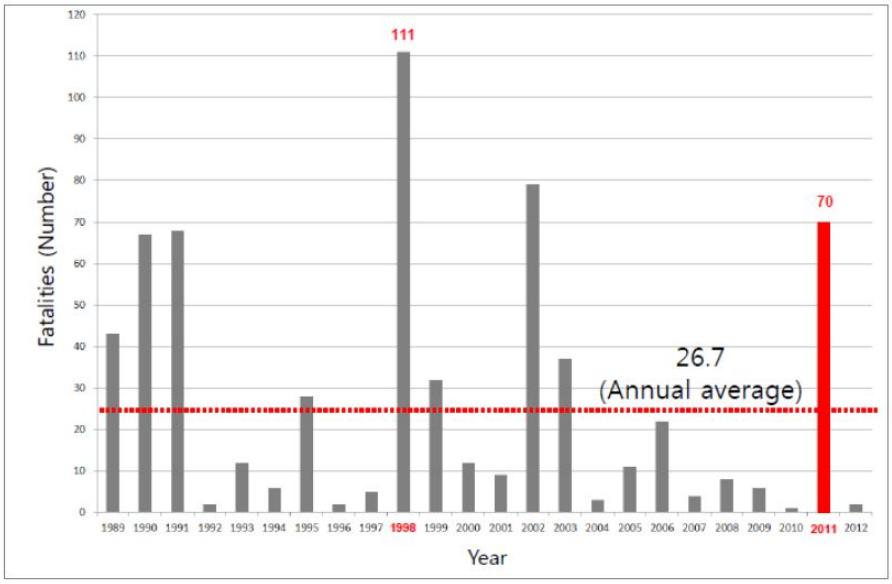

Figura 5.5: Numero di decessi a causa di fenomeni franosi in Corea del Sud dal 1089 al 2012 (Chan Kyung, 2016)

Diversi istituti hanno lavorato congiuntamente per studiare questi fenomeni e ampliare la conoscenza per la realizzazione di opere di difesa efficaci, e per tale motivo è stato eseguito l'esperimento in grande scale nella regione di Jinbu.

5.2 Descrizione del problema

Il sito in cui viene realizzato il test in grande scala oggetto di studio si trova nella Regione di Gangwon a Nord Est della Corea del Sud, nell'area Jinbu-Myeon di Pyeongchang.

Figura 5.6: Posizione Geografica del sito dove si svolgono i test nella Regione di Gangwon, Corea del Sud.

L'area designata per la prova si trova in una zona interessata da frequenti debris flow, infatti il bacino scelto ha caratteristiche di inclinazione, pendenza e morfologia del territorio, tipici dei fenomeni di colata detritica della Corea del Sud.

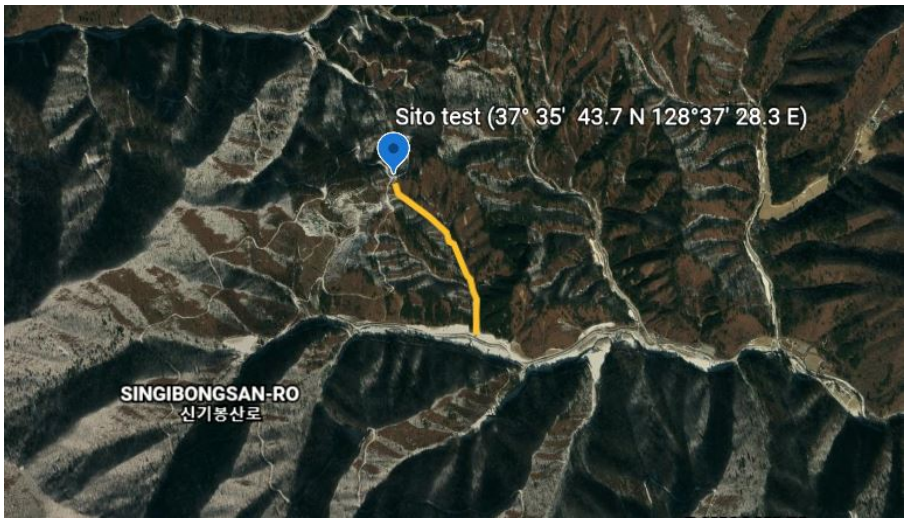

Figura 5.7: Inquadramento del sito dei test nella Regione di Gangwon, Corea del Sud.

Il test consiste nel riprodurre una colata detritica in grande scala utilizzando un cassone in calcestruzzo, posizionato sulla sommità del bacino scelto, contenente acqua e materiale detritico con una determinata distribuzione granulometrica. Una volta aperta la paratia del cassone che permette la fuoriuscita del materiale, si

vanno a misurare i parametri che caratterizzano la colata detritica lungo il percorso, tramite l'utilizzo di differenti strumenti di misurazione posizionati lungo il canale.

5.2.1 Preparazione del sito

Nella zona più alta del canale scelto, viene realizzata una cassa di rilascio in cemento armato, di dimensioni 12.6 m x 12.0 m x 6.4 m con un volume totale di 613.8 m^3 suddivisa in due camere grazie ad un setto, una per il contenimento del materiale solido pari a 346.3 m^3 e l'altra più arretrata per l'acqua con un volume di 267.5 m^3. Il setto centrale che separa i due volumi è realizzato in calcestruzzo armato e presenta un dreno nella parte inferiore che consente all'acuqa di filtrare all'interno della camera dei sedimenti. Il fondo della camera dei sedimenti ha un'inclinazione di 17° (Figura 5.8) per facilitare la fuoriuscita della massa, quest'ultima viene rilasciata nel canale tramite l'apertura di una paratia in acciaio azionata per mezzo di argani. Il fondo del canale vicino alla sommità del cassone è stato ricoperto con un geotessile ad alta resistenza per evitare l'eccessiva erosione del fondo nella fase iniziale di rilascio, e lungo lo sviluppo del canale sono state previste delle briglie di consolidamento in successione con il medesimo scopo, cioè limitare l'azione erosiva durante il moto di propagazione della massa. Inoltre sono stati introdotti degli elementi frangicolata per valutarne l'interazione con il flusso, ed infine a valle viene predisposta una piazza di deposito.

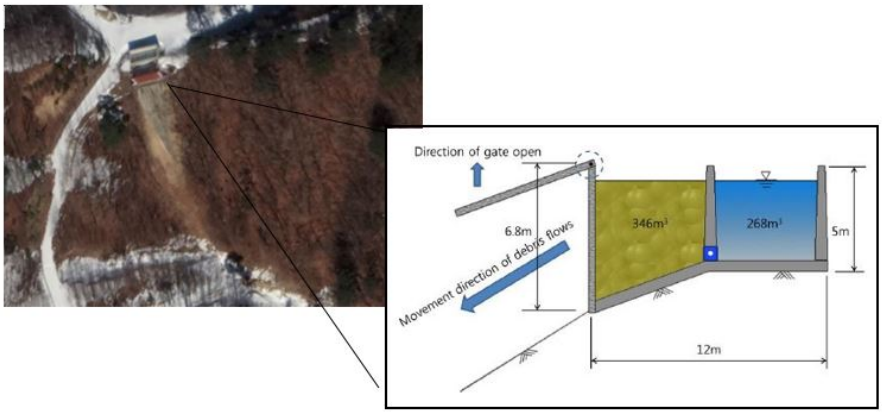

Figura 5.8: Vista dall'alto del cassone completato (Google Earth), sezione schematica del cassone (a destra)

Lungo il canale sono stati posizionati diversi strumenti di misurazione (celle piezometriche, celle di carico e sensori ad ultrasuoni), e videocamere per la ripresa del flusso. Inoltre in corrispondenza del cassone viene posto un pluviometro in modo da poter conoscere il quantitativo di pioggia caduta nei giorni precedenti ai test.
Prima di mettere in atto i test è stato necessario realizzare un modello digitale di elevazione del terreno (DEM) da poter confrontare poi sucessivamente ad un DEM ottenuto dopo il passaggio della colata. Per costruire il modello digitale del terreno i coreani hanno georeferenziato dei punti lungo l'incisione del canale del bacino sfruttando GPS e stazione totate (S.T.), poi su l'area d'interesse è stato eseguito un rilievo tramite LiDar, che restituisce una nuvola di punti di cui si

possono conoscere le coordinate geometriche e le quote, da queste informazioni è stato possibile risalire alla topografia del bacino prima della colata. Un volta eseguiti i test è stato ripetuto il rilevamento dei punti tramite Lidar che sono stati poi elaborati per ottenere un nuovo DEM dopo il passaggio del flusso, questo viene poi confrontato con quello ottenuto all'inizio per poter valutare le differenze. Lungo il canale sono stati presi come riferimento nella zona più a monte 9 punti di controllo e 10 punti di stazionamento GPS e LiDar (Figura 5.9)

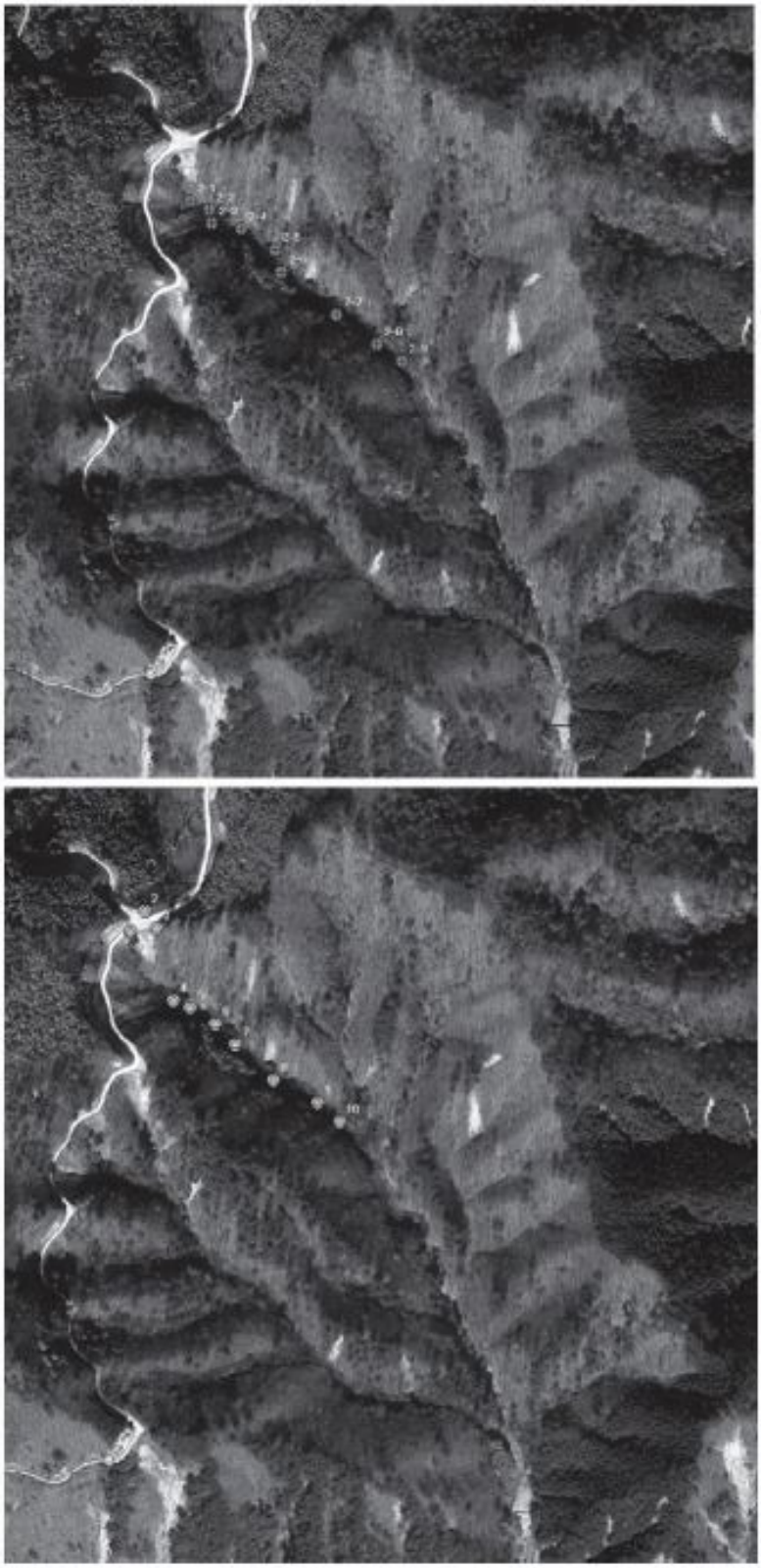

Figura 5.9: 9 punti di controllo (in alto), 10 punti GPS e stazioni Lidar (in basso) (Sangyeon et al., 2016)

La nuvola di punti ottenuta dal rilievo Lidar necessità di un'azione di filtraggio prima di poterla utilizzare, dato che presenta del rumore e della vegetazione che vanno ad alterare la reale topografia. A questo punto è stato utilizzato un software commerciale GIS con cui è stato possibile gestire i file Lidar filtrati in formato ASCII, con questo strumento si ricava il DEM in formato TIN (Triangulated Irregular Networks) con una risoluzione spaziale di 10 cm (Won et al.).
Di seguito vengono riportati i vari step necessari per ottenere il file finale del DEM dopo il processo di elaborazione appena descritto (Figura 5.11), e lo schema logico per l'analisi della colata artificiale seguito dai coreani (Figura 5.10).

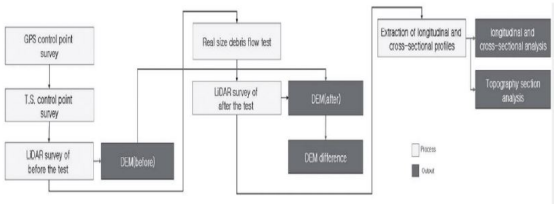

Figura 5.10: schema seguito dai coreani per l'analisi del debris flow artificiale (Sangyeon et al., 2016)

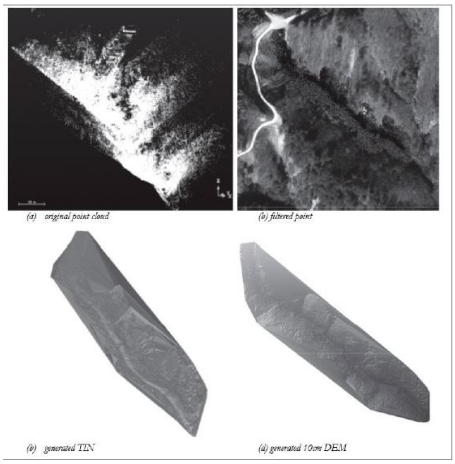

Figura 5.11: Step di processazione dei dati Lidar per ottenere il modello DEM:a) nuvola di punti originale, (b) punti filtrati, (c) generazione file TIN, (d) generazione DEM con risoluzione 10cm (Sangyeon et al., 2016)

Con i dati ottenuti fin qui si può andare ad analizzare il profilo longitudinale del canale e le relative caratteristiche geometriche (figura5.12). La lunghezza complessiva del canale è di 824.4 m, con una larghezza media di circa 8m e un valore massimo di quasi 12 m. La pendenza media del canale è di 10°, ma possiamo notare come nel tratto più a monte del bacino l'acclività media è più elevata, pari a 35°.

5.2.2 Descrizione dei test

L'esperimento per riprodurre la colata detritica in grande scala si compone di due test, per i quali vengono descritte le principali caratteristiche.

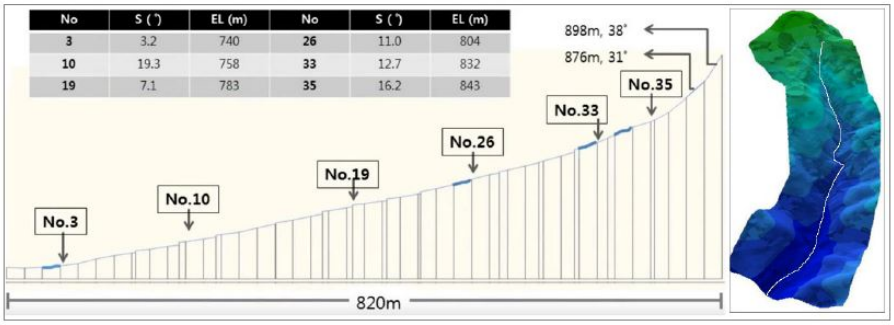

Figura 5.12: profilo longitudinale del canale (a sinistra) e immagine Lidar con linea di flusso tracciata in bianco (a destra), (Chan Kyung, 2016)

- **Test 1**:
  eseguito il 18 Settembre 2012, in seguito a 3 giorni di pioggia cumulativa pari a 100 mm. Il volume di detriti solidi utilizzato per questo test è pari a 255 m^3 con un peso di 357 tonnellate. Prima della prova il fondo del canale è stato bagnato utilizzando un elicottero, per riprodurre l'effetto delle piogge sul terreno . In questo test viene inserita una canaletta (drainage box) a circa metà della lunghezza del canale di dimensioni 1.2 m x 1.2 m (figura 5.13), sono state effettuate delle riprese aeree tramite un elicottero della KFS.

Figura 5.13: test 1, posizione delle videocamere (punti 1, 2, in corrispondenza della canaletta,e nella punto in cui avvene una brusca variazione di direzione), dei sensori (celle di carico, sensori a ultrasuoni, celle piezometriche), drainage box con sezione quadrata (Chan Kyung, 2016)

Di seguito vengono riportate alcune immagini dell'esperimento (test 1) in vari step temporali.

Figura 5.14: immagini dell'esecuzione del test 1 riprese dalla telecamera in posizione 1 (figura5.13)

- **Test 2**:
  eseguito il 9 Novembre 2012, prima del rilascio il canale è stato bagnato artificialmente tramite una condotta per 43 sec, inoltre vengono realizzati degli elementi frangi-colata in due punti del canale. Il volume di detriti solidi utilizzato per il test 2 è pari a 214 m^3 con un peso di 300 tonnellate. Lungo il canale viene incrementato il numero di videocamere per un totale di 12.

Figura 5.15: test 2, posizione delle videocamere punto 1 e 2, dei sensori (celle di carico su trave IPE, sensori a ultrasuoni, celle piezometriche), ed elementi frangicolata (3, 4, 5) (Chan Kyung, 2016)

La sostanziale differenza che si può notare con il test 1 è che in seguito al passaggio della prima colata la vegetazione è stata asportata lasciando il canale spoglio; questo effetto va a favorire l'erosione per due motivi: in primo luogo, la non presenza di radici di alberi e arbusti non contrasta l'azione meccanica esercitata dal passaggio degl flusso, in secondo luogo la presenza di verde favorisce l'assorbimento idrico, riducendo la quota parte di acqua presente nel terreno, che è la responsabile della riduzione delle tensioni efficaci e quindi della riduzione di resistenza del terreno. Le contromisure realizzate in due punti del canale (Figura 5.15, elementi in giallo) hanno caratteristiche tali da poter essere posizionate non solo nella zona finale di deposito, ma anche nella zona iniziale di innesco e trasporto favorendo la deposizione di materiale. Sono inoltre economiche e facilmente mantenibili, e svolgono un'azione dissipativa essendo in grado di assorbire l'energia dinamica del flusso. Queste opere hanno una particolare geometria in grado di catturare il materiale solido al loro interno, permettendo così di risalire alla densità del flusso della colata, come visibile dalla figura 5.16 sono stati utilizzate due geometrie in particolare, cilindrica (CL) e parallelepipeda (CB). In ultimo viene posizionata una trave IPE ad una progressiva di circa 20m più a valle rispetto al secondo elemento frangicolata (210m dal cassone di rilascio), dotata di appositi sensori (celle di carico) per la stima della forza d'impatto del flusso (Figura 5.17).

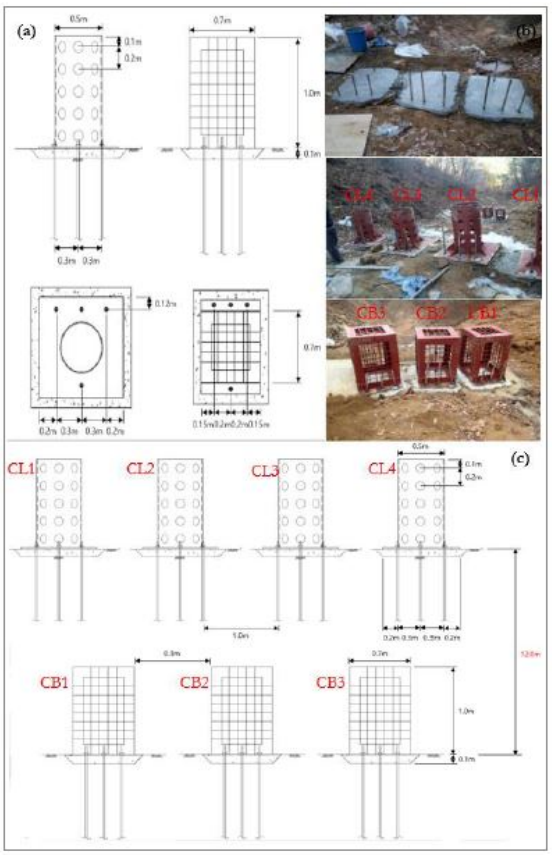

Figura 5.16: Schema geometrico (a) e fasi realizzative (b) delle contromisure

Figura 5.17: Trave IPE con celle di carico.

