

## **Rilievo fotogrammetrico dinamico di ammassi granulari in movimento alla scala di laboratorio.**

Daniele Dallavalle, Paolo Scotton

Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Geoscienze, Via Gradenigo, 6, 35131, Padova  
e-mail: paolo.scotton@unipd.it, daniele.dallavalle.1@studenti.unipd.it

### **Abstract**

*L'attività di ricerca sperimentale è finalizzata alla descrizione, con tecniche fotogrammetriche, dell'evoluzione della superficie di un ammasso granulare in movimento, allo scopo di contribuire alla comprensione della reologia e alla taratura di modelli fisico-matematico-numeric. L'apparato sperimentale è costituito da due piani ad inclinazione regolabile: un piano di monte, posto ad inclinazione di 27.5°, ed un piano di valle ad inclinazione di 6.5°. Entrambi i piani sono di forma quadrata di lato 1.5 m. Un volume stabilito di materiale granulare secco è rilasciato sul piano di monte e viene seguito fino all'arresto sul piano di valle. Sono state adottate 2 diverse tipologie di materiale granulare caratterizzate da dimensioni e fattore di forma diversi tra loro.*

*L'articolo descrive il grado di automatizzazione raggiunto nell'approccio metodologico ed il lavoro manuale ancora necessario con le tecniche hardware e software adottate. Vengono infine presentati i risultati sperimentali relativi ad alcune tipologie significative di prove effettuate e la qualità raggiunta dal punto di vista metrico.*

*The experimental research is aimed at the description, with photogrammetric techniques, of the evolution of the surface of a granular mass in motion, in order to contribute to the understanding of the rheology and to the calibration of physical-mathematical-numerical models. The experimental apparatus is constituted by two planes with adjustable inclination: an upstream plane, placed at the inclination of 27.5 °, and a downstream plane at the inclination of 6.5 °. Both planes are square-shaped with side length of 1.5 m. A fixed volume of dry granular material is released on the upstream plane and followed up to its stop on the downstream plane. two different types of granular material have been used, characterized by different size and form factor. The article describes the degree of automation achieved in the methodological approach and manual work still needed with the hardware and software techniques adopted. Finally, the experimental results are presented for some significant tests carried out and the metric quality achieved.*

### **Introduzione**

La taratura dei modelli fisico-matematico-numeric della evoluzione di ammassi granulari secchi e bagnati, realizzati per la produzione di carte di pericolosità e di rischio di fenomeni naturali come le valanghe di neve bagnata, le valanghe di roccia, le colate di detriti, viene effettuata, per lo più, attraverso la riproduzione in scala di modello degli stessi, basata sulla teoria della similitudine, e il confronto con i risultati ottenuti dalla applicazione del modello numerico. Spesso il confronto viene fatto sulla base della configurazione topografica sperimentale iniziale e finale o rilevando nel tempo alcune sezioni trasversali e longitudinali o, ancora, rilevando parametri dinamici come la velocità o la pressione. Nel caso presente, l'obiettivo è la descrizione nel tempo dell'evoluzione topografica dell'intera superficie esterna dell'ammasso granulare in movimento al fine di fornire dati tridimensionali geometricamente completi per la taratura dei modelli numeric.

Nella precedente edizione della conferenza Asita, tenutasi a Vicenza, si pose l'accento sull'apparato sperimentale utilizzato, nonché sul sistema di acquisizione e di sincronizzazione dei frames provenienti dalle videocamere [1]. Infine vennero presentati alcuni risultati preliminari per anticipare quello che sarebbe stato l'obiettivo finale e per valutare i limiti e le potenzialità della metodologia utilizzata e soprattutto gli aspetti sui quali era necessario porre maggiormente l'attenzione per incrementare la qualità del lavoro di ricerca. Nel presente articolo viene illustrato l'approccio metodologico utilizzato ed illustrato il grado di precisione raggiunto in fase di elaborazione dati. Viene infine fornito il rapporto completo di alcune prove sperimentali estratte dall'insieme delle prove effettuate.

