



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO**  
**FACOLTÀ DI AGRARIA**

*Scuola di Dottorato di Ricerca in*  
*Innovazione Tecnologica per le Scienze Agro-Alimentari e Ambientali*  
*XXIII ciclo*

**FUNZIONE DEL BOSCO NELLA FASE DI**  
**ARRESTO DEI**  
**DEBRIS FLOW**

Tutor: Prof. **Gian Battista BISCHETTI**

*Dipartimento di Ingegneria Agraria, Sezione di Idraulica*

Tesi di dottorato di:

**Emanuele Morlotti**

Matr. n. R07741

Anno Accademico 2009 – 2010





**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO**  
**FACOLTÀ DI AGRARIA**

*Scuola di Dottorato di Ricerca in*  
*Innovazione Tecnologica per le Scienze Agro-Alimentari e Ambientali*  
*XXIII ciclo*

**FUNZIONE DEL BOSCO NELLA FASE DI**  
**ARRESTO DEI**  
**DEBRIS FLOW**

Tutor: Prof. **Gian Battista BISCHETTI**

*Dipartimento di Ingegneria Agraria, Sezione di Idraulica*

Direttore del corso di Dottorato: Prof. **Roberto Pretolani**

*Dipartimento di Economia e Politica Agraria Agro-Alimentare e Ambientale*

Tesi di dottorato di:

**Emanuele Morlotti**

Matr. n. R07741

Anno Accademico 2009 – 2010



## Ringraziamenti

Con questo lavoro di tesi si completa il mio percorso di studi, che mi ha dato tante soddisfazioni non solo in termini intellettuali, ma anche personali. Penso che, oltre alla realizzazione di un buon lavoro, sia molto importante instaurare, all'interno del gruppo di studio, buoni rapporti interpersonali, così come è importante nella vita di tutti i giorni.

In questi tre anni di lavoro all'interno della Sezione di Idraulica Agraria del Dipartimento di Ingegneria Agraria (che mi piace chiamare ancora Istituto di Idraulica Agraria) ho conosciuto meglio persone che già conoscevo e ne ho conosciute di nuove, con le quali ho vissuto tante esperienze diverse.

Quindi voglio ringraziare prima di tutto la mia famiglia, che mi ha supportato durante questo periodo di studio, sostenendomi nei momenti più critici e senza l'aiuto della quale non credo avrei seguito tale percorso.

Voglio ringraziare tutti i componenti dell'Istituto che per vie diverse mi hanno aiutato, sia in modo diretto, seguendomi durante tutto il corso di dottorato, scrivendo software di elaborazione delle immagini, accompagnandomi nelle campagne di rilievo, aiutandomi nelle elaborazioni statistiche, aiutandomi nella realizzazione/spostamento del Reometro, aiutandomi nelle analisi di laboratorio, sia in modo indiretto, con consultazioni di vario livello, con critiche e osservazioni, dimostrazioni d'interesse.



Voglio ringraziare anche i colleghi di Padova che mi hanno dato preziosi consigli, i colleghi spagnoli che mi hanno ospitato per il periodo all'estero trascorso a Barcellona nel 2009, e tutte le persone all'esterno dell'Università che mi hanno dato una mano nello svolgimento delle attività del lavoro di dottorato.



Il sottoscritto dichiara che la presente tesi è frutto esclusivo del suo lavoro e che, a sua conoscenza, non contiene materiale precedentemente pubblicato o scritto da un'altra persona né materiale accettato per un concorso o per qualunque altro tipo di diploma universitario o altra istituzione di istruzione superiore, eccetto nei casi in cui ciò è riportato nel testo”

Bergamo, 25 Novembre 2010.





## Indice

1	INTRODUZIONE .....	13
2	I DEBRIS FLOW .....	17
2.1	Definizioni e fenomenologia .....	17
2.2	EVOLUZIONE.....	23
2.2.1	L'innesco.....	23
2.2.2	Il trasporto .....	24
2.2.3	L'arresto .....	25
2.3	Classificazione.....	28
2.3.1	Classificazione fisica.....	28
2.3.2	Classificazione reologica.....	36
2.4	FORMULE EMPIRICHE.....	38
2.4.1	Calcolo della magnitudo.....	38
2.4.2	Stima della portata massima.....	42
2.4.3	Velocità del flusso.....	44
2.4.4	Profondità di flusso massima.....	46
2.4.5	Dimensione e assortimento dei detriti .....	47
2.4.6	Travel distance .....	47
2.4.7	Distanza di run-out potenziale.....	47
2.4.8	Reach Angle .....	49
2.4.9	Forza d'impatto potenziale.....	50
2.4.10	Area occupata dal deposito .....	51
2.5	Formule empiriche di laboratorio .....	52
2.6	RUOLO DEI BOSCHI NELLA DIFESA DAI FENOMENI DA COLATA DETRITICA.....	53
2.6.1	Introduzione .....	53
2.6.2	La selvicoltura nelle foreste di protezione.....	54
2.6.3	Classificazione delle foreste di protezione .....	55
2.6.4	Caratteristiche delle foreste di protezione .....	55
2.6.5	Tecniche selvicolturali nelle foreste di protezione .....	58
3	MATERIALI E METODI .....	60
3.1	Introduzione.....	60
3.2	Modellazione fisica a scala di laboratorio .....	60
3.2.1	Apparecchiature descritte in letteratura.....	60
3.2.2	Scalatura.....	62
3.3	Apparecchiatura utilizzata nelle prove.....	64
3.4	Parametri per la scalatura del bosco.....	68
3.5	Esecuzione delle prove .....	74

3.6	Analisi dei risultati .....	77
3.7	Svolgimento delle prove .....	77
4	Risultati .....	80
4.1	Prima serie di prove .....	80
4.1.1	Considerazioni sulla prima serie di prove .....	90
4.2	Seconda serie di prove .....	91
4.2.1	Considerazioni sulla seconda serie di prove .....	98
4.3	Confronti fra prima e seconda serie di prove .....	99
4.4	Terza serie di prove .....	104
4.5	Quarta serie di prove .....	108
4.6	Quinta serie di prove .....	111
4.6.1	Prove con piano di deposizione a pendenza variabile con elementi .....	114
4.6.2	Prove con piano di deposizione a pendenza variabile, senza elementi .....	117
4.6.3	Confronto tra prove eseguite con e senza elementi .....	120
4.7	Sesta serie di prove .....	126
4.7.1	Prove con piano di deposizione a pendenza variabile con elementi .....	127
4.7.2	Confronto tra prove eseguite con e senza elementi .....	130
5	Discussione dei risultati .....	132
5.1	Parametri del deposito in relazione alla concentrazione volumetrica .....	132
5.2	Confronti tra le diverse configurazioni .....	134
5.3	Confronto con le formulazioni empiriche .....	141
5.3.1	Larghezza deposito – Run Out .....	141
5.3.2	Run Out funzione del baricentro e della concentrazione volumetrica .....	142
5.3.3	Run out funzione dell'energia cinetica e della concentrazione volumetrica .....	146
5.3.4	Equazione di Vandre .....	150
5.3.5	Dispersione laterale massima .....	151
5.3.6	Stima della distanza totale planimetrica .....	152
6	DISCUSSIONE .....	154
7	BIBLIOGRAFIA .....	155
8	Appendice A: parametri e indici per il calcolo della magnitudo .....	163
8.1	Indice geologico .....	163
8.2	Indice di Trasporto .....	167
8.3	Indice di Erosione ed indice di Frana .....	167
9	APPENDICE B: valori del numero di Froude calcolati per le prove sperimentali effettuate con il reometro di Milano .....	168
10	APPENDICE C: analisi granulometriche dei materiali utilizzati .....	170

## Sommario

Nell'ambiente montano, uno dei problemi più importanti è la sicurezza delle popolazioni che vi vivono stabilmente ed occasionalmente. Uno dei fenomeni più pericolosi è rappresentato dai debris flow, o colate di detrito, che consistono in un flusso ad alta velocità di materiale solido e acqua, che tipicamente si origina dalle pendici o dai piccoli impluvi, s'incanala nelle valli e raggiunge le conoidi di deposizione depositando talvolta ingenti quantità di materiale, investendo e spesso distruggendo tutto ciò che incontra lungo il suo percorso.

L'uomo nel corso degli anni ha sviluppato una serie di tecniche per limitare i rischi derivanti da questo fenomeno, che spesso consistono in grandi opere in grado di arrestare la colata attesa. Tali opere sono molto onerose ed impattanti e non possono essere realizzate su tutto il territorio; inoltre, non sempre costituiscono una garanzia assoluta di protezione dei centri abitati. In alternativa alle opere classiche, e solo su eventi di ridotta dimensione in termini di volume del materiale trasportato, da alcuni anni è stata rivalutata l'azione del bosco, come elemento di protezione in grado di mitigare la capacità distruttiva dei debris flow.

Le amministrazioni di alcune regioni italiane dell'arco alpino e degli stati confinanti che si sono trovate ad affrontare il problema, hanno rivalutato l'importanza della copertura forestale ed in alcuni casi hanno anche prodotto materiale tecnico per la corretta gestione dei boschi di protezione; ancora non vi sono, invece, studi di carattere applicativo quantitativi sull'argomento ed anche quelli scientifici sono assai limitati.

Nel presente lavoro si è voluto testare l'effetto del bosco sulla fase d'arresto delle colate utilizzando un apparato sperimentale a scala di laboratorio, per verificare quanto la presenza di vegetazione arborea possa essere rilevante ai fini della sicurezza delle zone montane. Dagli esperimenti condotti si è dimostrato quale sia l'effetto di riduzione in termini di distanza percorsa dalla colata e area investita dai depositi (che sono due fra i più importanti fattori caratteristici delle colate). Sebbene le problematiche relative all'invarianza di scala di questo tipo di fenomeni, non li rendano immediatamente utilizzabili a livello applicativo, i risultati ottenuti hanno dimostrato come l'effetto del bosco in fase di deposizione possa essere rilevante, a patto che esso abbia determinate caratteristiche di densità. Ciò assume un particolare rilievo in termini gestionali, supportando da un punto di vista quantitativo le indicazioni meramente qualitative ed empiriche che stanno emergendo nell'ambito delle cure minime per i boschi di protezione.

Il mantenimento dei boschi di protezione in uno stato efficiente, anche se il loro valore di macchiatico è negativo, risulta infatti un elemento fondamentale in una moderna strategia di difesa del suolo in ambito montano.

## Abstract

Debris flows, a flowing mixture of sediments, water, air and other materials, are one of the most destructive events in mountain areas: damaged buildings, interrupted infrastructures, fatalities are only some examples of their effects . In Northern Italy, for example, 36% of fatality events in the field of hydro-geo-morphological hazards is represented by debris flows.

Alluvial fans, which have been just built by debris flow events occurred in the past, in fact, are areas where human activities (homes, factories, etc.) have always been developed. People living in mountain areas, in this way, must adopt expensive and impacting technical devices to prevent or to mitigate this phenomena. When the magnitude of debris flow is quite small, the protective capability of forests can be used to mitigate their destructive power. Due to the cost and to the environmental impact associated to the technical works, public administration in some areas of the Alps developed knowledge and guidelines to manage forests in a protection perspective. Few studies concerning the quantification of the protection effect, however, have been carried out especially for debris flow phenomena.

In the present work small scale tests have been carried out in order to quantify the wood's effect in the process of debris flows deposition. Results, in particular, show that trees can significantly influence deposit's run out and area (two of the main debris flow's deposition parameters), if their density is appropriate with respect to debris flow characteristics.

Such evidence should represent the starting point for future researches which aspire to develop guidelines for protection forest's maintenance in mountain areas.

## 1 INTRODUZIONE

Le conoidi, frutto dell'azione di deposito dei torrenti, sono una delle zone montane più densamente popolate e da sempre sede di attività umane; nel passato essi costituivano una zona strategica per la localizzazione del mulino che richiedeva la vicinanza al torrente per poter sfruttare l'energia della corrente, oggi la loro vicinanza al fondovalle e quindi la facilitazione dei trasporti, li rende particolarmente interessanti per le attività produttive.

Il pericolo derivante dalla colonizzazione delle conoidi non è solo una questione del passato, quando la scarsa conoscenza dei fenomeni torrentizi poteva contribuire alla costruzione in zone pericolose, ma è purtroppo una questione attuale; i grandi interessi legati all'attività edilizia, ad esempio, incidono sui meccanismi di espansione urbanistica più di quanto possa incidere la consapevolezza che certe zone siano da lasciare indisturbate o quantomeno con una adeguata fascia che faccia da cuscinetto ai processi naturali, alle possibili esondazioni dei torrenti. Un esempio per tutti è il nucleo di nuove case in costruzione proprio sulla traiettoria della colata detritica avvenuta nel 2009 a Bormio (Figura 1).



**Figura 1: colata di detrito in località Bagni Nuovi - Bormio: è ben visibile il nucleo di nuove costruzioni che si trovano sul conoide originato molto probabilmente da colate precedenti, come quella del 1992.**

Quello delle colate detritiche è un fenomeno molto diffuso nel mondo: dalle Alpi (ad esempio la grande colata detritica del Torrente Chieppena, in Valsugana nel 1966 di oltre 1 milione di m<sup>3</sup> depositati sul conoide per un fronte di oltre 1 Km Figura 3; Cerato, 2000) alle Montagne Rocciose (Bateman et al., 2006), dagli Appennini (Zanchetta et al., 2004) alla costiera caraibica del Venezuela (ad esempio l'evento alluvionale del Dicembre 1999, che sul conoide del Bacino del Cerro Grande

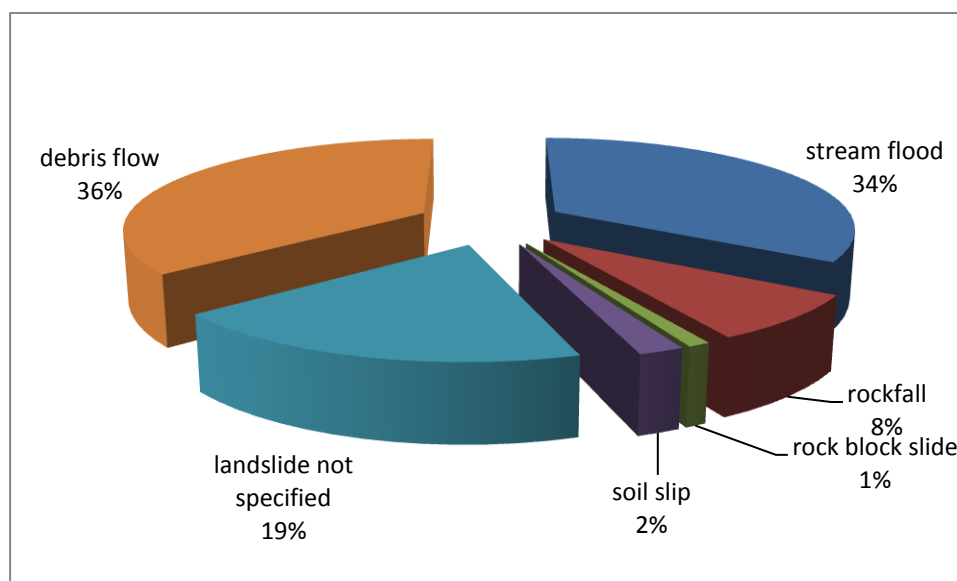
causò 15000 morti nella città di Tanagarana; Gröndahl, 2008), dal Giappone (Takahashi, 1991) alla catena Hymalayana (Seong et al., 2009). Anche se con caratteristiche diverse ed intensità variabili, gli effetti sono simili, ed i debris flow costituiscono un fenomeno che spesso causa ingenti danni e a volte anche morti. La periodicità irregolare del ripetersi di questi avvenimenti, che varia da torrente a torrente, e la frequenza di accadimento talora molto ridotta che caratterizza anche quei torrenti con deflusso intermittente, provocano una scarsa percezione del rischio da parte della popolazione che abita la zona, rendendo ancora più drammatiche le conseguenze.

Per quanto riguarda l'Italia, dal progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia; [www.sinanet.apat.it/progettoiffi](http://www.sinanet.apat.it/progettoiffi)) emergono dati che mostrano l'abbondanza di fenomeni franosi e dei colamenti rapidi (Tabella 1); da tale indagine, in particolare, risulta che la Regione Lombardia è sede del maggior numero di "colamenti rapidi", sia su versanti che su aste torrentizie (APAT, 2007).

Da un recente studio di Tropeano e Turconi (2004) sulla mortalità dovuta a fenomeni naturali (frane, fenomeni torrentizi), inoltre, emerge che il 36% degli eventi fatali è rappresentato dai debris flow (Figura 2).

**Tabella 1: dati relativi ai rilevamenti dei movimenti franosi effettuati da ogni regione (valori aggiornati a dic 2005/gen 2006; APAT, 2007)**

Regione	fenomeni franosi censiti	colamenti rapidi		area montano collinare	n° colamenti rapidi/Km <sup>2</sup> in area montano-collinare	I.F. indice di franosità (area in frana tot / area montano-collinare)
	n°	n°	%	Km <sup>2</sup>		
Lombardia	130.540	53.521	41%	11.061	4,839	29,904
Piemonte	35.023	3.152	9%	18.950	0,166	13,400
Veneto	9.476	1.792	19%	7.268	0,247	3,060
P.A.Trento	9.385	751	8%	5.962	0,126	14,740
Friuli Venezia Giulia	5.253	813	15%	3.451	0,236	14,800
Valle D'Aosta	4.359	305	7%	3.262	0,094	16,000
P.A.Bolzano	1.995	448	22%	7.399	0,061	6,260



**Figura 2: percentuale di eventi fatali in funzione del tipo di dissesto o fenomeno torrentizio negli ultimi 150 anni nel Nord Italia (Tropeano e Turconi, 2004)**

L'interesse delle amministrazioni locali e non, e il moltiplicarsi di studi che hanno ampliato le conoscenze sulla fenomenologia del dissesto, hanno consentito di mettere a punto metodologie di valutazione della pericolosità e nuove tipologie di opere di difesa, che hanno consentito di ridurre i danni provocati dai debris flow e quindi l'aumento della sicurezza di quelle popolazioni che abitano le zone a rischio.

Con la maggior sensibilità ambientale che è andata sviluppandosi negli ultimi decenni e con le restrizioni di bilancio di cui soffrono tutte le amministrazioni, sia italiane che straniere, negli ultimi anni si è riscontrata una sempre maggiore attenzione al recupero del soprassuolo forestale come elemento di protezione dei territori montani.

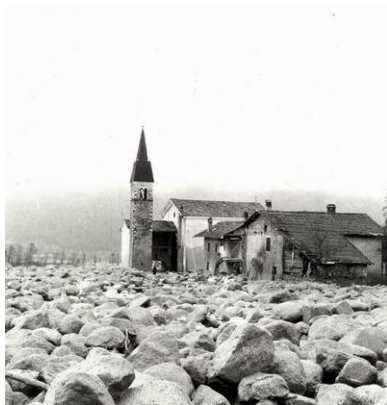
Le attività agro-silvo-pastorali, oltre ad essere un'attività produttiva, svolgono anche un'importante funzione di manutenzione del territorio garantendo una corretta regimazione delle acque ed interventi di sistemazione puntuali. La diminuzione delle aziende agricole montane che si è verificata negli ultimi anni ha portato ad un esteso abbandono di superfici a rischio di degrado o in situazioni di transizione verso superfici boscate poco stabili, sia dal punto di vista ecologico che idrogeologico. Al contrario, quando l'evoluzione del soprassuolo forestale è correttamente indirizzata, essa esalta la funzione protettiva dei boschi, con particolare riferimento ai versanti che si trovano a monte dei centri abitati e delle infrastrutture.

Entrando nello specifico, la presenza di queste aree boscate, oltre a contribuire alla buona regimazione delle acque meteoriche, in termini di migliore infiltrazione dell'acqua nel suolo ed evapotraspirazione, partecipa attivamente alla stabilità dei versanti contribuendo in diversi modi ad aumentare la coesione del terreno. Il bosco, inoltre, interviene nell'intercettazione nei fenomeni di caduta massi piuttosto che valanghe e, in certi casi, di colate detritiche. Questa serie di funzioni, nel complesso, portano ad identificare tali boschi nella categoria dei "boschi di protezione" e rappresentano una componente fondamentale per la buona gestione del territorio montano.

In particolare, in prossimità dell'alveo e nella zona apicale della conoide dove può verificarsi l'avulsione dei fenomeni di trasporto di massa, i boschi possono influenzare la normale dinamica della fase di arresto dei debris flow, che rappresentano uno dei fenomeni torrentizi più distruttivi che colpiscono le zone montane.

A tale riguardo, tuttavia, le conoscenze sull'effettiva efficacia del bosco e su quali caratteristiche possono essere maggiormente efficaci nel favorire l'arresto delle colate detritiche, sono ancora scarse.

Scopo del presente lavoro è quello di contribuire a colmare almeno parzialmente tali lacune, attraverso l'esecuzione di prove di colata su modello fisico di laboratorio a piccola scala, in grado di simulare anche la presenza di elementi arborei sul piano di deposizione.



**Figura 3: depositi in Villa Agnedo risultanti dall'evento di debris flow del 1966 (Servizio Sistemazione Montana della Provincia Autonoma di Trento)**



## 2 I DEBRIS FLOW

Le colate detritiche o debris flow, rappresentano un fenomeno piuttosto complesso; per affrontarne lo studio è necessario partire dalle conoscenze acquisite fino ad oggi in merito al loro comportamento fisico. La descrizione di questo fenomeno, la caratterizzazione dei parametri relativi alla dinamica di flusso all'interno del canale ed alla fase di arresto, oltre alle proprietà reologiche della mistura (termine che più si avvicina all'anglosassone "mixture" usato in molte pubblicazioni per indicare il materiale costituente la colata detritica) sono tutti elementi necessarie per poterne studiare il comportamento e le interazioni in presenza di un bosco.

### 2.1 Definizioni e fenomenologia

I fenomeni di colata si manifestano con modalità molto differenti ed anche nel caso delle colate detritiche le definizioni non sono univoche.

I "flussi d'acqua e materiale solido con concentrazione volumetrica dei sedimenti tale da non poter più assimilare il loro movimento a quello dell'acqua, a causa di una viscosità di diversi ordini di grandezza più elevata" sono, secondo D'Agostino (2006), fenomeni riconducibili a debris flow. Una descrizione più succinta che descrive le colate dal punto di vista dinamico e reologico è quella di Hungr et al. (2001) che definisce, all'interno della classificazione dei movimenti di massa, i Debris Flow come "rapidissimi fino ad estremamente rapidi flussi di detriti saturati non plastici in alvei pendenti". Altre interpretazioni di questo fenomeno sono: "tipo di movimento di massa che coinvolge acqua, materiale organico e inorganico prevalentemente granulare grossolano, che fluisce rapidamente lungo un canale preesistente ripido e confinato" (Van Dine, 1996), per arrestarsi sul conoide di deiezione del bacino ( tale definizione, tuttavia, non viene considerata l'aria fra gli elementi che partecipano alla formazione della massa in movimento); e "manifestazione parossistica con trasporto impulsivo di sedimenti lungo la rete idrografica secondaria" (Cesca, 2008).

Diversi termini sono utilizzati per tradurre "debris flow": colata detritica torrentizia, colata di detriti, lava torrentizia, lava fredda, trasporto torrentizio in massa, lave torrentielle, coulée de débris; in questa ricerca cercherò di utilizzare i due termini "debris flow" e "colata detritica" per indicare univocamente il fenomeno.

I debris flow consistono in una lingua di sedimenti in movimento che può essere suddivisa in diversi settori, (Gröndahl 2008, Ancey 2001) come riportato in Figura 4. Si possono dunque distinguere:

- un **fronte** o **testa** di colata che è la prima parte del flusso, costituito dalla parte più grossolana dei detriti, spesso massi ciclopici, che funge da apripista e presenta uno spessore maggiore rispetto al resto della colata;
- Il **corpo** di colata, che segue la testa, con altezza del flusso pressoché uniforme e materiale costituente più fine rispetto il fronte e che appare più fluido, presenta ondate instabili. A volte il debris flow si muove in modo completamente laminare, ma più frequentemente mostra un moto turbolento;
- La **coda** che rappresenta la parte terminale del flusso, dove la concentrazione diminuisce significativamente ed il flusso si comporta come acqua fangosa turbolenta.

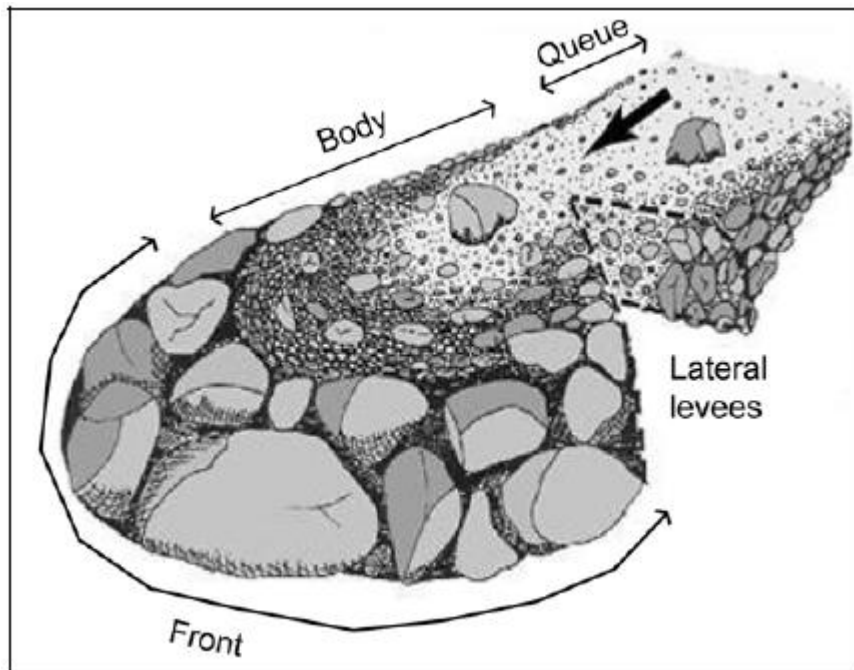


Figura 4: schema rappresentativo del debris flow tipico. (Bardou, 2002, in Gröndahl 2008)

Una caratteristica particolare dei depositi da debris flow è la **gradazione inversa**: essa consiste nella presenza di materiale grossolano vicino alla superficie, e materiale via via più fine avvicinandosi alla base del deposito (Malet et al. 2003, Hungr et al. 2001).

Hungr (2001) parla anche di **gradazione longitudinale** indicando che lo stesso processo della gradazione inversa sul piano verticale combinato con un forte gradiente di velocità nello spessore del flusso spesso provoca l'assortimento longitudinale, ovvero la concentrazione nella zona frontale di materiale grossolano e legnoso, e l'aumento di presenza di materiale più fine allontanandosi dal fronte in direzione della coda.

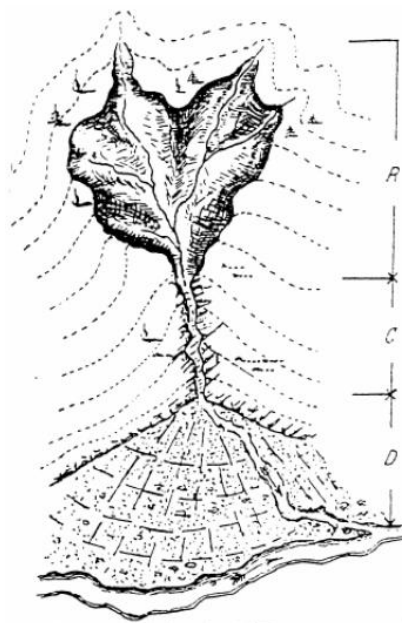
Lateralmente alla traiettoria del debris flow si formano argini dovuti alla deposizione del materiale che si trova nella parte esterna al flusso, materiale fine trasportato a livello del fronte ma anche cordoni di materiale più grossolano sulla cresta dell'argine; questa deposizione avviene quando le particelle del corpo di colata fluiscono più velocemente della testa e spingono i ciottoli più leggeri nella direzione degli argini, o quando il flusso non è confinato.

A livello del corpo si può osservare talvolta una parte di materiale che si muove in modo coordinato senza subire rimescolamenti.

La *normale evoluzione* di un debris flow consiste in diverse fasi:

- innesco, avviene nella parte alta del bacino detta anche zona di alimentazione o testata (zona R in Figura 5, spesso zona interessata da franamenti),
- trasporto lungo l'alveo del torrente, canale collettore o adduttore (zona C in Figura 5) spesso in erosione al fondo (detta anche aratura) e con la genesi di nuove aree contribuenti lungo le sponde e la deposizione di argini laterali,
- arresto, che solitamente avviene in conoide (zona D in Figura 5), in genere subito dopo la classica strozzatura, in roccia o meno, che caratterizza la parte apicale dell'area di deposito dei detriti prodotti dal bacino.

Questo schema è chiaramente molto generico e suscettibile di variazioni proprio per la natura imprevedibile del fenomeno.



**Figura 5: schema degli spazi di sviluppo di un debris flow (D'Agostino 2006)**

L'innesco e l'alimentazione della colata possono essere causati da materiale proveniente da più aree sorgente che provocano diverse onde di colata: per alcuni eventi sono state contate fino a un centinaio di aree sorgente; nell'area alpina questo numero è molto minore, riducendosi nei casi peggiori a 6 (Gröndahl, 2008).

Le aree soggette al fenomeno dei debris flow sono principalmente:

- l'area alpina;
- le aree con clima arido;
- le aree vulcaniche.

Classicamente l'ambiente in cui si sviluppano i debris flow è il torrente che è stato definito da Ancey (2001) come corso d'acqua con pendenze medie superiori al 6%, con un caratteristico abbondante apporto di detrito e con piene che, viste le dimensioni del bacino idrografico in cui si trovano tipicamente (0,1 – 100 km<sup>2</sup>), sono improvvise, di breve durata e violente.

Gli indizi che suggeriscono la presenza di attività collegata ai debris flow sono le tipiche forme morfologiche derivanti dalla deposizione:

- lobature (depositi a forma di lobo);
- trovanti (grandi massi presenti in area di conoide);
- fronti di colata (ammassi disordinati di pietrame di grandi dimensioni);
- alveo pensile (alveo confinato da argini che superano il livello di campagna).

La grandezza che meglio descrive un debris flow è la *magnitudo*, cioè il volume di materiale coinvolto dal movimento di massa, che è espresso in metri cubi; consultando la bibliografia, emerge molto chiaramente come questo parametro possa coprire un intervallo di valori molto ampio. Alcuni autori, fra i quali Jakob (2005), propongono sistemi di classificazione in cui i debris flow vengono suddivisi in classi che vanno dai piccoli fenomeni di alcune migliaia di m<sup>3</sup>, fino all'estremo dei fenomeni più disastrosi che raggiunge il milione di m<sup>3</sup>.

Caratteristica saliente del *materiale trasportato* dai debris flow è l'ampiezza della curva granulometrica del sedimento che lo compone, contenendo dall'argilla finissima a massi di dimensioni nell'ordine delle centinaia di metri cubi e della massa che può raggiungere le 2000 tonnellate.

Per quanto riguarda la composizione dei debris flow gli autori non concordano nei limiti che li distinguono da altri tipi di movimenti di massa; anche allo stesso modo la *quota di acqua* contenuta nella mistura viene indicata variare dal 20 al 40% (concentrazioni volumetriche tra 80% e 60%) secondo alcuni autori (Lorenzini e Mazza 2004, Coslop 2001) mentre secondo altri tra il 30 al 70% (concentrazioni volumetriche tra 70 % e 30%; D'Agostino, 2006).

Il *peso specifico* del materiale che costituisce la colata è compreso fra 2000 e 2200 Kg/m<sup>3</sup> (Coslop 2001) fino 2600 Kg/m<sup>3</sup> (Gröndahl, 2008).

In genere l'evento di debris flow è molto rapido e si esaurisce in un *intervallo di tempo* che dura da 15 a 30 minuti come riportato in molti articoli che descrivono eventi reali (Ghilardi et al., 2001, Zanchetta et al., 2004)

Sembra esistere una certa stagionalità del fenomeno: secondo Stoffel (2010) i mesi nei quali è massimo lo sviluppo dei debris flow sono luglio ed agosto e secondo Coslop (2001) il 66% degli eventi si verifica nei mesi fra luglio e settembre.

La *frequenza di accadimento* dei debris flow (anche se non è corretto parlare di frequenza o tempo di ritorno per i fenomeni franosi) non dipende solo dall'intensità della pioggia dell'evento scatenante e quindi dalla portata del corso d'acqua, ma anche da una serie di fattori che nella combinazione ideale creano le condizioni necessarie al loro innesco: le condizioni meteorologiche locali, le condizioni di umidità antecedenti l'evento, sia in termini di pioggia che di neve cumulata, il profilo longitudinale del canale, la presenza di detriti nel canale e la presenza di meccanismi di innesco all'interno del bacino.

Piuttosto che assegnare una frequenza di accadimento assoluta del fenomeno all'interno di un certo bacino, è meglio stimare una *probabilità relativa di ricorrenza* per un certo numero di corsi d'acqua in un'area geografica. A tal fine i fattori da considerare includono la frequenza degli eventi passati, il carattere dei bacini di drenaggio, dei torrenti, e delle conoidi confrontandoli con i bacini nei quali notoriamente originano debris flow. Con questa definizione si valuta che in una certa area geografica, che raccoglie più bacini idrografici aventi simili caratteristiche geomorfologiche, litologiche, pedologiche, di uso del suolo e caratteristiche meteorologiche si avrà una certa probabilità che in un certo periodo si verifichi un evento di debris flow.

Van Dine (1996) propone cinque categorie di probabilità relativa di ricorrenza con relativa descrizione, riportate in

Tabella 2.

**Tabella 2: categorie di probabilità relativa di ricorrenza dei debris flow (Van Dine, 1996)**

Categoria	Descrizione
4	ALTISSIMA PROBABILITA' DI ACCADIMENTO: debris flow di minore magnitudo rispetto a quella prevista (che si verifica con tempo di ritorno ridotto) possono ricorrere frequentemente. Categoria entro cui ricadono bacini idrografici nei quali si sono verificati più eventi di magnitudo $> 500m^3$ .
3	ALTA PROBABILITA' DI ACCADIMENTO: i debris flow si verificano meno frequentemente rispetto la categoria 4 ma l'evento con magnitudo previsto si verifica con tempo di ritorno ridotto. Categoria entro cui vengono classificati bacini nei quali si è verificato un singolo debris flow o in cui non se ne sono verificati ma che presentano caratteristiche predisponenti il verificarsi.
2	MODERATAMENTE ALTA PROBABILITA' DI ACCADIMENTO: il debris flow previsto può ricorrere durante la vita a lungo termine di una infrastruttura (ponte, edificio). Categoria nella quale sono classificati i bacini con caratteristiche fisiche predisponenti l'innescò dei debris flow non marcate, e che non presentano nella loro storia eventi riconducibili a debris flow.
1	BASSA PROBABILITA' DI ACCADIMENTO: bacini potenzialmente poco predisposti all'innescò di debris flow, dove le caratteristiche fisiche rasentano i limiti minimi considerati per l'innescò. Anche se l'evento è possibile durante la vita di una struttura a lungo termine, l'altezza di flusso necessaria all'innescò è decisamente inusuale.
0	PROBABILITA' NULLA: non c'è il rischio di grossi debris flow; nella parte alta del bacino e nei bacini secondari sono possibili fenomeni locali e di ridotta magnitudo; le caratteristiche del bacino sono ben sotto la soglia minima considerata per l'innescò dei debris flow.

È nota la relazione inversa che lega magnitudo e frequenza di accadimento: minore è la magnitudo e maggiore è la frequenza con la quale il fenomeno si ripete all'interno dello stesso bacino (Jakob 2005, Stoffel 2010). Ovviamente è una regola generale che non è valida per tutte le situazioni, ma che ha trovato parecchi riscontri. In alcuni casi la frequenza degli eventi è anche annuale (Ancy 2001).

Alcuni autori (Johnson e Warburton, 2003) parlano di frequenza riferendosi ad un ben definito ambito territoriale, che non consiste nel singolo bacino idrografico, ma in zone che possono essere estese anche centinaia di km<sup>2</sup>.

Interessante è la citazione tratta da un lavoro del Servizio Sistemazione Montana della Provincia Autonoma di Trento (che, come è noto, ha una lunga esperienza nell'ambito del controllo dei fenomeni di colata detritica): "*piene e fenomeni di disgregazione della medesima portata si verificano, nello stesso bacino imbrifero, con modalità pressoché analoghe*" (Kettl W., 1994).

L'analisi *storico-geomorfologica* rappresenta un iniziale strumento di indagine per definire la frequenza con la quale nel passato si sono verificati eventi di debris flow, e per delimitare le aree esposte a pericolo. Le fonti e i metodi impiegati sono la consultazione della bibliografia e dei documenti storici, l'interpretazione di foto aeree e la ricognizione in campo. Fra i metodi disponibili si ricordano:

- metodo di Aulitzky ha lo scopo di interpretare i "testimoni silenziosi" di eventi passati come lobi di deposizione e ferite sulla vegetazione, e si compone di una serie di quesiti per conoscere dimensione del materiale trasportato/eroso presente sul conoide, massimo spessore del singolo strato dei depositi, pendenza del conoide, copertura vegetale, morfologia del terreno in funzione dell'alveo e condizione di deflusso dell'acqua. Con questo metodo si può definire l'indice di torrenzialità del bacino di studio (tipo di trasporto solido che può verificarsi) e classificare qualitativamente la pericolosità delle varie zone del conoide come in Tabella 3.

**Tabella 3: livello di pericolosità in funzione dell'indice di pericolo calcolato con l'indice di Aulitzky (Marchi, 2006)**

Indice di pericolo	Livello di pericolosità
I.P. $\geq$ 2,6	Alto (vincolo assoluto all'edificazione)
1,6 $\leq$ I.P. $<$ 2,6	Medio (edificazione con restrizioni)
I.P. $<$ 1,6	Basso (edificazione senza vincoli)

La check list di 6 domande + 5, che compone l'analisi multifattoriale del metodo di Aulitzky è riportata Appendice A: parametri e indici per il calcolo della magnitudo.

- metodo della frequenza probabile derivata da una procedura proposta dall'Ufficio Bundesamt für Umwelt Wald und Landschaft (BUWAL) della confederazione elvetica, e stima la pericolosità delle aree coinvolte in passato da fenomeni di dissesto in base alle caratteristiche di questi ultimi. Nel caso di debris flow si valutano spessori e velocità deducibili da tracce morfologiche rimaste sul campo e da documenti storici e la possibile ricorrenza .

## 2.2 EVOLUZIONE

Riferendosi a quanto avviene in alveo, durante l'evento di debris flow si possono individuare diverse fasi evolutive (Bardou 2002, in Gröndahl, 2008):

- fase pre-evento: un'onda d'acqua precede l'arrivo del debris flow;
- fase di fronte: il fronte è la parte più lontana del flusso. È preceduto da un flusso iperconcentrato e viene sempre seguito dal corpo e dalla formazione degli argini laterali, ma non necessariamente separato da una coda rispetto all'onda seguente;
- la fase principale: durante la quale fluisce la parte più consistente della colata; gli argini laterali si formano se la topografia del canale segue il debris flow;
- fase finale: la coda segue il corpo, il flusso è passato e il canale inizia a riempirsi di depositi; massi isolati rotolano nel canale;
- fase post evento: l'alveo è sgomberato; il materiale proveniente dall'erosione degli argini o dei depositi, viene portato a valle dall'acqua.

Dal punto di vista più generale, invece, è opportuno distinguere: innesco, trasporto e arresto. Di seguito vengono approfondite le diverse fasi di evoluzione considerando che la *pendenza* gioca un ruolo fondamentale.

### 2.2.1 L'innesco

L'innesco dei debris flow è riconducibile ad alcuni meccanismi principali, derivanti in ogni caso dalla presenza di ingenti quantitativi di acqua combinata alla disponibilità di materiale movimentabile connesso all'alveo (il materiale presente in alveo può derivare dalla movimentazione di settori del quaternario sommitale non solo di origine gravitativa ma anche legati a fenomeni valanghivi, come anche dalla disgregazione di ammassi rocciosi sovrastanti il bacino (falde detritiche), o per eventi eccezionali come incendi e tagli che predispongono il versante a un'erosione accelerata); tali meccanismi sono:

- *intensi apporti idrici* rappresentati da piogge intense, rapido scioglimento delle nevi nel periodo primaverile o scioglimento dei ghiacciai nel periodo estivo, scioglimento di nevi/ghiaccio dovuto all'attività vulcanica, che contribuiscono ad una portata di piena straordinaria che movimentata il materiale presente nelle incisioni vallive ed erode il materiale di fondo dell'alveo trasformandosi in debris flow;
- *cedimento di ostruzioni* temporanee che hanno causato accumulo di materiale in alveo e causano l'onda di piena improvvisa; un fenomeno simile si può verificare in occasione del cedimento di opere di sistemazione idraulico-forestale o altre opere montane in stato di deperimento o mal costruite (ad esempio il caso della Val di Stava 19 luglio 1985, in cui il crollo di un bacino minerario innescò una colata detritica che distrusse completamente la frazione di Stava e parte del paese di Tesero causando la morte di 269 persone

(Dellagiacomma, 1990)) o anche per il cedimento di laghetti periglaciali (Coussot e Meunier, 1996);

- forti pendenze dei terreni che costituiscono il bacino sui quali si possono verificare *scivolamenti superficiali* o più generalmente movimenti di massa su versante (debris avalanche) che raggiungendo l'alveo evolvono in debris flow grazie all'aumento di pendenza o all'aumento di frazione liquida (Coussot & Meunier 1996, Ancey 2001).

Ancey (2001) individua una soglia di magnitudo a seconda del meccanismo di innesco del fenomeno: nel caso di innesco da erosione al fondo dell'alveo il debris flow può raggiungere una magnitudo di 100.000 m<sup>3</sup>; nel caso di scivolamento la magnitudo può superare questo valore.

E' stato preso in considerazione da molti autori il collegamento tra evento pluviometrico innescante e accadimento del debris flow ma senza trovare un valore soglia cui attribuire l'innescamento; D'Agostino (1996b) ritiene opportuno riferirsi ad un evento con tempo di ritorno compreso tra i 150 e i 200 anni, con una durata critica dell'evento fra i 10 minuti e le 3 ore, in funzione all'estensione del bacino.

Spesso lo scivolamento superficiale che innesca il debris flow interessa la parte apicale del corso d'acqua; in questi casi, nella zona d'innescamento si osserva chiaramente come il canale si allarghi e si approfondisca vistosamente rispetto al tratto immediatamente a monte. All'inizio dell'incisione profonda, il canale può presentare le fattezze di un'erosione di tipo gully, con una scarpata molto ripida in corrispondenza della testata del gully (D'Agostino 1996b).

Le aree di innesco dovrebbero essere individuate durante le fasi di redazione dei piani di bacino, caratterizzando oltre la quantità di potenziale materiale detritico, anche le caratteristiche granulometriche dello stesso, il grado di incisione dell'alveo, fattori predisponenti il dissesto e le caratteristiche geolitologiche che possono favorire la formazione di sedimento (faglie, zone milonitiche, fratture, ecc.).

La predisposizione del bacino a ospitare colate deriva dalla presenza di materiali non consolidati e dalla pendenza di fondo dell'alveo che deve essere:  $\alpha > 25^\circ$  (47%) secondo Van Dine (1996), mentre per Marchi (2006)  $\alpha > 15^\circ$ , anche se più frequentemente l'innescamento avviene per  $25^\circ < \alpha < 45^\circ$ ; in alcuni studi è stata individuata una pendenza limite dei versanti oltre la quale i debris flow sembra si verificano con maggiore frequenza. Nel caso di Johnson e Warburton (2003) tale pendenza corrisponde a 21,8°; Ancey 2001 sostiene che versanti con pendenza di 35° (70%) sono esposti a erosione e scivolamenti che contribuiscono apportando materiale in alveo.

### 2.2.2 Il trasporto

Una volta innescato, il debris flow tendenzialmente percorre tutto il reticolo principale fino a raggiungere la conoide di deiezione dove spesso esce dall'alveo (avulsione) spargendosi su un'ampia area arrestandosi. Questo flusso si svolge secondo la meccanica dei fluidi non Newtoniani.

Durante il trasporto è noto il fenomeno dell'*entrainment* che consiste nell'erosione al fondo operata dal debris flow: il passaggio della massa di detriti in movimento esercita una forza di attrito al fondo tale da asportare il materiale non consolidato, spesso portando in superficie il substrato. Per il trasporto con erosione la pendenza di fondo dell'alveo deve essere  $> 15^\circ$  (27%) (Van Dine 1996).

Questo fenomeno è collegato anche al rapporto fra dimensione media del materiale che costituisce il fondo dell'alveo e dimensione media del materiale che compone la colata detritica (Egashira et al. 2001).

Approfondendo il discorso in merito alla pendenza del fondo dell'alveo, è importante dire che esiste una pendenza "stabile" ovvero un valore di pendenza del fondo che una volta raggiunto, poste certe condizioni, si mantiene impedendo fenomeni di erosione e deposizione. Più in particolare, Brufau et al. (2000) dicono che, assumendo la concentrazione solida volumetrica del debris flow costante, la "velocità di erosione/deposizione",  $i$ , è assunta funzione della velocità della mistura,  $U$ ; a partire dal modello proposto da Egashira e Ashida (1987) Brufau et al. (2000) scrivono:

$$i = UK_E t g (\vartheta_f - \vartheta_e)$$



Dove  $K_E$  è un coefficiente sperimentale (pari a 1 nel lavoro di Egashira e Ashida citato da Brufau et al. 2000, pari a 0,1 nel lavoro di Brufau et al. 2000). La velocità d'erosione/deposizione sarà positiva o negativa a seconda che si tratti rispettivamente di erosione o deposizione.

Nella formula precedente sono stati introdotti due termini che sono l'angolo della linea di energia e l'angolo di equilibrio dell'alveo.

**L'angolo della linea di energia:**

$$\vartheta_f = \arctan \left[ \frac{S_f}{\cos \vartheta} \right]$$

Dove  $\vartheta$  è la pendenza dell'alveo e  $S_f$  è il fattore di attrito. Il fattore di attrito per fluidi con concentrazione dei solidi importante ( $c > 0,2$ ) viene definito da Takahashi (1991) con la seguente espressione:

$$S_f = \frac{u^2}{\left( \frac{2}{5} \frac{1}{\lambda} h \right)^2 \frac{1}{a_B \sin \alpha} \left[ c + (1 - c) \frac{\rho_l}{\rho_s} \right] g R_h}$$

Dove  $u$  è la velocità della massa in movimento,  $d$  è il diametro effettivo medio,  $h$  è l'altezza della parte di canale bagnato,  $a_B$  è una costante empirica (assunta pari a 0,042, in Bagnold (1954)),  $\rho_l$  è la densità dell'acqua,  $\rho_s$  è la densità del sedimento, ed  $R_h$  è il raggio idraulico;  $\lambda$  è la concentrazione lineare che dipende dalla granulometria dei solidi, in formula:

$$\lambda = \left( \left( \frac{c^*}{c} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right)^{-1}$$

Dove  $c^*$  è la concentrazione della frazione grossolana nel letto di detriti statico.

**L'angolo di equilibrio dell'alveo:**

$$\vartheta_e = \arctan \left[ \tan \varnothing \frac{c(s - 1)}{c(s - 1) + 1} \right]$$

Dove  $\varnothing$  è l'angolo di attrito interno statico del materiale che costituisce la mistura,  $c$  è la concentrazione della mistura, ed  $s$  è il rapporto fra la densità della frazione solida,  $\rho_s$ , e la densità della frazione liquida,  $\rho_l$ :

$$s = \frac{\rho_s}{\rho_l}$$

L'angolo di equilibrio dell'alveo è un importante parametro che dipende principalmente dalla concentrazione della mistura e dal rapporto fra densità dell'acqua e della fase solida. Quando la pendenza dell'alveo ha raggiunto l'angolo di equilibrio non si avrà erosione o deposizione e sarà stata raggiunta una situazione di stabilità del fondo (Mambretti et al., 2008). Questa affermazione è ovviamente da valutare in funzione del fatto che, soprattutto in bacini in cui l'evento è poco frequente, sarà molto difficile che il debris flow si presenti sempre con la medesima concentrazione, e quindi sarà altrettanto difficile che venga raggiunto l'angolo di equilibrio. La tesi sostenuta nell'articolo citato si adatta meglio nella situazione in cui il torrente presenta una certa frequenza nell'ospitare fenomeni di trasporto di massa (torrenti Trentini, come il Rio Moscardo, presentano anche frequenza annuale o maggiore (D'Agostino e Marchi, 2001)).

### 2.2.3 L'arresto

In genere il debris flow conclude il suo spostamento nell'area di conoide, anche se già durante la fluitazione lungo l'alveo, in corrispondenza di strozzature, curve o riduzioni di pendenza può abbandonare i materiali più grossolani ai bordi dell'alveo formando i caratteristici argini con *cordoni di massi*.

In genere la deposizione avviene a valle di sezioni critiche dove si può osservare la tipica formazione di lobi costituiti dai detriti; le caratteristiche misurate di questi depositi sono la distanza massima di run-out e la massima dispersione frontale: questi due parametri stanno in un rapporto tale che solitamente la dispersione frontale (B) è minore della metà del run-out (R). In formula:

$$B < \frac{R}{2}$$

I fattori principali della deposizione di un debris flow sono:

- riduzione della pendenza del canale;
- perdita delle caratteristiche di confinamento del flusso;
- impedimento al flusso, inteso come ostacolo presente in alveo;
- avulsione e seguente spargimento delle congerie;
- forte cambiamento di direzione dell'alveo;
- perdita d'acqua da parte della "mistura" che costituisce il debris flow: ciò provoca la modifica delle caratteristiche reologiche della massa, rallentandola fino a farla arrestare.

La deposizione per forte riduzione di pendenza senza aumento della larghezza del canale è stata studiata da diversi ricercatori che hanno definito dei rapporti per l'individuazione di tali pendenze. Per la deposizione parziale, ovvero per strati successivi, la pendenza della superficie del terreno deve essere  $<15^\circ$  (27%)(Van Dine 1996) e per la deposizione su conoide la pendenza deve essere  $<10^\circ$  (18%)(Van Dine 1996); Marchi (2006) indica un valore di pendenza  $< 8^\circ - 16^\circ$ , anche se mediamente è inferiore a  $8^\circ - 10^\circ$ , per l'inizio dell'arresto;

Takahashi (1983) scrive:

$$\frac{\tan\theta_d}{\tan\theta_u} < \frac{\tan\alpha}{\tan\phi'}$$

Dove:  $\theta_d$  è la pendenza del canale a valle del punto di variazione della pendenza,  $\theta_u$  è la pendenza del canale a monte del punto di variazione della pendenza,  $\alpha$  è l'angolo di attrito interno cinetico dei detriti,  $\phi'$  è l'angolo di attrito interno statico dei detriti.

All'interno delle "Specifiche tecniche finalizzate alla redazione degli studi di bacino" della Regione Valle d'Aosta (Assessorato territorio, ambiente e opere pubbliche, Dipartimento territorio ambiente e risorse idriche), vengono indicati i campi di pendenza all'interno dei quali il debris flow rallenta fino ad arrestarsi. Si riportano in Tabella 4 i valori.

**Tabella 4: valori di pendenza in fase di arresto dei debris flow non confinati**

Pendenza media del piano di scorrimento	Comportamento del debris flow
$\theta > 10^\circ$	La colata subisce un rallentamento trascurabile
$6^\circ < \theta < 10^\circ$	La colata subisce un sensibile rallentamento
$0^\circ < \theta < 6^\circ$	La colata si arresta entro un breve spazio
$\theta < 3^\circ$	La colata si arresta

Ancey (2001) identifica in 10% - 25% l'intervallo nel quale si osserva la decelerazione del debris flow.

Quindi un "testimone muto" dell'origine da debris flow di una conoide è la sua pendenza che come valore minimo risulta  $3^\circ - 4^\circ$  (Marchi 2006).

Johnson e Rodine (1984) (in Van Dine, 1996) scrivono che la deposizione in canale senza allargamenti ricorre quando viene raggiunto uno spessore critico  $T_c$ :

$$T_c = \frac{c}{(\gamma \cos\theta (\tan\theta - \tan\phi))}$$

Dove:  $c$  è la forza coesiva dei detriti,  $\gamma$  è il peso unitario dei detriti,  $\theta$  è la pendenza del canale,  $\phi$  è l'angolo di attrito interno dei detriti.

Anche per quanto riguarda il secondo fattore della deposizione, perdita di confinamento del flusso, sono stati sviluppati studi per comprendere quali siano i parametri influenti, in particolare la connessione con la pendenza. Affinché la deposizione avvenga in flussi confinati in canale, la pendenza deve essere minore di 8-12° (14-21 %) mentre per flussi non confinati deve essere minore di 10-14° (17-25 %) (Hungry et al. 1984, in Van Dine 1996). Ikeya (1976) (in Van Dine, 1996) scrive che con pendenze del conoide originato da debris flow minore a 10° (18%), la deposizione ricorre se il flusso si allarga 2 o 3 volte rispetto la larghezza di flusso in canale; più in generale afferma che un allargamento di 5 o 6 volte provoca l'arresto.

Mizuyama e Uehara (1983) (in Van Dine, 1996), formulano la seguente equazione per definire il punto in cui probabilmente avverrà la deposizione in corrispondenza di un allargamento del canale senza variazione di pendenza del fondo:

$$B_d = KQ^{\frac{1}{2}}$$

Dove:  $B_d$  è la larghezza del deposito del debris flow in corrispondenza di canale non confinato,  $K$  è una variabile adimensionale che può assumere valori compresi fra 3,5 e 7,  $Q$  è la portata del debris flow.

Hungry et al (1987) (in Van Dine, 1996) sottolinea la soglia di pendenza dei 18° sotto la quale il confinamento del flusso diventa fattore più critico della pendenza stessa, per il mantenimento del flusso.

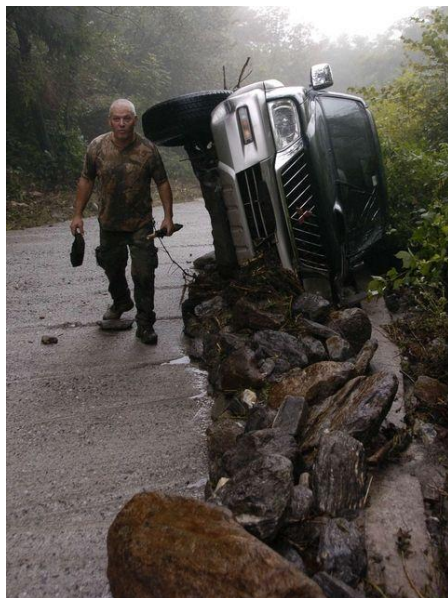
L'impedimento al flusso è rappresentato da ostacoli naturali come alberi, grossi massi e precedenti depositi di frane, e da impedimenti artificiali come strade, ponti, edifici e costruzioni sul conoide di deiezione del bacino oltre a tutte le possibili opere di sistemazione che possono essere costruite lungo l'alveo (briglie filtranti principalmente).

Le *forme del deposito* prodotto durante l'arresto di un debris flow possono essere molto diverse in funzione delle caratteristiche dei detriti, del conoide, delle caratteristiche dell'asta torrentizia e della presenza di ostacoli. Le principali forme di deposito sono:

- lobi su conoide: serie di rami nei quali si divide il flusso di detriti, che terminano con forma lobata caratteristica. Lo spessore dei lobi è stata indagata nella British Columbia per eventi di magnitudo pari a 10.000-50.000 m<sup>3</sup> con il risultato di un range fra 1 e 1,5 m, mentre per eventi di simile magnitudo avvenuti in Europa, Innis (1983) rileva spessori di 1,1-1,7 m (Van Dine, 1996). D'Agostino (2006) individua per un evento di magnitudo pari a 130000 m<sup>3</sup> uno spessore di 7-8 m nel deposito. Baroni et al. (2007) da uno studio effettuato su una conoide della valle Camonica (conoide della Valle d'Avio, gruppo dell'Adamello, Brescia) individua l'angolo di deposito dei lobi da debris flow da un valore massimo di 26° all'apice del conoide a un valore minimo di 11° nella parte più distale.
- deposito in alveo dei sedimenti trasportati con occlusione parziale o totale della sezione; quando è parziale i depositi vengono accumulati sul fondo o a ridosso delle sponde; quando è totale i depositi formano un lobo confinato che causa l'aumento del livello del flusso e la conseguente avulsione del debris flow, che di conseguenza varia la sua traiettoria di discesa sul conoide;
- argini pensili oltre il livello dell'alveo.

L'*avulsione* spesso ha luogo in quei punti in cui si ha restringimento dell'alveo (vicino all'apice del conoide) o dove insistono infrastrutture come ponti o guadi mal progettati che non lasciano sufficiente spazio per il possibile passaggio della massa di congerie in movimento che, altrettanto spesso, vengono deviati sulle strade adiacenti l'alveo che diventano veri e propri scivoli per il debris flow in direzione del centro abitato (per esempio l'incidente accaduto nel 2009 al conducente del pick-up in

Figura 6 ,fortunatamente rimasto illeso). Altri punti critici per l'avulsione della colata detritica sono i tratti intubati, tratti di canale pensile, punti di forte curvatura dell'alveo, tratti di torrente in deposizione, presenza di paleo alvei potenzialmente riattivabili.



**Figura 6: immagine del Pick-up travolto da un'onda di materiale che uscito dal torrente Perlino ha percorso la strada laterale al torrente in direzione del centro abitato. (foto di Sandonini - Dervio - per "La Provincia di Sondrio")**

Le *caratteristiche dei depositi* sono la tipica pezzatura grossolana del materiale, l'assenza di una stratificazione ben definibile, e l'ampiezza delle classi granulometriche entro le quali si possono classificare le congerie.

Per quanto riguarda la deposizione dei debris flow granulari, sono state proposte in letteratura formule che mettono in relazione la superficie potenzialmente inondabile dai detriti (B) con la magnitudo (V); in particolare Griswold (2004) propone la seguente formula:

$$B = 20V^{2/3}$$

## 2.3 Classificazione

La *classificazione* dei debris flow è complessa e articolata: se basata su caratteristiche fisiche spesso si rivelano limitate e poco coerenti, mentre se basate sulle caratteristiche del flusso sono difficili da utilizzare nella pratica.

In letteratura esistono diverse classificazioni dei debris flow; quando vengono prese in considerazione la natura del materiale coinvolto, le proporzioni fra acqua e materiale solido, e altre caratteristiche fisiche lo scopo è quello di differenziare i debris flow da fenomeni simili (earth flow, mud flow, solifluction, debris avalanche, grain flow, debris flood); quando invece si fanno distinzioni sul tipo di flusso che si osserva dal punto di vista reologico, allora lo scopo è quello di conoscere il meccanismo che governa lo scorrimento dei materiali coinvolti.

### 2.3.1 Classificazione fisica

Le caratteristiche dell'evento considerate per le varie classificazioni sono (Van Dine, 1996):

- composizione in termini di quota di acqua e di frazione solida;
- composizione in termini di granulometria prevalente nella frazione solida;
- composizione in termini di origine litologica del materiale che costituisce la colata;
- velocità del flusso;
- ambito di propagazione (canalizzati o non canalizzati);

- meccanismi di innesco;
- caratteristiche del bacino idrografico nel quale si sviluppano;
- rugosità relativa dell'alveo;
- durata dell'evento;
- pendenza dell'alveo;
- comportamento del materiale;
- processi fisici che si verificano durante il flusso.

Per una prima distinzione, come riportato da Coussot e Meuner (1996), rispetto un flusso iperconcentrato, i caratteri distintivi di un debris flow sono la natura transizionale (il flusso si presenta come serie di ondate), la vicinanza al comportamento meccanico di un fluido monofasico (Ancey 2001) viscoso, la porzione di frazione solida che può andare dal 50 al 90%, e la struttura del deposito molto eterogenea.

Rispetto uno scivolamento o una valanga di detriti, il debris flow si distingue dal punto di vista dinamico, presentando velocità fra 0,5 m/s e 10 m/s (che risultano maggiori di uno scivolamento e minori di una valanga di detriti/rocce), dal punto di vista del tipo di movimento, poiché mentre lo scivolamento mantiene la forma del materiale che trasla, il debris flow modifica completamente il materiale trasportato.

Distinguendo per tratti la colata, la velocità di un debris flow è stata misurata da ricercatori giapponesi e può variare da 10 – 15 m/s fino 20m/s (Coslop 2001, Hungr et al. 2001, Ancey 2001) nei tratti di monte, ai 2 – 7 m/s nella zona di scorrimento uniforme, fino a 1 – 3 m/s nella zona prossima a quella di deposizione, e anche valori inferiori per alcuni autori (0,0001m/s e 0,03m/s per Lorenzini e Mazza, 2004).

A partire dalle classificazioni di Varnes (1978) e Hutchinson (1988), Hungr (2001) propone una classificazione dei fenomeni di flusso, all'interno della quale descrive i debris flow come segue. Innanzi tutto sottolinea la distinzione fra flusso e scivolamento, ovvero flusso quando si tratta di massa in movimento nella quale avvengono distorsioni interne, mentre scivolamento quando gli strati della massa in movimento letteralmente scivolano uno sopra l'altro. Secondariamente distingue il tipo di materiale, ovvero la terra, quando si tratta di materiale con meno del 20% di ghiaia e clasti di maggiori dimensioni (diametro soglia dei grani pari a 2 mm), e il detrito quando questa percentuale è maggiore del 20%. Per quanto riguarda la distinzione fra debris flow e earth-flow, Hungr definisce come limite il 30% in contenuto di limo e particelle più fini per i debris flow, e il carattere non plastico o debolmente plastico.

I debris flow sono movimenti che possono svilupparsi in onde successive e hanno la caratteristica chiave di muoversi in un canale o traiettoria definita; da qui nasce un fattore di caratterizzazione della canalizzazione che è stato quantificato dallo stesso autore in:

$$\text{fattore di canalizzazione} = \frac{\text{larghezza canale}}{\text{profondità media canale}} < 5$$

Il rapporto massimo deve essere pari a 5 per mantenere in movimento una colata con fronte di materiale grossolano su pendenza lieve. Spesso questi canali sono alvei classificati come reticolo di primo o secondo ordine, oppure gully che definiscono la direzione del flusso dei debris flow che si verificano come processo ricorrente. Quando si tratta di canali di secondo ordine possono concentrare colate provenienti da più zone sorgente.

La presenza di un canale è importante per diversi motivi:

- la presenza di un canale durante la pioggia innescante un debris flow presuppone la presenza di acqua all'interno di esso, e quindi la diluizione del materiale trasportato dalla colata che corrisponde alla riduzione della concentrazione volumetrica;
- il confinamento laterale delle sponde del canale costringe la colata a percorrere la discesa fino al conoide mantenendo uno spessore del flusso considerevole. Tale spessore facilita la gradazione longitudinale del materiale; inoltre il confinamento laterale accentua il comportamento per "ondate" della colata;

Un ulteriore carattere distintivo dei debris flow è la portata al picco che può corrispondere a 10 volte la portata liquida di picco del massimo evento di piena che può verificarsi nel torrente in questione (Van Dine dice anche 40 volte la portata di piena con tempo di ritorno 200 anni); tale caratteristica, unitamente alle dimensioni del materiale trasportato ed alla densità, conferisce alle colate detritiche un elevato potere distruttivo.

Il tipo di materiale influisce sulle caratteristiche del debris flow: zone con substrato cristallino o rocce metamorfiche tendono a sviluppare debris flow composti da detriti grossolani che possono anche non contenere la frazione argillosa, e contenere principalmente massi di grandi dimensioni.

Coussot 1992 (in Lorenzini e Mazza, 2004) distingue i debris flow in due categorie principali:

- D.F. granulari: costituiti da una frazione solida grossolana costituita da sabbia, ciottoli e rocce, contenente meno del 10% di particelle fini (diametro < 40 µm) assimilabile ad un flusso bifasico;
- D.F. muddy: costituiti da una frazione solida fine (limo e argilla) importante, rappresentata dal 10% di particelle fini.

Coussot e Meunier (1996) presentano una classificazione basata su due parametri: frazione solida e liquida costituenti il materiale fluitato, e il tipo di materiale, coesivo o granulare. Per quanto riguarda il primo criterio, frazione solida in volume o peso, la distinzione fra fenomeni diversi non è rigidamente legata a valori soglia, anzi è piuttosto qualitativa. Per quanto riguarda il secondo criterio gli autori distinguono il comportamento molto differente fra particelle argillose coesive e ciottoli non coesivi in acqua, ovvero fra scivolamenti con importanti contenuti di materiale coesivo e le valanghe di detrito in cui la frazione argillosa è trascurabile. Gli autori presentano uno schema come riportato in Figura 7.