Di seguito vengono riportate alcune immagini dell'esperimento (test 2) in vari step temporali.

Figura 5.18: Immagini dell'esecuzione del test 2 riprese dalla telecamera in posizione 1 (figura5.13)

5.2.3 Risultati ottenuti dai test

Densità della colata detritica

La prima informazione ricavata dai coreani dai test è la densità del materiale. Sono risaliti ad essa sfruttando la particolare geometria cava dei baffle che ha consentito di trattenere la componente solida, la quale è stata prelevata dagli elementi della prima fila di contromisure (CL) dopo il passaggio del flusso, e analizzata come visibile in figura:

Figura 5.19: baffle colpiti dalla colata durante il test (in alto), materiale solido raccolto dal baffle (in basso).

I dati raccolti sono riportati nella tabella sottostante,

	CL1	CL2	CL3	CL4
Wet density (g/cm³)	2.25	2.23	2.18	2.19
Average	**2.21**			

Tabella 5.1: Valori di densità umida della debris flow campionati dai 4 buffle.

Il valore medio ottenuto è stato poi confrontato con i valori tipici di densità per le colate detritiche riportate da diversi autori (Tabella 5.2):

	Wet density (g/cm³)
Bugnion et al. (2012)	1.91
Chen & Young (2012)	2.14
Chen et al. (2012)	2.00-2.30
Luna et al. (2012)	1.6

Tabella 5.2: Valori tipici di densità secondo diversi autori.

	Natural density (g/cm³)	
Material	Bulk density*	Dry density
Sands and gravels : very loose	1.7-1.8	1.3-1.4
loose	1.8-1.9	1.4-1.5
medium dense	1.9-2.1	1.5-1.8
dense	2.0-2.2	1.7-2.0
very dense	2.2-2.3	2.0-2.2
Poorly-graded sands	1.7-1.9	1.3-1.5
Well-graded sands	1.8-2.3	1.4-2.2
Well-graded sand/gravel mixtures	1.9-2.3	1.5-2.2
Clays : unconsolidated muds	1.6-1.7	0.9-1.1
soft, open-structured	1.7-1.9	1.1-1.4
typical, normally consolidated	1.8-2.2	1.3-1.9
Boulder clays (overconsolidated)	2.0-2.4	1.7-2.2
Red tropical soils	1.7-2.1	1.3-1.8

* Assumes saturated or nearly saturated conditions

Tabella 5.3: Valori tipici di densità naturale (Carter and Bentley, 1991)

Distribuzione granulometrica della colata detritica

La classificazione granulometrica adottata per individuare la composizione della colata detritica è la UCS (Unified soil Classification System). Questa classificazione identifica innanzitutto due classi granulometriche principali, terreni a grana grossa e terreni a grana fine. In generale, il materiale viene sottoposto ad una vagliature attraverso setacci (maglia quadrata) o crivelli (maglia circolare) con dimensioni standard via via decrescenti, impilati l'uno sull'altro. Al termine dell'operazione si valuta la percentuale in peso di materiale trattenuto su ogni vaglio, e in base a questo si determina la classe granulometrica del materiale

- *Terreni a grana grossa*: per assegnare un terreno a questa classe occorre che più del 50% del materiale abbia una granulometria maggiore della dimensione del setaccio No.200 ASTM (0.075mm). All'interno di questa classe troviamo due sottoclassi (Figura 5.20), e a seconda se la percentuale in peso di trattenuto al vaglio No.4 ASTM (4.76mm) supera il 50% o meno, distinguiamo la ghiaia dalla sabbia. Un'ulteriore suddivisione all'interno delle sottoclassi è funzione della percentuale di trattenuto fine stabilita dal vaglio No. 40 (0.42mm).

- *Terreni a grana fine*: in questo caso la frazione di trattenuto al vaglio No.200 deve essere in termini di peso inferiore al 50% del totale. I terreni a grana fine

non vengono analizzati come i precedenti tramite vagliatura, ma subiscono un processo di sedimentazione in cui la parte solida si separà dall'acqua ed è possibile stimare la dimensione granulometrica del materiale fine (legge di Stokes) andando a misurare per diversi intervalli di tempo la densità della sospensione, e conoscendo il peso specifico dei grani si può quindi ottenere il diametro equivalente e la percentuale in peso delle particelle sospese che non sono ancora precipitate.
Per la classificazione dei terreni a grana fine inoltre è fondamentale considerare i limiti di consistenza o limiti di Atterberg, infatti le proprietà di questi terreni variano a seconda del contenuto d'acqua.

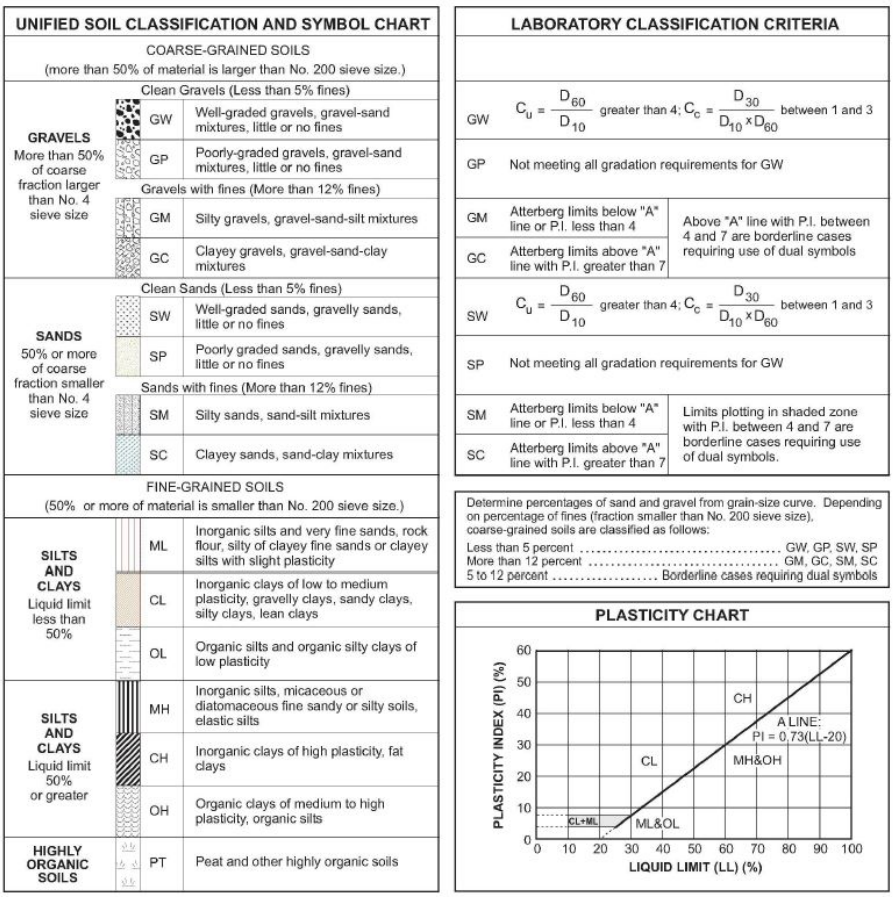

Figura 5.20: Classificazione dei terreni secondo il sistema UCS

Nell'esperimento in grande scala svoltosi a Jinbu è stato eseguito un confronto tra la composizione granulometrica del materiale iniziale, posto all'interno del cassone e il materiale raccolto dalla prima fila di contromisure (CL) posizionate lungo il canale, allo scopo di valutare l'effetto dell'erosione sulla composizione della massa fluida. Di seguito sono riportate le due curve granulometriche ottenute tramite classificazione UCS:

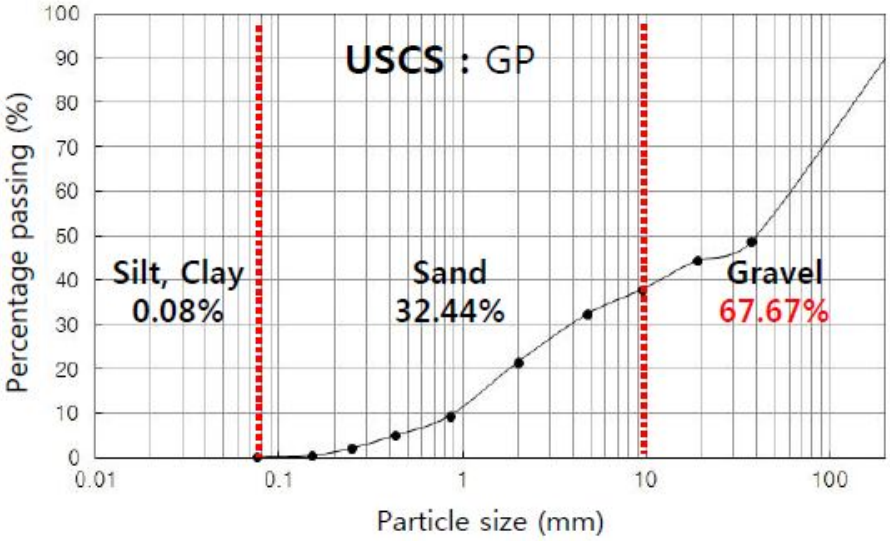

Figura 5.21: Curva granulometrica del materiale all'interno del cassone (Chan Kyung, 2016)

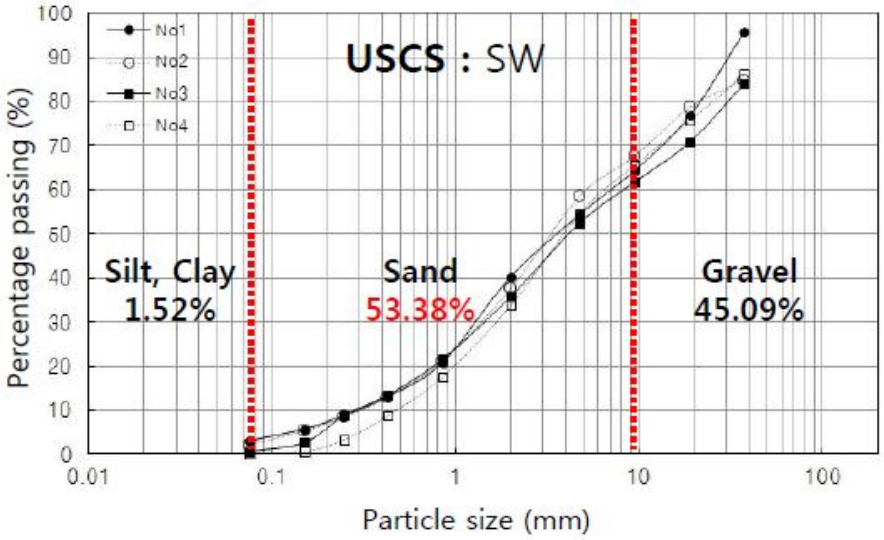

Figura 5.22: Curva granulometrica del materiale all'interno della prima fila di baffles (Chan Kyung, 2016)

Come si può vedere dalla figura 5.21, inizialmente il materiale all'interno della cassa di rilascio può essere classificato come una ghiaia o mix di ghiaia e sabbia mal assortita, con poco fine o del tutto assente (GP); mentre il materiale solido raccolto all'interno dei baffles risulta essere una sabbia o una sabbia ghiaiosa ben assortita con contenuto di fine minore del 5% (SW). Quindi l'effetto dell'erosione sulla granulometria porta il passaggio da un materiale con le caratteristiche di una ghiaia, ad un materiale prevalentemente sabbioso.
In aggiunta si riporta un grafico (Figura 5.23) in cui vengono classificati i materiali dei due test eseguiti secondo un sistema UNI EN ISO 14688-2, e vengono confrontati con i materiali relativi a diverse colate detritiche registrate nel mondo.

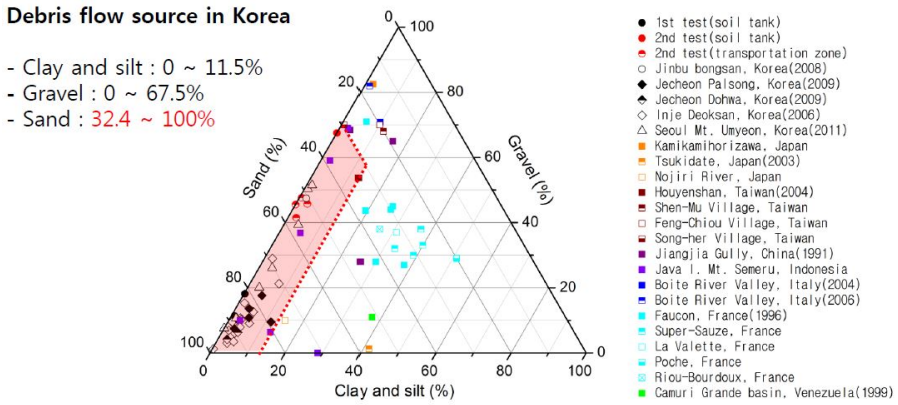

Figura 5.23: classificazione UNI EN ISO 14688-2 (Chan Kyung, 2016)

Rilevamenti Lidar

Grazie all'impiego del Lidar è stato possibile rilevare i cambiamenti che ha subito la topografia dopo il passaggio della colata detritica oggetto dell'esperimento. In particolare, non è stato analizzato l'intero canale di 824 m, ma solamente i primi 300m dopo essere stati suddivisi in intervalli da 10 m (Figura 5.24). Con i dati Lidar è stato realizzato un modello DEM con risoluzione di 10 cm dopo una serie di operazioni descritte in precedenza.

Con riferimento al primo test nella Figura 5.26 si riportano l'andamento lungo la linea di flusso del canale per i primi 300 m, le quote di elevazione (Z) prima e dopo il test. Si può notare come per il tratto iniziale fino a 60m lungo la progressiva dal cassone, l'erosione può essere considerata inferiore al metro nonostante l'acclività maggiore del tratto iniziale, questo per la presenza del geotessile posizionato lungo il canale fino a tale distanza, che riduce notevolmente l'azione erosiva della colata. Da 60m a 210m notiamo un sostanziale aumento dell'erosione dell'ordine dei 2m con il picco massimo a 140 m pari a 2.23 m.

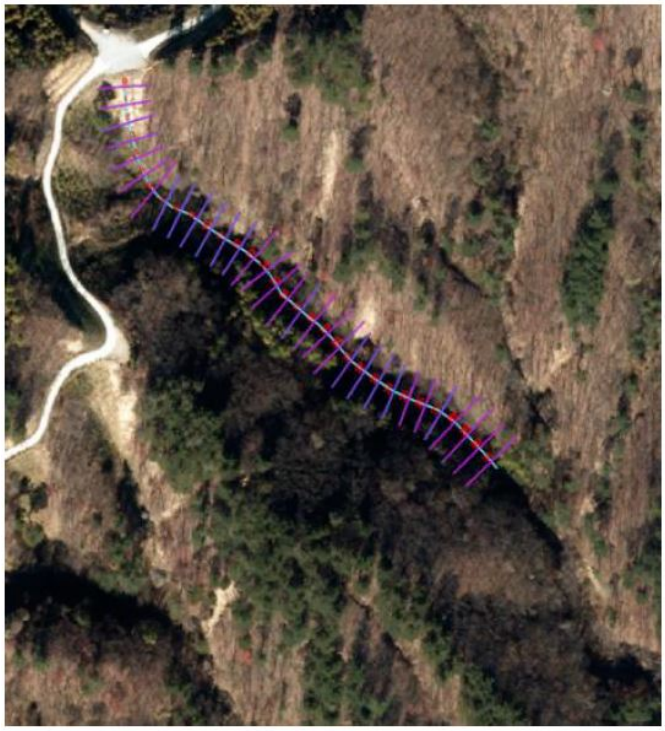

Figura 5.24: Foto aerea con evidenziate la sezione longitudinale e le sezioni trasversali.

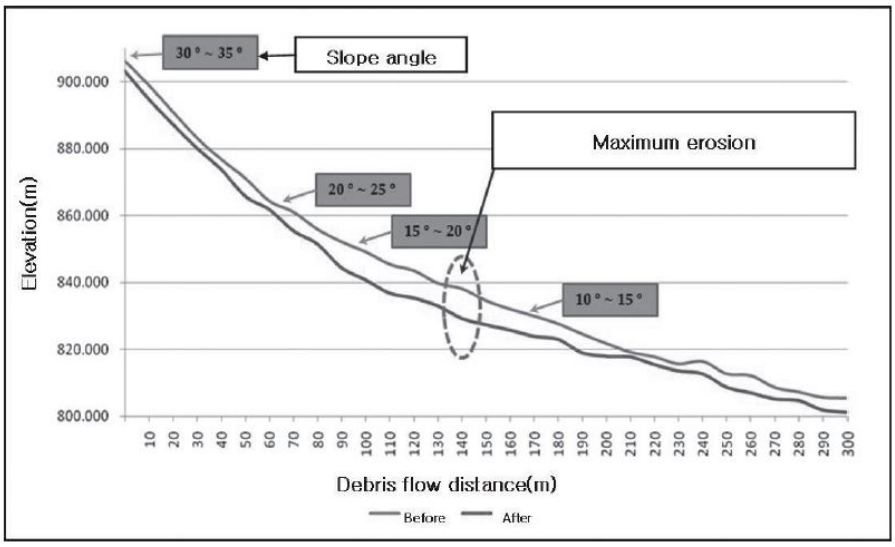

Figura 5.25: Variazione delle quote lungo la sezione longitudinale prima e dopo la colata (Sangyeon et al., 2016)

Vengono riportate delle sezioni trasversali significative lungo lo sviluppo del canale, che mostrano come variano le quote lungo la progressiva dopo il transito della colata. Se si osserva il canale da valle verso monte, si nota come nel primo tratto dove è presente il geotessile (figura 5.26 a), l'erosione è più spiccata per la sponda sinistra piuttosto che per la destra. Superati i 60 m (figura 5.26 b) l'erosione inverte l'azione sulla sponda opposta a causa di un netto cambio di direzione; scendendo

verso valle l'effetto dell'erosione agisce in modo pressochè uguale su entrambe le sponde; mentre la larghezza del canale resta mediamente sempre nell'intorno dei 10 m.

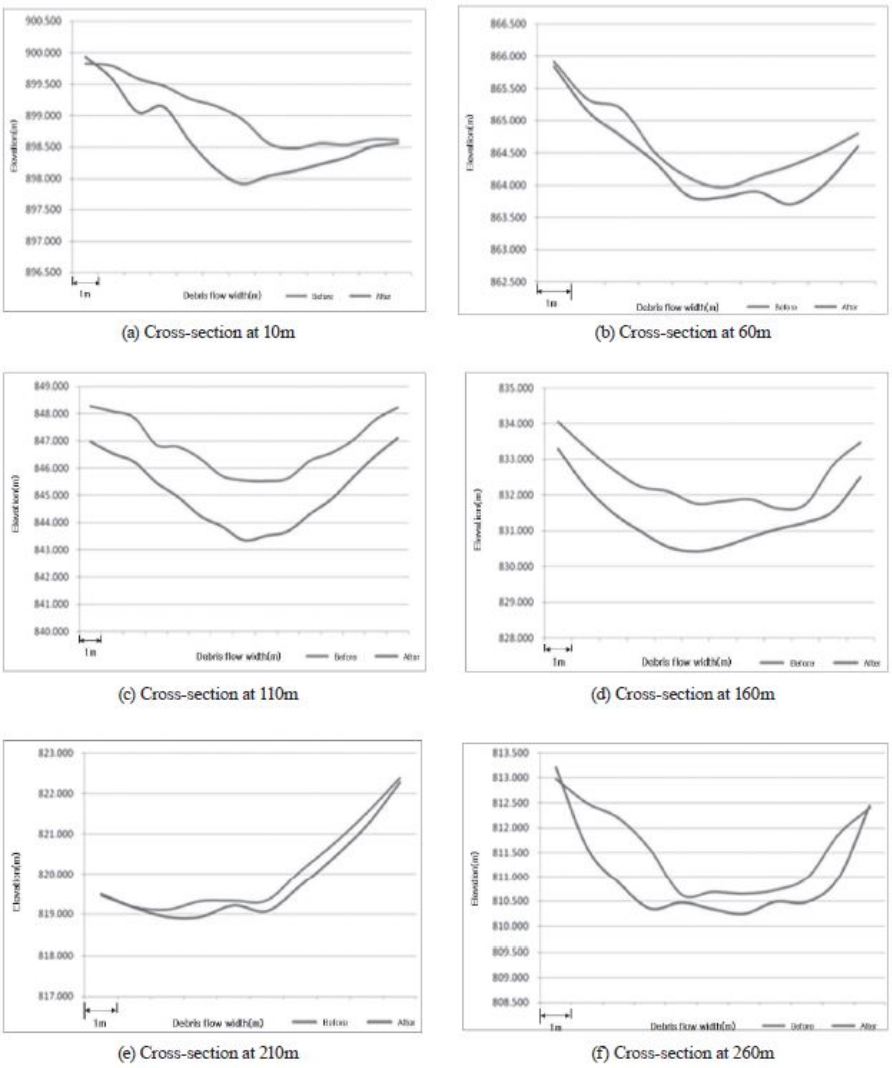

Figura 5.26: Variazione delle quote lungo sei sezione trasversali significative prima e dopo la colata (Sangyeon et al., 2016)

Riassumendo vediamo come dalla sovrapposizione dei dati Lidar con la vista aerea l'erosione si concentra dagli 80m ai 200m rispetto al cassone, con un massimo nell'intorno dei 140m per via del brusco cambio di pendenza che porta il flusso di detriti ad impattare con maggior violenza sul fondo del canale.