### L'apparato sperimentale

In laboratorio i fenomeni vengono realizzati facendo scorrere un volume di circa 10 litri di un ammasso granulare, costituito da ghiaia naturale o da materiale granulare plastico, su un supporto costituito da due piani in forex liscio a diversa inclinazione incernierati tra di loro. Ogni piano ha forma quadrata e lato di lunghezza pari a 1.5 m. Il piano di monte è posto a pendenze tipiche della zona di scorrimento dei fenomeni reali (27.5°), il piano di valle a pendenze tipiche della zona di arresto (6.5°). Possono essere riprodotti scorrimenti su pendio aperto o incanalati mediante l'installazione di una canaletta sul piano di monte (Figura 1). Il rilievo fotogrammetrico viene eseguito mediante otto videocamere disposte come in Figura 1. Nel lavoro di De Toni et al. sono descritti i dettagli dell'apparato sperimentale utilizzato [2].



Figura 1. L'apparato sperimentale utilizzato nelle prove.

### L'approccio metodologico

La ricostruzione topografica completa, nello spazio e nel tempo, di un ammasso granulare in discesa lungo una canaletta sperimentale ha comportato una approfondita ricerca dell'approccio metodologico più adeguato a garantire sufficiente precisione metrica ed elevata automatizzazione, al fine di ridurre al minimo i tempi di elaborazione.

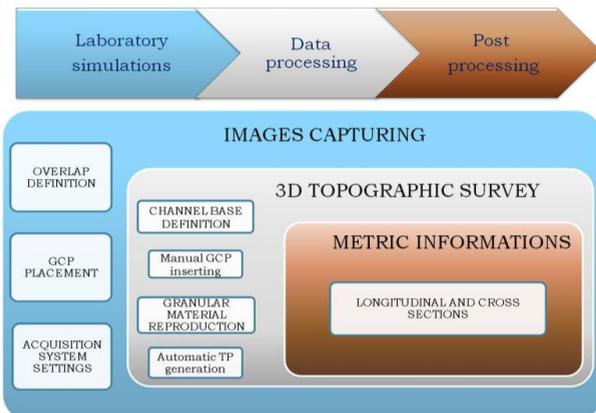


Figura 2. Rappresentazione schematica dei passi principali per la definizione topografica dell'ammasso granulare.

L'acquisizione delle immagini è preceduta da un settaggio del sistema di acquisizione (frequenza dei frames, luminosità, tempo di esposizione), dal posizionamento dei bersagli sul piano di base per l'individuazione dei GCP, e da un'accurata sistemazione delle videocamere sull'apposita struttura di supporto per garantire una fotogrammetria efficiente in fase di processing delle immagini.

Le procedure fondamentali che hanno consentito di ottenere le informazioni metriche cercate sono essenzialmente tre (Figura 2), così riassumibili:

1. Configurazione del sistema di acquisizione e di cattura delle immagini;
2. Elaborazione fotogrammetrica;
3. Visualizzazione tridimensionale e processamento dati.

Per ottenere un sistema di riferimento locale affidabile e preciso si è proceduto all'utilizzo di target predefiniti (Figura 3) che permettono, associati all'inserimento manuale di bersagli puntuali, di ricostruire la geometria dell'apparato sperimentale che funge da base allo scorrimento del materiale granulare. Il completamento della procedura ha poi richiesto l'individuazione della metodologia più consona per la definizione tridimensionale del materiale granulare.

Il software Agisoft Photoscan garantisce il riconoscimento di un elevato numero di punti in modo automatico per una copertura fitta e completa della superficie, consentendo un controllo sull'errore residuo RMS. La componente di lavoro manuale rimane comunque necessariamente ampia, in considerazione del fatto che la riuscita di tutta la procedura dipende in larga misura dal numero di control points inseriti, nonché dalla precisione nella collocazione degli stessi in tutte le immagini (in numero massimo di otto)[3].