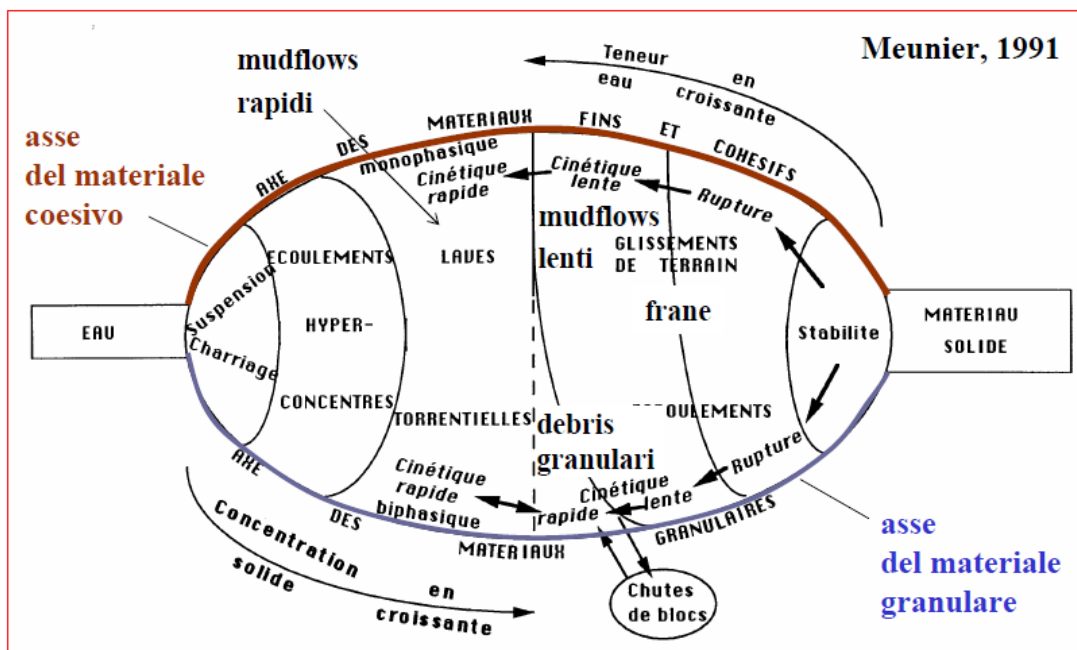
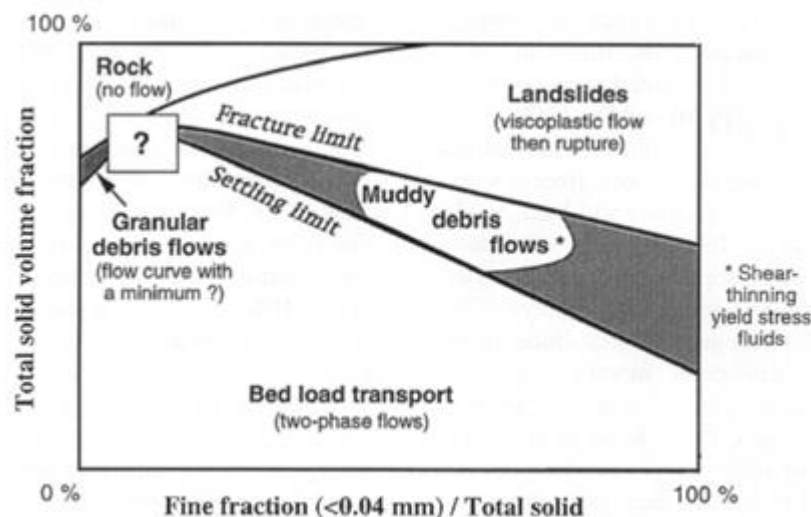


Figura 7: classificazione di Meunier (Coussot e Meunier, 1996; movimenti di massa su versanti molto ripidi; rivisitata da D'Agostino (2006)

Da tale schema spostandoci sull'asse dei materiali granulari nel senso della concentrazione solida crescente, si nota che si passa da sospensioni, a flussi iperconcentrati, a debris flow, e poi a frane a cinetica lenta fino ad arrivare a crepe nel materiale e materiale stabile; lo stesso sull'asse dei materiali fini e coesivi. Analizzando invece lo schema nel senso verticale, si nota che si passa da mud flow a debris flow, con tutti i casi intermedi che si possono annoverare.

Nello stesso studio, gli autori inseriscono un secondo schema (Figura 8), dicendo che per ogni materiale è necessario ricercare l'esatto confine fra le suddivisioni presentate. Da questo tipo di schema si può notare quanto ridotto sia il campo di pertinenza dei debris flow.



**Figura 8:** concettuale classificazione reologica dei movimenti di massa come funzione del contenuto in materiale fine e frazione solida. L'esatto limite fra le diverse parti del diagramma possono essere determinate per ogni materiale e possono essere variare leggermente con le caratteristiche del flusso (Coussot e Meunier, 1996).

Dalla consultazione di alcune classificazioni proposte in letteratura, D'Agostino (2006) presenta lo schema riportato in Figura 9, nel quale si può apprezzare la difficoltà nella classificazione dei debris flow notando la discrepanza che esiste fra i limiti di classificazione dei vari autori.

Fonte	C = Percentuale di materiali solidi nel volume. Peso specifico sedimenti rispetto all'acqua 2.65									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Beverage e Culbertson (1964)	Trasp. alto	Trasp. estremo	CORRENTI IPERCONCENTRATE				COLATE DI FANGO			
Costa (1984)	ONDATE D'ACQUA		CORRENTI IPERCONCENTRATE			COLATE DI DETRITO				
NRC, da O'Brien e Julien (1984)	ONDATE D'ACQUA		ONDATE DI FANGO		COLATE DI FANGO	FRANE				
Takahashi (1981)			COLATE DI DETRITO O COLATE GRANULARI				FRANE CROLLI COLAMENTI LENTI			

●—————→ Velocità decrescente

**Figura 9:** confronto fra classificazioni di autori diversi (D'Agostino, 2006)

I debris flow vengono classificati anche in base all'altezza del deposito e alla velocità raggiunta dal flusso, sempre che si riesca a misurarla o stimarla. In

Tabella 5, vengono presentati i valori limite proposti da Rickenmann (2001) e B.U.W.A.L (in D'Agostino 2006).



**Tabella 5: classificazioni dell'intensità dei debris flow (D'Agostino 2006)**

Autore	Intensità bassa	Intensità media	Intensità alta
Rickenmann (2001)	h deposito < 0,5 m e V < 0,5 m/s	h deposito < 1,5 m e 1 m/s < V < 1,5 m/s	h deposito > 1,5 m o V > 1,5 m/s
BUWAL (1997)	Nessun flusso	h deposito < 1m o V < 1 m/s	h deposito > 1m o V > 1m/s

Una volta identificato il fenomeno come debris flow, esso può venir classificato come proposto da Jakob (2005) in base a magnitudo o meglio il volume di detrito depositato in conoide, portata al picco e area invasa dal deposito. La classificazione che viene proposta in Jakob (2005) ha lo scopo di identificare la pericolosità di un bacino nell'ottica della pianificazione del rischio a scala regionale, per valutare quindi la dimensione e la frequenza del fenomeno. È una classificazione che contiene 10 classi, delle quali le prime 5 corrispondono a debris flow da bacino idrografico, mentre le seconde 5 riguardano debris flow che si sviluppano in ambiente vulcanico. In

Tabella 6 sono presentati i parametri principali che caratterizzano le classi.

**Tabella 6: classificazione dei Debris Flow in base a Magnitudo, Portata al picco ed Area interessata dal deposito (Jakob, 2005)**

Parametro	V - Volume	Q - Portata al picco	B – area inondata da detrito	Conseguenze potenziali
Classe	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /s	m <sup>2</sup>	
1	<10 <sup>2</sup>	<5	<4x10 <sup>2</sup>	Danni localizzati, vittime solo in caso di lavoratori in bosco, danni a piccoli edifici
2	10 <sup>2</sup> -10 <sup>3</sup>	5-30	4x10 <sup>2</sup> -2x10 <sup>3</sup>	Auto seppellite, distruzione di piccoli edifici in legname, abbattimento alberi, otturazione luci dei ponti, deragliamento treni
3	10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>	30-200	2x10 <sup>3</sup> -9x10 <sup>3</sup>	Distruzione di grandi edifici, danni a pilastri in cemento di ponti, blocco o danni a strade principali e infrastrutture
4	10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup>	200-1500	9x10 <sup>3</sup> -4x10 <sup>4</sup>	Distruzione di parti di paesi, distruzioni di parti di infrastrutture, ponti, ostruzione di piccole valli
5	10 <sup>5</sup> -10 <sup>6</sup>	1500-12000	4x10 <sup>4</sup> -2x10 <sup>5</sup>	Distruzione di parti di città, distruzione di foreste da 2 km <sup>2</sup> , ostruzione di bacini e piccoli fiumi

In particolare la **classe 1** descrive debris flow che si sviluppano in piccoli canali e trasportano materiali di piccole pezzature; essi possono originarsi in canale o da piccoli scivolamenti, ma anche da crolli di roccia. Limitazione all'alimentazione solida, frazione liquida insufficiente o rapido drenaggio per presenza di materiale colluviale grossolano e a bassa pendenza ne determinano un rapido arresto. Sono debris flow tipici di piccoli gully o ambiti collinari. Debris flow con magnitudo minori sono di limitato interesse pratico.

Alla **classe 2** afferiscono debris flow che si sviluppano in piccoli bacini che spesso sono limitati per quanto riguarda l'alimentazione in materiale solido. Questo tipo di fenomeni richiede quindi un significativo periodo di ricostituzione del deposito disponibile, e di conseguenza presentano una frequenza di accadimento piuttosto ridotta.

Piogge intense che si verificano su grandi aree possono innescare centinaia di migliaia di debris flow afferenti alle classi 2 e 3, che, nel caso di piogge forti e localizzate innescanti debris flow appartenenti a classi superiori, possono rimanere quiescenti. Debris flow classificati nelle classi 1 e 2 raramente sono descritti in letteratura poiché i casi di studio sono focalizzati sugli eventi più distruttivi e spettacolari (Jakob 2005).

La **classe 3** include un range di magnitudo tipico delle colate detritiche (come afferma Stoffel (2010) dicendo che un range di valori di magnitudo tipico è 1000-5000) che corrisponde a frequenze di accadimento decennali in bacini idrografici con alimentazione solida limitata. Sono eventi difficilmente riconoscibili come eventi pericolosi poiché il loro tempo di ritorno in piccoli bacini (<5 km<sup>2</sup>) può estendersi per decenni ed i testimoni silenziosi come lobi di massi, segni degli impatti sugli alberi, o gli argini lasciati in alveo possono essere erosi o coperti da altri depositi.

La **classe 4** possono aver luogo negli stessi bacini in cui si sviluppano colate della classe 3, ma con periodi di ritorno di centinaia di anni per bacini con limitata alimentazione solida. Il limite superiore di questa classe rappresenta, per bacini di limitata alimentazione solida ed estensione maggiore a 5 km<sup>2</sup>, il limite massimo della magnitudo anche di eventi con tempi di ritorno millenari.

La **classe 5** è l'ultima associabile a debris flow granulari che comunque sono molto rari.

Ancey (2001) propone una classificazione, basata sul comportamento meccanico della massa, in tre famiglie principali:

- muddy debris flow: quando si tratta di materiale con ampia classe granulometrica, con buona percentuale di materiali argillosi, tanto da conferire un comportamento coesivo alla massa e lubrificare il contatto fra particelle grossolane. Il comportamento è viscoplastico: il livello di tensione è basso, il materiale si comporta come corpo solido, ma quando la tensione supera la tensione di snervamento, fluisce come un fluido;

- granular debris flow: la distribuzione granulometrica è ampia, c'è poco materiale fine. Il comportamento della massa è atteso essere di attrito-collisionale poiché dominato da collisioni e attriti fra particelle grossolane. La dissipazione di energia è maggiore rispetto al muddy debris flow, quindi sono necessarie pendenze maggiori del 15% per avere la fluitazione. I depositi sono facilmente riconoscibili per la disposizione caotica del materiale grossolano in superficie e per la gradazione orizzontale del materiale dovuta al drenaggio a valle del materiale più fine;

- lahar debris flow: la distribuzione granulometrica è piuttosto ristretta e la porzione di materiale argilloso è limitata. Si sviluppano in aree vulcaniche dove i suoli sono formati da cenere, ma anche dove i suoli sono gessosi o loess. Il comportamento della massa è atteso essere frizionale/viscoso; lo stress di snervamento è basso e quindi questi fenomeni possono fluire su superfici anche in leggera pendenza (1%).

In conclusione, la disponibilità di tanti sistemi di classificazione permette di scegliere quello che meglio si adatta alle finalità del lavoro che si sta conducendo, anche se sarebbe opportuno identificare una classificazione adatta ad ogni scopo riconosciuta universalmente.

### 2.3.2 Classificazione reologica

La **reologia** dei fluidi è la parola conosciuta per definire lo studio delle proprietà dei fluidi e delle deformazioni a cui i corpi sono soggetti quando una forza è applicata ad essi, ovvero la relazione fra stress interno al fluido e tensione/sforzo applicato ad esso. La reologia ha come principio quello che tutti i corpi reali possiedono proprietà che sono intermedie tra due comportamenti reali estremi, da una parte quello del solido perfettamente elastico e dall'altra quello del liquido perfettamente viscoso.

La meccanica dei fluidi newtoniani e la teoria classica dei corpi elastici, rappresentano gli estremi del campo di studio della reologia che si occupa dei corpi viscoelastici.

Lo studio delle caratteristiche reologiche dei debris flow riveste un ruolo fondamentale nell'ambito della loro modellazione matematica, che partendo dal concetto generale che esso si muove per gravità e dissipa l'energia potenziale che possiede attraverso (Cesca 2008):

- l'attrito col fondo;
- le dissipazioni localizzate dovute ad ostacoli;
- gli urti reciproci tra particelle del flusso;
- l'energia necessaria a modificare l'alveo in cui scorre.

Nell'ambito della reologia gli spostamenti e le deformazioni vengono studiati in funzione del tempo sfruttando 3 principi fondamentali:

- conservazione della massa,
- conservazione dell'energia,
- conservazione della quantità di moto.

Nello studio dei debris flow vengono considerate equazioni costitutive che descrivono proprietà fisiche dei fluidi in varie condizioni.

La dissipazione dell'energia posseduta dalle congerie in movimento avviene grazie alle tensioni tangenziali fra le particelle del fluido o alle tensioni tangenziali fra fluido e contorno. Queste tensioni possono essere di origine:

- turbolenta: collegate alla velocità di agitazione turbolenta che inducono trasferimenti di quantità di moto tra strati fluidi a diversa velocità media di trasporto (prevalgono tensioni tangenziali);
- viscosa: collegate, in funzione del coefficiente di viscosità, alle velocità angolari di deformazione delle particelle fluide (prevalgono tensioni di origine viscosa).

Per rappresentare la reologia di una miscela acqua-sedimento, in funzione della quantità di materiale solido contenuto e le caratteristiche del materiale stesso, si possono assumere diversi comportamenti tipo, riportati in Figura 10.

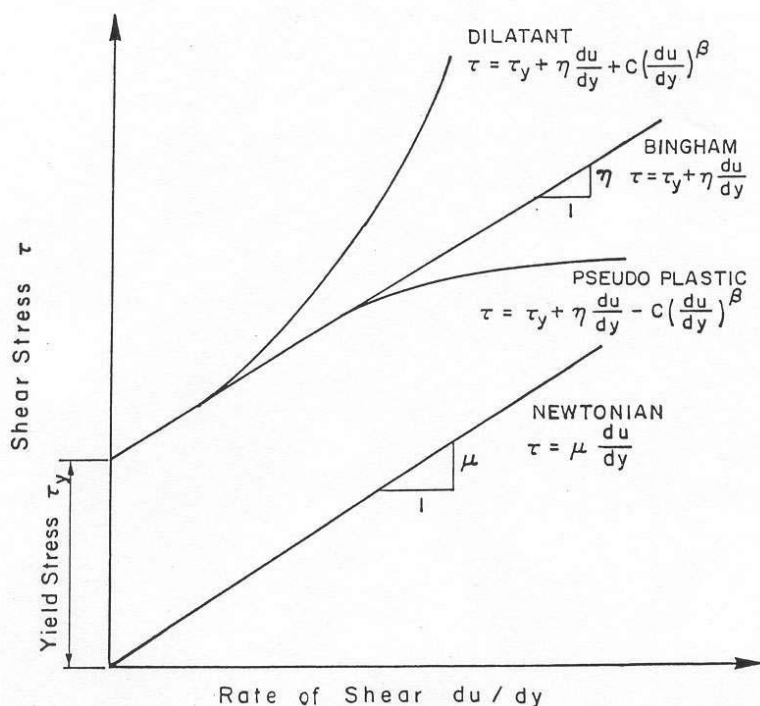


Figura 10: comportamento tipo (reologia) dei principali fluido (D'Agostino, 2006)

Per fluidi a bassa concentrazione di sedimento si può assumere il modello del *fluido newtoniano*, per il quale l'equazione dello sforzo di deformazione è lineare con l'intercetta all'origine; in altre parole un fluido è newtoniano se la relazione fra stress applicato e quota di taglio è costante. L'inclinazione dell'equazione che lega il gradiente di velocità allo sforzo tangenziale aumenta con l'aumentare della concentrazione di sedimento.

$$\tau = \mu * \frac{\partial v}{\partial y}$$

Dove:  $\tau$  è lo sforzo tangenziale,  $\mu$  è la viscosità dinamica (Pa \* s).

In funzione delle caratteristiche della colata detritica si possono scegliere i modelli reologici che meglio rappresentano il fenomeno:

- per i debris flow fangosi (muddy) vengono applicati i modelli Bingham o di Herschel Bulkley (Malet (2003) trova buona rappresentazione col modello Herschel Bulkley dei debris flow che originano da marne nere), i quali considerano il fluido viscoplastico (il materiale necessita di uno stress iniziale per fluire e ha uno stress di snervamento finito e una viscosità); oppure viene anche applicato il modello viscoso di Coulomb (lo stress di

snervamento è considerato come combinazione di forze di attrito e coesive). In questi modelli il flusso è assunto essere laminare. (Gröndahl, 2008).

- Per quanto riguarda i debris flow granulari, dove il flusso turbolento è dominante, si applica con successo il modello di Voellmy (Hürlimann, 2008). Lo studio dei debris flow granulari è basato sulla teoria della “mistura” dove la pressione interstiziale regola lo spargimento. I modelli frizionali e collisionali sono applicati nel caso di run-out granulari, nel quale il fluido è considerato bifasico (Gröndahl, 2008).

Cesca (2008) ritiene che i modelli reologici più interessanti per la descrizione dei debris flow sono:

- - modello viscoso Newtoniano;
- - modello viscoso plastico;
- - modello dilatante;
- - modello di Voellmy;
- - modello reologico quadratico.

## 2.4 FORMULE EMPIRICHE

Gli studi sviluppati per la redazione di formule empiriche predittive di parametri quantitativi relativi ai debris flow presenti in bibliografia sono innumerevoli: più applicative e pratiche le relazioni presentate in studi di enti pubblici desunte da empirismi che ben descrivono la realtà locale, più scientifiche e complesse le relazioni prodotte da studi di laboratorio che considerano più approfonditamente le caratteristiche dei debris flow. Le formule empiriche sono comunque da usarsi considerando che per loro stessa natura contengono l'incertezza delle regressioni statistiche e non possono essere applicate in tutte le situazioni, e soprattutto sono utili per una prima mappatura del rischio (D'Agostino et al., 2010). In questa parte del lavoro verrà presentata una serie di relazioni per la caratterizzazione dei principali parametri descrittivi dei debris flow.

### 2.4.1 Calcolo della magnitudo

Il parametro fondamentale per la caratterizzazione di un debris flow è la stima della magnitudo, ovvero del volume delle congerie che sono mobilizzate dal fenomeno atteso. In base a questo dato si procederà alla pianificazione e al dimensionamento delle opere di controllo. Diverse sono le formule per il calcolo della magnitudo; fra queste quelle che più si adattano al territorio montano dell'Italia settentrionale sono quelle di Bottino e Crivellari (1998), Bianco (1999), D'Agostino et al. (1996), Ceriani et al. (2000) che propongono una formula di calcolo che considera l'area del bacino idrografico e una serie di altri fattori, e Van Dine (1996), Hungr et al. (1984), che propongono il metodo geomorfologico.

Dall'analisi di 8 impluvi situati su depositi rissiani, litologicamente composti da ciottoli di varia natura e dimensioni, in matrice sabbio-argillosa, con elevato grado di addensamento e debole cementazione, valutando dati storici e di prove di laboratorio, Bottino G. e Crivellari, (1998) ottengono la seguente formula:

$$V_c = 21241 * A_{b(i)}^{0,2787}$$

Dove:  $V_c$  è il volume della conoide (del deposito) depositata dal debris flow ( $m^3$ );  $A_{b(i)}$  è l'area del bacino imbrifero (area di impluvio) ( $km^2$ ).

La formula può dare buoni risultati certamente nella zona in cui sono state fatte le esperienze per ricavarla, ma non è altrettanto logico aspettarsi che la medesima formula restituisca buoni risultati in altre aree.

Una formula più articolata, che considera anche la natura geologica e la pendenza dell'asta principale del torrente è quella di Bianco G. (1999) che avendo studiato casi di debris flow avvenuti in bacini Piemontesi, Trentini, Valdostani, Valtellinesi e Francesi, propone la seguente formula:

$$(G_s/A) \max/\min = (14000i^{(1,5-i)} * I.G.^{(1+0,1I.G.)}) \pm 13000A^{-0,4}$$

Dove:  $G_s/A$  max/min rappresenta il valore massimo e minimo della magnitudo specifica del bacino;  $i$  è la pendenza dell'asta principale (m/m); I.G. (-) è l'indice geologico che descrive la maggiore o minore predisposizione del bacino a produrre materiale (Appendice A: parametri e indici per il calcolo della magnitudo);  $A$  è l'area della superficie del bacino chiuso all'apice del conoide ( $Km^2$ ).

La formula di Bianco serve alla determinazione di un valore affidabile dell'ordine di grandezza del volume solido rilasciato in zona di conoide da un debris flow. La formula è adatta a fornire la stima della magnitudo in diverse situazioni ambientali e temporali, essendo stata dedotta da dati altrettanto distribuiti, ma con attenzione nella sua applicazione in condizioni ambientali particolari o con fattori antropici che possono influenzare fortemente il regime dei deflussi (presenza di cave per esempio).

Una formula ancora più articolata è quella di D'Agostino et. al., (1996), che rispetto le precedenti considerano anche la propensione di un certo bacino a produrre un certo tipo di trasporto solido (fra i quali anche il debris flow). Questa formula è basata sull'analisi di un gran numero di eventi accaduti in bacini montani di piccola e media estensione (< 10  $km^2$  tranne il torrente Chieppena – alluvione 1966, superficie 32,70  $km^2$ ) del Trentino Orientale:

$$G_s = 39 A * i^{1,5} * IG * IT^{-0,3}$$

Dove:  $G_s$  è la magnitudo ( $m^3$ );  $A$  è l'area del bacino ( $km^2$ );  $i$  è la pendenza (%); IG (-) è l'Indice Geologico che descrive la maggiore o minore predisposizione del bacino a produrre materiale (Appendice A: parametri e indici per il calcolo della magnitudo); IT è l'Indice di Trasporto (-) che qualifica la capacità di un bacino di trasportare il materiale erodibile e sotto che forma (Appendice A: parametri e indici per il calcolo della magnitudo).

La caratteristica saliente di questa formula rispetto le precedenti è la valutazione attraverso il *metodo di Aulitzky* del bacino idrografico.

Ceriani et. al. (2000) studiando un elevato numero di conoidi di Valtellina, Valle Camonica e Valchiavenna dove sono stati registrati eventi di fluitazione, ottengono la seguente formula:

$$M = k A_b M_b^{0,8} Scl_c I_F^{-2}$$

Dove:  $M$  è la magnitudo (migliaia di  $m^3$ );  $k$  è la costante di calibrazione determinata dalla tipologia di fenomeno atteso (-) pari a 5,4 per Debris flow, e 3 per Debris flood e Bedload; la predisposizione ad una tipologia di fenomeno piuttosto che ad un'altra viene determinata attraverso l'Indice di Melton e la pendenza in conoide;  $A_b$  è l'area planimetrica del bacino ( $Km^2$ );  $M_b$  è l'indice di Melton riferito al bacino (vedi spiegazione a seguire);  $Scl_c$  è la pendenza del collettore su conoide (%), ottenuto dal rapporto fra differenza di quota tra apice e unghia, e lunghezza planimetrica del canale in conoide;  $I_F$  è l'indice di frana che quantifica l'importanza dei fenomeni di instabilità e dei processi erosivi (Appendice A: parametri e indici per il calcolo della magnitudo).

L'Indice di Melton, (*Melton ruggedness number*)  $M_b$  o indice di torrenzialità, che definisce la tipologia di trasporto alla quale il bacino è predisposto, viene definito attraverso la seguente formula:

$$Me = \frac{H_{max} - H_{min}}{\sqrt{A_b}}$$

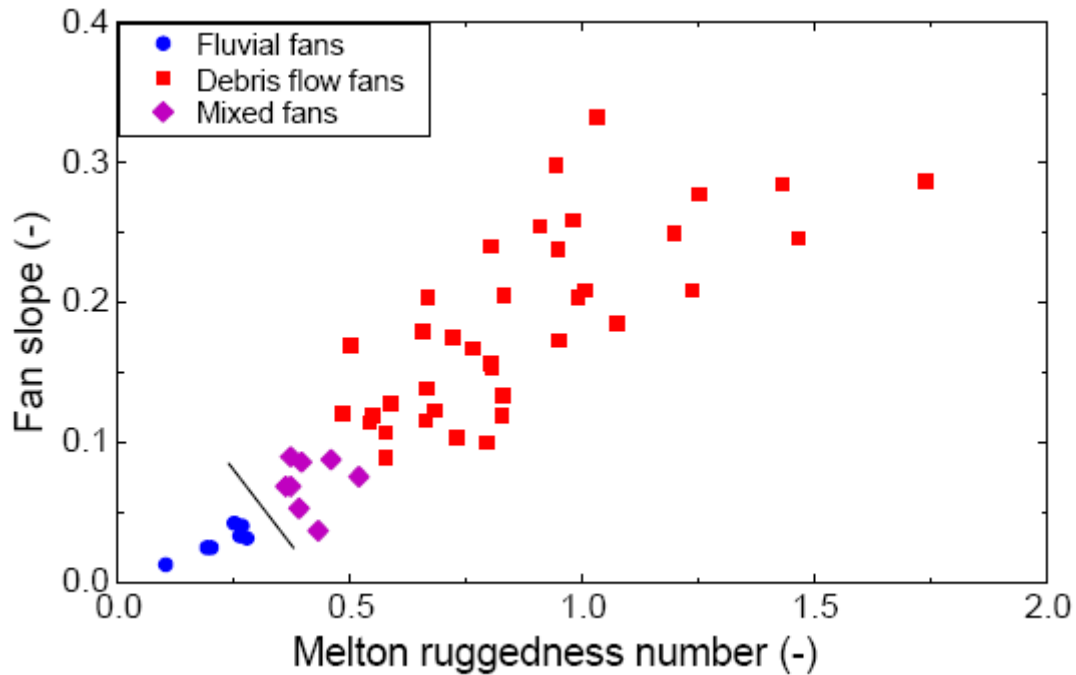
Dove:  $H_{max}$  è la quota massima del bacino (Km),  $H_{min}$  è la quota minima del bacino, inteso all'apice del conoide (Km),  $A_b$  è l'area del bacino idrografico ( $Km^2$ ).

Se l'indice di Melton è maggiore di 0,5 o se la pendenza media del conoide è maggiore al valore (7–14\*Me) allora il bacino è predisposto alla produzione di debris flow.

L'indice di Melton permette anche la distinzione dei conoidi in funzione dell'origine, come rappresentato in Tabella 7 e in Figura 11 dove si possono vedere i punti sperimentali ottenuti da dati di campo riguardanti le Alpi orientali.

**Tabella 7: indice di Melton rispetto l'origine del conoide**

Origine del conoide	Indice di Melton
Fluvial fans	<0,25
Mixed fans	0,25-0,30
Debris flow fans	>0,30



**Figura 11: distinzione dei conoidi in funzione dell'origine, e valutazione della propensione di un bacino a produrre Debris flow in base all'indice di Melton e alla pendenza del conoide.**

La tecnica del volume unitario di Van Dine (1996) considera che in un certo periodo di tempo, in un corso d'acqua, si possono verificare debris flow con ampio range di magnitudo, e si vuole definire la *design magnitude*, ovvero il limite superiore del volume di materiale coinvolto nel fenomeno che ultimamente ha raggiunto la conoide. Questa grandezza dipende dal materiale disponibile in alveo addizionato del materiale che può giungere dalle valli laterali durante gli eventi di piena. Viene stimato un volume unitario di detrito disponibile per tratti omogenei (volumi di detrito per unità di lunghezza dell'alveo, volumi erodibili al fondo); quindi sommando i prodotti dei volumi unitari per le lunghezze dei tratti omogenei si può stimare il volume potenziale del debris flow. Una seconda versione del metodo è quella di **Hungr et. al. (1984)** che, sulla base di dati relativi a cinque eventi importanti di debris flow verificatisi fra il 1981 e il 1984 in British Columbia, propone per il metodo del volume unitario la formulazione seguente, che è valida quando la sorgente diretta del materiale è il canale principale e le sue immediate vicinanze:

$$M = LBe'$$

Dove:  $M$  ( $m^3$ ) è il volume prodotto da una lunghezza  $L$  (m) di canale caratterizzato da ampiezza  $B$  (m) e profondità media di erosione  $e'$  (m). Il valore di  $B$  può essere misurato direttamente oppure correlato alla radice quadrata dell'area di drenaggio  $A_i$  ( $Km^2$ ) relativa al tratto di corso d'acqua considerato; dividendo il canale in  $n$  settori si ha:

$$M = \sum_i^n A_i^{1/2} L_i e_i$$



Dove  $e_1$  è un coefficiente di erodibilità del canale espresso in  $m^3/(m \cdot Km)$ , che coincide in fase revisionale con lo spessore medio dei detriti asportabili ovvero al tasso di produzione di detrito per metro lineare di canale.

Il metodo geomorfologico di terreno viene ripreso anche nelle “Specifiche tecniche finalizzate alla redazione degli studi di bacino” della Regione Valle d’Aosta (Assessorato territorio, ambiente e opere pubbliche, Dipartimento territorio ambiente e risorse idriche, dove viene descritto come procedura che perviene alla determinazione dei volumi delle colate detritiche sulla base di rilievi delle aree sorgenti di sedimentazione. La valutazione dei potenziali apporti di detrito riguarda gli alvei torrentizi, le sponde instabili o in erosione, nonché le frane connesse alla rete idrografica. Le analisi condotte lungo la rete idrografica devono dunque mettere in evidenza:

- lo stato di ricarica del collettore;
- le aree sorgenti di sedimentazione e le frane.

Per la valutazione dello stato di ricarica del collettore il metodo considerato adottabile dall’Assessorato è quello di Hungry et. al. (1984) che presenta il vantaggio di standardizzare le procedure e si basa su due ipotesi cautelative:

- in occasione del verificarsi di una colata detritica, tutte le aree sorgenti vengono attivate;
- non c’è redistribuzione del materiale all’interno del bacino.

I valori di apporto detritico unitario riportati dalla Regione Valle D’Aosta (“specifiche tecniche finalizzate alla redazione degli studi di bacino”, dipartimento territorio ambiente e risorse idriche) sono riportati in Tabella 8.

**Tabella 8: valori indicativi dell'apporto detritico per unità di lunghezza per diversi tipi di alvei torrentizi (R. Valle d'Aosta, Assessorato territorio, ambiente e opere pubbliche, Dipartimento territorio ambiente e risorse idriche)**

Classe	Pendenza Alveo (°)	Materiale alveo	Sponde	Condizioni Di stabilità	Apporto Detritico Unitario ( $m^3/m$ )
A	20-35	roccia	Non erodibili	Stabile (virtuale assenza di detrito)	0-5
B	10-20	Sottile strato di detrito o suolo sciolto su roccia	Non erodibili (roccia)	stabile	5-10
C	10-20	Copertura detritica o morenica	Altezza < 5m	stabile	10-15
D	10-20	Copertura detritica o morenica	Detrito, altezza > 5m	Angolo di riposo del materiale	15-30
E	10-20	Copertura detritica o morenica	Detrito altezza > 20m	Sponde potenzialmente instabili (area di frana)	Fino a 200 (sorgente di detrito localizzata)

All’interno dello stesso documento proposto dalla Valle d’Aosta, vengono presentate due formule (Spreafico et. al. 1999) da utilizzare in alternativa a quella complessiva del metodo geomorfologico,

con le quali l'autore propone di stimare separatamente il volume eroso dal fondo dell'alveo e dalle sponde; le formule sono le seguenti.

Per il calcolo del volume erodibile dal fondo,  $V_{alveo}$  ( $m^3$ ):

$$V_{alveo} = k * L_a * b_a * d_a$$

Dove:  $L_a$  è la lunghezza del tratto di alveo (m);  $b_a$  è la larghezza media dell'alveo (m);  $d_a$  è la profondità media di erosione (m);  $k$  è il fattore di riduzione.

Per il calcolo del volume erodibile dalle sponde,  $V_{sponde}$  ( $m^3$ ):

$$V_{sponde} = k * L_s * h_s * d_s$$

Dove:  $L_s$  è la lunghezza di un tratto di sponda (m);  $h_s$  la sua altezza (m);  $d_s$  la profondità media di erosione (m), da stime locali proposta pari a 0,5-1m, fino 2m per aree instabili localizzate;  $k$  fattore di riduzione che è compreso fra 0,5 e 0,8 m; valore adattato in base alle condizioni dei bacini in esame.

I valori calcolati dovranno poi essere sommati per avere un volume finale totale.

Un parametro derivante dalla magnitudo, che diventa un indice per caratterizzare i bacini studiati, è l'unità di magnitudo, ovvero il rapporto fra magnitudo e area del bacino drenante a monte del conoide. Per esempio, nella zona di Fiammes, in Veneto, D'Agostino et al. (2010) hanno trovato un indice che variava da 60.000 a 300.000  $m^3/ha$ , che analizzato con dati di colate nella stessa zona ha permesso di determinare quantomeno l'ordine di grandezza della frequenza di accadimento delle colate analizzate (frequenza minore di 1/100 anni).

#### 2.4.2 Stima della portata massima

La portata del debris flow è strettamente legata alla portata liquida oltre che ad una serie di fattori che verranno esaminati di seguito. Per questo motivo è necessaria un'analisi idrologica del bacino volta a determinare la massima portata liquida considerabile. A questo scopo sarà utile pervenire all'idrogramma di piena entrante in conoide con tempo di ritorno di 200 anni, poiché le colate possono raggiungere una portata 40 volte superiore per piccoli corsi d'acqua ( $5km^2$ ) e 10 volte superiore per grossi corsi d'acqua (Van Dine, 1996). In particolare l'idrogramma è da calcolare considerando, oltre le usuali caratteristiche, la durata di precipitazione che risulti associabile all'innescamento e al passaggio in conoide di una colata detritica: fenomeni meteorici di breve durata e massima intensità che colpiscono il bacino quando esso presenta un elevato grado di saturazione del suolo (per fusione nivale o precipitazioni antecedenti). Altre indicazioni da considerare riguardano la parte più intensa del pluviogramma simulato che potrà essere compresa fra il 30% e il 90% del tempo di risposta del bacino. Per bacini di superficie superiore ai  $5 Km^2$  (con portata liquida fino  $20 m^3/s$ ) è necessario condurre i calcoli idrologici sui sottobacini che li compongono, per valutare il contributo indipendente di ognuno di essi alla formazione del deflusso e quindi del debris flow, poi componendo cinematicamente i vari contributi.

La portata di debris flow canalizzati è funzione della geometria del canale dell'alveo e della velocità del flusso; la velocità del flusso a sua volta è determinata dalla pendenza e geometria del canale, e dalla viscosità dinamica e peso unitario della massa di detrito. La massima portata e la massima profondità di flusso si verificano subito dopo il fronte del debris flow e seppur di breve durata sono i fattori critici da considerare nella progettazione di opere riguardanti l'alveo.

Vari metodi sono stati proposti per il calcolo della portata massima:

- Van Dine (1996),
- Metodo volumetrico (Armanini 1996 in Marco e Forlati, 2002),
- Rickenmann (1998 in Marco e Forlati, 2002),

Le relazioni fra portata liquida di picco e portata di picco del debris flow presentate da Van Dine (1996) sono state estratte dalla curva mostrata in Figura 12.

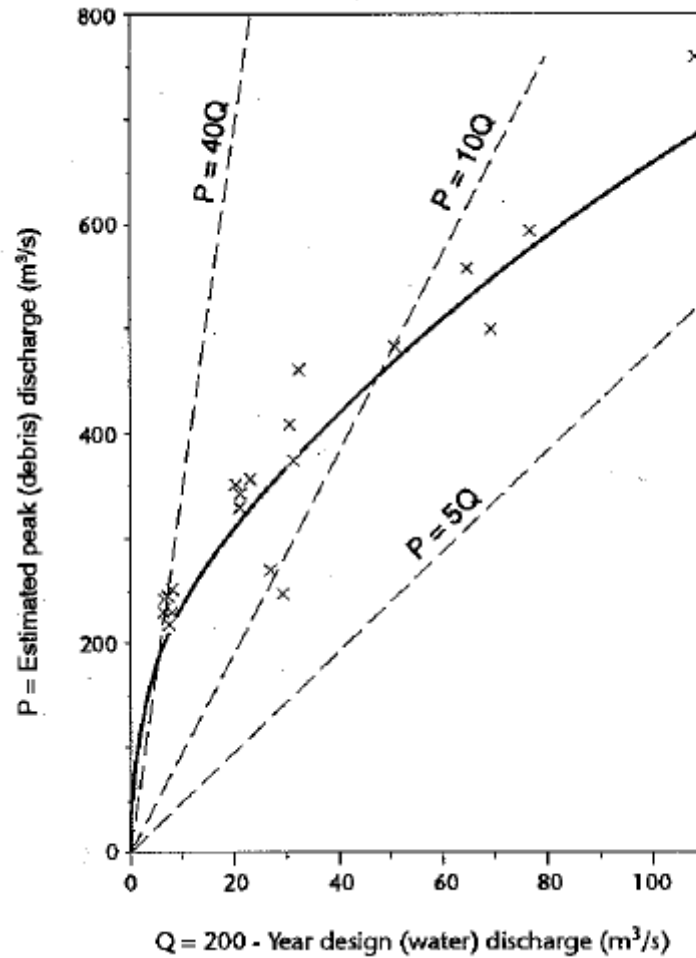


Figura 12: relazioni fra portata di picco del debris flow e portata liquida di picco (Van Dine, 1996)

Il Metodo volumetrico (Armanini (1996 in Marco e Forlati, 2002)) consiste in un metodo che deriva la portata del debris flow dalla portata liquida di piena considerata:

$$Q_{df} = Q_l * \left( \frac{c'}{c' - c_{df}} \right)$$

Dove:  $Q_{df}$  è la portata massima della colata ( $m^3/s$ ),  $Q_l$  è la massima portata liquida ( $m^3/s$ ),  $c'$  è la concentrazione di massimo impaccamento del materiale solido a riposo (in genere pari a 0,65-0,75),  $c_{df}$  è la concentrazione volumetrica di equilibrio del fronte stazionario della colata in movimento che, per pendenze al fondo maggiori del 35%, vale:

$$c_{df} = 0,9 * c'$$

Il coefficiente considerato nella formula per la moltiplicazione della portata liquida  $\left( \frac{c'}{c' - c_{df}} \right)$  può essere talora insufficiente per i debris flow a causa della presenza di aria all'interno del flusso sottoforma di fluido non omogeneamente distribuito (D'Agostino, 2006).

Il fattore  $\left( \frac{c'}{c' - c_{df}} \right)$ , corrisponde al "Bulking Factor" (BF o  $f_b$ ) proposto da Costa (1984 in D'Agostino 2006):

$$V_t = f_b * V_l$$

il quale Bulking Factor può essere stimato nota la concentrazione volumetrica del debris flow.

$$f_b = \frac{V_t}{V_l} = \frac{V_t}{c_{L-V} * V_t} = \frac{1}{c_{L-V}} = \frac{1}{1 - c_{S-V}} = BF$$

Per cui si può scrivere:

$$Q_T = f_b * Q_L$$

In Tabella 9 vengono riportati i valori del bulking factor ( $f_b$ ) per le corrispondenti concentrazioni volumetriche ( $c_{s-v}$ ).

**Tabella 9: bulking factor corrispondenti alle concentrazioni volumetriche (D'Agostino, 2006)**

$C_{s-v}$	$f_b$
20%	1,25
50%	2,0
75%	4,0

Takahashi (1978) per lo stesso metodo volumetrico, concorda, in condizioni di pendenza superiore a 20°, il valore di concentrazione della colata  $c_{df}$  pari a  $0,9 * c'$ , da cui si ricava:

$$Q_{df} = 10Q_l$$

Mentre per pendenze inferiori a 20° l'autore nipponico propone i seguenti limiti ai valori di concentrazione e di portata della colata:

$$0,3 < c_{df}/c' < 0,9$$

$$1,43Q_l < Q_{df} < 10Q_l$$

Rickenmann (1998 in Marco e Forlati, 2002), propone:

$$Q_{max} = 0,135 * M^{0,78}$$

Dove:  $Q_{max}$  è la portata massima della miscela acqua-detrito dell'evento ( $m^3/s$ ),  $M$  è la magnitudo dell'evento ( $m^3$ ).

### 2.4.3 Velocità del flusso

La velocità di fluitazione di un debris flow è un parametro che dipende da diversi fattori; uno di questi fattori è la presenza o meno di materiale grossolano nel fronte: la resistenza frizionale che può generare un fronte costituito da materiale grossolano può ridurre significativamente la velocità della colata rispetto ad un fronte costituito da materiale a granulometria minore (Jakob 2005).

Di seguito sono proposte alcune formule per la stima della velocità:

- Van Dine (1996)
- D'Agostino (in Ferro, 2008)
- Hungr et. al. (1984 in Marco e Forlati, 2002)
- Johnson e Rodine (1984 in Johnson e Warburton 2003)
- Rickenmann (1998 in Marco e Forlati, 2002)
- Moto turbolento

Per la stima della velocità di flusso Van Dine (1996) propone l'equazione di Poiseuille (moto laminare) che si presenta nella seguente forma:

$$v = \frac{\gamma * \sin\theta * h^2}{l * \nu}$$

dove:  $v$  è la velocità,  $\gamma$  è il peso unitario della massa di detriti (circa 20000 N/m<sup>3</sup>),  $\theta$  è la pendenza del canale,  $h$  è la profondità del flusso,  $l$  è una costante legata alla forma del canale che assume valore 3 per canali larghi e 8 per canali semicircolari,  $\nu$  è la viscosità dinamica della massa di detriti (che può assumere valori fra i 3000 Pa s e i 6000 Pa s (Marchi, 2006).

D'Agostino (1996b) propone l'adattamento della stessa equazione, o legge del moto laminare ai debris flow con la seguente formulazione relativa al moto del materiale all'interno di un canale prismatico di forma compatta:

$$U = \frac{g * \rho_m}{k * \mu} * h^2 * S$$

Dove:  $U$  è la velocità media della corrente (m/s),  $g$  è l'accelerazione di gravità (9,81 m/s<sup>2</sup>),  $\rho_m$  è la densità del debris flow (1500-2200 Kg/m<sup>3</sup>) calcolata facendo una media pesata delle densità di acqua e sedimento in funzione della concentrazione volumetrica,  $k$  è un fattore di forma che vale 3 per la sezione rettangolare molto larga, 8 per la sezione semicircolare e 5 per la sezione trapezia,  $\mu$  è la viscosità newtoniana apparente della colata (3000 Pa s),  $h$  è la profondità del flusso sull'asse di simmetria della sezione (m),  $S$  è la pendenza media del collettore principale calcolata dalla sorgente all'inizio del tratto deposizionale, spesso coincidente con l'apice dei conoidi (%).

Hungr et. al. (1984) propongono le seguenti formule:

$$v = \frac{(\gamma S h^2)}{(k \nu)}$$

dove:  $v$  è la velocità del flusso (m/s),  $\gamma$  è il peso unitario del detrito (KPa),  $S$  è la pendenza dell'alveo (°),  $h$  è la profondità del flusso (m),  $k$  è un coefficiente di forma pari a:

$k \sim 3$  per canali a sezione ampia e rettangolare

$k \sim 5$  per sezioni trapezoidali

$k \sim 8$  per sezioni semicircolari

$\nu$  è la viscosità apparente del detrito (KPa \*s)

e la formula

$$v = \left( \frac{(\Delta h r g)}{(k b)} \right)^{0,5}$$

dove:  $v$  è la velocità media del flusso (m/s),  $\Delta h$  è la differenza in elevazione del flusso sulle due sponde in curva,  $b$  è l'ampiezza del flusso in superficie (m),  $r$  è il raggio di curvatura medio (m),  $k$  è un coefficiente di correzione pari a:

$k = 5$  per calcolare la sopraelevazione a fini progettuali per ottenere risultati cautelativi

$k = 2,5$  per calcolare la velocità da dati di sopraelevazione

Johnson e Rodine (1984) propongono la seguente formula per la stima della velocità in un tratto di variazione della direzione del flusso:

$$V = (g r \cos\delta \tan\beta)^{1/2}$$

Dove:  $V$  è la velocità media locale della colata (m/s),  $g$  è l'accelerazione di gravità ( $m/s^2$ ),  $r$  è il raggio di curvatura (m),  $\delta$  è l'angolo della traccia dell'alveo ( $^\circ$ ),  $\beta$  angolo di superelevazione fra argine interno ed esterno.

Rickenmann (1998 in Marco e Forlati, 2002) propone, partendo dalla geometria dell'alveo:

$$V = 10R_h^{0,67}J^{0,5}$$

Dove:  $V$  è la velocità media della colata (m/s), il fattore 10 corrisponde al coefficiente di Strickler ( $m^{1/3}/s$ ),  $R_h$  è il raggio idraulico (m),  $J$  è la pendenza della porzione di alveo considerato (%), se si conosce la portata massima  $Q_{max}$ .

Per il calcolo della velocità si può considerare anche la seguente formula, proposta da Rickenmann (1999):

$$v = 2,1 * Q_{df}^{0,33} * S^{0,33}$$

Dove:  $v$  è la velocità media del flusso,  $Q_{df}$  è la portata massima della colata detritica,  $S$  è la pendenza media del collettore principale calcolata dalla sorgente all'inizio del tratto deposizionale.

Con la quale equazione, nota la geometria della sezione trasversale del torrente, è possibile calcolare l'area liquida impegnata come rapporto tra portata e velocità:

$$A = \frac{Q_{df}}{V}$$

e l'altezza del fronte ( $h$ ) della colata associata all'area liquida.

#### 2.4.4 Profondità di flusso massima

La profondità di flusso massima, ovvero lo spessore massimo raggiunto dal flusso, è stato studiato da alcuni studiosi i quali, come in Figura 13 (Van Dine 1996), presentano i risultati di studi volti a comprendere la relazione fra pendenza, forma della sezione e velocità.

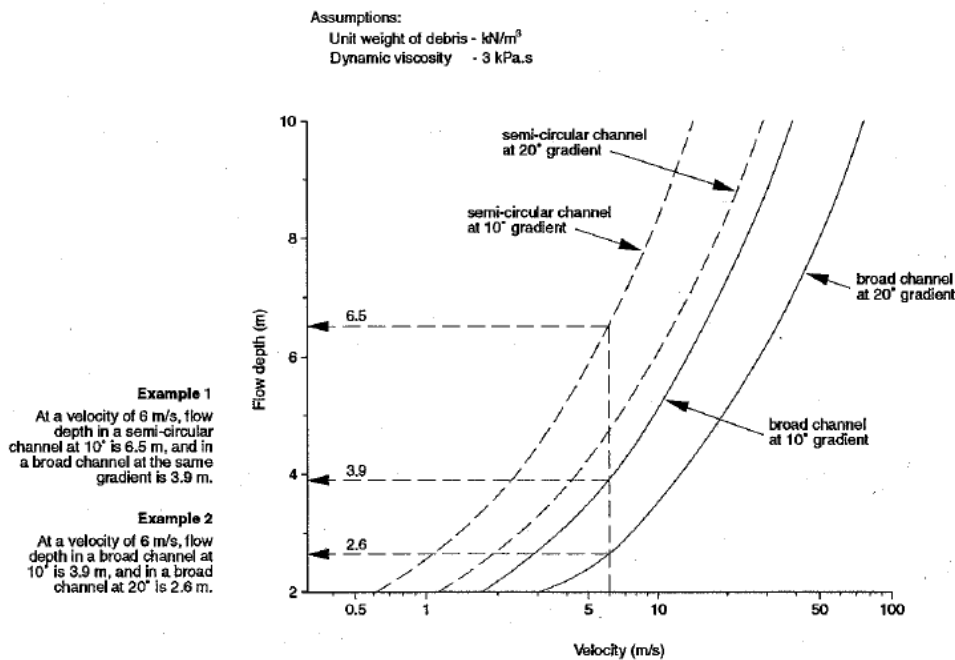


Figura 13: variazione della profondità di flusso in debris flow, rispetto velocità, pendenza dell'alveo e geometria (Van Dine, 1996)

#### 2.4.5 Dimensione e assortimento dei detriti

La stima della dimensione media e massima dei detriti grossolani, organici ed inorganici, nonché l'assortimento per classe granulometrica dei detriti, è un dato molto utile a definire quale tipo di struttura di controllo dei debris flow impiegare. Una stima approssimativa può derivare dall'esame dei detriti esposti presenti su conoide, da quelli che compongono l'alveo e da quelli che compongono i versanti soprastanti il corso d'acqua. In generale queste due caratteristiche sono strettamente correlate alla geologia superficiale e di substrato dell'area.

In taluni studi relativi a debris flow accaduti, si procede con la determinazione della curva granulometrica, del limite di liquidità e del limite plastico (Hürlimann, 2008).

#### 2.4.6 Travel distance

Zimmermann et. al. (1997) propone la seguente formula:

$$(H/L)_{min} = \tan\beta_{min} = 0,20(A_c)^{-0,26}$$

Rickenmann (1999) propone la seguente formula sulla base dell'osservazione di 154 debris flow avvenuti in Svizzera:

$$L=1,9M^{0,16}*H_l^{0,83}$$

Dove: L è la distanza media percorsa dal debris flow (m), H<sub>l</sub> è la differenza di quota tra il punto di innesco e quello di deposito del materiale.

Una valutazione positiva viene espressa dallo studio di D'Agostino et al. (2010) che applica le due formule di Rickenmann e Zimmermann in ambiente dolomitico.

#### 2.4.7 Distanza di run-out potenziale

Conservativamente la distanza di run-out può essere considerata dall'apice fino alla fine della conoide considerando sia la parte colluviale (debris fan) che la parte alluvionale (alluvial fan).

Volendo stimare la distanza di scorrimento del debris flow, si possono impiegare alcune fra le varie formule presenti in letteratura, di cui riporto alcuni esempi:

- Takahashi e Yoshida (1979) e Takahashi (1991)
- Rickenmann (1999)
- Rickenmann (1998)
- Ikeya (1981 in Marchi 2006)
- Vandre (1985)
- Corominas (1996)

Un metodo piuttosto rigoroso fra i tanti metodi giapponesi, è quello di Takahashi e Yoshida (1979) e Takahashi (1991) che richiede la stima del picco di portata del debris flow, della profondità e geometria del canale nel punto di transizione fra la zona di trasporto e la zona di deposizione (assunto essere in corrispondenza della pendenza di 10° (22,22%)); la formula si presenta sotto la seguente forma:

$$X_L = \frac{V^2}{G}$$

Dove: X<sub>L</sub> è la distanza di run out o distanza di esaurimento della colata,

e gli altri due fattori si ricavano con le seguenti formule:

$$V = \frac{V_u \cos(\theta_u - \theta_d)(1 + gh_u \cos\theta_u)}{(2V_u^2)}$$

e

$$G = g(S_f \cos\theta_d - \sin\theta_d)$$

Dove:  $V_u$  è la velocità a monte,  $h_u$  è la profondità del flusso a monte,  $\theta_u$  è la pendenza del canale a monte,  $\theta_d$  è la pendenza del canale a valle,  $S_f$  è l'angolo di attrito,  $g$  è l'accelerazione di gravità. ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ).

Per il valore massimo di distanza coperta dallo spostamento della colata (m), con gli stessi dati viene proposta:

$$L_{max} = 5M^{0,16}H^{0,83}$$

Rickenmann (1999) propone per la stima del Run Out sulla conoide:

$$L_f = 15M^{1/3}$$

Anche se per usi pratici lo stesso autore non consiglia l'uso della formula, come conferma anche D'Agostino (2010) dicendo che dà risultati poco soddisfacenti e in certi casi sottostima il run out.

Rickenmann (1998) propone la seguente formula:

$$L_c = 30 * M^{0,33}$$

Dove:  $L_c$  è la distanza di arresto (m);  $M$  è il volume della colata ( $\text{m}^3$ ); che sovrastima il run out, perlomeno in ambiente dolomitico.

Ikeya (1981) (in Marchi 2006) propone:

$$L = 8,6 * (V * \tan\theta)^{0,42}$$

Dove:  $L$  è la distanza di arresto (m);  $V$  è il volume della colata ( $\text{m}^3$ );  $\theta$  è la pendenza media della zona di deflusso, dell'asta torrentizia, prima del cambio di pendenza dove inizia la fase deposizionale ( $^\circ$ ).

Lo stesso metodo riportato nelle "Specifiche tecniche finalizzate alla redazione degli studi di bacino" della Regione Valle d'Aosta (Assessorato territorio, ambiente e opere pubbliche, Dipartimento territorio ambiente e risorse idriche) dice che una volta individuati i percorsi preferenziali di movimento della colata sulla conoide in corrispondenza delle possibili sezioni in cui può avvenire l'avulsione, la distanza di arresto può essere calcolata con la formula di Ikeya 1981, anche se la forma è leggermente diversa:

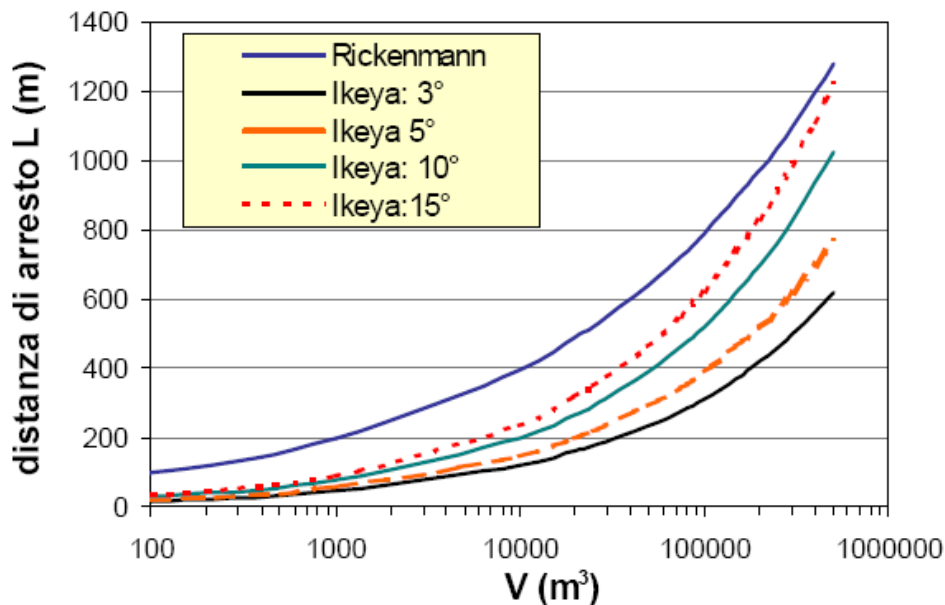
$$L_{run-out} = 8,6 * (V * \tan\theta)^{0,2}$$

Dove:  $L$  è la distanza di arresto (m);  $V$  è il volume dei sedimenti fuoriusciti durante l'avulsione della colata in sezioni critiche ( $\text{m}^3$ );  $\theta$  è l'angolo che esprime l'inclinazione media del piano di scorrimento della colata rispetto l'orizzontale.

In merito a questa formula, applicata in ambiente dolomitico, D'Agostino (2010) individua la tendenza a sottostimare il run out, in modo più accentuato della formula di Rickenmann (1999), anche se riporta che l'autore della formula raccomanda l'utilizzo della stessa in conoidi che abbiano una pendenza all'apice del conoide minore di  $8^\circ$ .

Marchi (2006) mette a confronto i risultati delle formule di Rickenmann (1998) e Ikeya (1981) per quanto riguarda il rapporto fra distanza di arresto e magnitudo dell'evento. Come si può notare dal grafico riportato in Figura 14.





**Figura 14: confronto fra i risultati della formula di Rickenmann(1997) e Ikeya (1981) in cui si confronta distanza di arresto con magnitudo del debris flow.**

Vandre (1985) propone la seguente formulazione:

$$R = \bar{\omega} * \Delta h$$

Dove: R è la distanza di arresto;  $\bar{\omega}$  è una costante empirica adimensionale;  $\Delta h$  è la differenza di quota tra punto di innesco e punto di inizio del deposito.

Da questa formula deriva un criterio di determinazione del run out proposto nello studio di *Burthor e Bathurst* del (1998 in *Cesca 2008*) nel quale si dichiara che un debris flow si arresta quando la distanza percorsa su pendenze comprese fra i 4° e i 10° (misurata lungo il pendio) è maggiore del 40% della quota persa durante la discesa del materiale su tratti con pendenze maggiori di 10°.

Quindi le regole di trasporto e deposizione di un debris flow in funzione della pendenza (S) sono (D'Agostino 2010):

- $S > 10^\circ$ : il debris flow continua la sua corsa incondizionatamente;
- $4^\circ < S < 10^\circ$ : il debris flow si arresta se si raggiunge la condizione espressa dall'equazione sopracitata;
- $S < 4^\circ$ : il debris flow si arresta incondizionatamente.

#### 2.4.8 Reach Angle

Per reach angle s'intende l'angolo che si ricava considerando dislivello, fra apice del dissesto innescante e fronte ultimo del deposito, e distanza planimetrica, degli stessi punti, di un evento di debris flow (Figura 15).

**Corominas (1996)**, a partire dalle considerazioni che solo con grandi dislivelli un ammasso di materiale può percorrere grandi distanze planimetriche, e che a parità di condizioni, un dissesto di maggiori dimensioni percorre maggiori distanze planimetriche (discorso dell'effetto scala: un grande debris flow supera ostacoli naturali o morfologie del terreno particolari disperdendo meno energia di un piccolo evento), propone una formulazione per calcolare il reach angle considerando il volume del debris flow:

$$\log(H/L) = 0,105 \log(Vol) - 0,012$$

Con  $r^2$  pari a 0,763.

Tale angolo è utilizzabile come indice di mobilità del dissesto e riconosciuto come tale da diversi autori (D'Agostino et al. 2010).

Lo studio proposto dall'autore considera diversi tipi di dissesto (crolli di roccia, valanghe di detrito, ecc.) e sottolinea come i debris flow abbiano, rispetto agli altri dissesti, il più basso angolo  $\beta$ , quindi maggiore mobilità, sia in percorsi canalizzati che in percorsi senza ostacoli; il debris flow mostra una leggera maggiore mobilità in traiettorie confinate.

Corominas (1996) sottolinea che il dislivello percorso dal dissesto non influenza l'angolo  $\beta$ , ma la distanza planimetrica percorsa.

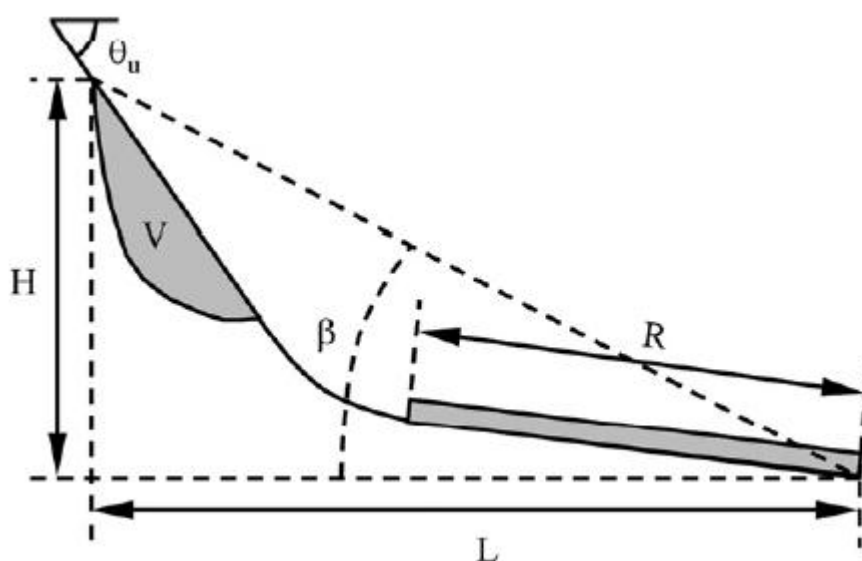


Figura 15: principali parametri descrittivi della geometria di una colata (da D'Agostino et Al. 2010)

Un parametro derivante dal reach angle è il rapporto inverso fra H e L (D'Agostino et Al. 2010):

$$\frac{L}{H} = \frac{1}{\tan \beta}$$

Il valore per debris flow di tale rapporto varia in letteratura da 2 a 20. Il significato che assume consiste nell'efficienza di viaggio netta ed esprime le dissipazioni energetiche interne (frizionali, turbolente e viscosi) ed esterne al flusso. Tali dissipazioni dipendono dalla topografia e dalla scabrezza che caratterizzano l'area attraversata dal debris flow, e la presenza di ostacoli.

#### 2.4.9 Forza d'impatto potenziale

Nella progettazione di opere di difesa un parametro fondamentale per valutare la stabilità e la resistenza dell'opera all'impatto con la colata è la spinta dinamica o forza d'impatto che dir si voglia.

I fattori che determinano l'intensità di questa grandezza sono:

- La velocità della colata;
- La rapidità del riempimento;
- Il tipo e le dimensioni del materiale che può impattare contro l'opera.

Per il calcolo di quest'ultima, Van Dine (1996) propone la seguente formulazione:

$$F = \rho * A * v^2 * \sin \beta$$

Dove:  $F$  è la spinta dinamica,  $\rho$  è la densità del detrito,  $A$  è l'area della sezione del deflusso,  $v$  è la velocità del flusso,  $\beta$  è l'angolo fra direzione di flusso e faccia della struttura investita dalla colata.

Per alcuni autori giapponesi la forza di impatto dinamico può essere il doppio di quella calcolata con la formula.

Secondo l'equazione della forza di contatto di Hertz è stato desunto il grafico in Figura 16 dal quale si può ricavare la forza d'impatto in base al diametro o il peso dei massi, e la velocità del flusso.

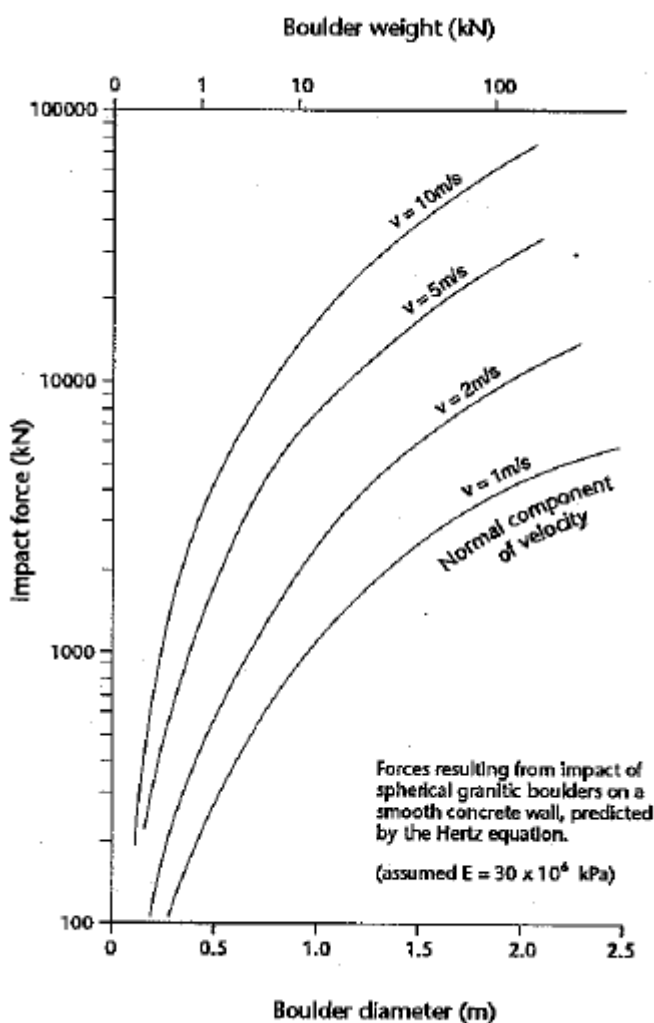


Figura 16: forza di contatto calcolata con l'equazione di Hertz (Hungry et. al. 1984)

Hollingsworth e Kovacs (1981) determinarono l'impatto dinamico di un debris flow desumendo un valore di  $125 \text{ lb/ft}^3$  pari a circa  $20 \text{ KN/m}^3$ , valore che decresce velocemente quando ha inizio l'arresto.