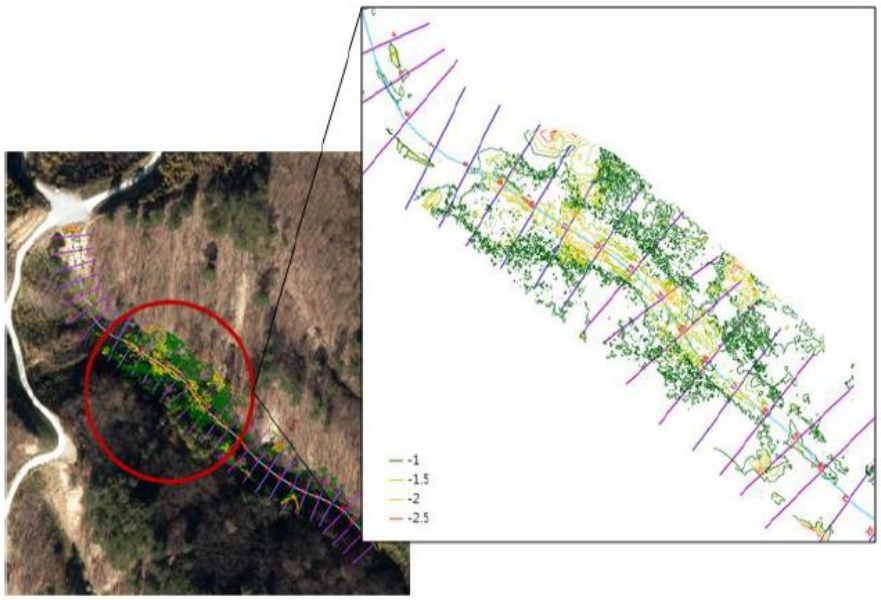

Figura 5.27: sovrapposizione dei dati topografici di erosione-deposizione con vista aerea(Chan Kyung, 2016)

Di seguito vengono riportate le variazioni di altezza topografica rispetto alle condizioni iniziali lungo il canale per i due test:

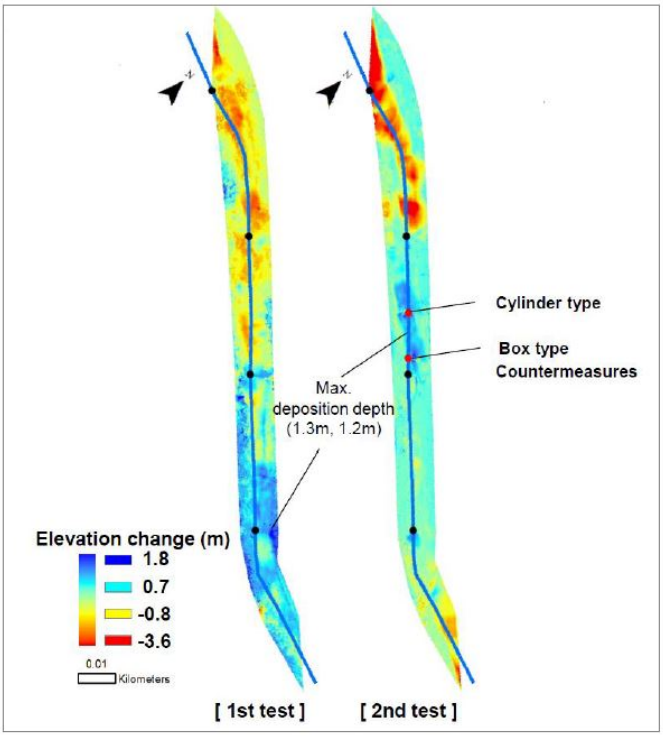

Figura 5.28: Variazione altezza topografica lungo il canale dopo il test 1 e il test 2 (Chan Kyung, 2016)

.

Valutazione delle altezze e velocità del flusso

Per la stima delle velocità del debris flow vengono adottati due metodi, la stima diretta tramite le registrazioni video delle telecamere poste lungo il canale (Figura 5.29) e la stima indiretta basata sul tempo di arrivo. Entrambi i metodi di stima vengono applicati per il test 2 al fine di confrontare i valori ottenuti. Come è possibile vedere dalla Figura 5.30 la curva tratteggiata si scosta di poco dalla curva continua, per cui è possibile sostenere che la velocità non è influenzata dal metodo di stima.

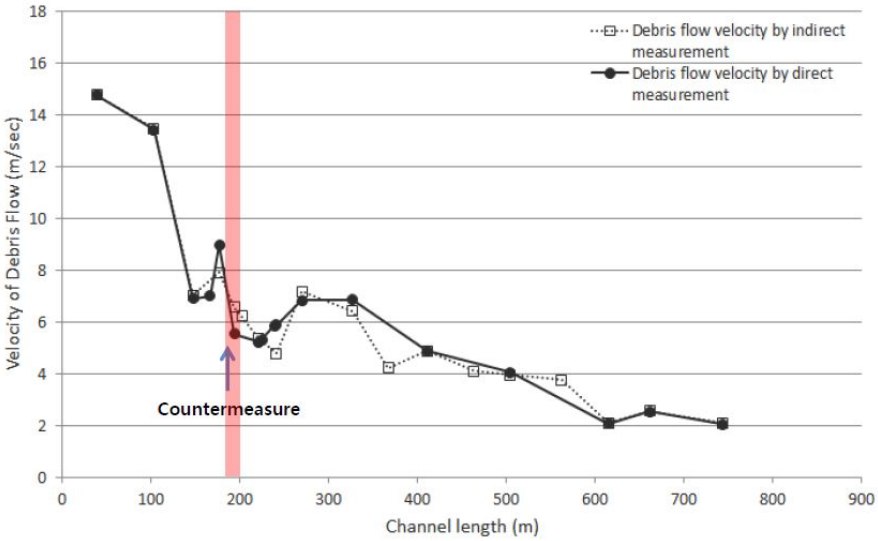

Figura 5.29: Stima della velocità per il test 2 con metodo diretto e metodo indiretto (Chan Kyung, 2016)

.

Nella figura sottostante sono riportati i valori di velocità per il test 1 e il test 2

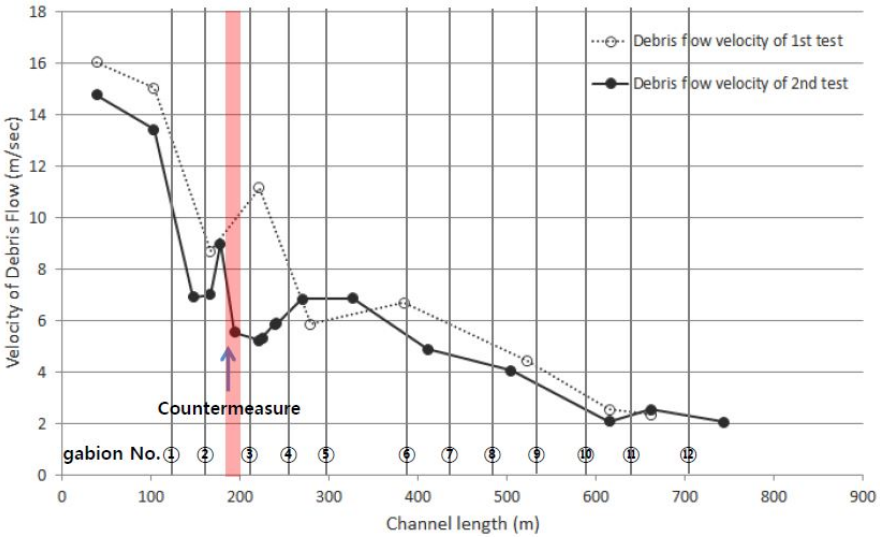

Figura 5.30: Confronto delle velocità test 1 e test 2 (Chan Kyung, 2016)

.

Allo stesso modo vengono confrontate le altezze medie di flusso del primo e del secondo test.

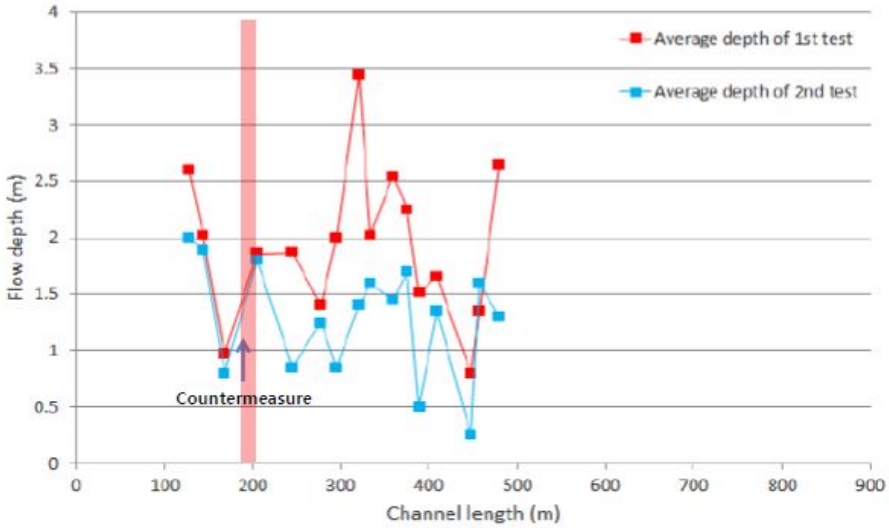

Figura 5.31: Confronto altezza del flusso media per il test 1 e il test 2 (Chan Kyung, 2016)

.

Dall'andamento delle velocità così come per le altezze del flusso si osserva come per il test 1 i valori siano maggiori rispetto al test 2, questo principalmente per via della quantità di materiale impiegata nel primo test ($600m^3$), superiore rispetto al secondo ($400m^3$). Analoga considerazione viene fatta per le altezze medie raggiunte dalla colata detritica. Nel test 2 inoltre, vengono realizzate due file di contromisure evidenziate nel grafico dalla banda rosa (Figura 5.31), poste nel tratto in cui il flusso dopo aver subito una forte decelerazione tende a riaccelerare; la presenza dei baffles limita la velocità del flusso e di conseguenza porta ad un aumento dell'altezza della colata, infatti le altezze medie in corrispondenza degli elementi frangicolata raggiunge quella del test 1 nonostante il minor quantitativo di materiale in gioco. L'effetto dei baffle possiamo vedere essere circoscritto nell'intorno dell'opera, non andando ad interessare il flusso più a valle. Infine si può stabilire dai dati registrati, che le birglie di consolidamento realizzate lungo il canale non hanno influito sulla dinamica del flusso.
I dati di velocità e altezze fin qui analizzati possono essere soggetti ad una notevole incertezza, infatti alcuni valori di altezza possono essere stati alterati da schizzi di flusso ad esempio, che hanno incrementato il reale spessore della colata detritica, stesso discorso va fatto per le velocità, le cui variazioni possono essere imputabili ai diversi volumi di rilascio o all'interazione con gli elementi frangicolata; purtroppo resta complicato verificarne l'assoluta attendibilità in quanto i dati ufficiali non sono stati pubblicati.

Calcolo della forza d'impatto
La valutazione della forza d'impatto della colata detritica viene fatta tramite una trave IPE di 2m, infissa nel terreno per 1.2m, sulla quale sono montate due celle di carico.
La stima della forza d'impatto può essere effettuata con due diversi approcci:

- *momento flettente ammissibile della trave*, quando il momento sollecitante supera il momento ammissibile della trave questa plasticizza. In questo caso il momento flettente ammissibile della trave (momento di plasticizzazione) è pari a 10.71 KN, mentre l'impatto del flusso sulla trave ha generato una sollecitazione maggiore, pari a 26.78 KN;

- *equazioni teorico-empiriche*, ottenute in seguito ad esperimenti in piccola scala,

$$F = A\rho\nu^2 \tag{5.1}$$

$$F = C_p A\rho\nu^2 \tag{5.2}$$

$$F = \frac{C_D}{2} A\rho\nu^2 \tag{5.3}$$

		F [KN]
Hungr et al., 1984	$F = A\rho\nu^2$	6.15
Bugnion et al., 2012	$F = C_p A\rho\nu^2$	3.69
Holzinger and Hubl, 2004	$F = C_D A\rho\nu^2$	12.98

Tabella 5.4: Stima della forza d'impatto con equazioni empiriche secondo diversi autori.

Le relazioni teorico-empiriche tendono a sovrastimare il valore della forza d'impatto fino al doppio della forza d'impatto media (Scottonand Deganutt,1997).

Capitolo 6

Modellazione numerica del caso di studio

Per realizzare un modello numerico del continuo in scala reale e validare un determinato programma di calcolo numerico è fondamentale definire tre punti:

- topografia (geometria del problema);

- comportamento reologico dei materiali in gioco;

- analisi comparativa dei dati ottenuti dai casi di studio (Benchmarking).

Per quanto riguarda la topografia si richiede la realizzazione di un modello digitale del terreno DTM, dove deve essere definito anche il volume di innesco. La legge reologica va scelta in base al comportamento che si presume possa avere il materiale, in questo caso viene presa come riferimento la legge Attritiva di Voellmy descritta nel Capitolo 4. Infine occorre valutare attentamente la qualità dei dati di riferimento, per questo bisonoga conoscere più dettagliatamente possibile aspetti come: le caratteristiche morfologiche del sito dove i dati sono stati ottenuti, le modalità di acquisizione del dato, le geometrie del problema (es: canale, cassone, celle di carico, ecc.). Un'ultima osservazione va posta sulla qualità dei dati di input in quanto questi influenzeranno poi i dati di output.

6.0.1 Descrizione del modello topografico utilizzato

Come abbiamo visto nei precedenti capitoli, per poter realizzare un modello numerico del continuo tramite il programma di calcolo Rash^{3D} dobbiamo partire dalla definizione di una maglia di punti. Questi devono rappresentare la topografia del problema, dove ad ogni nodo della maglia vengono attribuite le coordinate topografiche (X,Y,Z). Per tanto si è iniziato da un file Autocad georeferenziato, dove sono rappresentate le curve di livello del bacino oggetto dell'esperimento in Corea del Sud (Figura 5.32) con passo 5m.

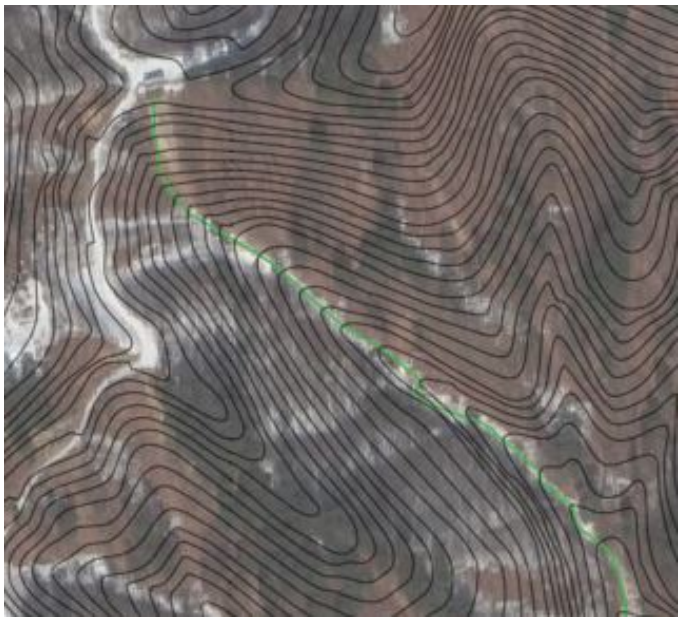

Figura 6.1: Curve di livello del bacino con spaziatura 5m (QGIS)

Il file Autocad delle curve di livello è stato elaborato con il software gis QGIS (Versione 3.12.3). Dallo shapefile delle curve di livello è stata eseguita un'interpolazione TIN (Triangular Irregular Network) ottenendo così un file raster (Figura 5.33), inizialmente con pixel della dimensione di 1m x 1m, da cui è stata poi estratta la maglia regolare di punti di passo 1m x 1m (la maglia dei punti dopo la calibrazione del modello verrà raffittita nelle zone d'interesse, per ottenere dei dati di output maggiormente dettagliati e non avere così fin da subito un onere computazionale elevato).

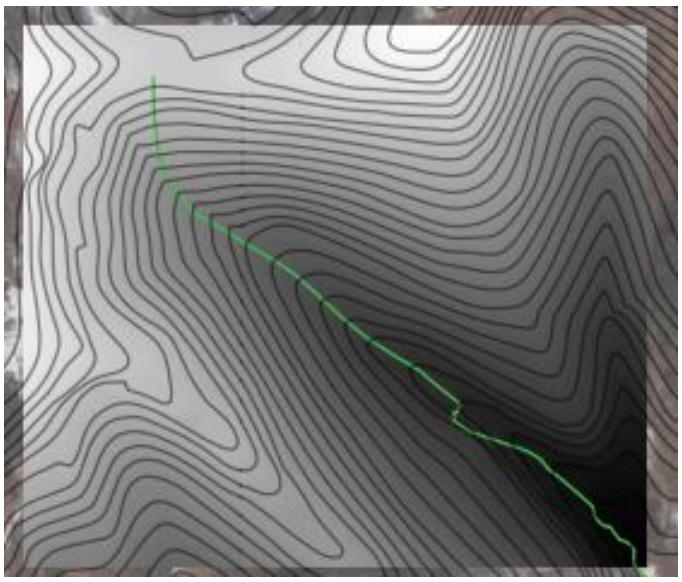

Figura 6.2: Raster delle curve di livello del bacino con spaziatura 5m (QGIS)

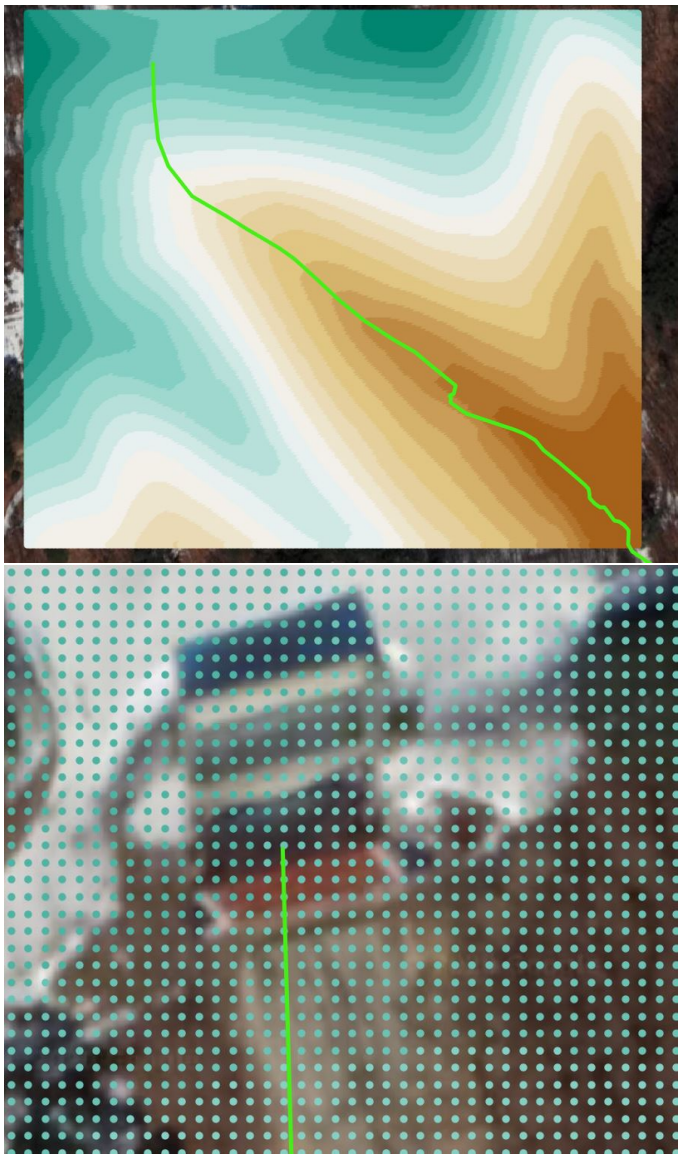

Figura 6.3: Griglia di punti con spaziatura 1m (QGIS)

Per quanto riguarda la modellazione della cassa di rilascio e del volume d'innesco (descritti nel paragrafo 5.2.2 e 5.2.3), si è provveduto alzando i valori delle quote Z dei punti nell'intorno del cassone di 15 m (Figura 5.35) in modo da simulare le pareti della cassa e contenere il materiale d'innesco del flusso, il quale è stato considerato andando ad inserire l'informazione H, che rappresenta il valore iniziale di altezza di materiale mobile, per ogni punto presente nella maglia, e in corrispondenza dell'interno del cassone è stato assegnato un valore diverso da zero in funzione del volume di materiale da simulare.