### L'accuratezza della ricostruzione

La verifica della precisione della metodologia adottata al fine di descrivere tridimensionalmente la topografia superficiale del materiale granulare in movimento lungo la canaletta, a diversi istanti di tempo, è stata effettuata utilizzando esclusivamente le tecnologie già a disposizione, sfruttando cioè la sincronizzazione garantita dalla gestione hardware delle videocamere. La procedura sperimentale consiste nel porre a confronto l'altezza del materiale granulare, visualizzata dalle telecamere poste lateralmente alla canaletta (Figura 3), con l'altezza ricavata attraverso la procedura fotogrammetrica nella stessa posizione.

La misura laterale è stata ottenuta apponendo una scala graduata sulla sponda sinistra in forex trasparente (Figura 4). Le videocamere utilizzate in posizione laterale sono ad una distanza dalla sponda, tale da ridurre al minimo l'effetto di parallasse. I valori sono confrontati con riferimento alla normale al piano di scorrimento.

Sebbene il software fornisca dei valori circa l'errore tra il valore reale ed il valore calcolato, ( in pixel per quanto riguarda lo spazio immagine, in mm per quel che riguarda lo spazio oggetto), si è ritenuto opportuno fornire una valutazione quantitativa della discrepanza tra il valore reale e il valore ottenuto dalla ricostruzione fotogrammetrica in corrispondenza di una sezione trasversale sul piano di scorrimento incanalato. Le verifiche si sono svolte utilizzando sia il materiale granulare zeolitico che grossolano.

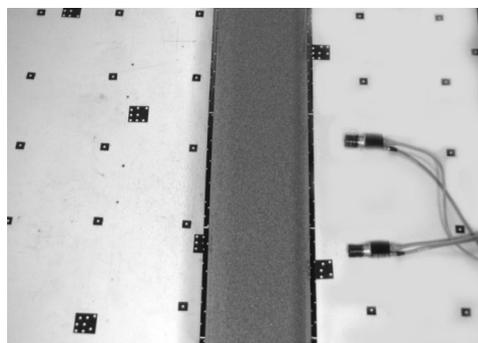
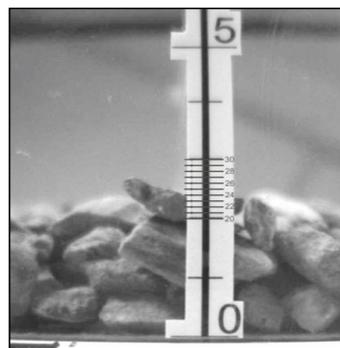


Figura 3. La misura diretta della profondità di scorrimento avviene mediante videocamere poste lateralmente alla canaletta (Figura 4).



N cam	N immagini	N tie points	Errore GCP (mm)	Errore GCP (pix)	Altezza sezione (mm)	Altezza sezione normale al piano (mm)
2	2	1284	1.028	0.129	27.2	25.4
3	3	2275	2.174	0.785	26.3	24.5
4	4	2849	0.717	0.862	26.2	24.4
5	5	3886	0.764	0.789	27.1	25.3
6	6	4181	0.721	0.73	25.4	23.7

Figura 4. La videocamera evidenzia un'altezza del materiale di 24 mm in corrispondenza della sezione considerata. La tabella in alto considera le altezze ricavate fotogrammetricamente nella stessa posizione, al variare del numero di videocamere utilizzate per la ricostruzione tridimensionale. L'errore medio è di circa un millimetro, tuttavia il confronto è puntuale e può risultare non significativo del tutto sulla precisione assoluta dell'elaborazione (Figura 5).

La misura è stata estratta apponendo una scala graduata centimetrica sulla sponda sinistra in forex trasparente. I valori sono confrontati con riferimento alla normale al piano di scorrimento. Dalle valutazioni desunte dai dati di Figura 4 si desume come l'errore tra la misura fotogrammetrica e la misura con la videocamera sia all'interno dell'errore medio indicato dal software. L'indagine è stata ulteriormente approfondita valutando l'andamento superficiale dell'ammasso lungo la sezione trasversale, al variare del numero di videocamere utilizzato per la modellazione topografica tridimensionale (Figura 5). Possono essere fatte le seguenti considerazioni:

- laddove il numero di punti individuati automaticamente nell'intorno della sezione sia adeguato, anche il numero minimo di 2 videocamere può risultare sufficiente; il numero di punti riconosciuti automaticamente aumenta all'aumentare dei frames impiegati nell'elaborazione;
- la maggior presenza di contrasti di luce sul materiale grossolano fa sì che anche il numero di punti automaticamente riconosciuti sia decisamente superiore, consentendo maggior libertà nell'utilizzo delle videocamere (Figura 5). Il materiale zeolitico risulta invece omogeneo e necessita di particelle bianche ad alto contrasto al suo interno, che fungano da traccianti.