Da uno studio giapponese emerge un valore misurato di  $60 \text{ KN/m}^3$  su una piastra metallica di dimensioni pari a  $150 \times 150 \text{ mm}$  (Thurber Consultants 1984).

#### 2.4.10 Area occupata dal deposito

Un importante fattore da determinare è l'area che verrà occupata dal materiale trasportato dal debris flow. D'Agostino et al. (2010) presentano l'approccio bilanciato sul volume che consiste in una formula empirica che calcola l'area ( $A$ ) in questione in funzione del volume totale dell'evento ( $V$ ):

$$A = kV^d$$

Dove k e d sono coefficienti empirici. Evidenza scientifica è che il coefficiente k sia direttamente dipendente dalle caratteristiche litologiche del materiale trasportato dal debris flow, e riflette lo stress di rottura e la mobilità della massa in movimento.

## 2.5 Formule empiriche di laboratorio

I risultati ottenuti dalle prove condotte sono stati utilizzati per il confronto con alcune relazioni proposte in letteratura (5.3 Confronto con le formulazioni empiriche), e per ottenere una stima quantitativa dell'effetto del bosco sul deposito delle colate.

Un primo confronto è stato quello fra Run Out e concentrazione volumetrica, poiché è questo che sembra essere il fattore determinante. Poiché la concentrazione volumetrica è la percentuale di volume occupato dal materiale solido rispetto al volume totale della miscela, è logico aspettarsi una relazione inversa fra i due parametri.

Ulteriori relazioni empiriche proposte per l'interpretazione del run-out considerano (Cesca 2008):

- Il baricentro e la concentrazione volumetrica:

$$R_{max} = 0,46h_G C_V^{-2}$$

Dove  $R_{max}$  è il Run Out del fronte di colata,  $h_G$  è l'altezza del baricentro del materiale che sta per essere rilasciato durante le prove rispetto alla quota del piano di deposizione,  $C_V$  è la concentrazione volumetrica.

- L'energia cinetica posseduta dalla colata al termine del suo percorso in canaletta ed in funzione della concentrazione volumetrica:

$$R = 1,04 \frac{u^2}{2g} C_V^{-2}$$

Dove R è il Run Out (m), u è la velocità della colata nell'ultimo tratto di canale (ultimi 45 cm nella tesi di Cesca, velocità espressa in m/s), g è l'accelerazione di gravità (9,81 m/s<sup>2</sup>),  $C_V$  è la concentrazione volumetrica (%).

- La formula di Vandre (1985) considera i limiti topografici, in particolare il dislivello percorso dalla colata:
- $R = \omega \Delta H$

Dove R è il Run Out e  $\Delta H$  è la differenza in termini di quota fra il punto in cui origina il debris flow e il punto in cui ha inizio la deposizione. L'autore individua un coefficiente pari a 0,4.

Un secondo elemento di confronto considera la dispersione laterale massima in funzione di:

- Run out attraverso un coefficiente empirico (Cesca 2008):
- $B_{max} = kR_{max}$

Dove  $B_{max}$  è la larghezza massima del deposito, k è il fattore empirico, e  $R_{max}$  è il Run Out massimo ovvero la lunghezza del deposito dal cambio di pendenza al fronte.

- Energia cinetica della colata, run out e coefficiente volumetrico (Cesca, 2008):

$$B_{max} = 0,70 \left[ \left( \frac{u^2}{2g} \right)^{0,07} R_{max}^{0,93} \right] C_V^{0,65}$$

Dove  $B_{max}$  è la dispersione laterale massima del deposito,  $u^2/2g$  è l'energia cinetica posseduta dalla colata allo sbocco della canaletta (in cui u è la velocità della colata),  $R_{max}$  è il Run Out massimo del deposito, e  $C_V$  è la concentrazione volumetrica della miscela impiegata per la prova.

È infine stata considerata la formula proposta da Takahashi (1994, in Cesca, 2008), che introduce un valore medio o caratteristico del rapporto fra dislivello e lunghezza planimetrica percorsi dal materiale della colata:

$$\frac{H}{L} = \tan\beta$$

Dove H è il dislivello fra baricentro del materiale in vasca di accumulo e punto ultimo del deposito, L è la distanza planimetrica fra gli stessi punti. Nel lavoro originale l'autore ricava valori dell'ordine di grandezza di 0,2, mentre Cesca ricava valori compresi fra 0,22 e 0,30, con valor medio pari a 0,24.

## 2.6 RUOLO DEI BOSCHI NELLA DIFESA DAI FENOMENI DA COLATA DETRITICA

### 2.6.1 Introduzione

L'interazione tra vegetazione arborea e processi di instabilità dei versanti in ambiente torrentizio, sia in termini di causa di dissesto, sia in termini di fattore di stabilità, è oggetto di grande interesse da parte degli studiosi (Baroni et al. 2007, Meloni et al. 2007, Bischetti et al. 2010)

Le varie essenze arboree, in funzione delle caratteristiche dell'apparato radicale, sono più o meno suscettibili allo sradicamento e quindi a fungere da causa primaria nel collasso di versanti rocciosi o ammassi di detriti. Tipico esempio sono le ceppaie di castagno invecchiate che, non cedute ed appesantite dalla crescita dei polloni, spesso si ribaltano trascinando con loro la zolla di terreno o di substrato roccioso connessi all'apparato radicale. Questi ribaltamenti creano dei vuoti assimilabili a nicchie di distacco che possono a loro volta innescare franamenti. Un tipico esempio di questo fenomeno lo si incontra percorrendo la Valvarrone, lungo la strada provinciale 62 (Lecco), che da Bellano porta a Taceno: sui versanti molto ripidi attaversati dalla strada, è molto frequente incontrare ceppaie ribaltate e la zolla di terreno o materiale roccioso incoerente solidale con l'apparato radicale.

I fattori scatenanti sono:

- peso della pianta che in condizioni di saturazione del terreno diventa insostenibile da parte dei detriti sottostanti;
- scarsa consistenza penetrativa degli apparati radicali;
- caratteristiche della specie non idonee (es. Abete Rosso).

In occasione di *soil slip* innescati da eventi piovosi estremi si possono verificare le condizioni per l'innescio di ulteriori scivolamenti nei quali la vegetazione partecipa all'innescio.

In genere la vegetazione assume il ruolo protettivo nei confronti dei versanti con la funzione di stabilizzazione svolta dall'apparato radicale, ma anche con la funzione di ostacolo al movimento di masse detritiche come si può osservare ai bordi dei torrenti montani, per non parlare della funzione traspirante della chioma. Si possono quindi individuare tre aree nelle quali il bosco svolge la sua funzione protettiva (Bischetti et. al. 2010):

- Protezione nella **zona di innescio** o meglio nel bacino contribuente con effetto di regimazione delle piogge intense che possono innescare le colate: la profondità di suolo occupata dall'apparato radicale e la densità delle radici determinano la presenza di un reticolo di pori finemente ramificati che permettono una grande permeabilità del suolo e al tempo stesso l'ancoraggio dello strato radicato al substrato; l'aumentata porosità del suolo mitiga l'effetto di precipitazioni intense che sono all'origine dell'innescio delle colate. Importante è la diffusione delle foreste sull'intera superficie del bacino e quindi gli effetti sull'idrologia complessiva del torrente. In particolare i boschi localizzati nelle vicinanze dei corsi d'acqua influenzano fortemente il regime idraulico del torrente;
- Protezione nel **tratto di trasporto** della colata dove il bosco garantisce la stabilità delle sponde degli impluvi e riduce il materiale che potenzialmente potrebbe alimentare la colata durante il suo passaggio. Viceversa, individui instabili possono ribaltarsi movimentando grandi quantità di materiale che possono alimentare la colata;

- Protezione nel **tratto di arresto** della colata in cui la foresta svolge un ruolo attivo trattenendo selettivamente la colata, rallentando il flusso fino ad arrestarlo.

E' per l'importanza che rivestono questi boschi che è necessario verificarne lo stato di salute e valutarne il grado di maturità poiché, sia fustaie che cedui, negli ultimi anni sono andate incontro ad un processo di invecchiamento (Tropeano e Turconi, 2008).

La funzione di protezione contro le colate detritiche viene documentata anche da Corominas (1996) che riconosce l'influenza che può avere il bosco sulla distanza percorsa da un debris flow; più in particolare l'autore definisce una magnitudo limite pari a  $10^5 \text{ m}^3$  al di sotto della quale il bosco esercita la sua funzione nel ridurre il run out. Nel lavoro si definiscono come aventi effetto le foreste dense, foreste aperte con arbusti.

Il bosco non è da considerare come elemento a se stante poiché esiste una relazione fra tipo di dissesto e tipo di bosco: da uno studio condotto su una conoide della valle Camonica (conoide della Valle d'Avio, gruppo dell'Adamello, Brescia (Baroni et al., 2007)) viene messa in risalto la correlazione fra vegetazione e evento geomorfologico operante nelle diverse aree del conoide. L'approccio geo-ecologico è consistito nella caratterizzazione della dinamica dei processi geomorfologici che hanno generato il cono alpino composito, nella ricerca dei collegamenti fra forme geomorfologiche e distribuzione delle comunità vegetali sul cono, e nella valutazione dell'influenza del complesso dei processi geomorfici sulla genesi e distribuzione degli habitat vegetali e della ricchezza floristica.

In particolare partendo dall'accurata analisi condotta, utilizzando interpretazione di foto aeree e rilievi di campo, vengono suddivisi i depositi in base all'evento originante:

- Morfologie da collassi di massa e depositi come caduta massi, macigni isolati, scivolamenti di falda detritica, e coni detritici;
- Morfologie e depositi formati da fluitazioni (canali da debris flow, lobi da debris flow, coni da debris flow, depositi fluviali);
- Depositati e morfologie nivali (tracce di valanghe, depositi di detriti da valanghe, coni da valanga).

Le morfologie da debris flow corrispondono, nel caso di canali attivi, a canali bordati da grandi argini consistenti in clasti strettamente connessi; nel caso di lobi di deposizione si notano lobi allungati e stretti, o collinette disposte in una configurazione radiale con delle depressioni fra una e la successiva; i ciottoli e i massi sono poco assortiti; spesso la struttura dei massi legati fra loro è molto evidente poiché la matrice viene dilavata dal runoff superficiale.

I debris flow periodicamente disturbano fisicamente la vegetazione poiché provocano il susseguirsi di nuove sequenze dinamiche di unità e subunità vegetative riflettendo una crono-topo sequenza di depositi sui quali esse si sviluppano.

La cosa più interessante di questo studio è che su un conoide composto come quello in oggetto è stato possibile riconoscere la correlazione fra vegetazione e fenomeno originante il deposito su cui l'unità vegetativa si è sviluppata.

### **2.6.2 La selvicoltura nelle foreste di protezione**

Da sempre è riconosciuto il ruolo multifunzionale delle foreste alpine: produzione di legname, pascolo, funzione turistico-ricreativa, paesaggistica, ambientale, naturalistica e di protezione. Negli ultimi decenni il rapporto dell'uomo col bosco è però variato in quanto non sono più prioritarie le funzioni produttive di materie prime e di pascolo per animali domestici, mentre hanno acquisito importanza la funzione turistico-ricreativa e protettiva. Modificandosi il comportamento e gli interessi dell'uomo nei confronti delle foreste, le foreste hanno subito un minor sfruttamento con effetti positivi dal punto di vista della densità e dimensione degli individui adulti anche se ultimamente questa incuria sta degenerando in abbandono del bosco. Lo scopo della gestione selvicolturale delle foreste di protezione è il mantenimento della foresta nelle condizioni ottimali per l'assolvimento della loro funzione protettiva. Mantenimento corrisponde a conservazione e non lasciare il bosco alla libera evoluzione: quindi una foresta di protezione richiede interventi di manutenzione a macchiatico negativo che corrispondono alla gestione attiva del bosco.

### 2.6.3 Classificazione delle foreste di protezione

Una prima distinzione delle foreste di protezione è quella che le distingue in base all'entità che gode della protezione: foreste di protezione diretta (FDP) di importanza fondamentale (che protegge insediamenti permanenti, vie di comunicazione fra insediamenti permanenti, aree industriali, stazioni turistiche), foreste di protezione diretta di importanza media (abitazioni stagionali, vie di comunicazione fra insediamenti stagionali, zone agricole, tralicci per il trasporto dell'energia elettrica), e foreste di protezione diretta di importanza secondaria (pascoli, aree poco frequentate adiacenti agli insediamenti).

Una seconda suddivisione dei boschi di protezione è in I livello di protezione (protezione generica rispetto erosione del suolo e regimazione delle acque superficiali) II livello di protezione (boschi che si trovano in una situazione morfologica tale per cui limitano o impediscono il distacco di valanghe, la caduta di massi e lo sviluppo di colate detritiche) III livello di protezione (di protezione diretta perché proteggono insediamenti abitativi permanenti, vie di comunicazione principali, aree industriali, stazioni turistiche e comprensori sciistici) – (Meloni et al., 2007)

### 2.6.4 Caratteristiche delle foreste di protezione

Per quanto riguarda le foreste di protezione, una caratteristica fondamentale è la stabilità che consiste nella "capacità di un popolamento forestale di mantenere la sua struttura e la sua vitalità rispetto alle influenze esterne ed interne e la capacità a svolgere in modo continuo e sostenuto le funzioni che ad esso sono richieste". La stabilità è classicamente suddivisa in resistenza e resilienza; la resistenza è la capacità di un sistema di contrastare un disturbo; la resilienza è la capacità di un sistema di ritornare alle caratteristiche iniziali dopo aver subito un disturbo.

Calandoci nel significato più profondo della parola, bisogna specificare il significato di diverse caratteristiche quali: la costanza (proprietà di non subire modifiche), resilienza (capacità di ritornare ad uno stato di riferimento dopo aver subito un disturbo temporaneo), persistenza (proprietà di un sistema di persistere nel tempo), resistenza (aspetto della costanza che indica la capacità di un sistema sottoposto a un disturbo di permanere), elasticità (aspetto della resilienza che identifica la velocità di un sistema nel tornare a uno stato di riferimento dopo un disturbo). Caratteristiche, quelle citate, fondamentali per il corretto funzionamento di un bosco di protezione.

Basandosi sulle indicazioni del manuale della **Regione Valle d'Aosta e Regione Piemonte (2006)**, il bosco di protezione contro le colate di detrito è un bosco ben distribuito orizzontalmente, con poche aperture, e verticalmente, poiché una pluristratificazione della copertura vegetale corrisponde ad una più completa presenza nei vari orizzonti di suolo delle radici; la struttura ideale è quindi pluristratificata su piccole superfici, con elevato grado di copertura e una omogenea distribuzione degli alberi nello spazio. Viene introdotto il concetto di diametro minimo efficace: se il diametro minimo efficace degli alberi è grande, non sarà possibile garantire perennemente nel tempo la presenza di tale struttura della foresta.

La continuità dell'ecosistema forestale non deve essere confusa con la stabilità del singolo popolamento, in quanto periodiche distruzioni del bosco rientrano nella normale ciclicità delle foreste naturali.

Il ciclo evolutivo di una foresta non gestita in termini selvicolturali, dal punto di vista protettivo può essere schematizzato nelle seguenti fasi:

- fase iniziale: popolamento con strutture regolari, raggiunge l'apice dell'incremento in volume e altezza (buona funzione protettiva);
- fase ottimale: elevata biomassa, copertura chioma totale, buona vitalità (buona funzione protettiva);
- fase di invecchiamento: biomassa decresce, diminuisce vitalità e inizia il crollo (buona funzione protettiva);
- fase di crollo: biomassa decresce, si aprono ampie chiarie (fase che non assicura una buona funzione protettiva);
- fase di rinnovazione: popolamento precedente completamente crollato, abbondante rinnovazione (fase che non assicura una buona funzione protettiva);

- fase di transizione: le specie pioniere sono sostituite dalle specie definitive (fase che non assicura una buona funzione protettiva);

Quindi è utile concentrare l'attenzione su foreste che si trovino in fasi che possano svolgere una efficace funzione protettiva, quindi una delle prime tre fasi elencate nel ciclo evolutivo.

Ancora dal manuale di **Regione Valle d'Aosta e Regione Piemonte (2006)**, sono presentate delle indicazioni derivanti dall'esperienza dell'ente sul tipo di bosco ideale per zone in cui scivolamenti e l'infiltrazione dell'acqua possono innescare colate detritiche; in Tabella 10 sono riportate tali indicazioni.



**Tabella 10: caratteristiche di un bosco di protezione in caso di pericolo da colata**

<b>Zone</b>	<b>Parametri</b>		<b>Dimensioni massi</b> <b>Esigenze in base al pericolo</b> <b>naturale stato minimo</b>	<b>Esigenze in base al pericolo</b> <b>naturale stato ideale</b>	
<b>Zona di scivolamento</b>	<b>Composizione</b>		compatibilmente con la categoria forestale, su suoli compatti e pesanti favorire le specie pioniere a radicazione profonda; tra le latifoglie: frassino, olmo, pioppo tremolo, ontani; tra le conifere: abete bianco, pino silvestre; nelle foreste di transizione occorre tendere verso la mescolanza di specie adatte alla stazione più mesofila		
	<b>Densità</b>	<b>N. Piante/ha</b>	indifferente purché sia rispettata la % di copertura.		
		<b>% di Copertura</b>	≥ 40%	≥ 60%	
	<b>Struttura</b>	<b>Numero strati</b>	popolamento pluristratificato		
		<b>Aperture</b> (lungo la linea di pendenza)	< 20 m e superficie < 600 m <sup>2</sup> , in presenza di rinnovazione affermata < 25 m e superficie < 1.200 m <sup>2</sup> <sup>1</sup>	< 15 m e superficie < 400 m <sup>2</sup> , in presenza di rinnovazione affermata < 20 m e superficie < 800 m <sup>2</sup> <sup>1</sup>	
<b>Elementi di stabilità</b>	<b>Ancoraggio</b>	- assenza di alberi di diametro grande (> 47,5 cm) o potenzialmente instabili per azione del vento, - > 80% di alberi con buona radicazione evidente	- assenza di alberi di diametro grande (> 47,5 cm) o potenzialmente instabili per azione del vento, - > 90% di alberi con buona radicazione evidente		
<b>Zona di infiltrazione</b>	<b>Densità</b>	<b>% di copertura</b>	≥ 30%	≥ 50%	

Per quanto riguarda gli unici due esempi di bosco di protezione rilevati da Dotta e Motta (2000), le caratteristiche sono:

- Ceresole Reale, loc. Villa Poma, 1630 m s.l.m., pendenza 35°: pecceta subalpina quasi pura (con percentuale relativamente ridotta di larice) con interesse esclusivamente protettivo, paesaggistico e naturalistico. La distanza media fra le piante è risultata di 4,66 m. In Tabella 11 sono riportati i dati risultanti dallo studio.

**Tabella 11: dati relativi alla foresta di protezione di Ceresole Reale**

<b>Ceresole reale - Villa Poma</b>						
specie	densità	area basimetrica	diam med	diam max	altezza med	altezza max
	piante/ha	mq	cm	cm	m	m
<b>Abete rosso</b>	370	27,3	30,7	50	16,8	25
<b>Larice</b>	90	6	29,1	40	n.d.	n.d.

- Bardonecchia, loc. Sette fontane di Valle Stretta, 1550 m s.l.m., pendenza 15°: pineta su detrito di falda con finalità unicamente di protezione (si trova a monte della strada per Colle della Scala). La distanza media fra le piante è risultata di 4,56 m. I dati risultanti dallo studio sono riportati in Tabella 12.

**Tabella 12: dati relativi alla foresta di protezione di Bardonecchia**

<b>Bardonecchia - Sette fontane di Valle Stretta</b>						
specie	densità	area basimetrica	diam med	diam max	altezza med	altezza max
	piante/ha	mq	cm	cm	m	m
<b>Pino uncinato</b>	480	21,6	23,9	35	11,9	16

## 2.6.5 Tecniche selvicolturali nelle foreste di protezione

Le foreste di montagna come sono quelle di cui ci stiamo occupando hanno bisogno dell'applicazione di trattamenti selvicolturali peculiari. Prima di operare è quindi necessaria un'approfondita analisi delle diverse componenti dell'ambiente e dei fattori con esse interagenti. Quindi il selvicoltore dovrà decidere natura ed intensità dei possibili interventi per raggiungere lo scopo indipendentemente da schemi prefissati ma supportato da osservazioni ed interpretazioni.

Come già accennato, all'interno di foreste di protezione, gli interventi di selvicoltura dovranno essere mirati al mantenimento della funzione protettiva e quindi saranno giocoforza interventi a macchiatico negativo.

È stata studiata in diversi ambiti la relazione esistente fra tecniche selvicolturali classiche, ovvero mirate allo sfruttamento della risorsa legno, e sviluppo dei debris flow (Mills et al. 2003) in particolare sono i tagli raso a determinare le condizioni maggiormente predisponenti all'innesco dei fenomeni di trasporto di massa. Dallo studio emerge anche che boschi giovani (di età inferiore a 9 anni), e boschi maturi e stramaturi (oltre i 100 anni) sono più predisposti ad originare dissesto.

Quindi indicazioni di massima per gli interventi da farsi in boschi di protezione da colate detritiche consistono in:

- allontanamento delle piante potenzialmente instabili lungo il reticolo idrografico principale e secondario: gli alberi ed il legname presenti in alveo devono essere allontanati in quanto rappresentano materiale che, in caso sia di trasporto di massa che di trasporto liquido, provoca possibili ostruzioni nelle sezioni di minore ampiezza come ponti, anse e promontori rocciosi. Tali sbarramenti possono provocare avulsioni o accumuli di materiale che potrebbero innescare nuove e più pericolose colate;
- evitare tagli totali e diffusi della vegetazione lungo le sponde;
- impiegare tagli di selezione atti a favorire vegetazione stabile e flessibile (*Salix e Alnus*). La presenza di un popolamento stabile riduce l'erosione superficiale e l'innesco di fenomeni dissestivi;

impiegare anche tagli a buche, che dal punto di vista naturalistico e anche pratico sembrano essere i migliori, seguendo le indicazioni riportate in

- Tabella 10;
- la difficile esecuzione dell'esbosco rende consigliabile il concentramento del materiale legnoso in zona di sicurezza, ovvero oltre la sezione occupata da una piena con tempo di ritorno di 200 anni.

Interventi consistenti nell'abbattimento di alcune piante per favorire la rinnovazione presente e per favorire l'insediamento di nuove piantine, per favorire la struttura a gruppi ed eliminare le piante instabili sono mirati a raggiungere una configurazione di bosco di protezione; in particolare: gli individui vengono recisi a 70-80 cm da terra e i tronchi lasciati a terra (obliqui rispetto le linee di massima pendenza e ben ancorati alle basi dei tronchi rimaste o agli altri individui del popolamento) per creare ostacoli alla corsa di pietre piuttosto che di valanghe o altri materiali. Sono da considerare i pericoli di attacco da parte degli scolitidi, e di brucamento da parte della fauna selvatica.

Nel settore altitudinale studiato e in popolamenti aventi caratteristiche simili, i popolamenti che svolgono una migliore funzione protettiva sono quelli misti con buona presenza di larice, disetanei e pluristratificata, e con una struttura orizzontale (tessitura) a piccoli gruppi. La situazione ideale per popolamenti di questo tipo consiste nella presenza di uno scheletro rappresentato da un centinaio di individui di grandi dimensioni in buone condizioni fitosanitarie (in grado di offrire resistenza nei confronti di disturbi) ma complessivamente giovani e ricchi di rinnovazione (che offrono resilienza)

In Mori (2002) viene presentata una metodologia per il rilievo dello stato dei boschi di protezione e per la valutazione degli interventi necessari: la struttura del metodo consiste nel riconoscimento del bosco e nella sua classificazione per poi procedere alla determinazione dello stato attuale e della tendenza di sviluppo nel breve e medio periodo; infine il selvicoltore dà indirizzi sugli interventi da effettuare per raggiungere lo stato ideale per assicurare la funzione protettiva richiesta al bosco in questione.

In letteratura si trovano anche interventi come nuovi impianti di larice per la stabilizzazione di versanti sui quali insiste un effettivo pericolo di franamento (Crosignani e Mazzucchi 1996).

### **3 MATERIALI E METODI**

#### **3.1 Introduzione**

Lo studio ed il monitoraggio di casi reali di debris flow direttamente in campo è il metodo di studio che può dare la migliore chiave di lettura del fenomeno proprio per le caratteristiche dei materiali, i volumi, le velocità e le forze in gioco. Lo studio di campo, tuttavia, è anche molto impegnativo in termini di tempo e di costi, considerando che la possibilità di cogliere eventi di colata in una determinata località è ridotta e quindi lo studio è limitato al singolo evento, a meno che non ci siano le condizioni di alta frequenza come accade in alcuni bacini, dove i debris flow si ripetono anche annualmente (Ancy, 2001).

La riproduzione del fenomeno in laboratorio è quindi un metodo di studio a cui è inevitabile ricorrere e che è riconosciuto come utile strumento (D'Agostino et al. 2010, Coussot e Meunier 1996) grazie al costo relativamente basso, la ripetibilità delle prove, la riproduzione in condizioni controllate.

Alcune delle caratteristiche più importanti del fenomeno (velocità, forma del deposito, volume del deposito, distribuzione granulometrica) possono essere misurate con relativa facilità rispetto alle condizioni di campo, anche se comportano problemi di scala, che non sono ancora completamente risolti.

Per alcuni autori la stima di parametri reologici attraverso prove di laboratorio rappresenta il principale problema poiché i risultati ottenuti presentano spesso discrepanze rispetto quelle ottenute da back-analysis di eventi passati (Gröndahl, 2008).

#### **3.2 Modellazione fisica a scala di laboratorio**

Prima di realizzare ex-novo un modello fisico a scala ridotta è stata condotta un'analisi bibliografica sull'argomento per verificare come altri autori hanno affrontato il medesimo problema, con riferimento anche alla scalatura del modello fisico rispetto al prototipo. Ciò che emerge è che gli autori si limitano a descrivere l'apparato sperimentale senza affrontare direttamente il problema della scalatura.

Di seguito viene presentata una rassegna dei lavori reperiti.

##### **3.2.1 Apparecchiature descritte in letteratura**

**Major (1997):** esegue prove sul canale realizzato dall' USGS di 95 m di lunghezza per 2 m di larghezza, pendenza di 31°, carico massimo 10 m<sup>3</sup>; l'autore non accenna alla questione scalatura.

**Ancy (2001),** parla di esperimenti condotti in canaletta con fondo erodibile e distingue, considerando una portata d'acqua sufficientemente elevata, due comportamenti in funzione della pendenza del canale: con pendenza inferiore al 20% il flusso d'acqua origina un trasporto di fondo (concentrazione

volumetrica minore del 30%), mentre con pendenze maggiori aumenta il materiale mobilizzato (flusso con il 50-90% di concentrazione solida) e quindi il flusso può essere assimilato ad un debris flow in natura. L'autore affronta il problema della modellizzazione nel quale presenta i tre numeri adimensionali utili a simulare fluidi alla Herschel-Bulkley, e nel suo caso di debris flow su modelli a piccola scala.

**Egashira et al. (2001):** utilizzano un canale sperimentale per lo studio dell'erosione del fondo da parte dei debris flow; il canale ha larghezza pari a 10 cm, altezza pari a 20 cm, e lunghezza pari a 6 m. Nella pubblicazione si capisce che la colata viene generata dalla combinazione di un dispensatore di materiale solido e da uno di acqua; la pendenza di esercizio viene mantenuta a 12°, e le osservazioni vengono effettuate tramite videocamera ad alta velocità. Nella pubblicazione non vengono menzionati possibili problemi di scalatura dovuti alla dimensione della canaletta o al tipo di miscela impiegata.

**Iverson e Denlinger (2001)** sostengono che gli apparati a piccola scala non siano adeguati a riprodurre un debris flow, ma non dimostrano che il loro apparato di dimensioni maggiori riesce effettivamente a farlo.

**Iverson e Vallance (2001):** effettuano prove in canaletta per verificare la dipendenza del comportamento del debris flow realizzato in canaletta (lunghezza 3 m, larghezza 0,3m e pendenza 18°) da alcuni parametri (temperatura, quota di taglio e pressione del fluido intergranulare). Gli autori descrivono l'apparato sperimentale in una didascalia senza affrontare il problema della scalatura. Calcolano i numeri di Savage (numero adimensionale che stima la quota di stress collisionale fra grani rispetto lo stress gravitazionale, in flussi stazionari a superficie libera), di Bagnold (numero adimensionale che stima il rapporto fra stress da collisione granulare e stress di taglio viscoso in una mistura granulare) e di Massa (numero adimensionale che quantifica approssimativamente l'effetto della concentrazione volumetrica della parte granulare sulle forze che governano il flusso).

**Pearson et al. (2001):** effettuano prove in canaletta di lunghezza 10 m, inclinabile da 10,7° a 15,2°. Lo studio punta a chiarire la transizione fra comportamento fluido-fangoso e flusso-granulare. Vengono calcolati i numeri di Bagnold, Savage e Frictional, per determinare la variazione del comportamento del debris flow in funzione della dominanza delle forze di collisione, di attrito e viscosità nella resistenza al moto.

**Deganutti et al. (2003):** eseguono prove su reometro con una canaletta di lunghezza 2m e 0,30 m di larghezza, e con piano di lunghezza 1,5m e larghezza 1m coperto da un reticolo a maglie quadrate per la simulazione della scabrezza naturale della conoide. Gli autori accennano ai parametri adimensionali ma allo stesso tempo dichiarano che la scalatura è un problema arduo da risolvere, senza dare indicazioni sul modello utilizzato.

**Hashimoto e Park (2003):** studiano la quota di trasporto di sedimento in canale aperto con file multiple di cilindri, utilizzando canalette di lunghezza pari a 12 m e larghe da 15 a 20 cm, realizzano, fra le altre, prove in regime supercritico con pendenza pari a 12° che associano alla simulazione dei debris flow. In canaletta vengono disposti strati di sedimento con spessore variabile fra le prove; il materiale ha diametro variabile fra 0,55 e 5,9 mm. L'innescò del flusso è dato da una portata immessa nella parte iniziale del canale. I cilindri inseriti nella parte terminale del canale hanno diametro fra i 4 e 5 mm, si trovano a una distanza fra i 5,7 e i 6 cm. Anche in questo caso non viene affrontata la questione della scalatura. Dalle prove emerge che la quota di sedimento in uscita rispetto a quella in entrata diminuisce all'aumentare del diametro del materiale di fondo e dell'estensione dell'area occupata dagli elementi cilindrici.

**Malet (2003)** descrive un apparato sperimentale consistente in un canale lungo 4 m e largo 25 cm, dotato di saracinesca all'apice con un volume caricabile pari a 0,002 m<sup>3</sup>. Il flusso dei materiali testati dura da 10 a 30 min e serve per determinare lo stress di snervamento secondo le relazioni proposte da Coussot et al. (1996) che considerano la profondità di flusso asintotico e la formula degli argini laterali. Tali prove hanno, a parità di parametri di partenza, differenze inferiori al 5%.

**Bateman et al. (2006):** effettuano prove in canaletta di lunghezza 9,2 m, larghezza 40 cm e altezza 60 cm inclinabile da 0° a 27,5° che scarica il materiale in una vasca da 4,3 m di lunghezza per 2,5 m di larghezza. Il materiale utilizzato per le prove è granulare e i diametri non sono inferiori a quelli delle sabbie fini (non utilizzano limi e argille per problemi di gestione). L'articolo, per quanto riguarda l'apparato sperimentale, si limita alla sola descrizione.

**Cesca (2008):** ha effettuato prove sullo stesso reometro di Deganutti et al. (2003) con una canaletta di larghezza 0,15 m, e con piano di lunghezza 1,5 m e larghezza 1 m, scabro ma senza maglie quadre; ammette che il modello non può essere considerato rappresentativo di un evento reale; ottiene risultati che vengono utilizzati da pubbliche amministrazioni che gestiscono il territorio montano.

**Mambretti et al. (2008):** sviluppano un modello monodimensionale basato sulle equazioni di Saint Venant considerando anche l'erosione e deposizione e l'interazione fra strati diversi, validato con i risultati di prove di laboratorio eseguite sull'apparato sperimentale presente nel laboratorio di Idraulica del Politecnico di Milano. In questo caso l'apparato è stato utilizzato per riprodurre il fenomeno del dam-break e la colata che da esso origina. L'attrezzatura consiste in un serbatoio di dimensioni pari a 0,5x0,5x0,9 m dotato di apertura comandata idraulicamente (tempo di apertura pari a 0,3 s) e di una canaletta di dimensioni 0,5x0,5x6 m. La questione della scalatura non viene affrontata, nemmeno nell'articolo descrittivo dell'apparato sperimentale (Larcan et al., 2002).

**Shieh et al., 2008:** effettuano prove in canaletta per verificare l'impatto dei debris flow su strutture trasversali (Sabo dam) di forma diversa; la canaletta è lunga 8 m, larga 0,2 m e ha sponde alte 0,5 m. Descrivono l'apparato sperimentale senza affrontare il problema della scalatura. Calcolano il numero di Froude per confrontare i flussi delle diverse prove che eseguono.

**Takahara e Matsumura (2008):** eseguono prove di laboratorio in scala 1:40, con pendenze del canale pari a 12° e 16°, per testare nuove strutture per l'arresto delle colate ma senza considerare il problema della scalatura.

In conclusione, la rassegna bibliografica evidenzia che la maggior parte degli studi si limita a descrivere brevemente l'apparato sperimentale ma non affronta, se non in maniera marginale, il problema della scalatura e le sue conseguenze.

Oltre alle considerazioni di Iverson e Denlinger (2001), anche D'Agostino et al. (2010) deducono da questi studi che gli effetti viscosi sono meno importanti e la pressione interstiziale (nei pori) è conservata più a lungo nei flussi a larga scala. La rapida dissipazione di pressione dei pori può quindi aumentare la resistenza al moto nei modelli a piccola scala.

### 3.2.2 Scalatura

Molti processi che si presentano in natura sono difficilmente osservabili e soprattutto misurabili per la loro rarità ed imprevedibilità e a causa di una serie di difficoltà pratiche. Solitamente tali fenomeni sono anche difficilmente riproducibili in scala reale ed è particolarmente utile studiarli attraverso una riproduzione in scala ridotta approntando modelli fisici. È questo il caso delle colate, il cui verificarsi in una determinata località in un determinato momento è scarsamente prevedibile, e la cui rapidità e violenza impedisce di effettuare misure rigorose dei parametri che ne regolano l'innescò e la dinamica, e che non possono essere indotte se non a scala ridotta sia in campo che in laboratorio. La validità delle sperimentazioni e dei risultati ottenuti con modelli in scala ridotta è legata alla corretta identificazione della legge di similitudine applicabile ai processi in esame.

Nel campo dell'idraulica l'utilizzo dei modelli fisici è ormai una pratica consolidata, così come sono ormai note ed universalmente accettate le leggi di similitudine (si veda ad esempio Novak et al. 2010). Così non è per i fenomeni di colata che presentano ancora un limitato numero di sperimentazioni di laboratorio, ed ancor meno di campo, e per i quali le leggi di similitudine proposte devono ancora essere investigate.

In generale, come già accennato nel precedente paragrafo, quando l'argomento viene trattato gli autori che fanno riferimento o al numero di Froude (si veda ad esempio Hubl et al. 2009), o a fattori adimensionali appositamente introdotti per lo studio delle colate (si veda ad esempio Denlinger e Iverson, 2001).

Il numero di Froude è espresso come:

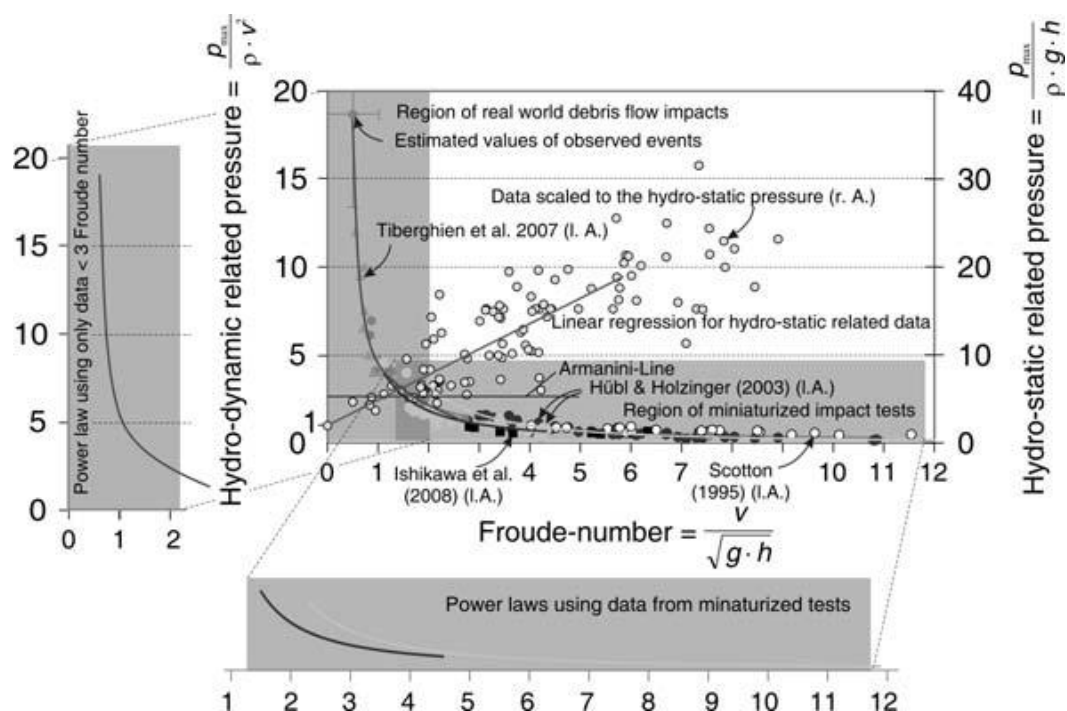
$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}}$$

Dove  $v$  è la velocità della colata (m/s),  $g$  è l'accelerazione di gravità ( $m/s^2$ ) e  $h$  è lo spessore del flusso (m) misurato alla fine delle prove.

Il numero di Froude è un parametro adimensionale che nasce per caratterizzare i flussi di acqua e mette in relazione la forza di inerzia che origina dal flusso con la forza di gravità; il significato cinematico del numero di Froude è quello di distinguere le correnti, ovvero:

- Quando il  $Fr > 1$  si parla di regime torrentizio o corrente supercritica (la forza d'inerzia domina la forza peso);
- Quando il  $Fr < 1$  si parla di regime fluviale o corrente subcritica (la forza peso domina la forza d'inerzia).

Hubl et al. (2009) utilizzano il numero di Froude come riferimento adimensionale per classificare debris flow reali e riprodotti in laboratorio. In particolare, ai fini del calcolo della pressione idrostatica relativa e idrodinamica relativa, indicano per i casi reali di debris flow valori del numero di Froude compresi fra 0 e 2, mentre per le riproduzioni in laboratorio valori del numero di Froude di 1,2 e 12 (Figura 17).



**Figura 17: relazione fra forza d'impatto del debris flow e numero di Froude derivante da dati di campo e dati da esperimenti (Hubl et al., 2009)**

Per i flussi geofisici di grandi dimensioni si considera che gli stress viscosi siano trascurabili ma gli effetti della pressione interstiziale importanti (Denlinger e Iverson, 2001). Per i flussi geofisici in miniatura, con il diminuire delle dimensioni del flusso gli stress viscosi diventano significativi e gli effetti della pressione interstiziale diminuisce in termini di importanza. Inoltre, i flussi di ridotte dimensioni possono mostrare effetti dovuti alla tensione superficiale. Su tali basi sono stati proposti parametri adimensionali specifici per lo studio delle colate detritiche. I valori di riferimento di tali indici sono riportati da Iverson (1997) per debris flow di magnitudo da  $10^3$  a  $10^9$   $m^3$  (range che secondo l'autore copre il campo di magnitudo riferita a colate detritiche, all'interno del quale possono essere considerati debris flow). Tabella 13.

**Tabella 13: dati relativi agli esempi di fenomeni studiati da Iverson 1997 con i numeri adimensionali relativi.**

fenomeno	magnitudo	$N_{Sav}$	$N_{Bag}$	$N_{Dar}$
	$m^3$	-	-	-
USGS d.f.	10	0,2	400	600
Odd Stad d.f. 1982	$10^3$	$2 \cdot 10^{-4}$	4	60000
South Toutle 1980	$10^7$	$6 \cdot 10^{-6}$	0,2	$2 \cdot 10^6$
Osceola 5700 B.P.	$10^9$	$1 \cdot 10^{-7}$	0,4	$6 \cdot 10^7$

Il numero di Savage è calcolato con la seguente formula:

$$N_{Sav} = \frac{\gamma^2 \rho_s D^2}{(\rho_s - \rho_f) g H \tan \phi}$$

Dove  $\gamma$  è la quota di taglio della mistura ( $1/T$ ),  $\rho_s$  è la densità del materiale solido ( $kg/m^3$ ),  $D$  è il diametro medio del materiale solido (m),  $\rho_f$  è la densità del fluido interstiziale ( $kg/m^3$ ),  $g$  è l'accelerazione di gravità ( $m/s^2$ ),  $H$  è la profondità del flusso (m),  $\phi$  è l'angolo di attrito interno o angolo di riposo ( $^\circ$ ).

Il numero di Bagnold viene calcolato con la seguente formula:

$$N_{Bag} = \frac{V_s \rho_s D^2 \gamma}{(1 - V_s) \mu}$$

Dove  $V_s$  è il volume del materiale solido ( $m^3$ ),  $\mu$  è la viscosità dinamica del fluido interstiziale (Pa s).

Il numero di Darcy viene calcolato con la seguente formula:

$$N_{Dar} = \frac{\mu}{V_s \rho_s \gamma k}$$

Dove  $k$  è la permeabilità della massa mentre il materiale solido sta fluendo.

Poiché la questione della scalatura è argomento ancora controverso nella letteratura internazionale e non rientra negli obiettivi del presente lavoro si è preferito non approfondire ulteriormente le conoscenze in merito, ma procedere con l'esecuzione delle prove. In analogia con la maggior parte delle sperimentazioni effettuate a scala di laboratorio, per la scalatura delle prove svolte verrà preso in considerazione il numero di Froude.

### 3.3 Apparecchiatura utilizzata nelle prove

Presso il Dipartimento di Ingegneria Agraria della Facoltà di Agraria dell'Università degli Studi di Milano è stato progettato e costruito un piano con canaletta inclinata per la simulazione delle colate detritiche a piccola scala. L'attrezzatura (Figura 18) è composta da una canaletta e un piano di deposito.



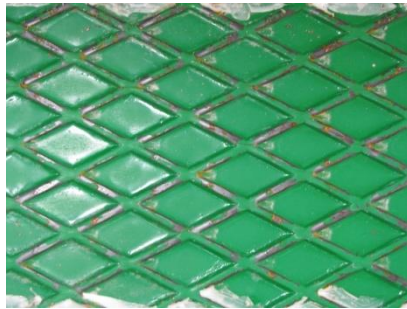


**Figura 18: reometro del Dipartimento di Ingegneria Agraria, sezione di Idraulica: si può notare in primo piano la canaletta inclinabile con il sistema di regolazione della pendenza, ed in secondo piano il bancone in cui si realizza il deposito.**

La **canaletta**, lunga 200 cm, larga 15 cm e alta 40 cm, ospita i fermi necessari a posizionare la paratoia che realizza la vasca di accumulo (vedi Figura 19). I fermi si trovano a distanze differenti dall'inizio del canale in modo tale da poter aumentare il volume di partenza dell'evento simulato. Il fondo del canale è liscio e predisposto per l'aggiunta di un accessorio consistente in una lastra godronata di lunghezza e larghezza pari a quella della canaletta adibita allo scorrimento, in modo tale da riprodurre la scabrezza naturale dell'alveo (vedi Figura 20). La canaletta è regolabile a diverse pendenze che vanno da un massimo di  $45^\circ$  a un minimo di  $25^\circ$ . Le varie posizioni che la canaletta può assumere, per natura stessa del sistema di regolazione della pendenza, portano a far coincidere il limite inferiore della stessa con posizioni diverse sul piano di deposito. Questo fattore produce la necessità di sigillare ad ogni cambio di pendenza il punto di contatto fra canaletta e piano (cambio di pendenza) per evitare fuoriuscite di materiale o drenaggio della parte più liquida in zone indesiderate. All'interno della canaletta sono stati adesi alle pareti pezzi di fasce millimetriche a distanze note rispetto la paratoia (35, 70, 105, 140 cm) con lo scopo di facilitare la lettura delle altezze di flusso della colata.



**Figura 19: vista frontale della canaletta nella configurazione con fondo scabro.**



**Figura 20: particolare del fondo della canaletta: la maglia in rilievo, larga 5 mm, disegna rombi che presentano una diagonale minore pari a 18 mm e una diagonale maggiore pari a 40 mm.**

Il **piano di deposito** presentato in Figura 21, alla fine della canaletta, serve per raccogliere il deposito e permettere le osservazioni sulle morfologie tipiche dei debris flow quali argini e lobi. Il piano è dotato di due sistemi di regolazione della pendenza, uno posto nel punto di connessione con la canaletta (Figura 22), e l'altro posto nella parte distale rispetto al senso del flusso della colata (Figura 23), i quali permettono di configurare il piano con pendenze variabili da  $0^\circ$  a  $-10^\circ$ . Il fondo è stato realizzato con lamiera mandrolata, per riprodurre la scabrezza delle zone di deposizione (Figura 24), e presenta un bordo alto 3 cm utile a facilitare le operazioni di lavaggio alla fine di ogni esperimento. I reflui del lavaggio vengono raccolti in una vasca posta sotto lo scarico (Figura 23) che si trova nella parte distale del piano rispetto al flusso della colata: questo sistema di recupero permette la decantazione della sospensione e la separazione dell'acqua dal sedimento. Per contenere la corsa della colata dopo il cambio di pendenza (Run Out) ed anche in previsione di costruire canali di dimensioni maggiori, il piano di deposito è stato abbondantemente sovradimensionato. Nella parte di piano più vicina alla canaletta sono stati praticati dei fori e saldati dei bulloni nella parte sottostante per permettere la predisposizione delle configurazioni con elementi simulanti il bosco: quest'area ha una larghezza di 1 m e una lunghezza di 1,2 m; i fori hanno una spaziatura di  $10 \times 10$  cm e sono stati svasati per consentire l'applicazione di viti a scomparsa per non influenzare la scabrezza del piano in assenza di elementi.



**Figura 21: piano di deposito**



**Figura 22: sistema di regolazione della pendenza del piano di deposito nella parte prossimale al cambio di pendenza**



**Figura 23: sistema di regolazione della pendenza del piano di deposito nella parte distale rispetto il cambio di pendenza, e scarico delle acque di lavaggio.**



**Figura 24:** particolare del piano sul quale si realizza il deposito del materiale delle simulazioni: lo spessore degli elementi di scabrezza è pari a 2 mm, la dimensione è di 10 mm nel punto più largo e 25 mm nel punto più lungo.

Le due parti principali sono montate su un telaio munito di ruote che permette un agevole spostamento della macchina.

Rispetto reometri descritti in studi precedenti, la grande innovazione di questo strumento è la possibilità di configurare il piano di deposito con leggere pendenze, così da simulare fedelmente la pendenza reale dei conoidi di deposizione. I conoidi, infatti, non presentano mai pendenza  $0^\circ$  e pur rimanendo grandi incertezze nella simulazione a piccola scala delle colate detritiche, questa variabile fa pensare che sia più corretto impostare il piano con pendenze simili alle pendenze delle conoidi nei casi reali.

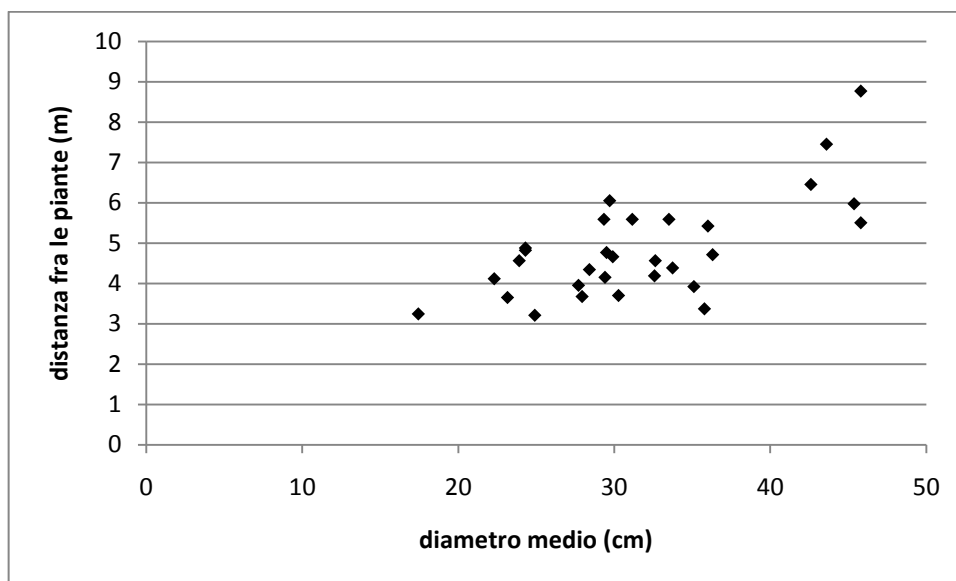
### 3.4 Parametri per la scalatura del bosco

Valutando la diffusione e la fascia altimetrica occupata dalle categorie più diffuse sul territorio montano (faggete, peccete e castagneti) si è pensato fosse più interessante prendere in considerazione una fustaia, vista la maggiore resistenza che un bosco del genere può opporre ad una colata, e vista la possibilità di gestire le specie citate sotto questa forma (Regione Autonoma Valle d'Aosta – Regione Piemonte, 2006). In Tabella 14 sono riportati i dati caratteristici di una fustaia di faggio che, sulla base delle attuali indicazioni, potrebbe essere un valido esempio di bosco di protezione facendo quindi riferimento ad una fase evolutiva nella quale la presenza di piante possa fungere da elemento di protezione contro le colate. Il dato di area basimetrica è piuttosto abbondante ma si può considerare attendibile in funzione dell'invecchiamento dei boschi che da alcuni decenni a questa parte non vengono mantenuti correttamente.

**Tabella 14:** caratteristiche di una fustaia di faggio tipo

fustaia di faggio		
età	70	anni
numero	150	Piante/ha
diametro medio	0,7	m
area basimetrica totale	57,7	m <sup>2</sup> /ha

Per ottenere dati di diametro e spaziatura fra individui arborei di diversa specie si è fatto riferimento in particolare a Dotta e Motta (2000) in cui vengono presentati i dati relativi a 30 aree di studio in boschi di conifere alpine, e dalle quali si è ottenuta la distribuzione diametro medio - distanza fra le piante (Figura 25).



**Figura 25: grafico rappresentativo del rapporto diametro medio - distanza fra le piante, ottenuto dai dati rilevati nelle 30 aree di studio della pubblicazione Dotta e Motta (2000).**

Dall'analisi degli strati informativi di Regione Lombardia (vettoriale semplificato delle categorie forestali, conoidi, frane lineari, disponibili sul geoportale di R.L.) con software GIS, sono state individuate le categorie più presenti in conoide.

Analizzando il tematismo delle categorie ritagliato con gli shape delle conoidi di deiezione, e con un buffer da 10 m dello shape delle frane lineari, si può notare che le categorie più diffuse nelle aree in cui un bosco di protezione potrebbe svolgere la sua funzione nei confronti delle colate di detrito sono quelle riportate in

Tabella 15. I dati presentati in

Tabella 15 sono solo una indicazione in quanto lo shape delle conoidi è evidentemente incompleto perché lo shape considerato presenta diverse aree scoperte e aver considerato un buffer di 10 m non considera la superficie che può essere eventualmente investita da una possibile avulsione di un evento di debris flow.

**Tabella 15: percentuale di superficie occupata da ogni categoria forestale risultante dalle elaborazioni condotte per individuare il bosco maggiormente presente nelle immediate vicinanze degli alvei in conoide.**

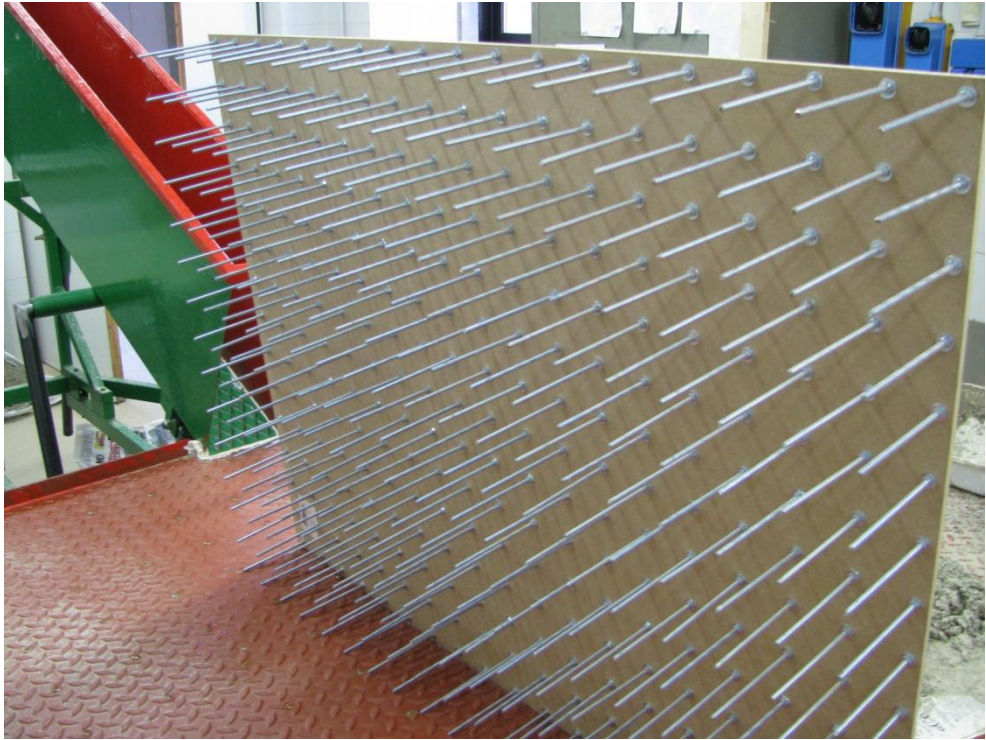
percentuale di superficie per categoria (7,36 km <sup>2</sup> )	
CATEGORIE	%
peccete	25,82
faggete	12,50
lariceti, larici-cembrete e cembrete	11,76
castagneti	11,26
aceri-frassineti e aceri-tiglieti	7,40
orno-ostrieti	7,32
querceti	4,43
abieteti	4,00
pinete di pino silvestre	3,52
formazioni antropogene	3,22
alneti	2,87
betuleti e corileti	2,12
mughete	1,67
piceo-faggeti	0,96
formazioni particolari	0,69
non classificato	0,28
querco-carpineti e carpineti	0,18

Dalla presentazione di Del Favero (2004) dei boschi classificati in chiave Tipologie Forestali, completa di parametri quantitativi descrittivi dei boschi, sono state considerate le caratteristiche silvane per confrontare i parametri utilizzati per la pianificazione degli esperimenti.

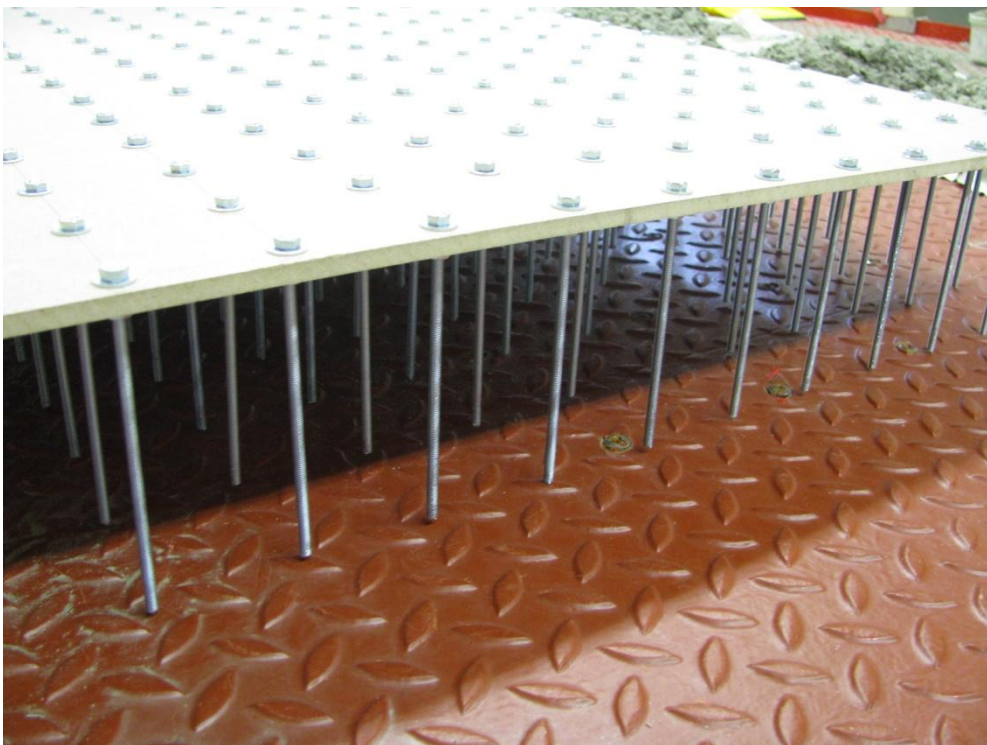
Studi che considerano la presenza di piante nella zona d'arresto delle colate sono presenti raramente in letteratura. Hashimoto e Park (2003) studiano l'effetto della vegetazione durante il trasporto e la deposizione in canali molto pendenti : i due autori utilizzano canali di larghezza compresa fra i 15 e i 20 cm, distanze fra gli elementi di 5,7 – 6 cm (anche se nello schema la densità farebbe supporre distanze pari alla metà del valore dichiarato), ma non giustificano la scelta effettuata. Anche nelle conclusioni vengono presentate valutazioni in merito ai fattori misurati durante le prove ma non viene fatto cenno alla validità di tali considerazioni anche nei casi reali.

Per la simulazione della presenza di un bosco su conoide più fitto di quanto inizialmente previsto, è stato costruito un accessorio che consiste in un grosso pettine con tanti denti, consistenti in aste filettate della medesima lunghezza (10 cm), vincolate al piano accessorio (dimensione pari a 72 cm x 93 cm), con spaziatura 5x5 cm. Il pettine è posizionato alla fine del canale, sul piano, appoggiato dalla parte degli elementi in modo tale che sia rispettata la scabrezza e la contemporanea presenza degli elementi (Figura 26 e Figura 27). Infine, il pettine è stabilizzato zavorrandolo con pesi.





**Figura 26: struttura dell'accessorio per la simulazione del bosco in ambiente di conoide.**



**Figura 27: accessorio per la simulazione del bosco in zona di conoide messo in posizione per l'esecuzione delle prove.**

### 3.5 Esecuzione delle prove

Le prove sono state eseguite con materiali corrispondenti alla matrice di colate detritiche avvenute nelle vallate lombarde, realizzando misture con concentrazioni volumetriche ed impostazioni del reometro differenti.

La **raccolta della matrice** dei depositi da colata è stata eseguita con un setaccio circolare costruito secondo gli standard internazionali ASTM E11, con luci di dimensioni pari a 19 mm (3/4 inch). La zona di prelievo variava a seconda della disponibilità del deposito: apice della conoide per il caso di Balisio, deposito risultante dallo svuotamento di briglie filtranti per il caso del torrente Perlino. È probabile che la granulometria del materiale raccolto sia diversa rispetto la matrice che ha costituito la colata poiché durante il processo di deposizione la distanza dall'apice della conoide è un fattore determinante per la distribuzione del materiale.

Una volta raccolto, il **materiale** viene steso per assicurare una corretta e completa essiccazione all'aria ed ottenere così il materiale solido completamente asciutto. Il materiale viene poi caratterizzato determinando la tessitura.

Le prove granulometriche consistono in una setacciatura per via umida per il materiale di dimensione superiore a 75  $\mu\text{m}$ , e nell'applicazione del metodo del densimetro per il materiale di dimensione inferiore. La densità viene misurata determinando la massa di una certa quantità di matrice (più di 100 g) e determinandone il volume per mezzo di un cilindro graduato da 1 l portato a volume con acqua a densità nota. Per differenza viene quindi determinato il volume della matrice considerata e di conseguenza ottenuta la densità tramite la seguente equazione:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Una nota merita un **secondo metodo** che consiste nell'immergere una quantità nota di materiale in un cilindro graduato riempito parzialmente di acqua, e nel misurare la variazione di volume. Questo secondo metodo è adatto a materiali argillosi che rimanendo un tempo relativamente ridotto in acqua non si rigonfiano falsando il risultato. Nel caso dei materiali analizzati durante le prove eseguite non è stata rilevata la necessità di applicare questo metodo poiché i materiali risultavano grossolani.

Conoscendo le caratteristiche del materiale è stato possibile ricostruire miscele di acqua e materiale a diverse concentrazioni volumetriche.

La **concentrazione volumetrica** è il rapporto fra volume di detrito solido e volume totale della miscela, rappresentato nella seguente equazione.

$$C_v = \frac{V_s}{(V_s + V_a)}$$

Determinando la quantità di acqua e sedimento necessari a riprodurre la miscela desiderata si procede a miscelare le due componenti in un contenitore. Dopo diverse prove, considerato il materiale granulare, si è verificato che il metodo migliore di miscelazione è quello manuale. Una volta omogeneizzata, la miscela viene travasata nella vasca di accumulo ed istantaneamente, per ridurre al minimo la separazione fra frazione solida e liquida, viene aperta la paratoia innescando la colata detritica. In pochi secondi la colata raggiunge il piano e si deposita sullo stesso.

A questa fase segue la successiva misurazione dei parametri caratterizzanti il flusso e il deposito, e quella di osservazione qualitativa del fenomeno, oltre all'acquisizione di immagini complessive e perpendicolari al deposito. L'esperimento si conclude con la pulizia del reometro.

Le **misure** effettuate dopo ogni prova consistono in:

- Misurazione del Run Out del fronte (R, cm) e del Run Out massimo (Rmax, cm), relativo a sassi isolati che raggiungono eventualmente distanze molto maggiori rispetto il fronte di colata; tali misure sono effettuate considerando come inizio il cambio di pendenza, ovvero la parte finale della canaletta e come fine il fronte di colata (nel caso di prove a concentrazione

volumetrica elevata il fronte era ben identificabile, mentre quando la mistura si presentava molto liquida il fronte veniva identificato nel punto in cui il deposito diventava molto diffuso, tanto da consistere in elementi sparsi);

- Misurazione della larghezza massima del deposito ( $B$ , cm) e della distanza della stessa rispetto il cambio di pendenza ( $distB$ , cm);
- Misurazione dello spessore massimo del deposito ( $S$ , cm) e area del deposito in cui si riscontrava;
- Spessore del flusso all'interno della canaletta a 35, 70, 105, 140 cm di distanza dalla paratoia;
- Osservazioni sul deposito: tipo di deposito, distribuzione della frazione grossolana, presenza di morfologie tipiche come lobi, argini;
- Valutazione del materiale rimasto sul fondo della canaletta.

In Figura 28 sono identificati le tre variabili principali misurate durante le prove.

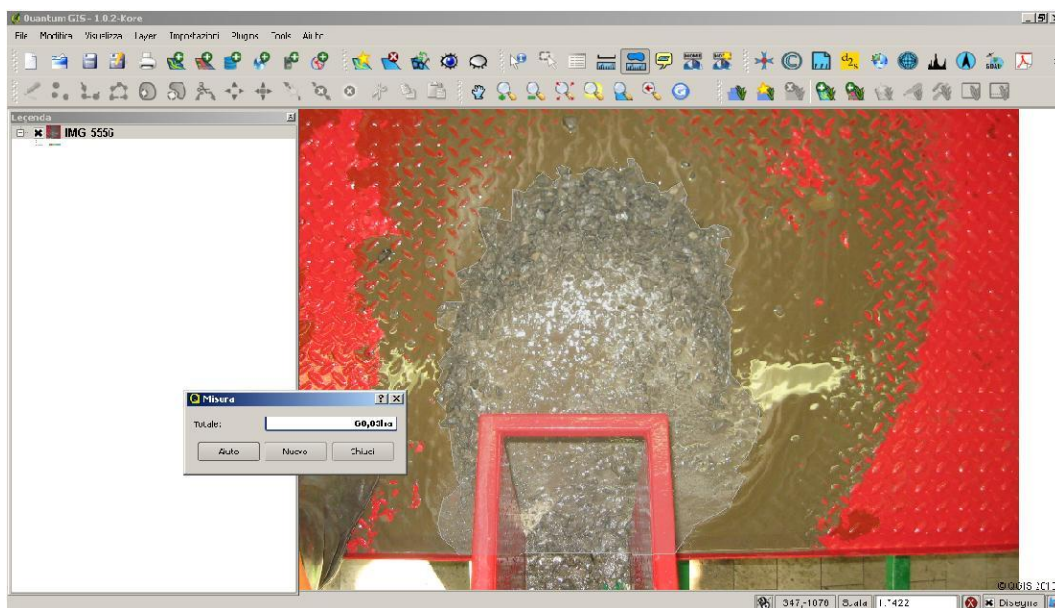


**Figura 28: tre dei parametri misurati durante le prove.**

Le prove sono state filmate con una fotocamera con frequenza di acquisizione pari a 30 frames/s: la qualità del filmato non è tale da permettere una precisa determinazione delle velocità ma comunque sufficiente per avere risultati accettabili.