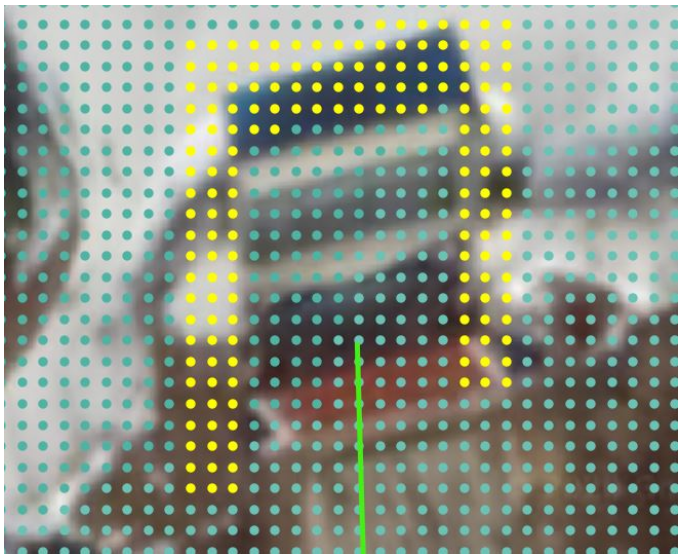

Figura 6.4: Modellazione cassone (QGIS)

6.0.2 Fase di calibrazione del modello numerico

Una volta ottenuto il file .txt della maglia di punti, contenente le informazioni relative alle coordinate spaziale dei punti (X,Y), le quote (Z), e l'entità del volume di rilascio (H), è stato utilizzato per creare una mesh agli elementi finiti con griglia triangolare tramite MeshGen da inserire nel calcolatore Rash^{3D}.
Quindi ricavata la mesh si è proceduto con la fase preliminare di calibrazione del modello numerico, andando ad modificare all'interno del file input (data.txt) in Rash^{3D}, i parametri relativi all'angolo di attrito del terreno (φ) e alla turbolenza (θ).

I dati utilizzati per la calibrazione del modello sono riassunti nella tabella sottostante:

Voellmy	Calib 1	Calib 2	Calib 3	Calib 4	Calib 5	Calib 6	Calib 7	Calib 8	Calib 9	Calib 10
φ [°]	5.7	7	5.7	5.7	5.7	12	12	11	9	10.5
θ [°]	300	500	500	1000	500	2000	2200	2500	2000	2500

Parametri Erosione	Calib 1	Calib 2	Calib 3	Calib 4	Calib 5	Calib 6	Calib 7	Calib 8	Calib 9	Calib 10
Vel er.	0.002	0.002	0.002	0.002	0.005	0.002	0.002	0.0015	0.001	0.0015
Dmax er. [m]	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Vol max er. [m³]	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
volume materiale tot. [m³]	700	640	830	1150	2700	900	900	800	900	1000

Tabella 6.1: Valori dei parametri relativi alla reologia e all'erosione impiegati per la calibrazione del modello numerico.

In questa fase preliminare il contributo dell'erosione viene trascurato, e i risultati ottenuti i quali vengono confrontati con i dati disponibili sono descritti di seguito.

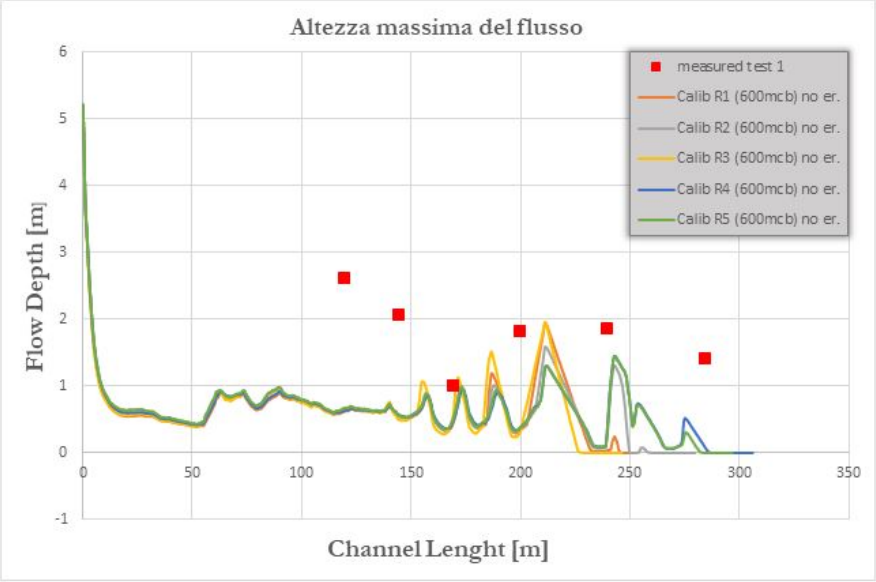

Figura 6.5: Altezza massima del flusso, calibrazione preliminare (senza erosione)

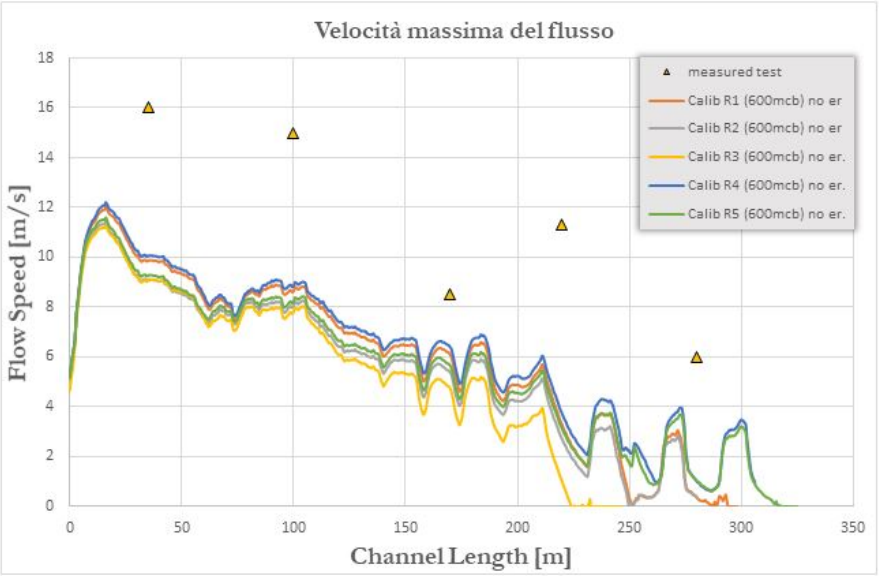

Figura 6.6: Velocità massima del flusso, calibrazione preliminare (senza erosione)

Come è possibile notare dal grafico della velocità massima del flusso (Figura 5.37) non si è ancora in grado di calibrare adeguatamente il modello senza tener conto del contributo dell'erosione.

Nel secondo step della fase di calibrazione, si va ad affinare il modello numerico realizzato tenendo conto in questo caso anche del contributo dell'erosione. Nei file di input di Rash^{3D} viene aggiunto, oltre al file maill2.amdba che contiene le coordinate x e y dei punti della mesh, il file z2.bb e h2.bb che contengono rispettivamente le quote z e le altezze del materiale nei punti in cui si innesca il flusso; il file e2.bb dove vengono indicati: i punti in cui c'è erosione, la velocità di erosione (Eq. 4.6)

in questi punti e la profondità massima erodibile. Per via della presenza del geotessile nel primo tratto del canale (circa 60m), come indicato nella descrizione dei test, è stato simulato il suo effetto, e quindi l'assenza di erosione in quel tratto, assegnando ai punti della mesh il valore 0, a differenza degli altri punti lungo il canale dove è stato assegnato un valore unitario; per quanto riguarda la profondità massima erodibile è stato assunto un valore di 4m come riscontrato nei test in Corea del Sud; invece la velocità di erosione è stata variata durante i test di calibrazione per ottenere un risultato quanto più vicino possibile ai dati di altezza massima e velocità massima del flusso registrati negli esperimenti in grande scala.
Nei grafici sottostanti vengono descritti i test di calibrazione eseguiti considerando l'altezza massima raggiunta dal flusso (Figura 5.32) e la velocità massima del flusso (Figura 5.33).

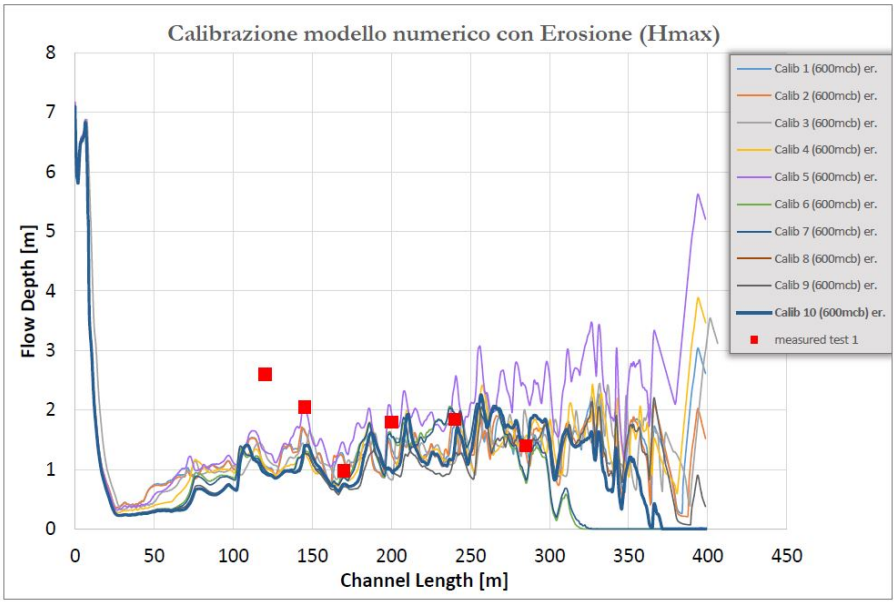

Figura 6.7: Test di calibrazione del modello numerico tenendo conto dell'effetto dell'erosione (Hmax).

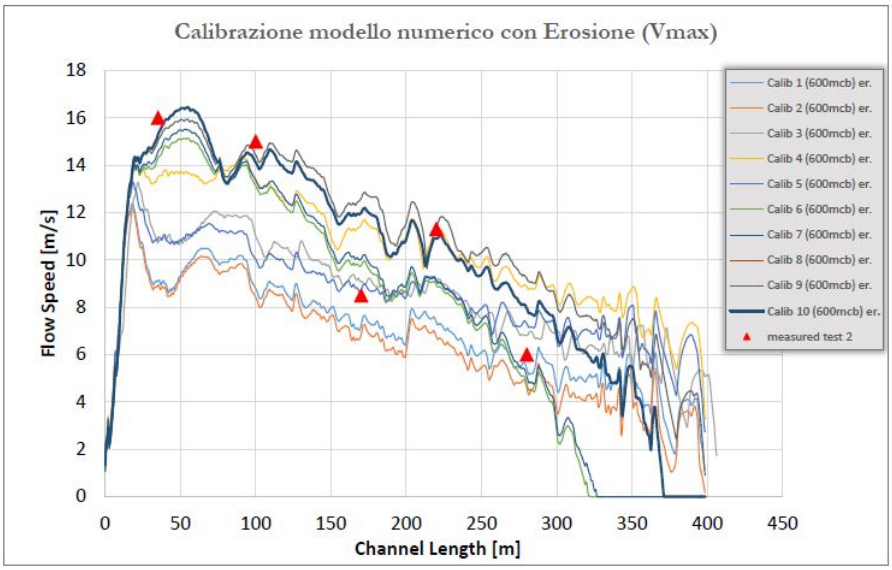

Figura 6.8: Test di calibrazione del modello numerico tenendo conto dell'effetto dell'erosione (Vmax).

Come si può notare dal grafico dell'altezza massima del flusso, così come dal grafico della velocità massima raggiunta dal materiale durante la discesa, si ha una buona corrispondenza delle simulazioni con i dati reali nel tratto iniziale e finale del canale, mentre non si ha un netto riscontro con i dati misurati nella parte centrale, questo può essere imputabile a diversi fattori, come alterazioni nelle misurazioni della reale altezza del flusso provocate da schizzi di materiale, invece per quanto riguarda la velocità va posta attenzione su come il calcolatore Rash^{3D} ottiene questo valore di output. Infatti il dato finale di velocità in ogni punto della mesh è ottenuto combinando il valore di velocità lungo la direzione x e la direzione y, non tenendo in considerazione il valore lungo z, in quanto il contributo sarebbe minimo rispetto agli altri due termini e l'errore risulterebbe trascurabile. Quando però, vi è un brusco cambio di pendenza, come nel caso in questione (circa 180m dal cassone), l'errore di approssimazione rispetto al valore reale risulta molto più marcato, e per questo, probabilmente non si ha un'ottima corrispondenza dei dati in quella zona.

Mettendo a confronto il grafico delle altezze con il grafico delle velocità possiamo vedere come alle zone di picco della velocità corrisponde ad un valore di minimo delle altezze e viceversa, questo perchè dove la velocità è più alta il flusso scorre più rapidamente e quindi ha uno spessore (altezza del materiale) minore.
Un'ulteriore considerazione va fatta riguardo la legge reologica scelta e ai parametri settati per la calibrazione, in particolare l'angolo di attrito φ e la turbolenza θ. La legge reologica è stata assunta a priori in seguito ad un precedente studio svolto da Nigro (2019), riguardante gli stessi test in scala reale avvenuti in Corea del Sud. Nel precedente studio è stata convalidata la legge reologica Voellmy come la più adatta a descrivere il comportamento del materiale in questa particolare condizione. Per quanto riguarda i parametri reologici, possiamo notare dai due grafici (Figura 5.38 e Figura 5.39) come al crescere dell'angolo d'attrito del materiale (φ), il flusso

raggiunge altezze più elevate, e di conseguenza velocità basse, mentre riguardo la distanza percorsa, la colata si arresta prima rispetto ad un angolo di attrito più basso. Aumentando invece il valore dell'angolo di turbolenza (θ) si va a diminuire la turbolenza del flusso, di fatto aumentandone il valore si tende a passare da un moto turbolento ad uno laminare che dissipa meno energia.

In definitiva è stato assunto come test di riferimento che meglio descrive i valori misurati negli esperimenti in grande scala, con cui sono stati eseguiti i successivi test per le opere di difesa, il test *"Calib 10 (600mcb) er."* (Figura 5.32 Figura 5.33, curva blu) dove sono stati utilizzati i seguenti parametri:
- $\varphi = 10.5°$
- $\theta = 2500$
- Velocità erosione $E_s = 0.0015$
- Massima profondità erodibile $D_{MAX} = 4m$

In particolare dal test di riferimento sono stati ricavati i seguenti grafici, che vengono confrontati con i risultati del test 1 e del test 2 eseguiti in Corea del Sud.

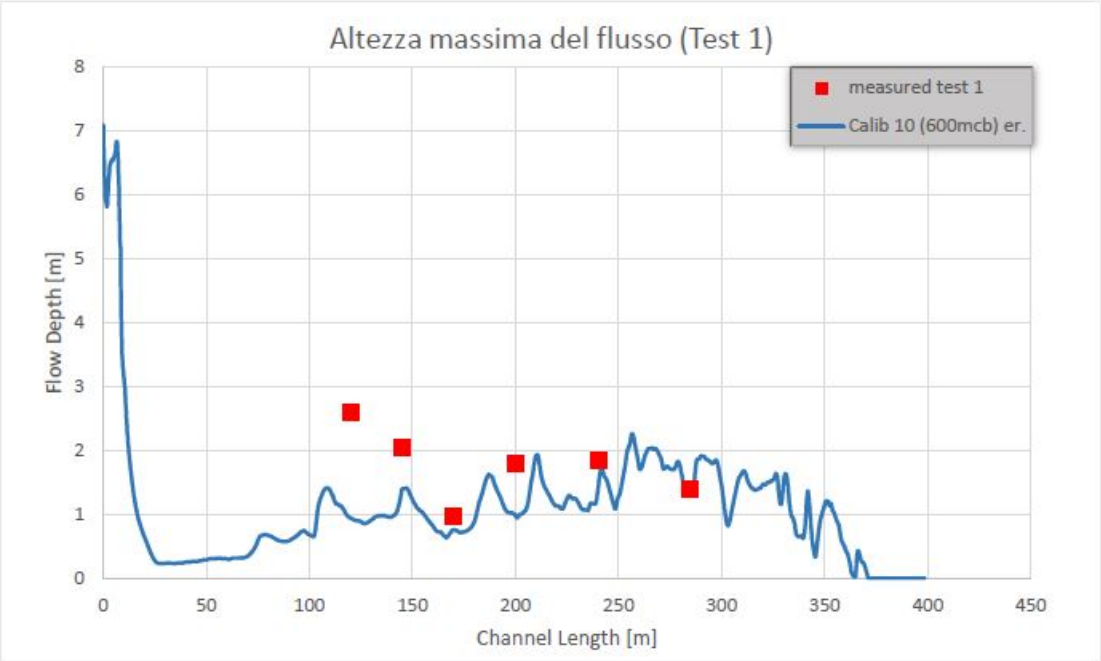

Figura 6.9: Altezza massima del flusso, simulazione test 1

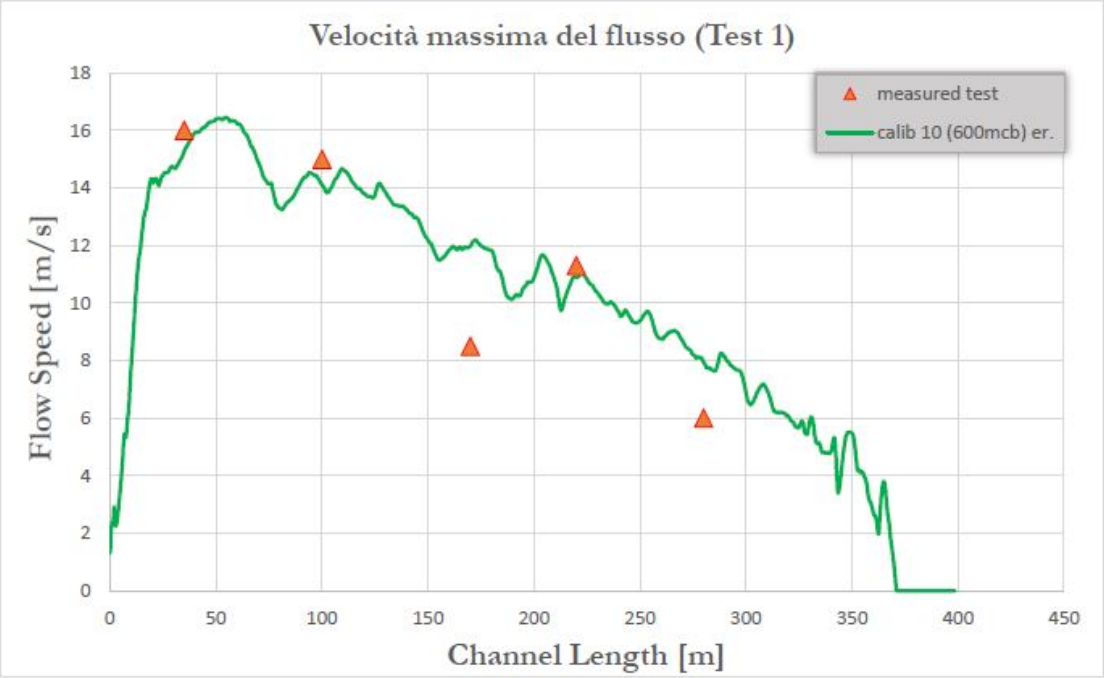

Figura 6.10: Velocità massima del flusso, simulazione test 1

Il grafico (Figura 5.42) descrive la massima profondità di erosione DH_{ER} causata dalla colata detritica; si può notare come il fenomeno dell'erosione sia nullo per il primo tratto (circa 60 m), in accordo con la presenza del geotessile, mentre è massimo nel centro del canale, superiore a 0,3 m. In corrispondenza del brusco cambio di pendenza (circa 180 m) si può notare come la profondità erosa passi rapidamente da un picco minimo ad un massimo, questo perchè il flusso va ad impattare energicamente il letto del canale dove si registra una variazione marcata dell'inclinazione del piano di scivolamento.
Nel grafico di Figura 5.43 viene riportata la variazione delle quote lungo la linea di flusso del canale ottenuta dalla differenza tra l'altezza del flusso al termine della colata e l'erosione, in seguito al processo di deposizione-erosione causato dal passaggio della colata detritica. Anche qui possiamo identificare il brusco cambio di pendanza nell'intorno dei 180 m, in quanto si passa da valori di elevazione posita, quindi il materiale si sta depositando lungo il canale aumentandone la quota, a valori negativi repentinamente, segno che sta avvenendo un'erosione più marcata. Nella mappa sottostante (Figura 5.44) si può vedere l'effetto di deposizione-erosione sulla scala del bacino, dove in blu abbiamo le zone che hanno subito un'asportazione del materiale, (elevazione negativa) e in rosso le parti del canale dove in seguito al passaggio della colata si è accumulato del materiale, con un valore massimo di circa 2 m.