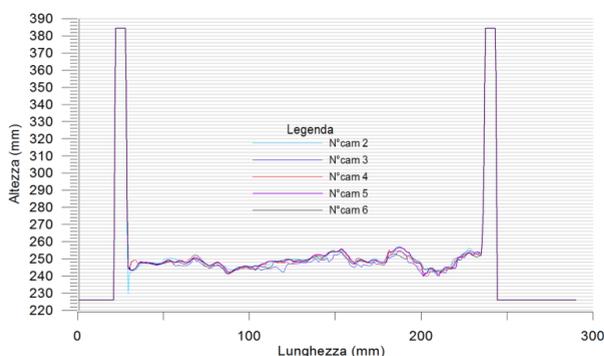


Figura 5. Sezione trasversale di valle relativa alla Figura 4, ricavata fotogrammetricamente. Sono presenti delle locali variazioni nell'andamento laterale al variare del numero di videocamere impiegate. La sezione con 3 videocamere si discosta dall'andamento generale delle altre sezioni e questo trova riscontro nel RMS nella tabella di Figura 4.

### Simulazioni di flusso su materiale granulare alla scala di laboratorio

Le variabili indagate nelle sperimentazioni effettuate sono:

- tipo di materiale granulare: zeolite sintetica, fattore di forma prossimo a 1, diametro medio 1 mm; ghiaia, fattore di forma di circa 0.7, diametro medio 12 mm;
- regime di flusso incanalato e su pendio aperto;
- effetto di elementi di rallentamento (coni rallentatori) e di contenimento e deviazione (deviatori di flusso).

Le prove sono state condotte mantenendo costante l'inclinazione dei 2 piani dell'apparato sperimentale. La posizione delle videocamere sulla struttura di supporto è stata modificata in funzione del tipo di test effettuato e della forma geometrica che il materiale modella sul piano di base, al fine di garantire una copertura completa della massa in movimento. Tuttavia si è sempre cercato di minimizzare gli spostamenti e di garantire l'equilibrio raggiunto tra le variabili in gioco (lunghezza focale, numero di videocamere, distanza tra le videocamere ed il piano di scorrimento). Nel seguito vengono descritti due test rappresentativi delle analisi effettuate.

### Elaborazione fotogrammetrica ad espansione libera su materiale grossolano

La prova è stata effettuata rilasciando del materiale granulare grossolano, inizialmente contenuto all'interno di una forma conica metallica e sollevata manualmente dall'operatore. Il volume del materiale rilasciato è conosciuto. Le informazioni relative agli istanti processati sono fornite in Figura 6.



t(s)	0.33	0.53	0.73	0.93	1.13	1.33	1.46	1.53	1.59	1.66	1.72	2
Numero immagini	6	6	7	8	8	8	7	7	6	6	6	4
Risoluzione a terra (mm/pix)	0.775	0.781	0.831	0.825	0.854	0.852	0.846	0.845	0.836	0.834	0.831	0.885
Area di copertura (m <sup>2</sup> )	0.362	0.563	0.79	0.898	0.949	0.892	0.845	0.789	0.767	0.715	0.667	0.575
Tie points	4789	6910	7608	8224	8438	7920	5695	5076	6074	5727	5253	2529
Errore (pix)	0.657	0.653	0.637	0.7	0.67	0.578	0.528	0.449	0.557	0.517	0.466	0.364
Errore (mm)	0.509	0.510	0.529	0.578	0.572	0.492	0.447	0.379	0.466	0.431	0.387	0.322
Densità punti DEM (pt/mm <sup>2</sup> )	22.4	12.6	7.28	5.74	4.57	4.1	4.26	4.03	4.87	5.61	4.83	10.54

Figura 6. A sinistra, la posizione di partenza antecedente al sollevamento del contenitore del materiale. A destra, informazioni generali relative alle elaborazioni fotogrammetriche individuate per descrivere il test. Per ogni elaborazione fotogrammetrica viene definito il numero di immagini utilizzate, la risoluzione, l'area occupata dal materiale, il numero di punti individuati sulla superficie del materiale, l'errore residuo e la densità di punti per la costruzione del modello digitale del terreno.