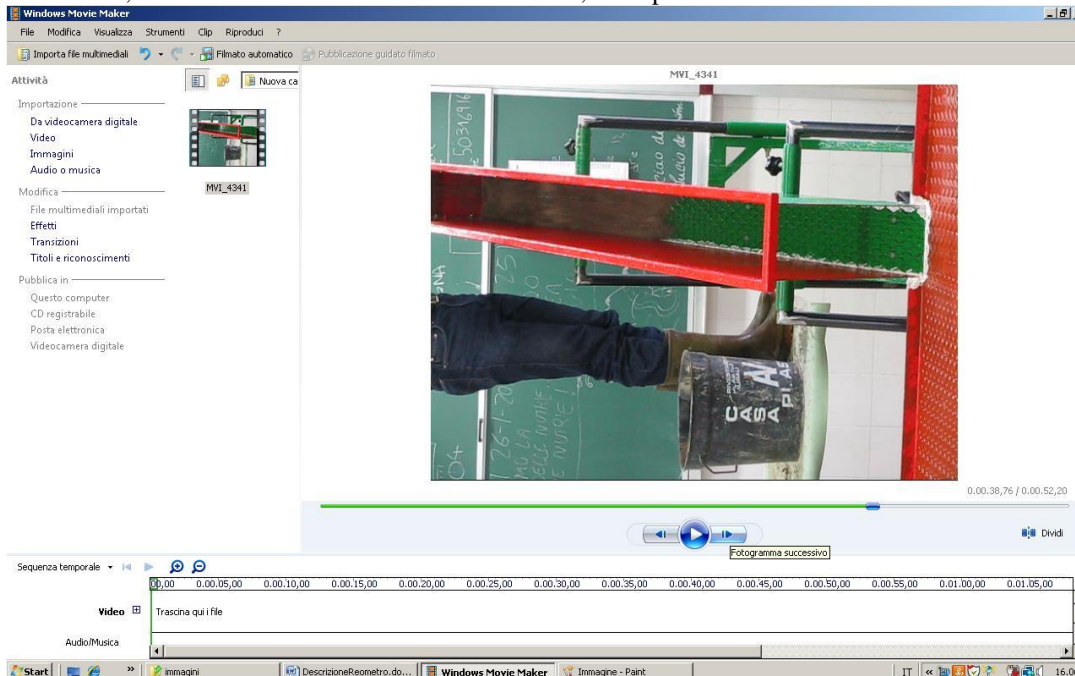
Tramite l'elaborazione delle immagini perpendicolari al deposito, utilizzando il software open source Quantum GIS, viene stimata l'area del deposito riscalandola rispetto alla dimensione della foto (Figura 29): l'area del deposito corrisponde alla porzione di deposito compatto, tralasciando le aree coperte da sottili strati di materiale fine trasportato dall'acqua.





**Figura 29:** elaborazione delle immagini, con il software open source Quantum GIS, per la stima dell'area del deposito delle colate simulate in laboratorio.

Tramite l'analisi dei filmati registrati durante la discesa del materiale lungo la canaletta, attraverso il software Windows Movie Maker, vengono determinati i tempi di passaggio della colata in punti noti e calcolata la velocità nei tre step individuati e la velocità media (Figura 30). Il fronte di colata, che assume una forma arrotondata, con la parte centrale più avanzata rispetto le due laterali, viene considerato, ai fini della determinazione della velocità, nella parte centrale.



**Figura 30:** elaborazione con il software Windows Movie Maker per la stima delle velocità del flusso di colata: si può notare a metà canaletta il fronte di avanzamento della colata che procede più avanzato ai bordi rispetto che al centro.

Le prove sono state eseguite una sola volta poiché Cesca (2008) ha dimostrato come adottando la procedura descritta la loro ripetibilità assicura un errore inferiore al 10%.

### 3.6 Analisi dei risultati

Una volta raccolti i parametri riguardanti le prove, si è proceduto all'analisi statistica per verificare che i gruppi di dati raccolti potessero essere rappresentati da una retta di regressione e che gli stessi appartenessero a serie statisticamente diverse o meno, per apprezzare l'effetto della variazione di ogni parametro di impostazione delle prove. L'analisi si è basata sull'Ancova, ovvero l'analisi della covarianza.

La procedura applicata consiste di 4 step principali:

- Calcolo della linea di regressione;
- Valutazione della significatività dei parametri dell'equazione di regressione;
- Valutazione della potenza della regressione;
- Confronto fra due o più rette di regressione

È stata applicata la regressione lineare semplice:

$$\hat{Y}_i = a + bX_i$$

Dove  $\hat{Y}_i$  è il valore stimato per il valore dell'osservazione i-esima,  $a$  è l'intercetta,  $b$  è il coefficiente angolare che indica quanto varia  $Y$  al variare di una unità di  $X$  e  $X_i$  è il valore empirico osservato.

Ogni punto sperimentale ha una componente di errore che rappresenta lo scarto verticale del valore osservato rispetto la retta di regressione. Per la costruzione della retta esistono diversi metodi fra i quali uno dei più diffusi è il metodo dei minimi quadrati.

Una volta individuata la retta di regressione si esegue il test F per verificare la significatività dei coefficienti della relazione, che consiste nel confronto fra varianza della regressione e varianza d'errore. Tale significatività è collegata alla probabilità di commettere un errore del primo tipo, ovvero rifiutare l'ipotesi quando è vera.

Il passo successivo è il calcolo del coefficiente di determinazione che consiste nel rapporto fra devianza dovuta alla regressione e devianza totale e che rappresenta la proporzione di variazione spiegata dalla variabile dipendente sulla variazione totale, ovvero con quanta approssimazione, nota la variabile indipendente, si prevede la variabile dipendente: quanto più questo rapporto si avvicina a 1 tanto migliore è la regressione.

Si procede quindi con il confronto fra due o più rette per verificare se le due serie sono statisticamente diverse o meno.

L'analisi della covarianza (ANCOVA) è stata eseguita combinando l'analisi della varianza con la regressione: il metodo utilizzato è stato quello delle  $Y$  ridotte che consiste in una prima analisi delle varianze, in cui si esegue un test F per verificare se le medie dei vari campioni presi in considerazione sono statisticamente uguali, ed in un secondo test per verificare che l'analisi sia significativa.

### 3.7 Svolgimento delle prove

Lo svolgimento delle prove ha avuto una pianificazione che è, come spesso avviene nelle sperimentazioni meno consolidate, maturata in itinere.

È necessario introdurre un quadro riassuntivo delle prove per poi procedere alla descrizione dei risultati.

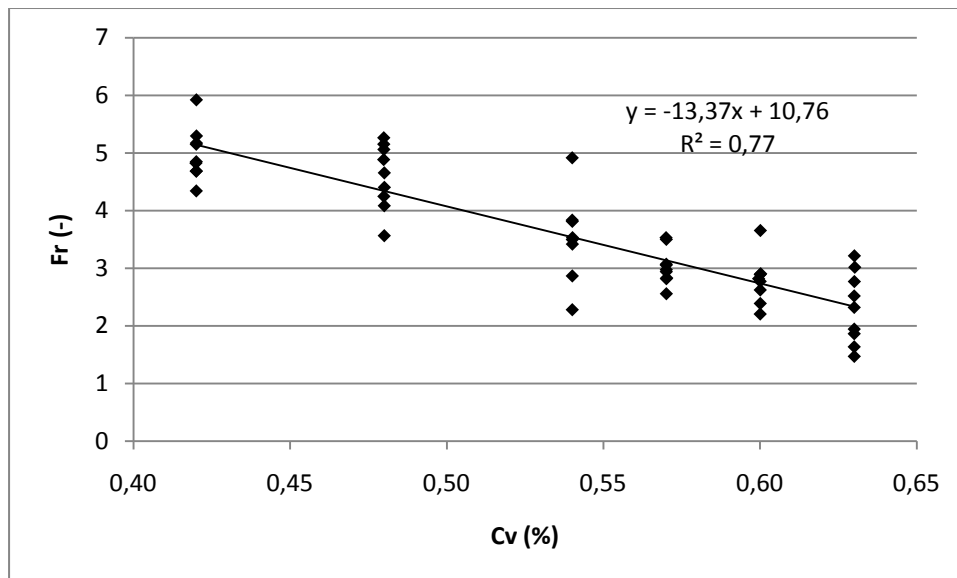
- Prima serie di prove: 9 prove con canale a 25°, con 3 volumi diversi e 3 concentrazioni diverse; 9 prove con canale a 40°, con 3 volumi diversi e 3 concentrazioni diverse;
- Seconda serie di prove: 18 prove come le precedenti ma con elementi da 3,5 cm di diametro disposti sul piano di deposito;
- Terza serie di prove: 9 prove con canale a 27°, con 9 concentrazioni crescenti per caratterizzare il materiale di Balisio, un solo volume (5 l);
- Quarta serie di prove: 10 prove con canale a 40°, con 10 concentrazioni crescenti per caratterizzare il materiale del torrente Perlino, un solo volume (5 l);

- Quinta serie di prove: 18 prove con canale a 25°, con 6 concentrazioni diverse ed elementi distribuiti secondo una spaziatura 10x10 cm con diametro 0,6 cm disposti sul piano di deposito: le prime 6 con piano a 0°, le seconde 6 con piano a 5°, le ultime 6 con piano a 7,3°;
- Sesta serie di prove: 18 prove con canale a 25°, con 6 concentrazioni diverse ed elementi distribuiti secondo una spaziatura 5X5 cm con diametro 0,4 cm disposti sul piano di deposito (285 elementi totali): le prime con piano a 0°, le seconde con piano a 5°, le ultime 6 con piano a 7,3°.

Prima di procedere con la presentazione dei risultati degli esperimenti, è utile presentare quanto emerso in termini di numero di Froude.

Considerando che il flusso in laboratorio viene innescato aprendo una saracinesca che trattiene una mistura immobile, è stato valutato opportuno considerare solo la parte distale del canale in cui si sviluppa il moto; sono così stati calcolati i valori del numero di Froude per gli ultimi due step separatamente (fra 50 e 136,5 cm e fra 136,5 e 200 cm rispetto l'inizio del canale), e mediando i valori di velocità e di spessore del flusso dei due tratti per ottenere un valore più omogeneo.

I risultati di tale elaborazione sono rappresentati in Figura 31, Figura 32 e Figura 33. Dai grafici si nota una relazione inversa chiara, che lega i due parametri: al crescere della concentrazione diminuisce il numero Froude. Tale comportamento è ovviamente dovuto alla porzione di fluido contenuta nella mistura. Osservando poi l'equazione della retta di regressione ottenuta per ogni grafico, si nota che in genere il coefficiente di determinazione è buono, migliore per il grafico che considera lo step finale in cui si realizza la velocità massima, ulteriormente migliorato se si considerano i valori medi dei due step.



**Figura 31: grafico del numero di Froude in funzione della concentrazione volumetrica per il secondo step (fra 50 cm e 136,5 cm dall'inizio del canale).**

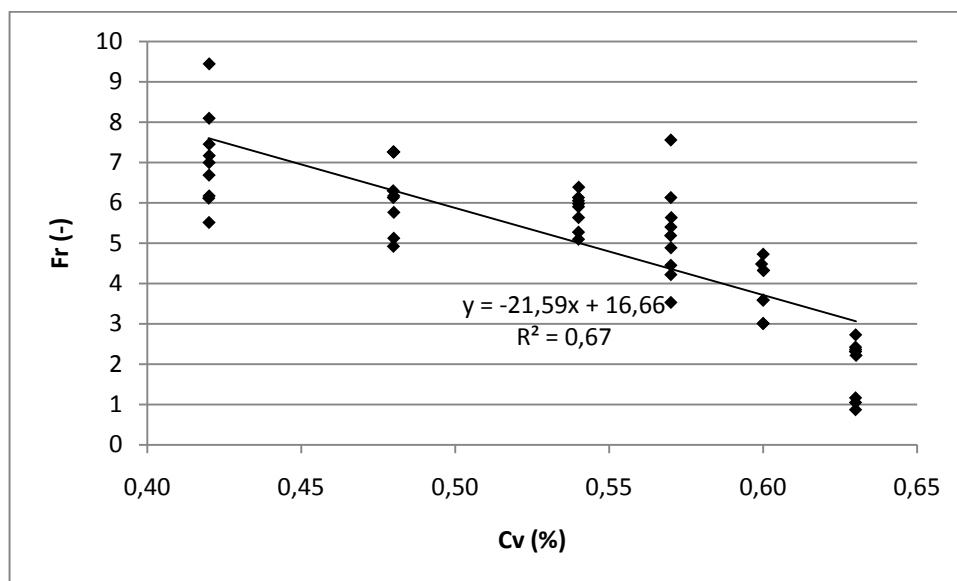


Figura 32: grafico del numero di Froude in funzione della concentrazione volumetrica per il terzo step (fra 136,5 cm e 200 cm dall'inizio del canale)

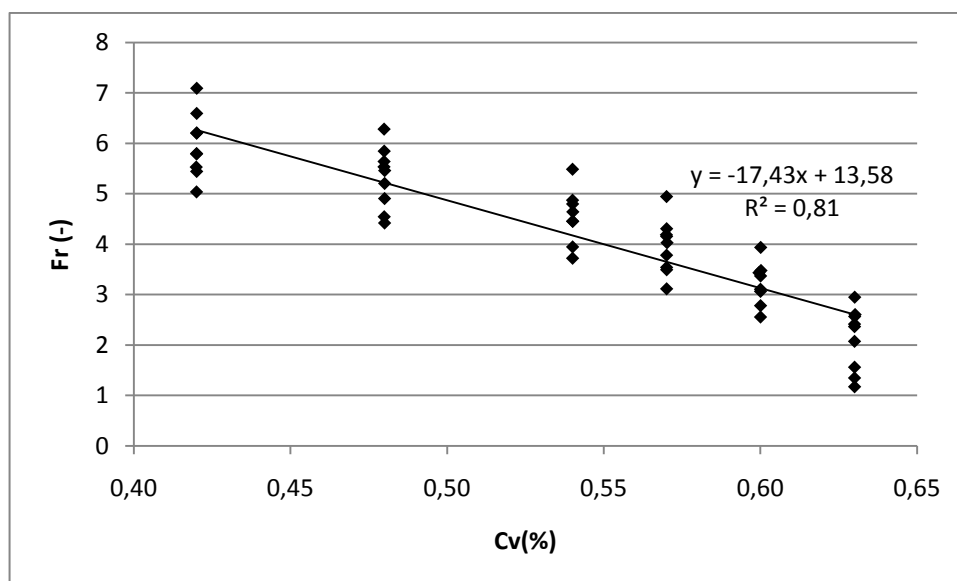


Figura 33: grafico del numero di Froude in funzione della concentrazione volumetrica per secondo e terzo step considerati insieme (fra 50 cm e 200 cm dall'inizio del canale)

Valutando i valori ottenuti si nota che il numero di Froude relativo alle prove eseguite con il reometro rientrano nell'intervallo individuato da Hubl et al. (2009) per le colate riprodotte in laboratorio, rendendole confrontabili con le prove di laboratorio degli altri autori. Si nota anche che le prove eseguite con concentrazioni volumetriche maggiori rientrano nell'intervallo di numero di Froude che Hubl et al. (2009) indicano come caratteristici dei debris flow in campo. Se tale impostazione risultasse corretta, ciò significherebbe che le prove in apparecchiature in miniatura possono essere adeguate a riprodurre fenomeni caratterizzati da elevate concentrazioni volumetriche, mentre non lo sarebbero per quelle inferiori.

## 4 Risultati

I risultati delle prove vengono di seguito presentati nell'ordine cronologico con cui sono state eseguite. Come accennato precedentemente, infatti, le prime prove sono state eseguite con lo scopo di prendere confidenza con l'apparecchiatura ed il materiale e per verificare le problematiche connesse. La tematica, infatti, non è ancora consolidata e la letteratura non è particolarmente ricca di dettagli sulle procedure sperimentali adottate. L'introduzione nelle sperimentazioni di elementi che simulino alberi, poi, è un aspetto completamente incognito e che ha richiesto numerose prove preliminari.

Complessivamente sono state eseguite 107 prove con uno sforzo di gestione, anche pratica, del materiale non indifferente.

### 4.1 Prima serie di prove

La prima serie di prove è stata eseguita utilizzando le pendenze massime e minime raggiungibili dal canale, preparando la miscela in 3 volumi diversi e con 3 concentrazioni diverse:

- 9 prove a 25° con 3 volumi, e 3 concentrazioni diverse;
- 9 prove a 40° con 3 volumi, e 3 concentrazioni diverse;

Lo scopo di questa serie di prove è stato quello di prendere confidenza dell'apparato sperimentale, di mettere a punto la procedura (anche se erano state condotte prove preliminari non riportate nel presente documento perché prive di valore) e di definire la variabilità che i parametri di partenza (pendenza del canale, volume della colata e concentrazione volumetrica) inducono nei risultati ottenuti. I parametri di partenza sono quelli riportati in Tabella 16.

**Tabella 16: parametri iniziali della prima serie di prove. La nomenclatura adottata si riferisce chiaramente alla data di esecuzione delle prove e all'ordine con cui sono state eseguite le prove.**

prova	densità materiale	pendenza Canale	pendenza Piano	presenza elementi	quantità suolo	volume acqua	Cv iniziali	volume
	Mg/mc	°	°		kg	l	%	l
09Mar_n1	2,7	40	0	no	12,000	3,00	0,60	7,20
09Mar_n2	2,7	40	0	no	8,119	2,00	0,60	5,01
09Mar_n3	2,7	40	0	no	4,871	1,20	0,60	3,00
10Mar_n1	2,82	40	0	no	13,201	2,52	0,66	7,20
10Mar_n2	2,82	40	0	no	9,167	1,75	0,66	5,00
10Mar_n3	2,82	40	0	no	5,522	1,05	0,60	3,01
16Mar_n7	2,78	40	0	no	8,999	3,96	0,42	7,20
16Mar_n8	2,78	40	0	no	6,198	2,75	0,42	4,98
18Mar_n1	2,73	40	0	no	3,670	1,65	0,42	2,99
11Mar_n1	2,56	25	0	no	11,004	2,88	0,54	7,18
11Mar_n2	2,56	25	0	no	7,782	2,00	0,54	5,04
11Mar_n3	2,56	25	0	no	4,620	1,20	0,54	3,00
16Mar_n1	2,78	25	0	no	12,995	2,52	0,60	7,19
16Mar_n2	2,78	25	0	no	9,023	1,75	0,60	5,00
16Mar_n3	2,78	25	0	no	5,408	1,05	0,60	3,00
16Mar_n4	2,78	25	0	no	8,996	3,96	0,42	7,20
18Mar_n3	2,73	25	0	no	6,161	2,75	0,42	5,01
16Mar_n6	2,78	25	0	no	3,750	1,65	0,42	3,00

I depositi risultanti da queste prime prove, sia nella configurazione con canale a 25° che nella configurazione con canale a 40°, consistono in un lobo unico che presenta una caratteristica



concentrazione del materiale più grossolano lungo gli argini e in corrispondenza del fronte (vedi Figura 34, Figura 35). Tale fenomeno, che ricorda la distribuzione granulometrica dei depositi da debris flow, si presenta, seppur con intensità diversa e talvolta incompleto, in quasi tutte le prove eseguite. Quando la concentrazione volumetrica è minore si osserva un deposito più diffuso e, nel caso di canale a 25°, meno conforme al deposito caratteristico sopra descritto; viceversa, quando la concentrazione è maggiore, il deposito è ridotto ad un cumulo localizzato vicino al cambio di pendenza. Per certe prove eseguite con bassi valori di concentrazione volumetrica il lobo risulta separato in due lobi, uno successivo all'altro.

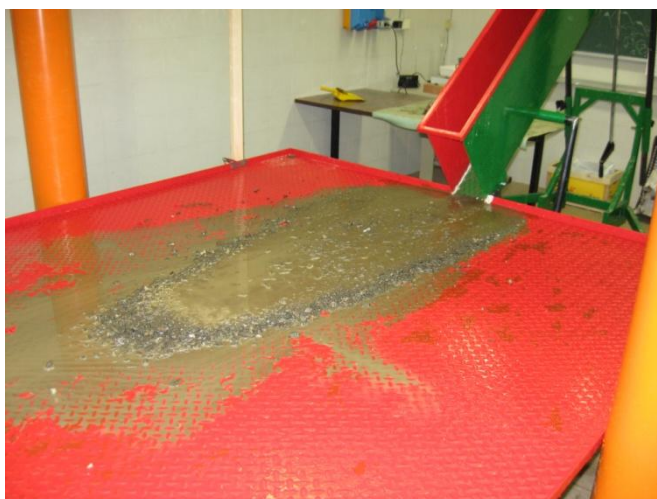


Figura 34: deposito della prova 16Mar\_n7

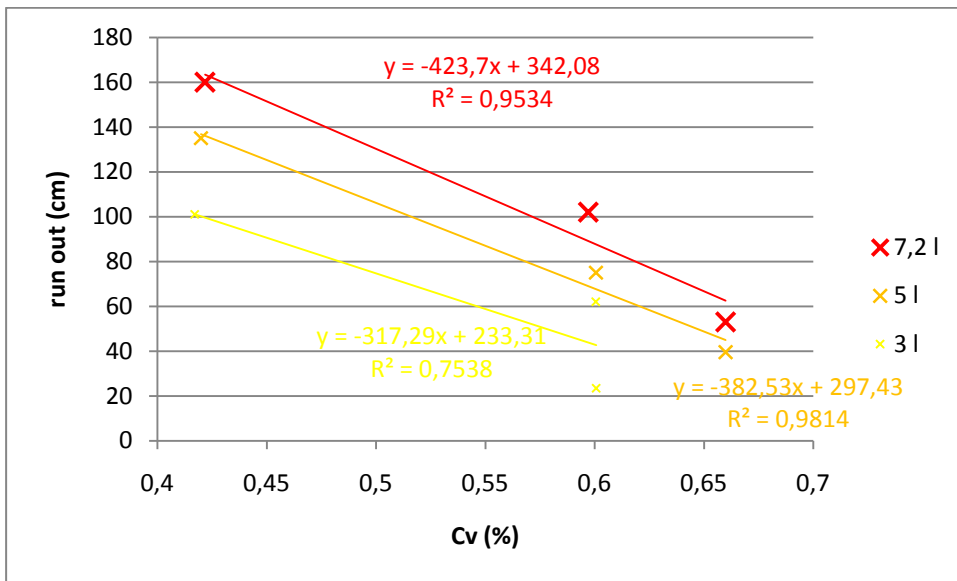


Figura 35: deposito della prova 16Mar\_n1

### **Run out**

La prima cosa che è possibile osservare, in accordo con altri autori (Cesca 2008, Major 1997, Deganutti 2003) è che il run out è legato in maniera molto stretta con la Cv. Come era logico attendersi, all'aumentare della Cv il run out diminuisce indipendentemente dagli altri parametri.

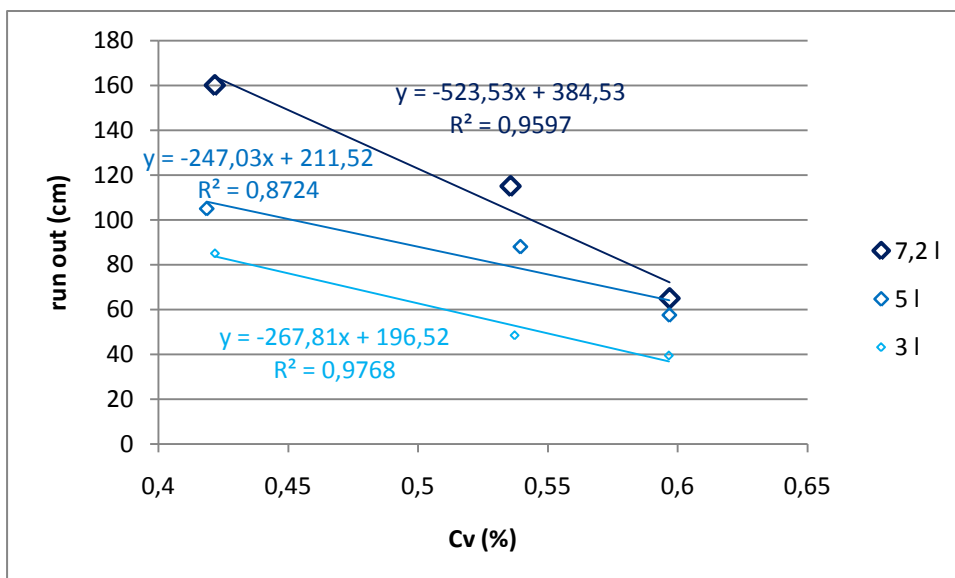
In Figura 36 si osservano i risultati delle prime 9 prove, con canale a 40°, suddivise in base al volume di partenza: i valori maggiori di run out si registrano con i volumi maggiori; qualitativamente le rette di regressione sono molto simili.



**Figura 36: grafico rappresentante il run out in funzione della Cv per le prove condotte con canale a 40°, con i dati suddivisi in base al volume utilizzato nelle prove**

Anche se i valori su cui è fatta la regressione sono pochi (Figura 36) si è ritenuto opportuno eseguire l'analisi di covarianza fra le tre serie di dati per verificare l'influenza del volume sul comportamento dei flussi. I risultati mostrano che le tre serie non sono statisticamente diverse (risultato del test  $F=0,62$  e  $p\text{-value} < 0,05$ ).

Osservando il grafico in Figura 37 relativo alle prove condotte con canale a 25° con volumi e concentrazioni diverse, si nota che il run out, come nel caso precedente, è maggiore per volumi iniziali maggiori; tale differenza è maggiore per Cv basse. Qualitativamente le rette di interpolazione delle prove condotte con volume pari a 3 e 5 litri sono simili, mentre si differenzia la retta relativa alle prove condotte con volume maggiore.



**Figura 37: grafico rappresentante il run out in funzione della Cv per le prove condotte con canale a 25°, con i dati suddivisi in base al volume utilizzato nelle prove.**

Dall'ancova condotta sulle tre serie considerate tutte insieme e per coppie (Tabella 17), emerge che le tre serie sono statisticamente diverse, anche se il p-value è solo sufficiente. Non è da considerare il risultato dell'analisi condotta fra prove con 5 litri e 7,2 litri.

**Tabella 17: risultati dell'ancova condotta sulle tre serie di dati relativi alle prove condotte con canale a 25°**

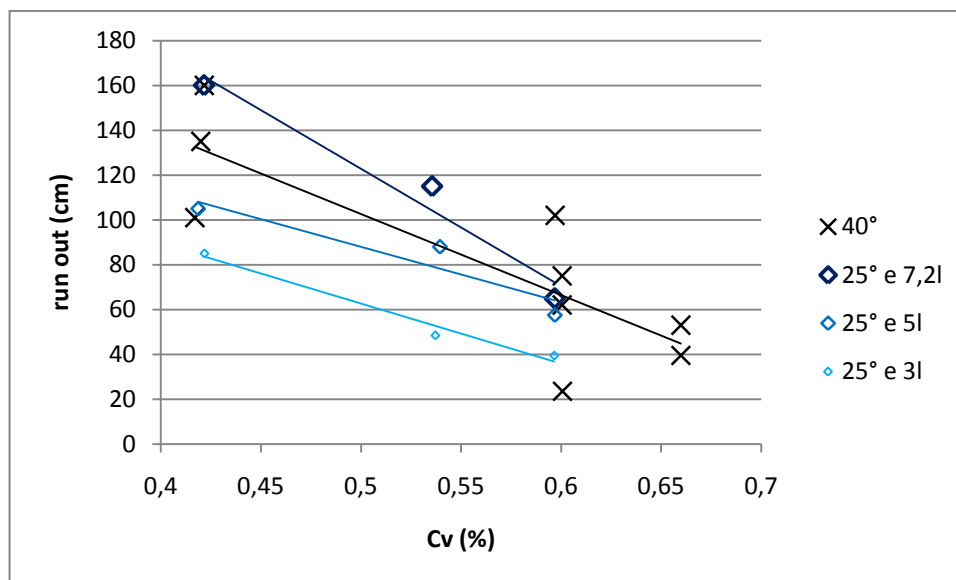
serie a confronto	esito test F	p-value
7,3l, 5l, 3l	sono diverse	0,05
5l, 3l	sono diverse	0,05
5l, 7,2l	sono uguali	non accettabile
3l, 7,2l	sono diverse	0,05

Da questi primi risultati sembrerebbe che la pendenza del canale tende ad omogeneizzare i risultati di colate con volumi diversi, quindi a mascherare l'effetto del volume che, invece, con canale a 25° è statisticamente significativo.

In Figura 38 si può notare il confronto fra prove condotte con canale a 40° e canale a 25°: le serie sono state raggruppate per le prove effettuate con canale a 40°, mentre sono state mantenute distinte per prove fatte con canale a 25°. Utilizzando l'analisi della covarianza, si ricava che le prove eseguite con canale a 40° sono statisticamente uguali alle prove con canale a 25° e volume pari a 3 litri; le altre prove sono invece statisticamente diverse poiché il un p-value non può essere considerato accettabile (Tabella 18).

**Tabella 18: risultati dell'ancova condotta sulle tre serie di dati relativi alle prove condotte con canale a 25° a confronto con i dati raggruppati delle prove condotte con canale a 40°**

serie a confronto	esito test F	p-value
40° & 7,2l a 25°	sono uguali	non significativo
40° & 5l a 25°	sono uguali	non significativo
40° & 3l a 25°	sono uguali	0,05

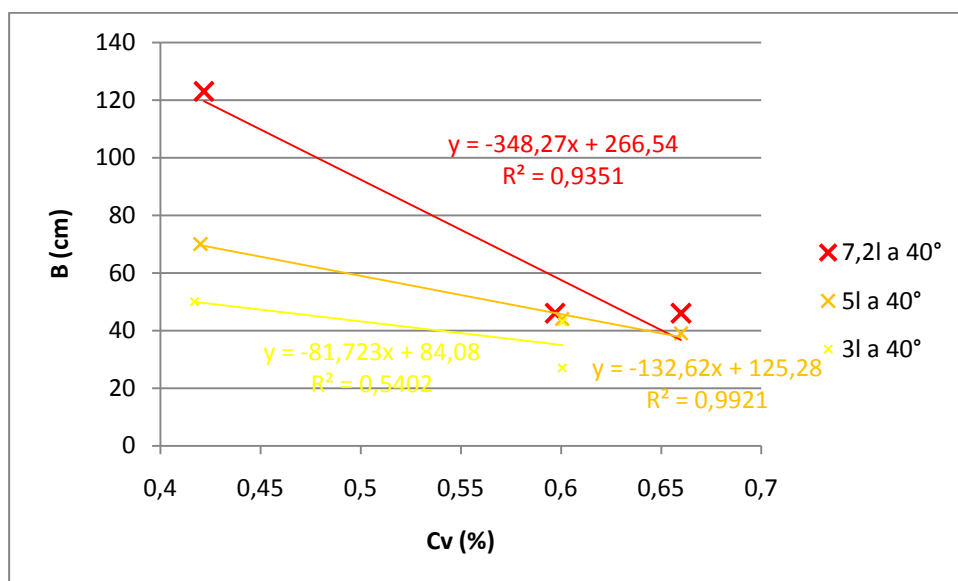


**Figura 38: confronto fra prove condotte con canale a 40°, e le tre serie di prove condotte con canale a 25°.**

### Larghezza del deposito

Per quanto riguarda la larghezza del deposito in funzione della Cv e considerando le tre serie di dati ottenuti dalle prove con volumi diversi e canale a 40°, dalle analisi di regressione emerge che per i volumi pari a 7,2 l e 5 l esiste una retta interpolante che rappresenta con ottimo grado di approssimazione i valori di larghezza (Figura 39). Per il volume di 3 l, invece, la retta non ha un coefficiente di determinazione sufficiente per essere rappresentativa dei dati presentati. Per quanto

riguarda l'analisi di covarianza invece, tra le serie non esiste relazione significativa di uguaglianza o diversità.

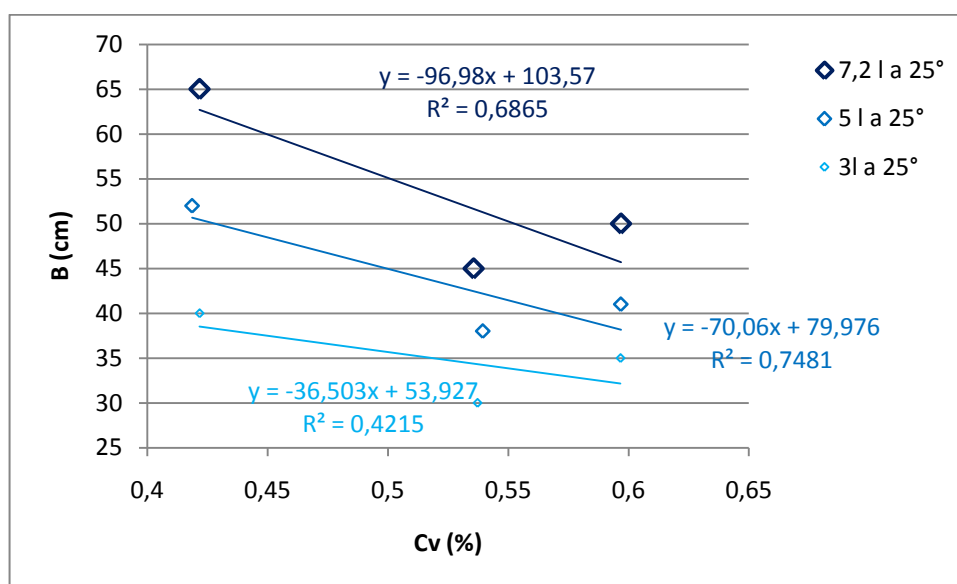


**Figura 39: prove condotte con canale a 40° - larghezza del deposito (B) rappresentata in funzione della Cv: serie suddivise in base al volume iniziale della colata.**

Considerando le serie di prove eseguite con canale a 25°, già osservando il grafico in cui sono riportati i dati (Figura 40), si osserva una spiccata somiglianza nell'andamento delle tre serie che sono semplicemente sfalsate di un intervallo (fra i 10 e i 5 cm) l'una rispetto l'altra. Dalle analisi di regressione emerge che per i volumi pari a 7,2 l e 5 l esiste una retta interpolante che rappresenta con buon grado di approssimazione i valori di larghezza. Per il volume di 3 l, invece, la retta non è rappresentativa dei dati (Figura 40). Per quanto riguarda l'analisi di covarianza (Tabella 19), invece, tra le serie con volume 7,2 l e 3 l emerge una differenza discreta, mentre fra le serie condotte con volume 7,2 l e 5 l, e 5 l e 3 l non esiste relazione significativa.

**Tabella 19: risultati dell'ancova condotta sui dati di larghezza del deposito in funzione della Cv, risultanti dalle prove condotte con canale a 25°.**

serie a confronto	esito test F	p-value
7,2l & 5l	sono diverse	non significativo
7,2l & 3l	sono diverse	0,05
5l & 3l	sono diverse	non significativo



**Figura 40: dati di larghezza in funzione della Cv per le prove condotte con canale a 25° suddivise in base al volume della colata.**

Sulla base delle elaborazioni condotte, si può quindi dire che esiste un rapporto fra larghezza e concentrazione volumetrica; tale rapporto è una relazione inversa e sembra essere più evidente per prove condotte con canale alla maggiore pendenza, e in entrambi i casi con i volumi maggiori. Le elaborazioni statistiche in generale non hanno però dato risultati significativi, probabilmente per il numero esiguo di dati.

### **Area del deposito**

Anche per quanto riguarda l'area del deposito, essendo direttamente collegata a run out e larghezza del deposito, vale quanto osservato per i due parametri precedentemente considerati, ovvero esiste una relazione inversa con la concentrazione volumetrica. Si osservano inoltre valori maggiori per volumi di partenza maggiori, e valori maggiori per pendenza del canale maggiore a parità delle altre condizioni. Nel grafico riportato in Figura 41 sono presentati i valori delle prove condotte con canale a 40°, suddivisi per le tre serie in base ai volumi utilizzati, con le rispettive rette di interpolazione che presentano, per i due volumi maggiori, un coefficiente di determinazione vicino all'unità. Dalle analisi di covarianza condotte fra le tre serie di dati (Tabella 20) non emerge una diversità o una uguaglianza netta: sembra che serie di dati di volumi vicini (7 l e 5 l, 5 l e 3 l) siano simili, mentre serie di dati di volumi lontani (7 l e 3 l) siano diversi.

**Tabella 20: ancova condotta fra serie di dati di area da prove con canale a 40°**

serie a confronto	esito test F	p-value
7,2l & 5l	sono uguali	0,05
7,2l & 3l	sono diverse	0,05
5l & 3l	sono uguali	0,1

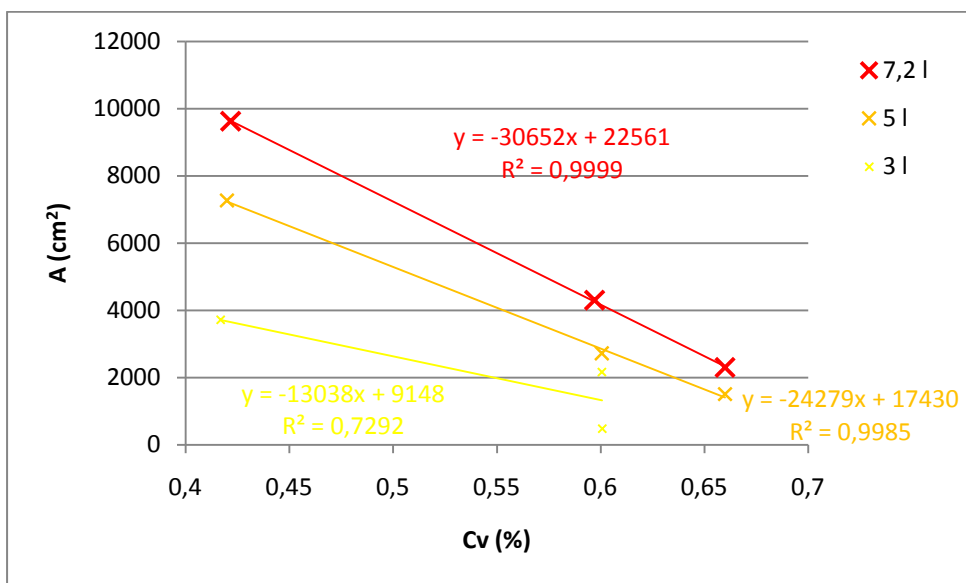


Figura 41: Area del deposito in funzione della Cv, per le prove condotte con canale a 40°

Anche per le aree del deposito ottenute nelle prove eseguite con canale a 25° si osserva quanto detto per le prove condotte con canale a 40°, con il miglioramento del coefficiente di determinazione della retta interpolante per il volume minimo (Figura 42). Dal punto di vista statistico le rette risultano tutte diverse l'una dalle altre, anche se con bassa significatività del test statistico (Tabella 21).

Tabella 21: esiti delle analisi di covarianza condotte sui dati di volume espressi in funzione della Cv, per le prove condotte con canale a 25°.

serie a confronto	esito test F	p-value
7,2l & 5l	sono diverse	0,1
7,2l & 3l	sono diverse	0,05
5l & 3l	sono diverse	0,05

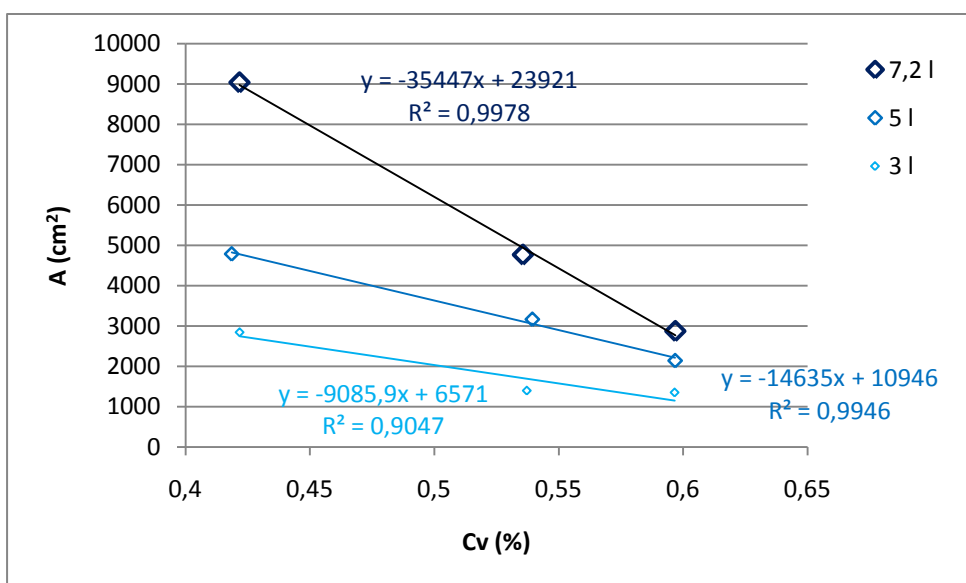
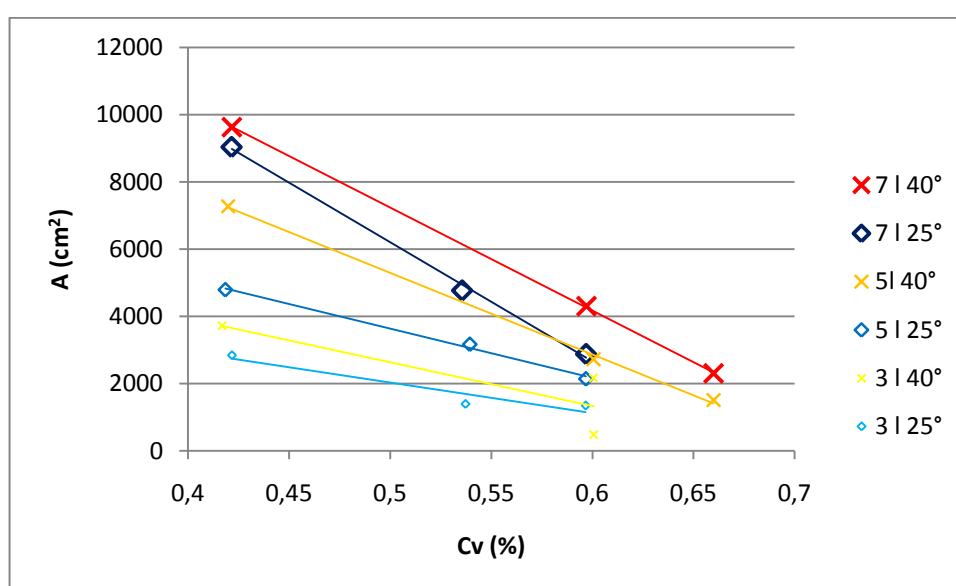


Figura 42: area del deposito in funzione della Cv per le prove condotte con canale a 25°

L'analisi statistica condotta confrontando le prove eseguite con lo stesso volume ma pendenza del canale diversa (Figura 43) mostra che i risultati non sono statisticamente significativi: si può dire, con debole solidità del test, che le prove eseguite con volume 7,2 l sono uguali mentre non si può dire lo stesso per gli altri due confronti (Tabella 22).

**Tabella 22: risultati dell'analisi di covarianza condotta sui dati di area del deposito mettendo a confronto serie di prove condotte con lo stesso volume e pendenza del canale diversa**

serie a confronto	esito test F	p-value
7,2 l	sono uguali	0,05
5 l	sono uguali	0,1
3 l	sono uguali	non significativo



**Figura 43: dati di area in funzione della Cv in cui vengono messi a confronto le serie di dati da prove con volume uguale e pendenza del canale diversa**

In conclusione, il volume è un fattore dal quale dipende l'area del deposito in modo direttamente proporzionale. Tale fattore diventa più importante della pendenza del canale quando si tratta di valori elevati, mentre non si può dire lo stesso per le prove eseguite con volumi minori. Questa affermazione, visto l'esiguo numero di dati disponibili, avrebbe bisogno di ulteriori prove per essere confermata.

Eseguendo la regressione di tutti i dati relativi ad ognuna delle due pendenze del canale si ottiene una retta che nel caso del canale a 25° non è rappresentativa ( $R^2=0,41$ ) mentre nel caso del canale a 40° presenta un coefficiente di determinazione appena sufficiente ( $R^2=0,61$  con  $p\text{-value}=0,05$ ):

$$A = 16042 - 22164Cv$$

### **Spessore massimo del deposito**

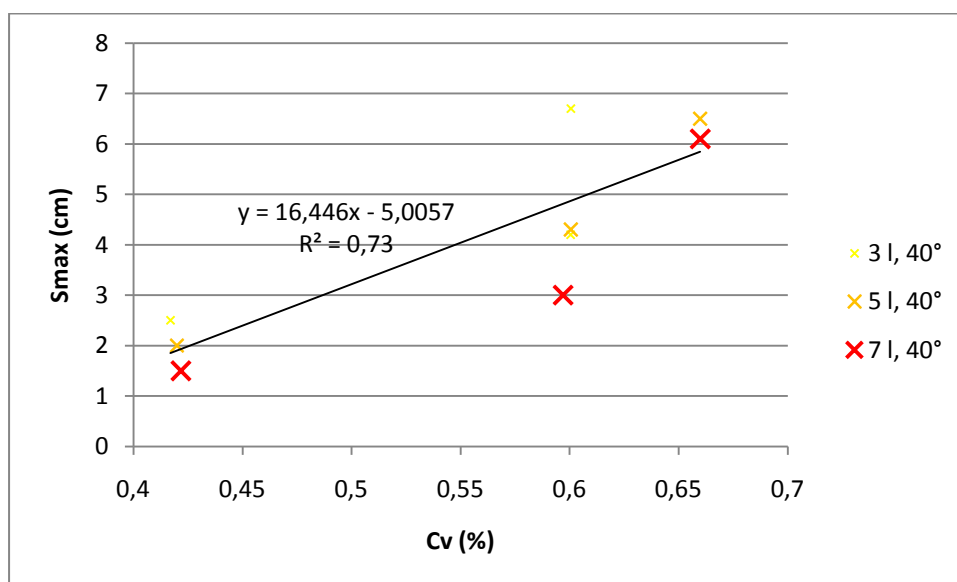
Per quanto riguarda lo spessore massimo del deposito rispetto al Cv, si osserva una relazione diretta fra i due parametri: al crescere della Cv cresce anche lo spessore massimo del deposito. Una prima distinzione si può fare per le prove condotte ad alte e a basse Cv. Per valori elevati di Cv, casi nei quali la colata fluisce lentamente, frequentemente lo spessore massimo si localizza vicino alla fine del canale poiché il materiale già depositato ostacola il materiale che ancora scorre all'interno del canale. Per valori minori, essendo il flusso più veloce e capace di raggiungere distanze maggiori, lo spessore massimo si localizza con maggior frequenza nella parte terminale del lobo di deposizione, in

corrispondenza del fronte. Dall'analisi di covarianza condotta considerando due serie alla volta, per le prove condotte con canale a 40°, non emerge una chiara differenza o somiglianza (Tabella 23).

**Tabella 23: risultati dell'analisi della covarianza fra i valori di spessore massimo in funzione della Cv, per le tre serie di prove eseguite con canale a 40°**

serie a confronto	esito test F	p-value
7,2 l e 5 l	sono uguali	non significativo
5 l e 3 l	sono uguali	non significativo
7,2 l e 3 l	sono uguali	non significativo

Si può solo osservare in Figura 44 che volumi maggiori fanno registrare spessori massimi del deposito minori rispetto a prove eseguite con volumi minori. Individuando un'unica retta di regressione per le tre serie di prove condotte con pendenza del canale a 40° si ottiene un retta di regressione che ha un discreto coefficiente di determinazione e un p-value inferiore a 0,01.



**Figura 44: spessore massimo del deposito in funzione della Cv per le prove condotte con canale a 40°, suddivise in base al volume della colata.**

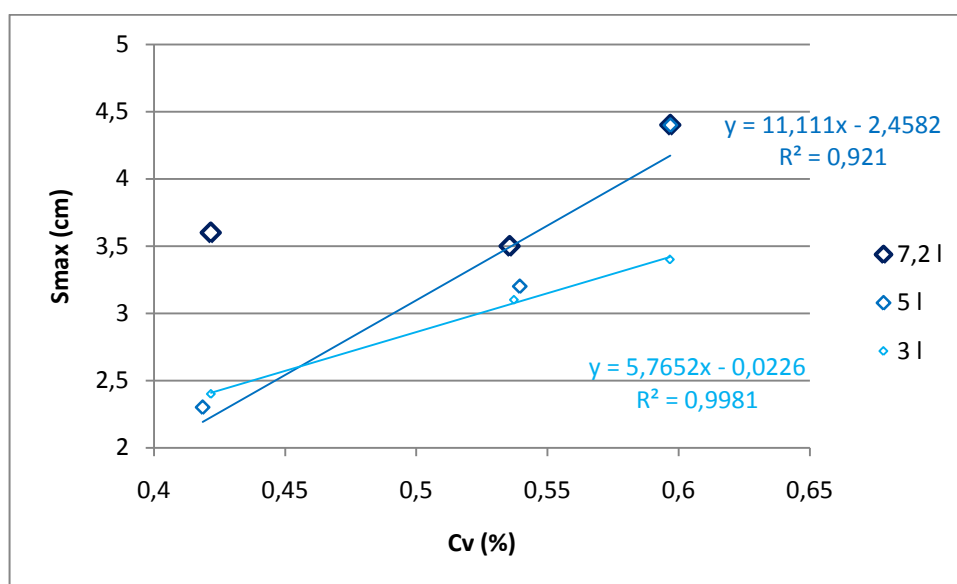
Considerando invece i valori dello spessore massimo in funzione della Cv, considerando le prove con canale a 25°, facendo l'analisi della covarianza non si può dire se le tre serie siano uguali o diverse (Tabella 24).

**Tabella 24: risultati dell'analisi di covarianza effettuate sui valori di spessore massimo in funzione di Cv relativi alle serie di risultati ottenuti dalle prove con canale a 25°**

serie a confronto	esito test F	p-value
7,2 l e 5 l	sono uguali	non significativo
5 l e 3 l	sono uguali	non significativo
7,2 l e 3 l	sono diverse	0,05

Dalle regressioni è emerso che mentre per le serie relative agli esperimenti condotti con volumi di 5 l e 3 l esistono linee di regressione con ottimi coefficienti di determinazione, per quanto riguarda il volume di 7 l la retta presenta un coefficiente insufficiente; anche per la retta interpolante tutti i dati relativi alle prove svolte con canale a 25° non è stato registrato un coefficiente di determinazione sufficiente (Figura 45).

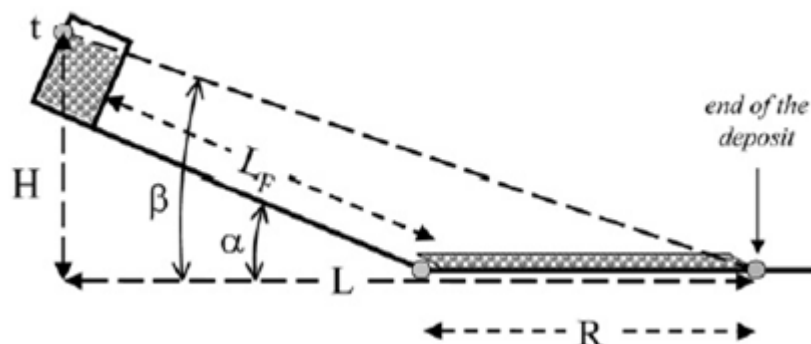




**Figura 45: valori di spessore massimo in funzione della Cv per le prove condotte con canale a 25°**

Angolo rispetto l'orizzontale

Prendendo in esame l'angolo formato rispetto l'orizzontale dalla linea che idealmente unisce il limite superiore della miscela all'interno del serbatoio con il fronte ultimo del deposito della colata (Figura 46), si osserva una relazione diretta con la concentrazione volumetrica, come è logico aspettarsi essendo il valore di tale angolo legato fortemente al run out.



**Figura 46: rappresentazione schematica dei parametri geometrici che definiscono le prove svolte in laboratorio.**

Effettuando l'analisi della covarianza fra serie di dati relativi all'angolo Beta in funzione della Cv condotti con volumi diversi, sia per il gruppo di prove con canale a 25° che con canale a 40°, non risultano casi in cui la determinazione dell'uguaglianza fra le serie sia significativa. Si è quindi proceduto con la determinazione di una retta interpolante unica (Figura 47) per le nove prove condotte con canale a 40° e per quelle a 25°. Essendo il dislivello percorso dalla colata uno dei fattori determinanti il valore dell'angolo Beta, si nota un netto distacco fra la serie di dati ricavata dalle prove eseguite con canale a 40° rispetto le stesse eseguite con pendenza 25°.

Dalle analisi di regressione (Tabella 25) si nota una buonissima retta di regressione, sia in termini di coefficiente di determinazione, che in termini di p-value. Dall'ancova, inoltre, emerge che le due serie sono statisticamente diverse, con elevata potenza del test.

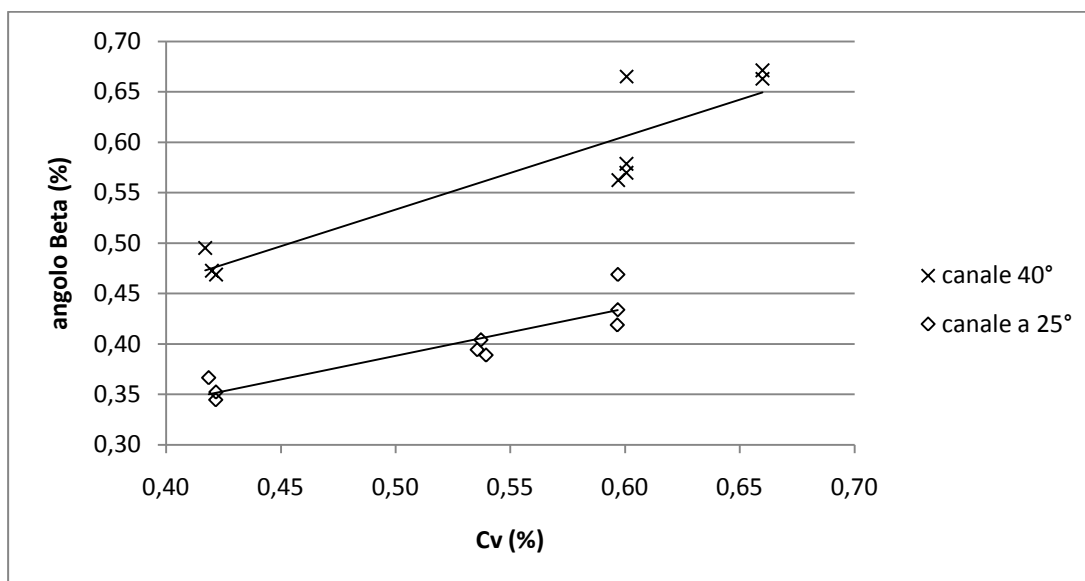


Figura 47: dati relativi all'angolo Beta in funzione della Cv, suddivisi in base alla pendenza del canale.

Tabella 25: dati relativi alla regressione effettuata sui dati di angolo Beta in funzione della Cv, per le prove condotte con pendenza del canale 40° e 25°

prove	b	a	R <sup>2</sup>	p-value
canale 40°	0,726	0,17	0,84	0,01
canale 25°	0,468	0,15	0,83	0,01

#### 4.1.1 Considerazioni sulla prima serie di prove

Dalla prima serie di prove eseguite, emergono alcune considerazioni che hanno poi guidato le successive prove sperimentali. I parametri che determinano i risultati delle prove sono principalmente tre: concentrazione volumetrica, pendenza del canale e volume della colata.

La concentrazione volumetrica è il parametro che principalmente governa i risultati delle prove eseguite: determinando di fatto la viscosità della miscela utilizzata nelle prove, incidendo di conseguenza su tutti i parametri misurati. La Cv risulta inversamente proporzionale al run out, alla larghezza massima e di conseguenza anche all'area del deposito; spessore del deposito e angolo beta risultano invece direttamente proporzionali alla concentrazione volumetrica. In genere il rapporto fra Cv e parametri misurati è piuttosto chiara.

La pendenza del canale, in questo caso i due valori estremi entro i quali sono racchiusi i casi registrati di debris flow, è un fattore che in termini di importanza segue immediatamente la Cv. Rispetto il run out la pendenza è direttamente proporzionale e, nel caso di pendenze elevate, maschera l'effetto del volume della colata che diventa il terzo fattore con effetti diretti sui risultati. Il volume, che sulle prove a bassa pendenza ha effetto sul run out, non rende distinguibili le prove quando si analizzano i casi con canale a 40°. La pendenza del canale amplifica gli effetti della Cv sulla larghezza massima del deposito; effetto questo esercitato anche dai volumi maggiori. L'area e lo spessore del deposito non sembrano invece essere condizionati in modo significativo dalla pendenza del canale. L'angolo Beta subisce significativamente l'effetto della variazione di pendenza del canale (da 25° a 40°) presentando due comportamenti nettamente staccati.

Il volume della colata ha un effetto direttamente proporzionale col run out. Il volume è un fattore dal quale dipende l'area del deposito in modo direttamente proporzionale. Tale fattore diventa più importante della pendenza del canale quando si tratta di valori elevati, mentre non si può dire lo stesso per le prove eseguite con volumi minori. Il volume infine non sortisce effetto nella differenziazione dello spessore del deposito.

Le elaborazioni statistiche in generale non hanno dato risultati significativi, verosimilmente per il numero esiguo di prove.

## 4.2 Seconda serie di prove

Lo stesso schema utilizzato per le 18 prove della prima serie è stato utilizzato per altrettante prove con l'aggiunta di elementi da 3,5cm di diametro disposti sul piano di deposito.

Tale disposizione, spaziatura e dimensione degli elementi deriva dalla scalatura di una fustaia-tipo considerando (si veda il paragrafo 3.4) come elemento di confronto la larghezza del canale del modello rispetto la larghezza dell'alveo (supposto di 3 m circa) con un fattore di scala 1:20.

In Figura 48 e Figura 49 vi sono due esempi di prove eseguite con tale configurazione. Ciò che si può osservare è la separazione del flusso operata da tali elementi, che hanno prodotto una serie di lobi di deposizione secondari, a seconda di quanti elementi venivano investiti dal flusso. Non sempre ma frequentemente si assiste alla concentrazione di materiale grossolano in corrispondenza del fronte e degli argini. Nel caso di colate con volume minimo, bassa pendenza del canale e  $C_v$  elevate, talvolta capita che il deposito non raggiunga gli elementi non subendo alcun effetto della loro presenza.



Figura 48: Prova eseguita con elementi di diametro 35 mm e spaziatura 20X20 cm.



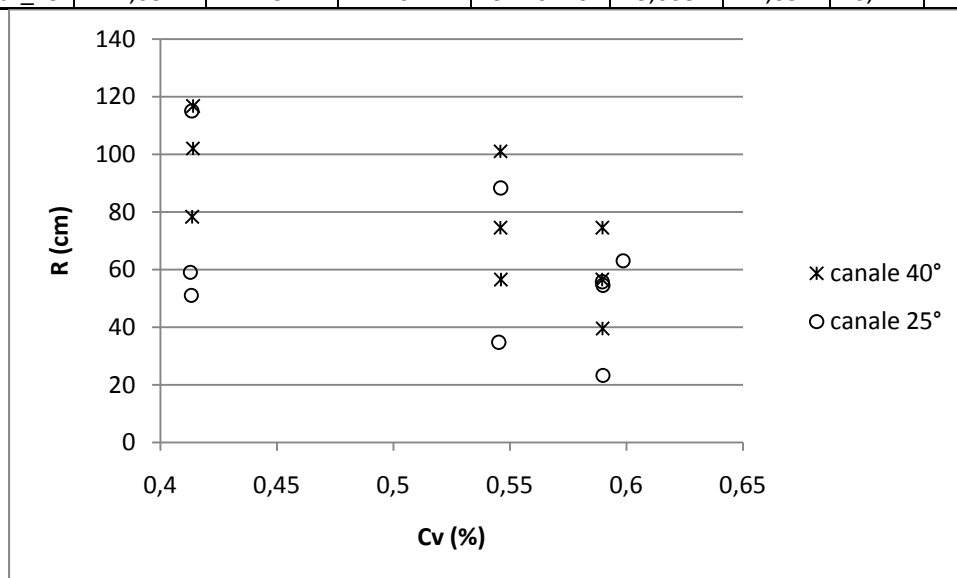
Figura 49: lobo di deposizione di colata con elementi da 35 mm di diametro e spaziatura 20X20cm

In Tabella 26 sono riportati i dati relativi alla seconda serie di prove.

Anche in questo caso si osserva una relazione tra run out e concentrazione volumetrica (Figura 50), con valori generalmente maggiori per la configurazione con canale a 40° (a parità degli altri parametri); meno regolare è la distribuzione dei valori della serie di dati derivanti da prove condotte con canale a 25°.

**Tabella 26: parametri iniziali della seconda serie di prove.**

prova	densità materiale	pendenza Canale	pendenza Piano	presenza elementi	quantità suolo	volume acqua	Cv iniziali	volume
	Mg/mc	°	°		kg	l	%	l
24Mar_n1	2,68	40	0	el. 20X20	12,527	2,52	0,59	7,19
24Mar_n2	2,68	40	0	el. 20X20	8,698	1,75	0,59	5,00
24Mar_n3	2,68	40	0	el. 20X20	5,222	1,05	0,59	3,00
24Mar_n4	2,68	40	0	el. 20X20	11,557	2,88	0,55	7,19
24Mar_n5	2,68	40	0	el. 20X20	8,026	2,00	0,55	4,99
24Mar_n6	2,68	40	0	el. 20X20	4,819	1,20	0,55	3,00
24Mar_n7	2,68	40	0	el. 20X20	8,688	3,96	0,41	7,20
24Mar_n8	2,68	40	0	el. 20X20	6,032	2,75	0,41	5,00
24Mar_n9	2,68	40	0	el. 20X20	3,614	1,65	0,41	3,00
25Mar_n1	2,68	25	0	el. 20X20	12,526	2,52	0,59	7,19
25Mar_n2	2,68	25	0	el. 20X20	8,710	1,75	0,59	5,00
25Mar_n3	2,68	25	0	el. 20X20	5,226	1,05	0,59	3,00
25Mar_n4	2,68	25	0	el. 20X20	11,563	2,88	0,55	7,19
25Mar_n5	2,68	25	0	el. 20X20	9,884	1,90	0,60	5,59
25Mar_n6	2,68	25	0	el. 20X20	4,798	1,20	0,55	2,99
25Mar_n7	2,68	25	0	el. 20X20	8,668	3,96	0,41	7,19
25Mar_n8	2,68	25	0	el. 20X20	6,002	2,75	0,41	4,99
25Mar_n9	2,68	25	0	el. 20X20	3,608	1,65	0,41	3,00

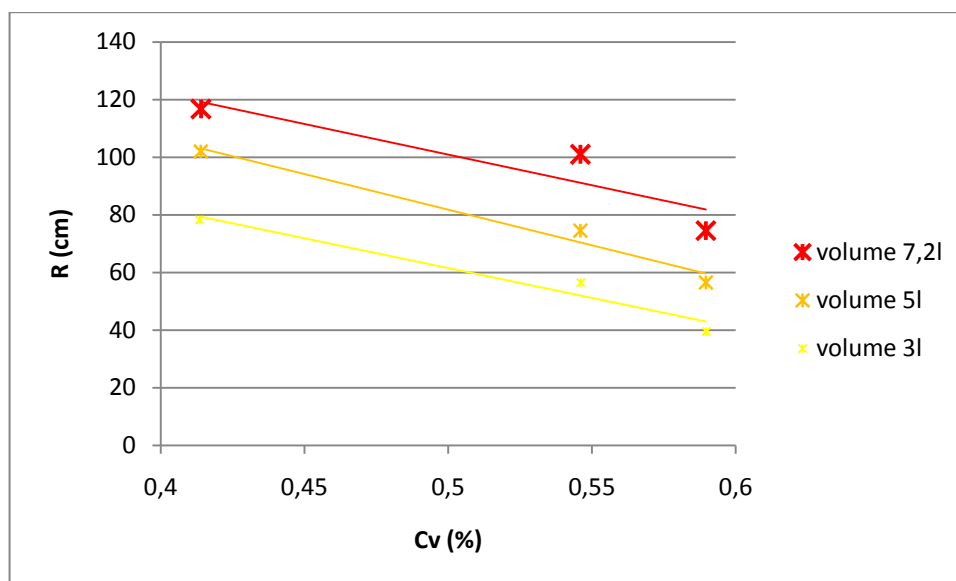


**Figura 50: grafico del run out in funzione della Cv per le prove condotte con elementi 20X20 cm.**

Distinguendo le prove eseguite in base al volume della miscela si nota in Figura 51 che, come nel caso di prove senza elementi, vi è una netta differenza tra i diversi volumi, ed esiste una relazione direttamente proporzionale fra run out e volume della colata.