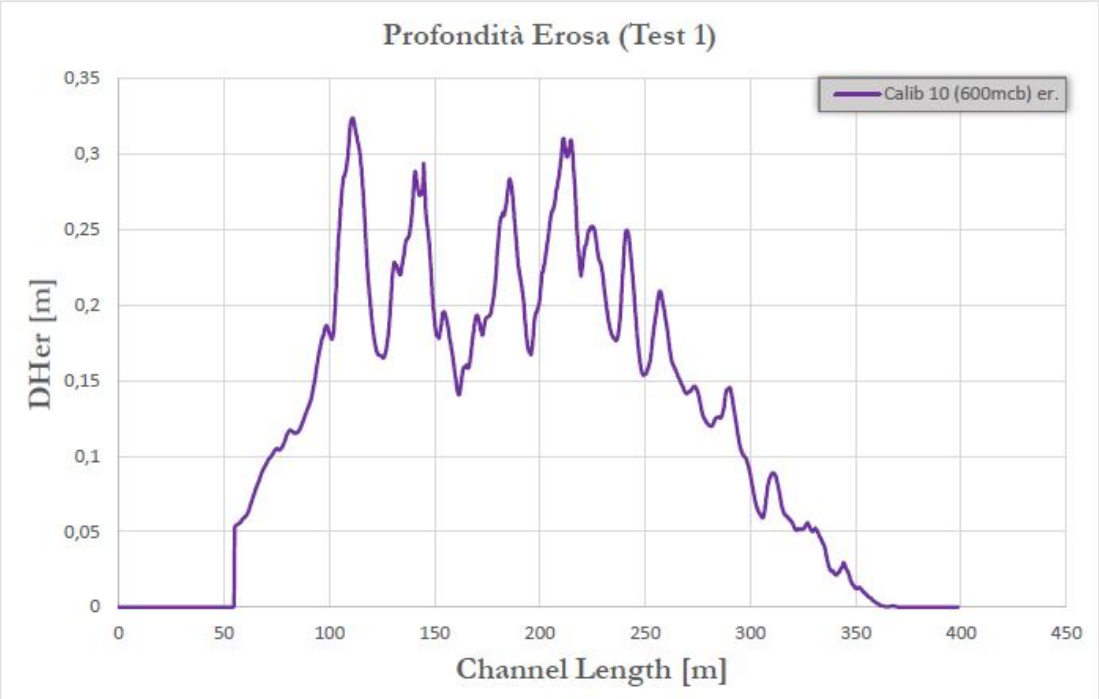

Figura 6.11: Profondità massima erosa, simulazione test 1

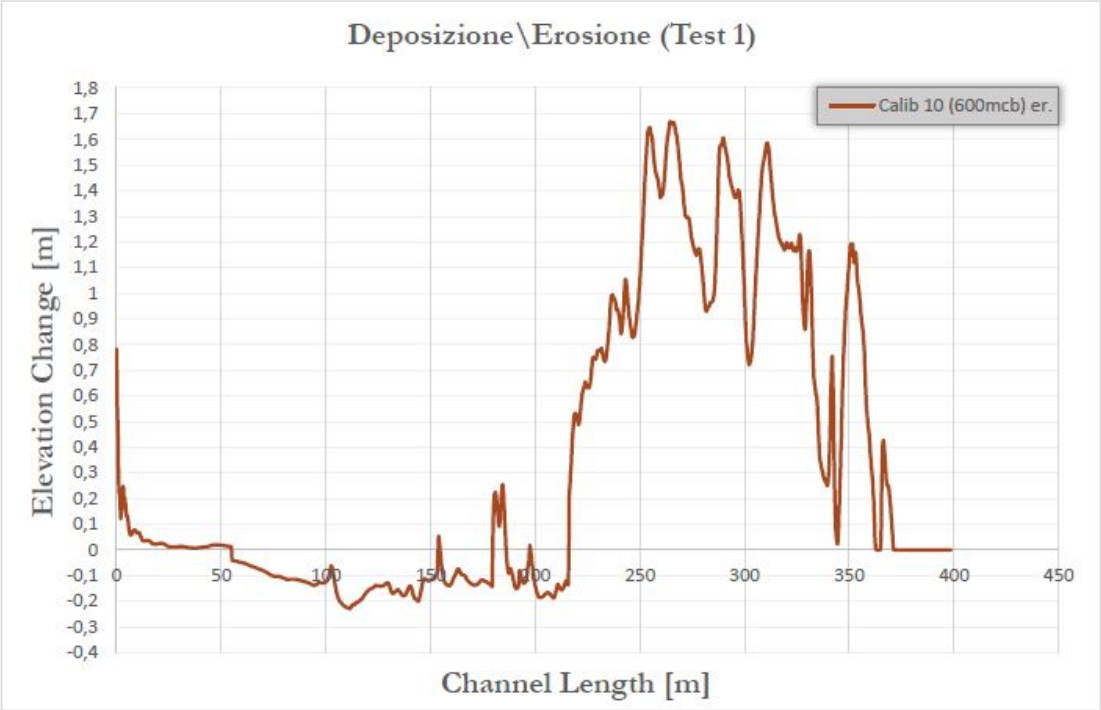

Figura 6.12: Variazione della quota altimetrica a causa della deposizione-erosione, simulazione test 1

Analoghe considerazioni valgono per il test 2, con la sostanziale differenza che in questo caso il volume iniziale del materiale della colata risulta di 400 m^3 anzichè 600 m^3 del test 1.

Figura 6.13: Mappa variazione della quota altimetrica a causa della deposizione-erosione, simulazione test 1

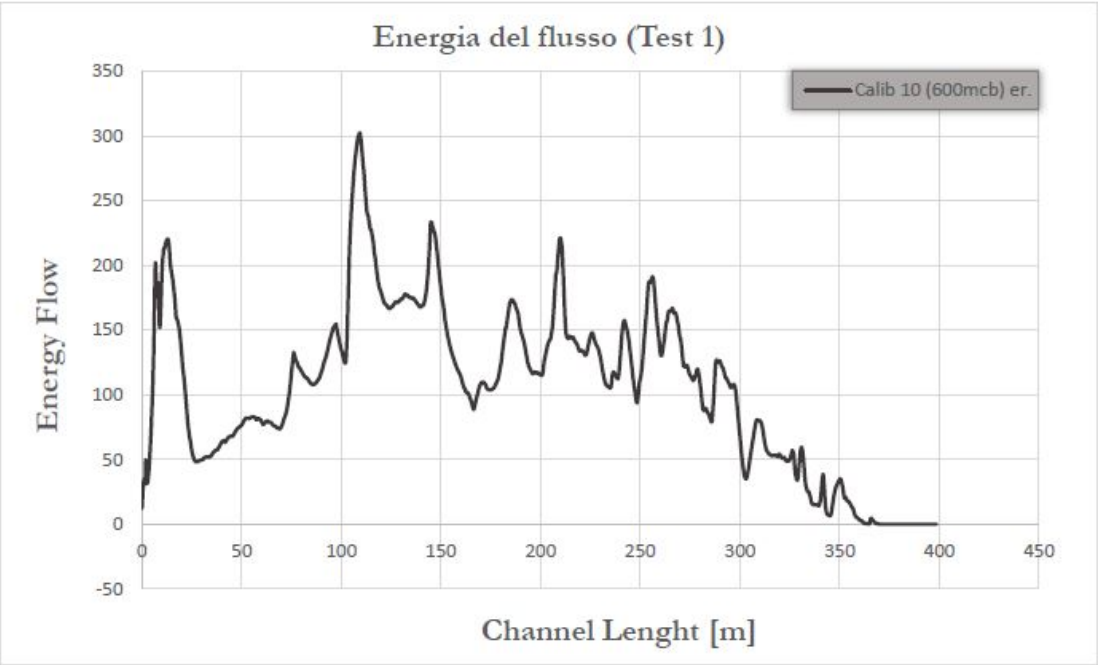

Figura 6.14: Energia del flusso, simulazione test 1

Infine si rappresenta l'energia del flusso come il prodotto tra il quadrato della

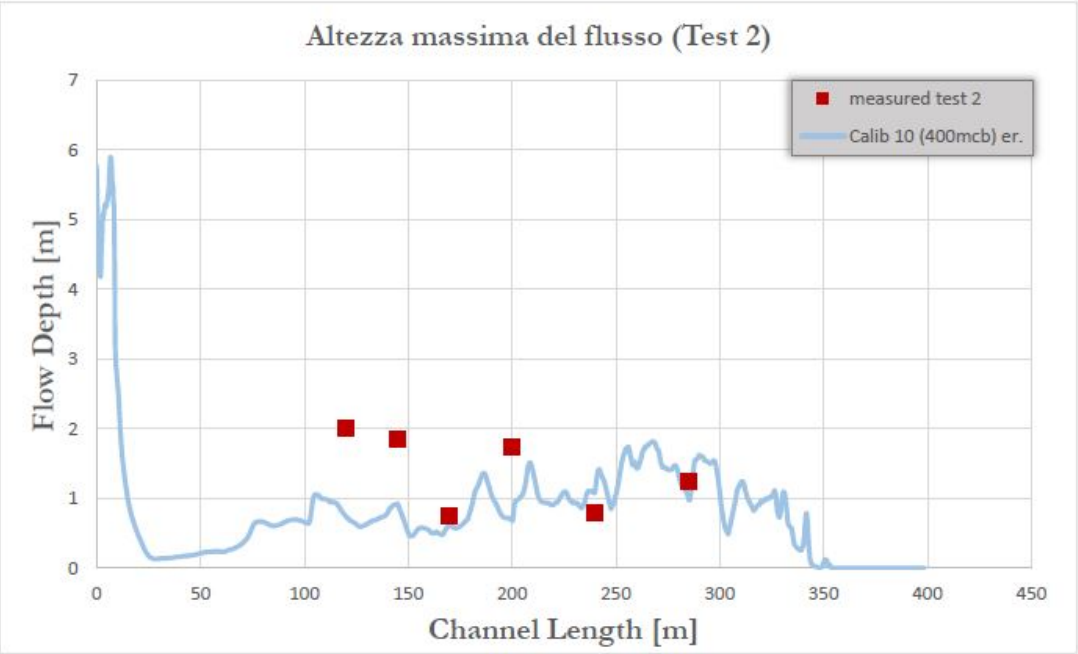

Figura 6.15: Altezza massima del flusso, simulazione test 2

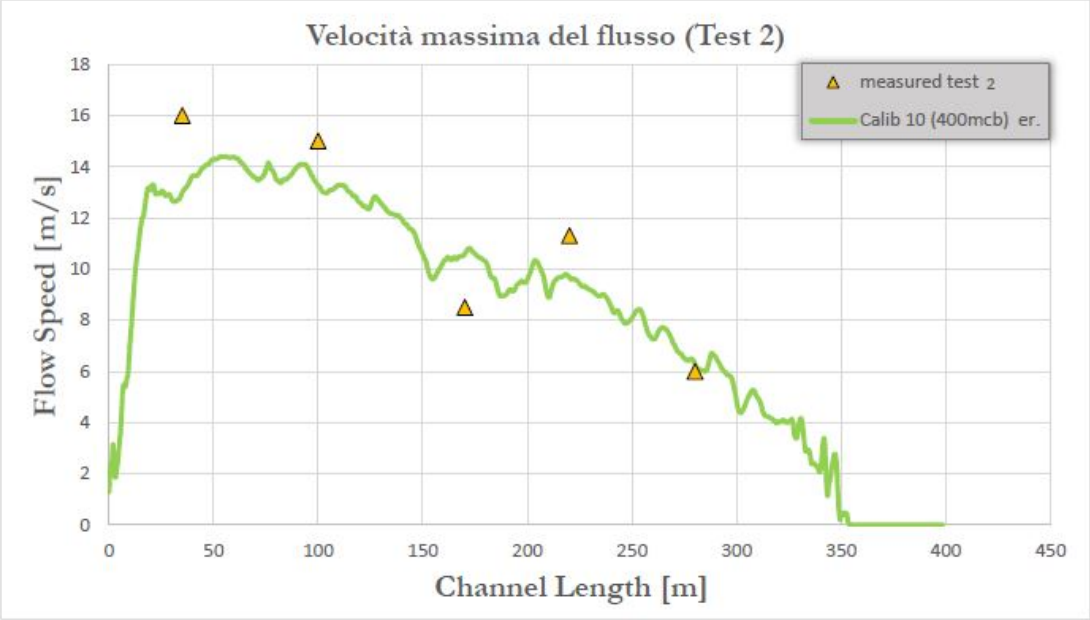

Figura 6.16: Velocità massima del flusso, simulazione test 2

velocità massima del flusso durante la discesa e l'altezza massima che questo raggiunge, in questo modo otteniamo dei valori di Eergy flow confrontabili tra i vari casi analizzati.

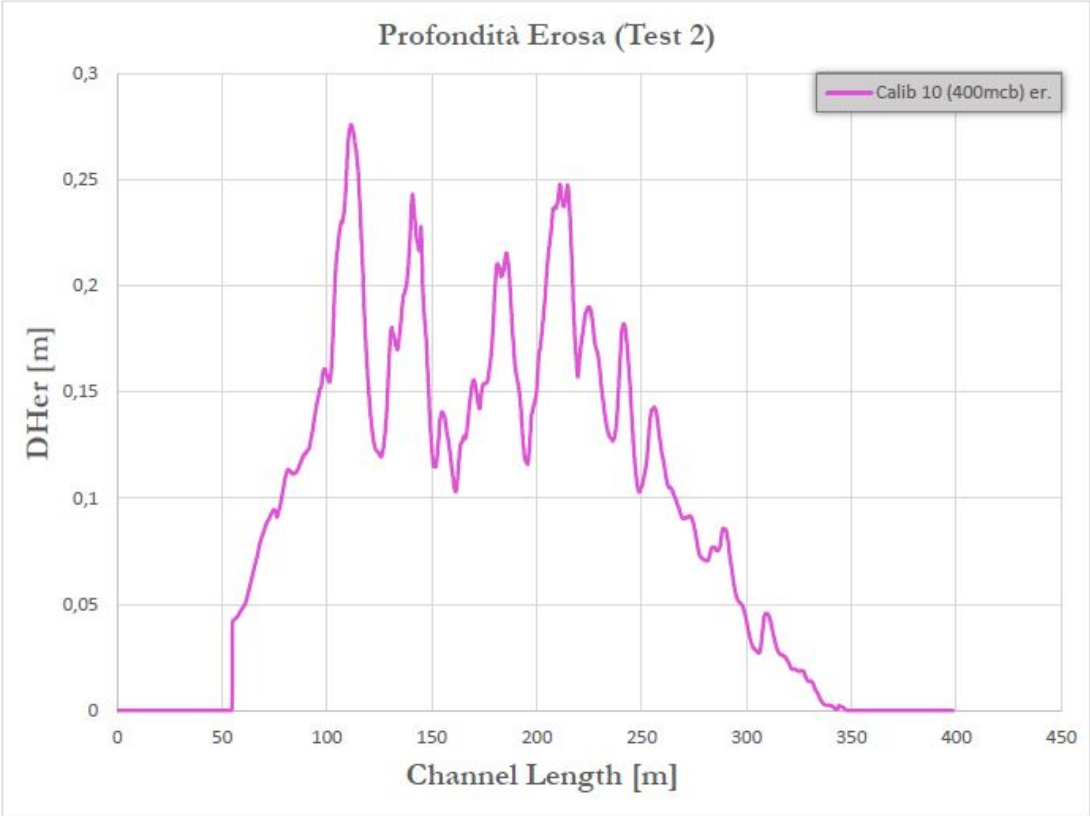

Figura 6.17: Profondità massima erosa, simulazione test 2

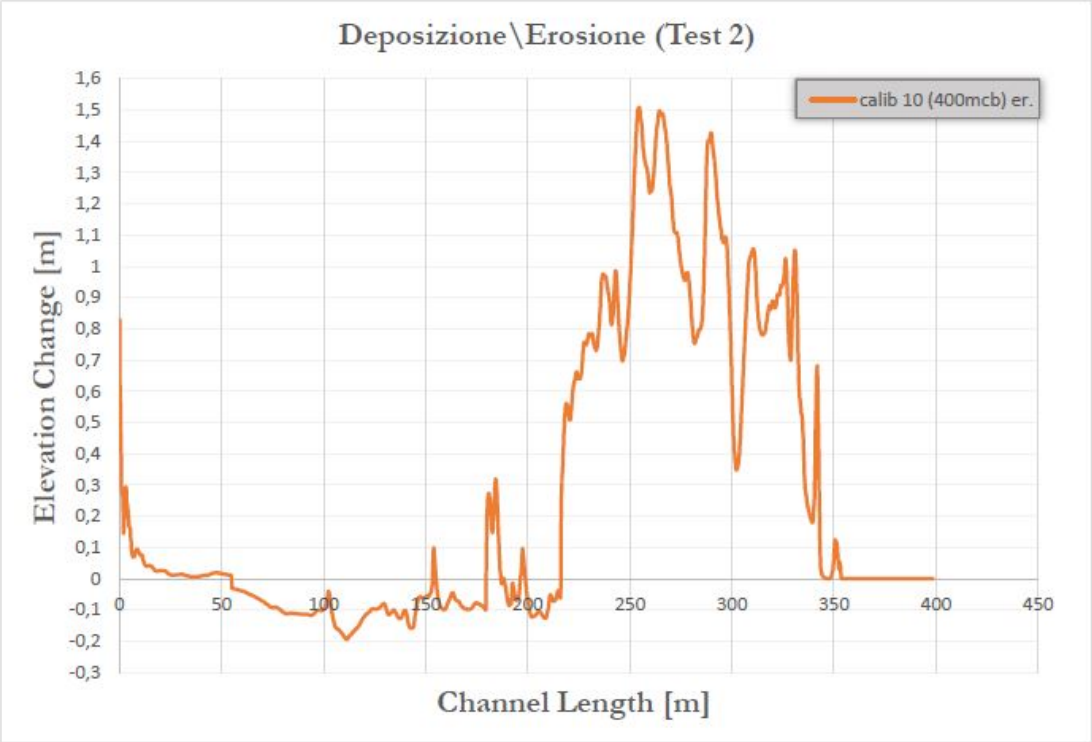

Figura 6.18: Variazione della quota altimetrica a causa della deposizione-erosione, simulazione test 2

Figura 6.19: Mappa variazione della quota altimetrica a causa della deposizione-erosione, simulazione test 2

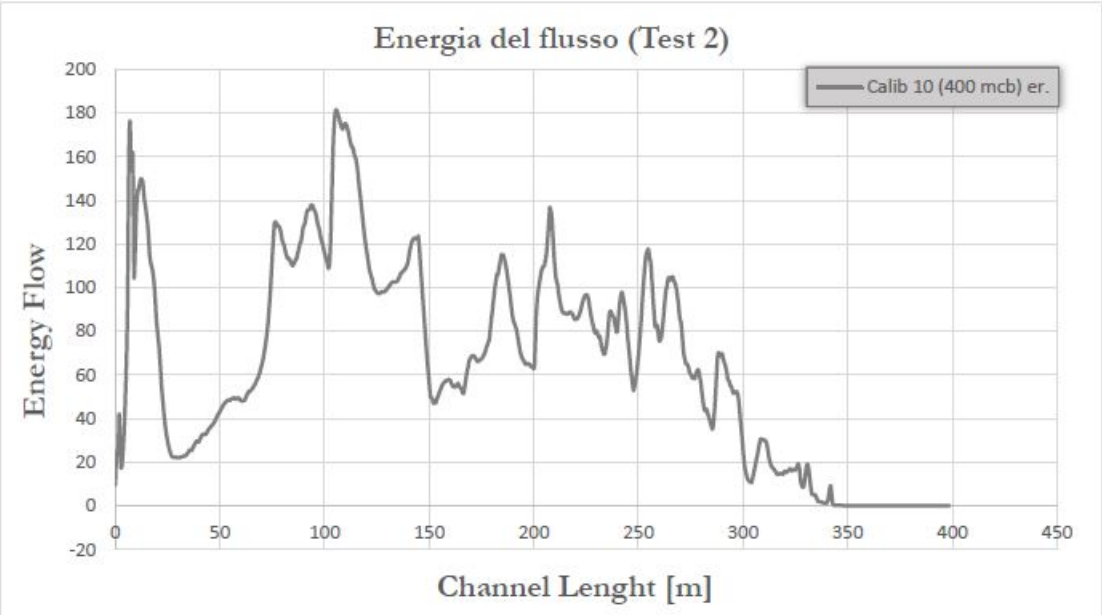

Figura 6.20: Energia del flusso, simulazione test 2

Capitolo 7

Modellazione numerica con opere di difesa

Uno dei maggiori vantaggi delle simulazioni numeriche, oltre a quello di permettere di valutare gli effetti delle colate detritiche lungo un pendio naturale, è quello di consentire di verificare l'efficacia di una determinata opera di difesa (Cap. 3), e quindi di studiare le possibili interazione tra il flusso e l'opera. Nel caso oggetto di studio in Corea del Sud, come è stato descritto in precedenza, durante il test 2 (400 m^3) vengono impiegati dei baffle di circa 1 m di altezza, disposti su due file lungo il canale a circa 150 m dal cassone. Come in precedenza per la modellazione del cassone, anche in questo caso, gli ostacoli lungo il canale vengono modellati andando ad assegnare ai punti in corrispondenza della posizione dei baffle una quota maggiorata pari all'altezza degli elementi, e un valore di erosione nullo.