In Figura 7a è rappresentato un certo numero di sezioni trasversali ed una sezione longitudinale, utili per un confronto di dettaglio con i risultati di una eventuale simulazione numerica. In Figura 7b sono rappresentati i DEM elaborati dell'ammasso in movimento per un certo numero di istanti scelti arbitrariamente. Dalla evoluzione dei DEM ottenuti possono essere eseguite numerose osservazioni sul comportamento reologico dell'ammasso granulare. Le osservazioni possono essere metricamente quantificate.

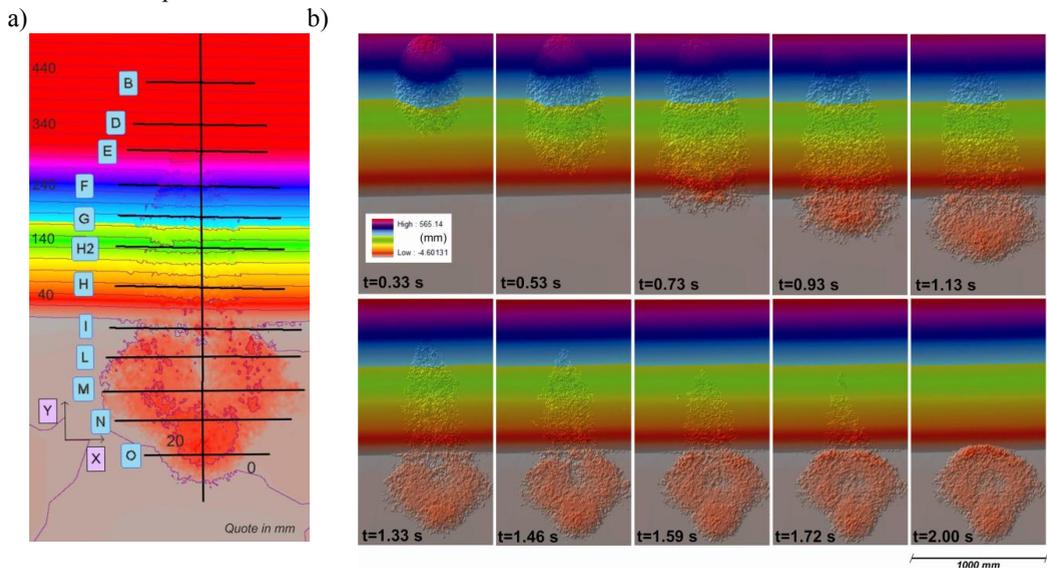


Figura 7. A sinistra è indicata la posizione del sistema di riferimento, adagiato sul piano di valle. Le sezioni trasversali sono distribuite lungo tutto l'apparato sperimentale. La frequenza di acquisizione è di 15 Hz. A destra sono rappresentati alcuni DEM ottenuti per alcuni istanti di tempo scelti arbitrariamente.

L'evoluzione della forma, nello spazio e nel tempo, evidenzia come il materiale granulare grossolano evolva da una forma a pera (Figura 7b), ad una configurazione trilobata del deposito finale. Questa è dovuta ad un precoce arresto dei lobi laterali rispetto al lobo centrale. L'arresto del lobo centrale avviene con un ritardo di circa 0.5 s. In Figura 8 sono rappresentate alcune sezioni longitudinali, elaborate per l'esperimento di Figura 7, in cinque istanti in prossimità dell'arresto dell'ammasso granulare sul piano di valle.