Dalla regressione effettuata separatamente sui dati delle tre serie (Tabella 27) emerge che i dati seguono fedelmente le funzioni individuate, anche se il test risulta poco solido.

L'ancova condotta sulle tre serie di dati (Tabella 28) distinte in base al volume e relativi al run out in funzione della Cv evidenzia che sono statisticamente diverse: il volume, in questo caso, ha sortito un effetto significativo sul rapporto fra Run Out e Cv.



**Figura 51:** valori di run out funzione della Cv per le prove condotte con canale a 40°, suddivisi in base al volume

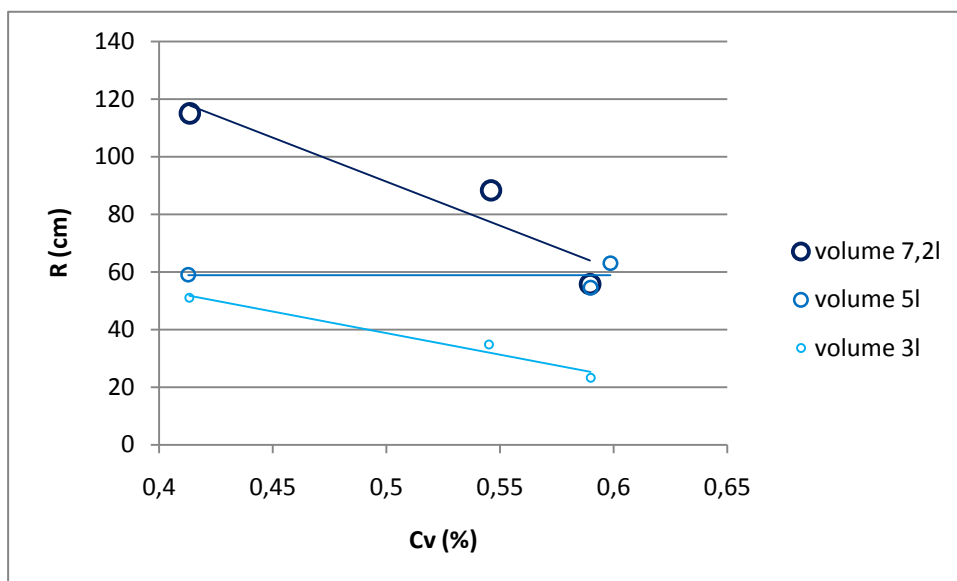
**Tabella 27:** risultati della regressione effettuata sui dati di run out in funzione della Cv suddivisi in base al volume e con canale a 40°.

prove	b	a	R <sup>2</sup>	p-value
volume 7,3l	-212	207	0,83	>0,10
volume 5l	-247	205	0,97	>0,10
volume 3l	-207	165	0,95	>0,10

**Tabella 28:** risultati dell'ancova condotta sui valori di run out per prove suddivise in base a pendenza del canale e volume della colata

prove messe a confronto	ancova	p-value
40°, 7,2l, 5l e 3l	diverse	0,01
40°, 7,2l e 5l	diverse	0,1
40°, 7,2l e 3l	diverse	0,01
40°, 5l e 3l	diverse	0,05

La medesima osservazione vale per le prove eseguite con elementi e canale a 25° (Figura 52), tranne per la serie di prove condotte con volume pari a 5 litri. Ciò è probabilmente dovuto ad un errore di valutazione durante la misura del deposito nella prova a bassa concentrazione che ha provocato una sottostima del run out, o ad un errore nella preparazione della miscela.



**Figura 52: run out in funzione della Cv per prove condotte con pendenza del canale 25° ed elementi 20X20 cm**

Dalla regressione eseguita sulle tre serie (Tabella 29) emerge che anche in questo caso esiste una funzione di regressione che si adatta molto bene ai dati sperimentali, anche se il test risulta poco potente. Questa considerazione non vale per la serie di dati relativi alle prove condotte con volume pari a 5 litri.

Dall'ancova condotta sulle tre serie (Tabella 30) considerate tutte insieme e due alla volta, emerge che sono statisticamente diverse ma con ridotta solidità del test statistico.

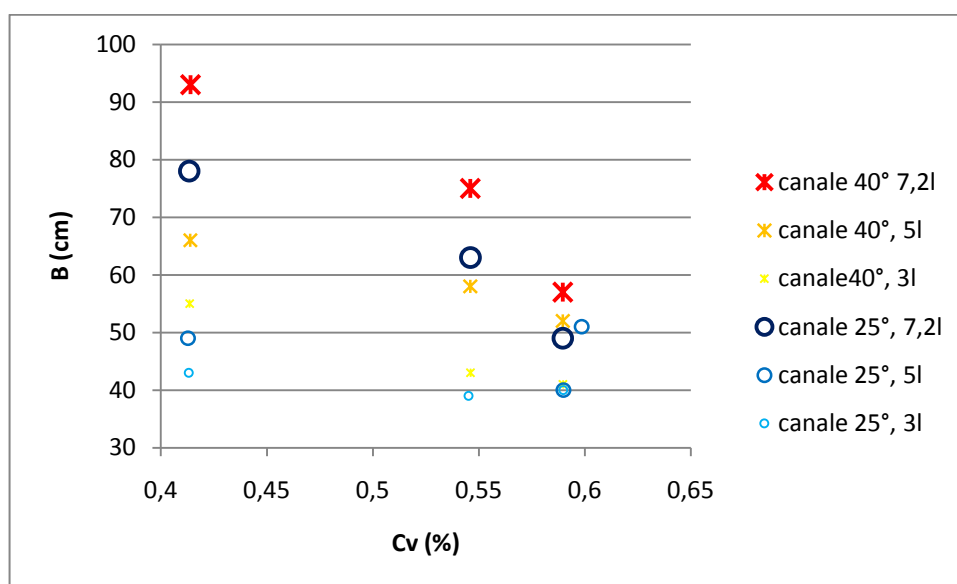
**Tabella 29: risultati della regressione effettuata sui dati di run out in funzione di Cv, suddivisi in base al volume della colata, per prove eseguite con canale a 25°**

prove	b	a	R <sup>2</sup>	p-value
volume 7,3l	-305	244	0,89	> 0,10
volume 5l	0,301	59	0	
volume 3l	-149	113	0,97	> 0,10

**Tabella 30: risultati dell'analisi di covarianza delle serie di dati di run out funzione di Cv per le prove condotte con canale 25° e suddivise in base al volume**

prove messe a confronto	ancova	p-value
25°, 7,2l, 5l e 3l	diversi	0,05
25°, 7,2l e 5l	diversi	>0,10
25°, 7,2l e 3l	diversi	0,05
25°, 5l e 3l	diversi	0,1

Anche in questo caso la larghezza del deposito in funzione della concentrazione volumetrica presenta una relazione inversa, relazione che risulta molto simile a quella esistente fra run out e concentrazione volumetrica. In particolare, come si vede in Figura 53, le tre serie relative a prove con canale a 40° e la serie di prove con volume 7,2l e pendenza del canale 25° sono tutte decrescenti, mentre per quanto riguarda le prove eseguite con canale a 25° e volumi minori, si osservano comportamenti diversi.



**Figura 53:** dati di larghezza del deposito massimo in funzione della Cv suddivisa in base al volume della colata e pendenza del canale

Dalle analisi di regressione (Tabella 31) eseguite sulle serie di dati di larghezza in funzione della Cv suddivise in base al volume della colata risulta che la maggior parte delle rette di regressione presenta un elevato coefficiente di determinazione tranne quelle relative alle prove con canale a 25° e volume 5 l. Dalle analisi di covarianza (Tabella 32) eseguite per coppie di serie di dati ottenuti da prove con la stessa pendenza del canale, emerge che tutte le serie sono diverse anche se il test in certi casi è poco o per niente solido.

**Tabella 31:** risultati della regressione applicata ai dati di larghezza in funzione della Cv per le prove condotte con elementi 20X20 suddivise in base al volume della colata

prove	b	a	R <sup>2</sup>	p-value
40°, 7,2 l	-189	173	0,92	>0,10
40°, 5 l	-75	98	0,96	>0,10
40°, 3 l	-82	89	0,99	0,10
25°, 7,2 l	-153	142	0,93	>0,10
25°, 5 l	-17	56	0,09	>0,10
25°, 3 l	-20	51	0,78	>0,10

**Tabella 32:** risultati dall'analisi di covarianza applicata alle coppie di serie di dati relativi a larghezza del deposito in funzione della Cv per le prove condotte con elementi 20X20 suddivise in base al volume della colata

serie a confronto	test F	p-value
40° 7,2 l con 40° 5 l	diversi	0,10
40° 3 l con 40° 5 l	diversi	0,01
40° 7 l con 40° 3 l	diversi	0,05
25° 7,2 l con 25° 5 l	diversi	>0,1
25° 3 l con 25° 5 l	diversi	>0,1
25° 7 l con 25° 3 l	diversi	0,05

I risultati ottenuti considerando l'area del deposito in funzione della Cv suddivisi in base al volume della colata (Figura 54), ricalcano l'andamento decrescente del run out in funzione della concentrazione volumetrica.

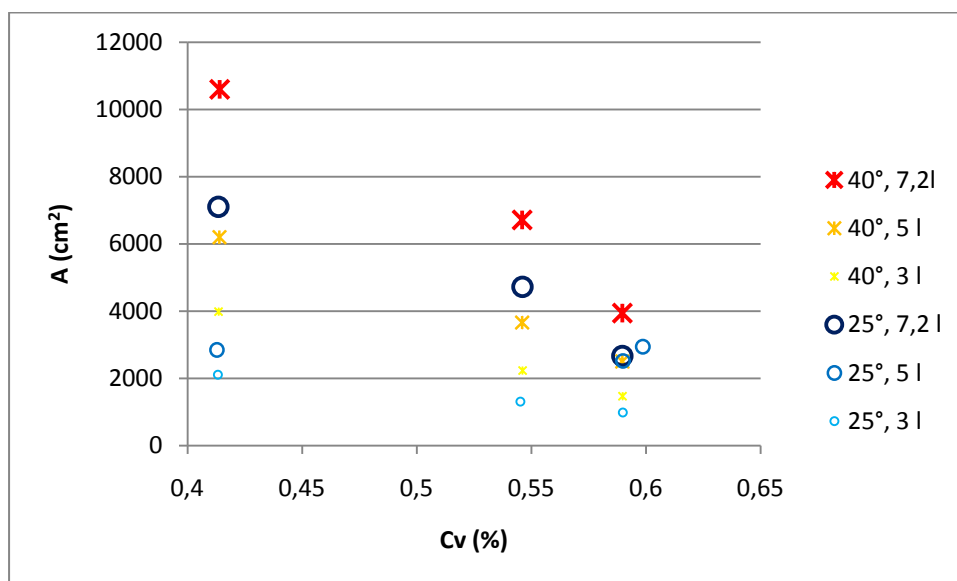


Figura 54: Area del deposito funzione della Cv, suddivisa per volume della colata e pendenza del canale.

Dall'applicazione della regressione (Tabella 33) emerge che esistono delle rette di regressione che interpolano i dati delle sei serie con buon coefficiente di determinazione (tranne che per la serie con pendenza del canale 25° e volume della colata 5l), ma il p-value è piuttosto elevato, rendendo, a volte, non significativa la regressione.

Dall'applicazione dell'ancova (Tabella 34) invece emerge che le sei serie messe a confronto fra di loro (a parità di pendenza del canale) sono statisticamente diverse anche se la potenza del test è sufficiente. Quindi il rapporto fra Area e Cv è inversamente proporzionale e dipendente dal volume.

Tabella 33: risultati della regressione applicata ai valori di area in funzione della Cv per le condizioni di volume e pendenza del canale specificati nella prima colonna

prove	b	a	R <sup>2</sup>	p-value
40°, 7 l	-35948	25650	0,97	>0,10
40°, 5 l	-20586	14750	0,99	0,05
40°, 3 l	-14024	9806	0,99	0,05
25°, 7 l	-23498	16961	0,94	>0,10
25°, 5 l	-558	3063	0,07	>0,10
25°, 3 l	-6288	4712	0,99	0,05

Tabella 34: risultati dell'ancova applicata ai dati di area del deposito in funzione della Cv distinte in base al volume della colata.

serie a confronto	test F	p-value
40° 7,2 l con 40° 5 l	diversi	0,05
40° 3 l con 40° 5 l	diversi	0,05
40° 7 l con 40° 3 l	diversi	0,05
25° 7,2 l con 25° 5 l	diversi	>0,10
25° 3 l con 25° 5 l	diversi	0,05
25° 7 l con 25° 3 l	diversi	0,05



Nel caso dello spessore (Figura 55) si riconosce una relazione diretta fra spessore massimo del deposito e concentrazione volumetrica per le prove eseguite con canale con pendenza 40°, mentre con canale a 25° è difficile definire un trend.

Per quanto riguarda lo spessore in funzione della Cv, eseguendo le regressioni (Tabella 35) si ottengono rette di regressione piuttosto buone per le prove condotte con pendenza del canale 40°, molto scarse per i volumi maggiori delle serie relative a esperimenti con canale a 25°, e ottima per la prova con volume 3 litri e pendenza del canale 25°.

L'analisi della covarianza effettuata su coppie di serie di dati simili (Tabella 36), non dà risultati certi poiché emerge che le serie di dati sono uguali ma la solidità del test è scarsa.

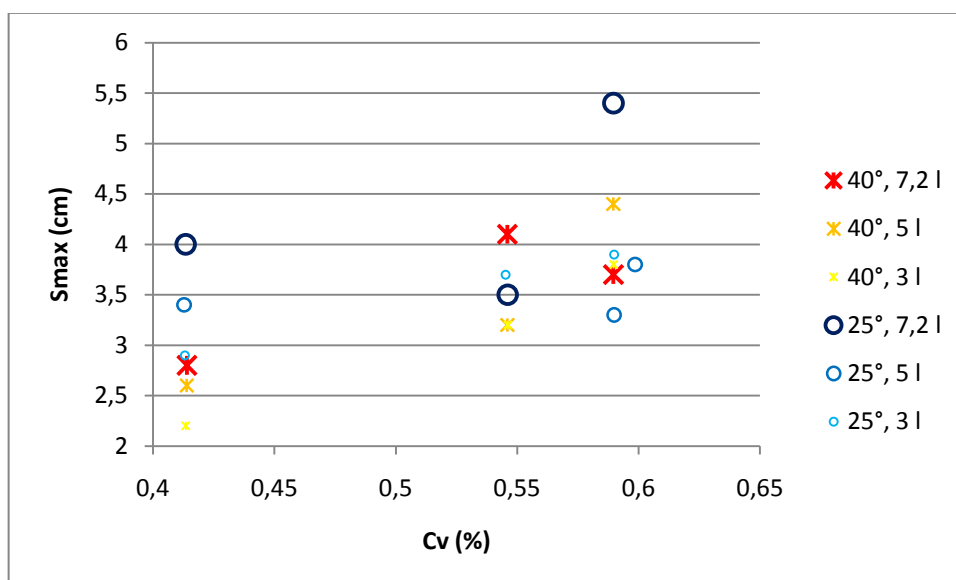


Figura 55: spessore massimo del deposito in funzione della Cv per le prove condotte con elementi 20X20 cm

Tabella 35: risultati delle regressioni dei dati di spessore in funzione della Cv .

prove	b	a	R <sup>2</sup>	p-value
40°, 7,2 l	6,828	-	0,72	0,01
40°, 5 l	6,631	-	0,74	0,01
40°, 3 l	5,995	-	0,88	0,01
25°, 7,2 l	8,263	-	0,15	0,05
25°, 5 l	0,924	3	0,13	0,05
25°, 3 l	6,761	-	0,97	0,01

Tabella 36: risultati dell'ancova condotta sugli spessori delle prove a volumi e pendenze del canale diverse.

serie a confronto	test F	p-value
40° 7,2 l con 40° 5 l	uguali	>0,10
40° 3 l con 40° 5 l	uguali	>0,10
40° 7 l con 40° 3 l	uguali	>0,10
25° 7,2 l con 25° 5 l	diversi	>0,10
25° 3 l con 25° 5 l	-	-
25° 7 l con 25° 3 l	uguali	>0,10

Infine, l'angolo Beta (Figura 56) rappresentato graficamente rispetto la concentrazione volumetrica, restituisce, come nel precedente set di prove, una funzione direttamente proporzionale alla variabile indipendente. Si nota un netto distacco fra prove eseguite con canale a pendenza diversa (25° e 40°).

L'angolo Beta presenta un comportamento ben adattabile ad una funzione di regressione per quanto riguarda le prove eseguite con canale a 40°, mentre è poco sotto il livello minimo di ammissibilità l'adattamento alla regressione della serie di prove eseguite con canale a 25° (Tabella 37).

Dall'applicazione dell'ancova si desume che le due serie di dati sono statisticamente diversi.

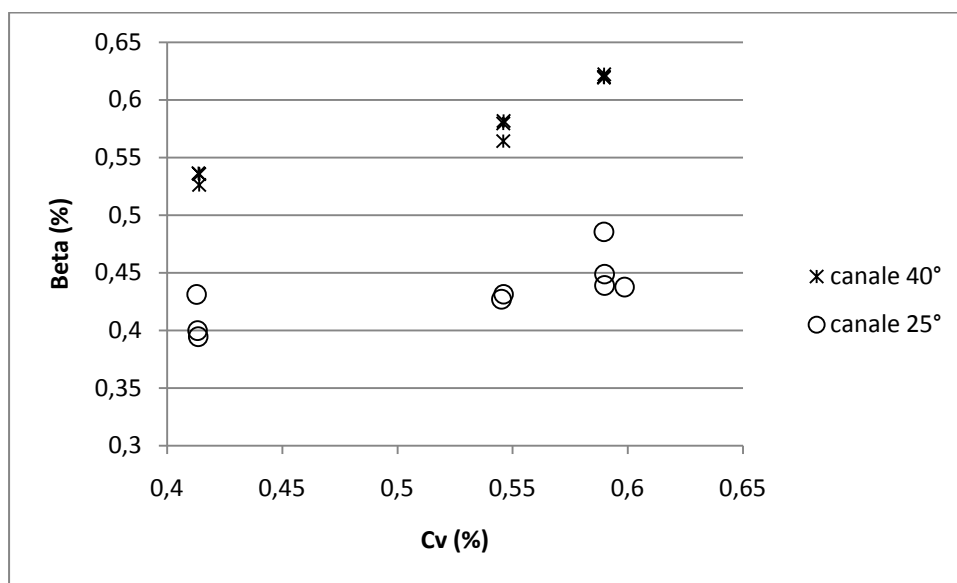


Figura 56: angolo Beta in funzione della Cv, suddiviso in base alla pendenza del canale

Tabella 37: risultati della regressione condotta sui valori di angolo Beta in funzione della Cv, suddivisi in due gruppi in funzione della pendenza del canale.

prove	b	a	R <sup>2</sup>	p-value
canale 40°	0,457	0,34	0,89	0,01
canale 25°	0,234	0,31	0,54	0,05

#### 4.2.1 Considerazioni sulla seconda serie di prove

L'esecuzione delle prove con elementi da 35 mm di diametro ha permesso di osservare il comportamento della colata nella situazione in cui dei corpi verticali fissi si trovino sul suo percorso. Le differenze fra prove con elementi e senza non sono significative come ci si aspettava.

Come nel caso delle prove condotte senza elementi, esiste una relazione inversa fra run out e Cv. Il run out rispetto la Cv, suddividendo i dati in serie in base al volume della colata, risulta ben rappresentato da rette di regressione anche se il p-value risulta poco significativo; si può affermare che sia per le prove condotte con canale a 40° che per quelle a 25°, il volume ha un effetto statisticamente significativo sul rapporto fra run out e Cv.

La larghezza del deposito presenta una relazione inversamente proporzionale alla Cv per le prove condotte con pendenza del canale 45° e per le prove con pendenza 25° e volume 7,2l. In questi casi il volume ha sortito un effetto importante. Per le due serie di prove condotte con canale a 25° e volumi minori non si può dire che esista un trend o correlazione statisticamente significativa con la Cv.

L'area presenta un andamento decrescente con la Cv anche se non è approssimabile fedelmente a una retta di regressione; comportamento che si ripete in tutte le serie rilevate correttamente e che si distinguono in base al volume, ovvero a volumi diversi corrispondono aree del deposito statisticamente diverse.

Lo spessore presenta un comportamento crescente rispetto la Cv: ciò avviene per le prove condotte con canale a 40° e per le prove condotte con canale a 25° e volume pari a 3l; così non si può dire delle prove condotte con canale a 25° e volumi maggiori. Il volume non sortisce effetto sul comportamento dello spessore.

L'angolo Beta infine presenta un comportamento crescente nei confronti della Cv ma anche una forte differenza di comportamento fra prove eseguite con canale a 40° e a 25°; mentre per le prove eseguite con canale a 40° si può definire una retta interpolante con elevato coefficiente di determinazione, per le prove con canale a 25° lo stesso coefficiente è molto inferiore alla soglia minima, quindi la retta non è rappresentativa della serie. Inoltre non si rileva differenza significativa fra le serie di dati distinte in base al volume della colata.

### 4.3 Confronti fra prima e seconda serie di prove

Per valutare l'effetto della presenza degli elementi sui parametri del deposito sono stati effettuati confronti ed elaborazioni statistiche tra le due tipologie di prove.

#### Run out

Osservando il grafico in Figura 57 non sembra esserci una netta distinzione fra le serie di dati di run out per prove con canale a 40° con e senza elementi, ma dall'analisi della covarianza risulta che le due serie sono uguali ma con p-value molto elevato (il test è debole).

Lo stesso confronto eseguito sulle prove con canale a 25° (Figura 58) non danno, ad una prima analisi visiva, l'impressione che siano due serie distinte. Dall'analisi della covarianza emerge invece che le due serie sono diverse (test F = 2,44) anche se il test non è solido (p-value = 0,10).

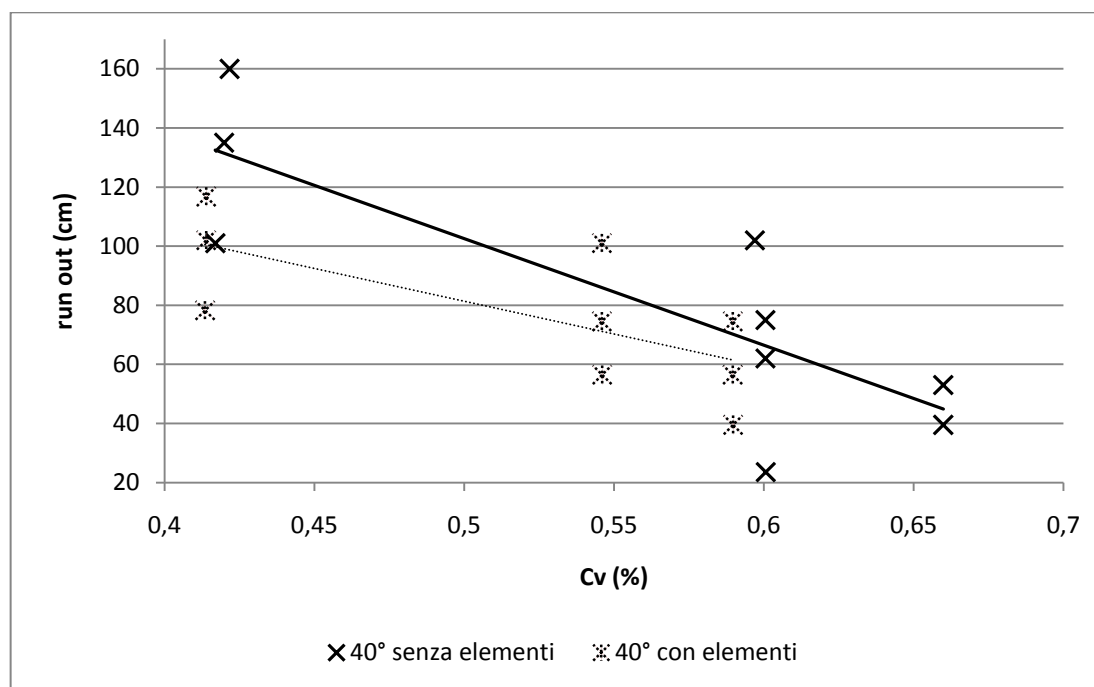


Figura 57: confronto fra il run out registrato per prove condotte con canale a 40° con elementi e senza elementi.

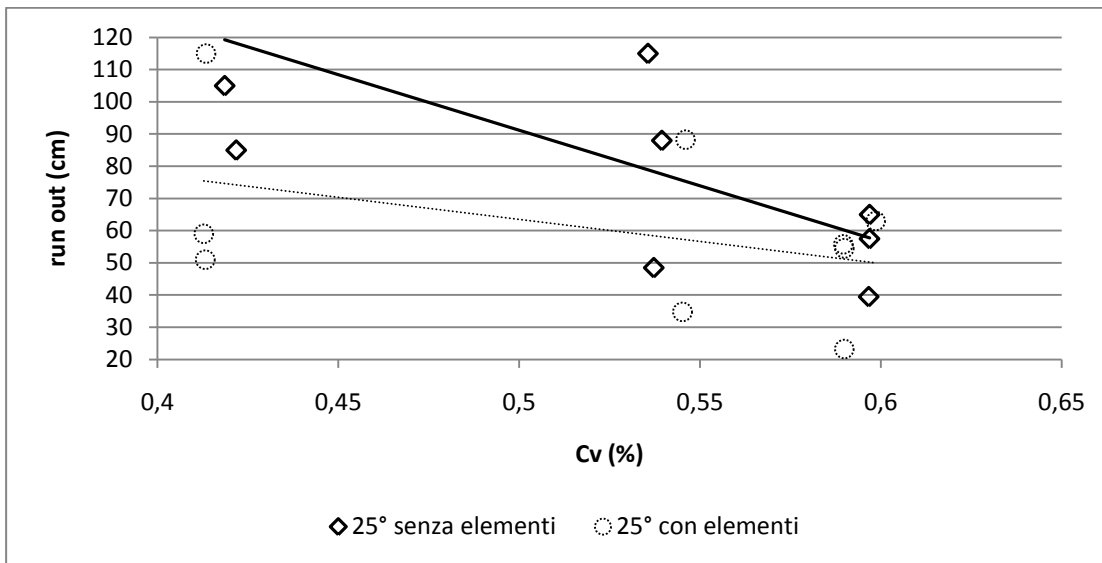


Figura 58: run out in funzione della Cv per le serie di dati condotte con canale a 25° con e senza elementi

### Larghezza

Dall'analisi dei dati di larghezza (Figura 59) dei depositi per le prove condotte con canale a 40° con e senza elementi il test F restituisce un valore di 0,28 (serie uguali) ma un p-value molto elevato (test debole).

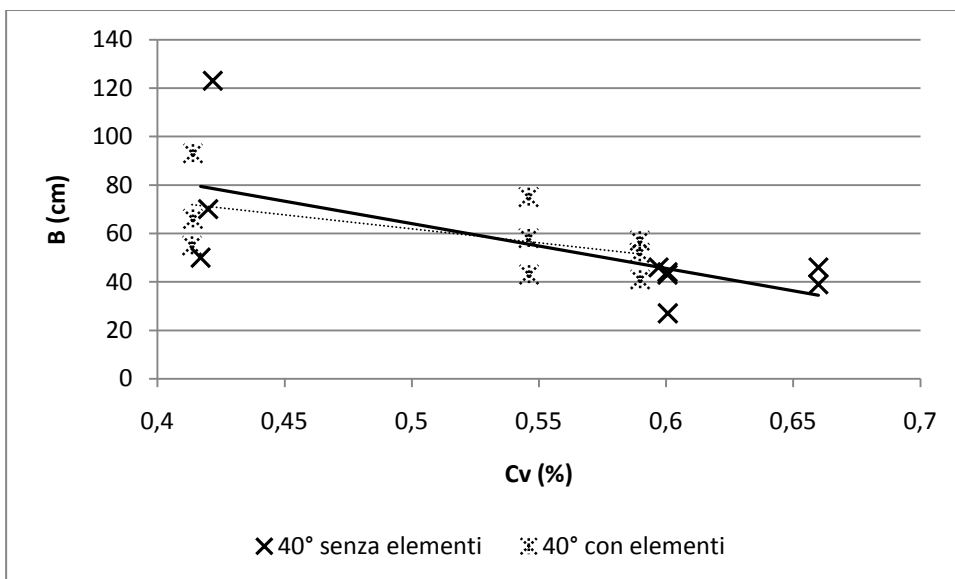


Figura 59: dati di larghezza del deposito in funzione della Cv, suddivisi in base alla presenza o meno degli elementi

Per quanto riguarda la larghezza del deposito (Figura 60) per le prove condotte con canale a 25°, con e senza elementi emerge che le due serie sono diverse (test F 1,26) ma con bassa solidità del test.

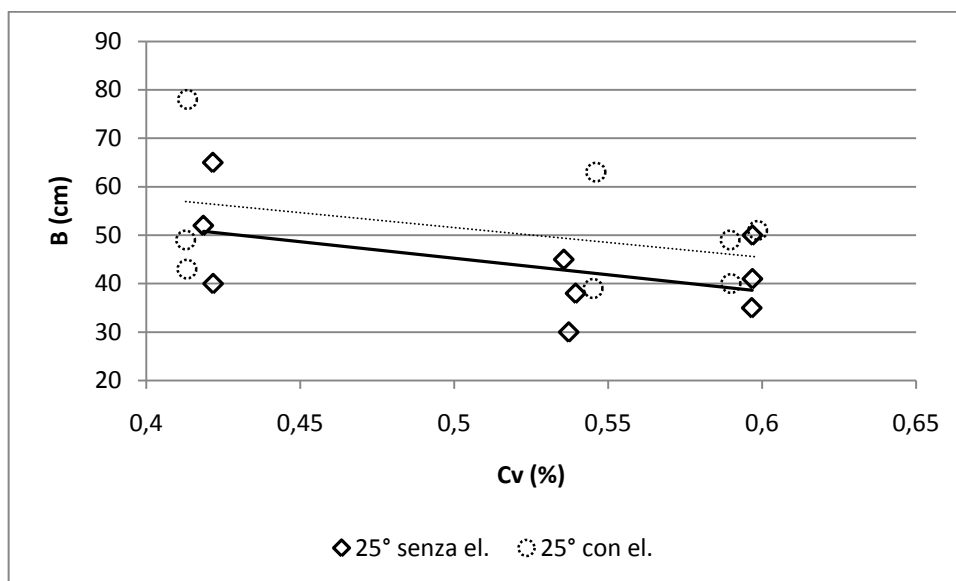


Figura 60: serie di dati relativi a prove condotte con canale a 25°, con e senza elementi

### Area

Lo stesso confronto viene eseguito sul dato relativo all'area per il quale visivamente non si notano differenze fra le due serie, sia per quanto riguarda le prove eseguite con pendenza del canale pari a 25° (Figura 61) che per pendenza pari a 40° (Figura 62). Anche eseguendo l'analisi della covarianza risulta l'uguaglianza delle due serie sia per il canale a 25° (test F 0,32) sia per il canale a 40° (test F 0,35), anche se il test non risulta solido.

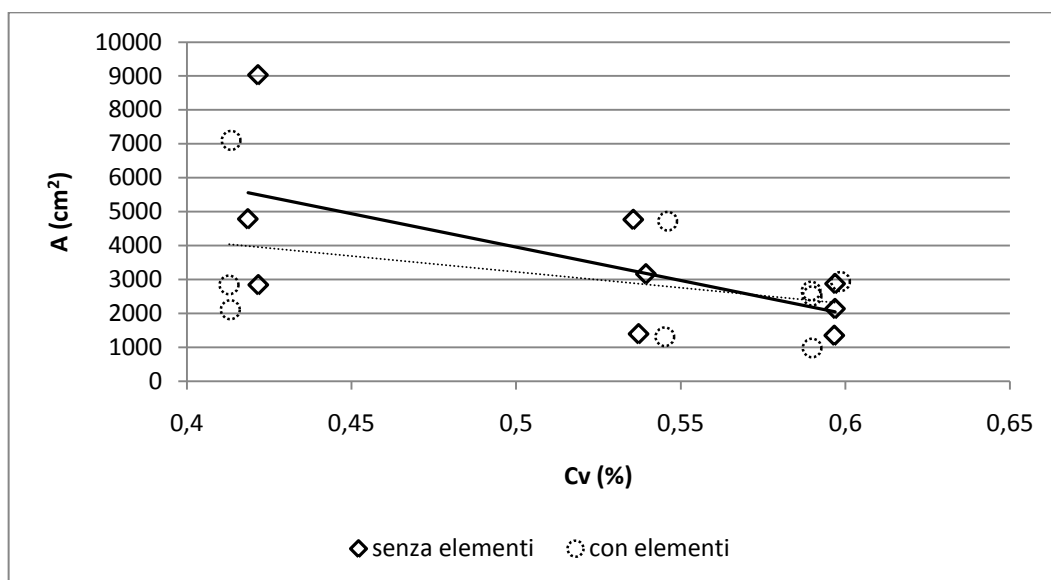
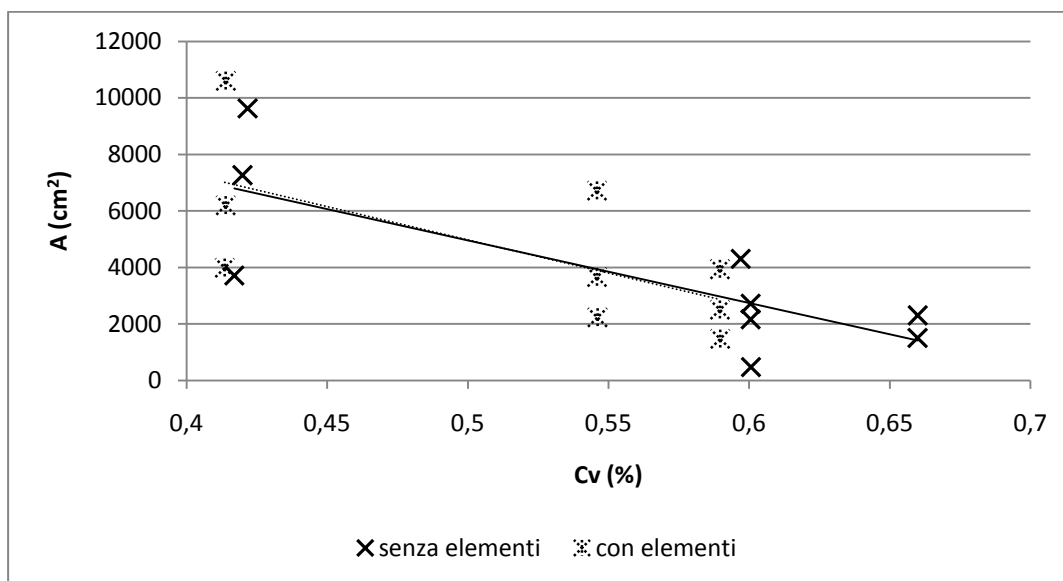


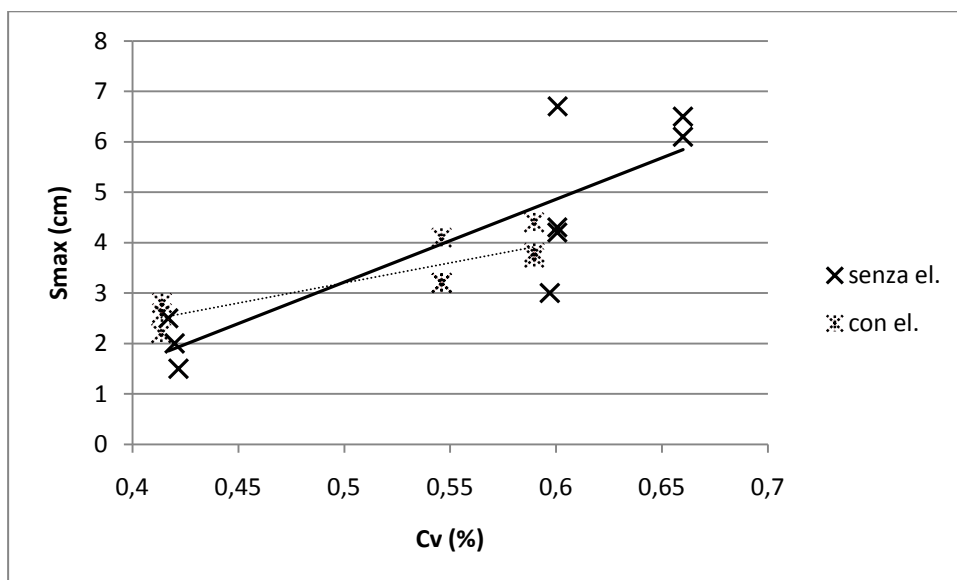
Figura 61: area del deposito in funzione della Cv per le prove condotte con canale a 25° e distinti per presenza o assenza degli elementi.



**Figura 62:** area in funzione della Cv per le prove condotte con canale a 40°, distinte per presenza o assenza degli elementi.

### Spessore massimo

Anche nel caso dello spessore massimo non sembra esserci differenza fra prove eseguite con e senza elementi. Osservando il grafico riportato in Figura 63 (dati di prove condotte con pendenza del canale pari a 40°) si osserva che le serie si incrociano ma hanno due andamenti diversi; dal test statistico condotto (test F 1,15) le due serie risultano diverse anche se il test non è solido.



**Figura 63:** spessore massimo in funzione della Cv per prove condotte con canale a 40°

Così anche per le prove condotte con canale a 25° (Figura 64) risultano diverse (test F 1,39) anche se con bassa significatività.

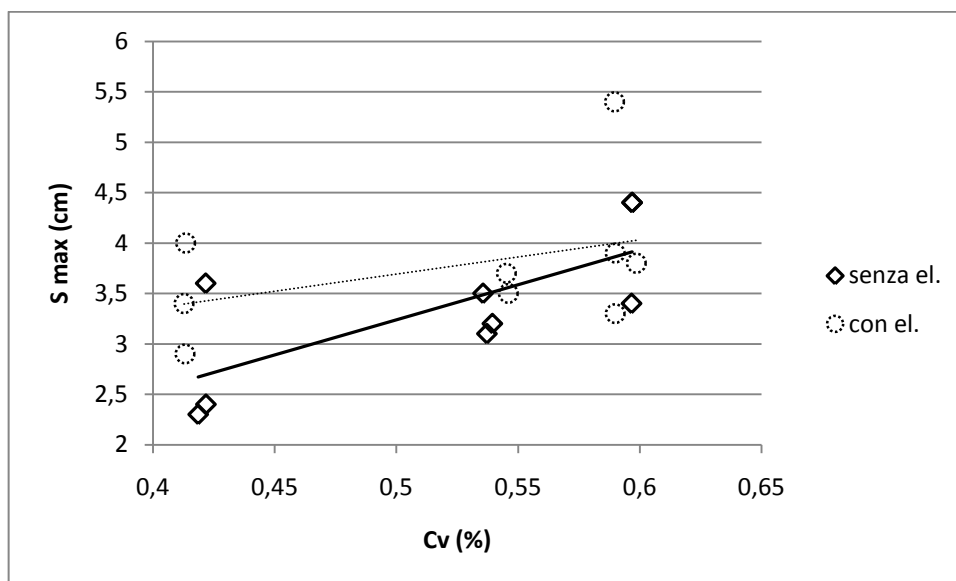


Figura 64: dati di spessore massimo del deposito in funzione della Cv, suddivisi in base alla presenza o meno degli elementi.

### Angolo Beta

Nel caso dell'angolo Beta (Figura 65) non si notano visivamente differenze evidenti e dall'analisi della covarianza risulta che le due serie sono simili (F 0,02 con p-value 0,10) per le serie di prove condotte con pendenza del canale 40°.

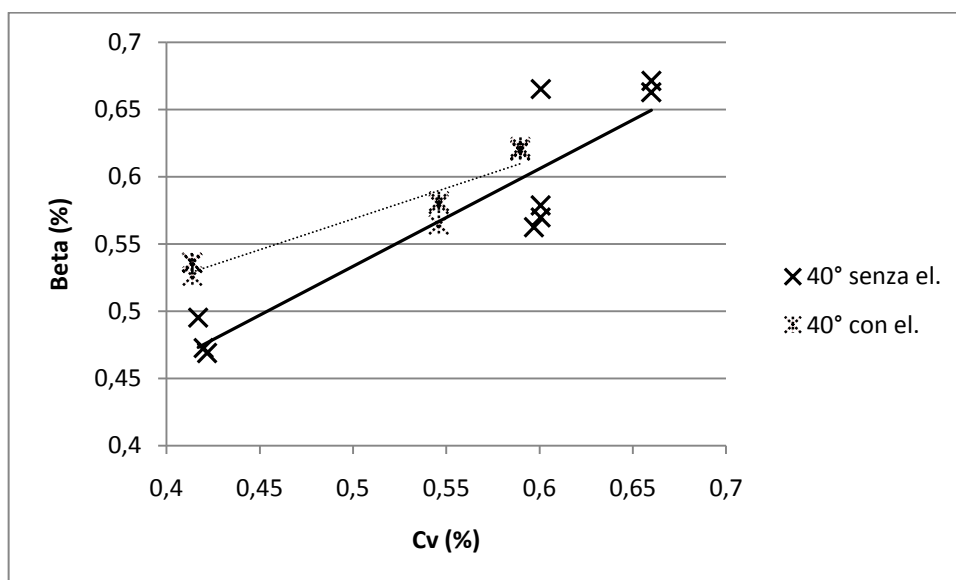
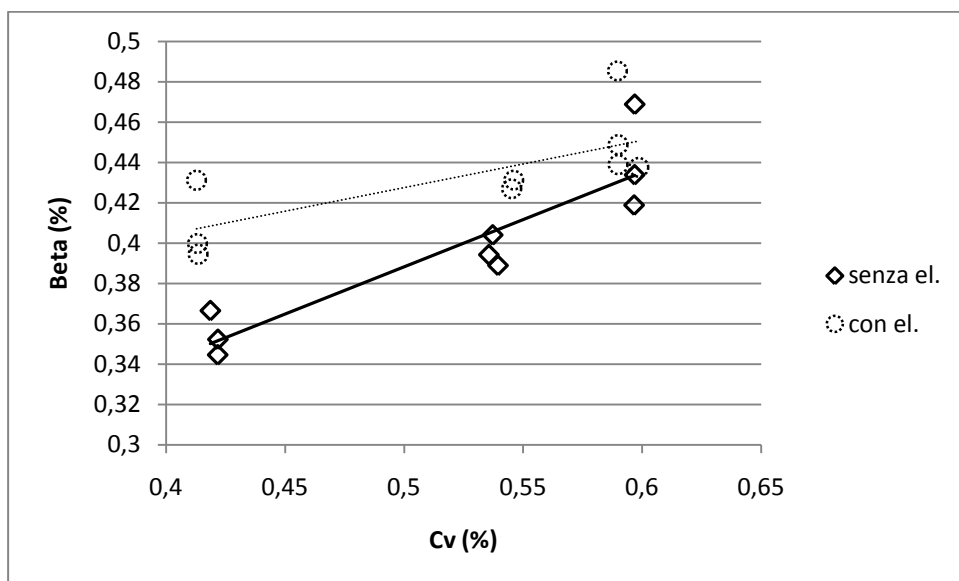


Figura 65: angolo beta in funzione della Cv per le prove condotte con pendenza del canale 40°.

Per le prove condotte con canale a 25° (Figura 66) invece si nota già da subito un netto distacco fra le due serie di prove: tale impressione è stata confermata dall'analisi della covarianza che restituisce un valore del test  $F = 5,02$  ed un p-value di 0,01.



**Figura 66: angolo beta in funzione della Cv per le prove condotte con pendenza del canale 25°.**

In generale, quindi, si ritiene di poter concludere che gli elementi disposti secondo lo schema proposto non abbiano effetti significativi sui parametri del deposito, tranne che per l'angolo Beta nel caso delle prove condotte con pendenza del canale pari a 25°.

Tale considerazione ha portato a rivedere la scalatura adottata e si è ritenuto più opportuno scalare la disposizione degli elementi che simulano la presenza di piante sulla base del volume della mistura piuttosto che sulla dimensione del canale.

#### 4.4 Terza serie di prove

Questa serie di prove è stata eseguita con un materiale diverso da quello precedente, proveniente da una piccola colata presso il colle di Balisio e usato unicamente per queste 9 prove aumentando le concentrazioni volumetriche impiegate (da 3 a 9), utilizzando un solo volume (5 litri) e una sola pendenza (pari alla pendenza media dell'alveo della colata da cui è stato prelevato il materiale). In tale modo si è potuto comprendere meglio l'effetto della concentrazione volumetrica sui parametri del deposito. I dati di realizzazione relativi alle prove sono riportati in Tabella 38



**Figura 67: esempio di prova condotta con il materiale raccolto a Balisio.**



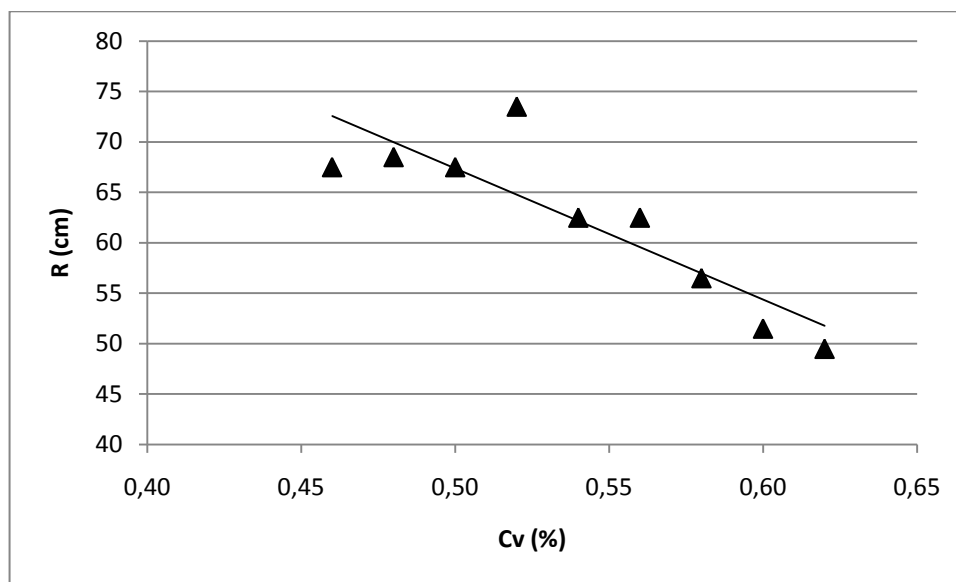
**Tabella 38: dati di partenza delle prove condotte con materiale raccolto a Balisio**

prova	densità materiale	pendenza Canale	pendenza Piano	presenza elementi	quantità suolo	volume acqua	Cv iniziali	volume
	Mg/mc	°	°		kg	l	%	l
8apr_Balisio_n1	2,75	27	0	no	7,976	2,1	0,58	5,00
8apr_Balisio_n2	2,75	27	0	no	7,701	2,2	0,56	5,00
8apr_Balisio_n3	2,75	27	0	no	7,426	2,3	0,54	5,00
8apr_Balisio_n4	2,75	27	0	no	7,151	2,4	0,52	5,00
8apr_Balisio_n5	2,75	27	0	no	6,876	2,5	0,50	5,00
8apr_Balisio_n6	2,75	27	0	no	6,601	2,6	0,48	5,00
8apr_Balisio_n7	2,75	27	0	no	6,326	2,7	0,46	5,00
8apr_Balisio_n8	2,75	27	0	no	8,251	2,0	0,60	5,00
8apr_Balisio_n9	2,75	27	0	no	8,526	1,9	0,62	5,00

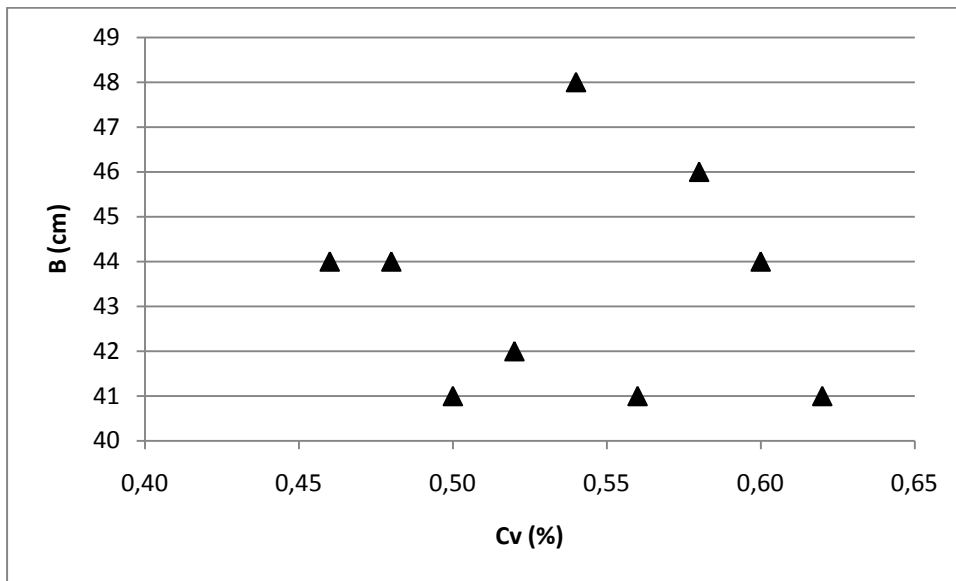
Dal grafico presentato in Figura 68 si nota che i valori di run out si hanno un comportamento decrescente. In analogia a quanto fatto da altri autori (Cesca 2008) è stata condotta una regressione tra run out e Cv.

$$R = 132 - 130Cv \quad (R^2 = 0,76; \text{p-value} < 0,01)$$

La larghezza del deposito (Figura 69) non presenta, invece, alcun trend rispetto la concentrazione volumetrica, come d'altra parte si poteva intuire già nelle prove precedenti.



**Figura 68: run out in funzione della Cv per le prove di Balisio**



**Figura 69: larghezza del deposito funzione della Cv**

Lo spessore massimo del deposito varia in funzione della concentrazione volumetrica in modo diretto secondo una funzione lineare (Figura 70) ( $R^2 = 0,60$  e  $p\text{-value} = 0,05$ ):

$$S_{max} = 12Cv - 2,57$$

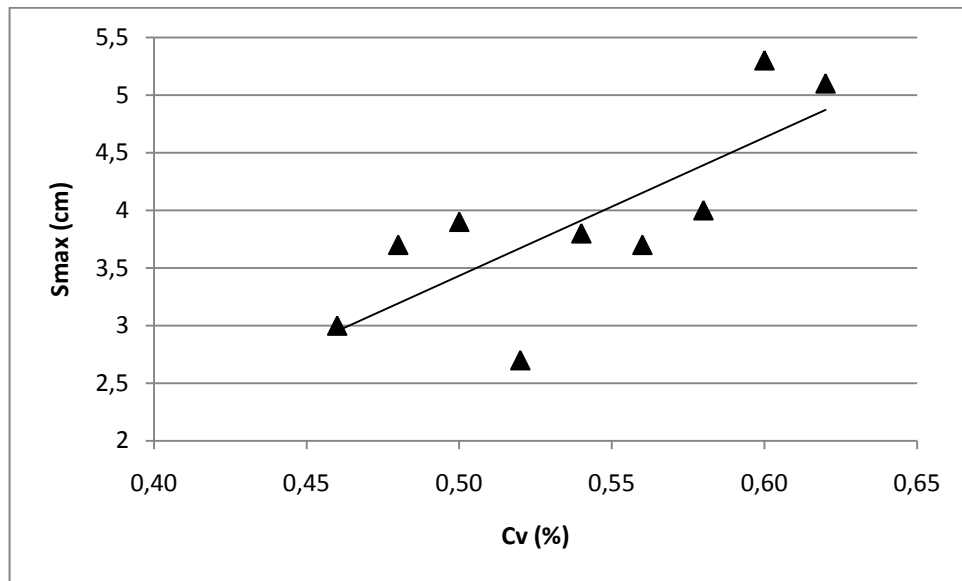
L'area rispetto alla concentrazione volumetrica si comporta analogamente al run out, ovvero presenta valori decrescenti. Tale parametro (Figura 71) restituisce una retta di regressione abbastanza fedele ai dati sperimentali ( $R^2=0,65$ ;  $p\text{-value}=0,01$ ):

$$A = 12212 - 16658Cv$$

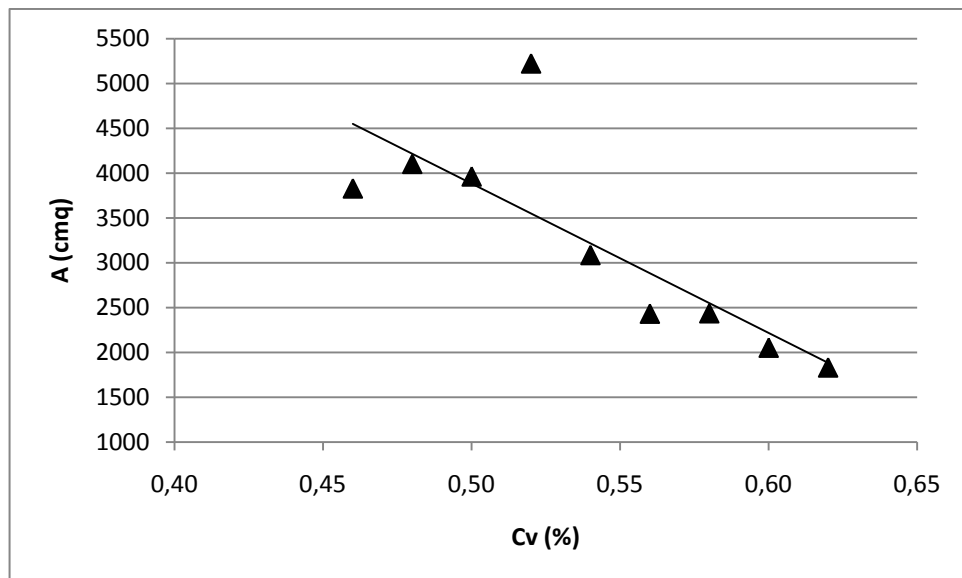
L'area rispetto la concentrazione volumetrica si comporta analogamente al Run Out, ovvero presenta valori decrescenti, senza considerare il quarto valore (out lyer).

Anche l'area (Figura 71) restituisce una retta di regressione sufficientemente fedele ai dati sperimentali ( $R^2=0,65$ ;  $p\text{-value}=0,01$ ):

$$A = 12212 - 16658Cv$$



**Figura 70: spessore del deposito in funzione della  $C_v$**



**Figura 71: area del deposito funzione della  $C_v$**

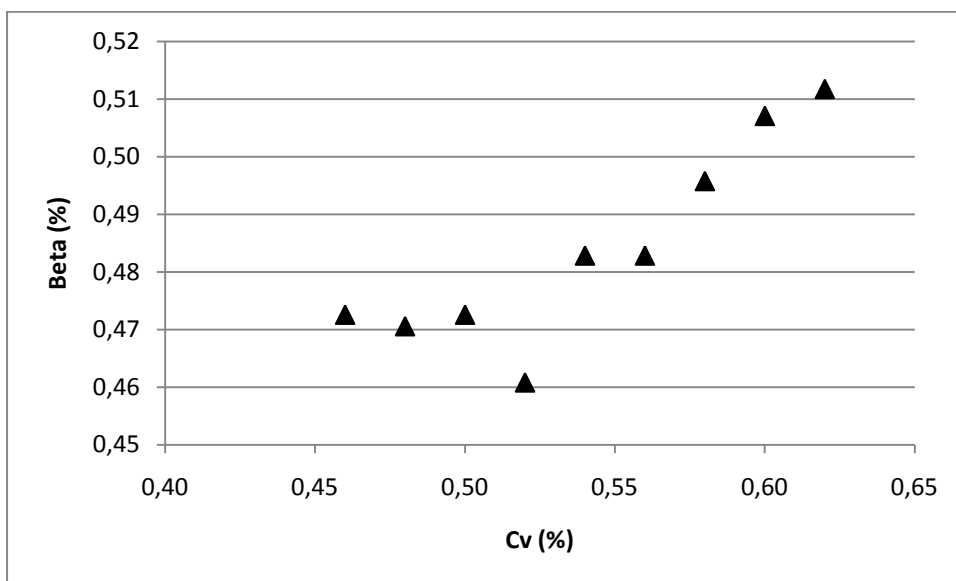


Figura 72: angolo Beta in funzione della Cv

#### 4.5 Quarta serie di prove

Sull'esperienza delle prove eseguite con il materiale proveniente dalla colata del torrente Perlino, gli esperimenti sono proseguiti con 10 prove a volume costante pari a 5 litri, pendenza del canale costante pari a 40°, e 10 concentrazioni variabili fra un minimo di 0,46 e 0,64. I dati relativi alle prove sono riportati in Tabella 39.



Figura 73: esempio di colata prodotta dalle prove con il materiale raccolto sul torrente Perlino

Tabella 39: dati relativi ai parametri delle prove condotte con il materiale del torrente Perlino

prova	densità materiale	pendenza Canale	pendenza Piano	presenza elementi	quantità suolo	volume acqua	Cv iniziali	volume
-------	-------------------	-----------------	----------------	-------------------	----------------	--------------	-------------	--------

	Mg/mc	°	°		kg	l	%	l
14apr_n1	2,71	40	0	no	6,235	2,7	0,46	5,00
14apr_n2	2,71	40	0	no	6,504	2,6	0,48	5,00
14apr_n3	2,71	40	0	no	6,7755	2,5	0,50	5,00
14apr_n4	2,71	40	0	no	7,0466	2,4	0,52	5,00
14apr_n5	2,71	40	0	no	7,316	2,3	0,54	5,00
14apr_n6	2,71	40	0	no	7,578	2,2	0,56	5,00
14apr_n7	2,71	40	0	no	7,866	2,1	0,58	5,00
14apr_n8	2,71	40	0	no	8,125	2	0,60	5,00
14apr_n9	2,71	40	0	no	8,415	1,9	0,62	5,00
14apr_n10	2,71	40	0	no	8,6735	1,8	0,64	5,00

Il run out (Figura 74) si presenta un trend simile a quello osservato per il caso precedente, con valori decrescenti al crescere di Cv.

Per quanto riguarda la larghezza del deposito in funzione della concentrazione volumetrica, si nota anche in questo caso l'inesistenza di una relazione fra le due variabili e vi è un leggero incremento dei valori di larghezza per le Cv minori.

Per quanto riguarda l'area (Figura 76) il trend è inversamente proporzionale alla concentrazione volumetrica in modo lineare; contrariamente al comportamento dello stesso parametro per le prove delle serie precedenti; in queste prove non si ha una variazione di pendenza in corrispondenza di una determinata concentrazione volumetrica.

Lo spessore massimo (Figura 77) presenta una relazione diretta rispetto la Cv a partire dal valore di circa 0,55, mentre per miscele con concentrazione minore si registra uno spessore simile.

L'angolo Beta (Figura 78), infine, presenta una relazione direttamente proporzionale rispetto la concentrazione volumetrica.

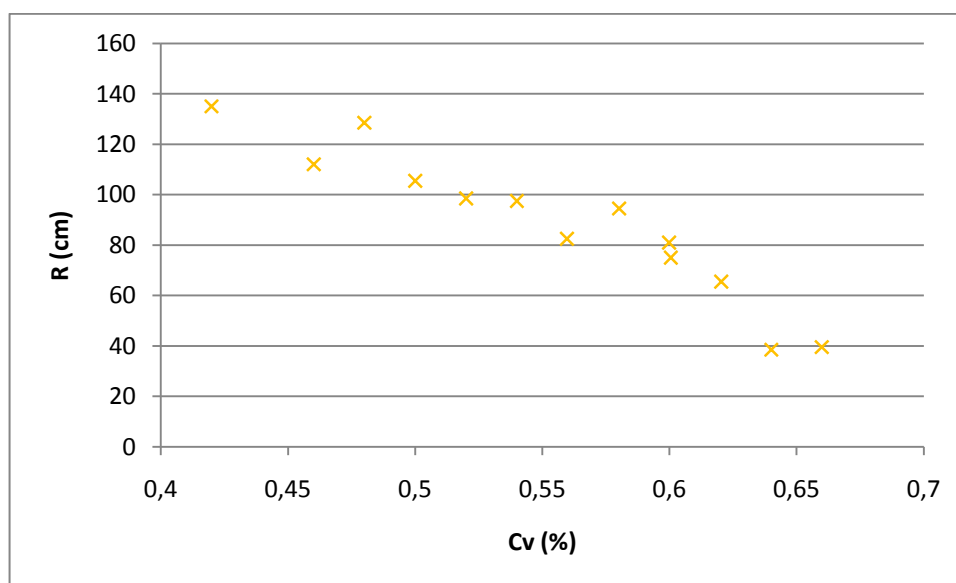
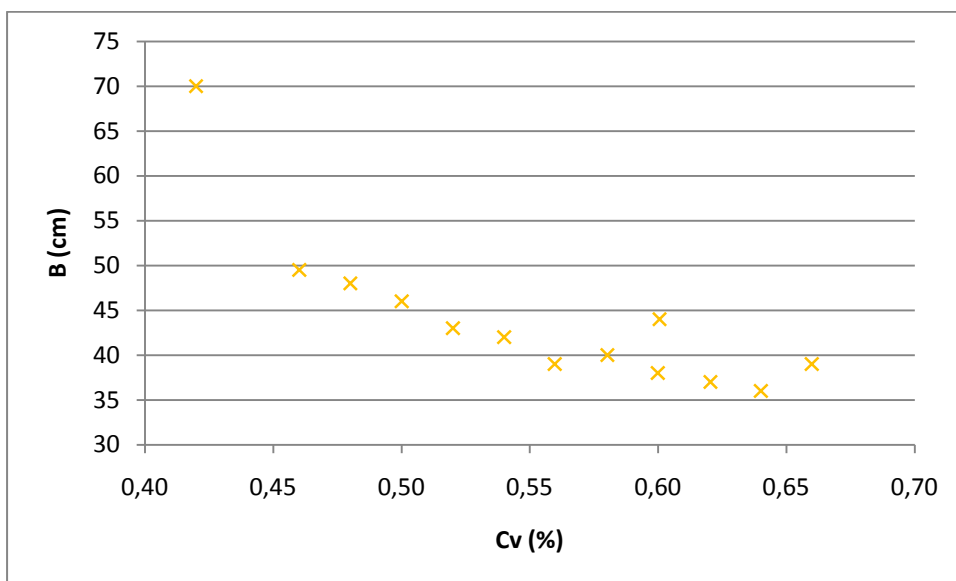
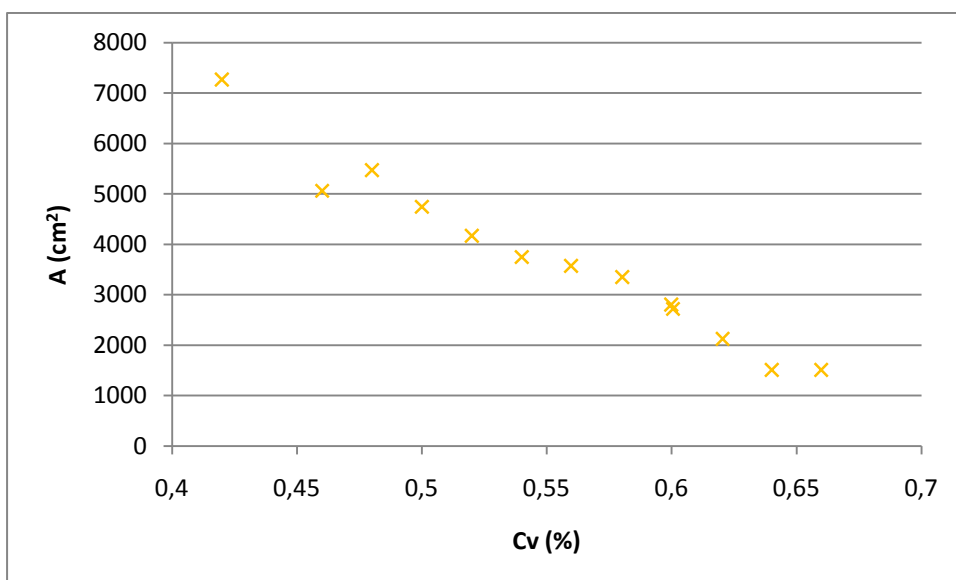


Figura 74: run out funzione della Cv



**Figura 75: larghezza del deposito in funzione della  $C_v$**



**Figura 76: area funzione della  $C_v$**

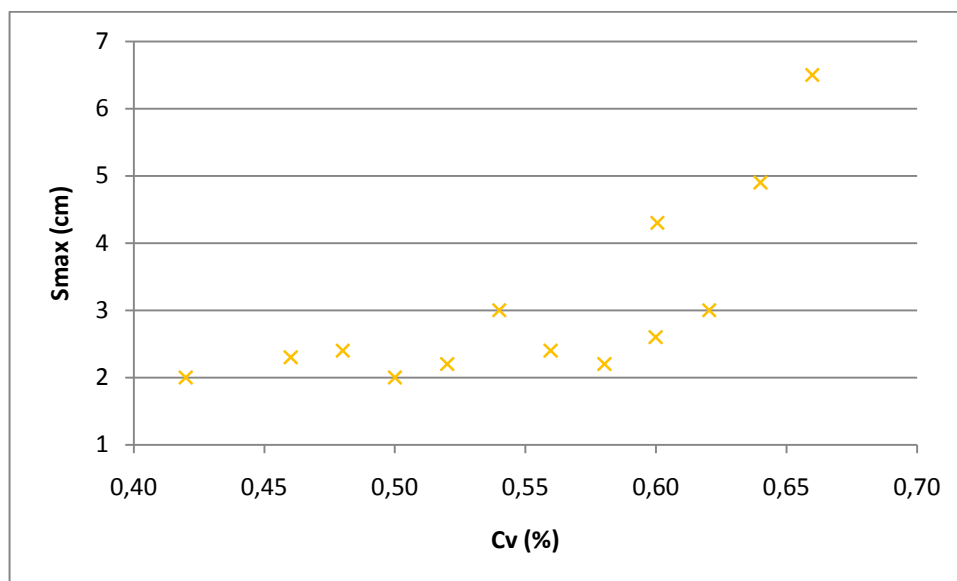


Figura 77: spessore massimo funzione della Cv

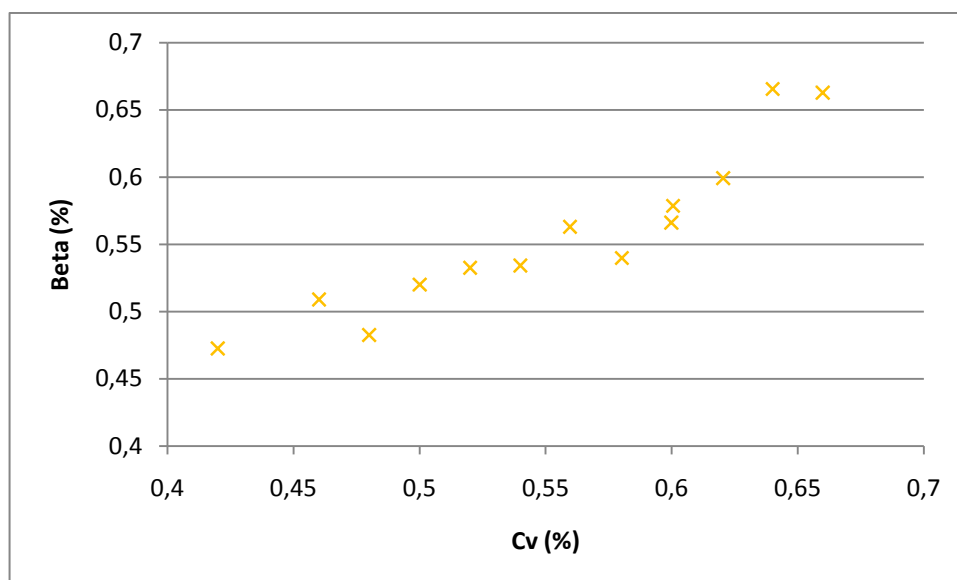


Figura 78: angolo Beta funzione della Cv

#### 4.6 Quinta serie di prove

Una volta messa a punto la procedura e verificato il comportamento delle misture al variare delle condizioni al contorno, è stato deciso di effettuare le prove con gli elementi che simulano la vegetazione, utilizzando una pendenza del canale di 25° ed un volume di 5l.