7.1 Modellazione numerica con presenza di baffle

Con gli stessi parametri relativi alla reologia (angolo d'attrito φ, turbolenza θ), e di erosione assunti nel test di calibrazione *Calib 10 (400mcb) er* ($\varphi = 10.5°$; $\theta = 2500$; $E_s = 0.0015$), è stato eseguito un test per valutare l'effetto dei baffle sulla colata detritica. Prima di eseguire il test, la maglia di punti è stata raffittita nella zona centrale del canale e in particolare nell'intorno dei baffle, per ricavare degli output più accurati. Dalla simulazione sono stati elaborati i seguenti grafici dai dati di output:

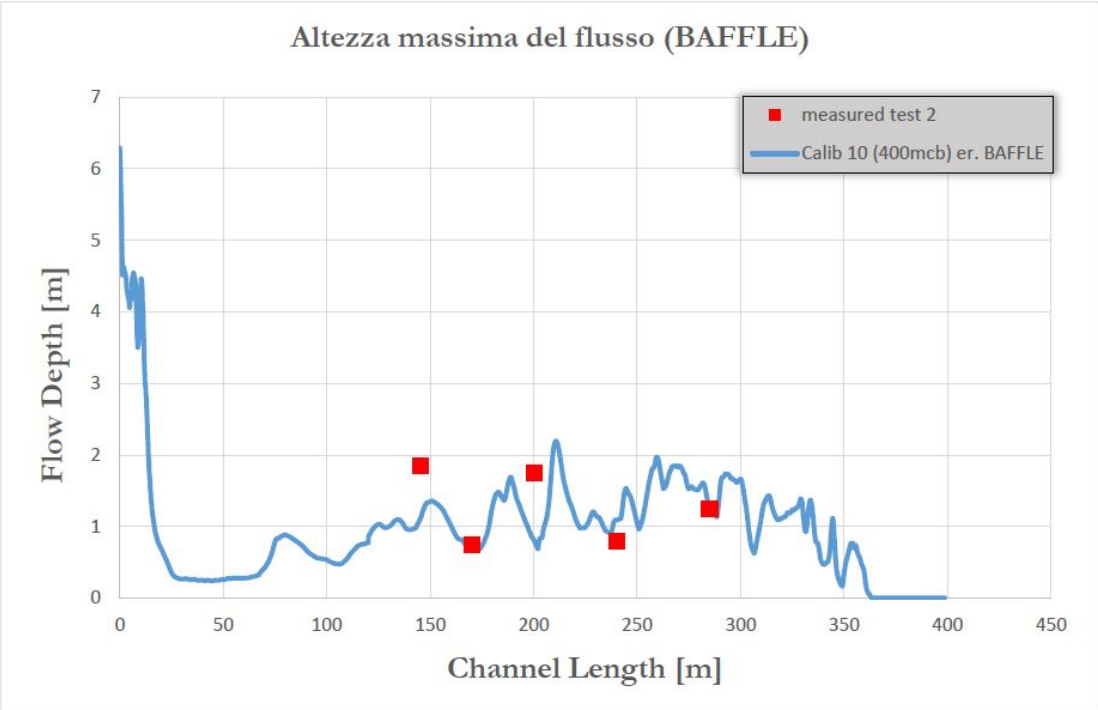

Figura 7.1: Altezza del flusso, simulazione test 2 (baffle)

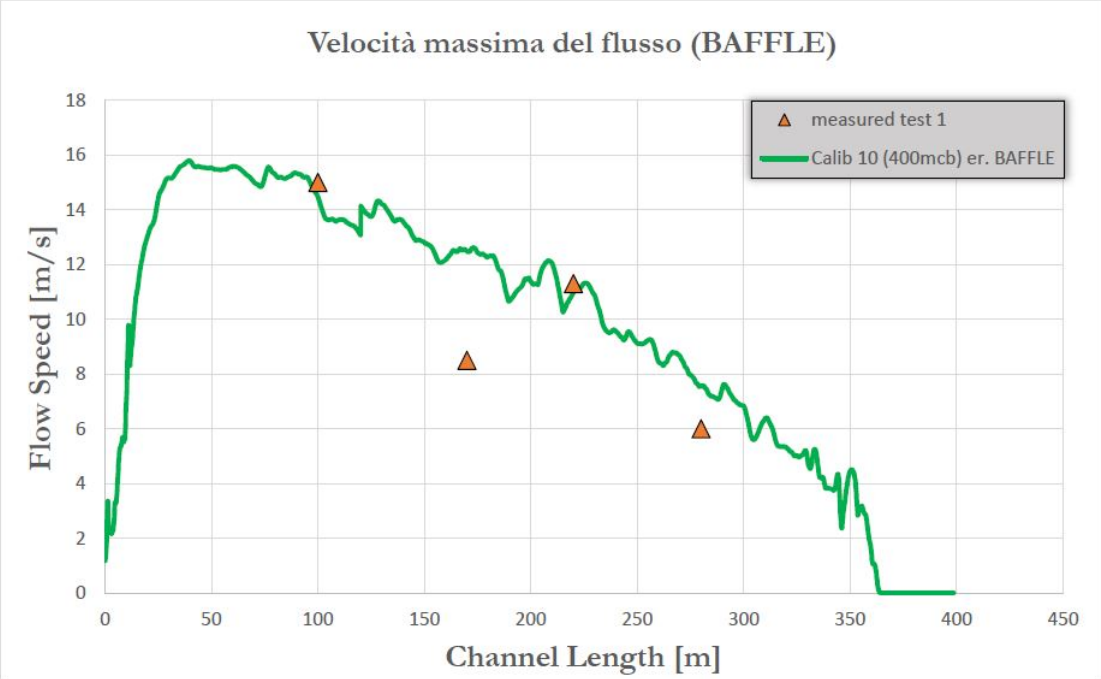

Figura 7.2: Velocità del flusso, simulazione test 2 (baffle)

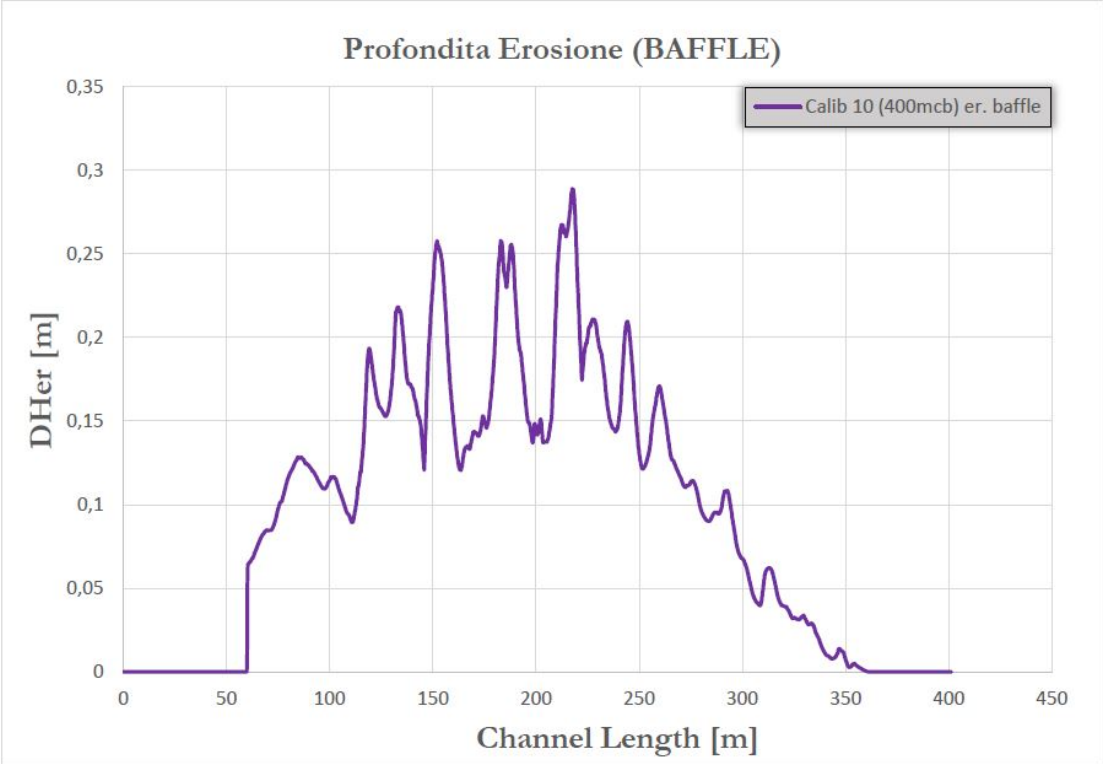

Figura 7.3: Profondità massima erosa dal flusso, simulazione test 2 (baffle)

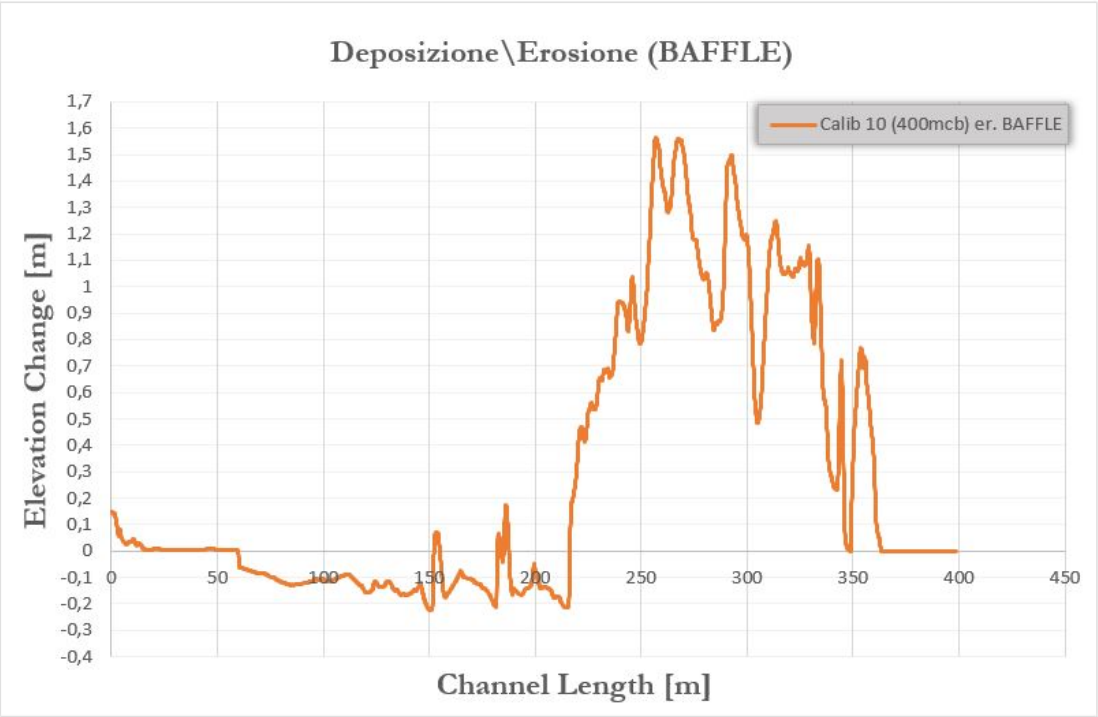

Figura 7.4: Variazione della quota altimetrica a causa della deposizione-erosione, simulazione test 2 (baffle)

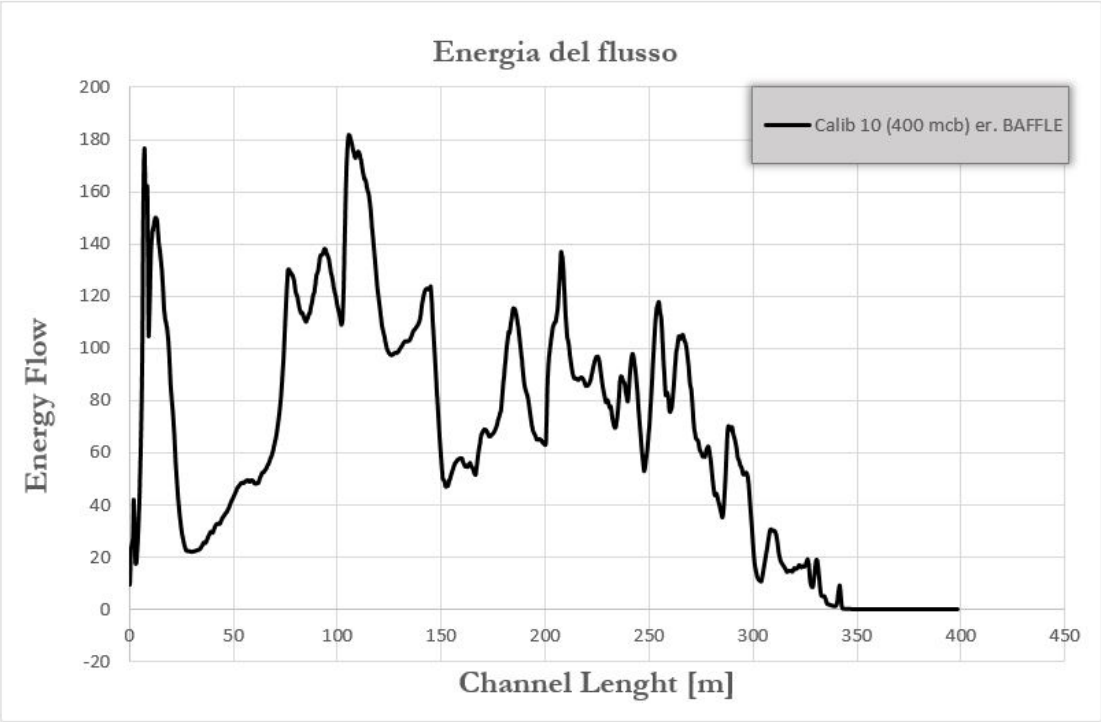

Figura 7.5: Energia del flusso, simulazione test 2 (baffle)

Dai risultati ottenuti si può dire che, la presenza dei baffle non ha provocato particolari effetti sul flusso. Possiamo apprezzare meglio questo fatto mettendo a confronto i grafici della simulazione ottenuta con la calibrazione *Calib 10 (400mcb) er.* e quelli con la calibrazione *Calib 10 (400mcb) er. BAFFLE*
Dal Grafico relativo all'altezza massima del flusso si nota come non vi siano sostanziali differenze nei due casi, una moderata variazione dell'altezza del flusso possiamo identificarla a monte dei baffle (150m) dove si passa da un'altezza di circa 60cm a circa 1m (Figura 6.6), ma per il resto del canale l'effetto è trascurabile. Analogo discorso può essere fatto per la velocità massima del flusso che non manifesta cambiamenti rilevanti se non nell'intorno dell'opera, mentre a valle resta pressochè invariata (Figura 6.7).

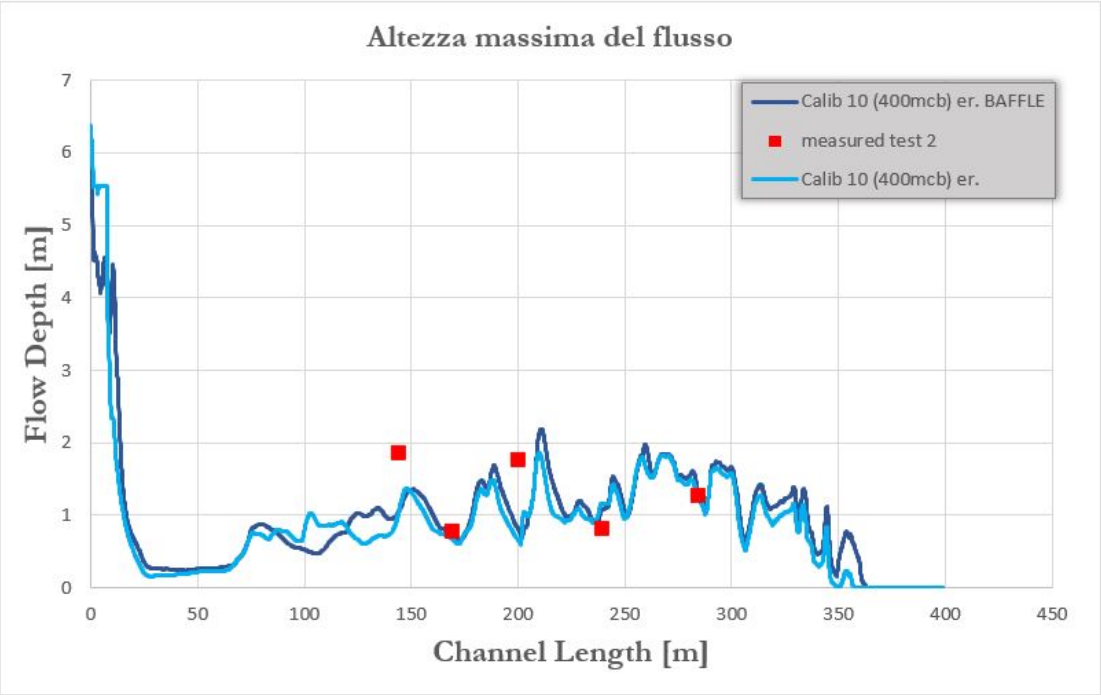

Figura 7.6: Altezza massima del flusso, confronto caso con e senza baffle.

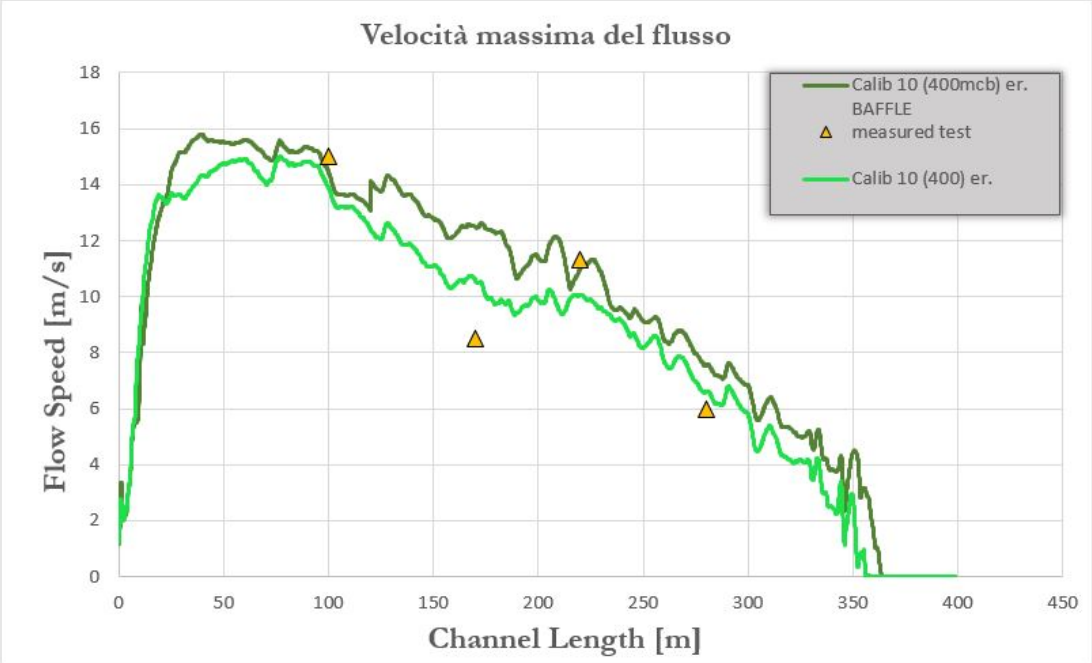

Figura 7.7: Velocità massima del flusso, confronto caso con e senza baffle

Analizzando il grafico della profondità massima erosa (Figura 6.8), si può notare come la presenza dei baffle porti ad un aumento marcato dell'erosione priprio a monte di questi, mentre appena più a valle di queste opere di difesa l'azione dell'erosione si riduce notevolmente, ma questo effetto resta circoscritto nell'intorno

dell'opera, e per tanto più a valle non si risente di questo effetto. Questo comportamento lo ritroviamo poi nel grafico relativo al processo di deposizione erosione, dove nell'intorno dei 150m troviamo un aumento delle quote nel caso con i baffle rispetto alla condizione in cui sono assenti, questo perchè appunto causano un accumulo di materiale (Figura 6.9), ma solo in una zona ben delimitata.