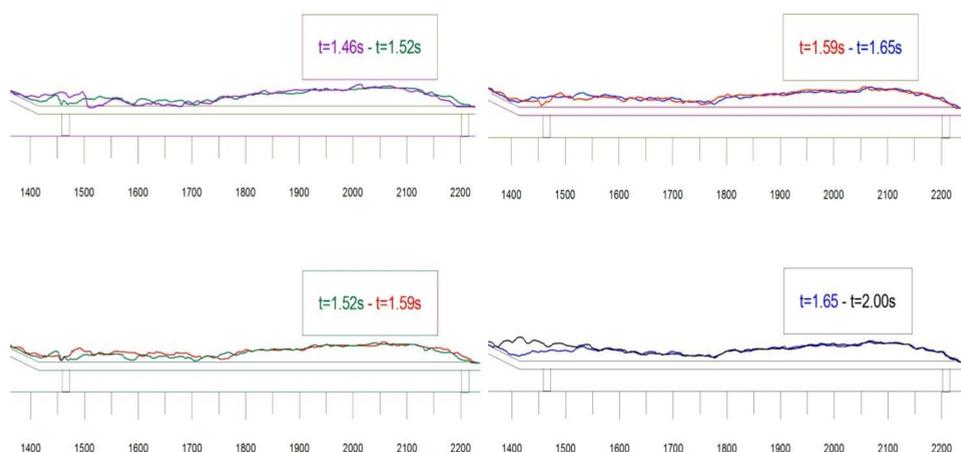


Figura 8. Alcune sezioni longitudinali, elaborate per l'esperimento di Figura 7, in cinque istanti in prossimità dell'arresto dell'ammasso granulare sul piano di valle.

Nella sequenza si può notare un avanzamento del corpo centrale che si protrae verso valle quando i corpi periferici sono già stabili. La sezione in basso mostra come tutto il deposito sia ormai stabile, mentre il materiale residuo in coda forma un piccolo accumulo secondario.

#### ***Elaborazione fotogrammetrica con utilizzo di deviatore di flusso su materiale zeolitico***

Il materiale viene rilasciato nel tratto incanalato sul piano di monte e scorre verso valle fino all'impatto con un deviatore laterale, collocato sul piano di valle (Figura 9).

Il deviatore della lunghezza di 50 cm ed un'altezza di 15 cm è posto allo sbocco del tratto di scorrimento incanalato, dove la pendenza diminuisce ed inizia la fase di rallentamento e deposizione del materiale. L'inclinazione sull'orizzontale del deviatore è di 45°. In Figura 9 sono mostrati, a sinistra, i DEM della zona di impatto, in alcuni istanti di tempo. A destra è rappresentato, in quattro posizioni lungo il deviatore, l'andamento trasversale nel tempo della superficie dell'ammasso granulare. È visibile e misurabile l'evoluzione temporale di una forma d'onda che si propaga lateralmente con caratteristiche diverse a seconda della sezione considerata.

#### **Conclusioni**

- L'apparato sperimentale progettato si è dimostrato adatto a fornire fotogrammi di qualità sufficiente per l'analisi fotogrammetrica;
- La precisione della ricostruzione aumenta all'aumentare dei tie points riconosciuti e dell'accuratezza nel posizionamento dei control points. Generalmente il software Photoscan tende a sovrastimare la quota topografica reale;
- Alcuni software fotogrammetrici presentano un alto grado di automatizzazione nel fornire un elevato numero di tie points, non permettendo l'inserimento manuale che talvolta si rende necessario;
- I tempi di elaborazione sono significativamente maggiori nel caso si renda necessario, per minimizzare gli errori sia nello spazio immagine che nello spazio oggetto, inserire in ogni immagine un elevato numero di control points.