Il piano di deposito è stato allestito con elementi di acciaio avvitati al fondo, con spaziatura 10cm X 10cm e un diametro di 0,6 cm (Figura 79) per simulare la presenza di un bosco caratterizzato da una spaziatura in scala reale di 5 m tra ciascuna pianta avente diametro di 35 cm ad una scala di 1:50 o una spaziatura in scala reale di 10 m tra ciascuna pianta avente diametro di 60 cm ad una scala di 1:100. Tali situazioni trovano riscontro in situazioni reali di fustaie (si veda il paragrafo 3).

Dal punto di vista dei volumi tali scale corrispondono rispettivamente a 625 e 5000 m<sup>3</sup>, volumi che, nel primo caso rientra nell'intervallo di 1.000-10.000 m<sup>3</sup> che caratterizza le colate reali (Mills et al. 2003).

Le prove sono state eseguite utilizzando 6 concentrazioni volumetriche diverse (in un intervallo compreso tra 0,4 e 0,6 circa) e differente pendenza del piano di deposito (0°, 5° e 7,3°).

Sono state eseguite anche delle prove senza elementi con piano inclinato per avere un termine di paragone. I parametri relativi allo svolgimento delle prove sono riportati in



Tabella 40.



**Figura 79: esempio di prova condotta con elementi 10X10 cm**

**Tabella 40: parametri iniziali delle prove condotte durante la quinta serie**

prova	densità materiale	pendenza Canale	pendenza Piano	presenza elementi	quantità suolo	volume acqua	Cv iniziali	volume
	Mg/mc	°	°		kg	l	%	l
07mag_n1	2,71	25	0	el. 10X10	5,697	2,90	0,42	4,98
07mag_n2	2,71	25	0	el. 10X10	7,320	2,30	0,54	5,00
07mag_n3	2,71	25	0	el. 10X10	8,130	2,00	0,60	5,00
12mag_n1	2,71	25	0	el. 10X10	6,501	2,60	0,48	5,00
12mag_n2	2,71	25	0	el. 10X10	7,724	2,15	0,57	5,00
12mag_n3	2,71	25	0	el. 10X10	8,537	1,85	0,63	5,00
12mag_n4	2,71	25	5	el. 10X10	5,691	2,90	0,42	5,00
12mag_n5	2,71	25	5	el. 10X10	6,505	2,60	0,48	5,00
12mag_n6	2,71	25	5	el. 10X10	7,318	2,30	0,54	5,00
12mag_n7	2,71	25	5	el. 10X10	7,722	2,15	0,57	5,00
12mag_n8	2,71	25	5	el. 10X10	8,135	2,00	0,60	5,00
12mag_n9	2,71	25	5	el. 10X10	8,539	1,85	0,63	5,00
20mag_n1	2,71	25	7,3	el. 10X10	5,692	2,90	0,42	5,00
20mag_n2	2,71	25	7,3	el. 10X10	6,501	2,60	0,48	5,00
20mag_n3	2,71	25	7,3	el. 10X10	7,319	2,30	0,54	5,00
20mag_n4	2,71	25	7,3	el. 10X10	7,729	2,15	0,57	5,00
20mag_n5	2,71	25	7,3	el. 10X10	8,132	2,00	0,60	5,00
20mag_n6	2,71	25	7,3	el. 10X10	8,544	1,85	0,63	5,00

#### 4.6.1 Prove con piano di deposizione a pendenza variabile con elementi.

Di seguito sono riportati i risultati relativi alle prove condotte con presenza di elementi 10X10 cm che simulano le piante, canale a 25°, volume 5 l e piano nelle tre pendenze.

Come era da attendersi, le variabili hanno un comportamento molto simile per le tre inclinazioni del piano. I valori di run out (Figura 80) maggiori si sono registrati per pendenze del piano maggiori; il grafico della larghezza (Figura 81) non permette invece di individuare alcun trend, mentre l'Area (Figura 82) aumenta con l'aumentare della pendenza del piano, anche se il grafico non è altrettanto chiaro.

Anche per quanto riguarda l'angolo beta (Figura 84) il grafico non evidenzia particolari differenze in relazione all'inclinazione del piano di deposito e non permette di trarre conclusioni tranne quella sull'andamento generale, ovvero in corrispondenza di Cv basse si assiste ad un leggero aumento dell'angolo beta, mentre passato il limite di Cv=0,52 il rapporto è crescente con un maggior fattore di proporzione fra le due variabili. Lo spessore massimo (Figura 83) del deposito presenta un comportamento simile a quello dell'angolo Beta seppur con maggiore dispersione dei valori.

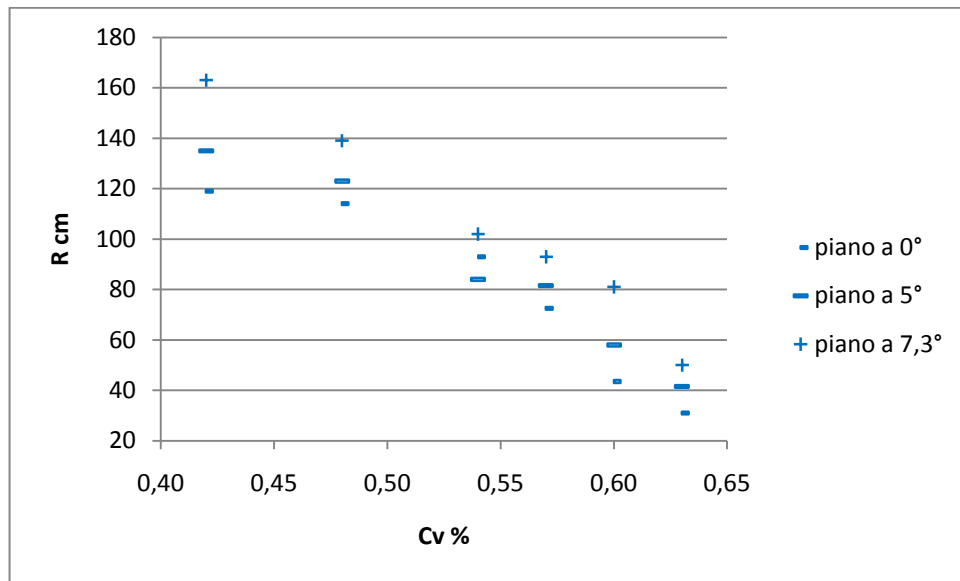


Figura 80: run out funzione della Cv

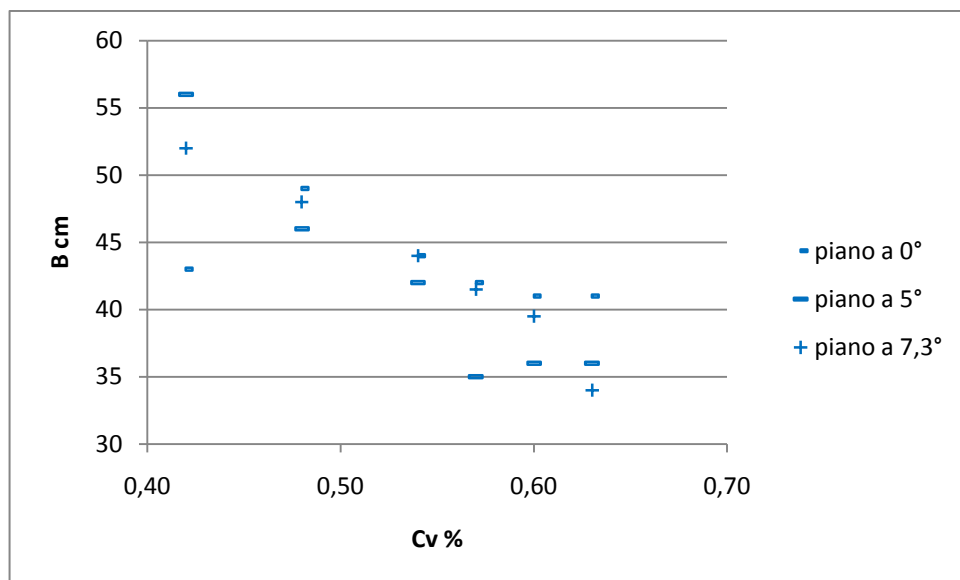


Figura 81: larghezza del deposito in funzione della cv

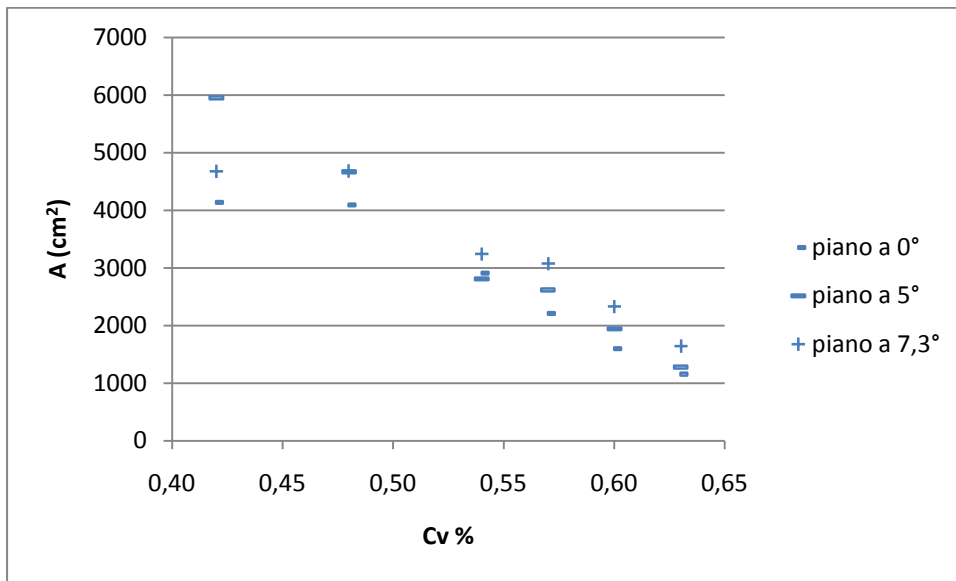


Figura 82: area del deposito funzione della Cv

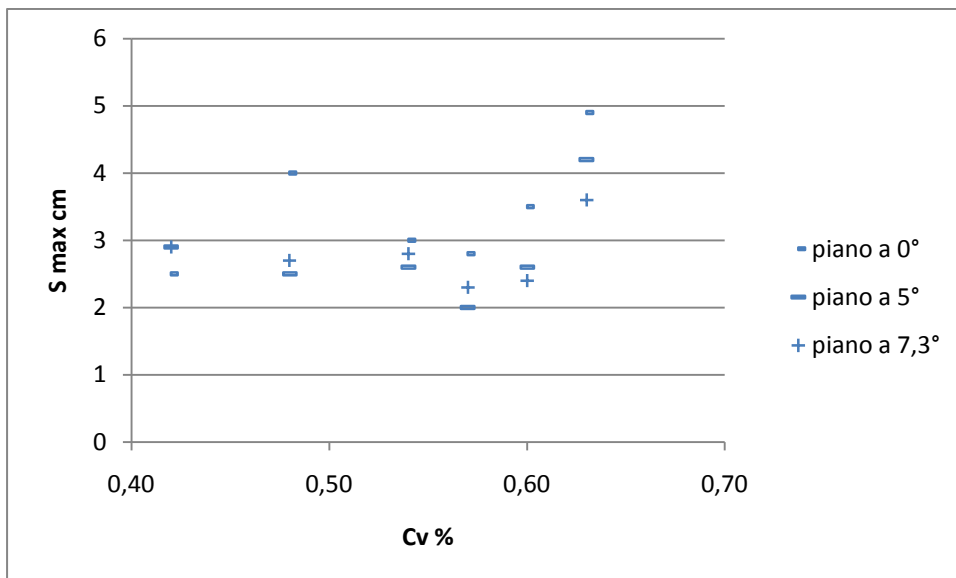
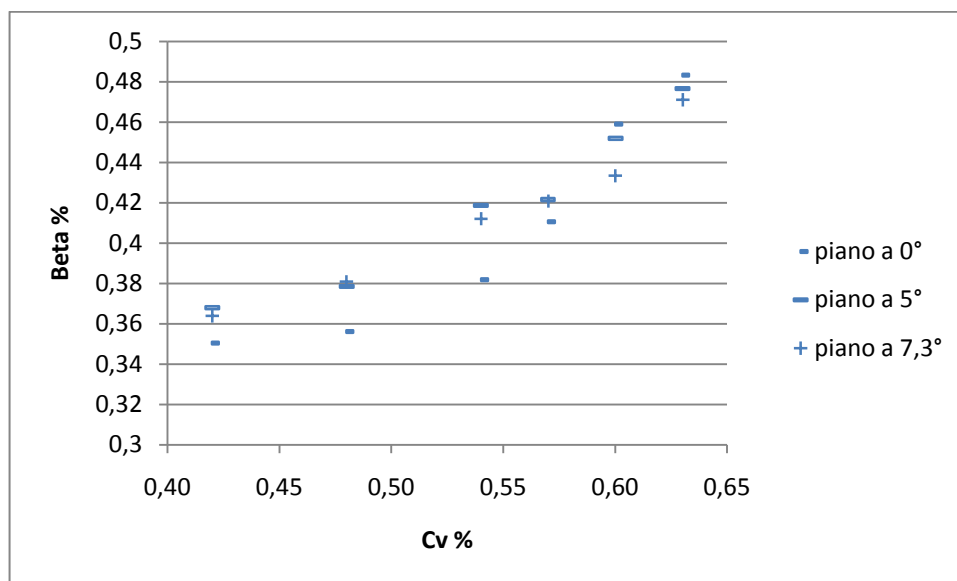


Figura 83: spessore massimo del deposito funzione della Cv



**Figura 84: angolo beta funzione della Cv**

#### 4.6.2 Prove con piano di deposizione a pendenza variabile, senza elementi.

Di seguito sono presentati i risultati delle prove condotte con canale a 25°, volume pari a 5 l, piano di deposizione a pendenze diverse ma senza elementi.

I valori di run out in funzione della Cv (Figura 85) presentano un andamento decrescente rispetto ai valori di Cv. Il run out di prove eseguite con pendenza del piano minore risulta sempre minore di quello con pendenza del piano maggiore.

Per la larghezza (Figura 86) si può solo osservare che si ha il valore maggiore per le prove condotte con minore Cv, mentre non si possono fare distinzioni per quanto riguarda la pendenza del piano.

L'area (Figura 87) segue un andamento decrescente rispetto la Cv, e si individuano valori minori di area per serie con pendenza del piano di deposizione minore.

Lo spessore massimo (Figura 88) del deposito non presenta trend che ne definiscano il comportamento rispetto la Cv.

L'angolo Beta (Figura 89) invece presenta un andamento crescente all'interno del quale non si può distinguere una differenza netta fra le pendenze del piano, ma si individuano valori in genere minori per pendenza maggiore del piano di deposito.

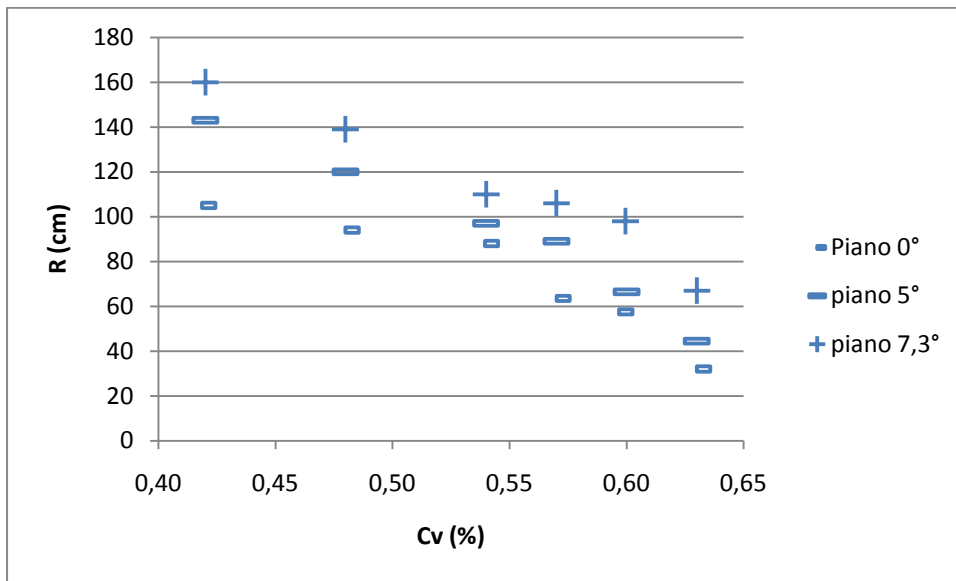


Figura 85: run out funzione della  $C_v$

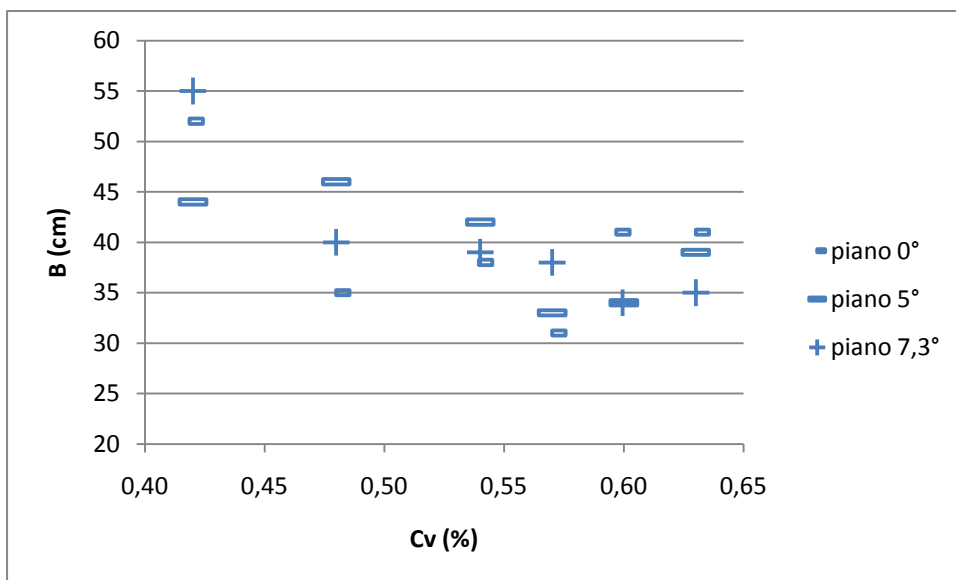


Figura 86: larghezza del deposito in funzione della  $C_v$

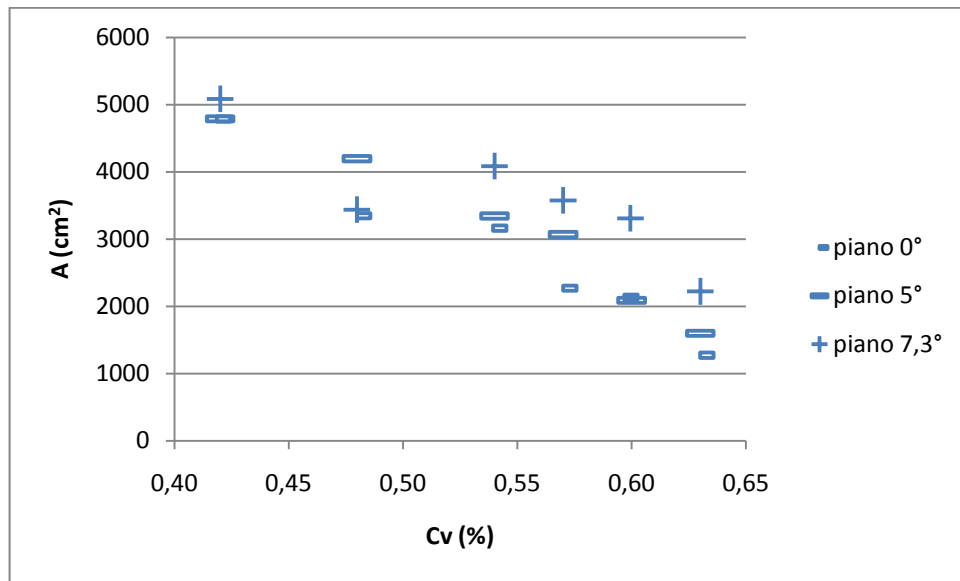


Figura 87: area in funzione della Cv

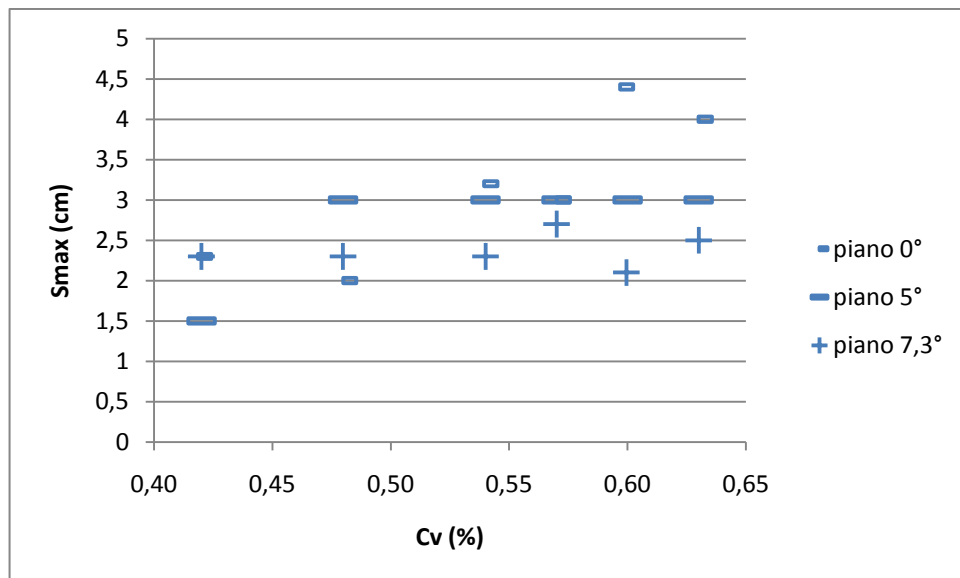


Figura 88: spessore massimo del deposito in funzione di Cv

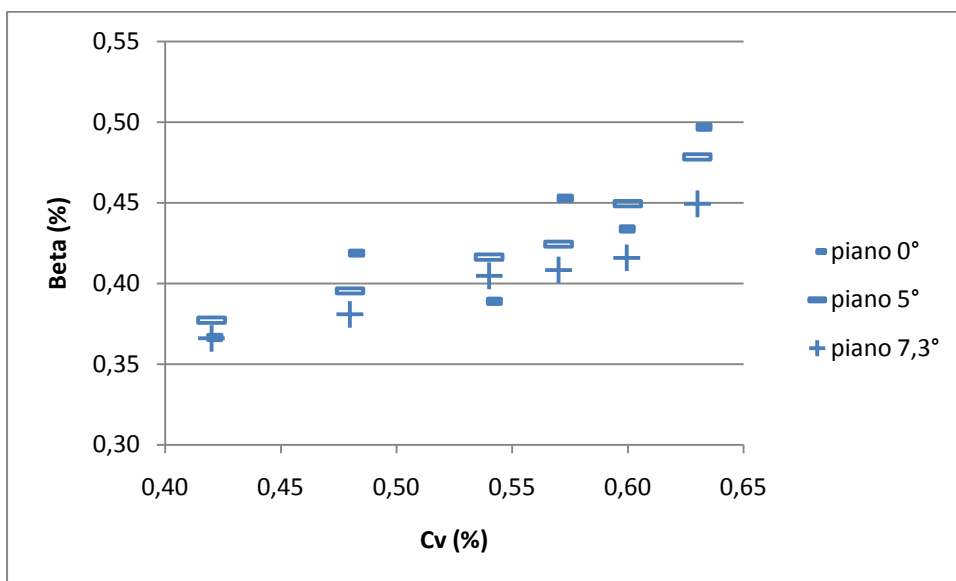


Figura 89: angolo beta funzione di Cv

#### 4.6.3 Confronto tra prove eseguite con e senza elementi.

##### Piano di deposizione a 7,3°

I risultati presentati di seguito sono relativi al confronto delle prove eseguite con canale a 25°, piano a 7,3°, volume di 5 litri, con e senza elementi.

Anche solo visivamente si può intuire che non esiste una netta differenza fra il comportamento delle due configurazioni per i parametri considerati (Figura 90, Figura 91, Figura 92, Figura 93 e Figura 94), poiché spesso le serie di dati si incrociano e sono molto vicine.

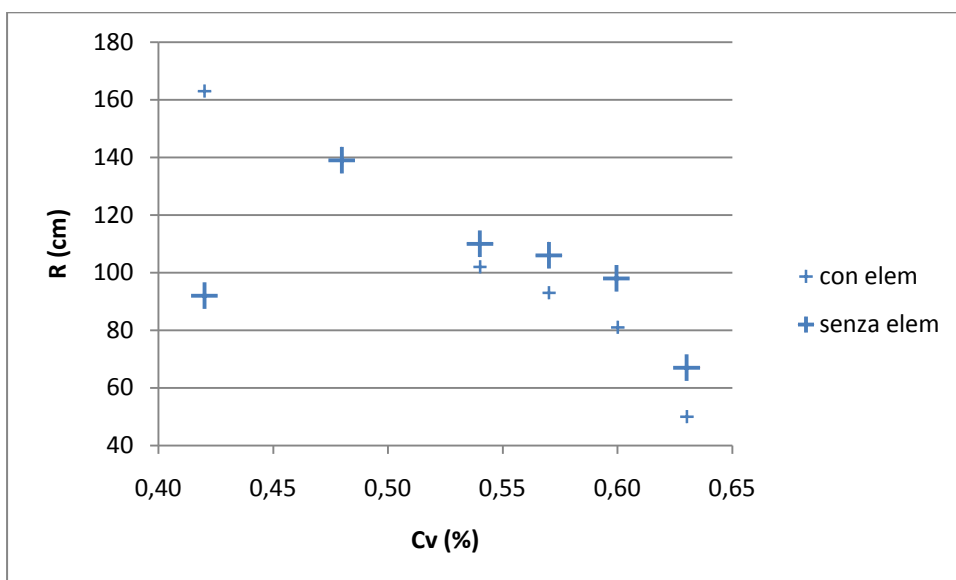


Figura 90: run out funzione della Cv



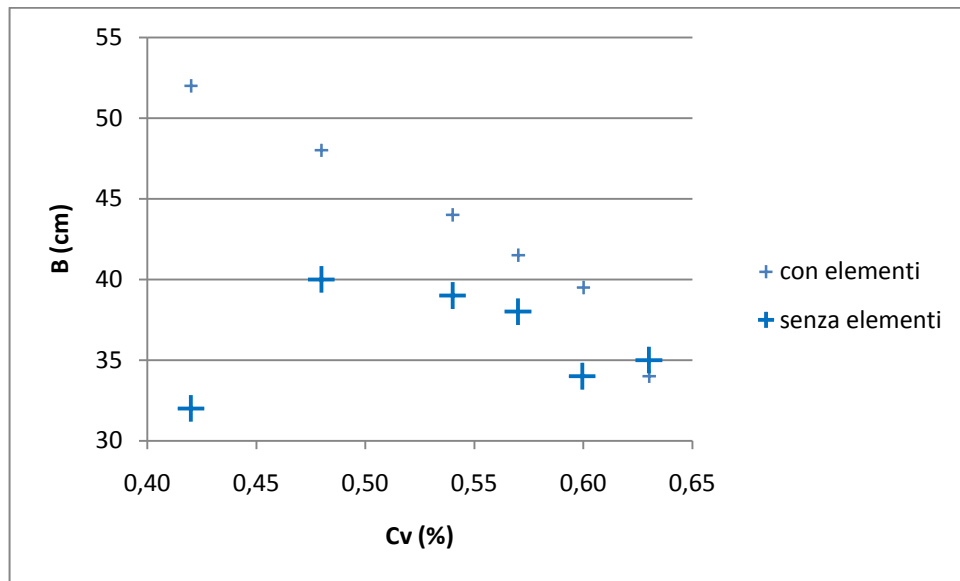


Figura 91: larghezza del deposito funzione della  $C_v$

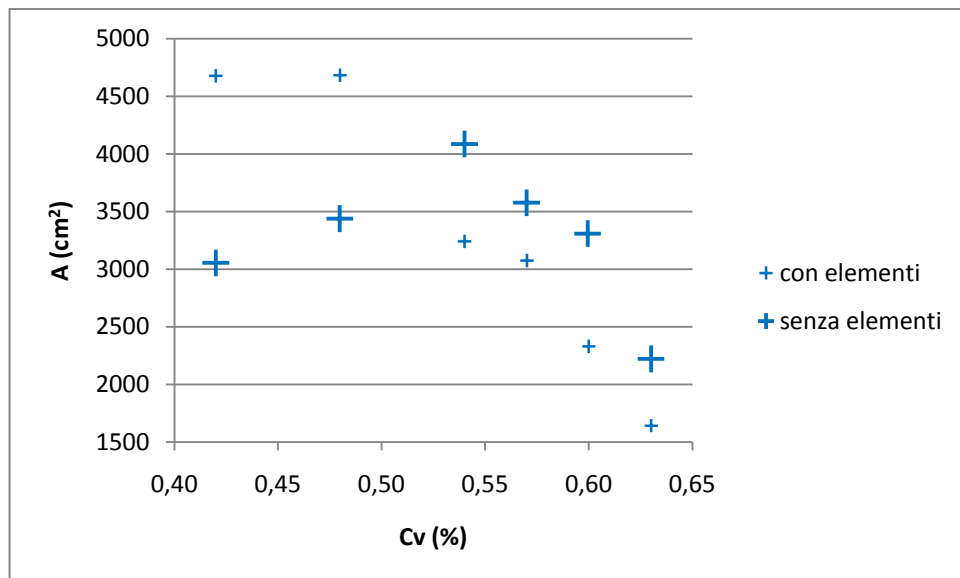


Figura 92: area del deposito funzione della  $C_v$

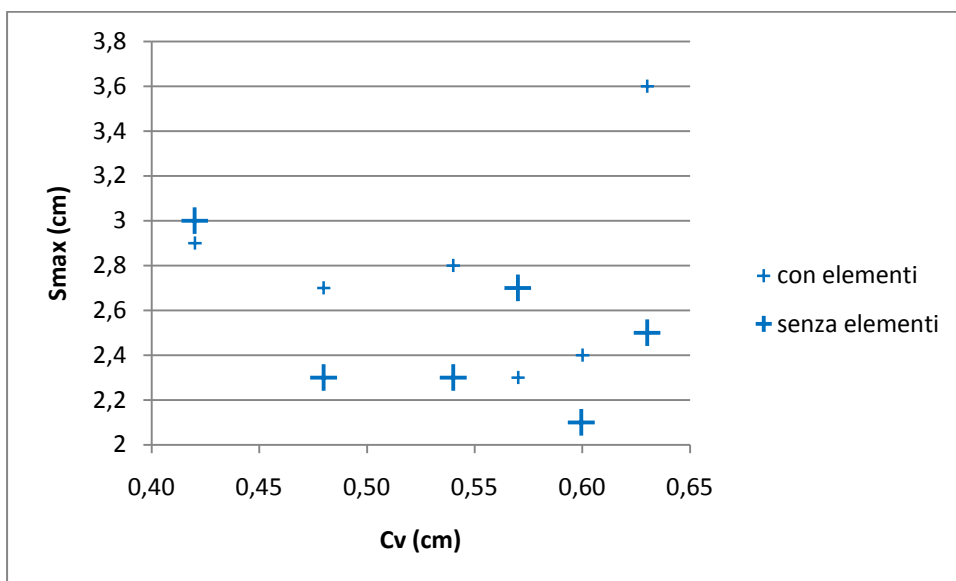


Figura 93: spessore massimo funzione della Cv

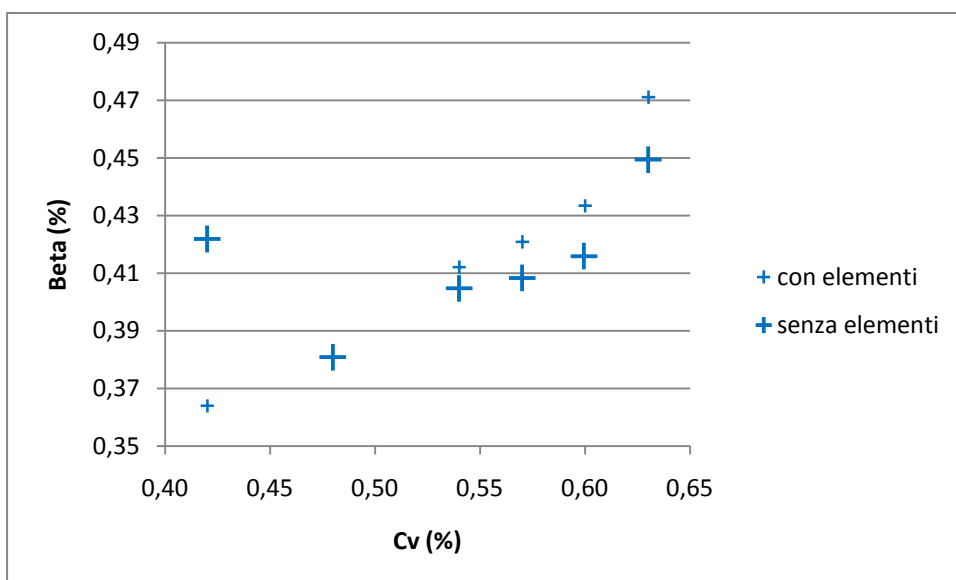
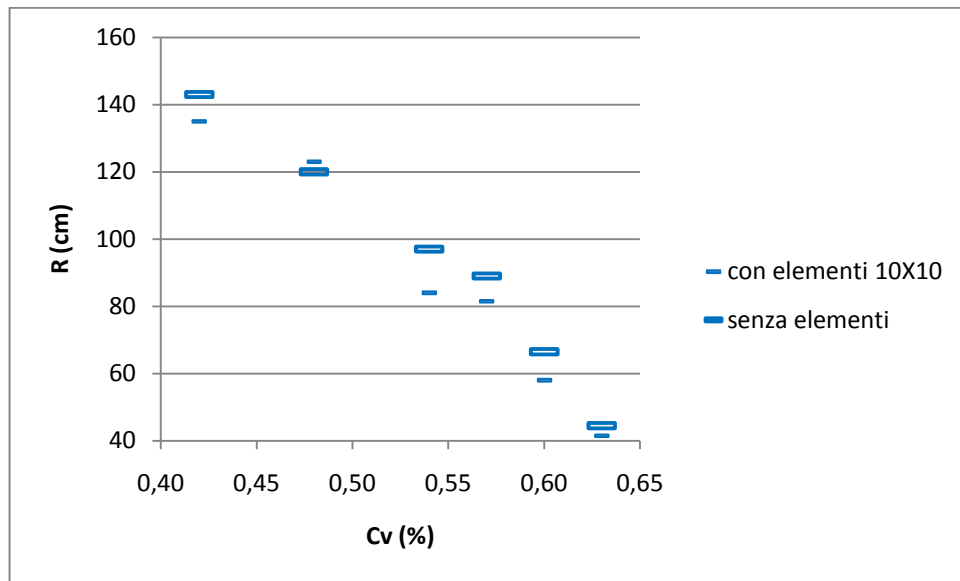


Figura 94: angolo beta funzione della Cv

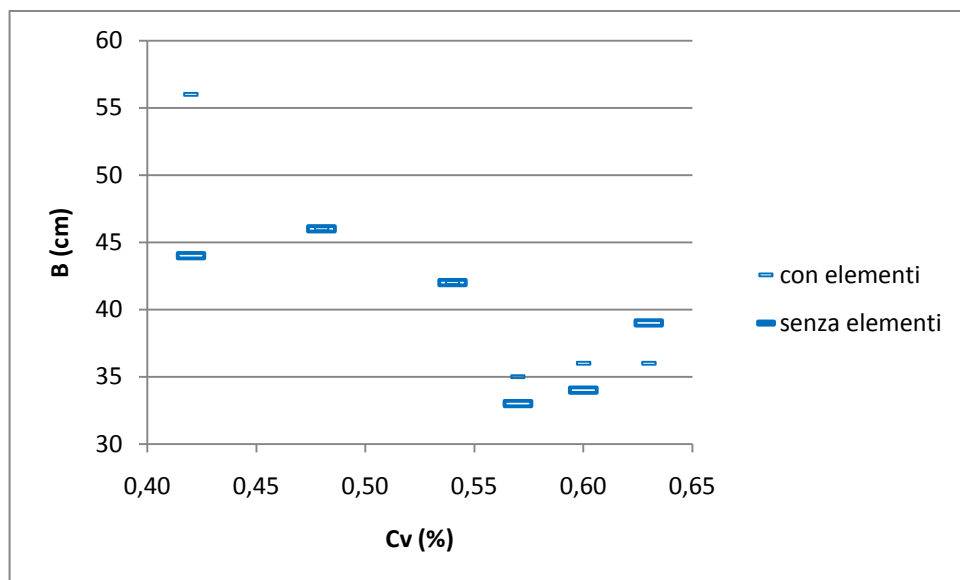
### Piano di deposito a 5°

I risultati presentati di seguito sono relativi alle prove eseguite con canale a 25°, piano a 5°, volume di 5 litri, con e senza elementi.

Anche in questo caso non si individua un comportamento che si possa differenziare in modo netto, anzi, in molti casi si assiste ad una buona sovrapposizione. (Figura 95, Figura 96, Figura 97 e Figura 98)



**Figura 95: run out funzione della Cv**



**Figura 96: larghezza del deposito funzione della Cv**

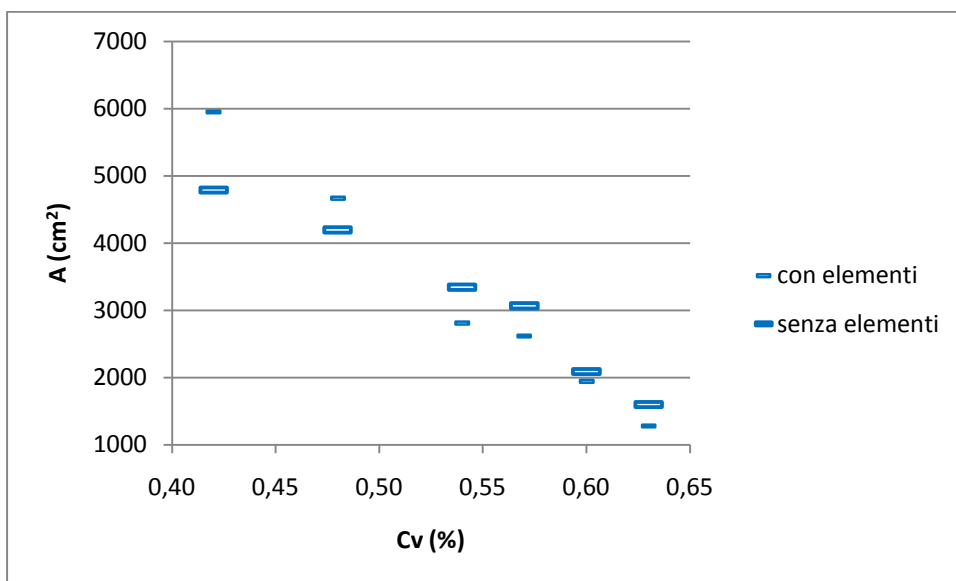


Figura 97: area del deposito funzione della Cv

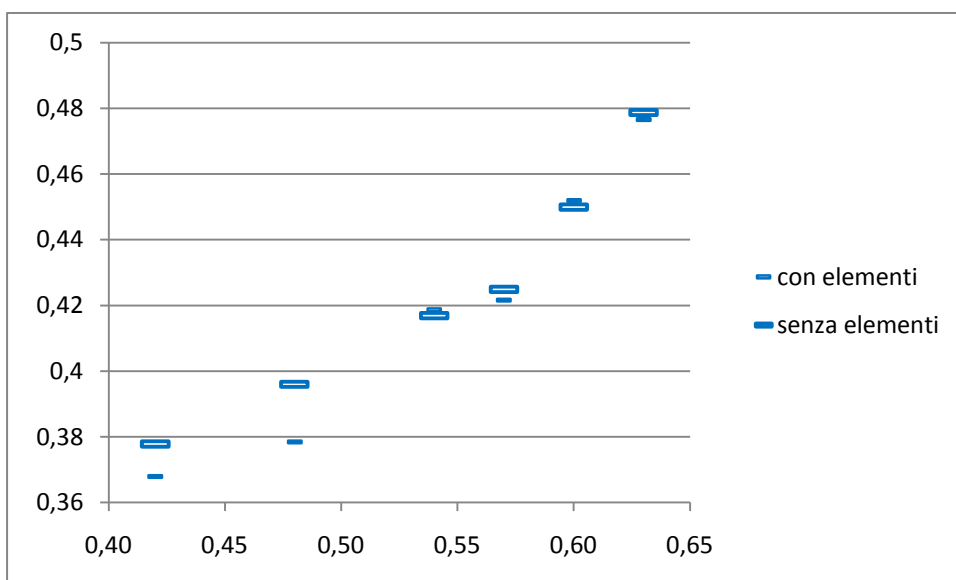


Figura 98: Angolo Beta funzione della Cv

### Piano a 0°

I risultati presentati di seguito sono relativi al confronto delle prove eseguite con canale a 25°, piano a 0°, volume pari a 5 litri, con e senza elementi.

Ancora una volta risulta evidente (Figura 99, Figura 100, Figura 101 e Figura 102), come per le altre due configurazioni analizzate precedentemente, che non vi sono differenze nette fra i comportamenti delle serie di dati.

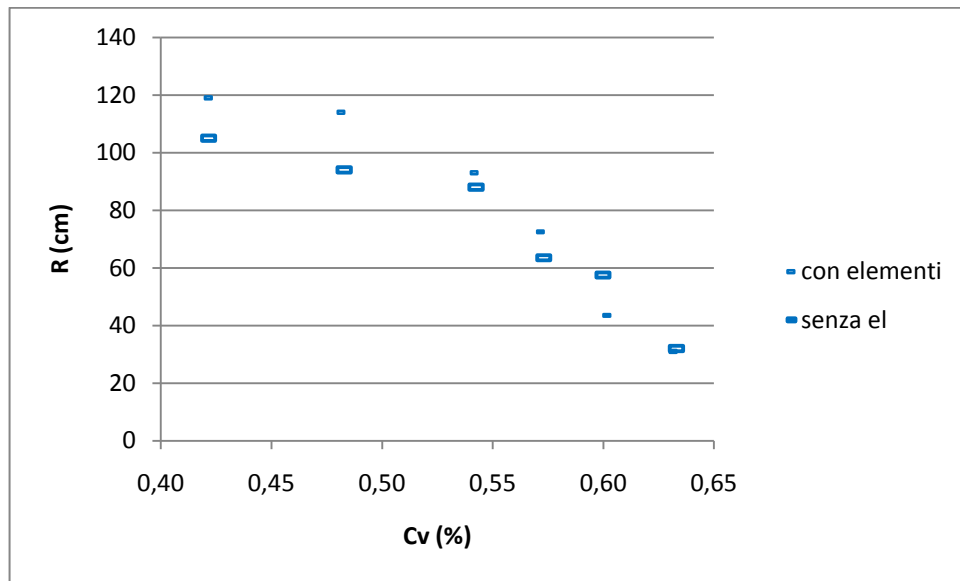


Figura 99: run out funzione della Cv

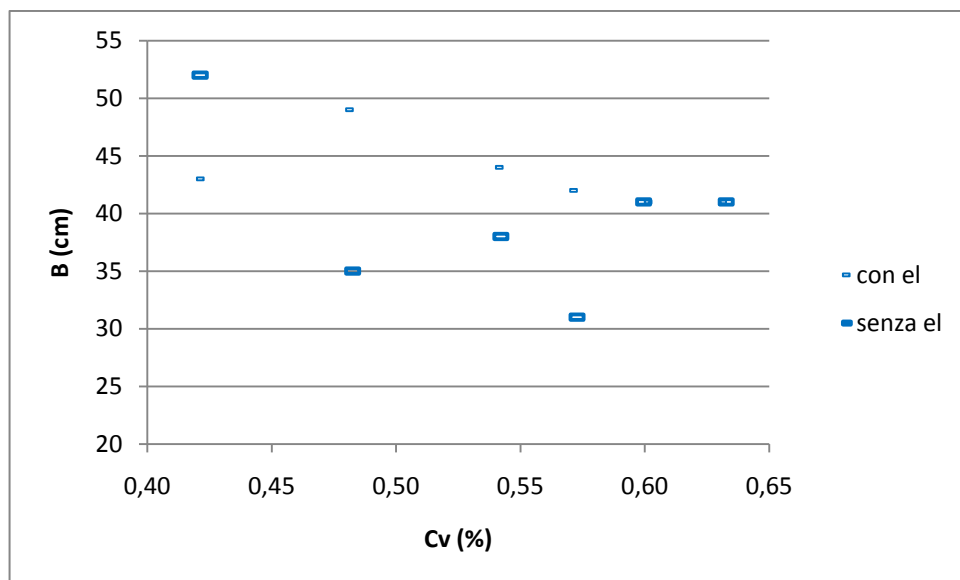


Figura 100: Larghezza del deposito funzione della Cv

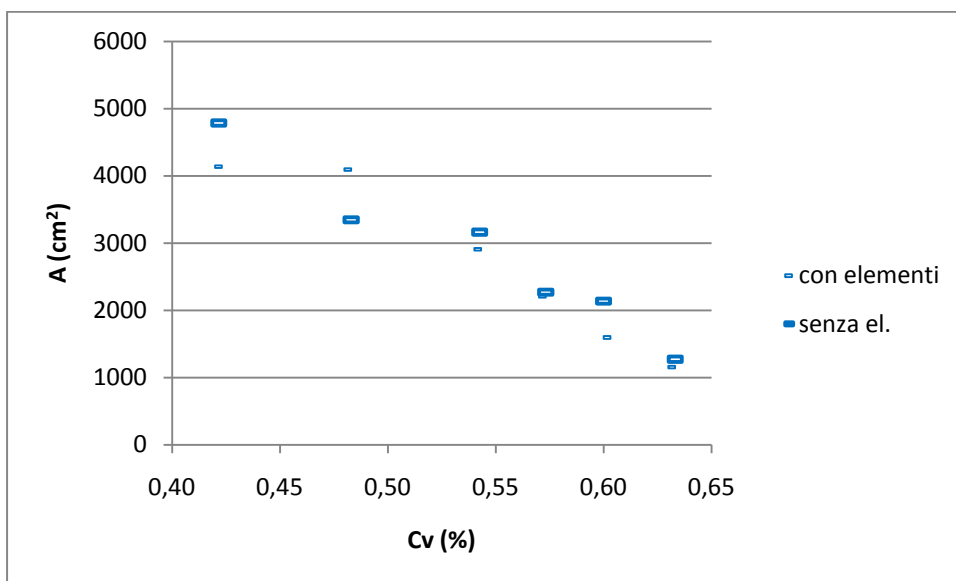


Figura 101: area del deposito funzione della Cv

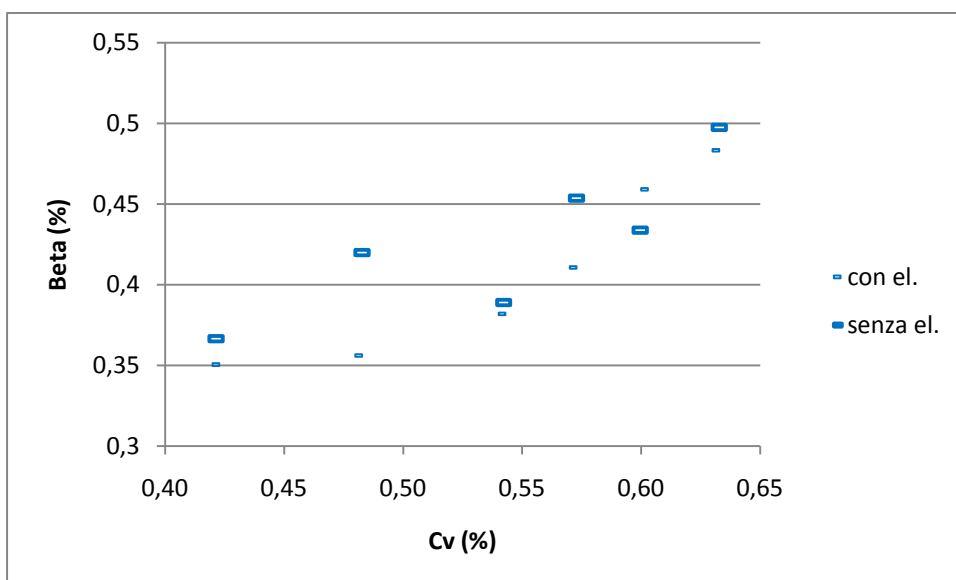


Figura 102: angolo beta funzione della Cv

#### 4.7 Sesta serie di prove

Visti i risultati delle prove precedentemente condotte, si è ritenuto opportuno proseguire l'attività di ricerca infittendo la presenza di elementi per studiare l'effetto di un bosco composto da piante con diametro minore ma densità maggiore.

Così è stato costruito un pettine composto da un piano sul quale sono stati avvitati 285 elementi di diametro 0,4 cm con spaziatura 5cm X 5cm (Figura 103), simulanti una fustaia di 5 m di distanza tra le piante e 40 cm di diametro in scala 1:100 o di 2,5 m di distanza tra le piante a 20 cm di diametro in scala 1:50. Come per la prova precedente, il volume riscalato sarebbe rispettivamente di 5000 e 625 m<sup>3</sup>.

Sono state condotte 18 prove, con 6 concentrazioni diverse. In Tabella 41 sono riportati i dati delle prove effettuate.



Figura 103: esempio di prova condotta con elementi 5X5 cm

Tabella 41: dati di riferimento usati per l'impostazione delle prove con elementi 5X5

prova	densità materiale	pendenza Canale	pendenza Piano	presenza elementi	quantità suolo	volume acqua	Cv iniziali	volume
	Mg/mc	°	°		kg	l	%	l
30giu_n1	2,71	25	0	el. 5X5	5,692	2,90	0,42	5,00
30giu_n2	2,71	25	0	el. 5X5	6,505	2,60	0,48	5,00
30giu_n3	2,71	25	0	el. 5X5	7,317	2,30	0,54	5,00
30giu_n4	2,71	25	0	el. 5X5	7,725	2,15	0,57	5,00
30giu_n5	2,71	25	0	el. 5X5	8,131	2,00	0,60	5,00
30giu_n6	2,71	25	0	el. 5X5	8,538	1,85	0,63	5,00
07luglio_n1	2,71	25	5	el. 5X5	5,691	2,90	0,42	5,00
07luglio_n2	2,71	25	5	el. 5X5	6,504	2,60	0,48	5,00
07luglio_n3	2,71	25	5	el. 5X5	7,318	2,30	0,54	5,00
07luglio_n4	2,71	25	5	el. 5X5	7,724	2,15	0,57	5,00
07luglio_n5	2,71	25	5	el. 5X5	8,131	2,00	0,60	5,00
07luglio_n6	2,71	25	5	el. 5X5	8,537	1,85	0,63	5,00
24ago_n2	2,71	25	7,3	el. 5X5	5,691	2,90	0,42	5,00
28luglio_n2	2,71	25	7,3	el. 5X5	6,504	2,60	0,48	5,00
28luglio_n3	2,71	25	7,3	el. 5X5	7,318	2,30	0,54	5,00
28luglio_n4	2,71	25	7,3	el. 5X5	7,725	2,15	0,57	5,00
28luglio_n5	2,71	25	7,3	el. 5X5	8,130	2,00	0,60	5,00
28luglio_n6	2,71	25	7,3	el. 5X5	8,537	1,85	0,63	5,00

#### 4.7.1 Prove con piano di deposizione a pendenza variabile con elementi

Di seguito sono presentati i risultati delle prove eseguite con elementi alle tre diverse pendenze del piano di deposizione.

I risultati ottenuti mostrano come anche in questo caso la pendenza del piano di deposito non sembra essere un fattore determinante nel differenziare le serie di prove condotte.

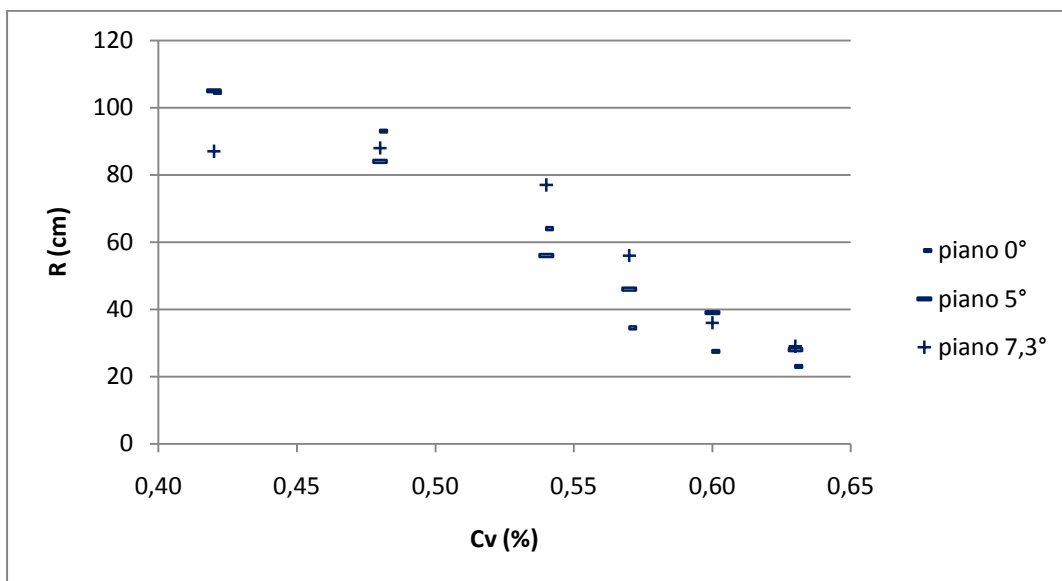


Figura 104: run out funzione di Cv

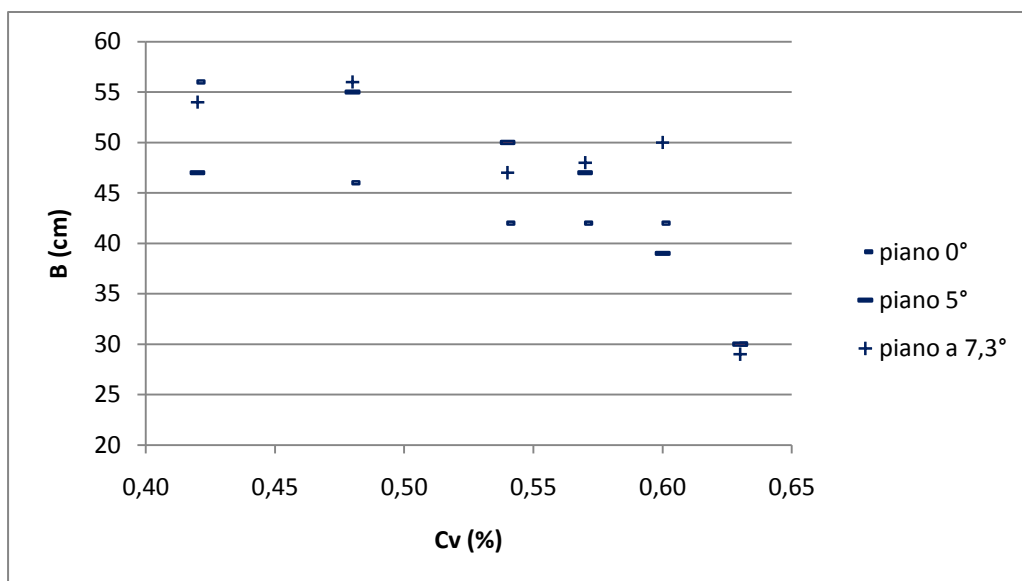


Figura 105: larghezza del deposito funzione della Cv



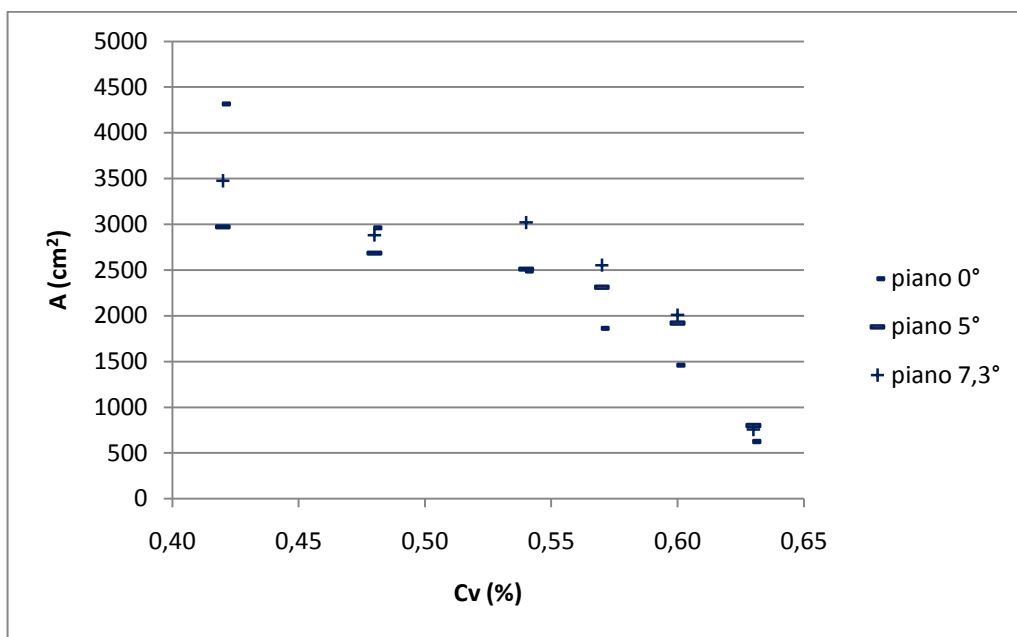


Figura 106: area del deposito funzione di  $C_v$

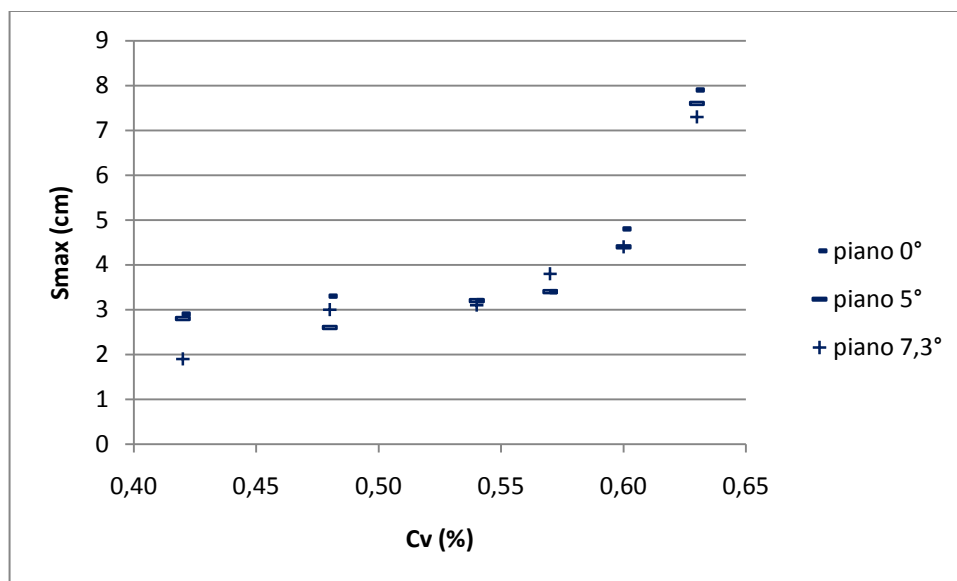


Figura 107: spessore del deposito funzione di  $C_v$

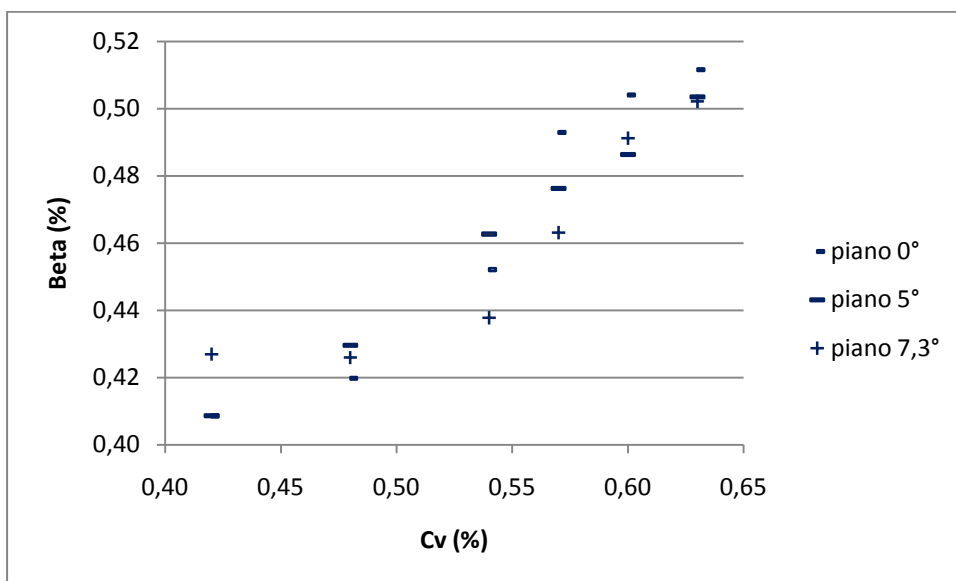


Figura 108: angolo beta funzione di Cv

#### 4.7.2 Confronto tra prove eseguite con e senza elementi

Sono presentati in questo paragrafo i confronti fra tutte le prove eseguite con elementi 5X5 e tutte quelle eseguite senza elementi.