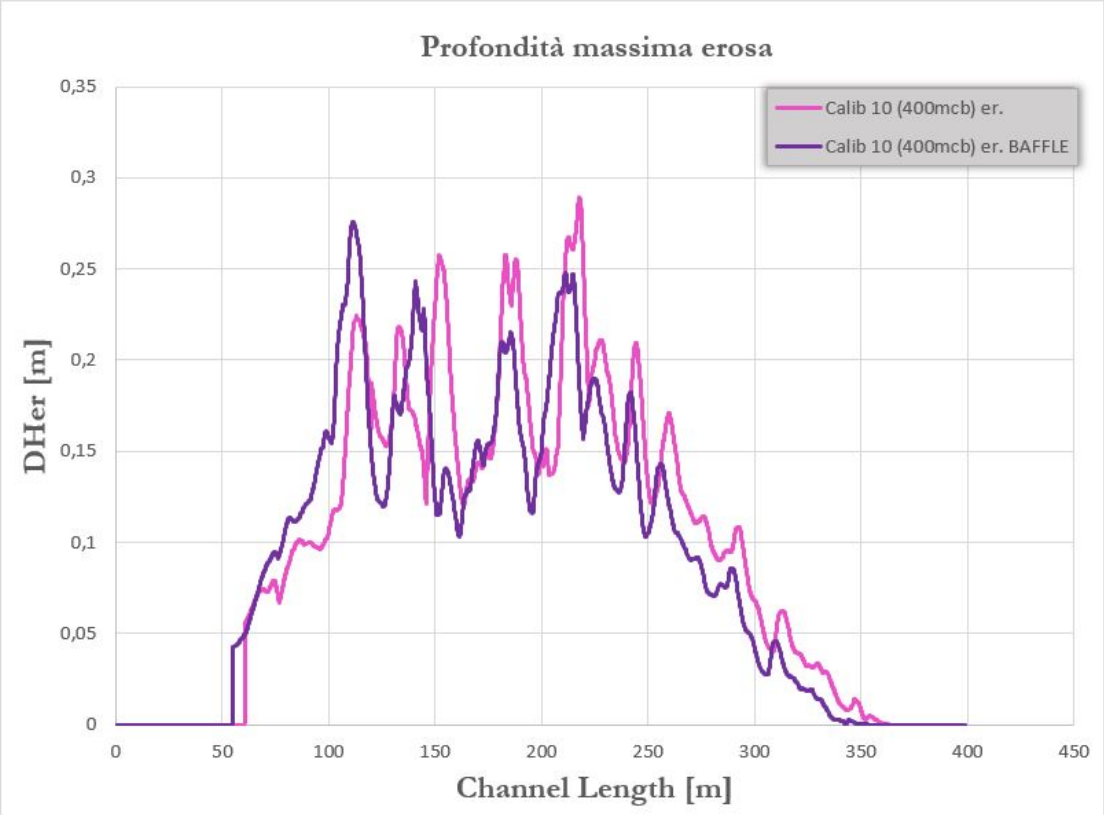

Figura 7.8: profondità massima erosa, confronto caso con e senza baffle

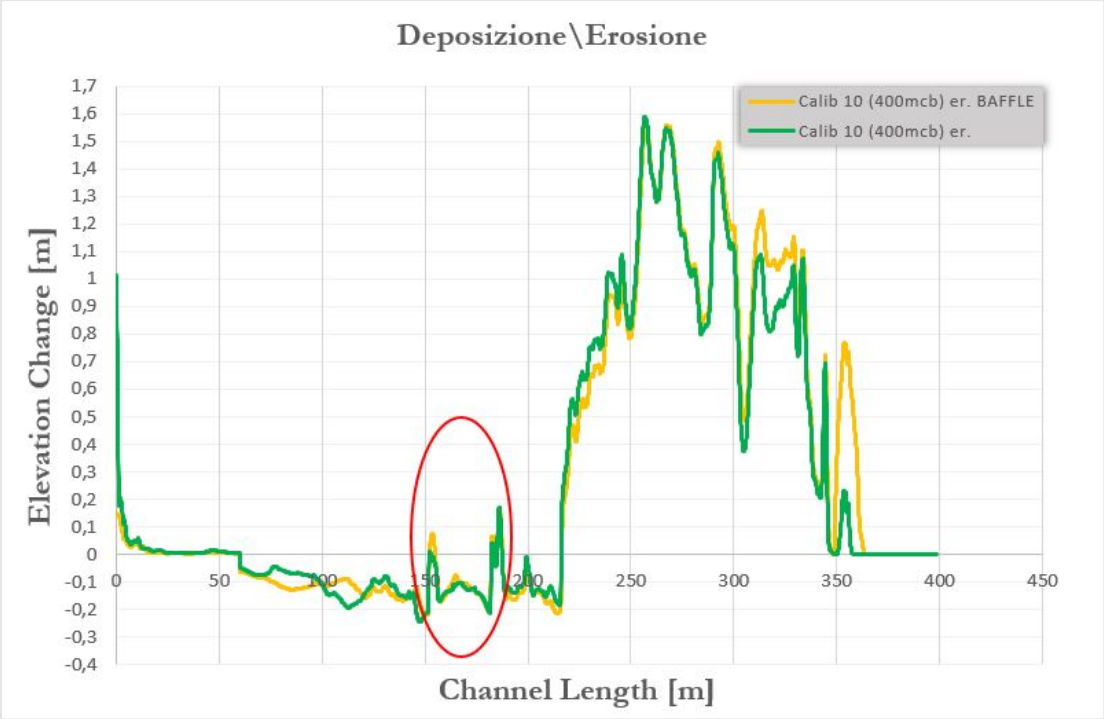

Figura 7.9: Deposizione-erosione, confronto caso con e senza baffle

Vengono poi riportate le mappe di variazzione della quota altimetrica causata dall'azione di deposizione-erosione sulla scala del bacino, anche qui possiamo vedere come non si riscontri un cambiamento evidente rispetto alla condizione precedente (*Calib 10 (400mcb) er.*), se non nella zona in cui sono presenti i baffle, infatti la zona di accumulo (in rosa) del materiale risulta leggermente più estesa (Figura 6.10 e Figura 6.11).

Figura 7.10: Mappa variazione della quota altimetrica a causa della deposizione-erosione, confronto caso con e senza baffle (baffle)

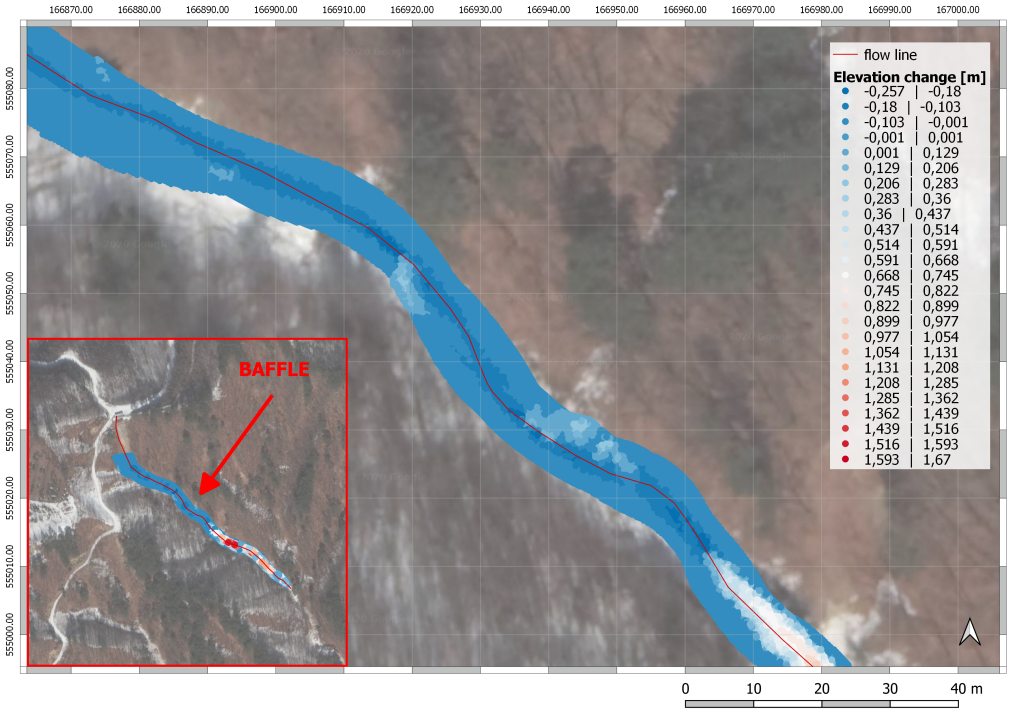

Figura 7.11: Dettaglio mappa variazione della quota altimetrica a causa della deposizione-erosione, confronto caso con e senza baffle (baffle)

Infine si pone l'attenzione sul diagramma relativo all'energia del flusso (Figura 6.12). Anche qui se andiamo a confrontare le due curve possiamo notare come, dalla

simulazione con la presenza dei baffle non comporti una riduzione dell'energia del flusso, pertanto si può sostenere che un'opera di difesa di quell'entità non comporti un'effettiva riduzione del rischio.

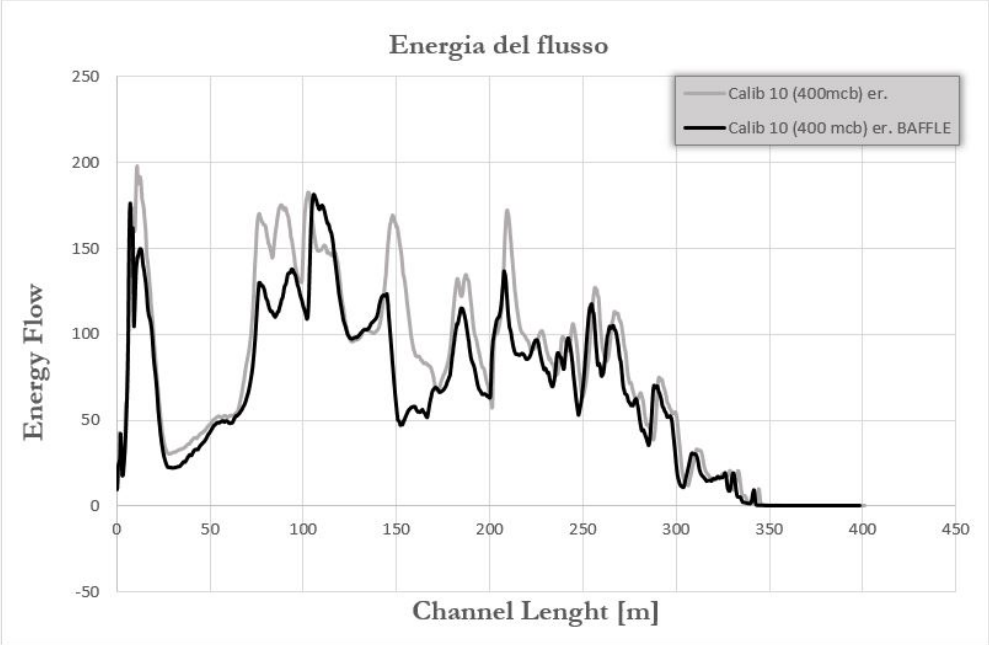

Figura 7.12: Energia del flusso, confronto caso con e senza baffle

7.2 Modellazione numerica con briglia filtrante a fessura

Nel seguente paragrafo si è ipotizzato di inserire un'opera di difesa lungo il canale al posto dei baffle visti in precedenza, in particolare si è optato per una briglia a fessura. Con lo stesso principio con cui è stato modellato il cassone e i baffles, anche in questo caso l'opera è stata considerata nel modello numerico, andando ad aumentare la quota (Z) dei punti in corrispondenza della stessa (Figura 6.13); volutamente è stata attribuita un'altezza inverosimile per un'opera di difesa di questo genere (pari a 20m), ed un'unica fessura di larghezza pari ad 1m, per valutare l'effetto della colata detritica in questa situazione, e cercare di ridurre notevolmente il rischio.

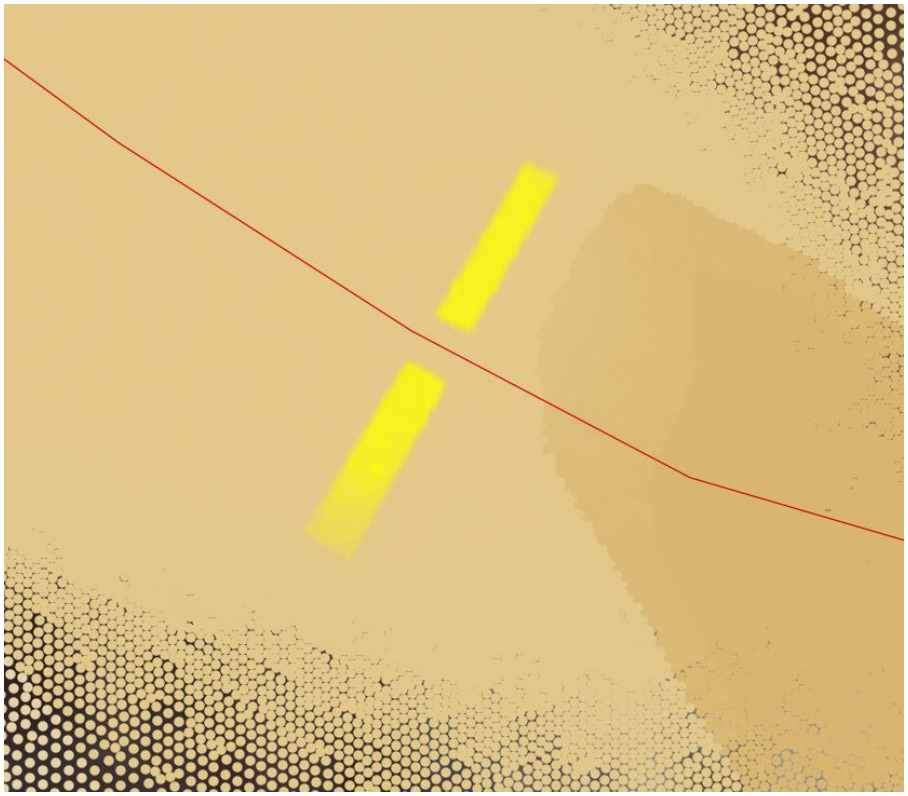

Figura 7.13: Modellazione briglia a fessura (Silt) in QGis

Dalla modellazione numerica sono stati ricavati i seguenti grafici, dove vediamo confrontati i risultati precedenti relativi ai baffle con quelli ottenuti con la briglia a fessura:

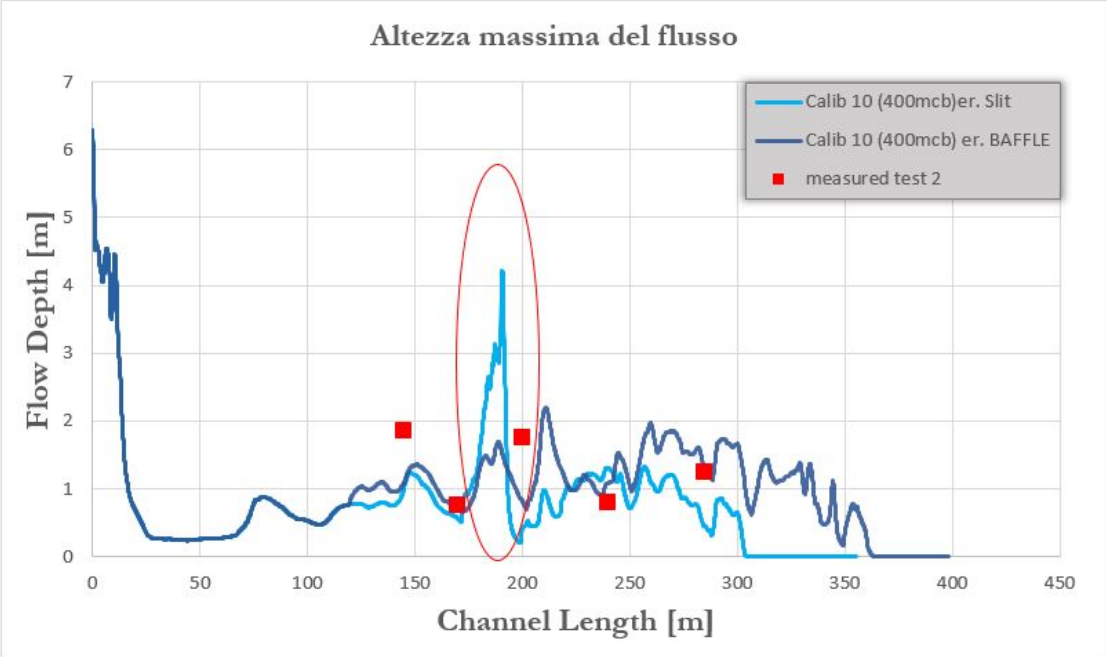

Figura 7.14: Altezza del flusso, simulazione test 2 (Slit)

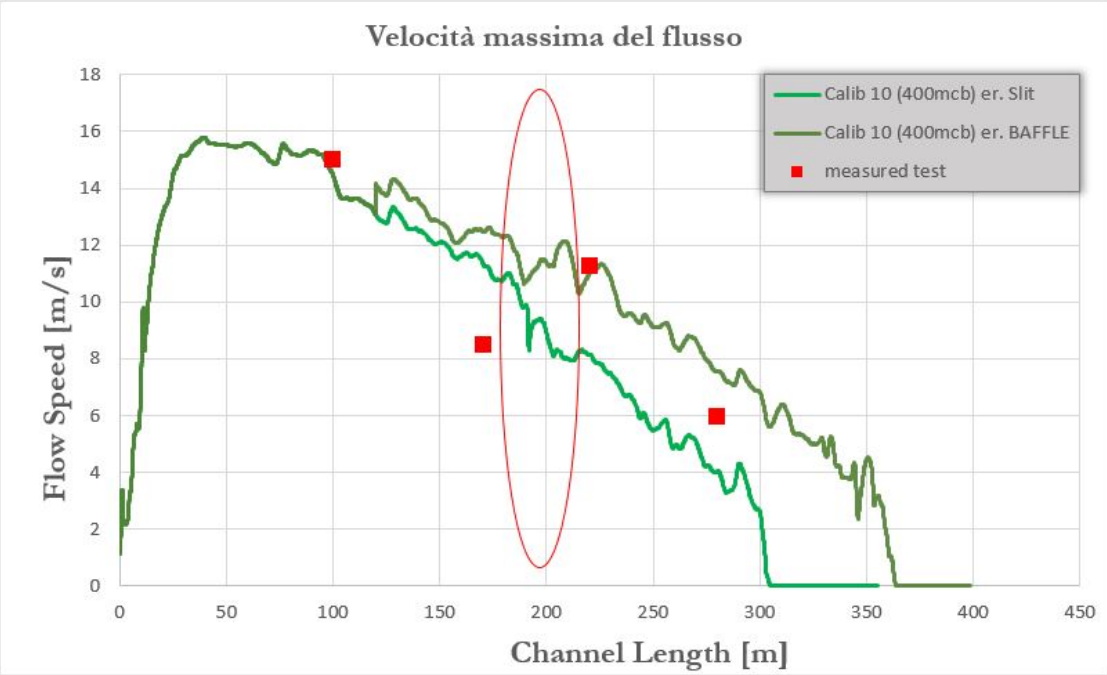

Figura 7.15: Velocità del flusso, simulazione test 2 (Slit)

La presenza dell'opera di difesa, in questo caso risulta rilevante, infatti il flusso che incontra l'ostacolo tende a rallentare notevolmente (Figura 6.15) se pure oltrepassa la fessura per arrivare a circa 300m dal punto di rilascio. Questo porta ad un aumento dell'altezza del flusso subito a monte della briglia di oltre 4 m.