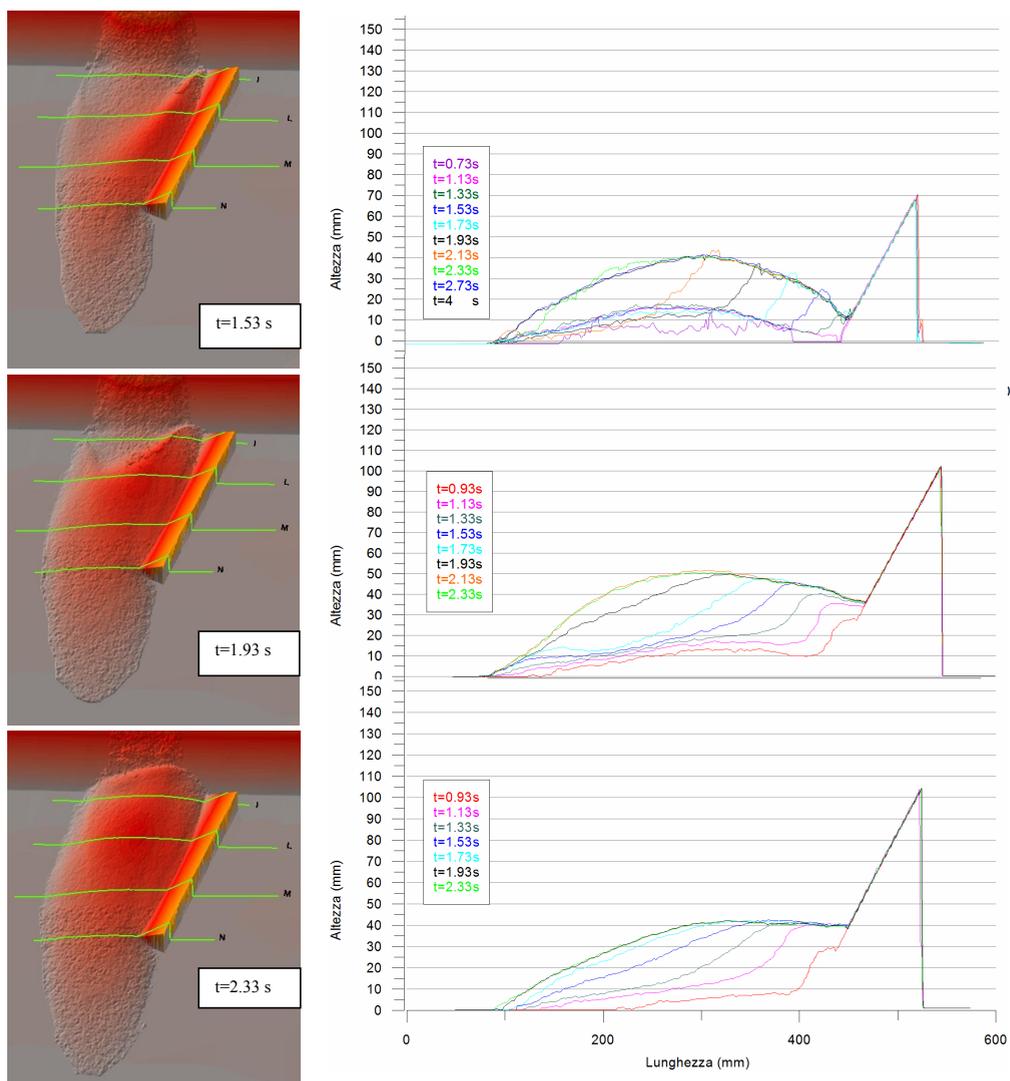


Figura 9. Dall'alto verso il basso sono visualizzate le sezioni i, l, ed m rispettivamente. Il fronte d'onda trasla nel tempo verso sinistra fino ad una configurazione d'equilibrio finale.

### Riferimenti bibliografici

- [1] P. Scotton, D. Dallavalle (2012). Rilievo dinamico tridimensionale di ammassi granulari in movimento con tecniche fotogrammetriche. Atti 16<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA, 6 – 9 novembre 2012, Vicenza.
- [2] S. De Toni, P. Scotton, E. Bertolazzi (2004). Modello matematico e numerico bidimensionale per lo studio delle valanghe di neve densa. Quaderni del Dipartimento IDR2, Università degli Studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale.
- [3] Agisoft Photoscan User Manual, Professional edition, version 0.9, 2013.