Già dall'analisi visiva si intuisce la differenza che esiste fra valori delle prove con elementi e delle prove senza elementi.

In particolare, sembra che gli elementi riducano il run out e l'area del deposito, ed aumentino lo spessore del deposito e il valore dell'angolo beta.

La distinzione fra le due serie di dati è abbastanza netta, con pochi valori che si sovrappongono.

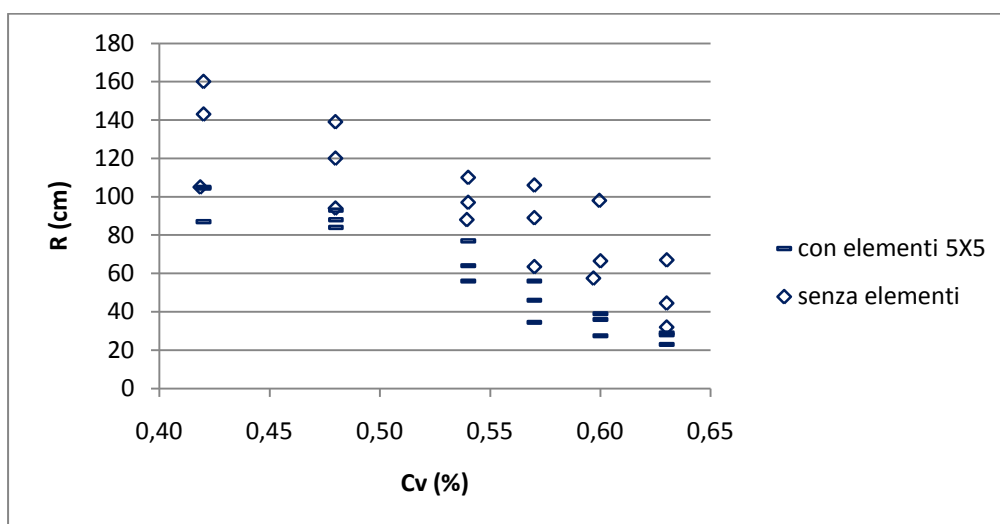


Figura 109: run out funzione di Cv

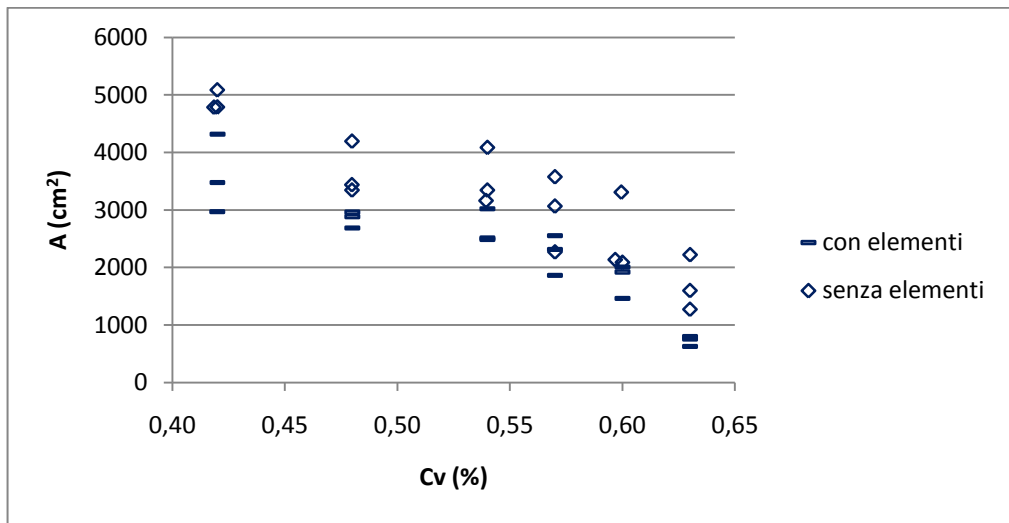


Figura 110: area funzione di  $C_v$

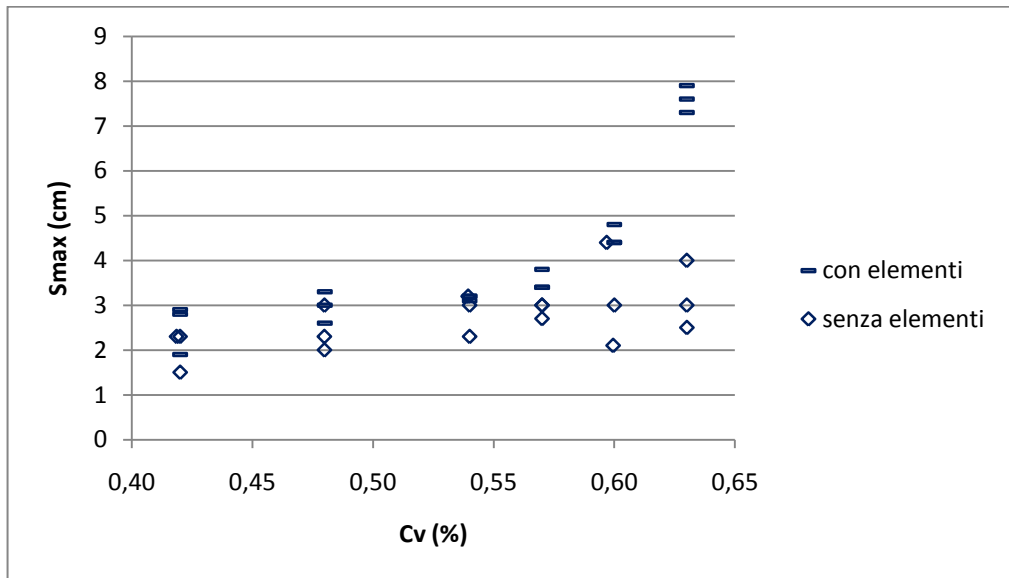


Figura 111: spessore del deposito funzione di  $C_v$

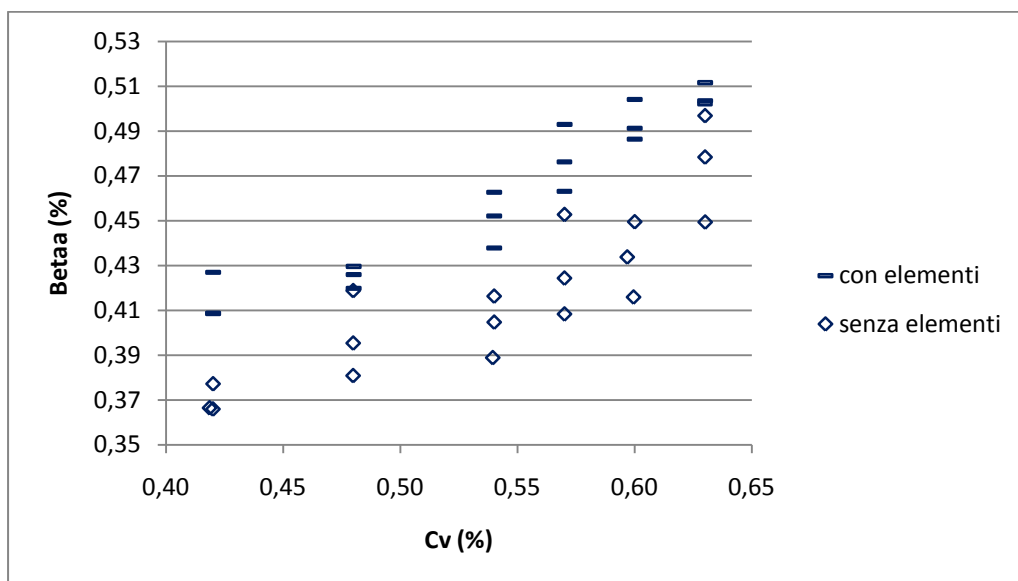


Figura 112: angolo beta funzione di Cv

## 5 Discussione dei risultati

Nel presente capitolo vengono discussi i risultati ottenuti dalle prove effettuate con e senza elementi che simulano la presenza del bosco sul piano di deposito, secondo le due configurazioni adottate e il coefficiente volumetrico. In particolare, vengono analizzati gli effetti sui parametri caratteristici del deposito Run Out

### 5.1 Parametri del deposito in relazione alla concentrazione volumetrica

#### Run out

In Tabella 42 vengono riassunti i risultati dalla regressione lineare effettuata sui valori di run out in funzione della concentrazione volumetrica suddivisi in base alla configurazione della prova.

Risulta innanzitutto evidente che al crescere della concentrazione, e quindi al diminuire della quota di acqua presente nella miscela, il run out si riduce seguendo un andamento di tipo lineare con una regressione statisticamente molto significativa come testimoniano i valori ridotti di p-value e quelli elevati del coefficiente di determinazione.

**Tabella 42: coefficienti delle rette di regressione, con relativi risultati del test F e coefficienti di determinazione, ottenute dai dati di Run Out in funzione della concentrazione volumetrica.**

configurazione		regressione (run out)					
pendenza piano	elementi	a	b	F	p	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj
0°	senza elementi	249,76	-327,25	30,92	0,01	0,89	0,86
	elementi 10X10	317,64	-442,26	37,85	0,01	0,90	0,88
	elementi 5X5	293,64	-436,82	79,83	0,01	0,95	0,94
5°	senza elementi	334,52	-447,38	128,43	0,01	0,97	0,96
	elementi 10X10	332,63	-454,58	116,27	0,01	0,97	0,96
	elementi 5X5	260,87	-372,58	560,51	0,01	0,99	0,99
7,3°	senza elementi	333,08	-407,60	101,80	0,01	0,96	0,95
	elementi 10X10	382,40	-514,33	194,71	0,01	0,98	0,97

	elementi 5X5	225,79	-303,00	21,68	0,01	0,84	0,81
--	--------------	--------	---------	-------	------	------	------

### Area

In Tabella 43 sono presentati i valori risultanti dalle regressioni effettuate sui valori di Area del deposito sul piano in funzione della concentrazione volumetrica, suddivisi in base alla configurazione. Il rapporto è anche in questo caso inversamente proporzionale, secondo una relazione lineare la cui regressione è nei due terzi dei casi molto significativa, e nel rimanente terzo significativa. Anche il coefficiente di determinazione è in genere molto elevato.

### Angolo $\beta$

In Tabella 44 sono presentati i valori risultanti dalle regressioni effettuate sui valori di angolo  $\beta$ , calcolato per ogni prova, in funzione della concentrazione volumetrica, suddivisi in base alla configurazione. Il rapporto è direttamente proporzionale secondo una regressione lineare che nella maggior parte dei casi è statisticamente molto significativa. Anche il coefficiente di determinazione è in genere molto elevato.

**Tabella 43: risultati della regressione lineare effettuata tra Area e Concentrazione volumetrica, con valori del test F e del coefficiente di determinazione.**

configurazione		regressione (Area)					
pendenza piano	elementi	a	b	F	p	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj
0°	senza elementi	11021,54	-15197,81	80,95	0,01	0,95	0,94
	elementi 10X10	11075,02	-15540,96	60,75	0,01	0,94	0,92
	elementi 5X5	11034,64	-16201,29	158,63	0,01	0,98	0,97
5°	senza elementi	11358,53	-15170,55	92,64	0,01	0,96	0,95
	elementi 10X10	15271,04	-22334,44	317,20	0,01	0,99	0,98
	elementi 5X5	6807,23	-8530,84	11,89	0,05	0,75	0,69
7,3°	senza elementi	9120,70	-10204,90	10,06	0,05	0,72	0,65
	elementi 10X10	11425,42	-15096,64	49,87	0,01	0,93	0,91
	elementi 5X5	8184,30	-10619,80	11,60	0,05	0,74	0,68

**Tabella 44: risultati delle regressioni effettuate sui valori di angolo Beta in funzione della concentrazione volumetrica, con i risultati dei test F effettuati e coefficienti di determinazione relativi.**

configurazione		regressione (angolo Beta)					
pendenza piano	elementi	a	b	F	p	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj
0°	senza elementi	0,1564	0,5005	9,86	0,05	0,71	0,64
	elementi 10X10	0,0554	0,6508	26,25	0,01	0,87	0,84
	elementi 5X5	0,1673	0,5511	63,80	0,01	0,94	0,93
5°	senza elementi	0,1810	0,4498	51,07	0,01	0,93	0,91
	elementi 10X10	0,1408	0,5156	64,74	0,01	0,94	0,93
	elementi 5X5	0,2146	0,4566	772,21	0,01	0,99	0,99
7,3°	senza elementi	0,2120	0,3560	49,20	0,01	0,93	0,91
	elementi 10X10	0,1579	0,4736	65,84	0,01	0,94	0,93
	elementi 5X5	0,2500	0,3850	19,00	0,05	0,83	0,78

## 5.2 Confronti tra le diverse configurazioni

Al fine di confrontare tra loro i risultati derivanti dalle prove condotte nelle diverse configurazioni – senza elementi, con elementi a spaziatura 10x10 cm e con elementi a spaziatura 5x5 cm- è stata condotta un'analisi di covarianza.

I risultati delle analisi sono presentati nella Tabella 45, Tabella 46 e Tabella 47, suddivisi per pendenza del piano di deposito. L'ancova è stata condotta sulle tre serie confrontate nello stesso test (ANCOVA a tre), ed su ogni coppia di serie di dati (ANCOVA a due).

### Run out

In Tabella 45 sono presentati i risultati delle analisi condotte sulle tre serie di dati relative al run out considerati tutti e tre insieme e per coppie.

Considerando le tre serie, per le prove con pendenza del piano pari a 0° le medie campionarie risultano statisticamente non differenti ( $F < 1$ ); per le prove condotte con pendenza del piano pari a 5° e 7,3° le medie campionarie sono statisticamente diverse ( $F > 1$ ) con buona solidità del test ( $p\text{-value} = 0,01$ ).

Considerando le serie per coppie si nota che le serie di dati raccolti dalle prove con elementi 5X5 risultano statisticamente diversi dalle serie di dati raccolti dalle prove con elementi 10X10 e senza elementi: questo comportamento è poco visibile con piano di deposito a 0° mentre si accentua con piano di deposito a pendenza crescente. Risultano non significativi i test condotti fra serie di dati da prove condotte senza elementi e con elementi 10X10 che quindi non sembrano in grado di modificare il parametro di run out.

Si può invece dire che gli elementi 5X5 hanno un effetto statisticamente significativo sul run out.

**Tabella 45: risultati delle analisi di covarianza condotte sulle serie di dati di Run Out rispetto la concentrazione volumetrica: sulle tre serie (ANCOVA a 3) e per coppie (ANCOVA a 2).**

pendenza piano	ANCOVA a 3			ANCOVA a 2			
	F	F	p	condizioni	F	F	p
0°	0,65	6,18	0,05	senza&5X5	0,7	7,0	0,05
				senza e 10X10	0,1	0,7	test non significativo
				5X5&10X10	1,0	12,9	0,01
5°	1,69	46,97	0,01	senza&5X5	3,2	97,6	0,01
				senza e 10X10	0,1	2,2	test non significativo
				5X5&10X10	2,1	58,1	0,01
7,3°	4	39,75	0,01	senza&5X5	9,1	78,8	0,01
				senza e 10X10	0,2	3,4	test non significativo
				5X5&10X10	4,7	35,6	0,01

In Figura 113, Figura 114 e Figura 115 vengono presentati i grafici contenenti i risultati delle prove eseguite con pendenza del piano di deposizione variabile in ogni grafico (pari a 0°, 5° e 7,3°).

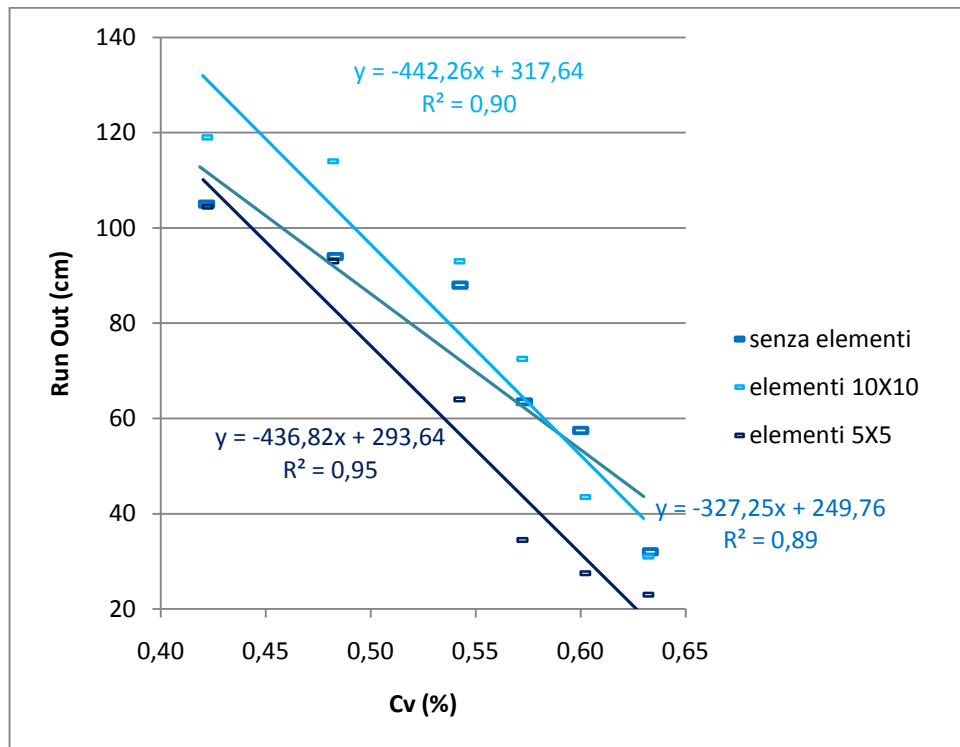


Figura 113: grafico delle serie di dati, relativi al Run Out, delle prove condotte con piano di deposizione con pendenza 0°

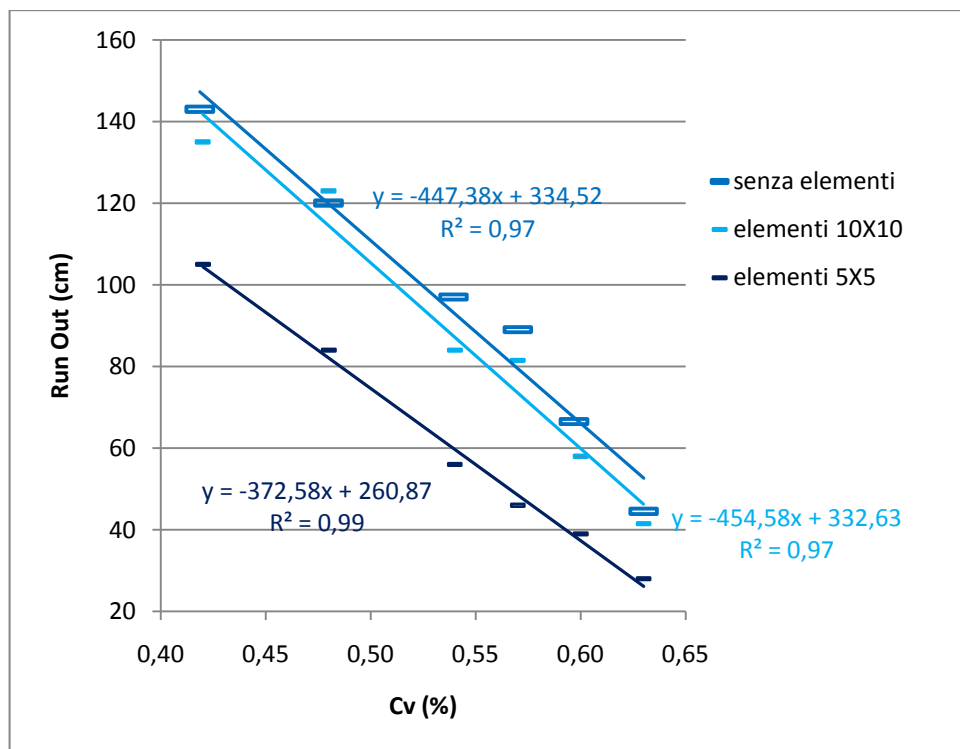


Figura 114: grafico delle serie di dati, relativi al Run Out, delle prove condotte con piano di deposizione con pendenza 5°

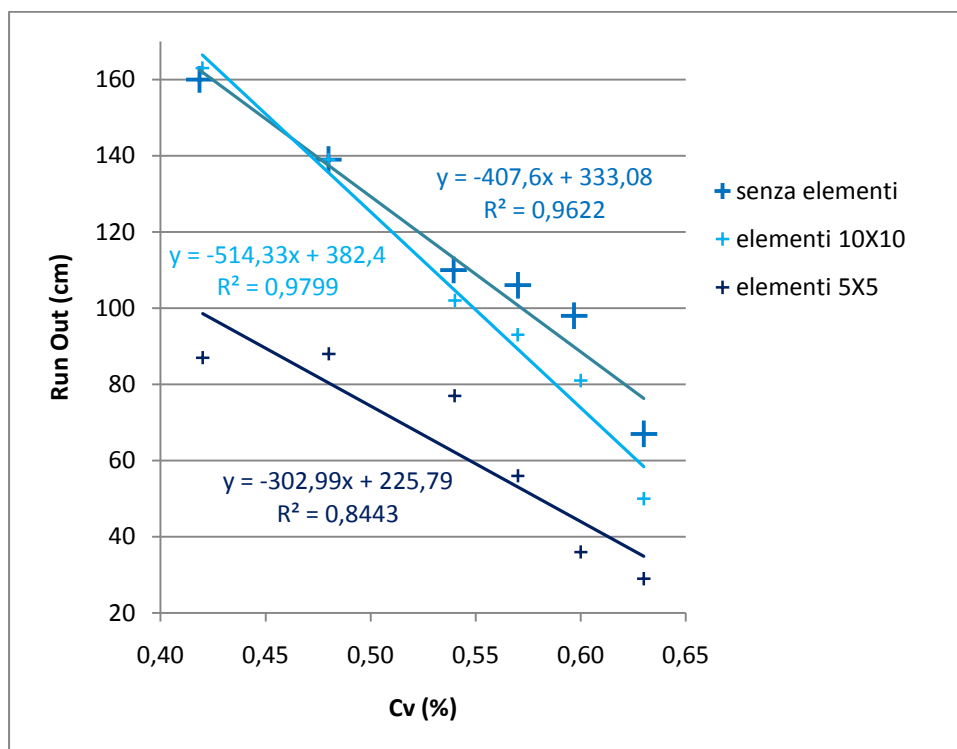


Figura 115: grafico delle serie di dati, relativi al Run Out, delle prove condotte con piano di deposizione con pendenza 7,3°

È possibile notare anche visivamente la differenza tra la serie di dati “elementi 5X5” dalle altre due, differenza che diventa più accentuata all’aumentare della pendenza del piano di deposizione.

### Area

La medesima procedura è stata applicata ai dati riguardanti l’Area. Osservando i risultati riportati in Tabella 46, è possibile notare che differenze statisticamente significative esistono solo per gli esperimenti condotti con piano di deposizione a 5° e 7,3°, mentre non c’è differenza con piano a 0°.

Per quanto riguarda le analisi condotte per coppie viene confermato quanto risulta dall’ancova condotta sulle tre serie, ovvero non c’è differenza statisticamente significativa fra aree dei depositi delle prove condotte con piano a 0° e configurazione diversa (con e senza elementi), mentre si osserva l’effetto bosco degli elementi con configurazione 5X5 quando si analizzano le prova su piano di deposizione inclinato.

La bontà dei test è nella metà dei casi molto buona (p-value = 0,01) mentre nell’altra metà dei casi rientra nel valore accettabile (p-value = 0,05). Quando si analizzano serie di dati relativi a prove senza elementi e con elementi 10X10 il test è risultato sempre non significativo (p-value non accettabile).

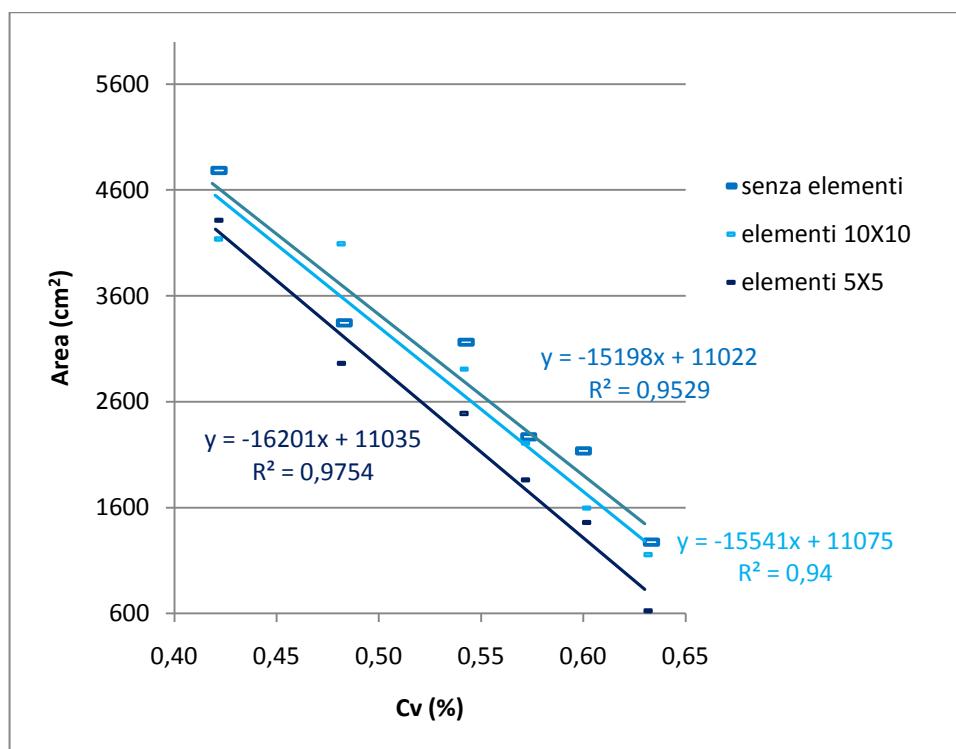
Tabella 46: risultati dell’analisi di covarianza (Ancova) condotta sulle serie di dati relative all’area in funzione della Concentrazione volumetrica: eseguita sulle tre serie (ANCOVA a 3) e sulle coppie (ANCOVA a 2).

pendenza piano	ANCOVA a 3			ANCOVA a 2			
	F	F	p	condizioni	F	F	p
0°	0,30	6,03	0,05	senza&5X5	0,6	13,3	0,01
				senza e 10X10	0,0	0,60	test non significativo
				5X5&10X10	0,3	6,10	0,05
5°	<b>1,15</b>	6,57	0,01	senza&5X5	<b>2,8</b>	14,7	0,01



				senza e 10X10	0,0	0,00	test non significativo
				5X5&10X10	<b>1,7</b>	7,10	0,05
7,3°	1,95	8,62	0,01	senza&5X5	4,5	14,80	0,01
				senza e 10X10	0,3	1,40	test non significativo
				5X5&10X10	1,7	8,90	0,05

In Figura 116, Figura 117 e Figura 118 vengono presentati i grafici contenenti i risultati delle prove eseguite con pendenza del piano di deposizione variabile in ogni grafico (pari a 0°, 5° e 7,3°) relativi all'Area.



**Figura 116:** grafico delle serie di dati, relativi all'Area, delle prove condotte con piano di deposizione con pendenza 0°

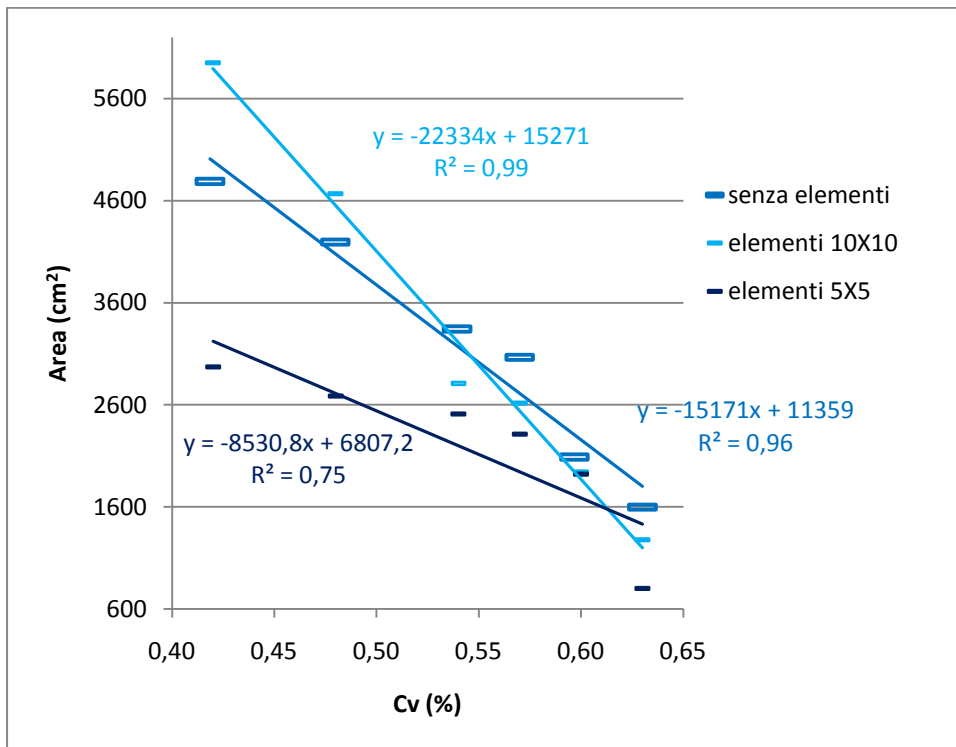


Figura 117: grafico delle serie di dati, relativi all'Area, delle prove condotte con piano di deposizione con pendenza 5°

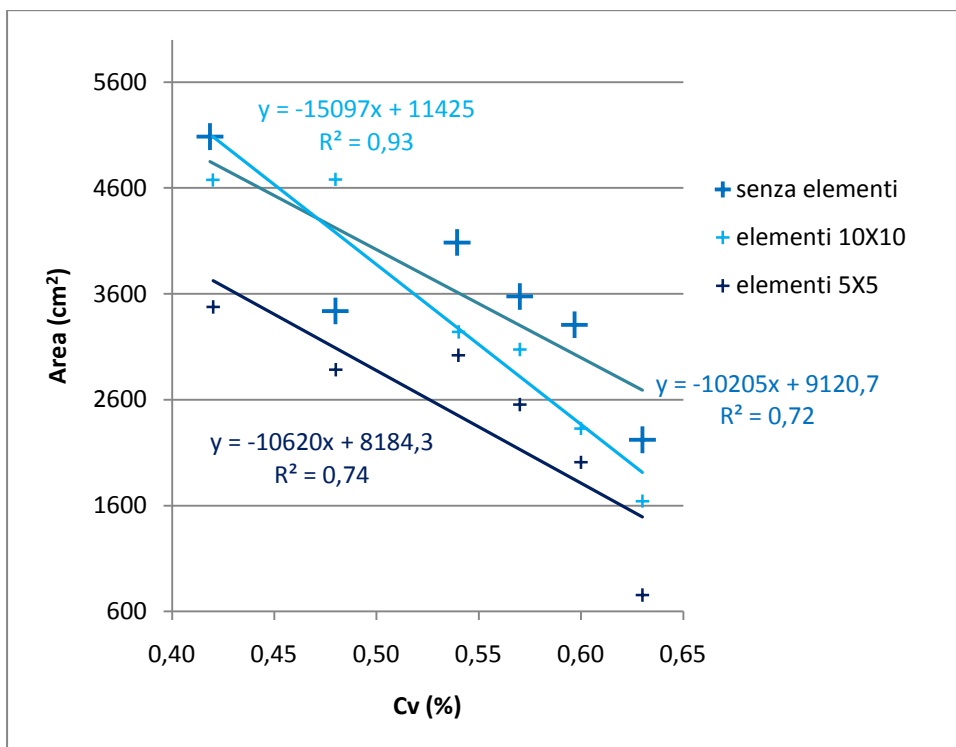


Figura 118: grafico delle serie di dati, relativi all'Area, delle prove condotte con piano di deposizione con pendenza 7,3°

Anche in questo caso si nota la differenza crescente fra la serie “elementi 5X5” e le altre serie presenti nei grafici 6 e 7; si nota anche la somiglianza, nel grafico 5, delle tre serie.

### **Angolo Beta**

Infine, i risultati delle prove sperimentali per l’angolo Beta sono riportati in Tabella 46. Considerando le tre serie di prove condotte nei tre casi di pendenza del piano, le medie campionarie risultano statisticamente diverse ( $F > 1$ ) con buona solidità del test ( $p\text{-value} = 0,01$ ). Considerando le serie per coppie si nota che i risultati derivanti dalle prove con elementi 5X5 risultano statisticamente diversi dalle serie di dati raccolti dalle prove con elementi 10X10 e senza elementi: tale differenza è più netta fra prove condotte con piano a pendenza maggiore. Risultano non significativi i test condotti fra serie di dati da prove condotte senza elementi e con elementi 10X10: ciò vuol dire che la presenza di elementi 10X10 ha lo stesso effetto dell’assenza degli elementi.

**Tabella 47: risultati delle analisi di covarianza (Ancova) eseguite sulle tre serie di dati (ANCOVA a 3) e sulle serie di dati considerate a coppie (ANCOVA a 2)**

pendenza piano	ANCOVA a 3			ANCOVA a 2			
	F	F	p	condizioni	F	F	p
0°	<b>2,20</b>	12,09	0,01	senza&5X5	<b>2,2</b>	10,5	0,05
				senza e 10X10	0,4	2,0	test non significativo
				5X5&10X10	<b>4,1</b>	33,4	0,01
5°	<b>2,21</b>	40,27	0,01	senza&5X5	<b>3,3</b>	72,2	0,01
				senza e 10X10	0,0	0,6	test non significativo
				5X5&10X10	<b>3,5</b>	80,6	0,01
7,3°	4,35	35,60	0,01	senza&5X5	8,9	60,0	0,01
				senza e 10X10	0,2	0,2	test non significativo
				5X5&10X10	4,6	35,3	0,01

In Figura 119, Figura 120, e Figura 121 vengono presentati i grafici contenenti i risultati delle prove eseguite con pendenza del piano di deposizione variabile in ogni grafico (pari a 0°, 5° e 7,3°) relativi all’angolo Beta.

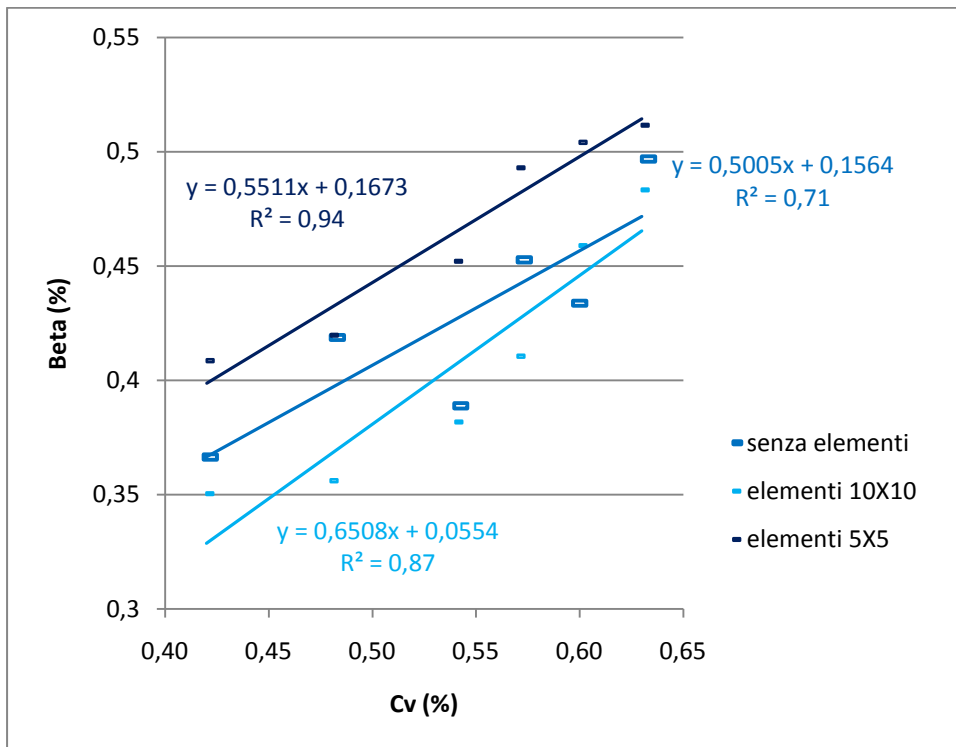


Figura 119: grafico delle serie di dati, relativi all'angolo Beta, delle prove condotte con piano di deposizione con pendenza 0°

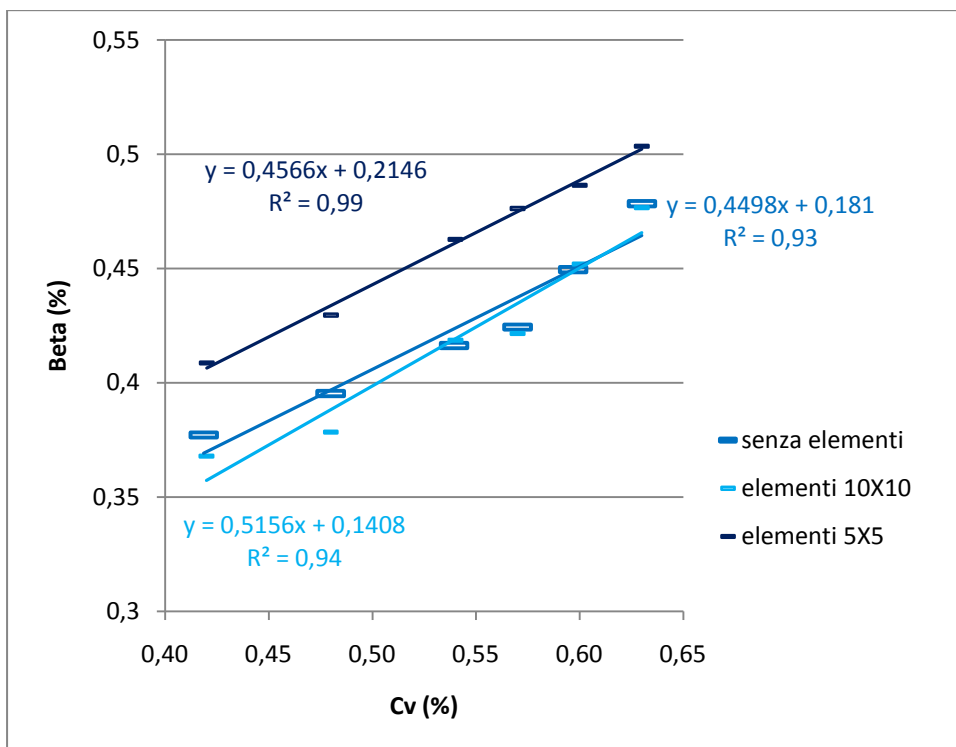
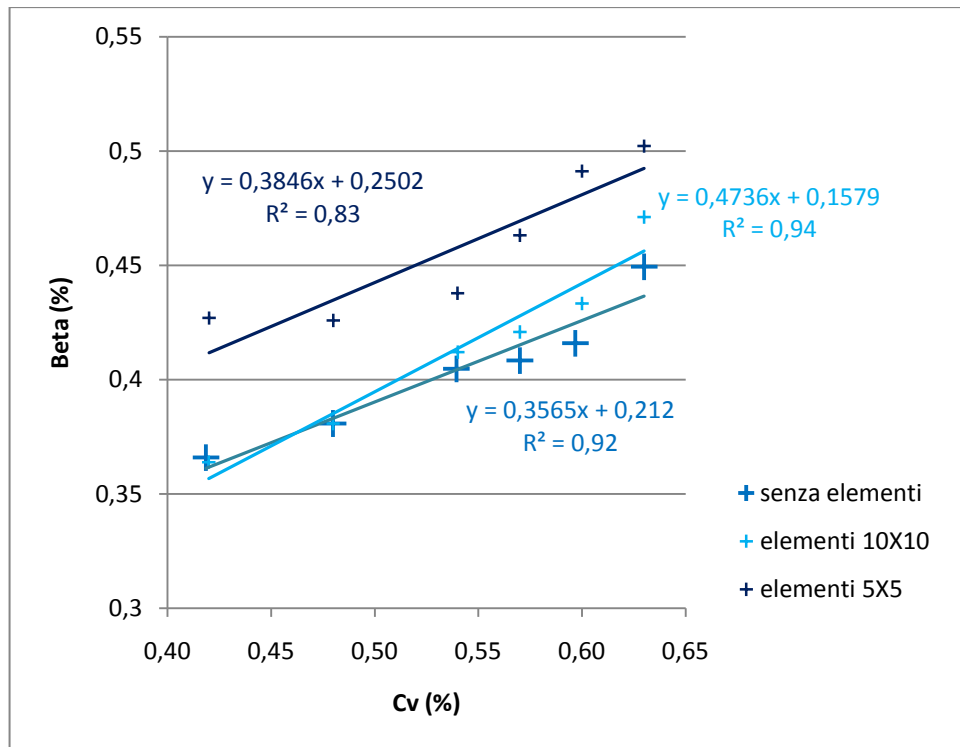


Figura 120: grafico delle serie di dati, relativi all'angolo Beta, delle prove condotte con piano di deposizione con pendenza 5°



**Figura 121: grafico delle serie di dati, relativi all'angolo Beta, delle prove condotte con piano di deposizione con pendenza 7,3°**

Nei grafici è facilmente individuabile la serie “elementi 5X5” che si distacca dalle altre due serie, conferma anche visiva che la serie è effettivamente diversa.

### 5.3 Confronto con le formulazioni empiriche

Diversi autori estrapolano dalle prove di laboratorio relazioni fra i parametri caratterizzanti il deposito con lo scopo di mettere a punto metodi di previsione del fenomeno per agevolare il lavoro dei pianificatori del territorio. Di seguito sono presentate alcune di queste formule confrontandole con i risultati ottenuti nel presente lavoro.

#### 5.3.1 Larghezza deposito - Run Out

Una prima formula è quella che mette in relazione la larghezza del deposito con la lunghezza dello stesso.

$$B_{max} = kR_{max}$$

Dove  $B_{max}$  è la larghezza massima del deposito,  $k$  è il fattore empirico, e  $R_{max}$  è il run out massimo ovvero la lunghezza del deposito dal cambio di pendenza al fronte.

Dalla regressione lineare condotta sui risultati delle prove condotte nel presente lavoro il risultato è sempre stato una retta di regressione con intercetta diversa da 0 (l'intercetta è risultata sempre significativa al test T) contrariamente a quanto proposto da Cesca (2008). Come si può notare in Tabella 48 il valore del coefficiente angolare risulta in genere molto minore rispetto il coefficiente individuato dall'autore.

In genere, il coefficiente di determinazione risulta molto basso anche se il p-value rivela che la regressione è molto significativa; le osservazioni relative alle prove con elementi danno valori di  $R^2$  accettabili, ma la significatività è molto bassa. Quindi, suddividendo le prove in base alla configurazione impostata durante le prove, nei casi esaminati non ci sono evidenze nette che indichino l'esistenza di una relazione generalizzabile fra larghezza del deposito e lunghezza.

Valori di non significatività risultano anche dall'applicazione della regressione ai dati di Larghezza e lunghezza suddivisi in base alla concentrazione volumetrica.

In conclusione, per le esperienze condotte durante questo studio, la larghezza non è un termine direttamente collegabile al run out.

**Tabella 48: risultati della regressione condotta fra larghezza del deposito e run out**

		n° prove	b	a	R <sup>2</sup>	p-value	SSQ	
Cesca (2008)		8	0,55	-	0,48	-	0,171	
tutte le prove		107	0,19	0,31	0,27	0,01	<b>1,252</b>	
senza elementi 5X5	tutte	89	0,20	0,29	0,26	0,01	1,174	
	pendenza canale 40° gradi	tutte	28	0,42	0,16	0,47	0,01	0,541
		tutte	52	0,13	0,32	0,27	0,01	0,316
	pendenza canale 25° gradi	piano a 0°	27	0,17	0,32	0,31	0,01	0,196
		piano a 5°	12	0,14	0,28	0,55	0,01	0,022
		piano a 7,3°	13	0,20	0,21	0,70	0,01	0,026
	con elementi 5X5	tutte	18	0,22	0,32	0,54	0,01	0,058
pendenza canale 25° gradi		piano a 0°	6	0,20	0,32	0,69	0,05	0,011
		piano a 5°	6	0,21	0,32	0,47	NON SIGNIFICATIVO	0,021
		piano a 7,3°	6	0,28	0,30	0,55	0,1	0,021
campione Balisio		9	-0,02	0,45	0,01	NON SIGNIFICATIVO	0,005	

### 5.3.2 Run Out funzione del baricentro e della concentrazione volumetrica

Una seconda formula empirica è quella riportata di seguito che calcola il run out in funzione del baricentro e della concentrazione volumetrica:

$$R_{max} = 0,46h_G C_V^{-2}$$

Dove  $R_{\max}$  è il run out del fronte di colata,  $h_G$  è l'altezza del baricentro del materiale che sta per essere rilasciato durante le prove rispetto alla quota del piano di deposizione,  $C_V$  è la concentrazione volumetrica.

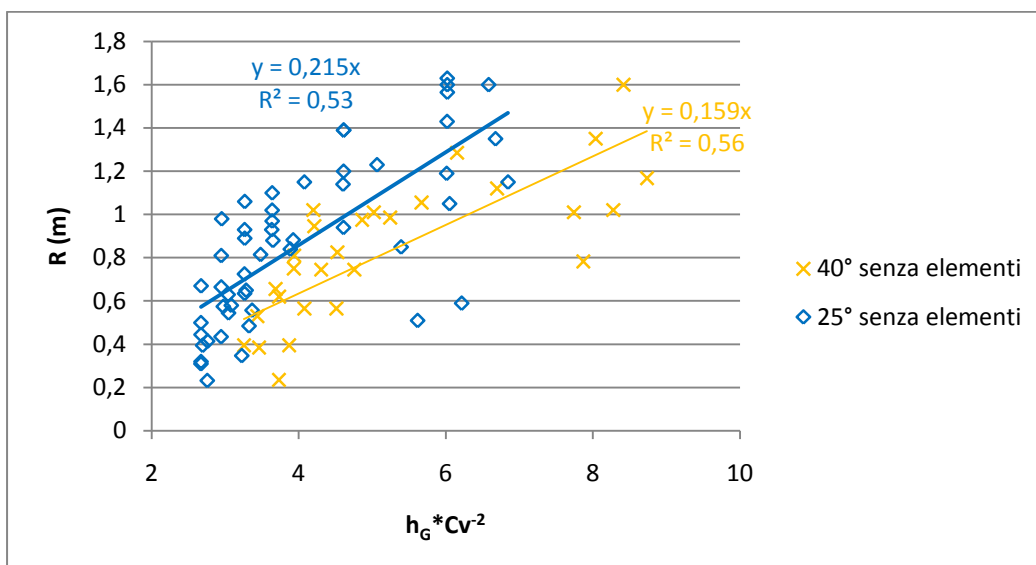
In Tabella 49 sono riportati i valori di  $k$  calcolati per le prove eseguite nel presente lavoro: le regressioni eseguite sui dati suddivisi in base alla configurazione adottata durante la prova sono risultate quasi sempre significative nella forma con intercetta pari a zero. Il coefficiente di determinazione è scarso per tutti i gruppi di dati che considerano tante prove eseguite in condizioni diverse; quando il numero di prove considerate si limita a quelle condotte nelle medesime condizioni o in condizioni simili (numerosità < 25) lo stesso coefficiente diventa significativo. Il p-value è molto buono in tutte le analisi condotte, deducendo che la regressione è decisamente significativa.

Rispetto il coefficiente angolare individuato da Cesca (2008), i valori risultanti dalla regressione sono minori, con valore massimo pari a 0,28 nelle prove con piano di deposizione alla massima pendenza e senza elementi. Non è significativo considerare i valori dei coefficienti della retta di regressione ottenuta da tutte le prove condotte senza elementi, poiché sono incluse prove con canale a pendenze diverse e perché l'intercetta è risultata statisticamente significativa.

**Tabella 49: valori del coefficiente  $k$  relativo alla formula di stima del Run Out, in funzione della configurazione del reometro.**

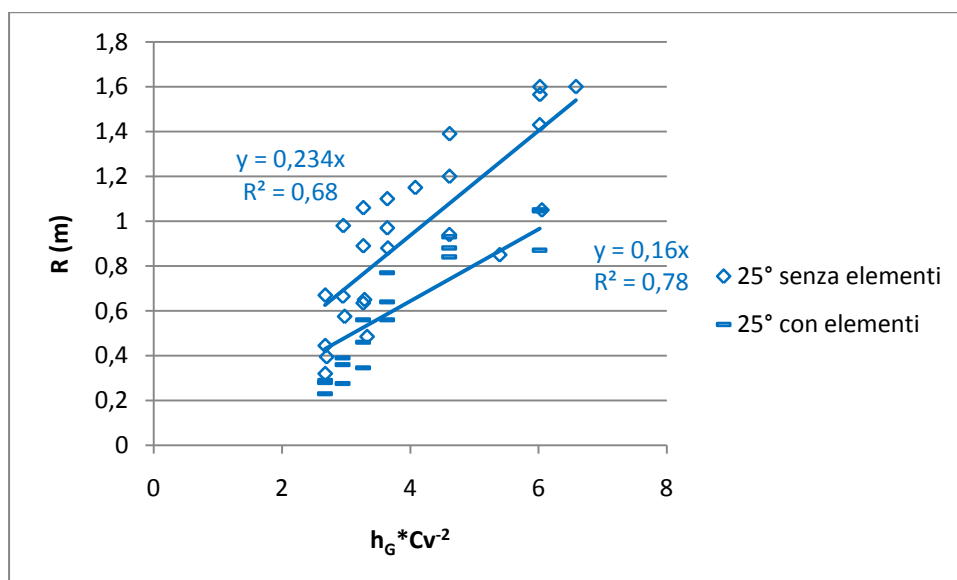
configurazione delle prove			numerosità	b	a	$R^2$	p-value	ssq
Cesca 2008			8	0,46	-	0,644	-	1,470
tutte le prove			107	0,18	-	0,478	0,01	6,634
prove senza elementi			89	0,15	0,17	0,438	0,01	5,893
prove con pendenza canale 40° senza el.			28	0,16	-	0,557	0,01	1,227
prove con pendenza canale 25° senza el.			52	0,21	-	0,532	0,01	3,366
prove con pendenza canale 25°	senza elementi	tutte le prove	25	0,23	-	0,679	0,01	1,116
		piano 0°	12	0,20	-	0,729	0,01	0,393
		piano 5°	6	0,24	-	0,892	0,01	0,068
		piano 7,3°	7	0,28	-	0,871	0,01	0,089
	con elementi	tutte le prove	18	0,16	-	0,780	0,01	0,304
		piano 0°	6	0,16	-	0,745	0,01	0,156
		piano 5°	6	0,16	-	0,881	0,01	0,051
		piano 7,3°	6	0,16	-	0,710	0,01	0,097

Confrontando le serie di prove condotte con canale a 40° e con canale a 25°, entrambe senza elementi, si nota che il coefficiente angolare è minore per le prove condotte a pendenza 40°; ciò è dovuto all'elevata influenza esercitata dal valore della variabile indipendente rappresentata dal dislivello percorso dalla colata, quindi dalla pendenza del canale (vedi Figura 122).



**Figura 122: rappresentazione grafica del Run Out in funzione del baricentro del materiale in vasca di carico e della concentrazione volumetrica: confronto fra prove condotte con pendenza del canale 40° e 25°, senza elementi 5X5.**

Considerando le tre serie di prove condotte con pendenza del canale e pendenza del piano uguale, e considerando i dati delle tre serie insieme, suddivise per presenza o meno degli elementi (vedi Figura 123), si nota una costante superiorità del coefficiente angolare delle rette di regressione ottenute dai dati delle prove senza elementi, potendo dedurre quindi che è significativo l'effetto degli elementi 5X5 presenti sul piano di deposito.



**Figura 123: rappresentazione grafica del Run Out in funzione del baricentro del materiale in vasca di carico e della concentrazione volumetrica: confronto fra prove condotte con pendenza del canale 25° con e senza elementi 5X5.**

Suddividendo le prove (eseguite con pendenza del canale 25°) in base alla pendenza del piano di deposizione si nota che al crescere della pendenza del piano cresce anche la distanza fra le rette che rappresentano una la serie con elementi e l'altra la serie senza elementi (vedi Figura 124, Figura 125 e Figura 126).



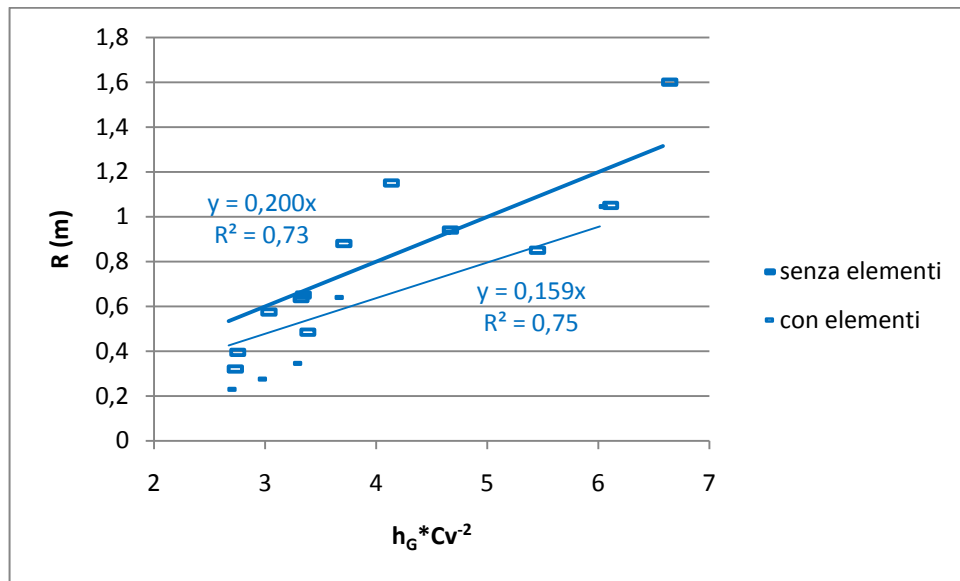


Figura 124: rappresentazione grafica del Run Out in funzione del baricentro del materiale in vasca di carico e della concentrazione volumetrica: confronto fra prove condotte con pendenza del canale 25° e pendenza del piano di deposizione 0°, con e senza elementi.

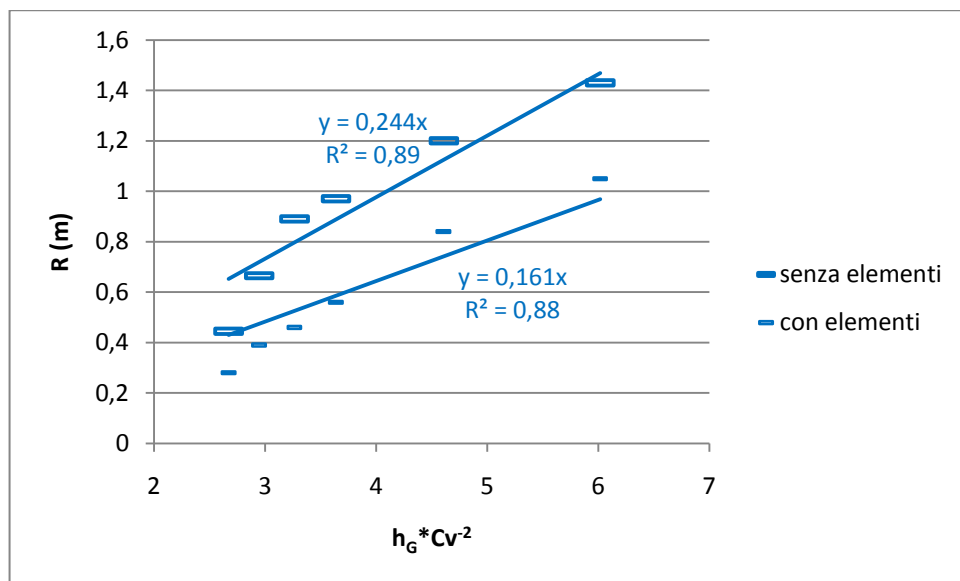
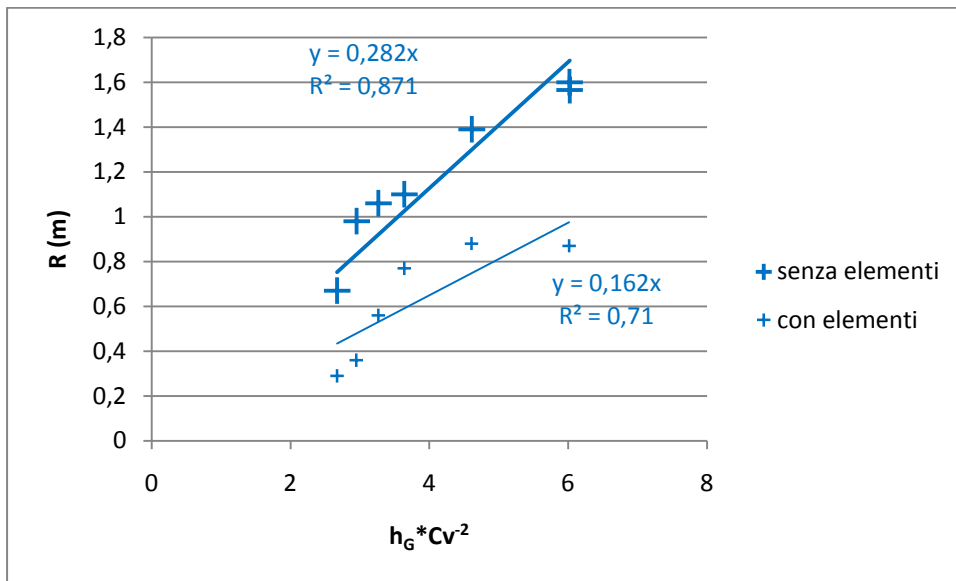


Figura 125: rappresentazione grafica del Run Out in funzione del baricentro del materiale in vasca di carico e della concentrazione volumetrica: confronto fra prove condotte con pendenza del canale 25° e pendenza del piano di deposizione 5°, con e senza elementi.



**Figura 126: rappresentazione grafica del Run Out in funzione del baricentro del materiale in vasca di carico e della concentrazione volumetrica: confronto fra prove condotte con pendenza del canale 25° e pendenza del piano di deposizione 7,3°, con e senza elementi**

Suddividendo le prove in base alla concentrazione volumetrica si ottengono valori che non identificano un trend tale da desumere informazioni sul comportamento della relazione. Ciò è dovuto alla difformità fra le prove afferenti allo stesso gruppo. Quindi i due fattori che principalmente incidono sul risultato di questa seconda formula empirica sono in primis il dislivello percorso dalla colata, e poi la presenza degli elementi; la pendenza del piano di deposizione amplifica l'effetto degli elementi; la Cv incide ovviamente sulla distribuzione dei dati risultanti dalle prove ma ha un effetto minore rispetto i due parametri principali.

### 5.3.3 Run out funzione dell'energia cinetica e della concentrazione volumetrica

La seguente formula serve a stimare il run out in funzione dell'energia cinetica posseduta dalla colata al termine del suo percorso in canaletta ed in funzione della concentrazione volumetrica:

$$R = 1,04 \frac{u^2}{2g} C_V^{-2}$$

Dove R è il run out (m), u è la velocità della colata nell'ultimo tratto di canale (ultimi 45 cm nella tesi di Cesca, velocità espressa in m/s), g è l'accelerazione di gravità (9,81 m/s<sup>2</sup>), C<sub>V</sub> è la concentrazione volumetrica (%).

In Tabella 50 sono riportati i valori risultanti dalle regressioni eseguite sui risultati delle prove eseguite nel presente lavoro: come si può ben notare tutte le serie analizzate presentano rette di regressione con intercetta, perché in tutti i casi quest'ultima risultava statisticamente diversa da zero.

Osservando il grafico in Figura 127 si può notare la parziale sovrapposizione delle due rette relative alle serie di prove condotte con canale a pendenza 40° e 25°, entrambe senza elementi.

Mettendo a confronto le prove condotte alla medesima pendenza della canaletta, in assenza di elementi (Figura 128) suddivise in base alla pendenza del piano di deposizione, e in presenza di elementi (Figura 129), si osserva che le rette di regressione sono molto vicine. È stato quindi condotto un test per verificare che le serie siano effettivamente diverse. Dai test emerge che (Tabella 51) considerando tutte le prove suddivise solo in base alla pendenza del canale, esse risultano

statisticamente uguali ( $F < 1$ ) con buonissimo p-value ( $< 0,01$ ); così come le serie di risultati delle prove condotte con canale a  $25^\circ$ , e con elementi disposti sul piano, risultano statisticamente uguali ( $F < 1$ ), con buonissimo p-value ( $< 0,01$ ) (Tabella 51).

Le tre serie di prove condotte senza elementi risultano statisticamente diverse ( $F > 1$ ) con p-value sufficiente ( $p < 0,05$ ). Dal relativo grafico si nota la somiglianza delle rette relative a prove con piano a  $5^\circ$  e  $7,3^\circ$ , quindi sono state confrontate la serie di dati relativa a prove con piano a  $0^\circ$ , con le altre due serie. Confrontando le prove con piano a  $0^\circ$  e piano a  $5^\circ$  il risultato non è significativo ( $p < 0,1$ ), mentre confrontando le prove condotte con piano a  $0^\circ$  e  $7,3^\circ$  le serie risultano diverse ( $F > 1$ ) con sufficiente p-value.

**Tabella 50: Valori risultanti dalle analisi di regressione eseguite sui dati delle prove condotte.**

configurazione delle prove			numerosità	b	a	$R^2$	p-value	ssq
Cesca 2008			8	1,04	-	0,848	-	0,628
tutte le prove			107	0,21	0,50	0,516	0,01	6,153
prove senza elementi			89	0,20	0,54	0,487	0,01	5,382
prove con pendenza canale $40^\circ$ senza el.			28	0,15	0,58	0,434	0,01	1,568
prove con pendenza canale $25^\circ$ senza el.			52	0,26	0,52	0,605	0,01	2,843
prove con pendenza canale $25^\circ$	senza elementi	tutte le prove	25	0,25	0,60	0,638	0,01	1,260
		piano $0^\circ$	12	0,37	0,38	0,762	0,01	0,345
		piano $5^\circ$	6	0,20	0,62	0,775	0,05	0,142
		piano $7,3^\circ$	7	0,20	0,88	0,683	0,05	0,218
	con elementi	tutte le prove	18	0,26	0,30	0,803	0,01	0,272
		piano $0^\circ$	6	0,32	0,22	0,874	0,01	0,077
		piano $5^\circ$	6	0,28	0,23	0,992	0,01	0,003
		piano $7,3^\circ$	6	0,20	0,42	0,637	0,1	0,121
Balisio			9	0,09	0,51	0,737	0,01	0,014

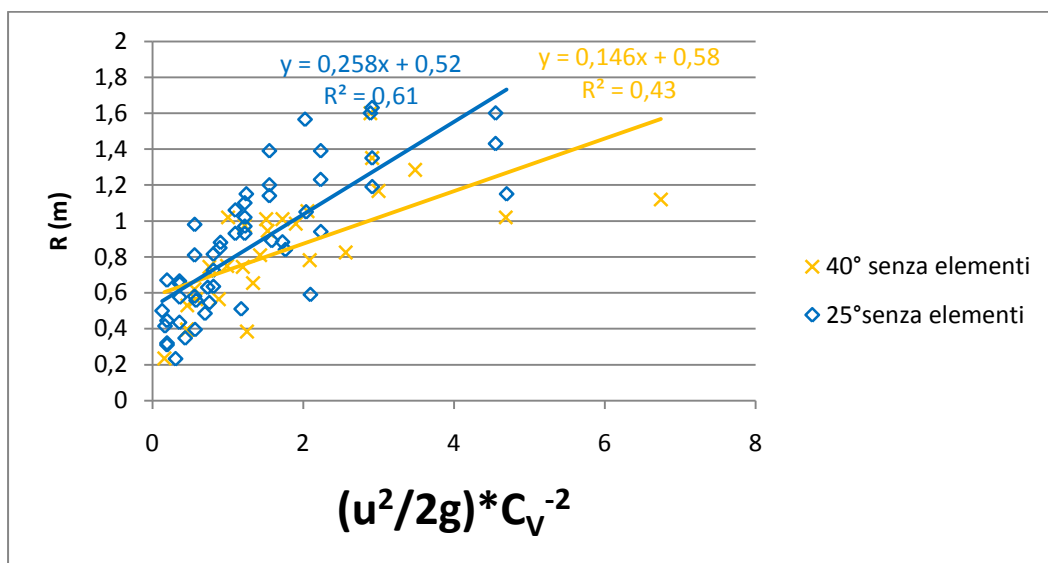


Figura 127: Relazione fra Run Out ed energia cinetica per Concentrazione volumetrica: risultati relativi alle prove condotte con canale a 40° e a 25°, senza elementi.