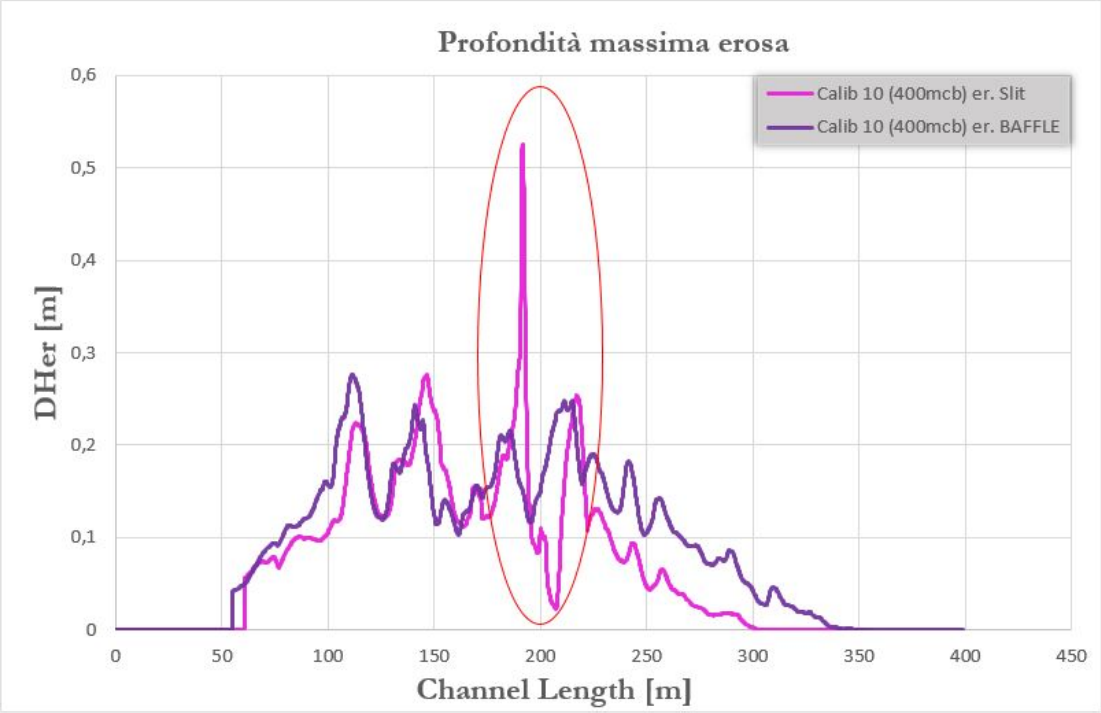

Figura 7.16: Profondità massima erosa dal flusso, simulazione test 2 (Slit)

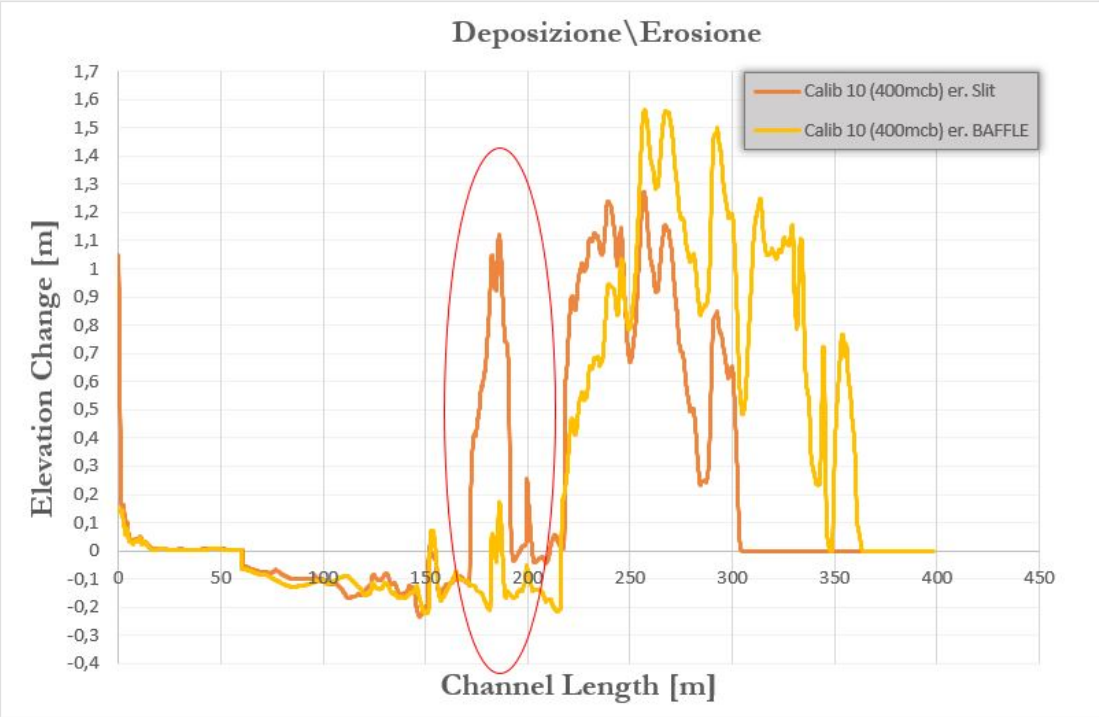

Figura 7.17: Variazione della quota altimetrica a causa della deposizione-erosione, simulazione test 2 (Slit)

Anche nel grafico della massima profondità erosa e di deposizione-erosione (Figura 6.16 e 6.17), la presenza della barriera risulta ben visibile da una brusca riduzione sia dell'azione dell'erosione che dalla variazione delle quote altimetriche. Ben visibile

dalle mappe della variazione della quota altimetrica la presenza della briglia a fessura, dove si accumula il materiale e fuoriesce verso valle. Da qui possiamo fare un'ulteriore osservazione, se pur vero che il flusso si arresta più a monte (circa 300 m) rispetto a prima (circa 450 m), la zona di deposito risulta avere quote più elevate, segno del fatto che la stessa quantità di materiale si è depositata su uno spazio minore.

Figura 7.18: Mappa variazione della quota altimetrica a causa della deposizione-erosione, simulazione test 2 (Slit)

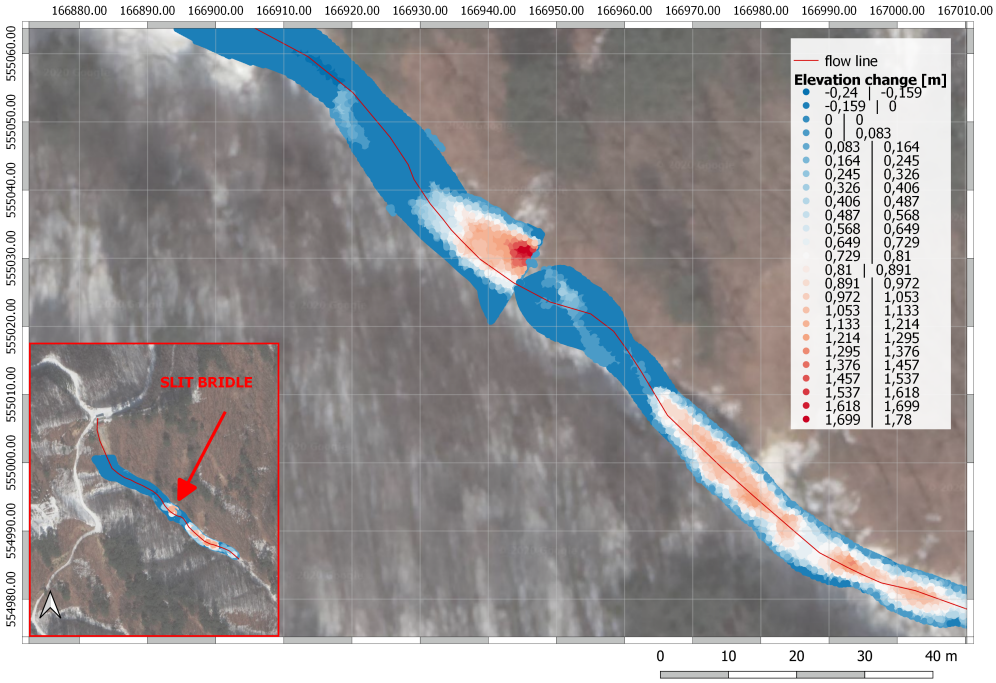

Figura 7.19: Dettaglio mappa variazione della quota altimetrica a causa della deposizione-erosione, simulazione test 2 (Slit)

Infine si pone attezione sul grafico più interessante per questa simulazione, l'energia del flusso (Figura 6.20). La presenza della briglia a fessura che ostacola il flusso fa si che, a valle di essa, l'energia della colata si riduca drasticamente fino ad arrestarsi. Questo potrebbe essere un effeto vantaggioso ragionando a breve termine, perchè si va ad abbattere notevolmente il rischio; però bisogna notare come, a monte dell'opera, l'energia del flusso che si trova costretto a passare esclusivamente all'interno della fessura di 1m, aumenti notevolmente, e questo si traduce in una forte energia d'impatto contro la briglia, che quindi è soggetta a elevate sollecitazioni che dovranno essere opportunamente considerate in fase di progettazione. Inoltre dal grafico di figura 6.17 si può notare come dopo il passaggio del flusso in corrispondenza della fessura il livello del terreno aumenti di oltre un metro a causa dell'accumulo di materiale, che dovrà essere necessariamente asportato per ripristinare l'efficacia della barriera intasata, successivamente ad ogni evento franoso. Pertanto questa ideale opera di difesa, porterebbe ad un notevole riduzione del rischio inizialmente, ma quest'effetto vantaggioso a breve termine verrebbe rapidamente a mancare, perchè necessiterebbe di una continua manutenzione senza la quale, l'opera avrebbe un'efficacia ridotta nei confronti delle successive colate detritiche.

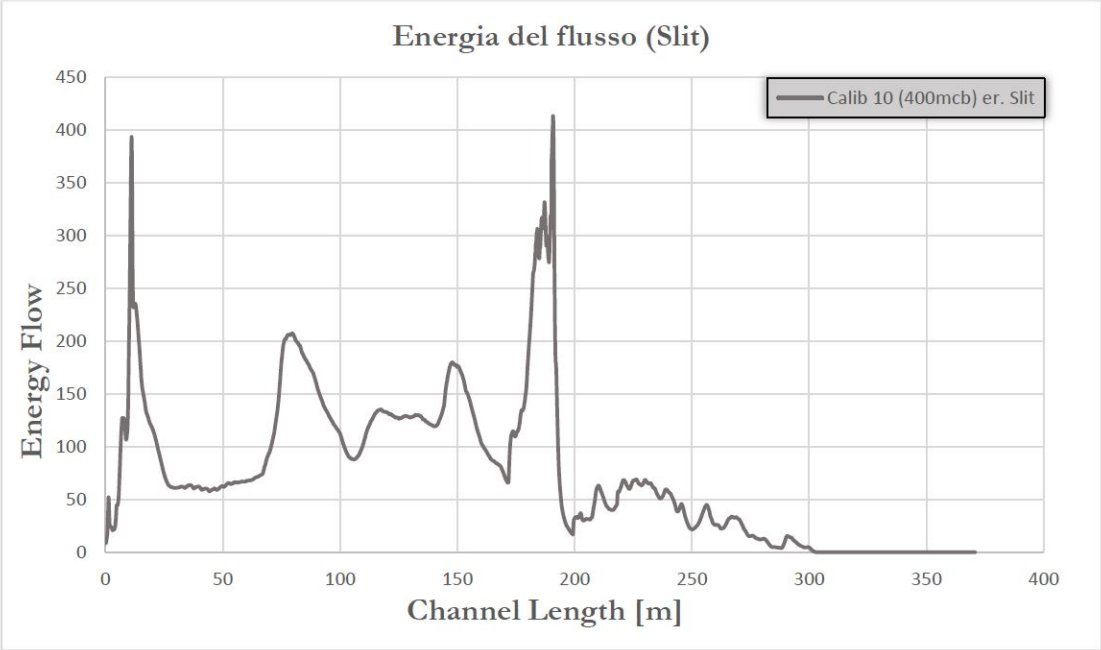

Figura 7.20: Energia del flusso, simulazione test 2 (Slit)

Capitolo 8

Considerazioni finali

Nel lavoro di tesi qui descritto sono stati trattati specifici eventi franosi, quali le colate detritiche. In particolare si è posta maggiore attenzione all'azione erosiva che questi fenomeni provocano sul terreno che ricopre il letto del canale durante la discesa verso valle. Lo studio delle colate detritiche e dell'erosione si è incentrato in particolar modo sulla modellazione numerica relativa a questi eventi, e come è stato descritto, con riferimento ai tre possibili modelli utilizzabili: continuo, discreto, e ibrida, si è scelto di analizzare la modellazione classica del continuo.

La modellazione con il continuo equivalente prevede l'integrazione delle equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto, lungo la profondità del flusso, che restituisce per ogni punto della superficie topografica, un valore medio di velocità. Per l'applicabilità del modello numerico del continuo occorre definire le condizioni al contorno e un continuo equivalente, assegnando a tutto il flusso in maniera omogenea le stesse caratteristiche. In questo caso la legge reologica impiegata (Voellmy) non è stata oggetto di studio approfondito in questo elaborato, dato che è stata precedentemente validata in un lavoro di tesi che trattava lo stesso esperimento eseguito in Corea del Sud.

Il risolutore numerico scelto con cui calibrare il modello numerico e validare i dati reali misurati in sito è RASH^{3D}, che permette di lavorare direttamente sulla reale topografia del problema note le coordinate (x,y,z) dei punti del bacino. In una prima fase vengono eseguite una serie di simulazioni numeriche variando i parametri relativi alla reologia del materiale (φ e θ) cercando di riottenere gli stessi dati reali misurati nell'esperimento in grande scala in termini di altezze del flusso e di velocità, da prima senza considerare l'effetto dell'erosione per poi inserirne il contributo. I risultati ottenuti in questa fase, indicano in maniera molto evidente come il contributo dell'erosione sia fondamentale per ottenere una buona corrispondenza tra i dati di output e quelli misurati; va notato inoltre, che nella zona centrale del canale, il processo di back analysis non porta a risultati molto soddisfacenti, infatti in questa zona i risultati si discostano dalla reale condizione ottenuta nell'esperimento in grande scala. Questo comportamento può essere imputabile a due circostanze, la prima riguarda la misurazione in sito, in quanto potrebbe essere stata soggetta ad errore, la secondo invece riguarda il risolutore numerico impiegato, dato che,

l'ipotesi di velocità media calcolata in ogni punto potrebbe venir meno quando il flusso interagisce con un ostacolo di geometraia particolare, o come in questo caso vi sia la presenza di un brusco salto, con repentina variazione di quota. Preso atto di questa possibile incertezza, si è passati alla modellazione numerica con la preseza di opere di difesa.

Si è voluto riprodurre la reale opera di difesa realizzata in Corea del Sud durante i test, ovvero una doppia fila di baffle dell'altezza di circa un metro posti ad una distanza di circa 150m dal cassone di rilascio. I risultati ottenuti, in accordo con quelli ricavati dai coreani non hanno portato a evidenti miglioramenti in termini di riduzione del rischio, dato che l'effetto positivo dei baffle nei confronti del flusso è rimasto circoscritto nell'intorno dell'opera, risultando di fatto ininfluenti nella parte più a valle del canale.

In fine si è valutato l'effetto di una barriera che andasse a interagire in maniera significativa con il flusso della colata, pertanto si è optato per una briglia a fessura posizionata dove in precedenza erano posizionati i baffle. Qui come ci si aspettava, il flusso viene rallentato notevolmente e una gran parte di materiale si arresta a monte dell'opera stessa. Questo risultato può essere visto in maniera favorevole in termini di riduzione del rischio a breve termine, ma un'opera del genere richiederebbe una continua manutenzione per mantenerne l'efficenza nel tempo, con conseguenti costi elevati.

In definitiva la modellazione numerica costituisce un valido strumento di analisi per lo studio e la conoscenza di fenomeni di elevata incertezza come le colate detritiche, fornendo una valida previsione in termini di area inondata e di evoluzione del flusso, però di contro richiede un'accurata calibrazione dei parametri che descrivono il modello, e questa per poter essere realizzata con maggiore precisione necessita di dati sperimentali, che permettono di raggiungere risulati più affidabili, ma non sempre disponibili. Inoltre la modellazione con il continuo equivalente, se pur risulti essere più semplice e meno onerosa in termini computazionali rispetto ad altri modelli come ad esempio quelli ibridi, comporta una più elevata inefficienza in termini di risultati, in caso di geometrie particolari e cambi di pendenza marcati. Inoltre l'effetto dell'erosione che molto spesso per questi fenomeni viene trascurata, in realta risulta dominante in certe situazioni, andando a governare l'entità dei volumi in gioco, e il comportamento del materiale. Pertanto se venisse sviluppato un modello numerico più affidabile e accurato, che non richieda una capacità di calcolo eccessiva porterebbe ad un migliramento della conoscienza dei meccaniscmi che regolano questi fenomeni e ad una progettazione più efficiente.

Capitolo 9

Software utilizzati

- QGIS (3.12.3)
- Autocad
- Google Earth Pro
- Cygwin64 Terminal
- Excel
- MeshGen

Capitolo 10

Bibliografia

Bagnold. (1954). *Experiments on a GravityFree Dispersion of Large Solid Spheres in a Newtonian Fluid under Shear. Proceedings of the Royal*

Bagnold. (1996).*An approach to the sediment trasport problem from generl physics: physiographic and hydraulic studies. Washington: Us Geological survey.*

Campbell et al. (1995). *Large-scale landslide simulations: global deformation, velocities and basal friction.*

Casagrande. (1948). *Classification and identification of soils. Transactions of the American Society of Civil Engineers, CXIII(1).*

Chan Kyung. (2016). *Real-Scale Test for simulation and verification of debris flow and contermeasures.*

Cruden, D. a. (1996). *Landslie types and process. Washington: In Turner A.k. and Schuster R.L.*

Cruden VanDine (2013). *classification, description causes and indirect effects. Canadian Technical Guidelines and Best Practices related to Landslides: a national initiative for loss reduction*

D'agostino. (2005). *Sistemazione dei Bacini montani e difesa del suolo.*

Daniela Ferretti (2015). *Controllo morfologico sulla dinamica delle colate detritiche nel territorio di Cortina d'Ampezzo (BL)*

Du et al., 1. (1986). *Determination of the suspension competence of debris flows based on particle size analysis (Hong-juan YANG, Fang qiang WEI, Kai-heng HU, Chuan-chang WANG). International Journal of Sediment Research.* Tratto da https://doi.org/10.1016/S1001-6279(14)60023-8

Gray Thornton. (2005). *A theory for particle size segregation in shallow granular free-surface flows.*

Guzzetti, A. C. (2008). *Distribution of landslides in the Upper Tiber River basin, central Italy. Geomorphology. 96:105–122.*

Highland. (2008). *The landslide handbook:. Geological Survey Circular 1325. Tratto da http://pubs.usgs.gov/circ/1325/pdf/C1325*$_5$08*.pdf*

Hungr. (1995). A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches.Canadian Geotechnical Journal, 32(4),.

Hungr et al. (1984). Quantitative analysis of debris terrorent hazard for design of remedial measures. Canadian Geotechincal Journal Vol. 21.

Hungr et al. (2001). A Review of the Classification of Landslides of the Flow Type (Vol. 221-238). Environmental Engineering Geoscience, vol. VII

Imaizumi et al. (2008). Effects of forest harvesting on the occurrence of landslides and debris flows in steep terrain of central Japan. Earth Surf Process Landf. 33:827–840.

Lancellotta. (2014). Geotecnica 4ed. Bologna: Zanichelli.

Lorenzo Brezzi. Influenza del contenuto granulare di un debris flow.

Martin et al. (2002). Sediment transfer by shallow landsliding in the Queen Charlotte Islands. British Columbia Can J Earth Sci. 39(2):189–205.

NIDP. (2002). National Institute for Disaster Prevention: the field survey report of damages caused by the thphoon Rusa.

NIDP. (2003). National Institute for Disaster Prevention: the field survey report of damages caused by the thphoon Maemi.

Park et al. (2013). Landslide and debris flow susceptibility zonation using TRIGRS for the 2011 Seoul landslide event. Republic of Korea: Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon. doi:10.5194/nhess-13-2833-2013

Pastor et al. (2007). A SPH depth integrated model with pore pressure coupling for fast landslides and related phenomena. Procs. of the 2007 International Forum on Landslide Disaster Management, Edited by K. Ho and V. Li, Hong Kong, 10-12 December 2007, Vol. II.

Petley. (2012). Global patterns of loss of life from landslides. Geology. doi:https://doi.org/10.113

Pierson Costa. (1987). rheological classification of subaerial sediment-water. Geological Society of America: Reviews in Engineering Geology VII.

Pirulli Barbero. (2017). The failure of the Stava Valley tailings dams (Northen Italy): numerical analysis of the dynamic and rheological properties. Geoenvironmental Disaster.

Pirulli Leonardi. (2019). Modellazione numerica di movimenti rapidi di versante. Politecnico di Torino - Scuola di Dottorato.

Pirulli. (2005). Numerical modelling of landslide runout, a continuum mechanics approach. Turin, Italy: Ph.D dissertation, Politecnico of Turin.

Pirulli. (2014). Il fenomeno del debris flow e metodologie di calcolo dei percorsi di colata. Politecnico di Torino.

Pirulli et al. (2019). Modellazione numerica di movimenti rapidi di versante. Politecnico di Torino.

Pirulli, Leonardi Scavia (2019). Comparison of depth-averaged and full-3D model for the benchmarking exercise on lanslide runout

Pittarello (2019). Modellazione numerica della dinamica di colate detritiche post incendio: analisi dell'evento del 7 giugno 2018 comune di Bussoleno (To).
Sangseom, Yongmin, Joon Kyu, Junghwan (2015). The 27 July 2011 debris flows at Umyeonsan, Seoul, Korea

Sangrey, M. . (1978). Methods of slopes stability analysis. Landslides analysis anc control (special report 176).

Sangyeon et al. (2016). Analysis of Erosion in Debris Flow Experiment Using Terrestrial LiDAR. Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography. Tratto da http://dx.doi.org/10.7848/ksgpc.2016.34.3.309

Takahashi. (1978). Mechanical characteristics of debris flow. Journal of the Hydraulics Division.

Takahashi. (1991). Debris flow. Rotterdam: A.A. Balkema.

Taylor, F. E. (2015). Enriching Great Britain's National Landslide Database by searching newspaper archives. Geomorphology. doi:https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.

VanDine. (1996). Debris flow control structures for forest engineering. Res. r., .C. Min. For., Victoria, B.C., Pap. 08.

Wu Jishan (1992). Characteristics of erosion and deposition from debris flows

Wang, W. e. (1994). Hyperconcentrated flow. Rotterdam, A.A. Balkema: International Association of Hydraulic Research Monograph.

Yune et al. (2011). Analysis of debris flow characteristics through database costruction in Korea.

Yune et al. (2016). Analysis of debris flow characteristics through database construction in Korea.Gangneung-Wonju National University: Dept. of Civil Engineering. doi:10.4408/IJEGE.2011-03.B-019

Yune et al. (2017). Susceptibility Assessment of Rainfall Induced Landslides: A Case Study of the Debris Flow on July 27, 2011 at Umyeonsan (Mt.), Seoul, Korea. Seoul: Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.