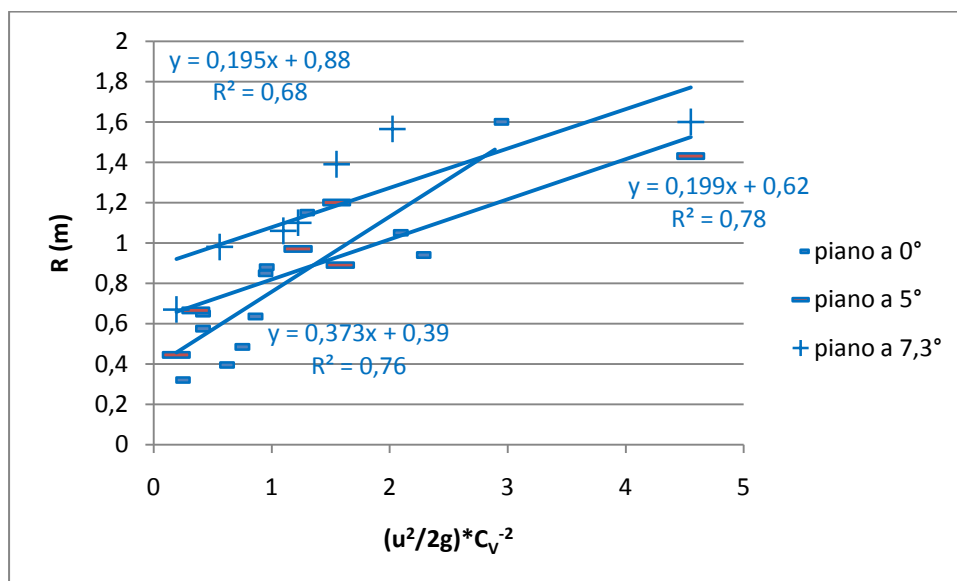


Figura 128: Relazione fra Run Out ed energia cinetica per Concentrazione volumetrica: risultati relativi alle prove condotte con canale a 25°, senza elementi, e con pendenza del piano di deposizione pari a 0°, 5°, e 7,3°.

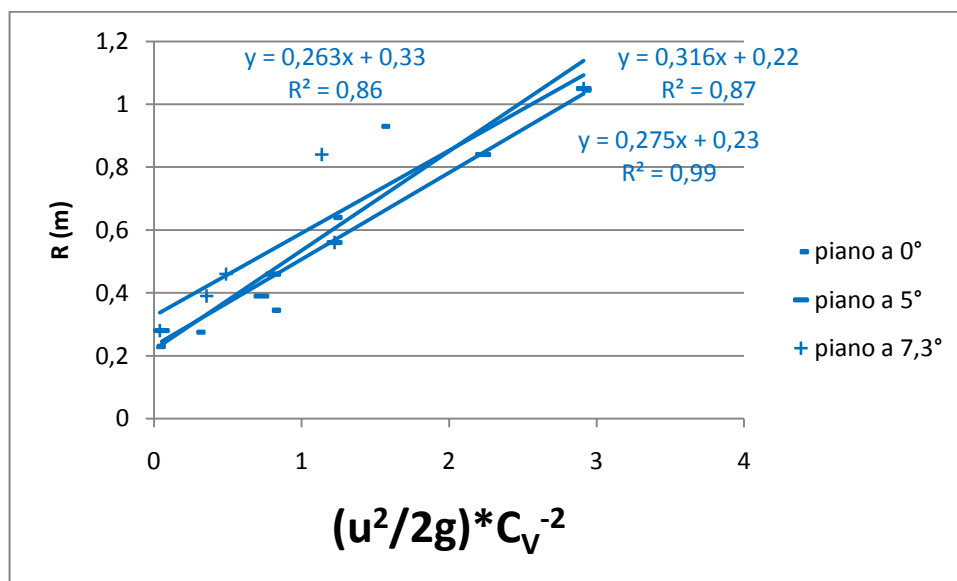


Figura 129: Relazione fra Run Out ed energia cinetica per Concentrazione volumetrica: risultati relativi alle prove condotte con canale a 25°, con elementi, e con pendenza del piano di deposizione pari a 0°, 5°, e 7,3°.

Tabella 51: risultati dei confronti fra serie, condotte per verificare che siano statisticamente diverse

	pendenza canale	pendenza piano	F (relativo alle medie)	p-value
tutte	40°	tutte	0,11	0,01
tutte	25°	tutte		
prove con elementi	25°	0°	0,03	0,01
		5°		
		7,3°		
prove senza elementi	25°	0°	2,83	0,05
		5°		
		7,3°		
		0°	0,60	NON SIGNIFICATIVO
		5°		
		0°	5,66	0,05
		7,3°		

Risultando poco determinanti le differenze verificate fra le serie di dati, si propone di utilizzare i coefficienti ottenuti dalla regressione di tutte le prove condotte, che vengono ritenuti estendibili in generale i valori così come nella seguente equazione:

$$R = 0,5 + 0,21 \frac{u^2}{2g} C_V^{-2}$$

### 5.3.4 Equazione di Vandre

La formula di Vandre (1985) è annoverata fra i metodi che considerano i limiti topografici, ovvero alla pendenza della conoide piuttosto che ai parametri collegati alla dissipazione di energia lungo il percorso del debris flow. Dall'approccio empirico l'autore propone la seguente formula:

$$R = \omega \Delta H$$

Dove R è il Run Out e  $\Delta H$  è la differenza in termini di quota fra il punto in cui origina il debris flow e il punto in cui ha inizio la deposizione. L'autore individua un coefficiente pari a 0,4.

Un unico coefficiente non soddisfa sicuramente la casistica ottenuta con le prove eseguite ed è stato quindi deciso di individuare coefficienti diversi in funzione delle concentrazioni volumetriche e della presenza o meno degli elementi. In tutti i casi il valore di  $\Delta H$  è considerato a partire dal baricentro della massa contenuta nel serbatoio (perché è il punto che meglio rappresenta la massa che costituisce il debris flow), fino al punto in cui cambia la pendenza fra canale e piano di deposizione.

I risultati, riportati in Tabella 52 mostrano un comportamento decrescente del coefficiente medio in funzione dell'aumento della concentrazione volumetrica, e valori medi minori per le prove condotte con elementi 5X5. L'ampiezza del range fra valore massimo e valore minimo è piuttosto ridotta.

Come già osservato nel lavoro di Cesca (2008) la formula di Vandre sottostima il valore di run out tranne che nel caso delle prove a massima concentrazione volumetrica in presenza di elementi.

**Tabella 52: coefficiente risultante dall'analisi dei dati delle prove eseguite suddivise per classe di Concentrazione volumetrica e per presenza o meno di elementi.**

		$\omega$ minimo	$\omega$ medio	$\omega$ massimo
da 0,42 a 0,48	senza el.	0,59	1,15	1,79
	con el.	0,92	1,03	1,15
da 0,50 a 0,58	senza el.	0,40	0,81	1,21
	con el.	0,38	0,61	0,85
da 0,59 a 0,66	senza el.	0,18	0,53	1,08
	con el.	0,25	0,33	0,43

Gli stessi risultati sono stati considerati in funzione delle varie configurazioni adottate durante le prove, senza distinguerle in base alla concentrazione volumetrica. Osservando i valori (Tabella 53) emerge che il valore medio del coefficiente per tutte le prove condotte è circa doppio rispetto quello proposto da Vandre (1985) ma circa la metà rispetto quello proposto da Cesca (2008) che è pari a 1,85; probabilmente la differenza dipende dal materiale utilizzato.

Suddividendo in base alla pendenza della canaletta si osserva il maggior valore del coefficiente nel caso di pendenza pari a 25°; la presenza di elementi è decisamente influente sul rapporto fra run out e dislivello.

Infine, anche la pendenza del piano di deposizione ha un ruolo importante nella determinazione del coefficiente in questione: all'aumentare della pendenza del piano aumenta il coefficiente.

**Tabella 53: valori del coefficiente della formula di Vandre in funzione della configurazione adottata durante le prove.**

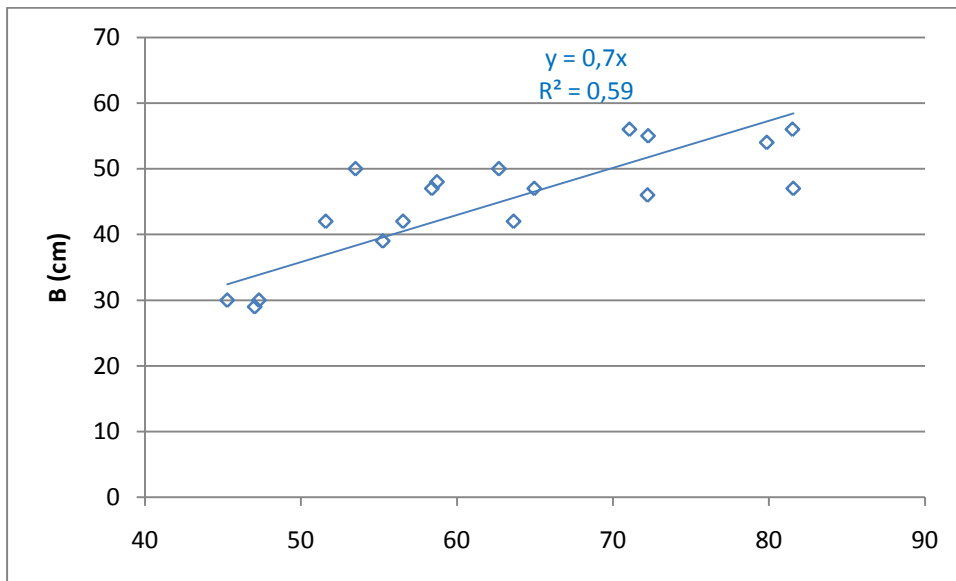
	$\omega$ minimo	$\omega$ medio	$\omega$ massimo
tutte le prove	0,18	0,79	1,79
canale a 40°	0,18	0,63	1,17
canale a 25°	0,27	0,95	1,79
canale a 25° con elementi 5X5	0,25	0,66	1,15
canale a 25° senza elementi 5X5	0,35	1,03	1,76
Balio	0,51	0,64	0,76
canale a 25° piano a 0° con elementi	0,25	0,63	1,15
canale a 25° piano a 5° con elementi 5X5	0,31	0,66	1,15
canale a 25° piano a 7,3° con elementi 5X5	0,32	0,68	0,97
canale a 25° piano a 0° senza elementi 5X5	0,35	0,87	1,68
canale a 25° piano a 5° senza elementi 5X5	0,49	1,03	1,57
canale a 25° piano a 7,3° senza elementi 5X5	0,74	1,31	1,76

### 5.3.5 Dispersione laterale massima

L'equazione predittiva per la dispersione laterale massima individuata da Cesca (2008) è la seguente:

$$B_{max} = 0,70 \left[ \left( \frac{u^2}{2g} \right)^{0,07} R_{max}^{0,93} \right] C_v^{0,65}$$

Dove  $B_{max}$  è la dispersione laterale massima del deposito,  $u^2/2g$  è l'energia cinetica posseduta dalla colata allo sbocco della canaletta (in cui  $u$  è la velocità della colata),  $R_{max}$  è il Run Out massimo del deposito, e  $C_v$  è la concentrazione volumetrica della miscela impiegata per la prova. La formula applicata alle varie configurazioni testate durante gli esperimenti condotti ha dato buon risultato solo considerando tutte le prove eseguite con elementi simulanti il bosco, pur presentando un coefficiente di determinazione inferiore alla soglia accettabile (Figura 130).

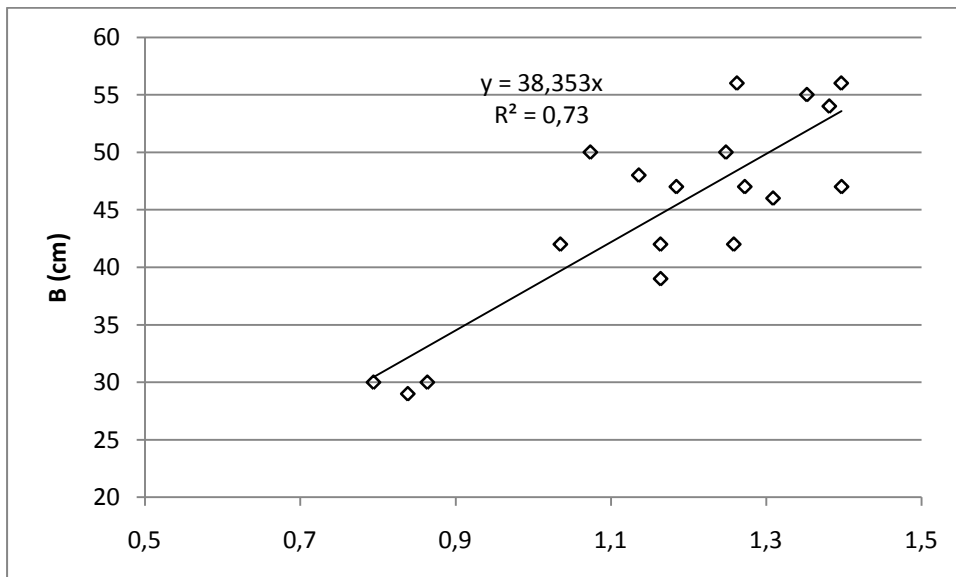


**Figura 130:** grafico riportante i valori di larghezza in funzione di energia cinetica della colata alla fine del canale, Run Out e concentrazione volumetrica

Riparametrizzando la formula, considerando solo le prove eseguite con elementi, si ottiene il seguente risultato:

$$B_{max} = 38,35 \left[ \left( \frac{u^2}{2g} \right)^{0,11} R_{max}^{0,06} C_v^{-0,14} \right]$$

Per le prove condotte senza elementi la formula, pur riparametrizzata, non restituisce valori di coefficiente di determinazione accettabili e quindi non sembra poter modellare il fenomeno.



**Figura 131:** grafico riportante i valori di larghezza in funzione di energia cinetica della colata alla fine del canale, Run Out e concentrazione volumetrica, con formula riparametrizzata per i dati delle prove eseguite con elementi

### 5.3.6 Stima della distanza totale planimetrica



La formula proposta da Takahashi (1994), ricava un valore medio o caratteristico del rapporto fra dislivello e lunghezza planimetrica percorsi dal materiale della colata:

$$\frac{H}{L} = \tan\beta$$

Dove H è il dislivello fra baricentro del materiale in vasca di accumulo e punto ultimo del deposito, L è la distanza planimetrica fra gli stessi punti. Nel lavoro originale l'autore ricava valori dell'ordine di grandezza di 0,2, mentre Cesca (2008) ricava valori compresi fra 0,22 e 0,30, con valor medio pari a 0,24.

Osservando i risultati ottenuti emerge che le prove si suddividono con valori diversi in funzione della concentrazione volumetrica: al crescere di quest'ultima cresce anche l'angolo H/L, crescita dovuta logicamente al minor Run Out realizzato dalle colate con minor contenuto idrico, e quindi maggior dispersione di energia durante il flusso.

In Tabella 54 sono presentati i valori rilevati dalle prove. Si può osservare come i range di variazione del valore del rapporto siano piuttosto ampi e sovrapponibili, mentre rimane netta la differenza fra le medie per le prove suddivise in base alla concentrazione volumetrica. Ponendo l'attenzione sulla differenza fra prove eseguite con e senza elementi si nota che esse non sono tali da poter permettere una distinzione netta, ma anzi sono talmente simili da poter essere considerati lo stesso campione.

**Tabella 54: valori del rapporto H/L in funzione della concentrazione volumetrica e della presenza o meno degli elementi.**

		H/L minimo	H/L medio	H/L massimo
Cv basse (0,41-0,48)	senza el	0,36	0,45	0,59
	con el	0,43	0,45	0,46
Cv medie (0,50-0,58)	senza el	0,40	0,49	0,66
	con el	0,47	0,50	0,54
Cv alte (0,59-0,66)	senza el	0,44	0,57	0,79
	con el	0,53	0,55	0,56

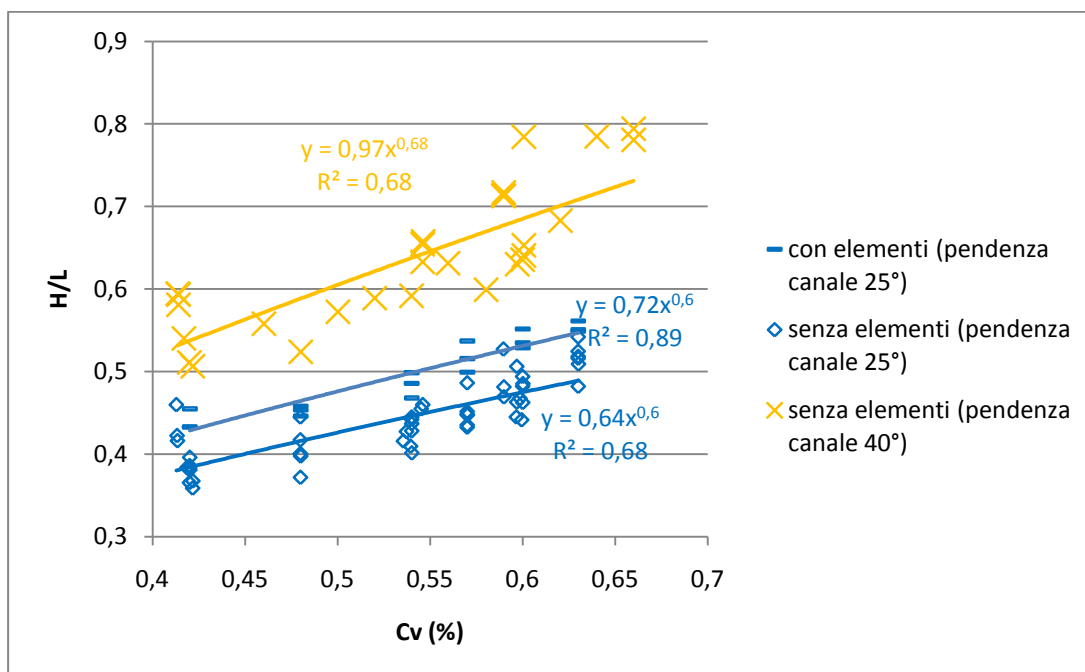
Considerando la formulazione proposta da Cesca (2008) in cui il rapporto H/L viene messo in relazione alla concentrazione volumetrica si ha:

$$\frac{H}{L} = \tan\beta = aC_v^b = 0,44C_v^{0,85}$$

Per le prove effettuate i risultati migliori sono stati ottenuti considerando quelle prove con la stessa pendenza del canale (25° e 40°), e con o senza elementi 5X5. Le formule sono riportate di seguito e rappresentate in Figura 132.

**Tabella 55: parametri della formula di Takahashi 1994 calcolati per le prove eseguite**

Prove considerate	a	b
Cesca (2008)	0,44	0,85
Canale a 25° con elementi	0,72	0,6
Canale a 25° senza elementi	0,64	0,6
Canale a 40°	0,97	0,68



**Figura 132: grafico rappresentante il rapporto H/L, ovvero angolo Beta, in funzione della concentrazione volumetrica**

## 6 DISCUSSIONE

Nel lavoro presentato è stato preso in esame il fenomeno di deposizione dei debris flow, in particolare l'effetto che il bosco ha sul deposito di questi fenomeni. Per studiare questo fattore è stata messa a punto un'attrezzatura per riprodurre le colate in laboratorio, in condizioni controllate. L'esecuzione di più di cento prove ha permesso di osservare il comportamento di una miscela di materiale e acqua in fase di deposizione dopo rilascio da serbatoio, di determinare quali sono i parametri che influenzano le caratteristiche principali dell'oggetto dello studio, e di fare osservazioni sugli elementi che possono essere presenti nella zona di deposizione di un debris flow.

Considerando i parametri che governano i risultati delle prove senza elementi, ovvero concentrazione volumetrica (Cv), pendenza del canale e volume della colata si possono fare alcune osservazioni generali.

- La Cv risulta inversamente proporzionale a run out, larghezza del deposito e, come logico aspettarsi, area del deposito; risulta invece direttamente proporzionale a spessore e angolo beta. La Cv è il fattore che maggiormente governa i risultati delle prove.
- La pendenza del canale risulta avere un effetto direttamente proporzionale a run out, incide fortemente sull'angolo beta per una questione strutturale, e nel caso di elevate pendenze, maschera l'effetto del volume e amplifica gli effetti della Cv sul run out. La pendenza del canale non sembra avere effetti su area e spessore del deposito.
- Il volume della colata è direttamente proporzionale al run out, ed all'area; quando si tratta dei valori maggiori (7,2 litri) il volume diventa fattore più importante della pendenza del canale.

Con l'introduzione della variabilità legata alla pendenza del piano di deposito le osservazioni che si possono fare rispetto i comportamenti fin qui descritti sono che l'aumento della pendenza del piano incide sui valori di run out aumentandoli; di conseguenza anche i valori di area del deposito sono influenzati in modo direttamente proporzionale alla pendenza del piano. Non si notano differenze significative sugli altri parametri; si può solo intuire che all'aumentare della pendenza del piano diminuisce il valore dell'angolo beta. La pendenza del piano di deposizione, quindi sembra non avere un effetto determinante sui risultati, se non un effetto di amplificazione dei risultati già osservati.

L'introduzione degli elementi 10X10 non ha effetti statisticamente significativi, tanto da essere assimilabili alle prove condotte senza elementi.

L'introduzione degli elementi 5X5 sul piano di deposizione provoca, per tutte le prove condotte anche a pendenza del piano di deposizione diverse, la diminuzione del run out (che risulta maggiore per pendenze del piano di deposizione maggiore) e quindi dell'area del deposito (tranne nel caso di piano di deposizione a 0°), l'aumento dello spessore del deposito e l'aumento dell'angolo beta.

Attraverso l'analisi della covarianza si evidenzia che gli elementi con spaziatura 10X10 cm non provocano differenze significative sui risultati rispetto le prove senza elementi. Le prove eseguite con elementi 5X5 cm risultano invece in tutti i casi analizzati statisticamente diverse dalle prove senza elementi e con elementi a spaziatura 10X10 cm.

Le evidenze sperimentali, quindi, dimostrano che la presenza di piante nell'area di deposito è in grado di ridurre in primis il run out, e di conseguenza i fattori ad esso collegato.

Considerando le scale adottate emerge che la simulazione in scala 1:100, in cui il volume è di 5000 m<sup>3</sup> gli elementi hanno un effetto significativo nella fase di arresto solo per spaziatura fra le piante di 5X5 m (con diametro 40 cm), mentre non sembrano avere effetto per spaziature di 10x10 m (e diametro 60 cm). Per la scala 1:50 con un volume di 625 m<sup>3</sup>, invece, gli elementi hanno un effetto significativo nella fase di arresto solo per spaziatura fra le piante di 2,5X2,5 m (con diametro 20 cm), mentre non sembrano avere effetto per spaziature di 5x5 m (e diametro 30 cm).

I risultati ottenuti confermano quindi che il bosco può svolgere un ruolo importante nella fase di deposizione delle colate detritiche di volume ridotto purché essi abbiano determinate caratteristiche.

L'indirizzo generale che emerge per la gestione dei boschi nelle zone di conoide è quella del loro mantenimento purché abbiano una densità pari a 400 piante/ha, con diametro medio di 35 cm. In linea generale e compatibilmente con le caratteristiche stazionali sarebbero da preferire le latifoglie che potrebbero assicurare, nel caso di distruzione del soprassuolo o interrimento delle piante, una più rapida ricolonizzazione dell'area interessata grazie alla loro capacità pollonifera e di ricaccio.

A conclusione è opportuno sottolineare che rimane ancora da studiare sul tema delle foreste di protezione contro le colate, poiché si tratta di un filone di studio piuttosto giovane. In particolare sarebbe innanzitutto opportuno proseguire nelle prove per consolidare i risultati ottenuti, verificando in campo le indicazioni sperimentali. Ciò è possibile analizzando eventi recenti, di cui ancora esistono le tracce, ma anche eventi passati, le cui tracce sono conservate nei tronchi delle piante decifrabili attraverso la dendrocronologia.

## 7 BIBLIOGRAFIA

**Abbe T.B., Montgomery D.R., 2002**, "Patterns and processes of wood debris accumulation in the Queets river basin, Washington" *Geomorphology* 51, 81-107, (2003);

**Ancey C., 2001**, "21 - Debris flow and Related Phenomena", in N.J. Balmforth and A. Provenzale (Eds.): LNP 582, pp. 528-547, 2001;

**APAT, 2007**, autori vari, "Rapporto sulle frane in Italia, il progetto IFFI – metodologia, risultati e rapporti regionali", Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici, Dipartimento Difesa del Suolo, Rapporti 78/2007, ISBN 978-88-448-0310-0;

**Baroni C., Armiraglio S., Gentilini R., Carton A., 2007**, "Landform-vegetation units for investigating the dynamics and geomorphologic evolution of alpine composite debris cones (Valle dell'Avio, Adamello Group, Italy)", *Geomorphology*, 84, pp. 59-79, Elsevier;

- Bateman A., Medina M., Steiner F., Velasco D., 2006**, “Estudio experimental sobre flujos granulares hiperconcentrados”, XXII congreso latinoamericano de hidráulica, Ciudad Guayana, Venezuela, Octubre 2006;
- Bianco G. (1999)**, “Sulla valutazione dei volume di materiale solido associati a eventi di debris flow (quale elemento conoscitivo per la scelta delle misure relative al controllo e alla difesa idraulica dei territori e della rete idrografica di fondovalle)”, Accademia delle scienze di Torino – Atti di Scienze Fisiche 133 (1999), meccanica dei fluidi 99-126, 8ff., 5 tabb.;
- Bischetti G.B., D’Agostino V., (2010)**, “Sistemazioni Idraulico Forestali: Indirizzi per gli interventi”, Quaderni della ricerca n.116, Regione Lombardia - Agricoltura, giugno 2010;
- Bottino G. e Crivellari, (1998)**, "Analisi di colate detritiche connesse con l'evento alluvionale del 5-6 Novembre 1994 nell'anfiteatro morenico di Ivrea", Atti del Convegno su "*Rischio idrogeologico, opere di difesa ed uso del territorio nel Canavese*", Ivrea, 8-9 maggio 1998, pag 35-45;
- Brayshaw D. and Hassan M.A., 2009**, “Debris flow initiation and sediment recharge in gullies”, *Geomorphology*, doi: 10.1016/j.geomorph.2009.02.021;
- Brufau P., Garcia-Navarro P., Ghilardi P., Natale L., Savi F., 2000**, “1D Mathematical modelling of debris flow. Simulation numérique unidimensionnelle du charriage torrentiel”, *Journal of Hydraulic Research*, vol. 38, 2000, n°6;
- Burns B. 2007**, “Woodson Debris Flow, Dec 2007” Oregon Department of Geology and Mineral Industries;
- Burthou A. e Bathurst J.C., 1998**, “Physically based modeling of shallow landslide sediment yield at a catchment scale”. *Environmental Geology*, 35: 89-99; in Cesca 2008;
- Calvo et al. 2006**, “Progetto carta dei tipi forestali – relazione finale”, ERSAF e Regione Lombardia, Marzo 2006;
- “**CatchRisk**”, “Mitigation of hydro-geological risk in alpine catchments” Program INTERREG IIIB – Alpine Space, Final Report, stampato da Regione Lombardia.
- Cerato M., 1995**, “Sulla progettazione ed il funzionamento delle briglie filtranti, alcune esperienze in Provincia di Trento”, 6° corso internazionale postuniversitario sullo “Sviluppo e gestione dei bacini idrografici”, Servizio Azienda Speciale di Sistemazione Montana della Provincia Autonoma di Trento, Ottobre 1994;
- Cerato M. e Coali R., 1997**, “A type of open check-dam adopted in east Trentino”, Azienda Speciale di Sistemazione Montana, Provincia Autonoma di Trento.
- Cerato M., 2000**, “Progettazione per la tutela delle aree a rischio. I casi del torrente Chieppena in provincia di Trento e dei bacini di San Jose de Galipan e Cojo in Venezuela”, Azienda Speciale di Sistemazione Montana – Provincia Autonoma di Trento;
- Ceriani M., Crosta G., Frattini P. & Quattrini S., (2000)**, *Evaluation of hydrogeological hazard on alluvial fans*, Internationales Symposium, INTERPRAEVENT 2000 – VILLACH / OSTERREICH, Tagungspublikation, Band 2, Seite 213 – 225;
- Cesca M., 2008**, “Studio dei meccanismi di deposizione dei debris flow: integrazioni tra esperienze di laboratorio, analisi di campo e modellazioni numeriche”, tesi di dottorato di ricerca in Idronomia Ambientale ciclo XX, Università degli Studi di Padova, Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali;
- Comiti F., Mao L., Preciso E., Picco L., Marchi L., Borga M., 2008**, “Large wood and flash floods: evidence from the 2007 event in the Davča basin (Slovenia)”, in “Monitoring, simulation, prevention and remediation of dense debris flow II”, pp 173-182, WIT transaction on engineering science, vol 60, WIT press, ISSN 1743-3533;

**Corominas J. 1996**, “The angle of reach as a mobility index for small and large landslides” *Canadian Geotechnical Journal* 33: pp 260-271;

**Coslop D., 2001**, “Tecnica delle sistemazioni idraulico forestali”, Calderini Edagricole, Bologna, 2001;

**Coussot P., Laigle D., Arattano M., Deganutti A., Marchi L., 1998**, “Direct Determination of Rheological Characteristics of Debris Flow”, *Journal of Hydraulic Engineering*, August 1998, pp. 865-868;

**Coussot P., Meunier M., 1996**, “Reconition, classification and mechanical description of debris flows”, *Earth-Science Reviews*, 40, 1996, p 209-227;

**Crosignani B. e Mazzucchi M., 1996**, “Il ruolo del larice nella selvicoltura alpina”; *Monti e boschi*, 47, 3: 4-10;

**Curran J.H. and Wohl E.E., 2003**, “Large woody debris and flow resistance in step-pool channels, cascade range, Washington”, *Geomorphology* 51 (2003) 141-157;

**D’Agostino V., Cerato M. & Coali R., (1996)**, *Il trasporto solido di eventi estremi nei torrenti del Trentino Orientale*, Internationales Symposion, INTERPRAEVENT 1996 – GARMISCH – PARTENKIRCHEN, Tagungspublikation, Band 1, Seite 377 – 386;

**D’Agostino, 1996b**, “Analisi quantitativa e qualitativa del trasporto solido torrentizio nei bacini montani del Trentino orientale – Scritti dedicati a Giovanni Tournon”, *Associazione Italiana di Ingegneria Agraria*, 111-123, IN **Ferro V., 2008**, “Sistemazione dei bacini montani e difesa del suolo”, Nuova BIOS, Castrovillari (CS), ISBN-10: 978-88-6093-042-2;

**D’Agostino V., 2006**, “Analisi della pericolosità lungo i conoidi. Introduzione alla modellazione idraulica bidimensionale” corso intensivo “Il rischio idrogeologico”, Master in difesa e manutenzione del suolo, Università degli studi di Padova, 2006;

**D’Agostino V., Cesca M. & Marchi L., 2010**, “Field and laboratory investigations of runout distances of debris flow in the dolomites (Eastern Italian Alps)”, *Geomorphology* 115 (2010) 294-304;

**Deganutti A.M., Tecca P.R., Genevois R., Galgaro A., 2003**, “Field and laboratory study on the deposition features of a debris flow”, in *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*, Rickenmann & Chen (eds) 2003 Millpress, Rotterdam, pp. 833-841;

**De Jong C., 1992**, “A catastrophic flood/multiple debris flow in a confined mountain stream: an example from the Schriedlaine, southern Germany”, *Erosion, Debris Flow and Environment in Mountain Regions (Proceedings of the Chengdu Symposium, July 1992)*, IAHS Publ. no. 209, 1992;

**Del Favero R., 2004**, “I boschi delle regioni alpine italiane. Tipologia, funzionamento, selvicoltura”, casa editrice CLEUP, 600 p”

**Dellagiacomma F., 1990**, “La colata detritica di origine artificiale del 19 Luglio 1985 nel rio Stava (Trentino)” *Quaderni di Idronomia Montana* n° 10, 1990, pp. 61-70, Associazione Italiana Di Idronomia, a cura delle cattedre di sistemazioni idraulico-forestali e di idrologia forestale delle università di Bari, Firenze e Padova;

**Denlinger R.P. e Iverson R.M., 2001**, “Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain 2. Numerical prediction and experimental test” *Journal of Geophysical Research*, vol 106, no. B1, pp 553-566, 10 Gennaio 2001;

**Dotta A. e Motta R., 2000**, “Boschi di conifere montani – indirizzi selvicolturali”, Blu edizioni, Stige, San Mauro (TO);

**Egashira S., Honda N., Itoh T., 2001**, “Experimental study on the entrainment of bed material into debris flow”, *Physics and Chemistry of the Earth, part C: Solar terrestrial & planetary science* 26 (9): 645-650;

**Ferro V., 2008**, “Sistemazione dei bacini montani e difesa del suolo”, Nuova BIOS, Castrovillari (CS), ISBN-10: 978-88-6093-042-2;

**Fetherston K.L., Naiman R.J., Bilby R.E., 1995**, “Large woody debris, physical process, and riparian forest development in montane river networks of Pacific Northwest”, *Geomorphology* 13, 133-144;

**Ghilardi P., Natale L., Savi F., 2001**, “Modelling debris flow propagation and deposition”, *Physics and Chemistry of the Earth, part C: Solar terrestrial & planetary science* 26 (9): 651-656;

**Ghilardi, P, Natale, L., Savi, F. (Eds.), 1999**, “Two mathematical models simulating a real-world debris flow”, In: *Proceedings IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, Genoa, Italy, pp. 91-99;

**Griswold, 2004**, “Mobility Statistics and Hazard Mapping for Non-Volcanic Debris Flows and Rock Avalanches. Unpublished master thesis, Portland State University; In Jakob (2005);

**Gröndahl S., 2008**, “Analysis of debris flow characteristics with numerical modelling – application to two alpine torrents and to the semeru volcano”, Master – 2<sup>nd</sup> year – Mention Géosciences, Environnement, Risques, Spécialité “Risques Technologiques et Naturels”, Parcours “Risques Naturels”, internship report, Institut de Physique du Globe, University Louis Pasteur – Strasbourg;

**Hairston-Strang A.B., Adams P.W., 1998**, “Potential large woody debris sources in riparian buffers after harvesting in Oregon, USA”, *Forest Ecology and Management* 112 (1998) 67-77;

**Hashimoto H. & Park K., 2003**, “Sediment transport and deposition in a steep open channel with multiple rows of cylinders”, in *Proceedings of the third international conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*; Davos, Switzerland, September 10-12, 2003, p 1291-1301;

**Hashimoto H. & Park K. 2003**, “Sediment transport and deposition in a steep open channel with multiple row of cylinders” in *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*, Rickenmann & Chen (eds) 2003, p1291 – 1301, Millpress, Rotterdam, ISBN 907701778X;

**Hollingsworth R., and Kovacs G.S., 1981**, “Soil slumps and debris flows: prediction and protection. *Bull. Assoc. Eng. Geol.* 18: 17-28; in **Van Dine D.F., 1996**, “Debris flow control structures for forest engineering”, *Res. Br., B.C. Min. For., Victoria, B.C., Work. Pap.* 08/1996;

**Hubl J., Suda J., Proske D., Kaitna R., Scheidl C., 2009**, “Debris flow impact estimation”, *International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, Ohrid/Macedonia*, 1-5 Settembre 2009, paper A56;

**Hungr O., Morgan C. e Kellerhals R., 1984**, “Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures, *Can. Geotech. J.*, Vol 21, 663-677; in Marco e Forlati, 2002, “Pericolosità geologica in conoide: ricerca bibliografica e analisi critica” Settore Studi e Ricerche Geologiche Sistema Informativo Prevenzione Rischi, Regione Piemonte; ed in **Van Dine D.F., 1996**, “Debris flow control structures for forest engineering”, *Res. Br., B.C. Min. For., Victoria, B.C., Work. Pap.* 08/1996;

**Hungr O., Evans S.G., Bovis M.J., Hutchinson J.N., 2001**, “A review of the classification of landslides of the flow type”, *Environmental & Engineering Geoscience*, Vol. VII, No. 3, August 2001, pp 221-238;

**Hürlimann M., Rickenmann D., Medina V., Bateman A., 2008**, “Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment”, *Engineering Geology* 102 (2008) pp. 152-163.

**Iverson R.M., 1997**, “The physics of debris flows”, *Reviews of Geophysics*, 35, 3 / August 1997, pp 245-296, paper number 97RG00426;

**Iverson R.M. e Denlinger R.P., 2001**, “Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain 1. Coulomb mixture theory”, *Journal of Geophysical Research*, gennaio 2001, vol 106, no.B1, pp 537-552;

**Iverson R.M. e Vallance J.W., 2001**, “New views of granular mass flows”, *Geology*, febbraio 2001, vol 29, no.2, pp 115-118;

**Jakob M., 2005**, “A size classification for debris flow”, *Engineering Geology* 79 (2005) 151-161;

**Johnson A.C., 1991**, “Effects of landslide-dam-break floods on channel morphology”, a thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, University of Washington, Timber Fish e Wildlife, TFW-SH17-91-001;

**Johnson A.M. & Rodine J.R., 1984**, “Debris flow.”, In Brunsden, D. & Prior, D.B. (eds), *Slope Instability*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd. In **Johnson R.M., Warburton J., 2003**, “Regional Assessment of contemporary debris-flow activity in Lake District mountain catchments, northern England: occurrence, scale and process”, *Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, Rickenmann & Chen (eds) 2003 Millpress, Rotterdam, pp 965-976;

**Johnson R.M., Warburton J., 2003**, “Regional Assessment of contemporary debris-flow activity in Lake District mountain catchments, northern England: occurrence, scale and process”, *Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, Rickenmann & Chen (eds) 2003 Millpress, Rotterdam, pp 965-976;

**Kettl W., 1994**, “Le tecniche di regimazione delle acque e dei trasporti detritici come contributo alla stabilizzazione degli ecosistemi”, relazione non pubblicata; da Servizio Sistemazione Montana della Provincia Autonoma di Trento;

**Lancaster S.T. and Grant G.E., 2006**, “Debris dams and the relief of headwater streams”, *Geomorphology* 82 (2006) 84-97;

**Lancaster S.T., Hayes S.K., Grant G.E., 2003**, “Effects of wood on debris flow run out in small mountain watersheds”, *Water Resour. Res.*, 39 (6), 1168, doi:10.1029/2001 WR001227, 2003;

**Lancaster S.T., Hayes S.K., Grant G.E., 2001**, “Modeling sediment and wood storage and dynamics in small mountainous watersheds”, *Geomorphic Processes and Riverine Habitat Water Science and Application*, Vol 4, pages 85-102;

**Lancaster S.T., Grant G.E., 1999**, *Modeling the interaction of landslides, debris flow and the Channel Network*;

**Larcan E., Mambretti S., Orsi E., 2002**, “Leggi di resistenza al moto nelle colate di detriti conseguenti al crollo di dighe. 1: Apparato sperimentale e primi risultati”, 28° Convegno di Idraulica e Costruzioni idrauliche, Potenza 16-19 settembre 2002, Editoriale BIOS, Cosenza (IT);

**Linee guida, Trento**, “Linee guida per il calcolo dell'idrogramma e sedimentogramma di progetto”, *Relazione tecnico scientifica*, Associazione Italiana Di Idronomia, Servizio Sistemazione Montana della Provincia Autonoma di Trento;

**Lorenzini G. e Mazza N., 2004**, “DEBRIS FLOW, Phenomenology and Rheological Modelling”, *Alma Mater Studiorum – University of Bologna, WIT Press Southampton, Boston*, ISBN 1-85312-802-3;

- Mambretti S., Larcan E., De Wrachien D., 2008**, “1D modelling of dam-break surges with floating debris”, *Biosystems engineering* 100 (2008) 297-308.
- Marchi L., 2006**, “Colate detritiche: zonizzazione del rischio sui conoidi alluvionali” Corso intensivo “Il Rischio Idrogeologico”, Master in difesa e manutenzione del suolo, Università degli studi di Padova, 2006;
- Marchi L. e D’Agostino V., 2004**, “Estimation of debris flow magnitude in the eastern Italian Alps”, *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 207-220; **Marco F. e Forlati F., 2002**, “Pericolosità geologica in conoide: ricerca bibliografica e analisi critica”, Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale – Piemonte, Settore Studi e Ricerche Geologiche – Sistema Informativo Prevenzione Rischi;
- Major J.J., 1997**, “Depositional Processes in Large-Scale Debris-Flow Experiments”, *The Journal of Geology*, 1997, vol 105, pp 345-366;
- Malet J.P., Remaitre A., Maquaire O., Ancey C., Locat J., 2003**, “Flow susceptibility of heterogeneous marly formations: implications for torrent hazard control in the Barcelonnette Basin (Alpes-de-Haute-Provence, France)”, in *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, Rickenmann & Chen (eds) 2003 Millpress, Rotterdam;
- Mambretti S., Larcan E., De Wrachien D., 2008**, “1D modelling of dam-break surges with floating debris”, *Biosystems engineering* 100 (2008) 297-308;
- May C.L., 1998**, “Debris flow Characteristics associated with forest practices in the central Oregon Coast Range”, Abstract of the thesis for the degree of Master of Science in Forest Engineering, presented on September 30.1998;
- Medina V., Hürlimann M., Bateman A., 2008**, “ Application of FLATModel, a 2D finite volume code, to debris flows in the northeastern part of the Iberian Peninsula”, *Landslides* (2008) 5: 127-142;
- Meloni F., Lingua E., Berretti R., Motta R., 2007**, La carta delle foreste di protezione diretta in Valle d’Aosta, Università di Torino – Dipartimento Agroselviter, Aosta – Salone Manifestazioni Palazzo Regionale;
- Mills K., Paul J., Hinkle J., Skaugset A., 2003**, “Forest practices and mitigation of debris-flow risk in Oregon, USA”, in *Proceedings of the third international conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*; Davos, Switzerland, September 10-12, 2003, p 1197-1207;
- Moratti S., 2003/2004**, “Lezioni del corso di selvicoltura”, corso di selvicoltura, corso di laurea in Valorizzazione e Tutela dell’Ambiente e del Territorio Montano;
- Mori P., 2002**, “Cure minime per i boschi di protezione”, *Sherwood*, 78: 17-24;
- Motta R., Actis F., Collatin A., Dovigo L., Haudemand J.C., Lingua E., 2003**, “Selvicoltura e foreste di protezione diretta nel comune di Cogne (Valle d’Aosta)”, *Sherwood* n°94, Novembre 2003;
- Novak P., Guinot V., Jeffrey A., Reeve D.E., 2010**, *Hydraulic Modelling – An Introduction: principles, methods and applications*, Spohn Arch. Price Book
- Pearson J.D., Whipple K.X., Simoni A., 2001**, “Experimental study of the grain-flow, fluid-mud transition in debris flow”, *The Journal of Geology*, volume 109, pp 427-447, University of Chicago;
- Regione Autonoma Valle d’Aosta – Regione Piemonte, 2006**, “SELVICOLTURA NELLE FORESTE DI PROTEZIONE Esperienze ed indirizzi gestionali in Piemonte e Valle D’Aosta”, *Compagnia delle Foreste*, Arezzo, pp. 224;
- R. Lombardia**, autori vari, “I tipi forestali della Lombardia; inquadramento ecologico per la gestione dei boschi lombardi”, collana “C’è vita nel bosco”, Cierre edizioni;



**R. Piemonte, 2000**, “cedui di castagno; indirizzi per la gestione e la valorizzazione”, Assessorato alle Politiche per la Montagna Foreste, Beni Ambientali, autori vari, BLU Edizioni, Torino 2000;

**R. Piemonte, P.Camerano, F.Gottero, P.G.Terzuolo, P.Varese, 2004**, “Tipi forestali del Piemonte, metodologia e guida per l'identificazione” centro BRA Edizioni, (CN), 2004;

**Remaître A., Van Asch Th.W.J., Malet J.-P., Maquaire O., 2008**, “Influence of check dams on debris-flow run-out intensity”, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 1403-1416, 2008;

Rickenmann D., 1998, “Ecoulement des laves torrentielles: méthodes de prediction” , Atti del Convegno “Rischio Idrogeologico, Opere di difesa ed uso del territorio nel Canavese” Ivrea 8-9 maggio 1998, 49-58. In Marco e Forlati, 2002, “Pericolosità geologica in conoide: ricerca bibliografica e analisi critica” Settore Studi e Ricerche Geologiche Sistema Informativo Prevenzione Rischi, Regione Piemonte;

**Rickenmann D., 1999**, “Empirical Relationships for Debris Flow”, *Natural Hazards* 19: 47-77, 1999;

**Rigon E., Comiti F., Mao L., Lenzi A., 2008**, “Relationships among basin area, sediment transport mechanisms and wood storage in mountain basins of the Dolomites (Italian Alps)”, in “Monitoring, simulation, prevention and remediation of dense debris flow II”, pp 163-172, WIT transaction on engineering science, vol 60, WIT press, ISSN 1743-3533;

**Schatzmann M., Bezzola G.R., Minor H.-E., Windhab E.J., Fischer P., 2009**, “Rheometry for large-particulated fluids: analysis of the ball measuring system and comparison to debris flow rheometry”, *Rheological Acta*, 48, pp. 715-733;

Seong Y.B., Owen L.A., Yi C., Finkel R.C., Schoenbohm L., 2009, “Geomorphology of anomalously high glaciated mountains at the northwestern end of Tibet: Muztag Ata and Kongur Shan” *Geomorphology* 103 (2009), 227-250;

**Shieh C.L., Ting C.H., Pan H.W.**, “Impulsive force of debris flow on curved dam” *International journal of sediment research*, vol. 23, n°2, pp 149-158;

**SIBCA**, Sistema Informativo Bacini e Corsi d'Acqua, Regione Lombardia, D.G. Territorio e Urbanistica, U.O. Tutela e Valorizzazione del Territorio;

**Stoffel M., 2010**, “Magnitude-frequency relationships of debris flow – A case study based on field surveys and tree-ring records”, *Geomorphology* 116 (2010) 67-76;

**Takahara T. e Matsumura K. 2008**, “Experimental study of the sediment trap effect of steel grid-type sabo dams” *International Journal of Erosion Control Engineering*, vol. 1, No. 2, 2008;

**Takahashi T., e Yoshida H., 1979**, Study on the deposition of debris flows. Annual report of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Japan, 22: 315-328, in Van Dine 1996;

**Takahashi T., 1978**, Mechanical characteristics of debris flow, *Journal of the Hydraulic Division ASCE* 104 (HY8): 1153-1169, in Marchi L., 2010, *Le colate detritiche: determinazione dei volumi e delle portate di picco*, AVAMIRI, presentazione, CNR-IRPI Padova;

**Takahashi T., 1983**, Debris flow and debris flow deposition. *In Advances in the mechanics and the flow of granular materials*. Vol. 2. M. Shahinpoor (editor). Trans Tech Publications, West Germany. In Van Dine 1996;

**Takahashi T., 1991**, “Debris Flow” Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Published for the International Association for Hydraulic Research by A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield/1991;

**Thurber Consultants Ltd, 1984**, “Debris torrents, a review of mitigative measures. Report to B.C. Min. Transportation and Highways, Victoria, B.C.; in **Van Dine D.F., 1996**, “Debris flow control structures for forest engineering”, *Res. Br., B.C. Min. For., Victoria, B.C., Work. Pap. 08/1996*;

**Tropeano D. e Turconi L., 2008**, “Interazione tra vegetazione arborea e processi di instabilità in ambiente torrentizio”, CNR-IRPI sezione di Torino, Seminario Nazionale “Il ruolo della vegetazione ripariale e la riqualificazione dei corsi d’acqua. Proposte operative per una gestione sostenibile.”, Torino, 1-3 Ottobre 2008, Regione Piemonte.

**Tropeano D. e Turconi L., 2004**, “Using Historical documents for Landslide, debris flow and Stream flood prevention. Application in Northern Italy”, *Natural Hazard*, 31, 663-679, 2004;

**Van Dine D.F., 1996**, “Debris flow control structures for forest engineering”, Res. Br., B.C. Min. For., Victoria, B.C., Work. Pap. 08/1996;

**Vandre B.C., 1985**, “Ruud Creek debris flow. Delienation of Landslide, Flash Flood and Debris Flow Hazards in Utah, General Series Rep. UWRL/G-85/03, D.S. Bowles ed., Utah Water Res. Lab., Utah State Univ., Logan, Utah:117-131; in Cesca M., 2008, “Studio dei meccanismi di deposizione dei debris flow: integrazioni tra esperienze di laboratorio, analisi di campo e modellazioni numeriche”, tesi di dottorato di ricerca in Idronomia Ambientale ciclo XX, Università degli Studi di Padova, Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali;

**Voellmy A., 1955**, Über die Zerstörungskraft von Lawinen. *Schweizerische Bauzeitung* 73, 212-285. Cit. **Hürlimann M., Rickenmann D., Medina V., Bateman A., 2008**, “Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment”, *Engineering Geology* 102 (2008) pp. 152-163;

**Welsh A.J. 2007**, “Delineating debris flow hazard on alluvial fans in the Coromandel and Kaimai regions, New Zealand, using GIS”, Thesis, Master of Science in Environmental Science at the University of Canterbury;

**Zanchetta G., Sulpizio R., Pareschi M.T., Leoni F.M., Santacroce R., 2004**, “Characteristics of May 5-6, 1998 volcanoclastic debris flows in the Sarno area (Campania, southern Italy): relationships to structural damage and hazard zonation” *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 133 (2004), 377-393;

**Ziemer R.R., Thomas B.R., Rice R.M., 1982**, “Mass erosion and forest management”, presented at the Ninth Meeting, U.S./Japan cooperative Program in Natural Resources, Panel on Forestry, June 6-13, 1982, Tokyo, Japan;

**Zimmerman M., Mani P., Gamma P., Heiniger O., Hunziker G., 1997**, Murgaggefah und Klimaänderung-ein GIS-basierter Ansatz. Schlussbericht NFP31, ETH, Zurich. (In German), in D’Agostino et al. 2010,

## **8 Appendice A: parametri e indici per il calcolo della magnitudo**

### **8.1 Indice geologico**

L'Indice Geologico (IG) utilizzato nelle formule di Bianco (1999) e D'Agostino V., Cerato M. e Coali R., (1996), viene presentato in

Tabella 56 dove si trova una descrizione completa delle formazioni rocciose e dei suoli corrispondenti. L'Indice geologico è fondamentale nella determinazione della magnitudo poiché la geologia risulta essere un parametro in grado di amplificare anche di 2 o 3 volte il volume di sedimenti trasportato da un debris flow (D'Agostino V., Cerato M. e Coali R., (1996)).

L'Indice geologico che descrive quindi la maggiore o minore predisposizione del bacino a produrre materiale; corrisponde ad una somma degli indici di erodibilità delle litologie presenti (I.G.<sub>i</sub>) pesata sull'area occupata da ogni litologia (A<sub>i</sub>). Si calcola con la seguente formula:

$$I. G. = \frac{(\sum A_i) I. G. _i}{A_{tot}}$$

**Tabella 56: indice geologico (D'Agostino (1996) in Marco e Forlati, 2002)**

Classe	Livello Erosione (formaz.rocciose E suoli)	Formazioni rocciose / suoli	Coeff. Erodibilità	I.G.
A	Basso	Arenarie più o meno cementate, Breccie calcaree, Breccie e conoidi anche cementati, Calcareniti, Calcari avana o nocciola, Calcari dolomitici, Calcari bianchi grigio-biancastri, Calcari organogeni giallastri, Dolomie, Graniti, Marne, Puddinghe con cemento arenaceo grossolano molto tenace o con cemento calcareo sabbioso, Travertini concrezionari tenaci o vacuolari, Bosco chiuso (copertura 90-100%)	0-0,24	0-1,2
B C	Medio-basso Medio	Limi argillosi calcarei, Puddinghe fluvio-lacustri con cemento sabbioso calcareo giallastro, Praterie con grado di copertura del 90-100%	0,24-0,36	1,2-1,8
D E	Moderato Moderatamente alto	Alluvioni anche terrazzate costituite da ciottoli prevalentemente calcarei arrotondati e scarsamente cementati da matrice sabbiosa, Basalto fessurato e alterato, Complessi caotici calcareo dolomitici di probabile origine tettonica formati da blocchi cartonatici di svariatissime dimensioni e da tritume calcareo, Fillade fessurata ed alterata, Gneiss fessurati ed alterati, Lenti di sabbia e limi argillosi intercalate al ciottolame, Micascisti fessurati ed alterati tufo calcareo, Bosco aperto (copertura 60-70%)	0,36-0,48	1,8-2,4
F G	Medio alto Alto	Alluvioni recenti terrazzate e alluvioni attuali e sub-attuali costituite da ghiaie sabbie sciolte o debolmente legate da limi sabbiosi, Detriti di falda e conoidi di deiezione con legante terroso, Gessi, Ghiaie, Travertini spugnosi e vacuolari, Tufo caotico lapideo, Bosco rado (copertura < 60%) Praterie con grado di copertura 60-90%	0,48-0,8	2,4-4,0
H	Molto Alto	Argille verdi e grigie in lenti, Conoidi di deiezione incoerenti, Formazioni lacustri antiche costituite da limi argille verdi o giallastre, Lenti morbide e ciottolate sciolte o scarsamente cementate, Sabbie fini, Campi coltivati, Praterie con copertura < 60%	0,8-1,0	4,0-5,0

Una classificazione riassunta, basata sulle classi litologiche, e di applicazione pratica è quella riportata in

Tabella 57 (D'Agostino et. al. (1996)).

**Tabella 57: indice geologico in forma abbreviata (D'Agostino et. al., 1996)**

Classe litologica	I.G.
Copertura morenica, alluvionale e di falda	5
Rocce metamorfiche: filladi, gneiss, ecc.	4
Rocce "terrigene": marne, strati del Werfen, ecc.	3
Rocce laviche degradate, tufi basaltici, brecce.	2
Rocce calcaree	1
Rocce porfiriche, granitiche, dioritiche	0

## 8.2 Indice di Trasporto

IT è l'*Indice di Trasporto*: basato sulla classificazione di Aulitzky (1982) valuta la capacità di un bacino di trasportare il materiale erodibile e sotto che forma; assume i valori riportati in Tabella 58.

**Tabella 58: Indice di Trasporto (IT) in base al tipo di evento di trasporto**

IT	Tipo di evento di trasporto solido
1	Debris flow
2	Debris flood
3	Trasporto di fondo (bedload)

## 8.3 Indice di Erosione ed indice di Frana

Considerata la rilevanza dei fenomeni di instabilità e dei processi erosivi sull'attività della conoide nell'area di studio, Ceriani et al. (2000) introducono due parametri descrittivi: l'indice di erosione del bacino (I\_E) in Tabella 59, e l'indice di frana del bacino (I\_F) presentato di seguito.

**Tabella 59: Indice di Erosione (I\_E).**

Descrizione del bacino	Indice di Erosione I_E
Area con elevata intensità di attività erosiva	1
Area con media intensità erosiva e/o erosione concentrata	2
Bassa intensità o assenza di erosione	3

L'indice di frana quantifica l'importanza dei fenomeni di instabilità e dei processi erosivi sulla stabilità del conoide alluvionale, ed assume i valori riportati in Tabella 60.

**Tabella 60: Tabell Indice di Frana (I\_F).**

Descrizione del bacino	Indice di Frana I_F
Presenza di frane fortemente attive o riattivabili che insistono sull'alveo	1
Presenza di frane sui versanti non direttamente connesse alla rete di drenaggio	2
Assenza di frane significative	3

## 9 APPENDICE B: valori del numero di Froude calcolati per le prove sperimentali effettuate con il reometro di Milano

Tabella 61: valori del n° di Froude calcolato per il secondo ed il terzo step e con i valori medi dei valori di velocità e altezza del flusso per le due parti di canale considerate. I tratti di canale sono stati scelti in quanto si considera poco significativa l'influenza dell'accelerazione dovuta all'innesco. Si può notare che c'è una certa corrispondenza fra valori maggiori di concentrazione volumetrica (Cv) e valori minori di numero di Froude (n° Fr).

Prove eseguite con pendenza del canale 25° e volume 5l									
prova	Cv	VELOCITA'		ALTEZZA DEL FLUSSO IN CANALE			FROUDE		
		velocità 2°step (50-136,5cm)	velocità 3°step (136,5-200cm)	2°step	3°step	2° e 3° step	secondo step	terzo step	medio
	%	m/s	m/s	m	m	m	-	-	-
30giu_n6	0,63	0,77	0,45	0,028	0,028	0,028	1,47	0,87	1,17
28luglio_n6	0,63	0,83	0,55	0,026	0,028	0,027	1,64	1,04	1,34
07luglio_n6	0,63	0,98	0,64	0,026	0,031	0,028	1,94	1,16	1,56
10giu_n3	0,63	1,02	1,22	0,031	0,029	0,030	1,86	2,31	2,07
04giu_n6	0,63	1,19	1,22	0,027	0,026	0,027	2,32	2,42	2,36
12mag_n3	0,63	1,34	1,22	0,029	0,029	0,029	2,52	2,31	2,41
28luglio_n5	0,60	1,26	1,59	0,034	0,029	0,031	2,21	3,00	2,55
12mag_n9	0,63	1,34	1,13	0,024	0,024	0,024	2,77	2,36	2,56
20mag_n6	0,63	1,43	0,99	0,023	0,021	0,022	3,02	2,21	2,60
30giu_n5	0,60	1,34	1,44	0,027	0,024	0,025	2,62	3,01	2,78
27mag_n6	0,63	1,54	1,22	0,023	0,021	0,022	3,22	2,72	2,94
04giu_n5	0,60	1,43	1,59	0,027	0,020	0,024	2,77	3,58	3,06
07mag_n3	0,60	1,54	1,59	0,029	0,020	0,024	2,89	3,58	3,10
28luglio_n4	0,57	1,54	1,76	0,030	0,026	0,028	2,82	3,53	3,11
07luglio_n5	0,60	1,34	2,27	0,032	0,024	0,028	2,39	4,72	3,37
27mag_n5	0,60	1,54	1,98	0,030	0,020	0,025	2,82	4,48	3,43
12mag_n8	0,60	1,54	1,98	0,029	0,022	0,025	2,90	4,32	3,47
30giu_n4	0,57	1,43	2,27	0,032	0,022	0,027	2,56	4,88	3,49
12mag_n2	0,57	1,65	2,27	0,032	0,030	0,031	2,94	4,22	3,54
12mag_n6	0,54	1,43	3,17	0,040	0,037	0,039	2,28	5,27	3,72
07luglio_n4	0,57	1,54	2,27	0,026	0,027	0,026	3,07	4,45	3,78
20mag_n5	0,60	1,79	1,98	0,025	0,022	0,023	3,65	4,32	3,93
07luglio_n3	0,54	1,54	2,65	0,029	0,028	0,028	2,87	5,09	3,94
20mag_n4	0,57	1,54	2,65	0,030	0,023	0,026	2,83	5,63	4,03
27mag_n4	0,57	1,65	2,65	0,032	0,019	0,025	2,98	6,13	4,15
12mag_n7	0,57	1,79	2,27	0,026	0,020	0,023	3,53	5,19	4,18
10giu_n2	0,57	1,65	2,27	0,023	0,018	0,020	3,50	5,40	4,30
28luglio_n2	0,48	2,15	2,27	0,028	0,020	0,024	4,08	5,12	4,42



20mag_n3	0,54	1,79	2,65	0,028	0,020	0,024	3,42	5,97	4,45
28luglio_n3	0,54	1,79	2,65	0,027	0,023	0,025	3,50	5,63	4,45
12mag_n1	0,48	2,39	2,65	0,032	0,030	0,031	4,25	4,92	4,54
07mag_n2	0,54	1,79	2,65	0,026	0,018	0,022	3,53	6,39	4,64
27mag_n3	0,54	1,79	2,65	0,023	0,021	0,022	3,81	5,90	4,79
04giu_n3	0,54	1,79	2,65	0,022	0,019	0,021	3,83	6,13	4,87
07luglio_n2	0,48	1,79	3,17	0,026	0,027	0,026	3,56	6,17	4,90
04giu_n4	0,57	1,54	3,17	0,026	0,018	0,022	3,06	7,56	4,94
24ago_n3	0,42	2,39	2,65	0,027	0,024	0,025	4,69	5,51	5,03
30giu_n2	0,48	2,15	2,65	0,022	0,022	0,022	4,65	5,76	5,20
24ago_n2	0,42	2,39	3,17	0,027	0,027	0,027	4,69	6,17	5,44
12mag_n5	0,48	2,39	3,17	0,030	0,020	0,025	4,40	7,26	5,46
30giu_n3	0,54	2,15	2,65	0,020	0,020	0,020	4,92	6,05	5,48
07mag_n1	0,42	2,39	3,17	0,025	0,028	0,026	4,82	6,11	5,53
27mag_n2	0,48	2,15	2,65	0,020	0,018	0,019	4,88	6,30	5,53
04giu_n2	0,48	2,39	2,65	0,021	0,019	0,020	5,26	6,13	5,64
12mag_n4	0,42	2,69	3,17	0,028	0,023	0,025	5,15	6,68	5,79
07luglio_n1	0,42	2,39	3,18	0,025	0,021	0,023	4,85	7,00	5,79
20mag_n2	0,48	2,69	3,17	0,029	0,020	0,024	5,06	7,26	5,84
24ago_n1	0,42	2,15	3,97	0,025	0,025	0,025	4,34	8,10	6,20
30giu_n1	0,42	2,39	3,18	0,021	0,020	0,020	5,29	7,17	6,20
10giu_n1	0,48	2,15	3,17	0,018	0,020	0,019	5,15	7,26	6,28
20mag_n1	0,42	2,69	3,18	0,021	0,019	0,020	5,92	7,45	6,59
04giu_n1	0,42	2,39	3,97	0,022	0,018	0,020	5,17	9,44	7,09
<b>media</b>	0,54	1,78	2,34	0,027	0,023	0,025	3,55	5,03	4,19
<b>massimo</b>	0,63	2,69	3,97	0,040	0,037	0,039	5,92	9,44	7,09
<b>minimo</b>	0,42	0,77	0,45	0,018	0,018	0,019	1,47	0,87	1,17

## 10 APPENDICE C: analisi granulometriche dei materiali utilizzati

Il materiale utilizzato per le prove di laboratorio del presente lavoro è stato sottoposto ad analisi granulometrica, quindi a setacciatura per via umida per quanto riguarda la parte più grossolana (dimensione  $> 75 \mu\text{m}$ ), e ad analisi con densimetro per la parte più fine. Dalle analisi si ottengono dati utili a ricostruire i valori espressi in percentuale della quantità di passante corrispondente a determinate dimensioni del materiale. In questo modo si può costruire il grafico posizionando su scala logaritmica il diametro per ottenere un andamento normale, che è il tipico andamento utilizzato dalle procedure statistiche standard per l'analisi dei risultati. Ottenuta la curva granulometrica si può definire un suolo ben assortito se sono presenti tutte le frazioni su un ampio campo cosicché la curva presenta un andamento regolare e con concavità verso l'alto, o poco assortito se caratterizzato da un eccesso o da una mancanza di determinati diametri o da particelle che hanno tutte lo stesso diametro.

Il materiale raccolto sul torrente Perlino si presenta ben assortito anche se con un leggero gap a livello delle sabbie grosse (vedi grafici in Figura 133, Figura 134 e Figura 135). Lo stesso si può dire del materiale raccolto a Balisio. Il sedimento presenta le composizioni e può essere classificato come riportato in Tabella 62.

**Tabella 62: risultati delle analisi granulometriche eseguite sul deposito raccolto a Balisio e sul torrente Perlino.**

RISULTATI DELLE ANALISI GRANULOMETRICHE E CLASSIFICAZIONE			
	<b>Perlino 1°</b>	<b>Perlino 2°</b>	<b>Balisio</b>
<b>sand</b>	0,62	0,32	0,32
<b>silt</b>	0,35	0,63	0,64
<b>clay</b>	0,03	0,04	0,03
<b>classificazione USDA</b>	argilla sabbiosa	argilla limosa	argilla limosa
<b>classificazione USCS</b>	sabbia	sabbia	sabbia

